01180

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

## DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

# DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA PARA LA OBTENCION Y CARACTERIZACION DE ACEROS DE BAJO CARBONO RECUBIERTOS CON ZINALCO.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERIA MECANICA

P R E S E N T A:

M. en I. JOSE JAVIER CERVANTES CABELLO

DIRECTOR DE TESIS: DR. ARTURO BARBA PINGARRON

México, D.F. 2004

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**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.

## DEDICATORIA:

**A MIS QUERIDOS PADRES JESUS Y REMEDIOS QUIENES ME DIERON EL SER, EL CARIÑO Y LA FORMACION.**

**A MIS NOBLES HERMANOS POR SER COMO SON, UNOS MAGNIFICOS HERMANOS, GRACIAS A LOS CUALES TENEMOS UNA EXCELENTE Y UNIDA FAMILIA.**

**A XOCHITL, POR TODO EL AMOR, PACIENCIA Y COMPRENSION QUE ME HA BRINDADO EN LOS ULTIMOS AÑOS.**

**A MIS HIJOS SUSANA Y JAVIER PARA QUE ESTE TRABAJO SEA EL ALICIENTE QUE LOS IMPULSE A SUPERARSE.**

**A TI.**

**A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS DE LA FACULTAD DE INGENIERIA Y DE LA UNAM, POR SU INVALUABLE AMISTAD.**

**UN RECONOCIMIENTO MUY ESPECIAL AL DR. ARTURO BARBA PINGARRON POR TODO SU APOYO Y SOBRE TODO POR EL GRAN SENTIDO DE HUMANIDAD QUE LO CARACTERIZA.**

**A LOS MIEMBROS DEL COMITE DOCTORAL POR EL TIEMPO QUE LOS DISTRAJE DE SUS ACTIVIDADES.**

**CITAS:**

**LAS SIETE PERSONALIDADES**

Durante una noche, en el momento más silencioso de la misma, estando yo acostado y en duermevela, mis siete personalidades sentáronse en rueda para hablar en susurros, en los siguientes términos:

Primera personalidad: -Aquí en este demente, he vivido durante todos estos años, sin hacer otra cosa que repetir sus penas durante el día y reavivar su aflicción, durante la noche. No puedo sufrir más mi sino, y me sublevo.

Segunda personalidad: -Hermana, tu sino es mejor que el mío, pues me atañe ser la personalidad alegre de este demente. Río cuando se siente alegre y canto en sus horas de felicidad, y con pies alados bailo sus más joviales pensamientos. Yo soy quien se subleva contra tan extenuante ser.

Tercera personalidad: -¿Y qué pensaís de mí, la personalidad aguijoneada por el amor, la forma ardiente de salvaje pasión y caprichosos deseos? Es la personalidad enferma de amor la que debe sublevarse contra este demente.

Cuarta personalidad: -Yo soy la más infortunada de todas vosotras, pues solamente me tocó el odio y los deseos destructivos. Yo, la personalidad tormentosa, la que nació en las sombrías cavernas del Averno, soy la que tiene más opción a sublevarse por servir a este demente.

Quinta personalidad: -No; soy yo, la personalidad de la imaginación, la que sufre hambre y sed, la condenada a vagar sin reposo en busca de lo ignorado y de lo increado..., soy yo, y no vosotras, quien tiene más derecho a sublevarse.

Sexta personalidad: -Y yo, la personalidad que trabaja, la agobiada trabajadora que con resignadas manos y mirada codiciosa va esculpiendo los días en representaciones y va dando a las nociones sin forma, perfiles nuevos y eternos...Soy yo, la aislada, la que más razones tiene para sublevarse contra este inquieto demente.

Séptima personalidad: -¡Qué raro que toda vosotras os sublevéis contra este hombre por gozar cada una de vosotras una comisión ordenada de antemano! ¡Ah! ¡Cómo desearía ser una de vosotras, una personalidad con un propósito y un sino definido! Pero no; no cuento con un propósito definido: soy la personalidad que no hace nada; la que se asienta en el silencioso y vacío espacio que no es espacio y en la época que no es época, mientras vosotras os anheláis recreándose en la vida. Referidme, hermanas, ¿quién debe rebelarse: vosotras o yo?

Al acabar de hablar la Séptima personalidad, las otras seis la miraron con sentimiento, pero no adujeron nada más; y al paso de la noche y hacerse más profunda, una tras otra se fueron a descansar, llenas de una nueva y feliz resignación.

Solo la Séptima personalidad se mantuvo despierta, mirando y observando a la Nada, que está al final de todas las cosas.

Extracto: "LA NAUCEA" Frederich Nietzsche

"Felicidad no es hacer lo que uno quiere, sino querer lo que uno hace".

Jean Paul Sartre

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio que se realizo para determinar los parámetros óptimos que se requieren en la obtención de recubrimiento de Zinalco y aluminio sobre acero SAE 1018, mediante la técnica de inmersión del acero en la aleación líquida del Zinalco y Aluminio, (técnica de zinalquizado y aluminizado en caliente). Así mismo se presentan los resultados de las pruebas a las que fueron sometidos los recubrimientos para su evaluación, en lo relativo a: análisis de microestructura, Microdureza Vickers, espesor de recubrimiento, características del recubrimiento al aplicar tratamientos térmicos de recocido y laminación, así como la evaluación de la resistencia a la corrosión y determinación de la capacidad de deformación. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas durante este estudio.



## ABSTRACT

This work shows the study that was made to determinate the best parameters that are required at the obtaining of a Zinalco and aluminum coating on steel SAE 1018. This covering it's obtained by steel immersion in liquid Zinalco and aluminum. Likewise it's presented the results from the tests to those that were subjected to coatings. This evaluation was in the relative to: microstructure analysis, microhardnes HV, coat thicknes, the coating characteristics after been applied thermal treatments such as anneling and rolling, as well as the evaluation of to corrosion resistance and deformation capacity. Finally its shown the conclusions that was obtain during this study.

# ÍNDICE


**CAP. I INTRODUCCIÓN**

1.1 Objetivos ---------- 1
1.2 Introducción---------- 1
1.3 Definición del problema---------- 3
1.4 Justificación---------- 3
1.5 Contenido del trabajo---------- 4

**CAP. II ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

2.1 Aluminizado ---------- 5
2.2 Zinalquizado ---------- 7

**CAP. III RECUBRIMIENTOS METALICOS**

3.1 Recubrimiento metálico ---------- 12
3.2 Aluminizado ---------- 23

**CAP. IV DESARROLLO EXPERIMENTAL**

4.1 Material empleado ---------- 30
4.2 Reactivos Utilizados ---------- 31
4.3 Equipo Empleado ---------- 31
4.4 Procedimiento en la obtención de los recubrimiento ---------- 34

**CAP. V REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS**

5.1 Preparación de muestras para observación en el microscopio electrónico de barrido y obtención de micrografías ---------- 39
5.2 Ensayo de microdureza Vickers ---------- 41
5.3 Evaluación del espesor de recubrimiento ---------- 41
5.4 Evaluación de la resistencia a la corrosión (Técnicas electroquímicas) ---------- 41
5.5 Evaluación de la resistencia a la corrosión (Cámara de niebla salina) ---------- 47
5.6 Evaluación de conformabilidad ---------- 48

CAP. VI ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Obtención del material recubierto ---------- 51
6.2 Análisis de los resultados de microscopía electrónica---------- 55
6.3 Análisis de las pruebas de corrosión- ---------- 69
6.4 Análisis de las pruebas de deformación ---------- 80
6.5 Análisis de costo de los recubrimientos ---------- 85
6.6 Comparativo final de resultados ---------- 88

CAP. VII CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones generales relativas a la obtención de los recubrimientos ---------- 89
7.2 Conclusiones resistencia a la corrosión ---------- 91
7.3 Conclusiones relativas a al capacidad de deformación ---------- 92
7.4 Conclusiones relativas al costo de los recubrimientos ---------- 93
7.5 Aportaciones y originalidad del trabajo---------- 94
7.6 Aplicaciones potenciales---------- 95
7.7 Recomendaciones a futuros trabajos relativos al tema---------- 95

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA---------- 96

ANEXO:TABLAS, GRÁFICAS Y FOTOGRAFÍAS

Capítulo II ---------- 105
Capítulo III ---------- 106
Capítulo IV ---------- 111
Capítulo V ---------- 120
Capítulo VI, colocadas en el capítulo por ser de análisis ---------- 51

# CAPÍTULO I

# INTRODUCCIÓN

## 1.1. Objetivos

El presente trabajo de investigación esta dirigido a dos objetivos fundamentales:

1. Determinar los procedimientos y parámetros de operación que permitan mediante la inmersión en la aleación metálica fundida, obtener recubrimientos de zinalco (y de aluminio) de calidad adecuada sobre acero AISI 1018.

2. Efectuar la caracterización amplia de los recubrimientos conseguidos, especialmente en términos de su composición química, fases presentes, espesor de la capa, dureza, resistencia a la corrosión y la capacidad de deformación del acero posterior a los recubrimientos a fin de vislumbrar sus posibilidades de aplicación industrial.

## 1.2. Introducción

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

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

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

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

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

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

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

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

México acostumbra vender su materia prima y comprarla procesada, en lugar de aprovechar sus recursos naturales y producir a partir de éstos sus propios productos terminados. En nuestro país hay grandes yacimientos de bismuto, arsénico, selenio, cadmio, zinc, y muchos más, entre los más importantes.

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

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

Así mismo, se tiene que la aleación zinalco presenta buena resistencia a la corrosión, ya que tiende a pasivarse con facilidad resistiendo perfectamente las condiciones ambientales más adversas, a pesar de presentar menores propiedades mecánicas que el acero (baja tenacidad y dureza), y se reporta como un material que tiene buen nivel de resistencia a agentes oxidantes gracias a sus propiedades anticorrosivas. De ahí que la intención de este trabajo de investigación sea realizar un recubrimiento de zinalco sobre acero AISI 1018 con la finalidad de generar una

capa que proporcione al acero, resistencia a la corrosión (sobre todo en medios salinos) y permita que el acero pueda ser conformado después de la aplicación de dicho recubrimiento. [58]

### 1.3. Definición del problema

La aleación zinalco, que es una combinación de zinc, aluminio y cobre, surgió como producto de estudios básicos realizados sobre las propiedades del zinalco y del cobre. Se le llamó zinalco porque esta constituida de 77% de Zn, 21% de Al y 2% de Cu.
De acuerdo con las investigaciones realizadas sobre el desarrollo y propiedades del zinalco en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM de la UNAM ), la resistencia a la corrosión es una de sus propiedades más atractivas ya que es superior a las que presentan los productos galvanizados, además de aceptar recubrimientos protectores por anodizado o inmersión en baños de cromatos mediante una limpieza y preparación previa. Así mismo el zinalco, con cualquiera de sus microestructuras tiende a formar una capa de óxido protector al someterlo al vapor de agua y de igual forma cuando es deformado presenta una mayor ganancia en peso, posiblemente debido a que, la deformación produce levantamiento de los granos (relieve superficial), esto implica un aumento de la superficie efectiva reflejándose en una mayor cantidad de óxido protector formado [26].
Con base a los antecedentes que se tienen del zinalco, se propone como tema de investigación doctoral, desarrollar un procedimiento o metodología que permita depositar o recubrir acero AISI 1018 con zinalco a fin de generar un material bimetálico, con las propiedades mecánicas del acero y una buena resistencia a la corrosión en la superficie, como la ofrecida por el zinalco. Es importante destacar que este tipo de recubrimiento no se ha generado con anterioridad, por lo cual esta investigación tendrá que resolver la problemática de la unión entre los materiales, determinando el procedimiento y los parámetros más adecuados para lograr dicha unión.
Una vez lograda la unión se deberá realizar la caracterización detallada del recubrimiento a fin de determinar sus propiedades, así como sus potenciales aplicaciones.

### 1.4. Justificación

De acuerdo con las razones anteriormente expuestas se pretende generar un recubrimiento de zinalco (y de aluminio) sobre acero AISI 1018, que presente suficiente adherencia, que permita ser deformado en conjunto con el material base y que lo provea de la suficiente resistencia a la corrosión, logrando así, que el acero recubierto pueda ser empleado en áreas en las que se requieran materiales con la resistencia mecánica del acero pero con un buen nivel de resistencia a la corrosión, como la ofrecida por los recubrimientos, ampliando así el ámbito de aplicación de este conjunto de nuevos materiales.
El recubrimiento que se logre permitirá que el acero y el zinalco tengan mayor aceptación en el ámbito industrial, doméstico y comercial, con lo cual se logrará un beneficio importante en la utilización del zinc, un recurso natural que existe en México y del cual se cuenta con grandes excedentes, ya que de las 270,000 toneladas que se producen anualmente solo se utilizan 70,000 y el resto se venden a la mitad del precio con respecto del aluminio.

El recubrimiento de zinalco puede ser logrado por distintos procesos, sin embargo el método que se propone en esta investigación es el de inmersión en caliente, en el cual un material (metal base), se sumerge en el baño fundido de un segundo metal (metal de recubrimiento). Tras la extracción de la pieza, el metal fundido recubre al primero. Los recubrimientos obtenidos por inmersión del metal en el metal protector en estado líquido alcanzan espesores relativamente grandes, que van desde 50 hasta 500 micras, con excelente adherencia. La capa de recubrimiento

que se genera esta compuesta por dos zonas, la zona externa del recubrimiento constituida fundamentalmente por el metal de recubrimiento y la zona intermetálica que se origina por difusión del metal fundido dentro del metal a proteger y esta formada por un compuesto de composición no estequiométrica metal protector-metal protegido.
Los metales a recubrir por esta técnica con más frecuencia son los aceros. El zinc, el aluminio, el estaño y el plomo son los metales de recubrimiento más empleados. De ahí que en esta investigación se deberá realizar un estudio previo y detallado del proceso de inmersión en caliente para establecer las condiciones necesarias para lograr el recubrimiento de zinalco mediante está técnica.

### 1.5. Contenido del trabajo

El presente trabajo esta constituido por siete capítulos estructurados de la siguiente forma: El capítulo I, contiene los objetivos planteados en la realización de este trabajo de investigación, así como una breve introducción, el planteamiento del problema que se aborda y su justificación. En el capítulo II, se plantean los antecedentes y los procedimientos de investigación que se han realizado a lo largo de la historia con relación al proceso de inmersión en caliente, aplicado en la generación de recubrimientos de aluminio (aluminizado), así como los procedimientos y aplicación del mismo en el ámbito industrial. De igual forma en este capítulo, se presenta la información básica necesaria para el conocimiento de la aleación zinalco, así como algunas de sus propiedades y aplicaciones.
En el capítulo III, se presenta la información relativa a los principales métodos empleados para generar y aplicar recubrimientos metálicos, siendo presentado con mayor detalle el proceso de inmersión en caliente aplicado al aluminizado, ya que éste ha sido tomado como base para realizar los recubrimientos de zinalco. El capítulo IV, contiene la información relativa al desarrollo experimental que se ha seguido para generar los recubrimientos de zinalco y de aluminio. En el capítulo V, se presentan las pruebas realizadas a los recubrimientos obtenidos, así como los resultados de dichas pruebas. El capítulo VI, contiene el análisis de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo y finalmente, en el capítulo VII se presentan las conclusiones de la investigación. Al final del trabajo se ha colocado la bibliografía y un anexo con las gráficas, figuras y fotografías a las que se hace referencia en el contenido de los capítulos.

# CAPÍTULO II

# ANTECEDENTES HISTÓRICOS

## 2.1 Aluminizado

Se desconoce la fecha exacta en la que se realizaron por primera vez recubrimientos con aluminio por inmersión en caliente, aunque se tienen noticias de la existencia de una patente concerniente al recubrimiento de acero con aluminio, concedida en 1893[59], pocos años después de que se pudiera disponer del aluminio comercialmente. Sin embargo, en el siglo antepasado se encontraron dificultades debidas a la alta reactividad química del aluminio, las cuales se fueron superando en el siglo XX.

### 2.1.1 Procedimientos de Investigación Realizados

A principios de 1930 E.J. Groom [59], realizó una revisión de los intentos que se habían realizado hasta entonces, para conseguir una capa homogénea de recubrimiento con aluminio por inmersión en caliente. El principal inconveniente que se encontraba era la formación por difusión de una gran capa interna de compuesto intermetálico $Fe_2Al_5$ que, debido a su fragilidad, impedía el posterior trabajo de los materiales aluminizados.

En 1932 Dellgren [6] en Francia y Nillson [7] en Alemania experimentaron con adiciones de zinc al baño de aluminio, para mejorar las propiedades de doblado de la capa intermetálica.

En 1938 Colin F. Fink [8] llevó a cabo el aluminizado de alambre de acero, a nivel experimental, siendo el método utilizado similar a los empleados en el recubrimiento de chapa y fleje.

En 1945 K. Oganowski, N. W. Parks y K. G. Coburn, de la American Rolling Mill Company [9], ensayaron diversos aleantes para reducir el espesor de la capa intermetálica de recubrimiento, pero no fue hasta 1950 en que D.O. Gittings, D.H. Rowland y J.Q. Mack del Research Laboratory de la Carnegie-Illinois Steel Corporation de Pittsburg [10], efectuaron una investigación sistemática con antimonio, berilio, bismuto, cadmio, calcio, cromo, cobre, germanio, plomo, magnesio, manganeso, níquel, silicio, plata, estaño, titanio y zinc, individualmente y con combinaciones de ellos.

En 1951 W. Hodge y E.M. Smith [11] encontraron que añadiendo pequeñas cantidades de cerio y tierras raras (Misch—Metal) se obtenía un recubrimiento brillante, puesto que evitaban la formación de puntos rugosos sobre su superficie.

En 1952 B.W. Gonser [12] comprobó que añadiendo un 0.005% de berilio al baño de aluminizado se obtenían recubrimientos con un brillo excelente.

Se han realizado numerosos estudios encaminados a conseguir que un sólo baño de aluminio, con los aleantes adecuados, reuniese todas las propiedades necesarias para conseguir un recubrimiento con buenas propiedades mecánicas y excelente apariencia exterior, así la Kaiser Aluminium and Chemical Corporation [60], produce actualmente aleaciones comerciales

patentadas para el recubrimiento con aluminio de metales por el método de inmersión en caliente en continuo.

En los años de 1970 Adam Gierek y Lech Bajka del Instituto de Ingeniería de los Materiales de la Universidad Técnica de Silesia en Katowice (Polonia), desarrollaron una gran actividad investigadora sobre el aluminizado, llegando a sacar cerca de 100 patentes sobre el mismo.

A finales de los años 70 Gerhard Langerscheid y Gunter Klein de Fachbereich Werstofftechnik de Dortmund investigaron la influencia del contenido de nitrógeno del material base sobre la capa interna de aleación.

En los años 80. C. Won y J. Y. Lee del Instituta Of. Ícense de Seul (Corea), investigaron la estructura de las distintas capas intermetálicas y su crecimiento preferencial en los distintos planos cristalográficos.

En España, Manuel Serra, en la década de los años 50, investigó el aluminizado en continuo, construyendo en 1955 una instalación semi-industrial para el aluminizado de alambre en continuo, en el Departamento de Metales no férrosos del Patronato Juan de la Cierva de Investigaciones Técnicas.

### 2.1.2. Procedimientos Industriales

En 1939 la American Rolling Mill Company (Armco) pone en servicio en Middletown, Ohio, la primera cadena en continuo para el aluminizado en caliente de chapa y fleje de acero, utilizando un método patentado por Sendzimir. El proceso Armco se basa en la oxidación previa del fleje, por calentamiento en un horno, con lo cual se elimina la materia orgánica y se forma en la superficie una delgada película de óxido. A continuación se lleva a un horno reductor con atmósfera de hidrógeno, donde se eliminan los productos de la oxidación y queda una superficie completamente limpia [13].

En 1942 Alferieff patentó un procedimiento para el aluminizado continuo de fleje de acero. El procedimiento es similar al Sendzimir, pero difiere en que el vapor de agua se introduce en la zona de alta temperatura con el fin de efectuar la descarburación de la superficie del acero [14].

En 1943 la American Mollerizing Company, patentó el proceso Mollerizing [15], que se basa en la utilización de un fundente más denso que el aluminio (cloruro de bario, cloruro de sodio y criolita), pudiéndose utilizar en continuo y discontinuo. En el fondo del crisol se colocan las sales fundidas y sobre ellas flota el aluminio debido a su menor densidad.

En 1951 la General Motors Corporation patentó [16] el proceso Aldip para el recubrimiento discontinuo de piezas en general, si bien en la actualidad se utiliza para el recubrimiento en continuo de chapa y alambre. En el proceso Aldip, las piezas una vez desengrasadas y decapadas se llevan al baño de aluminio, en la superficie del cual se encuentran fundidas las sales.
En 1954 la Kaiser Aluminium and Chemical Corporation patentó [17] el proceso Battelle-Kace para el recubrimiento de alambre de acero, en donde el alambre, después de su limpieza superficial, se pasa por un horno de calentamiento ( 700 °C) en donde circula, en contracorriente con el alambre, una mezcla de 10% de hidrógeno y 90% de nitrógeno.

En 1955 la Page Steel and Wire Division de la American Chain and Cable Company, desarrolló y patentó [18] el proceso Acco para el recubrimiento de alambre. En dicho proceso, el alambre, previamente limpio, se fluxa en una disolución acuosa de fluoro-circonato de potasio, cloruro potásico y fluoruro de aluminio.

En Europa, la primera línea industrial de aluminizado en continuo fue puesta en servicio en 1962 por la Coated Metals Ltd., en su planta de Glamorgan (Gran Bretaña) quien adoptó y desarrolló los trabajos de Martín L. Hughes [4]. Actualmente hay una línea similar instalada en la empresa Sherai Steel Corporation en Farrell, Pennsylvania.

En 1983 la Nisshin Steel Co. y la Hitachi Ltd. desarrollaron un nuevo método de aluminizado por inmersión en caliente que evitaba el arqueo del fleje y además patentaron un proceso para aluminizar el fleje por una sola cara [19].

En la actualidad son las empresas Americanas Armco y Bethlehem y las Japonesas Mitsubishi Heavy Industries Ltd y la Nisshin Steel Company las mayores productoras de chapa aluminizada en el mundo[61].

## 2.2 Zinalquizado

Con relación a la generación de recubrimientos con ZINALCO, no existe ningún antecedente, ya que esto no se ha realizado con anterioridad. Sin embargo en este trabajo, se pretende como innovación realizar el recubrimiento de acero con Zinalco, ya que éste cuenta con un gran porcentaje de Zinc, del cual México es gran productor y se reporta esta aleación como un material con buena resistencia a la corrosión [20]. A continuación se presenta la información relativa a la aleación Zinalco.

### 2.2.1 Características generales del zinalco

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

La aleación Zinalco, que es una combinación de zinc, aluminio y cobre, surgió como producto de estudios básicos realizados sobre las propiedades del zinc y del cobre. Se le llamó Zinalco porque es una palabra compuesta por las primeras letras de los metales componentes: Zinc, Aluminio y cobre.

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

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

Esto permite que el zinalco resulte altamente competitivo, en comparación con aleaciones de cobre, aceros inoxidables y latones, según se explica en un informe del grupo Falmex-Galvotec, única empresa que decidió arriesgar su capital en un proyecto conjunto con la UNAM, encaminado a ensayar las aplicaciones del zinalco en la industria [21].

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

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

Los científicos encontraron que, combinado con el aluminio, la densidad del zinc bajaba hasta hacerlo 35% más ligero que el hierro y el acero. Adicionalmente, las pruebas mostraron que el material desarrolla un óxido protector que impide su posterior oxidación. Este comportamiento, similar al que presentan las aleaciones de aluminio, asegura su utilización en diseños arquitectónicos expuestos a la intemperie, como ventanas y perfiles [22].

Por otro lado, la presencia del cobre en la aleación también tuvo sus efectos: las propiedades mecánicas de la aleación se ven sensiblemente mejoradas con la aleación de dicho elemento, ya que tanto su dureza como su esfuerzo de cedencia en compresión se ven mejorados [23].

### 2.2.2 Propiedades físicas del Zinalco

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

El bajo punto de fusión de esta aleación, en comparación con el aluminio, latón, bronce o hierro de fundición, nos permite ahorros considerables de energía. La figura 2.2 nos da una idea del consumo de energía requerida para fundir el zinalco, el hierro, el bronce y el aluminio. Podemos notar que el zinalco requiere de 150 W/kg mientras que el mismo volumen de aluminio requiere cerca de 400W/kg. [24].

La densidad de la aleación la coloca en una posición intermedia entre el acero y el aluminio, comparativamente es 18% más ligera que el zamak (que es la aleación más conocida del zinc para fundición), 30% más ligera que el hierro de fundición y 40% más ligera que el latón y pesa el doble que el aluminio.

### 2.2.3 Resistencia a la corrosión del zinalco

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

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

Entre las propiedades más relevantes del zinalco es que con cualquiera de sus microestructuras tiende a formar una capa de óxido protector al someterlo al vapor de agua. El material deformado presenta una mayor ganancia en peso, posiblemente debido a que, la deformación produce levantamiento de los granos (relieve superficial); esto implica un aumento de la superficie efectiva reflejándose en una mayor cantidad de óxido protector formado.[25]

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

La figura 2.3 nos muestra el efecto de tres diferentes medios corrosivos sobre aluminio 380 y zinalco. Los efectos son medidos a través de los cambios de peso que sufre una muestra con un decímetro cuadrado de área. En todos los casos, el aluminio 380 sufrió un ataque mayor al presentado por el zinalco. En el caso de presentarse $SO_2$ en el ambiente, el zinalco presenta una clara pasivación, mientras que el aluminio 380 sufre un severo ataque. Este resultado es particularmente importante cuando el material se enfrenta a medios tan severos como en las ciudades.

Experimentos detallados realizados en la Facultad de Química de la UNAM han demostrado que el zinalco resiste mejor la corrosión que el aluminio en la Ciudad de México.[26]

Las pruebas realizadas en cámara salina muestran que después de 10 horas de prueba el material pierde su brillantez y se torna grisáceo, a las 200 horas aparecen depósitos blancos localizados en ciertas zonas de la superficie. El cambio de color se debe a la formación de una película de óxidos protectores que protegen al material de una corrosión progresiva. Al formarse esta capa se tiene la ganancia de peso en el material. Los depósitos blancos se originan en impurezas especialmente compuestas de combinaciones hierro-aluminio.

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

### 2.2.4 Procesos de transformación usados para el zinalco.

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

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

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

*Laminación.*- La principal cualidad que presenta la lámina de zinalco es su resistencia a la corrosión, así como la posibilidad de deformarse utilizando la propiedad de ser superplástico.[27]

### 2.2.5 Campos de aplicación del zinalco

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

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

Algunos ejemplos de piezas producidas con zinalco son:

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

Mediante el proceso de inyección, Falmex fabricará 2000 válvulas de gas diarias para la empresa que controla el 40% del mercado de tanques. El precio es entre 20 y 30% debajo de costos internacionales.[28]

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

La maquinabilidad del zinalco es excelente, esta propiedad le permite encontrar una gran variedad de aplicaciones, como la correspondiente a diseños para porta muestras de microscopio electrónico, en el cual juega también un papel importante su baja resistencia eléctrica.
Los tornillos fabricados con esta aleación tendrán la propiedad de alta resistencia a la corrosión y no formar par galvánico ni con el aluminio ni con el acero, pudiéndose utilizar tanto en torres eléctricas como en el ensamble de ventanas.

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

En forma general mencionaremos algunas ventajas de esta nueva aleación:

- Requiere de baja energía para ser procesado, de hecho la extrusión, la forja y la fundición consumen menos energía que con cualquier otro metal.
- Alto grado de limpieza en su proceso al grado de no requerir equipo anticontaminante
- Insuperable fluidez, mejor aún que el aluminio y el cobre
- Alta resistencia mecánica, comparable a la de un acero de bajo carbono
- Menor costo que el bronce. Su alta resistencia mecánica permite diseñar piezas más delgadas que pueden abatir el precio del aluminio
- Buena resistencia a la corrosión, comparable a la del aluminio
- Las áreas de aplicación de este material empiezan a crecer rápidamente reemplazando al hierro, bronce, aluminio y plástico.[21]

# CAPÍTULO III

# RECUBRIMIENTOS METALICOS

## 3.1 Recubrimiento metálico

Un recubrimiento metálico es una capa de metal relativamente delgada, que recubre a otro material de sección relativamente elevada, como se muestra en la figura 3.1. Los recubrimientos metálicos se aplican para lograr alguna propiedad superficial deseada que no tiene el metal base. En general las propiedades del conjunto vendrán determinadas por las del material predominante y el recubrimiento sólo tendrá marcada influencia sobre las propiedades de superficie como son:

1. Proporcionar protección contra la corrosión al metal base
2. Aumentar la resistencia al desgaste y reducir la fricción de la superficie
3. Mejorar el aspecto del producto proporcionando ya sea en 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
8. Aumentar la capacidad de unión por procesos de soldadura
9. Incrementar la resistencia al calor

Los recubrimientos con metales no ferrosos tienen especial aplicación en la protección de otros metales, especialmente acero, en algunos medios corrosivos. La combinación de un metal base resistente mecánicamente y un recubrimiento resistente a la corrosión forma un sistema de gran importancia en la industria.

Existen diversos procedimientos para recubrir el acero, siendo los más importantes los siguientes:

### 3.1.1 Proyección térmica:

Los recubrimientos por proyección consisten en calentar un metal o cerámico por encima de su punto de fusión y proyectarlo, con presión gaseosa, sobre un sustrato, a donde llega en estado finamente dividido [29].

Generalmente la fusión y la proyección del metal o cerámico se realizan en un mismo aparato llamado pistola. El metal se suministra a la pistola en forma de alambre, varilla, polvo, etc.

Los recubrimientos de aluminio por proyección son de un color gris mate, y consisten en glóbulos de aluminio compactados y aplanados. Estos recubrimientos contienen una pequeña proporción de óxidos, no se forman intermetálicos y son poco porosos. Con este procedimiento se puede aplicar el recubrimiento por una sola cara y no hay limitaciones en las dimensiones de los artículos a tratar, auque si con la aplicación del recubrimiento en el interior de las piezas, sobre todo cuando dicho interior es reducido.

### 3.1.2 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 iónes 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 los siguientes y se muestran en la figura 3.2:

a) 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.
b) El cátodo a recubrir debe ser un conductor eléctrico
c) El ánodo, también conductor eléctrico que puede ser soluble (ánodo de sacrificio) ó insoluble (ánodo inerte)
d) Una cuba inerte que contiene los componentes antes descritos
e) Una fuente de corriente continua

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 del 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.

*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.

### 3.1.2.1 Recubrimientos de deposición mediante reacciones químicas.

La deposición sin electricidad es el nombre que se da al proceso de recubrimiento que se produce 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 iónes 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, Ni-P y Ni-B). Mediante este proceso se ha logrado depositar también materiales como cobalto, cromo, cobre, paladio, níquel, etc. Algunas de las características más importantes del depósito son que posee elevada dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

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

- Una sal que suministre el níquel, un sulfato o cloruro comúnmente.
- Un agente reductor
- Agua destilada
- Agentes, para controlar la cantidad de níquel libre disponible para la reacción.
- Un regulador de pH
- Estabilizadores
- Aceleradores
- Una temperatura adecuada
- 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 iónes.

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

1. 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.

2. Cantidad del agente reductor. La velocidad de deposición es una función directa de dicha concentración. De este modo un alto contenido de este ión seria deseable, de no ser porque la estabilidad del baño disminuye como función directa de la concentración de iónes.

3. pH. En términos generales la velocidad de deposición aumenta con el pH de la solución. La zona de pH preferida para una solución de niquelado químico ácido, esta entre 4.3 y 4.8.

4. 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 también en elementos hidráulicos, tanques y tuberías (industria aeronáutica).

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

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

### 3.1.3 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 haciendo reaccionar 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 concurso 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 el que se aprovecha para facilitar el anclaje superficial de lubricantes, colorantes y de otros sistemas de protección (pinturas).

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

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

1. Oxidación del metal aluminio y formación sobre su superficie de una película dura de óxido.
2. Disolución del metal aluminio en el electrolito.
3. 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 anodización del aluminio comprende las siguientes tres etapas:

*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 3.3 (utilizando corriente continua y la pieza a anodizar colocada al electrodo positivo [ánodo]) son:

- Descomposición del agua. En el cátodo se genera hidrógeno y en el ánodo oxígeno.
- Disolución parcial del aluminio del ánodo. El líquido de la cuba electrolítica se va enriqueciendo en iónes de aluminio.

- 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.

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 (figuras. 3.4 y 3.5). 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, intercaras redondeadas.

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 coloreados 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 buena resistencia a la corrosión en una amplia variedad de medios

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

- La naturaleza del metal.
- Concentración del electrolito.
- Temperatura del baño
- Agitación
- Densidad de corriente
- Tiempo de duración del tratamiento

*b) 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 más protector, ya que se ha originado un aumento de volumen (Fig.3.6). Esto se consigue calentando el anodizado en agua hirviendo.

El mecanismo que se realiza para la colmatación es:

- Absorción de moléculas de agua en la superficie más externa de los poros.
- Formación de cristales de agua en la superficie externa del anodizado
- Micro cristalización en el fondo de los poros.

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

- Pureza del agua
- Temperatura del agua
- Tiempo de tratamiento

*c) Coloración*

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

- Inmersión en disolución que contiene el colorante.
- Deposición catódica a partir de iónes metálicos.
- Anodización autocolorante.

La coloración por inmersión se realiza introduciendo la pieza anodizada en disoluciones de:
Sales minerales que precipitan dentro del poro son compuestos inorgánicos insolubles, como: óxidos e hidróxidos coloreados, como los que se presentan en la tabla 3.7
Colorantes orgánicos que quedan absorbidos, principalmente dentro de los poros.

### 3.1.4 Recubrimientos por deposición física a partir de la fase vapor

La deposición física de vapor, DFV (en inglés 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. 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:

- Síntesis del vapor de recubrimiento
- Transporte del vapor al sustrato
- 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

En la tabla 3.8 se presentan algunas características generales de cada proceso antes mencionado.

#### 3.1.4.1 Aplicaciones generales

Este tipo de recubrimientos incluye 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 $\mu m$ ) aplicadas con laca transparente para proporcionar un aspecto de plata o cromo satinado. Otro uso importante es en recubrimientos antirreflejantes de fluoruro de magnesio ($MgF_2$) 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.

### 3.1.4.2 Evaporación al vacío

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 3.9.

La evaporación se lleva a cabo en sistemas de vacío (el vacío es conveniente que sea del orden de 9.9866 Pascales 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[30].
Se utilizan varios métodos para calentar y vaporizar el material. Entre los más importantes están:

*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 el material fuente. Se aplica una corriente para calentar el envase (crisol) y este transmite calor al material en contacto. 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.

*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. 3.10) 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.

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. 3.11).

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 μm/ 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.

### 3.1.4.3 Bombardeo con partículas atómicas (sputtering)

El sputtering o pulverización catódica es una 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 iónes acelerados por una diferencia de potencial, es decir el bombardeo de material de recubrimiento catódico con iónes 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 3.12

### 3.1.5 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 a partir de la fase 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 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 ($SiO_2$), él nitruro de silicio ($Si_3N_4$), el carburo de titanio (TiC) y él 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 amoniaco ($NH_3$).

*Equipo*

El proceso de deposición química a partir del 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 3.13 se presenta un diseño posible de reactor para el proceso de CVD.

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 sí 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, 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.

### 3.1.6 Chapado

Mediante la técnica del chapado se consiguen espesores de recubrimiento muy superiores a los obtenidos con los otros recubrimientos (entre 100 y 1500 $\mu$ m). Los primeros chapados se realizaban por laminación en caliente del sustrato y del recubrimiento. Más adelante se introdujo

la técnica de la electro-soldadura y actualmente se unen las chapas por fusión y por soldadura por explosión. La interdifusión entre el metal base y la lámina de recubrimiento proporciona la suficiente adherencia. Estos recubrimientos están exentos de porosidad y tienen una buena ductilidad y resistencia al calor [31].

### 3.1.7 Cementación

La cementación es un proceso de metalización que consiste en un tratamiento termoquímico de difusión, mediante el cual se consigue la formación de una aleación superficial resistente al calor y a la corrosión. Los más comunes son la nitruración, la carburización y la carbonitruración.
Uno de los procesos que se utilizan para obtener recubrimientos por cementación se llama calorización. La calorización es la saturación de la capa superficial de la pieza con aluminio, a fin de aumentar su resistencia al calor. La calorización se lleva a cabo introduciendo las piezas en cajas cerradas dentro de las cuales se introduce una mezcla de polvo de aluminio, cloruro amónico y alúmina en una atmósfera reductora o inerte. Luego las cajas se introducen en un horno a 950 -1000 °C durante 4-15 horas.

El espesor del recubrimiento es función del tiempo y de la temperatura de tratamiento y suele estar entre 25-150 $\mu$ m. Estos recubrimientos se utilizan casi exclusivamente para la protección contra la oxidación a altas temperaturas (por encima de los 900 °C).

### 3.1.8 Inmersión en caliente

La inmersión en caliente es uno de los métodos más antiguos para lograr recubrir un metal con otro y todavía hoy se utiliza ampliamente, puesto que es de los procesos de recubrimiento que consigue mayor adherencia y su aplicación resulta más barata. El recubrimiento se forma en la superficie del metal base cuando éste se sumerge en un baño de metal protector fundido [33].

Por inmersión en caliente se consiguen espesores de recubrimiento relativamente gruesos, entre 0.01 y 0.1 mm., aunque en algunos casos, como en el aluminizado, se llegan a espesores de más de 0.2 mm. Los metales usados para este tipo de recubrimiento han de tener bajos puntos de fusión, para evitar cambios térmicos en el metal base. Los más indicados son: zinc, estaño, plomo y aluminio.

El recubrimiento obtenido por inmersión en caliente consiste en una capa interna de aleación y otra capa externa de metal puro. La formación de la capa aleada da lugar a que la adherencia recubrimiento-sustrato sea en general muy elevada. La capa de aleación se forma por difusión del metal fundido dentro del metal base y consiste en un intermetálico metal protector metal base [34]. La capa exterior de metal puro se forma a partir del metal líquido que se adhiere a la superficie de la pieza cuando ésta se extrae del baño. En general el espesor del recubrimiento se puede variar mediante el control del tiempo de inmersión, de la temperatura del baño, de las velocidades de inmersión y de extracción, de la velocidad de enfriamiento y de la composición química del baño. Las propiedades a considerar en la calidad de un recubrimiento son: espesor medio, uniformidad del espesor de la capa, adherencia y ductilidad. Solamente podrán obtenerse recubrimientos satisfactorios con una correcta preparación de la superficie a recubrir, adecuado tiempo y temperatura del tratamiento y gran pureza del metal protector [35].

### 3.2 Aluminizado

El aluminizado en caliente es un procedimiento de protección contra la corrosión mediante el cual se obtienen recubrimientos de aluminio sobre aleaciones base hierro, por inmersión en un baño de aluminio fundido, a una temperatura comprendida entre 700 y 900 °C, durante un tiempo no superior a algunos minutos [36].

El aluminizado es un proceso de recubrimiento por difusión, en el cual, para alcanzar una satisfactoria unión metálica, se han de dar varias condiciones [37]:

- El metal sustrato y del metal protector deben presentar solubilidad a temperatura ambiente (en estado sólido) y a altas temperaturas (en estado líquido).
- Los diámetros atómicos del metal de recubrimiento y del metal sustrato no deben diferir en más de un 16%.
- Se debe mantener un contacto íntimo entre el recubrimiento metálico y el sustrato.

En el aluminizado se cumple el primer principio puesto que el aluminio es soluble en el hierro a alta y baja temperatura. También se cumple el segundo, puesto que el factor diferencial entre los diámetros atómicos del hierro y del aluminio es del 11.7% [38]. Luego si se cumple el tercer principio será posible una buena unión en el aluminizado, por lo cual la superficie de las piezas a recubrir ha de estar químicamente limpia para que no haya ningún impedimento al realizarse la difusión [39]. El aluminizado puede llevarse a cabo de dos formas: en continuo y en discontinuo.

El aluminizado en continuo consiste en el recubrimiento de alambres, flejes, bandas de acero, tuberías, etc., durante su paso a través del metal fundido, con una capa delgada y relativamente plástica de aleaciones de aluminio, principalmente de aleaciones Al-Si [6].

El procedimiento de aluminizado en continuo más empleado, se basa en el método Sendzimir [40], en donde el material a recubrir se pasa primero a través de un horno oxidante donde la chapa se calienta hasta 450-500 °C para quemar las grasas y lubricantes combustibles y oxidarla ligeramente.

Luego, la chapa se hace circular a través de un segundo horno que contiene una atmósfera reductora, donde la chapa se calienta por encima de la temperatura crítica de transformación (800-850 °C) para el normalizado o templado, con lo cual se reducen los óxidos de hierro. A continuación, y aún bajo la atmósfera protectora, la chapa se enfría hasta unos 700 °C antes de entrar en el baño de recubrimiento. Después del recubrimiento, la chapa se enfría rápidamente y se lleva al tratamiento final donde se efectúan las operaciones de acabado. Una variante del método Sendzimir utiliza un desengrase químico, para quitar las grasas o aceites, en lugar del horno de oxidación [20]. Otra variante emplea el horno oxidante seguido de un decapado con ácido, antes de entrar en el horno reductor, para asegurar que ningún depósito esponjoso de hierro pueda contaminar el baño de aluminio [41]. Otros métodos utilizan, para el fluxado de la chapa o del alambre, disoluciones acuosas de fluoruros de zirconio o de titanio y también delgadas capas de cobre, estaño o zinc depositadas electrolíticamente en la superficie limpia del acero, para preservarla de la oxidación hasta que se sumerge en el baño de aluminio [42]), [43].

El aluminizado en discontinuo, también llamado cíclico o por piezas, se aplica a elementos de formas compactas, tales como productos colados, forjados, laminados, soldados, etc. El aluminizado en discontinuo se encuentra menos desarrollado, debido a las muchas dificultades de los problemas tecnológicos que es menester resolver. Sólo después de una cuidadosa preparación de la superficie metálica que se trata de recubrir se puede obtener el recubrimiento [44].

El trabajo que se desarrolla en esta investigación versa sobre el procedimiento discontinuo.

Las características más importantes del proceso discontinuo son: [45]

- Combinar en una las operaciones de tratamiento térmico de las piezas sumergidas en el baño de aluminio con la obtención sobre su superficie de un recubrimiento por difusión, resistente a la corrosión.

- Determinar el método para lograr el control del espesor, microestructura y composición del recubrimiento, apoyado en el mecanismo de formación de los recubrimientos y en el conocimiento de su microestructura.

- Determinar la posibilidad de aplicación de esta tecnología a escala industrial.

### 3.2.1 Técnica

La tecnología de la aluminización por inmersión en caliente presenta un amplio espectro de aplicaciones industriales, gracias a la buena resistencia a la corrosión de los recubrimientos de aluminio obtenidos por difusión y la posibilidad de combinar simultáneamente el recubrimiento de los productos con su tratamiento térmico durante el proceso de aluminizado[46].

#### 3.2.1.1 Preparación Superficial

Una buena preparación de la superficie es fundamental a la hora de obtener un buen recubrimiento, la existencia de materiales extraños diseminados sobre la superficie ocasiona defectos en el recubrimiento, no sólo en la adherencia, resistencia a la corrosión o continuidad del recubrimiento, sino también en los aspectos de acabado superficial y estético [47].
Dado que el aluminio fundido no puede atacar al metal base a través de grasas, óxidos y cascarillas, la superficie de las piezas a recubrir ha de estar químicamente limpia antes de su inmersión en el baño de aluminio.
El proceso general para la adecuación de la superficie, consta de dos etapas fundamentales: el desengrasado y el decapado[48],[49].

*a) Desengrasado*

Mediante el desengrasado se eliminan las impurezas de tipo orgánico como aceites y grasas solubles y los lubricantes que se usan en los procesos de laminación y embutición profunda y también algunas clases de pintura. El desengrasado se puede efectuar mediante:

- Soluciones alcalinas en caliente:

Se usan generalmente entre 80 y 90 °C durante unos 20 minutos, siendo la más empleada la disolución de sosa cáustica al 50%.

- Soluciones alcalinas en frío:

Se utilizan cuando las piezas están ligeramente engrasadas. Son disoluciones preparadas a base de fosfatos.

- Desengrase al vapor:

Utiliza vapor de tricloro-etileno, muy eficaz para aceites y grasas, aunque es necesaria una instalación muy costosa.

- Desengrase por inmersión en el baño de aluminio:

Es un sistema eficaz sobre todo cuando las piezas tienen pinturas o grandes cantidades de grasa.

- Chorro de granalla:

Se suele utilizar cuando las piezas de acero llevan pinturas, cascarillas de recocido, escorias de soldadura, arena, etc., y también para preparar piezas de fundición gris y de fundición maleable.

*b) Decapado*

Las impurezas de tipo inorgánico tales como: la cascarilla de fabricación y el óxido generado durante el recocido, se eliminan mediante el decapado. Normalmente, para este fin se utilizan: ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico y también mezclas de ácidos.

El decapado tiene por objeto eliminar las cascarillas y el óxido, pero no atacar el acero subyacente, puesto que el decapado excesivo origina una superficie áspera y es causa de un recubrimiento poco satisfactorio. Por este motivo se usan inhibidores, los cuales impiden prácticamente el ataque del acero sin afectar la velocidad de eliminación del óxido.
Con el uso de inhibidores de decapado, la superficie del acero queda más lisa y produce un acabado mejor del aluminizado.

*Decapado con ácido clorhídrico:*

El ácido clorhídrico se utiliza diluido al 50% en volumen y a temperatura ambiente. Es importante que la temperatura del ácido no sea inferior a 15 °C, puesto que la reactividad es menor y el ataque del ácido al metal, más lento.

*Decapado con ácido sulfúrico:*

Se utiliza con un contenido de ácido entre 10-14% y a una temperatura de 60 a 80 °C. El ácido sulfúrico es más económico que el clorhídrico, pero tiene el inconveniente de que se ha de calentar para lograr mayor rapidez de decapado y es mucho más peligroso para el operario.

*Decapado con ácido fluorhídrico:*

Puede utilizarse en sustitución del chorro con granalla en la limpieza de piezas de fundición, siendo la concentración empleada del 19%. Este ácido es muy peligroso al causar quemaduras si entra en contacto con la piel.

*Decapado con mezcla de ácidos:*

Se puede utilizar para decapar piezas de fundición. La mezcla suele ser de ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y agua en proporciones de (6:4:40).

### 3.2.1.2 Fluxado

La preparación superficial se completa con el fluxado. El fluxado consiste en la inmersión de las piezas a tratar en un baño de sales. En general, el fluxante se emplea como agente de activación de la superficie del metal base pero en realidad es un reductor químicamente activo que neutraliza la oxidación del metal base cuando la pieza se introduce en el baño de metal fundido.
Existen tres formas distintas para llevar a cabo la operación de fluxado:[50],[51]

*a) Disolución acuosa:*

Los métodos basados en el uso de disoluciones acuosas de fluxado son las más simples y económicas. Una disolución acuosa se puede preparar, controlar y mantener fácilmente, se desprende rápidamente de las piezas y no forma productos indeseables. Para la preparación de los fluxados acuosos se utilizan cloruros y fluoruros alcalinos en distintas proporciones y también sales de titanio y de circonio tales como el fluorocirconato de potasio ( $K_2ZrF_6$ ) y el fluorotitanato de potasio anhidro ($K_2TiF_6$).

*b) Sales fundidas:*

Las sales fundidas se pueden utilizar de dos formas, como un baño de flujo independiente del baño de aluminio, o como una capa de sales fundidas encima del baño de aluminio. Se utiliza el mismo tipo de sales fundidas que en la disolución acuosa a una temperatura entre 700-800 °C. La ventaja de las sales fundidas es que calientan la pieza a la misma temperatura que el baño de aluminio, por lo cual el aluminizado se realiza más rápidamente, al acelerarse la velocidad de reacción entre el aluminio y el hierro. El inconveniente de los baños de sales fundidas es su poca duración dada su gran volatilidad e inestabilidad.

*c) Atmósferas reductoras o inertes:*

Las atmósferas reductoras o inertes se utilizan sobre todo en los procesos en continuo ya que implican una simplificación del procedimiento y un aumento de la eficacia. Las atmósferas más empleadas son las de: hidrógeno, argón y mezclas de hidrógeno y nitrógeno.

### 3.2.2 Técnica de Inmersión

Después de sacar las piezas del baño de fluxado se introducen en el baño de aluminio líquido. Durante el período de inmersión las piezas se suben y se bajan algunas veces, para eliminar el aire que haya podido quedar atrapado y para asegurarse de que el aluminio líquido entra en contacto con la totalidad de superficie de la pieza.

Debido a la gran reactividad del hierro y el aluminio a temperaturas superiores a los 700 °C, el crisol del baño no puede ser de acero o fundición, y se han de emplear crisoles de refractario o de grafito [52]. Un problema más es la disolución del hierro del material que se ha de recubrir dentro del baño de aluminio. Este hierro se combina con el aluminio y forman las características matas o aluminio duro que corresponde en su mayor parte al intermetálico $FeAl_3$ [53]. Las matas tienden a adherirse a la superficie de las piezas en forma de granos o nódulos con lo cual estropean el recubrimiento de aluminio, por lo cual se han de retirar periódicamente, dichas matas, del baño de aluminio.

### 3.2.3 Procesos de Post-aluminizado

#### 3.2.3.1 Preparación para la deformación

A pesar de que el aluminio utilizado en el recubrimiento es dúctil, la capa intermetálica formada, durante el aluminizado por inmersión en caliente, es dura y quebradiza. Por lo cual, cuando se les ha de dar a las piezas un conformado posterior al aluminizado, es necesario reducir los tiempos de inmersión, así como la temperatura del baño, y se deben utilizar elementos de aleación en el baño de aluminio. Esto reducirá el espesor y la dureza de la capa intermetálica, produciendo un recubrimiento más flexible. Aplicados correctamente, los recubrimientos de aluminio, resistirán una moderada deformación, maquinado y estirado, sin escamados o peladuras. El material recubierto se puede doblar hasta 180° sobre un diámetro igual a dos veces su espesor, sin perder la adherencia [54].

#### 3.2.3.2 Acabados

En aplicaciones en las que intervenga la exposición ambiental, el aluminizado obtiene resultados satisfactorios sin ninguna protección adicional. Sin embargo, la resistencia a la corrosión, la apariencia y la duración pueden ser mejoradas mediante el empleo de tratamientos de acabado [55].

*a) Acabados químicos*

Un buen sistema de acabado relativamente económico para los recubrimientos de aluminio por inmersión en caliente, lo constituye la aplicación de cromatos amorfos y películas de fosfatos por técnicas de inmersión o metalización. Ofrecen una mayor resistencia a la corrosión, a la vez que una superficie más decorativa, pero no son particularmente resistentes a trabajos mecánicos. Los recubrimientos cromatados son característicamente de color dorado y dan una mayor resistencia a la corrosión en ambientes marinos, mientras que los fosfatados son típicamente de color verde oscuro.

*b) Recubrimientos anódicos.- Coloreado y sellado.*

El anodizado es un proceso electrolítico que sirve para engrosar y estabilizar las películas superficiales de óxido sobre el metal base. La película anódica es un buen soporte para la pintura y el coloreado o para tratamientos posteriores.
El anodizado se emplea con frecuencia para el aluminio, pues el 5% del aluminio consumido se anodiza, además de otros metales.

### 3.2.4 Tratamientos Mecánicos

Mediante los tratamientos mecánicos se puede mejorar la apariencia del recubrimiento de las piezas aluminizadas por inmersión en caliente, eliminando las rebabas, los restos de sales de fluxado y los granos de matas que hayan podido quedar adheridos a su superficie.

Generalmente el espesor del recubrimiento no es superior a las 250μm, por lo cual se habrán de dar tratamientos de acabado poco agresivos tales como [56]:

a) Chorreados abrasivos con partículas de vidrio: producen una atractiva apariencia mate con la mínima eliminación de material.
b) Maquinados ligeros: se ha de tener especial cuidado con las esquinas y los bordes de las piezas, puesto que es donde se arranca mayor cantidad de material.
c) Ruedas de nylon de baja densidad impregnadas con un abrasivo, que proporcionan acabados direccionales.
d) Chorreados con arena y granallados con polvo de acero.

### 3.2.5. Soldadura

Los métodos empleados para soldar o unir acero aluminizado son paralelos y presentan los mismos problemas que los métodos usados para la soldadura del aluminio moldeado o forjado. El principal impedimento lo constituye la capa de alúmina (aproximadamente 0.03 μm), que se forma en la superficie del recubrimiento, y cuyo espesor tiende a crecer cuando se eleva la temperatura. Este óxido muy estable y muy adherente, cuyo punto de fusión es de 2050 °C, no es soluble ni en el aluminio sólido ni líquido y constituye una barrera que se opone a la adecuada unión de los elementos. Es importante, por lo tanto, eliminarla para obtener soldaduras de calidad. Se pueden emplear los siguientes procedimientos [[57],[58]:

*a) Soldadura por resistencia*

Dentro de los procedimientos de soldadura por resistencia, las de puntos y costuras son las más adecuadas, puesto que el daño en el recubrimiento está minimizado.

*Soldadura por puntos:* las partes a soldar son prensadas entre dos electrodos y se hace pasar una corriente eléctrica que genera calor en las diversas resistencias de contacto. Para reducir al mínimo el calentamiento del metal es conveniente soldar en tiempos muy cortos de (1/50 a 1/5 segundos) y la corriente de soldadura debe ser de gran intensidad.
Los electrodos deben tener buena resistencia mecánica y gran conductividad eléctrica y térmica. Los más empleados son los de aleaciones de cobre : Cu-Cd, Cu-Ag y Zn-Al-Cu. En cuanto a la forma de los electrodos, los de puntas troncocónicas de 120° favorecen la evacuación del calor.

*Soldadura por costura:* Es similar a la soldadura por puntos, siendo aplicada con rodillos que efectúan la soldadura en forma continua, bajo esta metodología se puede obtener la unión de piezas aluminizadas.

*b) Soldadura por fusión*

*Soldadura oxiacetilénica:* Para la soldadura del acero aluminizado con este método, se utilizan gases y materiales idénticos a los empleados en la soldadura del acero. Para eliminar la capa de alúmina se emplean fundentes, que suelen ser sales halogenadas (cloruros y fluoruros) de metales alcalinos y alcalinotérreos. El fundente se coloca sobre el alambre de aportación o secundariamente sobre las partes a unir.
La forma de actuar del fundente es la siguiente: durante el calentamiento, debido a los diferentes coeficientes de dilatación, la capa de alúmina se agrieta, permitiendo al fundente líquido entrar en contacto con el metal subyacente; el fundente ataca al metal que está bajo el óxido y libera halogenuros de aluminio, los cuales tienen una tensión de vapor suficiente para despegar las capas de óxido, que ascienden a la superficie del fundente líquido y son rechazadas hacia el borde del baño fundido. El fundente o la escoria aseguran la cobertura de la superficie del baño fundido y colocan a éste al abrigo de una nueva oxidación.

*Soldadura al arco bajo gas inerte con electrodo de tungsteno:* TIG (Tungsten Inert Gas). Este procedimiento consiste en hacer saltar un arco entre un electrodo refractario (de Tungsteno o de Tungsteno-Torio) y la pieza que se suelda, mientras que un chorro de gas inerte (argón o helio), que rodea al electrodo protege a éste y al baño fundido contra la oxidación. Este procedimiento permite la soldadura de piezas aluminizadas sin fundente; basta mantener el arco en unas determinadas condiciones para eliminar el óxido superficial del baño de fusión y del metal de aportación.

# CAPÍTULO IV

# DESARROLLO EXPERIMENTAL

## 4. Introducción:

En este capítulo se presenta la metodología y el procedimiento experimental que se ha seguido para la obtención de los recubrimientos de Aluminio y de Zinalco sobre Acero AISI 1018, así como las pruebas efectuadas sobre los mismos, para su caracterización.

## 4.1 Material empleado.

*Acero AISI 1018.* En la experimentación del presente trabajo, se empleó chapa de acero tipo AISI 1018 con calidad comercial producida por AHMSA, con la siguiente composición química:

| | |
|---|---|
| C | 0.18% |
| Si | 0.25% |
| Mn | 0.75% |
| P y S | residuales |

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

*Zinalco.* El zinalco empleado fue zinalco extruido con la siguiente composición química:

| | |
|---|---|
| Zn | 77% |
| Al | 21% |
| Cu | 2% |

Proporcionado por el Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM.

*Aluminio.* El aluminio utilizado fue aluminio 1100 comercial con la composición química siguiente:

| | |
|---|---|
| Al | 99.700% |
| Si | 0.048% |
| Fe | 0.220% |
| Cu | 0.002% |
| Mn | 0.004% |
| Mg | 0.003% |
| Cr | 0.002% |
| Zn | 0.008% |
| Otros | 0.013% |

## 4.2 Reactivos Utilizados

- Ácido Clorhídrico al 10 % (HCl)
- Tiourea ($H_2NCSNH_2$)
- Cloruro de Zinc ($ZnCl_2$)
- Cloruro de Amonio ($NH_4Cl$)
- Ácido Fluorhídrico al 48% (HF)
- Ácido Clorhídrico Concentrado (HCl)
- Ácido Nítrico Concentrado ($HNO_3$)
- Ácido Crómico

## 4.3 Equipo Empleado

**4.3.1 Horno de fusión:** Para fundir el zinalco y el aluminio se utilizó un horno eléctrico, marca CONSTRUCTORA DE APARATOS INDUSTRIALES(CAISA), Modelo 12BMPCH, de 220 volts, una fase, control de temperatura y calentamiento a base de resistencias eléctricas con rango de temperatura de 300 hasta 1350 [°C].

**4.3.2 Horno para recocido:** Para realizar el recocido y precalentamiento de las piezas antes de introducirlas al laminado, se utilizó un horno eléctrico marca LINDBERG modelo 439DL tipo 41SE8156 que alcanza una temperatura máxima de 1500 [°C] por medio de resistencias eléctricas y cuenta con la posibilidad de un sistema de atmósfera controlada a base de Argón.

**4.3.3 Control de la Temperatura** El control de la temperatura se ha llevado a cabo mediante un equipo pirométrico integrado por un indicador de temperaturas MESEL LX-D digital y un termoelemento de Ni-Cr/Ni, situado en el interior de una caña de Silimag, de 360 mm. de longitud y 1/8 in. de diámetro.

**4.3.4 Crisol de grafito:** Se ha utilizado un crisol de grafito, Morgan- Suprex de las siguientes características.

- Capacidad total 10 kgs/litro.
- Dimensiones interiores 200 mm altura, 175 mm de diámetro superior y 120 mm de diámetro inferior.

**4.3.5 Laminador:** El laminador empleado fue un laminador dúo experimental, con posibilidades de arreglarse como cuarto, marca HILLE, con capacidad de 25 toneladas, en el cual se puede controlar la velocidad de laminación y el porcentaje de deformación.

**4.3.6 Microscopio electrónico:** se empleó un microscopio electrónico de barrido marca Phillips, modelo XL20. Este equipo fue empleado para realizar la observación de las diferentes fases del recubrimiento en las probetas.

Las características de este microscopio son las siguientes:

- Voltaje de aceleración 0 – 30 [KV]
- Detector de electrones secundarios y retrodispersados
- Almacenamiento de información: cámara 35mm, videoprint, disco duro y flexible
- Disco duro del sistema de cómputo
- Unidad de discos flexibles de 3.5 mm
- Equipo de microanálisis por dispersión de energía

**4.3.7. Potenciostáto** El potenciostáto es un instrumento electrónico que se puede emplear para determinar la resistencia a la corrosión de los recubrimientos metálicos. Está basado en la aplicación de una diferencia de potencial, variable con el tiempo, entre el electrodo de trabajo (probeta a estudiar) y un electrodo de referencia (Electrodo de Calomelanos Saturado: ECS), midiéndose la intensidad de corriente que circula entre el electrodo de trabajo y el electrodo de calomel, con respecto al potencial aplicado. La diferencia de potencial se controla automáticamente, de manera que cualquier desviación de un valor escogido del potencial se corrige a través de un amplificador de corriente continua cuya salida alimenta a un tercer electrodo (electrodo auxiliar). El electrodo auxiliar puede actuar anódica o catódicamente respecto a la probeta según sea la corrección requerida. El potenciostáto también mide la intensidad de corriente que circula entre el electrodo auxiliar y el electrodo de trabajo

*a) Funcionamiento del potenciostáto*

El potenciostáto, como se muestra en las figuras 4.1 y 4.2 emplea cinco amplificadores operacionales y un circuito lógico, denominado secuenciador. El corazón del aparato es el amplificador de potencia $Q_1$, que conduce la corriente dentro de la célula a través del contraelectrodo y recibe la realimentación negativa a través del electrodo de referencia. El amplificador de salida $Q_3$ actúa como un convertidor de intensidad a voltaje (tensión), proporcionando una salida con conexión a tierra. La realimentación positiva, recogida por un potenciómetro en esta salida, se suma a la modulación externa eventual y a la D.C. de polarización por medio del amplificador de salida $Q_4$. El electrómetro $Q_5$ tiene una doble función: la primera, medir el potencial estático del electrodo de trabajo, antes de conectar la célula; la segunda, controlar el eventual cambio de voltaje cuando circula la corriente.
La misión del secuenciador es realizar una secuencia lógica, a través de los relés $K_1$ y $K_2$ cuando la célula está conectada y desconectada. De esta forma los electrodos son protegidos de las descargas de voltaje producidas por la introducción de una secuencia incorrecta del contraelectrodo.
El potenciostáto incluye dos controladores de sobrecarga, $Q_6$ y $Q_7$, para la salida de escala del contraelectrodo y para la saturación del amplificador de salida $Q_3$ , respectivamente.

*Cámara de niebla salina.* Para confirmar los resultados de corrosión potenciostática
Se realizaron pruebas en una cámara de niebla salina, en la que se trabajo según la norma ASTM-117.
Las condiciones principales que se siguieron para realizar el ensayo fueron las siguientes:

- Temperatura de la cámara: 35 °C
- Temperatura del humificador: 35 °C
- Ciclo de trabajo: 59 min. de trabajo por 1 min. de paro cada 24 hrs.
- Concentración de sal al 3% (80lts. De agua por cada 2.4 Kg de sal)

Las características técnicas del equipo son las siguientes:

- Capacidad de tanque 100 litros
- Dimensiones interiores útiles 700 x 850 x 700 mm
- Margen de temperatura de 0-50 °C

**4.3.9. Microdurómetro.** Se han realizado ensayos de microdureza Vickers, en el metal base, en la capa interna del intermetálico y en la capa externa, de cada uno de los materiales recubiertos con zinalco y aluminio. Las pruebas han sido realizadas en superficies desbastadas y pulidas empleando un microdurómetro Leitz equipado con un penetrador de diamante en forma de pirámide y provisto de una carga máxima de 500 gramos.

**4.3.10. Herramental para ensayo de Embutido Erichsen.** El ensayo de embutido o de Erichsen, se empleó para determinar la capacidad de deformación y adherencia del recubrimiento. Para realizar ésta prueba se ha utilizado una máquina Universal de ensayos Marca INSTRON y un herramental fabricado especialmente para realizar dicho ensayo. El ensayo se ha realizado bajo la norma ASTM E-643 Ball punch deformation of metallic sheet material. El herramental permite realizar ensayos de embutición en chapas, desde un espesor de 0.005 mm. hasta un espesor de 3.5 mm. El ensayo consiste en colocar la probeta (figura 4.3) recubierta en la hendidura de introducción y sujetarla entre la matriz y el soporte. Luego, la probeta se va deformando por efecto de la presión que se ejerce con un punzón de bola de acero hasta agrietarse.

**4.3.11. Máquina universal de pruebas electromecánica marca Instron**

Para realizar los ensayos de tracción y los de embutido se empleó el siguiente equipo:

- Máquina universal de pruebas electromecánica marca Instron, modelo 4206, con mordazas con apertura máxima de 6.35 mm, cuyas principales características se mencionan a continuación:

Capacidad: 150 kN; Velocidades de aplicación de carga: hasta 25 kN a 500 mm/min y hasta 150 kN a 50 mm/min; precisión de la celda de carga: ± 1% de la lectura a 1/50 de su capacidad; rango de velocidades del marco de carga: 0.05 a 500 mm/min; precisión de la velocidad del marco de carga: ± 0.2% en valores superiores a 100 mm; velocidad de regreso del marco de carga: 500 mm/min, y rigidez de la máquina: 140 kN/mm.

## 4.4 Procedimiento para la obtención de los recubrimientos

*Preparación de la probeta del metal base*

El material base empleado fue solera de acero AISI 1018 de 1/8 de pulgada de espesor por 1.5 o 3 pulgadas de ancho, la cual fue cortada, según se requería en las normas para cada ensayo, y con las dimensiones apropiadas para su mejor manejo al introducirlas en el metal fundido (Zinalco ó Aluminio). Las dimensiones a las que fueron cortadas cada una de las probetas utilizadas para esta investigación fueron de 50 X 38 y de 76X90 [mm]. Las probetas pequeñas fueron empleadas en las pruebas siguientes: dureza, estudio metalográfico del recubrimiento, espesor del recubrimiento y corrosión, siendo utilizadas las probetas de mayor tamaño para el ensayo de embutido pues así lo señala la norma correspondiente.

### 4.4.1. Limpieza de las Probetas del Metal Base

Una vez obtenida cada probeta del material base con las dimensiones adecuadas se efectuaron los procedimientos de limpieza mecánica, decapado y activación de la superficie, para que la superficie de las probetas quedará libre de cualquier impureza que dificultará el proceso de adherencia del recubrimiento (Zinalco ó Aluminio). Los procedimientos mencionados se explican a continuación.

*La limpieza mecánica;* se lleva a cabo con ayuda del esmeril, esto se realiza para dejar la superficie de la probeta rugosa y facilitar así la adherencia de los materiales de recubrimiento, a la vez de eliminar impurezas de tipo orgánico como aceites, grasas y lubricantes que son empleados en los procesos de producción de los aceros.

*Limpieza en ácidos (decapado)*; En este caso se utilizó una solución de ácido clorhídrico diluido en agua destilada al 10%, mezclado con Tiourea al 10% en volumen con relación al ácido clorhídrico, la cual funciona como inhibidor (La tiourea se emplea con la finalidad de evitar el ataque excesivo del ácido sobre el acero y para evitar la oxidación del mismo después de ser extraído del decapado y ser expuestos al medio ambiente). Las probetas son sumergidas durante un tiempo de 5 minutos en esta solución a una temperatura de 60 °C, las cantidades de reactivos utilizados para realizar el decapado son los recomendados en la literatura [75] y con ellos se ha obtenido buen resultado, ya que las probetas se limpiaron sin oxidación de las mismas por sobre ataque del ácido.

*Activación de la superficie(fluxado);* La activación de la superficie se realiza mediante una solución compuesta de cloruro de zinc al 15% y cloruro de amonio al 15% diluido en agua destilada. Las probetas son sumergidas en la solución durante un periodo de 5 minutos a temperatura ambiente, al ser retiradas de la solución son secadas con una pistola de aire caliente con objeto de que no se oxiden y las sales queden depositadas en su superficie. Mediante esta preparación las probetas están listas para la inmersión en el metal liquido (Zinalco ó Aluminio)[50].

### 4.4.2 Obtención de los Recubrimientos

El objetivo principal de esta etapa fue determinar los parámetros que permitieran obtener los mejores recubrimientos de Zinalco y Aluminio, para lo cual se realizaron pruebas variando los principales parámetros que inciden en la calidad del recubrimiento, por lo que se realizaron las siguientes pruebas:

*Experimentación previa*

Con el objeto de determinar los valores más adecuados de las variables a utilizar y el procedimiento de generación del recubrimiento de Zinalco y de Aluminio, se han mantenido constantes algunas de las variables del proceso, como son: Tiempo de decapado, composición del reactivo de decapado, tiempo de fluxado, temperatura y composición de las sales de fluxado, composición del metal de recubrimiento, velocidad de inmersión y de extracción, ya que los valores de estas variables han sido proporcionados por los investigadores Dr. Pedro Molera Solá y Dr. Alfonso Vázquez Vaamonde del departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Barcelona España[86], quienes han realizado trabajos de investigación relativos al aluminizado por inmersión en caliente, siendo las únicas dos variables a estudiar en este caso, el tiempo de inmersión de las probetas y la temperatura del metal de inmersión. Así mismo, este estudio se basa en la teoría de diseño de experimentos [76], en lo relativo a incertidumbre en función de dos variables. El método aplicado en este caso es como se explica a continuación.

#### 4.4.2.1 Generación del recubrimiento de Zinalco, (efecto del tiempo y de la temperatura en el espesor del recubrimiento)

Una vez preparadas las probetas como se indica en la sección 4.4.1, y con la finalidad de evaluar las variables de tiempo adecuado de inmersión del metal base en el metal líquido ( metal de recubrimiento) y la temperatura óptima para la inmersión , se procedió a realizar lo siguiente:

Experimento 1.- Se procedió a variar el tiempo de inmersión de las probetas de acero AISI 1018, en el metal líquido (Zinalco) en un periodo de tiempo comprendido entre 3 a 30 minutos. (El intervalo de tiempo de 3 a 30 minutos, se ha considerado adecuado, pensando en que el proceso se pueda aplicar industrialmente, para lo cual un menor tiempo será lo más adecuado), mientras se mantenía constante la temperatura del metal líquido a un valor de 700°C. La temperatura de 700 °C se estableció como límite porque por arriba de esta temperatura se inicia la transformación del zinc en oxido de zinc y se pierde la concentración del mismo en la aleación. Con la variación del tiempo de inmersión de las probetas a temperatura constante se determino el comportamiento del recubrimiento a dicha temperatura (Espesor de recubrimiento, adherencia del recubrimiento, calidad superficial del recubrimiento), lo cual ha permitido determinar el tiempo más adecuado para lograr el recubrimiento. Los resultados de este experimento se presentan en la tabla 4.4 y en la gráfica 4.5.

Experimento 2.- En este experimento, al igual que el anterior fue variado el tiempo de inmersión de 3 a 30 minutos mientras se mantenía constante la temperatura a un valor de 550°C que es una temperatura superior a la de fusión del Zinalco (480°C)[58]. El comparativo entre el experimento 1 y 2 permitió determinar el tiempo óptimo de inmersión.

Los resultados obtenidos del experimento 2 son mostrados en la tabla 4.4.1 siendo los mismos presentados en forma gráfica en la gráfica 4.6 y 4.7. Es importante destacar que para cada ensayo se han realizado un mínimo de cinco eventos y de acuerdo con el procesamiento estadístico se han eliminado el mayor y el menor presentando los restantes en las tablas.

Experimento 3.- Habiendo determinado de los experimentos anteriores (1, 2 ), que el tiempo más adecuado para la inmersión es de 5 minutos, ya que dicho tiempo además de ser adecuado para aplicar el recubrimiento en forma industrial, ha permitido la obtención de un recubrimiento de calidad (lo cual fue verificado mediante ensayos preliminares, no reportados en este trabajo, por haber sido empleados sólo para determinar en forma previa la calidad del recubrimiento, algunos de los estudios preliminares fueron los siguientes: espesor de recubrimiento, así como el acabado superficial y la resistencia mecánica de adherencia del recubrimiento).
Una vez establecido el tiempo de inmersión, se procedió a experimentar variando la temperatura del metal de recubrimiento al enfriamiento desde 768 hasta 481°C para determinar los efectos de ésta en el grosor y calidad de la capa de recubrimiento. De la experimentación realizada, se ha determinado que la temperatura más adecuada para realizar el recubrimiento, es de 600 °C, ya que de acuerdo con la tabla 4.8 y la gráfica 4.9, esta temperatura permite lograr un recubrimiento de un espesor promedio de 0.9 mm sin tendencia al crecimiento con ese nivel de temperatura.

Una vez evaluado el efecto de la temperatura y del tiempo de inmersión en la experimentación preliminar, se establece que la temperatura más adecuada para realizar el recubrimiento de Zinalco es de 600 °C, siendo el tiempo del orden de 5 a 10 minutos. Por lo que las probetas para evaluación de propiedades serán realizadas a un tiempo de inmersión de 5 minutos, considerando que este tiempo es más adecuado, sobre todo pensando en la posibilidad de aplicación a nivel industrial del recubrimiento.

En conclusión se establece que los parámetros que serán adoptados para generar los recubrimientos de zinalco para estudio son los siguientes, ya que éstos permitieron obtener las probetas con las mejores características:

- Tiempo de inmersión 5 minutos.
- Temperatura de inmersión 600 °C.

### 4.4.2.2 Generación del recubrimiento de Aluminizado, (efecto del tiempo y de la temperatura de inmersión en el espesor del recubrimiento)

Para obtener los parámetros adecuados, en la generación del recubrimiento de aluminio sobre acero (Aluminizado), se ha trabajado de la siguiente forma, se han realizado tres experimentos, manteniendo la temperatura constante en cada caso y variando el tiempo de inmersión de las probetas.

Experimento 1.- Se procedió a variar el tiempo de inmersión de las probetas de acero AISI 1018, en el metal líquido (aluminio) en un periodo de tiempo comprendido entre 2 a 15 minutos. (El intervalo de tiempo de 2 a 15 minutos, se ha considerado adecuado, pensando en que el proceso se pueda aplicar industrialmente, para lo cual un menor tiempo será lo más adecuado), mientras se mantenía constante la temperatura del metal líquido a 750°C. La temperatura de 750°C se estableció, porque se considera que a esta temperatura el aluminio presenta buena

fluidez para lograr el recubrimiento. Los resultados obtenidos de esta experimentación son mostrados en la tabla 4.10.1.

Experimentos 2 y 3.- Estos experimentos se han realizado de forma similar al experimento 1, esto es, se ha variado el tiempo de inmersión de 3 a 15 minutos manteniendo en estos casos la temperatura en un valor de 800 y 850 °C respectivamente. Los resultados obtenidos de los experimentos 1 y 2 se presentan en las tablas 4.10.2 y 4.10.3 y la gráfica 4.10 presenta el resumen de los tres experimentos.

Las probetas obtenidas en los experimentos 1, 2 y 3 fueron evaluadas preliminarmente, en cuanto al espesor , adherencia y calidad superficial del recubrimiento, (Los resultados de dichas pruebas no son reportados en el trabajo por ser preliminares, el estudio detallado del recubrimiento, se hace posteriormente). Dicha evaluación preliminar ha permitido determinar el tiempo y temperatura más adecuados para lograr el recubrimiento, siendo éstos los siguientes.

- Tiempo de inmersión 5 minutos.
- Temperatura de inmersión 800 °C.

Se han seleccionado las condiciones anteriores de tiempo y temperatura, por que con ellas los recubrimientos obtenidos presentan mejores características, evaluadas en las pruebas preliminares.

Con las condiciones explicadas en las dos secciones anteriores, se generaron los recubrimientos de las probetas que serán evaluadas en lo relativo a las características del recubrimiento, su resistencia a la corrosión y su capacidad de deformación.

### 4.4.3 Producción de probetas recubiertas para estudio.

Con la finalidad de determinar las propiedades de los recubrimientos obtenidos de Zinalco y de Aluminio se realizaron algunas variantes de terminación sobre las probetas generadas, dichas variantes incluyen lo siguiente:

- Enfriamiento al medio ambiente.
- Enfriamiento en agua.
- Tratamiento Térmico(1 a 5 Hrs.)
- Laminación (20 y 40% de reducción)

Las condiciones de las variantes de los recubrimientos de Zinalco y de Aluminio en detalle son mostradas en las tablas 4.11 y 4.12

*Recocido.* El tiempo de recocido varió desde 1 hasta 5 horas manteniendo la temperatura constante.

En este caso el periodo de tiempo de recocido fue aplicado hasta 5 horas porque se ha estudiado que el zinalco presenta cambios microestructurales solo cuando está expuesto a períodos prolongados de temperaturas de recocido, en este sentido con el tiempo de recocido se pretende determinar el efecto sobre la capa del revestimiento y del intermetálico.

El recocido consistió en efectuar un calentamiento a las temperaturas correspondientes de acuerdo al diagrama de equilibrio en cada caso, siendo ésta de 550 °C para las probetas de aluminio y de 350 °C para las de zinalco, durante los siguientes periodos:

1 Hora de recocido
2 Horas de recocido
3 Horas de recocido
4 Horas de recocido
5 Horas de recocido

*Laminación.* La laminación fue aplicada con la finalidad de lograr un mejor acabado superficial de las probetas, por lo cual se aplicaron niveles bajos de deformación, a la vez de verificar los cambios que experimenta el material durante la deformación. La laminación se realizó con un precalentamiento de las probetas de 550 y 350 °C respectivamente, durante un periodo de15 minutos (esto con objeto de disminuir el riesgo de fracturas).

Los porcentajes de reducción empleados fueron los siguientes:

20% de Reducción
40% de Reducción

*Laminación y recocido.* En algunas probetas se aplicó una combinación de laminación al 20 y 40% de reducción, y posteriormente un recocido a la temperatura predeterminada, con la finalidad de determinar si el recocido posterior a la laminación elimina los efectos de la deformación, como son grietas y fisuras, a la vez de homogeneizar la microestructura.
En esta prueba se utilizó un tiempo de recocido de dos horas, por ser el tiempo en el que se obtienen las mejores características del recubrimiento, como se aprecia en las microfotografías de las piezas recocidas dos horas. (figuras 5.5, 5.6, 5.27, 5.28)
Bajo las condiciones explicadas anteriormente se generaron las probetas que serán estudiadas en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO V

# REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

## 5. Introducción:

En este capítulo se presenta el procedimiento experimental que se ha seguido para la realización de pruebas que fueron efectuadas sobre el acero AISI 1018 recubierto con Aluminio y Zinalco. En el siguiente capítulo se realizará el análisis de cada una de las pruebas que en éste capítulo se mencionan.

## 5.1 Preparación de muestras para observación en el microscopio electrónico de barrido y obtención de micrografías

*Corte:* cada una de las probetas son cortadas de tal manera que no sea deformada la superficie de corte y no se eleve demasiado la temperatura de la muestra, ya que se tendría el riesgo de modificar su microestructura. El corte puede realizarse de forma manual o con disco abrasivo.

*Montaje*: Las muestra pequeñas o de forma incómoda deben montarse de alguna forma para facilitar las operaciones de pulido y preparación, de tal manera que resulte una forma y tamaño apropiados para una buena sujeción y un manejo adecuado. El material para el montaje de la muestra en este caso fue una resina conductora que facilita la observación en el microscopio electrónico de barrido. Una vez montada la muestra se continuó con la preparación metalográfica, hasta lograr el pulido final, así como el ataque químico para que en la muestra se hagan visibles sus características estructurales.

Cuando se observa al microscopio una muestra metálica que haya sido pulida y atacada, se revelan el tamaño y tipo de inclusiones no metálicas, la cantidad y tamaño de micro-poros y micro-grietas, y (sí las hay) las fases existentes, formas y distribución de las mismas, tamaño de grano, etc.

En este caso las piezas recubiertas con aluminio fueron atacadas con los siguientes reactivos para obtener la mejor calidad de la observación.

*Primer Reactivo*

Composición química

- 2 ml ácido Fluorhídrico al 48% (HF)
- 3 ml ácido Clorhídrico Concentrado (HCl)
- 20 ml ácido Nítrico Concentrado ($HNO_3$)
- 175 ml agua

Se mezclan estas soluciones y una vez obtenido el reactivo, se colocan unas gotas en la superficie del metal que se va a observar, durante un periodo de 10 a 60 segundos, se enjuaga con agua y

se limpia con un paño seco, no se permite el calentamiento de la superficie. Si es necesario se repite la operación por otro periodo de tiempo.

*Segundo Reactivo (consta de 2 reactivos)*

Composición química del Reactivo A

- 1 parte de Ácido Fluorhídrico al 48% (HF)
- 12 partes de Ácido Clorhídrico Concentrado (HCl)
- 6 partes de Ácido Nítrico Concentrado ($HNO_3$)
- 1 parte de agua

Composición química del reactivo B

- 25 ml Ácido Nítrico Concentrado ($HNO_3$)
- 40 ml de la solución compuesta por
- 3 g de Ácido Crómico
- 10 ml agua

Se prepara el reactivo A en un vaso de precipitado con dichas soluciones, de tal forma que se obtengan 50 ml del mismo, para preparar el reactivo B; se coloca en otro vaso de precipitado 25 ml de ácido nítrico concentrado, mientras que en un tercer vaso de precipitado se hace la mezcla del ácido crómico con agua, con las proporciones arriba mencionadas, de tal forma que se obtengan una solución final de 40 ml, dicha solución se mezcla con los 25 ml de ácido nítrico para obtener el reactivo B. Una vez obtenido el reactivo B y el reactivo A se mezclan ambos para obtener el reactivo final.

Una vez obtenido el reactivo final se depositan unas gotas sobre la superficie que se desea observar durante un periodo de 1 a 4 minutos, se lava y se limpia con un paño seco, y se observa al microscopio. Se repite la operación de ser necesario.

El reactivo que se utilizó finalmente para observar las muestras fue el primero, el cual nos dio una buena claridad de las tres fases existentes (metal base, intermetálico y el recubrimiento), mientras que el segundo reactivo ocasionó un ataque concentrado en el material.

Para el Zinalco se utilizó una solución de nital al 2%

Composición química

- 2 ml de ácido nítrico
- 98 ml de alcohol

En éste caso se sumerge la superficie en el reactivo aproximadamente 5 segundos, después se enjuaga con agua y se seca con ayuda de una pistola de aire.

Una vez atacadas las muestras se procedió a observarlas en el microscopio electrónico de barrido y se tomaron fografías de las fases que se encuentran presentes, así como de las posibles imperfecciones que existen en el recubrimiento. Además con ayuda del microscopio se efectuaron análisis químicos por microanálisis de energía dispersiva de rayos X para determinar la proporción de los elementos que se encuentran en los diferentes recubrimientos. Las

fotografías de las muestras metalográficas tomadas en el microscopio electrónico serán mostradas en anexo de fotografías al final del trabajo, en las figuras 5.1 a 5.42.

## 5.2 Ensayo de microdureza Vickers

Se han realizado medidas de microdureza Vickers, en la capa externa, capa interna y en el metal base, de las probetas, aplicando una carga de 50 gramos durante 30 segundos. La prueba se realizó mediante un microdurómetro. En una platina se coloca la muestra, la cual se somete a una indentación por medio de una punta de diamante. La huella alojada sobre la muestra tiene la forma de un rombo. Una vez que la huella se ha impreso se procede a medir la longitud de la diagonal que se observa a través del microscopio integrado en el equipo, donde los oculares están provistos de una retícula para su medición. Conforme a la escala indicada en μm y de acuerdo con la carga utilizada, los valores se convierten a dureza Vickers.

En este ensayo se realizaron 5 lecturas aplicando una carga de 50 [gramos fuerza] en cada una de las zonas presentes en cada muestra, de las cuales se elimina la mayor y la menor y se obtiene un promedio de las restantes. Los resultados se indican en las tablas 5.43 para el recubrimiento de Zinalco y 5.44 para el recubrimiento de Aluminio. Así mismo se presentan las gráficas de barras de los promedios de dureza en la gráfica 5.45 para el Zinalco y en la 5.46 para el Aluminio.

## 5.3 Evaluación del espesor de recubrimiento

La variación del espesor del recubrimiento fue medido, en la zona externa y en la zona de intermetálico para las diferentes probetas de Zinalco y de Aluminio, siendo los valores los mostrados en las gráficas 5.47 y 5.48 para el Zinalco y el Aluminio respectivamente.

## 5.4 Evaluación de la resistencia a la corrosión (Técnicas electroquímicas)

Para determinar la velocidad de corrosión, se han aplicado técnicas electroquímicas sobre probetas de acero AISI 1018 sin recubrimiento y en piezas del mismo acero recubierto con Zinalco y Aluminio generadas por el proceso de inmersión en caliente en el metal fundido, así mismo se ha probado un recubrimiento de galvanizado de tipo comercial.

En estos revestimientos se llevo a cabo la prueba durante 3 días, con el fin de poner a punto el equipo de medición, así como de hacer una comparación de la velocidad de corrosión que experimentan los recubrimientos cuando son expuestos a un medio corrosivo.

Para realizar lo anterior, se montaron 3 muestras de cada material dentro de una celda electroquímica. El empleo de esta cantidad de probetas fue para obtener un comportamiento estadístico de la relación velocidad de corrosión contra tiempo y para observar variaciones del sistema en el medio, para dos probetas se aplicó sobrepotenciales de bajo campo así como de alto campo, y para la tercer probeta solamente potenciales de bajo campo, para no perturbar su superficie en exceso, durante el tiempo de duración de la experimentación.

Para realizar los ensayos se hizo uso de un equipo especializado en ensayos electroquímicos, que cuenta con un software integrado para manejo de datos y obtención de resultados. Los

métodos electroquímicos utilizados en los experimentos fueron: Pausa, Potencial de Circuito Abierto, Resistencia de Polarización y Voltametría Estacionaria, dando a continuación una breve explicación de cada uno, y la importancia de los datos manejados en cada caso.

### 5.4.1 Técnicas electroquímicas en laboratorio

Como primera etapa se obtiene el valor del potencial de reposo (Erep) del electrodo de trabajo (recubrimiento) en el medio, (con la finalidad de conocer el valor de este para las pruebas posteriores). Para la medición del potencial de reposo se dejó estabilizar al sistema durante 1 hora según la norma ASTM G5-87. Éste se considera estable cuando no existe una variación apreciable del mismo con respecto al tiempo. Después de la hora considerada, el tiempo de medición de dicho potencial fue de hasta 10 minutos como máximo, permitiendo un lapso menor cuando la variación de voltaje fuera prácticamente de cero.

Una vez conocida la teoría electroquímica en que se basan las técnicas de extrapolación de Tafel y resistencia de polarización[72, 73], se describen enseguida los pasos a seguir para implementar su uso en el desarrollo de un experimento.

#### 5.4.1.1 Resistencia de polarización (Rp)

Para encontrar la resistencia de polarización que presenta la superficie de un material al ataque del medio que lo rodea, se aplican sobrepotenciales de polarización de las dos siguientes formas:

a) *Potenciostática.* Conocido también como el método de los 3 puntos. Para cada potencial aplicado se permite la estabilización del sistema antes de aplicar un siguiente paso de potencial.

- Se mide el potencial de reposo, $E_{rep}$, hasta que sea estable.
- Se aplica un potencial de polarización catódico de $\eta$ = -20 mV, y se espera a que el flujo de corriente se estabilice. Conseguido lo anterior, se invierte el sentido del potencial y se aplican escalones de 5 mV hasta llegar a un valor de potencial de polarización anódico de $\eta$ = 20 mV, Si los puntos obtenidos no son colineales, entonces se toman solamente los puntos extremos.

b) *Potenciodinámica.* Para esta técnica se cuenta con una velocidad de barrido constante, en mV/s, con lo que no se permite la estabilización del sistema y se toman lecturas del sistema inestable.

- Se establece una velocidad de barrido [entre 0.1 a 1 (mV/s)], el valor de la velocidad de barrido debe ser pequeño para poder determinar con mayor precisión el comportamiento del recubrimiento
- A partir de Erep se hace el barrido con un potencial de polarización de $\eta = \pm$ 20 mV, el cual comienza en dirección catódica hasta el potencial indicado, regresa y termina en la zona anódica.

### 5.4.1.2 Extrapolación de Tafel

Para esta técnica se aplican los sobrepotenciales de polarización prácticamente de la misma forma que para el método de resistencia de polarización, existiendo la variante en la técnica potenciostática, que se describe enseguida, para la polarización catódica, la cual puede ser en pasos o directa hasta el valor de $\eta$ = -300 mV.

- Se mide el potencial de reposo, Erep, hasta su estabilización,
- Se polariza hacia la parte catódica en cualquiera de las siguientes maneras[72,73]

a) Llevar potencial de electrodo hasta $\eta$ = -300 mV durante 5 minutos y regresar al potencial inicial
b) Llevar potencial de electrodo hasta $\eta$ = -300 mV en etapas, con incrementos de voltaje entre 10 y 20 mV, y regresar de igual forma al potencial inicial

- A partir del potencial de reposo se aplican escalones de potencial de 10 a 20 mV en la dirección anódica hasta $\eta$ = 300 mV.
- Con los datos obtenidos en las lecturas, se traza la curva de polarización respectiva y se encuentra la zona rectilínea debido al fenómeno activacional, tanto en la rama catódica como en la anódica, si es que existe.

Para la técnica potenciodinámica se sigue el mismo procedimiento que para obtener Rp, pero manejando valores límite de potencial de polarización de ±300 mV pudiendo iniciar inmediatamente la polarización desde el valor de $E_{rep}$ =-300 mV.

La utilidad de la polarización catódica consiste en que al aplicar un potencial de protección para el electrodo a valorar, se eliminan impurezas superficiales en el mismo o se eliminan productos de corrosión que se hayan creado, con lo que al aplicar el potencial anódico el comportamiento obtenido es el real del área del material expuesto.

### 5.4.1.3 Medio o Electrólito

Los medios seleccionados para valuar el comportamiento de los diferentes materiales frente a la corrosión fueron soluciones de NaCl y $Na_2SO_4$ en agua, ambos preparados al 3% en peso debido principalmente a que:

- La concentración de 3% en peso de cloruro de sodio simula condiciones de un medio como lo es el agua de mar,
- La concentración de iónes cloruro en este medio corresponde con este porcentaje siendo el elemento primordial en el fenómeno de corrosión marina,
- Una concentración de NaCl alta implica un mayor nivel de iones cloruro libres, y con esto mayor tendencia la corrosión en este medio,
- Existe alta conductividad,
- El anión $Cl^-$ puede romper películas pasivas generando fenómenos de corrosión por picadura,
- La intensidad de corriente se transmite por los aniones $Cl^-$, por lo tanto, aumenta la velocidad de corrosión generalizada.

Siendo el agua de mar un medio tan agresivo se dan los siguientes tipos de corrosión:

- Corrosión Generalizada,
- Aireación diferencial más intensa cuando aparecen incrustaciones,
- Galvánica por la alta conductividad
- Picadura por presencia de cloruros
- Además de la posibilidad de los fenómenos de corrosión–erosión, bajo tensión, fatiga y microbiológica

La solución de sulfato de sodio se utiliza principalmente como una comparación con la solución de NaCl, ya que es un electrolito con características de alta conductividad.

### 5.4.1.4 Método de prueba

Cada probeta se colocó sistemáticamente en la celda según el signo de identificación, correspondiendo las primeras 3 probetas a la solución de sulfato de sodio y las restantes a la de cloruro. De colocar una probeta en un lugar diferente al indicado, el área involucrada puede ser significativamente diferente a la correspondiente dando densidades de corriente mayores o menores con lo que varia la velocidad de corrosión.

El área expuesta de cada probeta se limpió, según la norma ASTM G 5-87, con papel lija número 600, seguido de un enjuagado con agua destilada antes de montarla en su posición seleccionada en la celda. Para el caso del acero galvanizado debido a que el espesor de recubrimiento es apenas de 20 μm, se realizó solamente un desengrase con jabón y agua destilada. Así mismo, la celda o recipiente se enjuagó con agua destilada antes de llenarla con los electrólitos.

Una vez montada completamente una celda, el sistema se dejó reposar 1 hora antes de comenzar las mediciones (norma ASTM G 5-87).

La instrumentación utilizada para el desarrollo de las técnicas electroquímicas consistió en lo siguiente:

Equipo: el equipo de aplicación específica conectado a computadora personal, para este caso el equipo fue el Potenciostáto PGP201 de Radiometer Copenhagen con las siguientes características:

- ✓ Potencial máximo de salida = ±4.095 V con resolución de 1mV,
- ✓ Máxima corriente de salida = ±1.023 A,
- ✓ Máximo voltaje de salida = ±20 V,
- ✓ Impedancia de entrada (electrodo de referencia) > 1010 Ω a 25 °C,
- ✓ Salidas análogas con 10 kΩ.

*Electrodos:*

Auxiliar: Electrodo de grafito para soldar el cual es lo suficientemente puro para fines prácticos en la realización de experimentos electroquímicos.

Referencia: Electrodo de calomel saturado, XR-100 de Radiometer Copenhagen
Trabajo: (Porcentaje de elementos, $P_E$: Peso Específico y $\rho$: densidad del material a valorar)

- Acero AISI 1018 (lámina), 0.18 C, 0.7, 0.05 S, 0.04 P, Mn. $P_E = 27.923$ (g), $\rho = 7.86$ (g/cm$^3$)
- Acero AISI 1018 aluminizado, 99 Al. $P_E = 8.993$ (g), $\rho = 2.7$ (g/cm$^3$)
- Acero AISI 1018 galvanizado comercial, 98.5 Zn, 1.4 Pb, 0.2 Cd. $P_E = 32.685$ (g), $\rho = 7.14$ (g/cm$^3$)
- Acero AISI 1018 zinalquizado. 75 Zn, 22 Al, 3 Cu. $P_E = 27.299$ (g), $\rho = 5.4$ (g/cm$^3$)

Medio:

a) Solución de sulfato de Sodio 3% en peso en agua destilada

b) Solución de cloruro de Sodio 3% en peso en agua destilada

Características del medio: para condiciones de estancamiento se mantuvo el flujo estacionario. La temperatura a la que se realizaron los experimentos fue la ambiente manteniéndose en un valor constante de 18° C. El medio se mantuvo sin desairear, el desaireado puede realizarse burbujeando nitrógeno sobre la superficie del metal. El pH de la solución fue de 6.9 por lo que se consideró neutro. Las condiciones anteriores fueron establecidas simulando las condiciones de un medio ambiente salino natural.

Características de la probeta: Para materiales recubiertos por inmersión la porosidad se considera inexistente; espesor del acero galvanizado 20 μm, espesor para aluminizado y zinalquizado 200 μm evaluados mediante su observación en microscopio metalográfico con lentes graduados.

### 5.4.2 Mecánica del experimento

La mecánica elegida y aplicada en los experimentos fue como se enumera a continuación:

Para cada celda en lo particular, se aplican los siguientes primeros tres pasos a las 3 probetas:

- Medición de Erep de la probeta i durante 10 minutos o menos si el mismo es estable (i = 1 a 3).
- Aplicación de la técnica de Rp con velocidad de barrido de 30 mV/min y con límite de potencial de polarización de $\eta = \pm 20$ mV a la probeta i.
- Antes de aplicar la técnica voltamétrica, se permite la estabilización del sistema pasando a la siguiente probeta.

Aplicar los siguientes pasos solamente a las primeras 2 probetas:

- Debido a que el sistema se puede hallar todavía inestable como consecuencia de aplicar polarización de bajo campo,, se mide el Erep de la probeta j para conocer los límites de la polarización de alto campo (j = 1 a 2)

- Conocido el potencial de reposo, se aplica la técnica de voltametría estacionaria con los límites de polarización de $E_{polarización} = E_{rep} \pm 300$ mV a la probeta j, con pasos de $\eta = 20$ mV

### 5.4.3 Resultados

En esta sección se reportan los valores obtenidos tanto directamente de los experimentos como los resultados después de aplicar el primer método de Stern para obtener la velocidad de corrosión.

Dado que la presentación de gráficas con los valores del comportamiento de potenciales de reposo, resistencia de polarización y velocidades de corrosión, de probeta a probeta y día por día son extensos, se presentarán solo los valores finales y resultados en tablas y gráficas en forma comparativa entre las probetas de los diferentes recubrimientos.

Para las curvas voltamétricas, se presentan gráficas comparativas donde se sobreponen las cuatro probetas con los diferentes recubrimientos empleados a fin de permitir el análisis.

Al final se presentan los resultados de velocidad de corrosión obtenidos mediante las diferentes formas ya expuestas en este trabajo y mediante el uso del software "Voltamaster 1".

#### 5.4.3.1 Comportamiento del potencial de reposo respecto al tiempo

Se presentan los valores de potencial de reposo obtenidos durante los tres días que duraron los experimentos, más el de la cuarta probeta, en las tablas 5.49 y 5.51 los valores de potencial para cada material inmerso en cada medio seleccionado, de manera que se observe la variación de dichos valores de probeta a probeta y de cada una contra el tiempo. Debe recordarse que los potenciales se midieron mediante el uso de un electrodo de calomel saturado, ECS, como electrodo de referencia, el cual tiene un potencial de +244 mV respecto al electrodo de hidrógeno.

En las gráficas 5.51 a 5.57 se confrontan probeta a probeta los valores de $E_{rep}$ de los diferentes materiales involucrados en función del tiempo de exposición. Esto con el fin de hacer una comparación de forma termodinámica de los recubrimientos con respecto al material base, acero AISI1018.

#### 5.4.3.2 Variación de la resistencia de polarización (Rp) respecto al tiempo

En las tablas 5.58 y 5.59 se presentan los valores de resistencia de polarización obtenidos por medio de la aplicación de polarización de bajo campo, tomados durante los tres días que duraron

los experimentos propuestos en la metodología, más el de la cuarta probeta. Se reúnen en cada tabla los valores de resistencia de polarización para cada material inmerso en cada medio seleccionado, de manera que se observe la variación de dichos valores de probeta a probeta y de cada una contra el tiempo.

En las gráficas 5.60 a 5.66 se comparan probeta a probeta los valores de los diferentes materiales involucrados en función del tiempo de exposición en cada electrolito seleccionado. Esto con el fin de hacer una comparación de los valores respectivos del comportamiento de los recubrimientos con respecto al material base, acero 1018.

### 5.4.3.3 Gráficas de polarización potenciostática

Se presentan en la sección anexa en diagramas semi-logarítmicos, la comparación entre la probeta 1 de acero AISI 1018 con respecto a las tres probetas 1 recubiertas en su respectivo medio (Sulfato de Sodio y Cloruro de Sodio). Lo mismo para las probetas 2 y 3. Esto con el fin de observar y comparar el comportamiento termodinámico y cinético de cada probeta con relación a las demás y dar un comentario acerca de cual probeta presenta mejor conducta cinética.

La forma en la que se presentan las gráficas en el anexo al final del trabajo es la siguiente:

- Gráfica 5.67 probetas número 1 en sulfato de sodio, día 1
- Gráfica 5.68 probetas número 1 en sulfato de sodio, día 2
- Gráfica 5.69 probetas número 1 en sulfato de sodio, día 3
- Gráfica 5.70 probetas número 1 en cloruro de sodio, día 1
- Gráfica 5.71 probetas número 1 en cloruro de sodio, día 2
- Gráfica 5.72 probetas número 1 en cloruro de sodio, día 3
- Gráfica 5.73 probetas número 1 y 2 en cloruro de sodio, día 1
- Gráfica 5.74 probetas número 1 y 4 en cloruro de sodio, día 1

La discusión de las gráficas será realizada en el capítulo siguiente.

## 5.5 Evaluación de la resistencia a la corrosión (Cámara de niebla salina)

### 5.5.1 Ensayo de corrosión

Esta prueba se realizó con la ayuda de una cámara de niebla salina (ver fotografía 5.83) que se encuentra al servicio del Instituto de Investigación de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.
El primer paso es preparar las probetas, de acuerdo con la sección 4.4 del capítulo anterior, con recubrimiento de Zinalco y de aluminio, así como las de Acero 1018 sin recubrir. Cabe mencionar que la pieza de acero será utilizada en esta prueba para tener una probeta comparativa,

de tal manera que se puedan analizar y comparar los fenómenos de corrosión que se presenten entre las probetas.
Para efectuar el ensayo se prepararon probetas de 2.5 cm. X 1.5 cm. se armó una base de acrílico de 70 cm. de largo por 10 cm. de ancho donde fueron montadas las probetas a 5 cm. de separación entre probetas
Las probetas se protegieron con pintura en los cantos, en donde el acero no estaba recubierto por efecto de los cortes, para así evitar que se afectara dicho material en la prueba. Después de ser pintadas se pesaron en una báscula electrónica con 0.0001 gr. de precisión y se montaron las piezas.
La preparación de la cámara de niebla salina fue con base en la norma ASTM B 117, con las siguientes características:

a) Temperatura de la cámara = 35°C
b) Temperatura del humidificador = 35°C
c) Ciclo de trabajo de 59 minutos de trabajo por 1 minuto de paro por cada 24 hrs.
d) Concentración de sal al 3% (80 lts de agua X 2.4 Kg de sal)

La duración de la prueba fue de 8 días en los cuales se realizó la inspección diaria de los efectos del ataque corrosivo en la cámara de niebla salina sobre las probetas. Así como la toma de lecturas de peso para ver si existe pérdida debido a la corrosión, previa limpieza de las probetas, para eliminar la sal adherida al recubrimiento. La pérdida de peso registrada en los ocho días de la prueba es mostrada en la tabla 5.84 y en las gráficas 5.85 a 5.87 se muestra el comparativo del comportamiento de resistencia a la corrosión.

### 5.6 Evaluación de conformabilidad

Se realizaron pruebas a láminas de acero AISI 1018 sin recubrimiento y al mismo acero, pero con recubrimiento de Zinalco y de aluminio para obtener algunas de sus propiedades mecánicas y su diagrama de conformabilidad límite. La tabla 5.88 muestra las características principales de las piezas bajo estudio.
A continuación, se describen los procedimientos experimentales utilizados para el estudio de las láminas y se reportan los resultados obtenidos.

#### 5.6.1 Procedimiento experimental

Durante el desarrollo experimental de este trabajo se utilizó el ensayo de tracción para caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales. Para obtener el diagrama de conformabilidad límite se empleó un método de grabado electroquímico para generar un mallado circular (figuras 5.90 y 5.92), se realizaron pruebas de embutido mediante el ensayo Erichsen, y se empleó una técnica para medir la deformación en la malla por efecto del embutido.

Se elaboraron probetas de láminas de acero sin recubrimiento y con recubrimiento para ensayar según la norma ASTM E8 (*Tension testing of metallic materials*). La máquina universal de pruebas electromecánica se preparó empleando el programa para ensayo de tracción de láminas (los parámetros utilizados en el programa fueron tomados de la norma ASTM E8, velocidad del marco de carga 10 mm/min e instalando el herramental correspondiente, las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y a 250°C y 350°C ). Figuras 5.89 y Figuras 5.89 A y B. A cada probeta se le midió el ancho y el espesor de la zona de prueba (con el calibrador digital) y se cargaron en el programa; posteriormente, se le sujetó a las mordazas y fue sometida a cargas de

tracción hasta la ruptura, obteniendo su diagrama esfuerzo-deformación ingenieril. Estas se hicieron en la dirección del laminado (longitudinal), a 45 grados y a 90 grados (transversal), los resultados son mostrados en las tablas 5.93 y 5.95.

### 5.6.2 Diagrama de conformabilidad límite

Para obtenerlos los valores que son graficados en los diagramas se utilizó lo siguiente:

• Equipo para grabado electroquímico marca Etch-O-Matic, modelo super kit:
Profundidad de grabado: 0.00254 mm con corriente alterna, 0.07620 mm con corriente directa; Tiempo de grabado: 10 a 12 segundos, y superficie máxima de grabado: 101.6 X 50.8 mm.

• Máquina universal de pruebas servohidráulica marca Instron, modelo 1331, herramental para el ensayo Erichsen:
Capacidad: 100 KN; rango de la velocidad del marco de carga: 8.5 X $10^{-5}$ a 846.6 mm/min, deflexión del marco de carga: 0.16764mm.

• Regla flexible para medir porcentajes de deformación, considerando una longitud inicial de 2.5 mm:
Rango de medición: -50% a 105%, y resolución: 1%.

#### 5.6.2.1 Grabado

Las probetas para el ensayo Erichsen se grabaron con el equipo Etch-O-Matic de la siguiente manera: se limpió la superficie por grabar, eliminando grasa y polvo; se conectó el equipo a una toma de 110 volts, y la terminal de tierra a la lámina; sobre ésta, se colocó el *stencil* -con un patrón de mallado, un fieltro mojado con electrolito y la terminal positiva (ver figura 5.90), cerrando el circuito y manteniéndolo así, durante 10 segundos, para realizar la marca; por último, se agregó neutralizador a la zona del grabado, para suspender la reacción química, y se lavaron las probetas.

#### 5.6.2.2 Ensayo Erichsen

La máquina universal de pruebas servohidráulica se programó con una función rampa negativa y una velocidad de 0.08 mm/seg (rango 0.01 hz., multiplicador 1.84, 100% de desplazamiento). Se instaló el herramental como se muestra en la figura 5.91 A) y B) (los parámetros del ensayo y el herramental fueron normalizados según ASTM E-643 *Ball punch deformation of metallic sheet material*). Cada probeta, ya marcada, se lubricó con grasa grafitada en la zona de prueba; se prensó con el herramental, de manera que no se moviera durante el ensayo, y se deformó hasta el comienzo de la formación del cuello (lo cual se detecta con la caída súbita de la carga). En ese momento se detuvo la prueba. Se obtuvo una gráfica de carga contra desplazamiento para cada probeta (escala: 0.25 V/cm, en ambos ejes. Equivalencias: para la carga 10V=10ton y para el desplazamiento 10V=5.08cm). Se calcularon las cargas máximas soportadas y las profundidades de la copa Erichsen.

### 5.6.2.3 Método de medición

En las probetas Erichsen ensayadas se midieron las deformaciones principales; es decir, eje mayor y menor de las elipses resultantes del cambio de forma de los círculos grabados previamente. Se midieron las elipses donde se formó el cuello y las localizadas en las zonas adyacentes. Se utilizó una regla flexible, como se muestra en la figura 5.92. A y B.

Las deformaciones mayor y menor de cada elipse medida se graficaron en un diagrama de estado de deformación, distinguiendo los puntos de la zona de cuello (fallados) de los demás (sin falla). Así, se forman dos regiones en la gráfica, ligeramente traslapadas, que permiten ubicar la curva crítica o límite del diagrama de conformabilidad, ver gráficas 5.100 a 5.105.

Para complementar el diagrama y obtener los estados de deformación a la izquierda del eje vertical, se realizaron ensayos de tracción (cuatro de cada dirección: longitudinal cero grados, 45 grados y transversal 90 grados). Se ensayaron y se siguió el mismo método y criterio utilizado para las probetas Erichsen, midiendo las deformaciones principales y graficándolas en el diagrama de conformabilidad límite. Los valores promedio de los resultados de los ensayos de tensión y de embutido son presentados en las tablas 5.100 a 5.105.

## 5.6.3 Resultados del ensayo de tracción

En esta sección se presentan solamente tres tablas y las gráficas de los ensayos de tracción sobre puestas en una gráfica, la razón de esto, estriba en que son 90 los ensayos realizados, ya que los pruebas fueron realizados en la sección longitudinal, en la dirección a 45° y en la dirección de 90° respecto de la dirección de laminación para cada tipo de recubrimiento y seria demasiada la cantidad de gráficas que se tendrían que presentar, sin embargo el análisis de resultados fue realizado considerando todo los resultados obtenidos en tablas y gráficas. Las tablas y gráficas 5.93 presentan algunos de los resultados de los ensayos de tracción para el recubrimiento de zinalco y así mismo las tablas y gráficas 5.94 muestran algunos de los resultados de los ensayos de tracción para el recubrimiento de aluminio a diferentes temperaturas.

### 5.6.3.1 Resultados y datos del ensayo de Anisotropía y de embutido Erichsen.

La tabla 5.97 presenta los resultados del estudio de anisotropía que será considerada para su análisis en el siguiente capítulo, siendo las tablas 5.98 y 5.99 las que muestran algunos de los valores obtenidos del ensayo de embutido y otros calculados a partir de las mismas, así mismo se presentan las gráficas representativas obtenidas durante el ensayo.

### 5.6.3.2 Diagramas de conformabilidad límite (mediciones y gráficas)

Las lecturas realizadas en las piezas de ensayo Erichsen con recubrimiento de Aluminio en frío, a 250°C y a 350°C son mostradas en las tablas 5.100 a 5.102. Así mismo las correspondientes al Zinalco con las mismas temperaturas son presentadas en las tablas 5.103 a 5.105. Las gráficas de conformabilidad límite para cada uno de los ensayos de Aluminio y de Zinalco que se obtienen a partir de los datos de las tablas son mostradas en las gráficas que acompañan a cada tabla. Dichas gráficas serán analizadas en el capítulo siguiente.

# CAPÍTULO VI

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 6. Introducción:

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

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

## 6.1 Obtención del material recubierto (evaluación preliminar)

Es importante notar que durante la obtención del acero zinalquizado y aluminizado se realizaron varias pruebas a diferentes temperaturas y tiempos de inmersión con la finalidad de determinar los parámetros óptimos en la obtención del recubrimiento, los cuales se muestran en las gráficas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.9 para el recubrimiento de zinalco y 4.10 para el de aluminio, en las cuales se observa lo siguiente:

a) De la gráfica 4.5 se observa que a temperatura de 700 °C, la variación del espesor de recubrimiento con respecto al tiempo de inmersión en el zinalco fundido, tiende a incrementarse desde 1.3 hasta 5 mm con tendencia lineal ya que el crecimiento del recubrimiento es directamente proporcional con el tiempo de permanencia en el metal líquido. Una aproximación a la tendencia de la recta que se obtiene como comportamiento es la siguiente ( $y = 0.1306x + 1.4050$ ), la cual fue obtenida mediante el método de mínimos cuadrados.

b) De la gráfica 4.6 se aprecia que cuando el zinalco fundido se encuentra a temperaturas inferiores a 550 °C, la variación del espesor de recubrimiento no presenta cambios significativos, ya que a los diferentes tiempos de permanencia en el metal, la capa de recubrimiento se mantiene entre 0.91 y 1.07 mm por lo cual se establece que a esta temperatura el tiempo de inmersión no influye de modo sustancial en el espesor del recubrimiento. En la gráfica 4.7 al utilizar una escala mayor se aprecia que a esta temperatura, el recubrimiento permanece constante independientemente del tiempo de inmersión en el zinalco líquido dentro de los rangos estudiados.

c) De la gráfica 4.9 al incluir todos los resultados se deduce que el espesor de recubrimiento en el rango de temperaturas de 480°C (punto de fusión del zinalco) a 600°C es casi constante, de 600 a 650°C el recubrimiento presenta un incremento importante en el espesor y de 650 a 700°C vuelve a ser constante y de 700 a 770°C aumenta con respecto a la temperatura en una proporción que se adecua a la siguiente ecuación cuadrática:

$$y = -1E\text{-}04\ x^2 + 0.1502\ x - 56.754$$

La ecuación anterior fue obtenida mediante el software del programa "*Mathemática*" utilizable en PC, introduciendo los valores de los puntos de la curva en donde se presenta inflexión.

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

De la experimentación realizada en la generación del recubrimiento de zinalco se deduce que la temperatura más adecuada para realizar el recubrimiento es de 600°C, ya que a esta temperatura no se presenta el efecto de crecimiento del recubrimiento. En cuanto al tiempo de inmersión y con base a pruebas preliminares de la resistencia del recubrimiento, se estima que el más adecuado para lograr el recubrimiento es del orden de 5 a 10 minutos, seleccionando 5 minutos por ser menor tiempo.

Con relación al recubrimiento de aluminio en la gráfica 4.10 se presentan los resultados de las pruebas realizadas en la generación del recubrimiento. De ello se determina que el espesor del recubrimiento de aluminio se incrementa en relación lineal con el incremento de temperatura (750 a 850°C) y también con el tiempo de permanencia del acero en el aluminio líquido (3 a 15 minutos), del análisis de las gráficas y a su comportamiento lineal como función de las variables del proceso (tiempo y temperatura), se establece que el tiempo de inmersión sea de 5 min. (Para ser compatible con el tiempo de inmersión del zinalco) y la temperatura de 800°C por ser el valor medio de temperatura estudiado.

### 6.1.2 Análisis de resultados de la prueba de microdureza.

- **Para ambos recubrimientos**

Con base en las gráficas 5.45 y 5.46 "Comparativo de micro-durezas" y en las "Tabla 5.43 y 5.44 de los Resultados de micro-durezas promedio", se puede decir que, en las diferentes probetas tanto para los recubrimientos de zinalco, como para los de aluminio, el material base (acero AISI 1018), presentan muy poca variación en el valor de dureza, que tiene como promedio de 221.16 Vickers para el caso de los recubrimientos con zinalco y de 181.19 para los recubrimientos con aluminio, los cuales no varían mucho del valor de dureza inicial del acero, siendo esta de 195 Vickers; demostrando así que el acero no fue afectado de manera drástica en su dureza, ni en su microestructura al ser recubierto mediante el zinalco o el aluminio o por alguno de los otros procesos posteriores al recubrimiento (como recocido a diferentes tiempos desde 1 hasta 5 horas, o por el proceso de laminado de 20% y 40% de reducción).

Realizando la comparación de dureza entre la parte externa y la interfase de los recubrimientos, de las probetas tenemos que en ambos recubrimientos en general la interfase o intermetálico es más dura que la parte externa del recubrimiento, debido al compuesto Fe-Al que se forma en los dos tipos de recubrimientos, dada la mayor afinidad del aluminio con el acero.

- **Para los recubrimientos de zinalco**

Haciendo referencia a la gráfica 5.45 en la que se presenta en diagrama de barras la dureza que presentaron los recubrimientos de zinalco en sus diferentes zonas, se puede determinar que el recubrimiento en la zona externa presenta una dureza promedio de 118.5 en la escala Vickers, el cual no varía en forma significativa con respecto al de el zinalco puro, lo que es adecuado ya que la parte externa del recubrimiento esta formada de acuerdo con el análisis químico por la composición del zinalco.
Así mismo en la gráfica es notorio que las probetas que fueron recocidas presentan un intermetálico de mayor dureza, propiciado por la difusión de aluminio hacia el metal base, los cuales forman un intermetálico Fe-Al, de gran dureza y fragilidad, lo cual se confirma con su composición química. La dureza promedio de las probetas recocidas en la zona de intermetálico es de 325 Vickers, siendo de 140 para las probetas sin recocido.

- **Para los recubrimientos de aluminio**

Con relación a la dureza de los recubrimientos de aluminio y de acuerdo con la gráfica 5.46 se puede determinar que el recubrimiento en la zona externa presenta una dureza muy variada dependiendo del proceso posterior al que fueron sometidas las probetas después del recubrimiento, sin presentar un patrón de comportamiento ya que algunas probetas recocidas presentan mayor dureza que otras y lo mismo sucede con las que fueron laminadas. Bajo esta apreciación y siendo más especifico, podemos mencionar que el recubrimiento externo que presenta el mínimo es de 28.7 Vickers en la probeta 91 (enfriada al medio ambiente y laminada 20% y recocida 2 hr.) y el máximo es 81.9 Vickers que se presenta en la probeta 71 (enfriada al medio ambiente y recocida 4 hrs.), el valor promedio de dureza en el recubrimiento exterior es de 48.3 Vickers y comparado con el valor de dureza del aluminio antes del proceso que fue de 35.8 Vickers.

Donde existe una mayor variación en los valores de dureza es en la zona intermetálica, donde ésta alcanza un mínimo de 204.66 en la probeta 50 (solo inmersión) y un máximo de 348.0 Vickers en la probeta 91 (laminada 20% y recocida 2 hrs.), en este caso la mayoría de las probetas presenta un valor similar de dureza siendo el promedio de 298.6 Vickers. De acuerdo a lo anterior podemos corroborar que las fases intermetálicas presentan mayor dureza, aún mayor que la del material base propiciada por el compuesto Fe-Al que se forma en esta zona y la dureza del intermetálico aumenta con el proceso de laminación.

### 6.1.3 Análisis de resultados del espesor del recubrimiento.

Analizando el valor del espesor de las piezas con base en las gráficas 5.47 para el recubrimiento de zinalco y la 5.48 para el recubrimiento de aluminio se puede establecer lo siguiente:
El espesor de los recubrimiento de zinalco y aluminio es difícil de controlar, ya que se depositan formando grumos irregulares sobre la superficie del metal base, sin embargo se pueden controlar

mediante el control de la temperatura del metal líquido, como se muestra en las gráficas 4.9 y 4.10, y se puede lograr ajustar y/o lograr un mejor acabado superficial mediante la aplicación de un proceso de laminación posterior a la inmersión.
En el caso del recubrimiento de zinalco (gráfica 5.47), éste mantiene su tamaño durante el tratamiento térmico de recocido, presentando un pequeño crecimiento del intermetálico. El valor promedio del intermetálico cambio de 20 a 54μm por efecto del tratamiento térmico, permaneciendo constante en su espesor cuando se aplicó el proceso de laminación. El valor promedio que lograron los recubrimientos de zinalco desde la zona de intermetálico hasta el exterior del recubrimiento es de 223μm.valor que se considera excesivo ya que 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), sin embargo, podemos afirmar que este proceso está dentro de un rango útil de protección.
Para los recubrimientos de aluminio (gráfica 5.48), el espesor promedio es de 85μm y presenta un gran incremento en proporción con el tiempo de duración en tratamiento térmico de recocido, incrementado hasta en un 100% por el crecimiento de estructuras columnares, propiciadas por la difusión de aluminio hacia el metal base, lo cual hace que el intermetálico incremente su tamaño por efecto de difusión, siendo en algunos casos superior a la capa externa del recubrimiento. Observar que los valores alcanzan un mínimo de 23.2 en la probeta 61 ( recocida 2 hrs.) y un máximo de 198.28 μm en la probeta 56 (recocida 1hr.), dando como promedio 85.8 μm .

Si consideramos sólo las piezas que fueron laminadas, se observa que el recubrimiento es de mayor espesor respecto al del intermetálico y esto es por que en estas probetas no se ha generado el efecto de difusión.

## 6.2 Análisis de los resultados de microscopía. (Se presentan en forma de tabla para facilitar el análisis)

En esta sección se estudian las microscopías obtenidas de los recubrimientos de zinalco (Sección anexa figuras 5.1 a 5.22) y aluminio (Sección anexa figuras 5,23 a 5.42), identificando las características de cada recubrimiento, con relación a espesor, dureza, composición química y observaciones del recubrimiento. (El número de probeta corresponde con el número de muestra observada en microscopia electrónica)

Tabla 6.2.1 Observaciones generales del recubrimiento de zinalco

| *Probeta* No. | Característica | Zona | Espesor En mμ | Dureza Promedio Vickers | Composición Química *Porcentaje de* | | | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Zn | Al | Cu | Fe | |
| 1 | Inmersión en metal fundido | Metal base | ---- | 234.33 | 0.37 | 0 | --- | 99.63 | Se aprecia la región correspondiente al acero perfectamente delimitada. |
| | | Intermetálico | 45 | 332.66 | 19.66 | 50.84 | 2.21 | 27.29 | El espesor es homogéneo. La región se encuentra constituida por granos pequeños y compactos. |
| | | Recubrimiento | 130 | 151.66 | 81.00 | 10.35 | --- | 8.65 | Está constituido por un porcentaje predominante de Zn y proporciones semejantes de Al y Fe. Los granos están bien definidos. El espesor de la zona es homogéneo. |
| 6 | Recocido 1 hr. | Metal base | ---- | 294.00 | 0.26 | 0.10 | --- | 99.65 | No se aprecian cambios en esta zona con respecto a la probeta anterior. |
| | | Intermetálico | 28 | 120.66 | 18.80 | 30.45 | 1.07 | 49.68 | El espesor es menor que en el caso anterior, pero bastante homogéneo. Se presentan algunas grietas a lo largo de todo el intermetálico. |
| | | Recubrimiento | 250 | 160.00 | 77.75 | 14.54 | --- | 7.71 | Se observan granos bien consolidados y compactados se tiene gran presencia de Zn en los limites de grano. |
| 11 | Recocido 2 hr. | Metal base | ---- | 203.00 | --- | --- | --- | --- | El metal base no presenta cambios. |
| | | Intermetálico | 64 | 357.66 | 26.0 | 43.57 | 2.17 | 28.26 | Se nota un desplazamiento del intermetálico hacia la zona superior del recubrimiento. Se presentan formas geométricas debido a la difusión del aluminio contenido en esta zona hacia el recubrimiento. |
| | | Recubrimiento | 275 | 132.66 | 86.43 | 10.12 | 3.08 | 0.37 | Los granos están bien alineados y son pequeños, hay presencia de Zn en los límites de grano, se tienen algunas porosidades en el recubrimiento, su tamaño es homogéneo. |

Continuación de la Tabla 6.2.1

| *Probeta* No. | Característica | Zona | Espesor En $m_{\mu}$ | Dureza Promedio Vickers | Composición Química *Porcentaje de* | | | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Zn | Al | Cu | Fe | |
| **16** | Recocido 3 hr. | Metal base | ---- | 230.00 | --- | --- | --- | --- | No se observan grandes cambios en esta zona respecto al metal base en las probetas anteriores. |
| | | Intermetálico | 95 | 252.66 | 20.96 | 38.66 | .84 | 39.55 | El espesor no es homogéneo. Se forman algunas ondulaciones debido a la difusión del aluminio contenido en esta zona hacia el recubrimiento, existen porosidades en esta zona y algunas cavidades. |
| | | Recubrimiento | 295 | 166.00 | 75.05 | 16.30 | 2.57 | 1.07 | La microestructura está muy bien definida, los granos son pequeños y hay una gran presencia de Zn en sus límites, se tienen algunas pequeñas porosidades en la superficie del recubrimiento. |
| **21** | Recocido 4 hr. | Metal base | ---- | 229.00 | --- | --- | --- | --- | Similar al metal base de las probetas anteriores. |
| | | Íntermetálico | 52 | 310.00 | --- | --- | --- | --- | El espesor es homogéneo, se concentran grandes cantidades de porosidades, cavidades y grietas. |
| | | Recubrimiento | 433 | 196.33 | --- | --- | --- | --- | Es notable la presencia de porosidades en todo el recubrimiento. |
| **26** | Recocido 5 hr. | Metal base | ---- | 184.33 | --- | --- | --- | --- | Similar al metal base de las probetas anteriores. |
| | | Intermetálico | 69 | 330.33 | 20.97 | 40.77 | 1.01 | 37.25 | El espesor es muy homogéneo, hay una gran concentración de porosidades y se presentan cavidades cerca del metal base. |
| | | Recubrimiento | 139 | 161.33 | 71.42 | 18.73 | 2.8 | 7.05 | Se puede observar granos pequeños con una gran cantidad de Zn en su límite. La presencia de porosidades va en aumento, principalmente en la superficie. |
| **31** | Laminada 20% | Metal base | ---- | 210.33 | --- | --- | --- | | Similar al metal base de las probetas anteriores. |
| | | Ínter-metálico | 20 | 111.00 | 7.68 | 52.60 | 0.74 | 38.98 | Tiene un espesor pequeño pero homogéneo, se nota la difusión del aluminio existente en ésta zona hacia el metal base, se notan algunas grietas muy pequeñas. |
| | | Recubrimiento | 152 | 98.23 | 84.84 | 7.78 | --- | 7.31 | Se tienen los granos muy bien definidos, grandes y alargados. |

Continuación de la Tabla 6.2.1

| *Probeta* No. | Característica | Zona | Espesor En mμ | Dureza Promedio Vickers | Composición Química *Porcentaje de* | | | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Zn | Al | Cu | Fe | |
| 36 | Laminada 40% | Metal base | ---- | 216.66 | --- | --- | --- | --- | Similar al metal base de las probetas anteriores. |
| | | Intermetálico | 18 | 181.33 | --- | --- | --- | --- | Se tiene un intermetálico muy delgado y en algunas zonas se puede observar que no hay intermetálico, se observan pocas grietas. |
| | | Recubrimiento | 274 | 104.66 | --- | --- | --- | --- | Es notoria la deformación de los granos debido a la laminación. Se muestran granos grandes y alargados, contiene algunas pequeñas grietas principalmente en la zona más externa. |
| 41 | Laminada 20% Recocida 2 hr. | Metal base | ---- | 212.00 | --- | --- | --- | --- | No se observan cambios importantes en comparación con las otras muestras. |
| | | Intermetálico | 12 | 124.66 | 11.58 | 48.06 | 1.15 | 39.21 | El intermetálico tiene un espesor muy pequeño el cual en algunos sitios desaparece, muestra algunas grietas causadas probablemente por efecto de la laminación. La línea de unión con el metal base es muy irregular. |
| | | Recubrimiento | 178 | 132.00 | 55.30 | 41.59 | 2.38 | 0.73 | Se tiene granos alargados y grandes, presenta zonas que contienen porcentajes similares de Al y Zn. |
| 46 | Laminada 40% Recocida 2 hr. | Metal base | ---- | 203.33 | --- | --- | --- | --- | Similar al metal base de las probetas anteriores. |
| | | Intermetálico | 16 | 132.33 | --- | --- | --- | --- | En algunas zonas ya no hay intermetálico, se encuentran zonas agrietadas, hay algunas porosidades y las regiones son bien definidas. |
| | | Recubrimiento | 224 | 128.66 | --- | --- | --- | --- | Hay granos alargados y grandes. Se encuentran muy bien diferenciados cada uno de los elementos, se tiene en gran parte del recubrimiento áreas constituidas principalmente por Al. |

Tabla 6.2.2 Observaciones Generales del Aluminizado

| *Probeta* No. | Característica | Zona | Espesor En mμ | Dureza Promedio Vickers | Composición Química *Porcentaje de* | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Al | Fe | |
| **50** | Inmersión en metal fundido | Metal base | ---- | 216.00 | 0.0 | 98.9 | Se observa la separación entre el metal base y la capa de intermetálico, con ligera tendencia de crecimiento del intermetálico hacia el metal base. |
| | | Intermetálico | 40 | 204.66 | 53.79 | 45.57 | Se tiene un espesor homogéneo. Se muestran pequeñas grietas en el espesor del intermetálico. Los porcentajes de Al y Fe son muy semejantes. |
| | | Recubrimiento | 123 | 48.10 | 95.87 | 3.38 | Su espesor es homogéneo. Presenta porosidades que inician en la superficie y se prolongan a la zona media del recubrimiento. Existe agrietamiento multidireccional. |
| **56** | Recocido 1 hr. | Metal base | ---- | 191.33 | ---- | ---- | Muy semejante al metal base de la probeta anterior. |
| | | Intermetálico | 58 | 279.33 | ---- | ---- | Se tiene un espesor homogéneo. Se muestran grietas en toda la zona y se observa una fractura probablemente ocasionada por el corte. Se muestra la difusión del aluminio hacia el metal base dando origen al comienzo de una estructura columnar. |
| | | Recubrimiento | 200 | 48.83 | ---- | ---- | El espesor es homogéneo. Las porosidades han disminuido en cantidad respecto a la probeta anterior. Se muestra claramente como se forma el intermetálico por la difusión de Al hacia metal base. |
| **61** | Recocido 2 hr. | Metal base | ---- | 183.33 | 0.60 | 99.40 | Se observan difusiones aisladas de aluminio hacia el metal base en forma de gruesos cristales columnares. |
| | | Intermetálico | 77 | 304.66 | 49.59 | 50.41 | El espesor es variable. Existen áreas muy fracturadas, con grietas que van del intermetálico hacia el metal base, se observan estructuras columnares bien definidas ocasionadas por la difusión del aluminio. |
| | | Recubrimiento | 23 | 64.63 | 95.17 | 4.83 | Su espesor es comparativamente muy pequeño, se tienen muchas porosidades cercanas a la superficie, y se aprecian algunas grietas. |

Continuación de la Tabla 6.2.2

| *Probeta* No. | Característica | Zona | Espesor En mμ | Dureza Promedio Vickers | Composición Química *Porcentaje de* | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Al | Fe | |
| **66** | Recocido 3 hr. | Metal base | ---- | 131.33 | 0.46 | 99.54 | Muy semejante al metal base de la probeta 31. |
| | | Intermetálico | 80 | 256.00 | 51.12 | 48.88 | Disminuye la presencia de grietas en esta zona, con fragmentación bien definida de los granos y crecimiento de los mismos, el espesor es homogéneo, hay algunas porosidades aisladas. |
| | | Recubrimiento | 57 | 41.33 | 96.14 | 3.86 | Se genera una gran densidad de porosidades en toda la región del recubrimiento, su espesor en general resulta homogéneo. |
| **71** | Recocido 4 hr. | Metal base | ---- | 189.33 | ---- | ---- | Muy semejante al metal base de la probeta anterior. |
| | | Intermetálico | 66 | 283.33 | ---- | ---- | Hay grietas muy grandes a lo largo de la zona, y algunas grietas más pequeñas a lo ancho, el espesor no es homogéneo, el intermetálico tiende al crecimiento y se observan algunas regiones con porosidades. |
| | | Recubrimiento | 75 | 81.90 | ---- | ---- | Las porosidades aumentan en tamaño y van desde la superficie hacia la zona media del recubrimiento, en algunas zonas el espesor es muy delgado. |
| **76** | Recocido 5 hr. | Metal base | ---- | 158.66 | ---- | ---- | Muy semejante al metal base de las probetas anteriores. |
| | | Intermetálico | 62 | 297.00 | 58.79 | 41.21 | Su espesor vuelve a ser homogéneo, se tiene grietas muy grandes en todas direcciones, existen agrupamientos de estructuras columnares y en algunas zonas existen porosidades. |
| | | Recubrimiento | 43 | 35.36 | 97.37 | 2.63 | Existen grietas que van de la superficie a la parte media del recubrimiento, hay gran cantidad de porosidades, su espesor no es homogéneo. |

Continuación de la Tabla 6.2.2

| *Probeta No.* | Característica | Zona | Espesor En mμ | Dureza Promedio Vickers | Composición Química *Porcentaje de* | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Al | Fe | |
| **81** | Laminada 20% | Metal base | ---- | 176.33 | ---- | ----- | En este caso es poca la difusión del aluminio hacia el acero. |
| | | Intermetálico | 57 | 317.33 | 52.34 | 47.66 | Su espesor es delgado y en unas zonas tiende a desaparecer, hay grietas ocasionadas por el proceso de laminación, no hay porosidades. No se observan las estructuras columnares definidas en los casos anteriores. |
| | | Recubrimiento | 80 | 47.83 | 97.77 | 2.23 | Hay grietas que surgen desde la superficie hacia el intermetálico, se tienen algunas porosidades. |
| **86** | Laminada 40% | Metal base | ---- | 219.33 | ---- | ---- | Se muestran algunas zonas aisladas donde se presenta difusión del aluminio hacia el metal base. |
| | | Intermetálico | 52 | 297.66 | ---- | ---- | Esta zona se encuentra muy fracturada, hay agrietamientos severos, su espesor es homogéneo, hay algunas porosidades. |
| | | Recubrimiento | 84 | 53.90 | ---- | ---- | Existen grietas ocasionadas por la laminación que van desde superficie hasta el intermetálico, hay grandes porosidades sobre todo en la superficie. |
| **91** | Laminada 20% Recocida 2 hr. | Metal base | ---- | 166.66 | ---- | ---- | La difusión del aluminio es muy poca por lo que casi no hay intermetálico. |
| | | Intermetálico | 34 | 348.00 | 49.08 | 50.92 | El poco intermetálico que hay se encuentra agrietado en la parte media, su espesor no es homogéneo y en algunas zonas tiende a desaparecer. |
| | | Recubrimiento | 100 | 28.76 | 98.82 | 1.18 | No existen grietas en la zona del recubrimiento, hay porosidades dispersas en casi toda la superficie del recubrimiento y en la parte media. Su espesor tiende a ser homogéneo. |
| **96** | Laminada 40% Recocida 2 hr. | Metal base | ---- | 179.66 | ---- | ---- | No se observan que el metal cambie sus características iniciales por la escasa difusión del Al. |
| | | Intermetálico | 64 | 319.33 | ---- | ---- | Se encuentra grietas de gran tamaño a lo largo de toda la zona, aparentemente ocasionadas por la laminación. El espesor es homogéneo, no hay porosidades en esta zona que tiende a formar estructuras columnares. |
| | | Recubrimiento | 40 | 32.86 | ---- | ---- | En algunas zonas el recubrimiento es muy delgado, presenta porosidades y muestra grietas en varias partes. |

### 6.2.3. Análisis cualitativo de ambos recubrimientos

Aunque los factores estéticos no son considerados primordiales en el objetivo del presente estudio, a continuación se comentarán algunas peculiaridades observadas a simple vista mientras se efectuaron los procesos de recubrimiento.

Una valoración puramente visual muestra que se obtiene un tono grisáceo brillante para el recubrimiento de aluminio, mientras que para el recubrimiento de zinalco se obtiene una tonalidad gris más oscura y opaca. En ambos casos se obtuvieron superficies ligeramente rugosas, pero éstas pueden convertirse en totalmente lisas con un proceso de laminación posterior a la extracción de las probetas del metal fundido.

Después de extraer las piezas de la inmersión se aprecia un aspecto más uniforme en las probetas recubiertas con zinalco, lo que evidencia probablemente una mejor adherencia del metal de recubrimiento sobre el metal base.

En términos generales se observó que el acabado superficial es un factor que depende mucho de las condiciones en que se efectúe el proceso de inmersión, así como de la extracción de las piezas, donde influyen factores tales como el control de la escoria durante el proceso, la técnica de extracción de las piezas así como su velocidad, el tipo de enfriamiento, etc.

### 6.2.4. Identificación de las fases en los recubrimientos

Para determinar las fases presentes en las diferentes zonas de cada recubrimiento se emplearon los análisis químicos correspondientes a cada muestra en conjunto con la interpretación del diagrama de equilibrio correspondiente.

En una sección transversal de muestras sometidas a aluminizado o zinalquizado por inmersión en caliente, para todos los casos analizados se presentan esencialmente tres zonas: una capa superficial formada por el elemento de recubrimiento prácticamente puro; una capa de transición constituida por dos o más fases cuyas composiciones están en función de la temperatura del baño, el tiempo de inmersión, la velocidad de enfriamiento y las características superficiales del metal base; y una capa interna delimitada por la zona de difusión del intermetálico, por lo que a partir de este límite se encuentra el metal base.

### 6.2.4.1. Fases presentes en el aluminizado

Para determinar las fases presentes en las diferentes zonas de este recubrimiento se utilizó como base el diagrama binario **Fe-Al** y los resultados de la composición química de los revestimientos, presentados en las tablas anteriores.

1.- Las fases que se presentan en la probeta que no tiene ningún proceso posterior a su recubrimiento son:

*Intermetálico:* En esta zona se puede detectar una fase $\zeta$ la cual está constituida de $FeAl_2$ y la fase $\eta$ la que está constituida por $Fe_2Al_5$. En general, la dureza de esta zona es elevada debido al alto contenido de Fe presente en los compuestos.

*Recubrimiento:* Ésta región está compuesta por una fase rica en *Al*, por lo que resulta ser una zona más bien dúctil.

2.- En las probetas que tienen un proceso de recocido posterior, las fases que se encuentran dependen del período de tiempo que fueron recocidas. En éstas probetas se pueden encontrar varias combinaciones de fases, dependiendo de que tanto se difunde predominantemente, el aluminio hacia el metal base.

*Intermetálico*: Una fase $\zeta$ la cuál está constituida por $FeAl_2$, otra fase $\eta$ la cual está constituida por $Fe_2Al_3$, y una tercera fase $\theta$ la cuál está constituida por $FeAl_3$ que consta de un alto porcentaje de *Fe* que hace muy dura y frágil esta zona.

*Recubrimiento:* nuevamente es una zona rica en aluminio con lo cual la fase de *Al*, es la que predomina en esta zona.

3.- Las probetas que fueron laminadas tienden a presentar fases muy similares a las anteriores pero en estas se dan una combinación de ambas

*Intermetálico:* En esta zona las fases presentes son $\zeta$ y $\eta$, las cuales se encuentran de la forma $\zeta + \eta$ con las composiciones químicas antes mencionadas.

*Recubrimiento:* Nuevamente se tiene un gran porcentaje de aluminio dando como resultado una fase rica en *Al*.

4.- Las probetas que fueron laminadas y posteriormente recocidas no presentan cambios en cuanto a las fases presentes en sus diferentes zonas con respecto a las que solo fueron laminadas. En el intermetálico se tienen fases $\zeta$ y $\eta$, mientras que en el recubrimiento se presenta la fase *Al* como en las anteriores probetas.

### 6.2.4.2.- Fases presentes en el zinalquizado

Para determinar las fases presentes en estos recubrimientos y para tratar de generar una primera explicación, se utilizaron los diagramas binarios **Fe-Al** para la zona del intermetálico y el diagrama binario de fases **Al-Zn** para la zona del recubrimiento.

1.- Para la probeta que cuenta únicamente con el recubrimiento se presentan varias combinaciones de fases en las distintas zonas:

*Intermetálico:* En esta zona se tiene una combinación del tipo $\zeta+\eta$ las cuales tienen las características antes mencionadas por la presencia de ***Fe*** nuevamente resulta en una estructura muy frágil.

*Recubrimiento:* En esta zona se forma una combinación de fases pero ahora de otro tipo $(\alpha+\beta)$, una de ellas es la fase $\alpha$ la cuál está constituida por alrededor del 98% de aluminio y la otra fase es $\beta$ que está constituida prácticamente del 99% Zinc, de acuerdo a los análisis químicos, obteniéndose así que esta región es de baja dureza.

2.- Las probetas a las que se aplicó el proceso de recocido presentan una fase o fases combinadas dependiendo de la difusión que tuvo el aluminio hacia el metal base durante el periodo en que sé dio dicho proceso.

*Intermetálico:* las fases que probablemente se encuentren en esta zona dependiendo del periodo de recocido son: una fase $\beta_2$ la cual esta constituida por ***FeAl***, y las fases $\zeta$ y $\eta$ con las características anteriormente mencionadas, se pueden presentar en forma de combinación o solas $(\beta_2, \eta \quad \beta_2+\zeta)$ dependiendo del tiempo de recocido.

*Recubrimiento:* en esta zona nuevamente se encuentra una combinación de fases, las cuales son nuevamente una fase $\alpha$ y una fase $\beta$, con las características antes mencionadas.

3.- En las probetas que fueron laminadas se siguen formando fases $\alpha$ y $\beta$ combinadas en el recubrimiento, mientras en el intermetálico solo se encontró una fase $\eta$.

En las probetas que fueron laminadas y recocidas, también se forman las fases combinadas de $\alpha$ y $\beta$ pero en este caso la fase que se forma en el intermetálico es $\zeta$.

Nota:
Los análisis realizados nos entregan solo una aproximación de las fases y las composiciones químicas presentes en los recubrimientos.

### 6.2.5. Análisis comparativo

Tabla 6.2.3 Análisis comparativo de las probetas de zinalco

| Probeta No. | Característica | Zona | Espesor [mμ] | Dureza Promedio Vickers | Espesor | Porosidad | Agrietamiento | Fases presentes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | inmersión en metal fundido | Metal base | ---- | 234.33 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 45 | 332.66 | Homogéneo | Baja | Nulo | $\zeta$, $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 130 | 151.66 | Homogéneo | Nula | Nulo | $\alpha$, $\beta$ |
| 6 | Recocido 1hr. | Metal base | ---- | 294 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 28 | 120.66 | Homogéneo | Nula | Medio | $\beta_2$ |
| | | Recubrimiento | 250 | 160 | Homogéneo | Baja | Nulo | $\alpha$, $\beta$ |
| 11 | Recocido 2hr. | Metal base | ---- | 203 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 54 | 357.66 | No Homogéneo | Regular | Medio | $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 275 | 132.66 | Homogéneo | Regular | Nulo | $\alpha$, $\beta$ |
| 16 | Recocido 3hr. | Metal base | ---- | 230 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 95 | 252.66 | No Homogéneo | Regular | Baja | $\zeta$, $\beta_2$ |
| | | Recubrimiento | 295 | 166 | Homogéneo | Alta | Nulo | $\alpha$, $\beta$ |
| 21 | Recocido 4hr. | Metal base | ---- | 229 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 52 | 310 | Homogéneo | Alta | Medio | ---- |
| | | Recubrimiento | 433 | 196.33 | Homogéneo | Alta | Nulo | ---- |
| 26 | Recocido 5hr. | Metal base | ---- | 330.33 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 69 | 161.33 | Homogéneo | Alta | Medio | $\zeta$, $\beta_2$ |
| | | Recubrimiento | 139 | 210.33 | Homogéneo | Alta | Bajo | $\alpha$, $\beta$ |
| 31 | Laminada 20% | Metal base | ---- | 210.33 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 20 | 111 | Homogéneo | Baja | Bajo | $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 152 | 98.23 | No Homogéneo | Baja | Nulo | $\alpha$, $\beta$ |
| 36 | Laminada 40% | Metal base | ---- | 216.66 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 18 | 181.33 | No Homogéneo | Baja | Muy Alto | ---- |
| | | Recubrimiento | 274 | 104.66 | Homogéneo | Baja | Bajo | ---- |
| 41 | Laminada 20% Recocida 2hr. | Metal base | ---- | 212 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 12 | 124.66 | No Homogéneo | Baja | Bajo | $\zeta$ |
| | | Recubrimiento | 178 | 132 | No Homogéneo | Baja | Bajo | $\alpha$, $\beta$ |
| 46 | Laminada 40% Recocida 2hr. | Metal base | ---- | 203.33 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 16 | 132.33 | No Homogéneo | Baja | Bajo | ---- |
| | | Recubrimiento | 224 | 128.66 | Homogéneo | Baja | Bajo | ---- |

Tabla 6.2.4 Análisis comparativo de las probetas de aluminio

| Probeta No. | Característica | Zona | Espesor [mμ] | Dureza Promedio Vickers | Espesor | Porosidad | Agrietamiento | Fases presentes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | Inmersión en metal fundido | Metal base | ---- | 216.00 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 40 | 204.66 | Homogéneo | Baja | Alto | $\zeta$, $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 123 | 48.10 | Homogéneo | Regular | Regular | Al |
| 56 | Recocido 1hr. | Metal base | ---- | 191.33 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 58 | 279.33 | Homogéneo | Nula | Alto | ---- |
| | | Recubrimiento | 200 | 48.83 | Homogéneo | Baja | Regular | ---- |
| 61 | Recocido 2 hr. | Metal base | ---- | 183.33 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 77 | 304.66 | Homogéneo | Nula | Regular | $\zeta$, $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 23 | 64.63 | Homogéneo | Nula | Baja | Al |
| 66 | Recocido 3 hr. | Metal base | ---- | 131.33 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 80 | 256.00 | Homogéneo | Baja | Bajo | $\zeta$, $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 57 | 41.33 | Homogéneo | Regular | Medio | Al |
| 71 | Recocido 4 hr. | Metal base | ---- | 189.33 | ---- | Baja | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 66 | 283.33 | No Homogéneo | Baja | Alto | ---- |
| | | Recubrimiento | 75 | 81.90 | No Homogéneo | Regular | Medio | ---- |
| 76 | Recocido 5 hr. | Metal base | ---- | 158.66 | ---- | Baja | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 62 | 297.00 | Homogéneo | Baja | Alto | $\theta$ |
| | | Recubrimiento | 43 | 35.36 | No Homogéneo | Regular | Alto | Al |
| 81 | Laminada 20% | Metal base | ---- | 176.33 | ---- | Baja | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 57 | 317.33 | No Homogéneo | Baja | Medio | $\zeta$, $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 80 | 47.83 | No Homogéneo | Regular | Medio | Al |
| 86 | Laminada 40% | Metal base | ---- | 219.33 | ---- | Baja | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 52 | 297.66 | Homogéneo | Baja | Muy Alto | ---- |
| | | Recubrimiento | 84 | 53.90 | Homogéneo | Regular | Alto | ---- |
| 91 | Laminada 20% Recocida 2 hr. | Metal base | ---- | 166.66 | ---- | Nula | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 34 | 348.00 | No Homogéneo | Nula | Regular | $\zeta$, $\eta$ |
| | | Recubrimiento | 100 | 28.76 | Homogéneo | Regular | Bajo | Al |
| 96 | Laminada 40% Recocida 2 hr. | Metal base | ---- | 179.66 | ---- | Baja | Nulo | ---- |
| | | Intermetálico | 64 | 319.33 | Homogéneo | Nula | Alto | ---- |
| | | Recubrimiento | 40 | 32.86 | No Homogéneo | Regular | Regular | ---- |

### 6.2.6. Análisis comparativo del aluminizado

En primer término hablaremos de las principales características que se muestran en las probetas que fueron recocidas.

*Recubrimiento:* Respecto a ésta zona, ninguno de los tratamientos de recocido parece afectar notablemente su dureza (Gráfica 5.46), y no se muestran variaciones considerables en relación a su espesor, que si bien presenta una forma regular en casi todos los casos, varía de tamaño en cada probeta sin presentar alguna tendencia de comportamiento definida.

Por otra parte se observó que las mejores características en cuanto a minimizar la porosidad y agrietamiento, se encuentran en el intervalo de 1 a 2 horas de recocido.

*Intermetálico:* La dureza de ésta capa aumenta conforme se eleva el tiempo de recocido, hasta llegar al tratamiento de 4 horas de recocido, en que el valor de la dureza comienza a disminuir.

De manera semejante, el espesor (Gráfica 5.45) de la zona del intermetálico aumenta en relación directa al tiempo de recocido, hasta llegar a un tiempo de recocido de 4hr.

*Probetas laminadas y recocidas:* Las probetas que fueron laminadas con recocido posterior presentan el mayor índice de dureza en relación con las demás probetas. Siendo las laminadas exclusivamente las que siguen en dureza. El intermetálico se ve notablemente afectado en el proceso de laminación con reducción de 20 y 40%, siendo en el primer caso, en el que se obtiene la dureza más alta.

El espesor de estas probetas no presenta un rango de variación importante en sus respectivas capas.

Las probetas que fueron laminadas y posteriormente recocidas presentan la dureza más baja de todas en la zona del recubrimiento.

Sin embargo, para estos procesos resultó que a partir del 40% de laminación el agrietamiento aumenta notablemente tanto en el intermetálico como en el recubrimiento.

### 6.2.7- Análisis comparativo del zinalquizado

De igual forma comenzaremos a hablar de las características de las probetas que fueron recocidas en los diferentes periodos de tiempo.

*Recubrimiento:* En la zona del recubrimiento se observa que el espesor aumenta conforme aumenta el tiempo de recocido, excepto en el intervalo de recocido de 5 hr. en que el espesor (Gráfica 5.47) de esta zona vuelve a ser muy semejante al espesor inicial sin recocido, además el intermetálico tiende a migrar hacia la parte externa de la capa de recubrimiento con el tiempo de permanencia del tratamiento térmico.

Al aumentar el tiempo de recocido se aprecia un aumento en la proporción de aluminio en ésta zona, mientras que los porcentajes de zinc y de hierro tienden a disminuir, excepto en el

recocido de 5 hr. en que la proporción de hierro se eleva y es muy semejante al caso de recocido durante una hora. Pese a estas tendencias, los valores de la dureza en ésta zona se encuentran dentro de un rango estrecho, poco variable por efecto del recocido o de los cambios en la proporción de los elementos.

En cuanto a la calidad del recubrimiento, es a partir de las 3 hr. de recocido que se observa un notable aumento en el número de porosidades, lo cual se debe a la migración acelerada de átomos propiciada por el tratamiento térmico.

*Intermetálico:* Para la capa de intermetálico, el tamaño de su espesor varía en cada periodo de recocido, sin presentar alguna tendencia evidente de comportamiento.

Para esta zona, al igual que en la del recubrimiento se observa una clara tendencia hacia el aumento en el número de porosidades conforme se aumenta el tiempo de recocido, siendo a partir de las 3 hr. de recocido en que resulta notablemente alto este efecto.

Con respecto a la dureza (Gráfica 5.45) del intermetálico, ésta resulta muy variable, posiblemente debido a que al efectuarse la medición de microdureza en un determinado punto, la proporción de fases que abarque la medición, es muy pequeña, con lo cual es razonable que varíe con respecto a otro punto en que se tome la medición, aún dentro de la misma zona, ya que la estructura microscópica de ésta capa, se caracteriza por presentar varias combinaciones de fases.

Al igual que para la zona del recubrimiento, la composición química de los elementos presentes en ésta zona presenta algunas variaciones notables, sobre todo en el caso del recocido por una hora donde el aluminio disminuye aproximadamente 20 puntos porcentuales con respecto a la probeta sin recocido, mientras que para los recocidos de entre 3 y 5 hr. la disminución es de 10 puntos con respecto a la probeta sin recocido.

Es notorio que para los procesos de 3, 4 y 5 hr. de recocido la composición química de los elementos presentes se mantiene casi invariable, resultando los cambios más drásticos a considerar en los casos de 1 y 2 hr. de recocido.

En todos los casos, la zona del intermetálico presenta cierto grado de agrietamiento, sin embargo éste no ocurre en función del tiempo de recocido, ni parece verse afectado por él, a diferencia de la porosidad que es notoria desde las 2 hr. de recocido y se vuelve muy alta a partir de las 4 hr. de recocido.

*Metal base:* Para la capa del sustrato, al igual que en las probetas recubiertas con aluminio, es prácticamente imperceptible, algún tipo de efecto causado por los procesos de recocido, laminado o laminado con recocido.
En todos los casos la separación entre el metal base y la capa de aleación aparece perfectamente definida.

*Probetas laminadas y recocidas:* Las probetas laminadas y laminadas con posterior recocido presentan mucha semejanza en cuanto a su espesor tanto en la zona del intermetálico (que no

disminuye marcadamente por efecto del aumento en el porcentaje de laminación), como en la zona del recubrimiento.

Al aumentar el porcentaje de laminación, en la zona del recubrimiento parece homogeneizarse en su espesor, sin embargo la zona del intermetálico se caracteriza por presentar espesores variables.

Por otra parte, la dureza en la zona de recubrimiento se eleva al aumentar el porcentaje de laminación, al igual que en las probetas laminadas y recocidas, mientras que en el intermetálico ésta propiedad se mantiene en un rango de valores poco variable.

La porosidad es independiente del porcentaje de laminación y considerando que la presencia de porosidades inicia su generación en tiempos de recocido superior a 3 horas las probetas laminadas y recocidas no presentan porosidad

Respecto al agrietamiento, éste es reducido en casi todos los casos, excepto en la probeta laminada 40%, ya que en la zona del intermetálico presenta grandes fracturas.

### 6.2.8- Ventajas de cada recubrimiento

Algunas de las ventajas encontradas para cada uno de los tipos de recubrimiento se mencionan a continuación:

Para el zinalquizado:

- El proceso de fundición ocurre a menor temperatura, lo cual trae asociado un menor gasto de energía que en el caso del aluminio.
- El Zinalco es más económico en México que el Aluminio por lo que el recubrimiento también lo será
- Se obtienen piezas recubiertas de aspecto uniforme, por lo que no requieren algún proceso posterior para mejorar su acabado.
- Presenta mejor resistencia a la corrosión que el acero galvanizado en ambientes marinos.
- El espesor del recubrimiento se puede variar según se requiera.

Para el aluminizado:

- Su resistencia a la corrosión es excelente en ambientes oxidantes y en procesos a altas temperaturas (debido a que la capa exterior adquiere propiedades superficiales semejantes al metal de recubrimiento).

- Se logran piezas con acabado brillante, y aunque su aspecto es más rugoso que para el zinalquizado, un proceso de laminación posterior (menor al 40%), mejora su aspecto superficial.

### 6.3 Análisis de las pruebas de corrosión.

En esta sección se realizará el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de corrosión, en primera etapa en relación con las pruebas realizadas con el potenciostáto y posteriormente en las realizadas en la cámara de niebla salina.

#### 6.3.1 Potencial de corrosión en sulfato de sodio como electrolito y usando un electrodo de calomel saturado como electrodo de referencia.

De los valores presentados en la tabla 5.49, así como de las gráficas 5.51 a 5.53 que corresponden a la prueba en sulfato de sodio, se puede observar un comportamiento más catódico en el aluminizado respecto a los recubrimientos de galvanizado y zinalquizado, así mismo, los potenciales de los recubrimientos de galvanizado y zinalquizado son menores que el aluminizado y que el acero, lo que sugiere que los primeros ofrecerían mayor protección a la corrosión del acero que el aluminizado, sobre todo en este tipo de electrolito, siendo los productos de corrosión de naturaleza protectora. En los resultados se aprecia que el aluminizado es más noble que el acero probablemente por la generación de óxidos protectores en la superficie de este, que inhiben o pasivan el efecto corrosivo del acero. Con los potenciales de zinalquizado y galvanizado se encuentra que ambos, protegerían al acero ya que son más activos. Se observa también la tendencia a disminuir del valor del potencial de corrosión para aluminizado y zinalquizado, es decir se vuelven ligeramente más nobles con el tiempo, situación contraria a la que se presenta para el acero1018 y galvanizado.

Para el caso del cloruro de sodio, en la tabla 5.50 y en las gráficas 5.54 a 5.57 se nota en todos los casos, que para el acero 1018 se encuentra el menor potencial comparado los recubrimientos de aluminio, zinc y zinalco, denotando, en principio, que cada material utilizado como recubrimiento debe ser capaz, en teoría, de proporcionar protección catódica al acero. La termodinámica indica que al existir dos materiales en contacto, el que se corroe es aquel con potencial de reducción más negativo en el sistema. Entonces, desde este punto de vista, se puede decir que cualquiera de estos recubrimientos deberá proteger al acero 1018 de la corrosión en un medio acuoso de tipo marino, ya que es más anódico respecto a éste.

También, se observa la disminución del potencial del acero, lo que indica que se vuelve más activo conforma transcurre el tiempo. Caso contrario se observa con el aluminizado y el galvanizado para los cuales su potencial tiende a ser más positivo, manifestando que conforme transcurre el tiempo el material se vuelve más noble respecto a su potencial del primer día.

### 6.3.2 Variación de la resistencia de polarización (Rp) respecto al tiempo

En teoría, los valores de resistencia de polarización deben ser mayores cuando la superficie metálica cuenta con un recubrimiento o productos de corrosión. Siempre que los productos de corrosión no fuesen porosos y/o presenten grietas, ya que la técnica no es aplicable en superficies porosas por la alta resistividad que se presenta. En este caso aunque los recubrimientos presentan un nivel bajo de porosidad, se efectuará la prueba de **Rp** (resistencia de polarización), para intentar obtener el valor de la misma para los recubrimientos generados de zinalco y aluminio.

Para sulfato de sodio gráfica 5.60 a 5.62, se observa un valor alto de **Rp** para el aluminizado con tendencia a un valor de 30 $k\Omega cm^2$ y para el zinalquizado la Rp aumenta con el tiempo, con lo que se puede afirmar la existencia de una capa protectora en la superficie de cada material. En los casos del acero 1018 y del galvanizado, sus valores de Rp se mantienen constantes o tienden a disminuir con el tiempo, lo que en oposición del aluminizado y zinalquizado indica que los materiales mantienen un comportamiento estable o se corroen con mayor rapidez conforme pasa el tiempo.

Para el caso del cloruro de sodio gráficas 5.63 a 5.66, se observa que el recubrimiento de zinalco presenta la mayor resistencia de polarización, seguida del aluminizado en segundo termino y finalmente el galvanizado solo antes del acero desnudo, lo cual es lógico ya que es conocida la baja resistencia del galvanizado en medios marinos[77]. En general se observa que el zinalquizado ofrece un nivel más alto de resistencia de polarización, seguida por el aluminizado y finalmente el galvanizado. Se considera que esto es correcto debido a la mayor agresividad del medio.

### 6.3.3 Discusión de Gráficas de polarización potenciostática en sulfato de sodio.

En las probetas número 1 (Gráfica 5.67) en solución de sulfato de sodio, el aluminizado y el acero 1018 presentan el mismo potencial de equilibrio lo cual no es de esperarse ya que según la serie estándar de potenciales, al aluminio le corresponde un valor menor que al acero, con respecto al electrodo normal de hidrógeno, por lo cual la explicación más lógica de éste comportamiento es que el recubrimiento presenta porosidad, (los potenciales obtenidos en los experimentos fueron realizados con un ECS, el cual tiene un potencial de +244 mV con respecto al electrodo de hidrógeno). La densidad de corriente del aluminizado es menor en general que la del acero, siendo menor la velocidad de corrosión de éste, con respecto al resto de los materiales cuando se trabaja en este medio como se verá adelante. El zinalquizado presenta un potencial de reposo mayor (más noble) que el galvanizado, y su densidad de corriente es mayor, por lo que el primer día el zinalco exhibe una corrosión más acelerada que los otros 3 materiales.

En el día 2 (Gráfica 5.68) los potenciales de reposo de los metales han sufrido cambios. Para el aluminizado es más noble (catódico), lo que confirma la presencia de poros en el recubrimiento, permaneciendo de igual manera companrado contra los otros materiales. Para el zinalquizado ocurre también una disminución de potencial, además de presentar una densidad de corriente menor que se refleja en la disminución de la velocidad de corrosión, lo cual es propiciado por la pasivación que presenta éste recubrimiento y que se confirma por el cambio en la pendiente de la curva correspondiente en la rama anódica. El acero se desplazó

hacia potenciales más activos presentando mayor degradación por corrosión del material. El galvanizado permaneció estable sin cambios significativos.

En el día 3 (Gráfica 5.69) el aluminio permanece con la misma conducta sin alteración por ataque del electrolito, lo cual se explica como ya se indico previamente por la presencia de porosidades en el recubrimiento. El acero presenta un comportamiento más anódico (los productos de la corrosión son muy notables en la celda electrolítica así como en el electrolito), la capa de óxido como ya se menciono protege al material sin corroer, aunque esta capa no sea del todo protectora si reduce la formación de iónes $Fe^{2+}$. La densidad de corriente del zinalco disminuye debido tal vez a productos de corrosión depositados sobre su superficie que inhiben la continuación del proceso corrosivo y al efecto de pasivación presentado por la gráfica. El galvanizado presenta una despolarización ya que su comportamiento es más anódico y su densidad de corriente aumenta, aumentando la velocidad de corrosión en este medio.

### 6.3.3.1 Discusión de Gráficas de polarización potenciostática en cloruro de sodio

En la gráfica 5.70 el potencial de corrosión del acero 1018 es más anódico con respecto a los recubrimientos de aluminizado, galvanizado y zinalquizado. Esto es normal si tomamos en cuenta la tabla de potencial estándar, en la que el acero se encuentra ubicada en potenciales más nobles con respecto a los otros 3 recubrimientos utilizados

En la gráfica del día 2 (Gráfica 5.71), el potencial de corrosión del acero se ha vuelto más activo, y también su densidad de corriente ha aumentado lo que indica que el acero se corroe más rápido que el día anterior. Aunque la curva del acero presente formación de posibles capas de óxido, estas no son capaces de proteger al material del medio. En el caso del aluminizado en el que su potencial de corrosión se vuelve más positivo (más catódico) y presenta una disminución de la densidad de corriente, aquí tal vez sí se puede hablar de micropelículas protectoras de óxido de aluminio mismas que permiten que el material se comporte de esta forma. El recubrimiento de zinalco presenta un desplazamiento positivo (variación anódica) con respecto al día anterior y con respecto al galvanizado, sin embargo, presenta una pasivación que permite establecer la existencia de una capa protectora (efecto del recubrimiento) que consigue disminuir la densidad de corriente, y por ende su velocidad de corrosión. El galvanizado presenta un pequeño incremento de la densidad de corriente, con lo cual, a diferencia del zinalco, incrementa su velocidad de corrosión.

Para el día 3 (Gráfica 5.72) se observa que el potencial de corrosión del acero es aún más anódico, la densidad de corriente no ha variado, y además la formación de productos de corrosión sobre su superficie, que de alguna manera protegen a éste, es más clara. El aluminizado presenta una película que no podía ser bien apreciada en el día 2, la cual reduce la velocidad de corrosión por efecto de la pasivación presentada en la gráfica. El recubrimiento de zinalquizado muestra un potencial de corrosión mayor inclusive que el del aluminizado, así como una película (recubrimiento) protectora que logra reducir la velocidad de corrosión del zinalco, y por lo tanto del acero, en este medio. El galvanizado al final de la zona anódica presenta una curvatura que puede ser una capa protectora o alguna sal en la superficie del material y que de alguna manera ocasiona fluctuación en el resultado.

Los experimentos que se realizaron con las probetas 2 y 4 (Gráficas 5.73 y 5.74) en solución de cloruro de sodio, presentan prácticamente el mismo comportamiento que el de la probeta 1 por lo cual los comentarios con relación a estas se consideran similares, siendo los aceros aluminizados y zinalquizados los que ofrecen la mayor resistencia a la corrosión en esta prueba.

### 6.3.3.2 Velocidad de corrosión

En las Tablas 5.75 a 5.78 se presentan los valores de velocidad de corrosión calculados para las 4 probetas de cada material, reuniendo en cada tabla los valores de velocidad de corrosión por día y se presentan de manera que se observa la variación de dichos valores de probeta a probeta y de cada una contra el tiempo.

Los valores presentados fueron calculados de la siguiente manera:

- Resistencia de polarización considerando al recubrimiento como metal desnudo y aplicando para B el valor de 0.026 V, donde $B = b_a b_c / 2.303(b_a + b_c)$ y $b_a = b_c = 0.120$ V,
- Resistencia de polarización utilizando las pendientes anódica y catódica obtenidas por medio de polarización de alto campo. Se conocen $b_a$ y $b_c$,
- Extrapolación de Tafel donde se toma el valor de corriente en la intersección de las rectas de Tafel, (se presenta con detalle en la siguiente sección 6.3.3.2.1)
- Velocidad de corrosión obtenida por medio del software proporcionado en el equipo.

### 6.3.3.2.1 Extrapolación de Tafel

La extrapolación de la relación lineal entre $E$ y $log\ (i)$ a $E_{corr}$ corresponde a una reacción de corrosión controlada por la transferencia de carga, permitiendo determinar la corriente de corrosión, $i_{corr}$ tal y como se muestra en la figura:

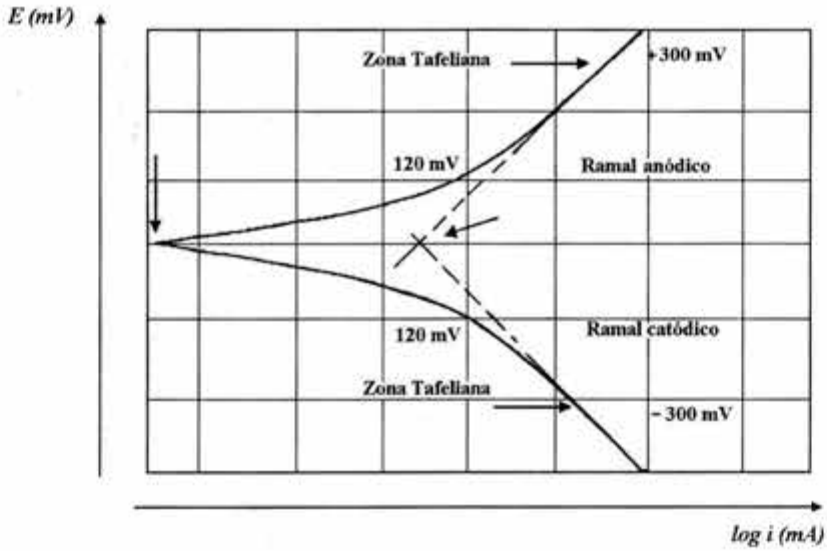



Figura . Diagrama representativo de la técnica de Extrapolación de Tafel

La velocidad de corrosión puede calcularse de la siguiente manera:

$$V.C. = i_{corr}(A) \times \left(\frac{C}{1A-S}\right) \times \frac{I}{F}\left(\frac{1eq}{96500C}\right) \times \frac{1}{n}\left(\frac{1mol}{\#eq}\right) \times P.M.\left(\frac{\#gr}{mol}\right) \times \frac{1}{\delta}\left(\frac{1cm^3}{\#gr}\right) \times \frac{1}{A}\left(\frac{1}{cm^2}\right) = \frac{cm}{s}$$

$$V.C,(m.p.y.) = V.C.\left(\frac{cm}{s}\right) \times \frac{1in}{2.54cm} \times \frac{1mpy}{1\times10^{-3}in} \times \frac{3600}{1hr} \times \frac{24h}{1dia} \times \frac{365dias}{1año} = m.p.y.$$

Donde:
$mpy$ = Milipulgadas por año
$i_{corr}$ = Corriente de corrosión — Amperes
$F$ = constante de Faraday (C/eq)
$n$ = Número de equivalente electroquímicos (eq/mol)
$P.M.$ = Peso molecular de la especie que se corroe (gr/mol)
$\delta$ = Densidad (gr/cm$^3$)
$A$ = Área de exposición (trabajo, cm$^2$)
Las rectas de Tafel anódica y catódica están descritas por la ecuación de Tafel:

$$\eta = b \log \frac{i}{i_{corr}}$$

$$\eta = b(\log i \pm \log i_{corr})$$

siendo $b$ la pendiente de Tafel.

La ecuación anterior corresponde al modelo general de una recta ($y = mx + a$). Luego, una representación gráfica de $\eta$ vs. $log\ i$ debe ser una recta de pendiente $b$ y ordenada en el origen de $\boldsymbol{b\ log(\ i_{corr})}$. Las pendientes de Tafel anódica y catódica, $b_a$ y $b_c$, pueden determinarse de las ramas anódica y catódica de la representación gráfica $\eta$ vs. $log\ i$ . Se expresan las pendientes de Tafel en *mV/década.*

La ecuación de Tafel es una aproximación de la ecuación general de la ecuación de Butler-Volmer para una reacción electroquímica controlada por el proceso de transferencia de carga.

Retomando nuevamente esta expresión:

$$i = i_0 \left\{ \exp\left( \frac{\alpha F \eta_a}{RT} \right) - \exp\left( \frac{-(1-\alpha) n F \eta_C}{RT} \right) \right\}$$

Para un $\eta^* > 120$ mV, se tiene:

$$i_a = i_0 \exp\left( \frac{\alpha n F \eta_a}{RT} \right)$$

$$\log i_a = \log i_0 + \frac{\alpha n F \eta_a}{2.303 RT}$$

despejando - $\eta_a$

$$\eta_a = \left( \frac{2.303 RT}{\alpha n F} \right) \log \frac{i_a}{i_0}$$

$$\eta_a = b_a \log \frac{i_a}{i_0}$$

* $\eta$ es el sobrepotencial aplicado= $E_{apl} - E_{corr}$

Este método está basado en la teoría electroquímica de los procesos de corrosión desarrollada por Wagner y Traud[82].

Respecto a las curvas de polarización éstas pueden obtenerse en estado estacionario o bien en estado no estacionario, al igual que en condiciones galvanostáticas o potenciostáticas, polarizando el electrodo hasta sobrepotenciales, $\eta >> RT/F^2$ debido a esta gran polarización aplicada al electrodo de trabajo, es posible que tengan lugar cambios irreversibles sobre éste.

En muchos sistemas que presentan corrosión uniforme en medio ácido, las velocidades de corrosión determinadas por este método presentan una buena concordancia con los resultados obtenidos por las mediciones de pérdida de peso.
Sin embargo, en los sistemas que contienen oxígeno en soluciones de ácido débil, neutras o alcalinas, la densidad de corriente de corrosión está determinada por el proceso de reducción del oxígeno, el cual está controlado por difusión, como se muestra de forma ejemplificada en la siguiente ecuación con su respectiva gráfica.

$$I_{corr} = I_{anódica}\left(cuando: E_{trabajo} = E_{corr}\right) = I_{l\,dO_2}$$

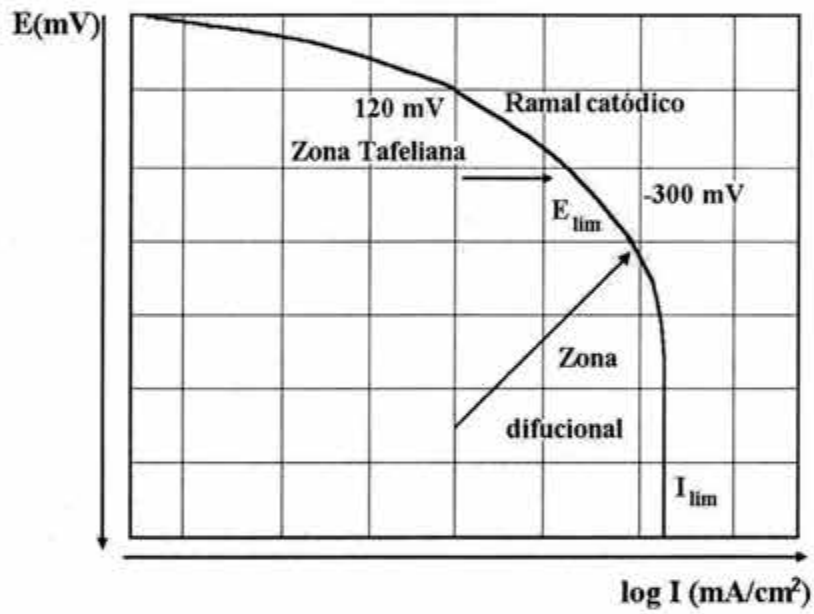



Figura Diagrama representativo del mecanismo por control difusional

Donde, $I_{l\,dO2}$ la densidad de corriente límite de difusión para la reducción del oxígeno. En estas condiciones, sobre la superficie del metal, se forman capas voluminosas y porosas de productos de corrosión. De aquí que la velocidad de corrosión deba ser dependiente del tiempo y de las condiciones hidrodinámicas. En este caso, la comparación entre los resultados analíticos y

electroquímicos resulta difil, sin embargo también existen análisis de la misma naturaleza pero para el caso de curvas de polarización, de ellas se desprende el llevado a cabo por Siebert[82] . Aquí se menciona que para la obtención de las curvas de polarización anódicas, éstas se pueden generar a partir de dos métodos electroquímicos, la diferencia entre uno u otro difiere

tan solo en la velocidad del cambio del potencial eléctrico aplicado, para ello la necesidad de caracterizar la velocidad de barrido.
Una velocidad de barrido alta 60 V/h generalmente es aplicada para indicar las regiones donde se desarrolla una intensa actividad anódica, mientras que una velocidad de barrido lenta indicaría posibles regiones de actividad anódica. Un barrido rápido minimiza la formación de una capa pasiva, observándose que la corriente de salida es cada vez mayor, por el contrario, una velocidad de barrido cercana a cero promueve una estabilidad electroquímica en la superficie metálica, siempre y cuando el ambiente corrosivo no modifique las condiciones del metal.

La norma ASTM G5-87[72] que describe el procedimiento de cómo debe de llevarse a cabo una polarización, es una referencia obligada cuando se quiere polarizar con una velocidad de barrido lenta y sobre todo de cómo mantener el ambiente en condiciones reproducibles.

### 6.3.4 Análisis de corrosión ( Cámara de niebla salina)

En esta sección se analizan los resultados relativos a la prueba de corrosión realizada en la cámara de niebla salina, los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 5.83 y en las gráficas 5.84 a 5.87.

#### 6.3.4.1 Análisis de corrosión del recubrimiento de zinalco

De acuerdo a los datos de pérdida de peso obtenidos en la prueba y al ser graficados (gráfica 5.86), la probeta con enfriamiento al medio ambiente laminada 20% es la que más peso perdió de las cinco en estudio, en relación con el recubrimiento de zinalco, esto es debido a la presencia de zinc en la parte externa del recubrimiento, ya que esté actúa como ánodo de sacrificio (se corroe) a favor del acero 1018 que actúa como cátodo. El sistema bajo el cual se protege al acero en este caso se conoce como "protección catódica con ánodo de sacrificio", esta probeta es la que contiene la mayor cantidad de zinc en la parte externa del recubrimiento, siendo además la probeta con mayor dureza.

En cambio analizando la pieza que menos peso pierde, que resulta ser la enfriada al medio ambiente laminada y recocida durante 2 hrs., en este caso, la pérdida de peso se debe a que en la parte externa del recubrimiento, existe una combinación de zinc y aluminio casi en el mismo porcentaje, lo que hace que el aluminio forme una película de óxido de aluminio (pasivación anódica) que lo hace resistente a la corrosión. Es decir, que con este efecto, no se permite que exista una gran pérdida de peso, como en los demás casos de estudio, donde el porcentaje de zinc en el exterior es grande. De igual manera pasa en la probeta enfriada al medio ambiente con recocido de 1 hora, la cual también tiene un nivel bajo de peso debido a la presencia de mayor proporción de aluminio en la zona externa del recubrimiento.

Si, comparamos la pérdida de peso de las cinco probetas con la de acero 1018 sin recubrimiento, esta perdió 90 milésimas de gramo (0.090 grs.) con respecto al peso original, durante los 8 días de duración de la prueba, si se considera a la pérdida de peso de la probeta de acero 1018 como el 100% por ser la que mayor peso perdió, entonces la diferencia en la pérdida de peso de las probetas es muy notable, teniendo en consideración que la probeta que

más peso perdió es la de "enfriamiento al medio ambiente laminada 20%" con 21milésimas de gramo (0.021 grs.), que representa el 23% del peso perdido con respecto al acero sin recubrir. Realizando la comparación con las demás probetas, tenemos la siguiente tabla:

Tabla 6.3.1 Análisis comparativo de las probetas recubiertas con zinalco

| COMPARATIVO DE PÉRDIDA DE PESO ENTRE ACERO AISI 1018 Y RECUBRIMIENTOS CON ZINALCO | | |
|---|---|---|
| Probeta | Peso perdido (grs.) 8 días | Peso perdido (%) |
| Acero AISI 1018 (Mayor pérdida, considerado 100%) | 0.009 | 100% |
| Enfriamiento medio ambiente laminado 20% | 0.021 | 23.30% |
| Enfriamiento medio ambiente | 0.0152 | 16.80% |
| Enfriamiento medio ambiente recocido 2 hrs. A 350° C | 0.0114 | 12.60% |
| Enfriamiento medio ambiente recocido 1hr.a 350° C | 0.0091 | 10.10% |
| Enfriamiento medio ambiente laminado 20% recocido 2 hrs. 350° C | 0.006 | 6.60% |

Analizando la tabla, se observa que la probeta que menos peso pierde es la enfriada al medio ambiente laminada 20% y recocida durante 2 hrs. A 350°C, que representa el 6.6% de pérdida total con respecto al acero sin recubrir, esta probeta, por lo tanto es la probeta más conveniente para ser utilizada, debido a todo lo antes mencionado (tamaño de espesor, dureza, análisis químico y protección contra la corrosión), y si consideramos que la prueba se realizó en probetas cuya superficie fue de 3.75 $cm^2$ donde el acero pierde 0.090 grs. de peso y la probeta considerada pierde apenas 0.0068 grs. de peso, si consideramos las dimensiones de una lamina comercial de 3 x 6 pies = 1.6722 $m^2$ tenemos que el acero 1018 sin recubrir perdería, si se siguiera corroyendo en la misma proporción 401.34 gramos en 8 días, al mes serian 1605.3 grs. y al año se tendría una pérdida de 19264.3 gramos.
En cambio si usamos la lámina de acero con el recubrimiento sugerido, tenemos que se perdería 26.75 gramos en 8 días, al mes serían 107.02 gramos y en el año se perderían 1284.26gramos, lo que se pierde en el acero 1018 sin recubrir en 1 mes, los resultados en resumen para el recubrimiento de zinalco y de aluminio se muestran en la tabla 6.3.3

### 6.3.4.2 Análisis de corrosión del recubrimiento de aluminio

En este caso, como era de esperarse, las probetas protegidas con el recubrimiento de aluminio pierden menos peso (independientemente del proceso utilizado para el recubrimiento) que el acero AISI 1018 sin recubrimiento. Esto es debido a que en el recubrimiento de acero con aluminio, la capa más externa está constituida por aluminio, el cual al estar en contacto con el medio corrosivo produce en su superficie una capa de óxido ($Al_2O_3$), sin embargo la oxidación (primera capa formada) no es 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 la corrosión 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 a las del aluminio logrando así reunir en un material una buena resistencia frente a determinados medios corrosivos.

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 forma, pues ocupa un gran volumen el óxido formado y se desprende de la superficie, exponiendo al metal fresco que se continúe oxidando.

Analizando los resultados obtenidos y presentados en la tabla 5.84 y en la gráfica 5.85 y 5.87 en la prueba 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 en general presentan un buen nivel de resistencia a la corrosión, esto debido a que este tipo de recubrimiento permite que exista un acomodo homogéneo y una mayor difusión del aluminio al acero, aunque la probeta con enfriamiento al medio ambiente y laminada 20% presenta un mejor comportamiento durante el ensayo, ya que se encuentra entre las probetas que perdieron menos peso.

Por el contrario las probetas que fueron enfriadas al medio ambiente y recocidas presentan mayor porcentaje de pérdida en peso.

Si se observan los resultados desde el proceso de laminación, se aprecia que este proceso de 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 del proceso de recubrimiento, provocando así mayor posibilidad de que se inicie la corrosión en estas zonas, aunque las fracturas y grietas existen, las probetas laminadas son las que perdieron menos peso, posiblemente porque el recubrimiento se compacta y los granos se alargan ofreciendo mayor protección. En el caso de la probeta enfriada al medio ambiente y laminada 20% se obtuvo una pérdida de peso de 0.0016 grs. en ocho días de exposición al ambiente salino, así podemos calcular que la pérdida en un año será de 0.077 grs. en una pieza que pesó inicialmente 8.4176 grs., siendo el área expuesta de 3.75 $cm^2$.
Si realizamos el comparativo con una lámina de tamaño comercial 3x6 pies = 1.6722 $m^2$, tendremos que el acero AISI 1018 sin recubrimiento perdería 401.37 gramos en ocho días, siendo al mes 1605.3 grs. y al año19264.3 grs. En cambio para la misma lamina de 3x6 pies de acero AISI 1018 recubierto con aluminio con enfriamiento al medio ambiente y laminado 20% se tiene que perdería 0.077 grs. en 8 días y al mes serían 0.313grs., siendo al año 3.76 grs. lo

que representa una pérdida de 1.7% respecto de lo que pierde el acero AISI 1018 sin recubrimiento.

Por otro lado la probeta que perdió mayor peso, fue la enfriada al medio ambiente y recocida 2 hrs., esta probeta obtuvo un espesor de intermetálico pequeño, que aunque el recubrimiento de aluminio tuvo 26μm es heterogéneo a lo largo de la superficie recubierta, así que en varias zonas la capa intermetálica se encuentra en contacto con el ambiente salino sin la presencia de una capa protectora de Al puro que sé pasivará y detendría el proceso de corrosión, así se puede explicar la pérdida de peso de 0.0086 en ocho días dando como resultado 0.41 grs. En un año, con una pieza de peso inicial de 8.493 grs. Otro factor por el cual existe mayor pérdida de peso 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, de igual forma se puede decir que la densidad de grietas se acentúa al utilizar un enfriamiento rápido después de que la probeta es aluminizada, así como por el proceso de laminación posterior. Por último, analizando las probetas enfriadas al medio ambiente y recocidas 1hr y 2 hrs., se determina que estas probetas presentan pérdida de peso significativamente más alto, lo cual puede ser propiciado por el tratamiento térmico, 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 , pero con mayor posibilidad de oxidación por la presencia de un intermetálico más heterogéneo constituido de hierro y aluminio, el cual presenta mayor índice de corrosión.

En las tablas siguientes se presenta el comparativo de pérdida de peso entre acero y recubrimientos de aluminio, así como la tabla comparativa entre acero AISI 1018 y el mejor recubrimiento de zinalco y de aluminio en relación con su resistencia a la corrosión.

Tabla 6.3.2 Análisis comparativo de las probetas recubiertas con aluminio

| COMPARATIVO DE PÉRDIDA DE PESO ENTRE ACERO AISI 1018 Y RECUBRIMIENTOS CON ALUMINIO | | |
|---|---|---|
| Probeta | Peso perdido (grs.) 8 días | Peso perdido (%) |
| Acero AISI 1018 (Mayor pérdida, considerado 100%) | 0.009 | 100% |
| Enfriamiento medio ambiente recocido 2hrs. 550° C | 0.0086 | 9.5% |
| Enfriamiento medio ambiente laminado 20% recocido 2hrs. | 0.0060 | 6.6% |
| Enfriamiento medio ambiente recocido 1hra. 550° C | 0.0055 | 6.1% |
| Enfriamiento medio ambiente | 0.0018 | 2.0% |
| Enfriamiento medio ambiente laminado 20% | 0.0016 | 1.7% |

Tabla 6.3.3 Análisis comparativo del recubrimiento de zinalco y de aluminio con relación al acero sin recubrimiento.

| COMPARATIVO EN PÉRDIDA DE PESO PARA LAMINA DE 3X6 PIES SIN RECUBRIMIENTO Y CON RECUBRIMIENTO | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PROBETA | PÉRDIDA EN 8 DÍAS | | PÉRDIDA EN 1 MES | | PÉRDIDA EN 1 AÑO | |
| | (Gramos) | (%) | (Gramos) | (%) | (Gramos) | (%) |
| Acero SAE 1018 sin recubrimiento | 401.34 | 100% | 1605.3 | 100% | 19264.3 | 100% |
| Acero SAE 1018 recubierto con zinalco enfriado al medio ambiente laminado 20% y recocido 2 hrs. A 350° C | 26.75 | 6.60% | 107.02 | 6.60% | 1284.26 | 6.60% |
| Acero SAE 1018 recubierto con aluminio enfriado al medio ambiente laminado 20% | 7.13 | 1.77% | 28.54 | 1.77% | 342.46 | 1.77% |

Con relación a los resultados obtenidos en las pruebas electroquímicas de corrosión y comparando estos con los obtenidos en el ensayo de corrosión en cámara de niebla salina, se establece que hay divergencia en los resultados, ya que en las pruebas electroquímicas el recubrimiento de zinalco es el que ofrece la mejor protección, sin embargo en las pruebas de cámara salina el recubrimiento de aluminio sobre acero AISI 1018 ofrece mejor protección contra la corrosión con una pérdida del 1.77% anual, siendo seguido del recubrimiento de zinalco, el cual presenta pérdida de 6.6% anual. Es importante destacar que a pesar de que el recubrimiento de zinalco presenta mayor pérdida de material por efecto de la corrosión, es más recomendable este, dado su comportamiento anódico por la presencia de zinc, el cual ofrecería buena protección sobretodo pensando en que el recubrimiento pudiera sufrir desgarramientos o fracturas, en cuyo caso el recubrimiento de aluminio no ofrecería protección y por el contrario propiciaría la corrosión del acero. Así mismo es importante destacar que el recubrimiento de aluminio resulta en mayor costo dado que se requiere mayor proporción de energía calorífica para fundirlo y también el costo de lingote de aluminio por kilogramo es mayor al de el zinalco.

## 6.4 Análisis de las pruebas de deformación

Para realizar este análisis utilizaremos los datos de las tablas y gráficas de la 5.93 a la 5.105. que corresponden a las tablas y gráficas obtenidas de los ensayos de tracción y de embutido, así como por procesamiento matemático de los mismos.

### 6.4.1 Análisis de las pruebas de tracción

La prueba de tracción fue realizada en frío a temperatura ambiente y a 250 y 350°C mediante el empleo de una cámara de temperatura controlada, obteniendo así la deformación de cada material recubierto, los valores obtenidos de los promedios de las deformaciones máximas a

tracción en las direcciones longitudinal 0°, a 45 grados y transversal a 90 grados, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.4.1 Comparativo de la capacidad de deformación en los ensayos de tracción recubrimiento de zinalco y de aluminio

| DEFORMACIÓN PROMEDIO A TRACCIÓN (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| Deformación | Aluminizado a 0° | Aluminizado a 45° | Aluminizado a 90° | Promedio |
| | | | | |
| En frío | 10.15 | 14.76 | 8.955 | 11.288 |
| En caliente a 250°C | 10.87 | 21.16 | 10.7 | 14.24 |
| En caliente a 350°C | 24.58 | 19.75 | 32.75 | 25.693 |
| | | | | |
| | Zinalquizado a 0° | Zinalquizado a 45° | Zinalquizado a 90° | Promedio |
| En frío | 5.864 | 3.331 | 4.701 | 4.632 |
| En caliente a 250°C | 5.699 | 7.393 | 8.268 | 7.12 |
| En caliente a 350°C | 21.86 | 25.017 | 31.348 | 26.075 |

De los resultados presentados en la tabla anterior, se determina que ambos recubrimientos tienen una baja capacidad de deformación, siendo esta más baja cuando la deformación en tracción se realiza en frío y presenta un ligero incremento cuando la deformación en tracción se realiza a mayor temperatura, lo que es de esperarse, ya que el incremento en temperatura facilita la capacidad de deformación de los materiales y en particular en este caso se esperaría mayor capacidad de deformación del acero recubierto con zinalco por las propiedades de mayor plasticidad de esta aleación, sin embargo el zinalquizado presenta menor capacidad de deformación que el aluminizado, lo cual esta asociado a la presencia de fases frágiles en el intermetálico.

### 6.4.2 Análisis de las pruebas de anisotropía

Para definir si un metal presenta la tendencia a localizar la deformación plástica en una dirección dada se mide el valor $R$ del mismo. Este parámetro se obtiene a partir de una probeta de tensión cortada en una lámina y se define como el cociente de la deformación real del ancho sobre la deformación real del espesor:

$$\mathbf{r} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

donde:

$$\varepsilon_W = \ln(w_0/wf)$$

$$\varepsilon_w = \ln(t_0/t_f)$$

$\varepsilon_w$ Y $\varepsilon_t$ son la deformación con respecto al cambio en ancho y espesor respectivamente, además $w_0$ y $wf$ se refieren al ancho inicial y final, así como $t_0$ y $t_f$ equivalen al espesor inicial y final respectivamente.

Una vez definido el valor de **r** y para poderlo relacionar directamente con la anisotropía, se resolverá la siguiente expresión:

$$r_m = \frac{R_L + R_T + 2R_{45}}{4}$$

Donde $R_L$ es el valor registrado en una probeta cortada a lo largo de la dirección de laminación, $R_T$ en la dirección transversal y $R_{45}$ a 45° de la misma, por lo que se considera a $r_m$ como un promedio de los valores individuales.

El significado fisico de **r** implica que cuando su valor es mayor a 1, el material exhibe una mayor deformación a través del plano de la lámina y una menor en el espesor de la misma y viceversa para un valor menor a 1. Por otro lado si el valor es igual a 1, se tendrá que el flujo es igual tanto en el plano como a través del espesor. Esta condición es importante puesto que piezas que han de ser estiradas excesivamente en una o dos direcciones, como es el caso de la producción de casquillos, botes, tinas u otro tipo de recipientes, el valor promedio de **r** debe ser lo más alto posible, lo que asegura que la lámina se estire a una tasa superior a la que se adelgaza.

Los resultados de la anisotropía (ver tabla 5.97) y con base en el párrafo anterior permiten determinar que el acero AISI 1018 recubierto con aluminio exhibe una mayor deformación a través del espesor de la lámina y una menor a través del plano de la lámina, sin un cambio apreciable como función de la aplicación de temperatura.

En el caso del acero recubierto con zinalco se presenta el mismo efecto de menor deformación en el plano y una mayor deformación en el espesor, por lo cual se puede aseverar que ambos recubrimientos tienen un comportamiento anisotrópico o propiedades diferentes en las diferentes direcciones de deformación independientemente de la temperatura a la que se realice el ensayo. Los valores de anisotropía planar ($\Delta r$) que se presentan en la misma tabla indican que no se formarán "orejas" durante el proceso de deformación, ya que si $\Delta r$ es cercano a cero ( ref. 7.6) el material presentará menor tendencia a formar bordes u orejas durante la deformación, lo cual se cumple para ambos recubrimientos.

### 6.4.3 Profundidad de la copa durante el ensayo Erichsen

La tabla siguiente (6.4.3) contiene los valores promedio de la profundidad de la copa Erichsen, para cada acero recubierto y ensayado bajo la prueba de Erichsen.

Tabla 6.4.3.1 Tabla comparativa de la profundidad de copa Erichsen

| Profundidad de la copa Erichsen. | |
|---|---|
| Probeta descripción | Profundidad (mm) |
| Lámina aluminizada deformada en frío. | 9.6 |
| Lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C. | 9.97 |
| Lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C. | 10.2 |
| Lámina zinalquizada deformada en frío. | 7.35 |
| Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C. | 8 |
| Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C. | 9.9 |

La tabla anterior muestra que las láminas con mayor capacidad de deformación son las aluminizadas deformadas en caliente a 250°C y 350°C, seguidas de la aluminizada y deformada en frío que se encuentra en un valor de deformación ligeramente menor al más alto de los recubrimientos con zinalco.
Con relación a los recubrimientos de zinalco el que presenta mayor profundidad de copa es el de la probeta zinalquizada y deformada en caliente a 350°C, siendo seguida de la deformada a 250°C y finalmente la deformada en frío con menor profundidad de copa durante el ensayo de embutido.

### 6.4.4 Generación y análisis de diagramas de conformabilidad límite

Las tablas y gráficas de la 5.100 a la 5.105 contienen las mediciones realizadas de estados de deformación en las probetas Erichsen y en las de tracción, distinguiendo los puntos fallados de los sin falla.

Los puntos se han graficado, en un diagrama de estados de deformación, para obtener la conformabilidad límite de cada material recubierto. ( tablas y gráficas de la 5.100 a la 5.105)

El procedimiento utilizado para ubicar la curva límite es el siguiente:

Hacer una regresión estadística con los puntos de menor ordenada ($e_2$ mínima) para cada conjunto de estados de deformación fallados de igual abscisa ($e_1$). Luego, desplazar la curva resultado de la regresión, disminuyendo únicamente sus ordenadas en múltiplos de cinco por ciento, hasta que todos los puntos fallados se encuentren por encima de la curva desplazada, obteniendo así las gráficas indicadas previamente.

Los criterios que comprende el procedimiento para la obtención de la curva crítica son los siguientes:

La curva de la regresión se desplaza gradualmente hacia abajo en magnitudes relativas o porcentuales, hasta que comprenda o envuelva todos los puntos de falla (criterio explícito).

Entre las posibles curvas de regresión, se escoge la que con la menor cantidad de puntos de inflexión -polinomio de menor grado- tenga la forma más adecuada para que, al desplazarla y convertirse en crítica, los puntos fallados queden por encima (criterio implícito).

Las gráficas que acompañan en la parte inferior a las tablas 5.100 a la 5.105 ilustran la aplicación del procedimiento propuesto en las líneas anteriores. En las gráficas 5.100 a 5.102 correspondientes al acero AISI 1018 recubierto con aluminio se aprecia que durante la deformación en frío y a 250°C el material presenta una deformación máxima (e1) de 16% en promedio, logrando una deformación de 27% cuando la deformación se realiza a 350°C.

En el caso del acero AISI 1018 recubierto con zinalco (gráficas 5.103 a 5.105), se aprecia que durante la deformación en frío y a 250°C el material presenta una capacidad de deformación inferior al 20%, aumentando en gran proporción cuando la deformación se realiza a 350°C, siendo el nivel alcanzado del 36.4% en promedio, con lo cual se establece que este recubrimiento permite mayor nivel de deformación que cualesquiera de los otros recubrimientos.

La tabla siguiente muestra las áreas bajo la curva límite, en cada uno de los diagramas de conformabilidad. Son el resultado de integrar las ecuaciones de la curva límite de cada lámina recubierta, en su intervalo correspondiente, y restarle el área bajo la recta $e_1=e_2$ en dicho intervalo (por definición en esta área no pueden existir estados de deformación).

Tabla 6.4.4.1 Tabla comparativa del área bajo la curva límite de los DCL

| Área bajo la curva límite de los DCL | | | |
|---|---|---|---|
| Descripción | Área | e2 inferior | e2 superior |
| Lámina aluminizada deformada en frío | 438.53 | -15 | 33 |
| Lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C | 611.74 | -17 | 24 |
| Lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C | 1331.16 | -17 | 47 |
| Lámina zinalquizada deformada en frío. | 690.76 | -19 | 39 |
| Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C | 315.82 | -14 | 20 |
| Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C | 1284.17 | -20 | 38 |

El área bajo la curva límite permite evaluar, con mayor utilidad práctica, la conformabilidad de láminas. Es el parámetro para hacer consideraciones, cuantitativas y cualitativas, referentes a los distintos estados de deformación (embutido, tracción, estirado) a que puede ser sometido el material durante la manufactura de productos específicos. Supera las limitaciones de los otros parámetros ligados, más bien, a la respuesta del material llevado a estados de máxima deformación (que, siendo indeseables, deben evitarse en el diseño y fabricación de partes).

Así, en una consideración general, es válido afirmar que las láminas aluminizada y zinalquizada deformadas en caliente a 350°C superan a las otras en conformabilidad ya que el área bajo la curva y la amplitud del intervalo son mayores (ver tablas y gráficas 5.102 y 5.105). Es decir, que la cantidad de posibles estados de deformación o pares de valores ($e_1$, $e_2$) es mayor en ambos casos.

Así mismo, se puede afirmar, en lo particular que tratándose de estados de deformación producto de tracción (zona a la izquierda del eje vertical, en el diagrama comparativo) la lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C superará a las otras en su capacidad para soportar, sin falla, deformaciones relativas o porcentuales ($e_1$) mayores, y que, análogamente, en la zona de estados de deformación producidos por estiramiento biaxial (a la derecha del eje vertical) este material tiene mayor capacidad de deformación que los demás recubrimientos. En el caso del acero recubierto con zinalco y deformado a 350°C, la capacidad de deformación por tracción es menor, sin embargo presenta un buen nivel de deformación uniaxial uniforme y mayor capacidad de deformación por estiramiento biaxial. En general los dos materiales ensayados a 350°C presentan buen nivel de deformación.

Cabe mencionar que, comparando los resultados de los tres parámetros utilizados (la deformación máxima promedio en el ensayo de tracción, la profundidad de la copa Erichsen y el área bajo la curva límite de los DCL), resulta, como es lógico, que las probetas recubiertas con aluminio y zinalco deformadas a 350°C son las que ofrecen las mejores condiciones de deformación, por lo cual cualquiera de estas dos condiciones de deformación, se recomendarían como adecuadas cuando se requiera una deformación posterior al recubrimiento.

### 6.5 Costo de los recubrimientos.

Con relación al costo de los recubrimientos, se realiza en este trabajo un análisis general para su determinación, se considera como general por que se considerará que el equipo que se requiere para la realización del recubrimiento ya se tiene ( horno de fusión, laminador, equipo de laboratorio, etc.), pues de no hacerlo así el costo del recubrimiento será muy elevado por el volumen tan pequeño de probetas que fueron realizadas. Esta consideración es valida ya que en una condición industrial los equipos son comprados para producir grandes volúmenes de material.
De este modo solo se consideran los elementos consumibles empleados en la generación de los recubrimientos, los cuales son los siguientes:

| **Material empleado.** | **Costo ($) M.N.** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Acero AISI 1018 (Solera de 3X1/8) | 120.00 | Barra |
| Aluminio 1100 en lingote | 23.42 | Kilogramo. |
| Zinalco en lingote | 20.00 | Kilogramo. |

| **Reactivos Utilizados** | **Costo ($) M.N.** | **Unidad** |
|---|---|---|
| Tiourea ($H_2NCSNH_2$) | 2110.28 | Kilogramo |
| Cloruro de Zinc ($ZnCl_2$) | 1583.60 | Kilogramo |
| Cloruro de Amonio ($NH_4Cl$) | 576.44 | Kilogramo |
| Ácido Clorhídrico al 10 % (HCl) | 109.51 | Litro |
| **Energía eléctrica** | **Costo ($) M.N.** | **Unidad** |
| Horno de fusión potencia 20 KW/hr. | 1.962 | KW/hr./mes |
| Horno de T. Térmico 7KW/hr. | 1.962 | KW/hr./mes |
| Laminadora 23.5 KW/hr. | 1.962 | KW/hr./mes |

En relación con estos costos y considerando que fueron recubiertas 150 piezas de 7.62X7.62cm. con un área total de 116.12 $cm^2$ por ambos lados, así mismo con base a los requerimientos de cada material y reactivo que han sido especificados en el capítulo IV relativo a desarrollo experimental, y con relación al valor de espesor promedio (sección 6.1.3) logrado en los recubrimientos de zinalco y de aluminio, se tiene que los valores de requerimiento de material por pieza y los valores de costo por pieza son los mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 6.5.1 costos por pieza generada para recubrimientos de zinalco y aluminio.

| MATERIAL Y REACTIVO | REQUERIMIENTO POR PIEZA | RECUBRIMIENTO DE ALUMINIO $ PESOS | RECUBRIMIENTO DE ZINALCO $ PESOS |
|---|---|---|---|
| Acero AISI 1018 de 7.62 x 7.62 cm | 58.06 $cm^2$ | $ 1.52 | $ 1.52 |
| Recubrimiento de zinalco | 1.1 grs. | | $ 0.025 |
| Recubrimiento de aluminio | 0.75 grs | $ 0.017 | |
| Tiourea | 0.066 grs | $ 0.13 | $ 0.13 |
| Cloruro de zinc | 0.66 grs. | $1.044 | $1.044 |
| Cloruro de amonio | 0.66 grs. | $0.38 | $ 0.38 |
| Ácido clorhídrico | 0.66 grs. | $0.072 | $ 0.072 |
| Horno de fusión | 0.53 Kw/hr | $1.43 | $1.03 |
| Laminador | 0.2 Kw/hr | $ 0.30 | $ 0.30 |
| **COSTO TOTAL** | | **$ 4.89** | **$ 4.50** |

De la tabla se aprecia que los costos por pieza para ambos recubrimientos es muy similar, lo cual se debe a que en general los elementos que se requieren para generar los recubrimientos son los mismos y por ende tienen el mismo costo, la única variación es en relación con el

material de recubrimiento, pero no existe una diferencia significativa respecto al costo de los mismos. Además de que el recubrimiento de aluminio es de menor espesor promedio compensando la diferencia en costo de este material, otra variante es el consumo de energía eléctrica, ya que se requiere más en el caso de la fusión del aluminio.

Si extrapolamos los resultados de costo por pieza para un material plano de 3X6 pies que es la más comercial se tiene que el costo para dicha pieza con recubrimiento de zinalco y de aluminio será el siguiente:

Tabla 6.5.1.a costos por lamina generada para recubrimientos de zinalco y aluminio.

| PLACA DE 1/8 in. | RECUBRIMIENTO DE ZINALCO COSTO (PESOS) | RECUBRIMIENTO DE ALUMINIO COSTO (PESOS) |
|---|---|---|
| 3X3in. | $4.5 | $4.89 |
| 3X6pies. | $1243.21 | $1321.92 |

Como se aprecia en la tabla el costo sigue siendo muy similar si los recubrimientos se aplican en placas de uso y dimensiones comerciales, con la diferencia en espesor de recubrimiento, siendo mayor para el caso de los recubrimientos de zinalco que los de aluminio.

**Tabla 6.6 Comparativo general de resultados.**

| RESULTADOS | ZINALQUIZADO | ALUMINIZADO |
|---|---|---|
| Obtención del recubrimiento | Preparación de la superficie.<br>Temperatura de inmersión 600°C.<br>Tiempo de inmersión 5 min. | Preparación de la superficie.<br>Temperatura de inmersión 800°C.<br>Tiempo de inmersión 5 min. |
| Espesor del recubrimiento | Intermetálico prom: 45 mμ.<br>Recubrimiento ext. prom: 223 mμ. | Intermetálico prom: 38.3 mμ.<br>Recubrimiento ext. prom: 85.8 mμ. |
| Dureza (Vickers) | Intermetálico prom: 325<br>Recubrimiento ext. prom: 118 | Intermetálico prom: 48<br>Recubrimiento ext. prom: 298.6 |
| Fases presentes en el recubrimiento | $\alpha, \beta, \beta_2, \zeta, \eta,$ | $\theta$, Al, $\zeta$, $\eta$ |
| Pruebas electroquímicas de corrosión | Potencial de corrosión en sulfato de sodio:-1050 mV.<br><br>Potencial de corrosión en cloruro de sodio:-1075 mV.<br><br>Resistencia de polarización en sulfato de sodio: 10 Kohmsxcm$^2$<br><br>Resistencia de polarización en cloruro de sodio: 1.5 Kohmsxcm$^2$<br><br>Velocidad de corrosión promedio en sulfato de sodio: 0.165 mm/año.<br><br>Velocidad de corrosión promedio en cloruro de sodio: 0.245 mm/año. | Potencial de corrosión en sulfato de sodio:-700 mV.<br><br>Potencial de corrosión en cloruro de sodio:-950 mV.<br><br>Resistencia de polarización en sulfato de sodio: 28.6 Kohmsxcm$^2$<br><br>Resistencia de polarización en cloruro de sodio: 1.7 Kohmsxcm$^2$<br><br>Velocidad de corrosión promedio en sulfato de sodio: 0.008 mm/año.<br><br>Velocidad de corrosión promedio en cloruro de sodio: 0.232 mm/año. |
| Prueba de corrosión Cámara de niebla salina | Pérdida de peso en ocho días placa de 1/8inX3X6pies: 26.75 gramos | Pérdida de peso en ocho días placa de 1/8inX3X6pies: 7.13 gramos. |
| Pruebas de capacidad de deformación DCL. | Lámina zinalquizada deformada en frío: 6. 9%<br>Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250°C:12.7%<br>Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350°C: 36.4% | Lámina aluminizada deformada en frío: 14.4%<br>Lámina aluminizada deformada en caliente a 250°C: 16.15%<br>Lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C: 27% |
| Costo del recubrimiento | Lámina zinalquizada de 1/8inX3X6pies: $1243.21 pesos. | Lámina aluminizada de 1/8inX3X6pies: $1321.92 pesos. |

# CAPÍTULO VII

# CONCLUSIONES

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

## 7.1 Conclusiones generales relativas a la obtención de los recubrimientos

1. Se cumplió con el objetivo de lograr la unión del zinalco y del aluminio con el acero por medio de inmersión en el metal fundido.

2. Se estableció el proceso y los parámetros óptimos para lograr la unión más adecuada, los cuales son detallados en la sección 4.4.2 del capítulo 4 y en resumen son los mostrados en la siguiente tabla:

| ETAPAS DE PREPARACIÓN | ZINALQUIZADO | ALUMINIZADO | TIEMPO(Minutos) |
|---|---|---|---|
| limpieza Mecánica | esmerilado | esmerilado | necesario |
| limpieza química | ácido clorhídrico y tiourea | ácido clorhídrico y tiourea | 5 |
| fluxado | cloruro de Zinc y cloruro de amonio | cloruro de Zinc y cloruro de amonio | 5 |
| temperatura de inmersión | 600°C | 800°C | 5 |

3. Tanto para el aluminizado como para el zinalquizado se lograron por el proceso de inmersión en metal fundido, recubrimientos continuos, es decir, exentos de porosidades, grietas o irregularidades notables, y con una distribución uniforme del metal fundido sobre la superficie. Es importante subrayar que no se observó, ni en el proceso de inmersión, ni en los procedimientos posteriores, alguna tendencia de la película de recubrimiento a separarse de la base (Figuras 5.1 a 5.42).

4. La adherencia con el sustrato y el espesor del recubrimiento son factores que se controlan mediante la técnica de limpieza y preparación de las piezas previa a su inmersión y a los parámetros bajo los que se realiza (sección 4.4.2.1 y 4.4.2.2).

5. En los dos tipos de recubrimientos analizados se produce una capa interna de aleación y una capa externa del metal protector o aleación, de alta pureza. La capa interna de aleación se origina por difusión del metal fundido hacia el metal a proteger y está formada por uno o varios compuestos intermetálicos de los metales constituyentes; en consecuencia, esta parte del recubrimiento es más dura y frágil que la exterior, constituida, casi toda ella, por el metal o aleación de recubrimiento (Figuras 5.1 a 5.42).

6. Para ambos recubrimientos, la transición entre las capas (intermetálico y recubrimiento) está bien delimitada, de manera que no se mezclan gradualmente entre sí, sino que cada una conserva su composición definida. Esto es de particular importancia porque implica la posibilidad de controlar individualmente el espesor de cada una de las capas y de esta forma buscar las características específicas deseadas en el recubrimiento (Figuras 5.1 a 5.42).

7. En ambos recubrimientos se muestra una tendencia de dureza elevada en la zona del intermetálico, más alta incluso que la del metal base, debido a que en general, los compuestos intermetálicos que se forman tanto para el aluminizado como para el zinalquizado son compuestos de Fe-Al de gran dureza y fragilidad (Gráficas 5.45 y 5.46).

8. En ninguno de los casos resulta recomendable efectuar un proceso de laminación posterior ya que esta práctica provoca el surgimiento de grietas en la zona del intermetálico que inciden desfavorablemente en las propiedades mecánicas (Figuras 5.15 a 5.24 y 5.35 a 5.42).

### 7.1.2. Conclusiones del Zinalquizado

1. El mejor tiempo de inmersión para el proceso de recubrimiento con zinalco se encuentra alrededor de los 5 minutos, a una temperatura de 600°C (sección 4.4.2.1).

2. Un tratamiento de recocido de una hora, posterior a la inmersión mejora la calidad del recubrimiento disminuyendo la presencia de porosidades y grietas. Sin embargo, el recocido a mayores periodos de tiempo no resulta conveniente debido a que incrementa el espesor del intermetálico, lo que va en detrimento de sus propiedades mecánicas finales (Figuras 5.3 a 5.14).

3. Después de un periodo de 2 horas de recocido, se presentan porosidades que aumentan en cuantía a razón del aumento en el tiempo de recocido. Este fenómeno puede ser debido al efecto Kirkendall, el cual indica que la formación de vacíos microscópicos (porosidades) se produce por ser diferentes las velocidades de difusión de los elementos en cuestión[79]. Se recomienda hacer estudios más a fondo sobre los recocidos para poder concluir a qué se deben estas porosidades (Figuras 5.7 a 5.12).

4. Se obtuvieron variaciones de espesor y dureza en la capa de intermetálico. Una causa probable de ello es la complejidad del compuesto intermetálico, se origina la presencia de diferentes fases del sistema Fe-Zn-Al en diversas proporciones de éstos elementos, y consecuentemente se obtienen valores de microdureza que se comportan de manera irregular (sección 6.2.4.2 y tabla 6.2.3).

### 7.1.3. Conclusiones del Aluminizado

1. El mejor tiempo de inmersión para el caso del aluminizado se encuentra alrededor de los 5 minutos a una temperatura de 800°C (sección 4.4.2.2).

2. Un tiempo de recocido de 2 horas parece ser el ideal para obtener las mejores características generales, ya que tiende a minimizar las irregularidades de las capas microestructurales (Figuras 5.27, 5.28).

3. Los compuestos de Fe-Al formados en el intermetálico, ocasionan que ésta zona presente una dureza mayor incluso a la del metal base en todos los casos (Gráfica 5.46).

4. El espesor del intermetálico presenta un efecto de crecimiento en forma de estructura de tipo columnar hacia el interior del metal base en tiempos de recocido superiores a 2 horas (Figuras 5.27 a5.32).

5. Un porcentaje de laminación superior al 20% ocasiona notable agrietamiento en el intermetálico por ser una capa muy dura y frágil debido a la gran cantidad de Fe que se encuentra en esa zona, y el agrietamiento perdura aún después de recocer las probetas (figuras 5.36 y 5.38).

## 7.2. Conclusiones de la resistencia a la corrosión

1. Al laminar, se observaron problemas de generación de fracturas y grietas en el intermetálico, en ambos tipos de recubrimiento, sin embargo la laminación permite que algunas grietas o porosidades externas se cierren diminuyendo el efecto de la corrosión.

2. Se determinó que las piezas recocidas presentan mayores beneficios que se traducen en un recubrimiento homogéneo y en una mayor resistencia a la corrosión en tiempos de permanencia no mayores a dos horas (tabla 6.3.3).

3. En el caso del recubrimiento con zinalco, el recocido mayor a dos horas influye en la pérdida de peso, ya que la difusión de aluminio hacia la parte central del recubrimiento provoca la formación de compuestos de aluminio con hierro en la interfase, por lo que el alto contenido de zinc en la parte externa del recubrimiento, hace que éste se comporte como ánodo de sacrificio y proporciona así protección a la corrosión (tabla 6.3.1).

4. La velocidad de corrosión y el comportamiento que exhibió el acero AISI 1018 sin recubrimiento en relación con los recubrimientos de aluminio y zinalco sobre dicho acero en las pruebas electroquímicas son alentadoras sobretodo en el caso del aluminizado, ya que éste ofrece mayor protección contra la corrosión (aunque a mayor costo), lo cual se confirma con el apoyo de diversas fuentes bibliográficas relativas al estudio de este recubrimiento (sección 6.3.4.1 y 6.3.4.2)

5. Uno de los objetivos de esta tesis es mostrar que tan útil resultaría el uso del zinalco en ambientes marinos, donde la concentración de iónes cloruro es alta, y la presencia de gran cantidad de oxigeno disuelto en el agua ocasiona una desintegración rápida del material ferroso. En este sentido en la solución de NaCl empleada para tal fin, el zinalco presentó un comportamiento de rápida pasivación en este medio, además de encontrarse una tendencia del material a disminuir su velocidad de corrosión con el tiempo. Por la pasivación mostrada y por los resultados obtenidos, se considera viable la utilización de recubrimiento en este tipo de medios (Gráfica 5.70 a 5.72).

6. Con relación a los resultados obtenidos en las pruebas electroquímicas de corrosión y comparando estos con los obtenidos en el ensayo de corrosión en cámara de niebla salina, se establece que hay divergencia en los resultados, ya que en las pruebas electroquímicas el recubrimiento de zinalco es el que ofrece la mejor protección, sin embargo en las pruebas de cámara salina el recubrimiento de aluminio sobre acero AISI 1018 ofrece mejor protección contra la corrosión con una pérdida del 1.77% anual, siendo seguido del recubrimiento de zinalco, el cual presenta pérdida de 6.6% anual (tabla 6.3.3).

### 7.3. Conclusiones relativas a la capacidad de deformación

1. De acuerdo al objetivo, se logró evaluar la conformabilidad de los recubrimientos de zinalco y de aluminio aplicados sobre acero AISI 1018, haciendo uso de ensayos habituales (tracción y embutido por el método de Erichsen) y aprovechándolos al máximo al someter las probetas a un proceso de mallado, que permite evaluar con mayor precisión la deformación que experimenta el material (tablas y gráficas 5.100 a 5.105).

2. El método empleado para evaluar la conformabilidad de los recubrimientos realizados fue el de diagrama de conformabilidad límite (DCL) (que define y muestra gráficamente los estados de deformación que no producen falla, separándolos de los que la producen). El procedimiento y los criterios descritos en este trabajo para obtener la curva crítica y su ecuación, se definieron a partir de la propia experimentación realizada (ya que en la literatura accesible no se especificaba el método a seguir [78]; sólo ejemplos de DCL de algunos materiales y sus aplicaciones).El procedimiento empleado para ubicar la curva límite en el DCL es útil y objetivo; pero si se realizan más pruebas y se relacionan con resultados de aplicaciones reales en la industria, se puede enriquecer y perfeccionar (sección 5.6 y 6.4).

3. De acuerdo a este estudio y de los diagramas de conformabilidad límite, se establece que el acero recubierto con aluminio cuando es deformado en frío permite un 18% de deformación, siendo ésta de un 29% en promedio cuando es deformado en caliente (350°C). En relación con los recubrimientos de zinalco, se establece que el zinalco en frío no presenta una satisfactoria capacidad de deformación, fracturándose a deformaciones inferiores al 10%, manteniendo este comportamiento a temperaturas inferiores a 250°C. Sin embargo a temperatura de 350°C la capacidad de deformación de este material es superior a 35%, lo que es de esperarse dado el comportamiento de alta plasticidad de esta

aleación. La anisotropía corrobora los resultados obtenidos en los diagramas de conformabilidad límite para ambos tipos de recubrimiento (gráficas 5.100 a 5.105).

4. Así, en una consideración general, es válido afirmar con base en los resultados que las láminas aluminizada y zinalquizada deformadas en caliente a 350°C superan a las otras en conformabilidad ya que el área bajo la curva y la amplitud del intervalo son mayores (ver tablas y gráficas 5.102 y 5.105). Es decir, que la cantidad de posibles estados de deformación o pares de valores ($e_1$, $e_2$) es mayor en ambos casos.

5. Así mismo, se puede afirmar, en lo particular que tratándose de estados de deformación producto de tracción (zona a la izquierda del eje vertical, en el diagrama comparativo) la lámina aluminizada deformada en caliente a 350°C superará a las otras en su capacidad para soportar, sin falla, deformaciones relativas o porcentuales ($e_1$=30%) mayores, y que, análogamente, en la zona de estados de deformación producidos por estiramiento biaxial (a la derecha del eje vertical) este material tiene mayor capacidad de deformación que los demás recubrimientos ($e_1$=40%, $e_2$=35% ). En el caso del acero recubierto con zinalco y deformado a 350°C, la capacidad de deformación por tracción $e_1$ es mayor ($e_1$=33%), por lo cual presenta un buen nivel de deformación uniaxial uniforme y similar capacidad de deformación por estiramiento biaxial ($e_1$=35%, $e_2$=30%). En general los dos materiales ensayados a 350°C presentan buen nivel de deformación (tablas y gráficas 5.102 y 5.105).

6. Cabe mencionar que, comparando los resultados de los tres parámetros utilizados (la deformación máxima promedio en el ensayo de tracción, la profundidad de la copa Erichsen y el área bajo la curva límite de los DCL), resulta, como es lógico, que las probetas recubiertas con aluminio y zinalco deformadas a 350°C son las que ofrecen las mejores condiciones de deformación, por lo cual esta condición de deformación, se recomienda como adecuada cuando se requiera una deformación posterior a la aplicación de recubrimiento de zinalco o de aluminio sobre acero AISI 1018 (tablas 6.4.1; 6.4.3.1; 6.4.4.1).

### 7.4. Conclusión relativa al costo del recubrimiento.

El costos por pieza para ambos recubrimientos presenta poca variación, lo cual se debe a que en general los elementos que se requieren para generar los recubrimientos son los mismos y por ende tienen el mismo costo, la única variación es en relación con el material de recubrimiento, pero no existe una diferencia significativa respecto al costo de los mismos. El costo del aluminio en lingote es ligeramente más alto que el de zinalco, sin embargo el recubrimiento obtenido para el aluminio es de menor dimensión, compensando así el costo del recubrimiento y resultando un costo final similar, otro factor de diferencia es el relativo al consumo de energía eléctrica que es mayor para la fusión del aluminio (sección 6.5).

## 7.5. Aportaciones y originalidad del trabajo.

Las aportaciones fundamentales que se han generado durante la realización de esta investigación son las siguientes:

- Se han determinado los métodos, procedimientos y parámetros de operación que permiten la obtención de recubrimientos de zinalco (y de aluminio) sobre acero AISI 1018 mediante la inmersión en la aleación metálica fundida, lo cual no se había realizado con anterioridad, por lo tanto no se tienen antecedentes previos al desarrollo y aportación de este trabajo.

- Se ha efectuado la caracterización amplia de los recubrimientos conseguidos, especialmente en términos de su composición química, fases presentes, espesor de la capa, dureza, resistencia a la corrosión y la capacidad de deformación del acero posterior a la generación de los recubrimientos a fin de vislumbrar sus posibilidades de aplicación industrial.

- Los resultados obtenidos durante el estudio comparativo de los dos recubrimientos de zinalco y de aluminio, permiten tener un criterio de selección entre ambos recubrimientos (tabla 6.5.2), aunque los resultados son muy similares en varios aspectos, permiten tomar la decisión en cuanto a la selección de uno u otro recubrimiento.

- En particular para el caso de México, y dada la gran cantidad de zinc disponible (Producción Nacional; 2003 412,255.12 ton.; 2004 enero – abril 122,479.2 ton.)[79], así como por la escasez de bauxita en el país, mineral del que se obtiene el aluminio, es más recomendable el uso del zinalco como recubrimiento del acero, ya que como se a presentado en este estudio ofrece similar protección que el aluminio, con mejores resultados en algunos aspectos. No debemos olvidar que hoy en día se generan recubrimientos de zinc (galvanizado por inmersión), que utilizan 100% de zinc, pero según este estudio ofrece menor protección a la corrosión que los recubrimientos de aluminio y zinalco (gráficas 5.67 a 5.74).

## 7.6. Aplicaciones potenciales

Logrados los objetivos establecidos como premisa de esta investigación (lograr la determinación de los parámetros que permitan la aplicación de recubrimientos de zinalco y de aluminio sobre acero AISI 1018 por el método de inmersión en el metal líquido, y realizar la caracterización de los mismos, particularmente en lo relativo a su microestructura, su dureza, el efecto de los tratamientos térmicos, su resistencia a la corrosión en medios salinos y su capacidad de deformación) se sugiere la aplicación de los recubrimientos sobre acero en los siguientes casos:

*Aluminio*

El recubrimiento de aluminio presenta buenas propiedades de adherencia, resistencia a la corrosión, y buen nivel de capacidad de conformación, lo cual nos permite sugerir las siguientes aplicaciones:

- Recubrimiento de estructura y perfiles expuestos al medio ambiente.
- Recubrimiento interior y exterior en tuberías de agua y vapor.
- Recubrimiento en intercambiadores de vapor.
- Recubrimiento de reflectores de calor.

*Zinalco.*

Las aplicaciones potenciales del Zinalco como recubrimientos son las siguientes:

- Recubrimiento de estructuras y perfiles expuestos al medio ambiente y ambientes marinos.
- Recubrimiento de válvulas.
- Recubrimiento de elementos mecánicos de unión como tornillos, clavos, tuercas, rondanas, remaches en aplicaciones de medios salinos.
- Recubrimiento de lámina y tubería.
- Como recubrimiento en estructuras de plataformas marinas como son las petroleras
- En la fabricación de embarcaderos, muelles, en barcos y piezas de los mismos, previa valoración de las necesidades de resistencia mecánica en estas aplicaciones.

## 7.7. Recomendaciones a futuros trabajos relativos al tema.

- Realización de pruebas de recubrimientos de zinalco y aluminio en piezas de fundición.
- Determinación de parámetros para la obtención de un intermetálico de menor espesor.
- Determinación de parámetros para la obtención de un intermetálico de menor dureza.
- Estudio del efecto del recocido del recubrimiento de Zinalco posterior a dos horas.
- Valoración de los recubrimientos en medio marino real.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA


1. King, F.
"El comportamiento del aluminio y sus aleaciones".
Ed. Urmo. Bilbao 1979, Pgs.125-131

2. Hertzberg, R. W.
"Deformatión and fracture mechanics of engineering materials".
Ed. J. Wiley. New York 1989, Pgs. 98,103

3. Asociación Técnica Española de Galvanizado
"Prontuario del acero galvanizado".
Madrid 1975.

4. Rudman, J.
"Sheet Metal fabrication".
Ed. National learnig corporation. USA 194, Pgs 87-92

5. Bunshah, R.F.
"Deposition technologies for coating, scince and applications".
Ed Noyes Data corporation, USA 1994

6. Dellgren
Patente Francesa, No. 743843. 1933.

7. Nilson
Patente Alemana, No. 634135. 1932.

8. Fink, C.J.
Patente USA No. 2082622. 1937

9. Oganowski, K., Parks, N.W., Coburn, K.G.
Patente USA, No. 2406245. 1946.

10. Gittings, D.O., Rowland, D.I-I., Mack, J.Q.
"Transactions of A.S.M".
Research Laboratory of Carnegie-Illinois Steel Corporation of Pittsburg 1951, Pgs 43, 587.

11. Hodge, W., Smith, E.M.
Patente USA No. 2788052. 1951

12. Gonser, B • W.
IV Congres Int. du Chauffage Ind.; Groupe III, Section 32, No 203.
Paris, Francia 1952.

13. Sendzimir, T.
Patente USA, No. 2110893. 1938.

14. Alferieff, M.
Patente Francesa, No. 773462.
Comptes Rendus, 1942, 215, 433.

15. Moeller, G. A.
Patente USA, No. 2315725. 1943.

16. General Motors Corporation.
Patente USA, No. 2569097. 1951.

17. Hodge, W.
Patente USA, No. 2783653. 1955
Informe del Battelle Memorial Institute, 1955.

18. Westerman, B. S.
Patente USA, No. 2708134. 1955
Iron Steel Engineer, 1955, March, 126.

19. Mishímura, K, Katayama, K., Kimura, T., Yamaguchi,

T. Hitachi Review, 1983, No32 (Vol.2), Pg77.

20. Hernández, L., Torres V. G.
"Influencia del micro estructura en la resistencia a la corrosión de la aleación Zn-22ap., Al"
VII Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería 1981.
Pgs. 238, 239, 240

21. Torres V. G.
"El desarrollo industrial del zinalco".
Revista Nueva Época, México 1988 Pgs. 5-10,

22. Ugalde, A., Torres V. G.
"Resistencia a la corrosión acuosa e influencia de la microestructura".
IV Encuentro de investigaciones metalúrgicas Saltillo Coah. 1982, Pgs 330-337

23. Valdés H.L., Negrete, J., Torres V. G.
"Efecto del Cu en la estructura y propiedades mecánicas de las aleaciones superplásticas Zn-22 %p, Al".
Congreso Nacional de Ingeniería 1981. Pgs. 259-262

24. Torres V. G.
"Materials aspects of world energy needs".
National Academy of Sciences, Washington, D. C. 1980, Pgs. 239-250,

25.. Hernández, L., Torres V. G.
"Influencia de la microestructura en la resistencia a la corrosión del Zn-22Al ".
Instituto de Investigación en Materiales, UNAM
VII Congreso ANIAC 1981 Pgs. 84-91

26. Valdés, L., Torres V. G.
"Oxidación del Zn-Al-Cu"
VII Encuentro de Investigación Metalúrgica. Saltillo1982

27. Torres V. G., Negrete S. J.
"El zinalco y su tecnología".
Edición del Instituto de Investigación en Materiales UNAM. 1984., Pgs. 15-22

28. Torres V. G.
"Zinalco propiedades y usos".
Edición del Instituto de Investigación en Materiales UNAM. 1990.
Publicación realizada con fondos OEA.

29. Molera, P., Felip, R. F.
"Metalización".
Ed. Prensa XXI. Barcelona 1982.

30. Molera S. P.
"Recubrimientos de los metales"
Ed. Alfaomega marcombo. Santafé de Bogotá 1999

31. Stevens, R.
"Metals and Technology"
Ed. Cambridge University Press 1994, Pgs 50-65

32. Koga, H., Uchiyama, Y., Aki, T.
"Coating metal"
Japan Institute of Metals, 1978, pgs.42, 136.

33. Tierra, P., García, J.
"Deformación Metálica".
Ed. Prentice Hall 1996, Pgs. 46-51.

34. Dauphin, J.Y., Foct, J., Perrot, P., Limare, A.
"Aluminium Diffusion During the Galvanizing of Iron Aluminium Alloys in Pure Zinc and Zinc-Aluminium Baths".
15th International Galvanizing Conference, Roma 1988.

35. Roselló, E.
Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección,
Febrero de 1985, No16, Pgs 99-116.

36. Molera, P., Tierra, P.
Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección,
Junio1987, No114, Pgs 85-92

37. Gorbunov, N .S.
"Diffuse Coatings on Iron and Steel".
Acad. Science. Washington, DC, 1958.

38. Talbot, D., Talbot, R.J.
"Corrosion Science and technology"
Publicer: CRC Press, 1997. Pgs 244-256

39. Sendzimir, T.
Patente USA, No. 2136957, 1938.

40. Hu, J., Marciniak, Z.
"Mechanics of Sheet Metal Forming"
Publisher: Butterworth-Heinemann
Pub. Date: England April 2000

41 Rellabov, V.R.
"Aluminizing of Steel"
Publisher: South Asia Books
Pub. Date: January 1985.

42. Bonaretti, A.,Capoccia, A., Giardetti, G.,Mucchino,U.
"Process and Properties of Galvanizing".
15th International Galvanizing Conference, Roma, 1988.

43. Gierek, A., Bajka, L., Adanczyk, D.
Patente Alemana No. DS 2759242, 1976.

44. Hosford, W.F.,.Caddell. R.M.
"Metal Forming"
Publisher: Prentice Hall Professional technical.
Pub. Date: February 1998.

45. Korman, M.
Wire Journal, 1978, August, No 52

46. Leonard, R.W.
Patente USA, No. US 4456663, 1984.

47. Asociación Técnica Española de Galvanización
Práctica de la Galvanización General, Madrid, 1968.

48. Kleingarn, J.P.
"Pickling in Hydrochloric acid"
15th International Galvanizing Conference, Roma, 1988.

49. Janecky, K.
Metal Finishing Journal, 1987, April No 68, Pg 109.

50. Mcnutt, J. E., Scott, R. J., William, W. C.
Patente USA No. EP 0150251, EUR. 1985.

51. Biolik, F.
Patente Alemana, No. 2317955. 1976.

52.Dominguez, A.
"Processes for Regeneration of Galvanizing Residues".
Intergalva Conference-85. Munich. 1985.

53. Kowaka, M.
"Metal Corrosion Damage Protection Technology"
Pgs. 120-138
Publisher: Allerton Press, IncorporatedPub. Date: June 1990.

54. User's Manual
Voltalab 21 electrochemical laboratory
Radiometer Copenhagen F.I. UNAM. 2002

55. Hans E. Hintermann, J. S.
"Metallurgic Coatings and Materials Surface"
Publisher: Elsevier Science/ European Materials Reserch, Pgs. 67, 211.
Pub. Date: August 1991

56. Patterson, W.C. , Hall, J.E.
Society Automotive Engineers, Inc., 1970, May, 1589.
Journal No.58 May 1970, Pgs 46-53

57. Silman, H.
"Enciclopedia del aluminio".
Ed. Urmo. Bilbao. 1998

58.Revista Tecno-industria
No. 13, Enero 1994

59 Yan Li
"Corrosión behaviour of hot dip zinc-aluminium coatings on steel in seawater
Bull". Mater Science Vol. 24 August 2001, Pgs. 355-360
Indian Academy of Sciences.

60 Borzillo and Horton
"Aluminiun and Chemical Corporation"
Patents U.S. 1970. No. 3,343,930 and 3,393,089

61 Difusion Alloys Limited
Leaders in Difusion Coating Technology.
www.difusion-alloys.com

62 He, Y., Li, D., Zhang, Z.
"Corrosion resistance of Zn-Al co cementation coating on carbon steels"
Materials Science and Engineering, October 2002, Pgs.554-559
www.elsevier.com/ locate/matlet.

63 Kobayashi,S., Yakou T.
"Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment"
Materials Science and Engineering, December 2001, Pgs. 44-53
www.elsevier.com/ locate/matlet.

64 J.T. John, G.B. Kale, S.R. Srinivasa.
A kinetic model for iron aluminide coating by low pressure chemical vapor deposition: Part II Model formulation.
Accepted 13 February 2204.
www.sciencedirect.com

65 Glasbrenner, H., Nold, E., Voss, Z.
"The influence of alloying elements on the hot-dip aluminizing process and on the subsequent high-tempereture oxidation".
Journal of Nuclear Materials 249, June 1997.

66 Mitani, Y., Vargas, R., Zavala, M.
"Deformation and difusión bonding of aluminide coated steels".
Departamento de Ingeniería Metalurgica, Instituto Politécnico Nacional.
Available online 6 September 2002.
www.sciencedirect.com

67 Z. Panossian, L., Mariaca, M.
"Steel cathodic protection afforded by zinc, aluminium and zinc/aluminium alloy coatings in the atmosphere".
Journal Surface and Coatings technology, August 2003
www.elsevier.com/locate/surfcoat

68 M.T. Abou EL-Khair, A. Daoud.
"Effect of different Al contents on the microstructure, tensile and wear properties of Zn-based alloy"
Accepted 19 October 2003.
Available online at www.sciencedirect.com

69 Murat, A., Temel, S.
"Fatigue properties of zinc-aluminium alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions".
International Journal of Fatigue 26 (2004) 103-110
Accepted 30 October 2002
Available online at www.sciencedirect.com

70 Rocco, A. M. , Tania M. C., Simao, R. A.
"Evaluation of chromate passivation and chromate conversión coating on 55% Al-Zn coated steel".
Surface and Coating Technology 179 (2004) 135-144
Accepted in revised form 17 June 2003
www.elsevier.com/locate/surfcoat

71 Llongueras, J.G., Avila, M. J.
"Tres métodos para evaluar velocidad de corrosión".
Notas, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México
Agosto de 1997

72 Norma ASTM Designation: G5-87
Standard Reference Test Method for
Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.

73 Norma ASTM Designation: G 59-97
Standard test Method for.
Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.

74 Metals Handbook . Aluminiun Coating of Steel.
Por el Comité de ASM en recubrimiento de Aluminio sobre Acero
Edit. American Society for metals. Vol. 5 9ª Edición. Pags. 333-341.E.U.A. 1982

75 Metals Handbook
Atlas of microstructures of industrial materials. American Society for metals.
Vol. 8, 8ª ed., USA 1982

76 Baird, D. C.
"Experimentación: La teoría de Mediciones y el Diseño de Experimentos".
Ed. Prentice Hall. Segunda Edición 1991. Pags. 18-35.

77 González, F. J.
"Control de la corrosión estudio y medida por técnicas electroquímicas".
Consejo superior de investigaciones científicas centro nacional de investigaciones metalúrgicas, Madrid 1989. Pgs 30-35

78 Dieter, G.E.
"Mechamical Metallurgy"
Mc. Graw Hill International editions. 1987. Pgs. 670-678

79 Zbigniew, D. J.
"Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería".
Edt. Interamericana 1987, Pgs134-137.

80 http//economía.gob.mx/?P=1023

81 Rosales Lombardi, Pablo I.
"Preparación, caracterización y control frente a la corrosión de películas delgadas de Hexametildisiloxano depositadas por plasma".
Tesis de maestría en metalurgia, Facultad de Química, UNAM 1998. Pgs.27-42.

82 Hernández Gallegos, Miguel A.
"Técnicas electroquímicas aplicadas al estudio de la corrosión de una aleación Al-Zn-In en función de la concentración de NaCl".
Tesis de maestría en metalurgia, Facultad de Química, UNAM 2001. Pgs.11-25.

83 Peralta, Sergio A.
"Técnicas electroquímicas aplicadas al estudio de la corrosión de un acero al carbono: influencia de la concentración de $Na_2SO_4$".
Tesis de maestría en metalurgia, Facultad de Química, UNAM 2001. Pgs.1-18.

84 Cubberly, William H., Unterweiser, Paul M.
"Metals Handbook Vol. 3 Properties and Selections: stainless steels, tools, materials and special-purpose metals".
9ª ed., USA, American Society for metals, Pg.882.

85 Villars, A. P., Okamoto, H.
"Handbook of Ternary Alloy". Vol. 3. Phases Diagrams.
8ª ed., USA, American Society for metals.

86 Dr. Vázquez Vaamonde Alfonso
avazquez@cenim.csic.es

# ANEXO:

# TABLAS, GRÁFICAS Y FOTOGRAFÍAS

Tabla 2.1 Propiedades físicas del zinalco [25]

| CONCEPTO | VALOR |
|---|---|
| Temperatura de fusión | 421 a 481 °C |
| Densidad | 5.4 gr/cm$^3$ |
| Módulo elástico | 110-130 Gpa |
| Conductividad eléctrica | 37 % del Cu. |
| Conductividad térmica | 37 % del Cu. |
| Coeficiente de expansión térmica | 25 $\mu$ m/mm Kx10$^6$ |
| Color | blanco grisáceo |

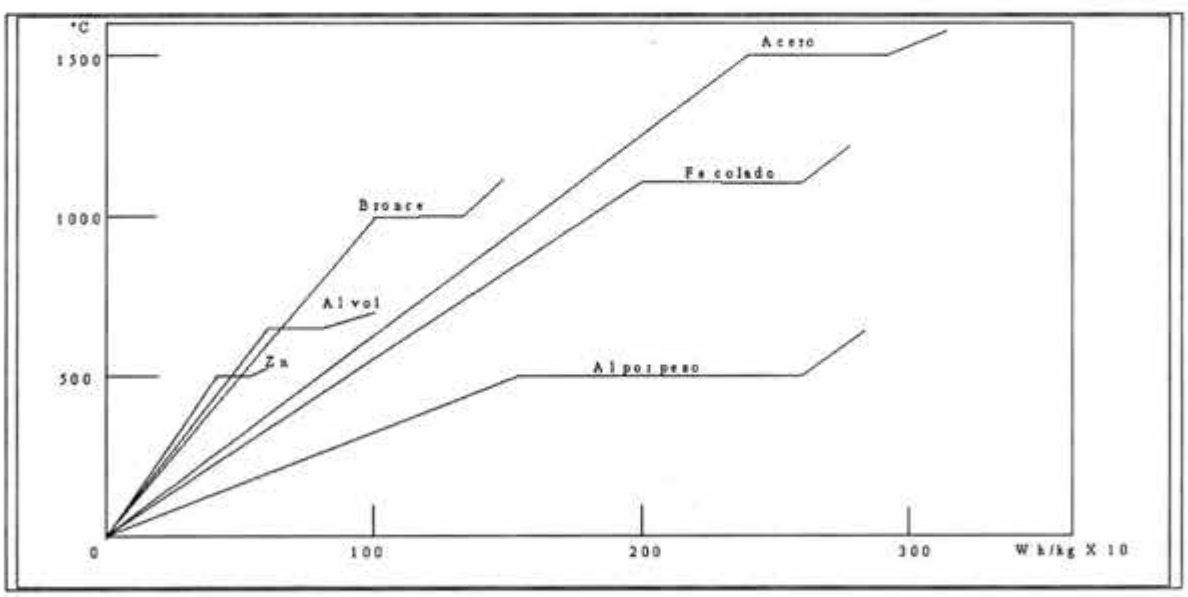



Figura 2.2 Cantidad de energía usada para fundir 1 kg de diferentes metales[25]

1 humedad 100%, temperatura 50°C, 1000 horas
2 100% de humedad + 100 ppm de $SO_2$
3 Ambiente salino

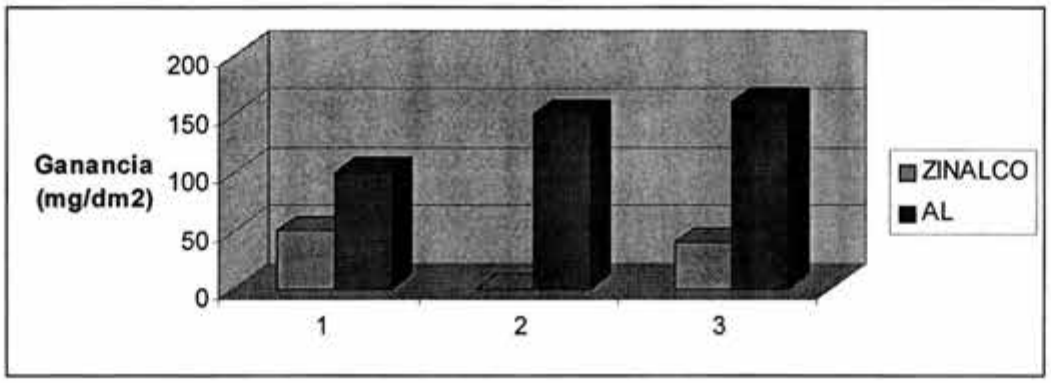



Figura 2.3 Resultado de las pruebas de corrosión en diversos medios, para el Zinalco y Al 380. En general, el Zinalco se comporta mejor [22]

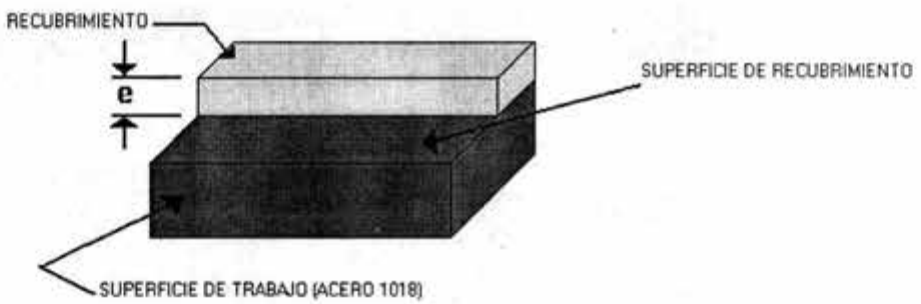



Figura 3.1 Representación del corte de un recubrimiento de espesor en una superficie de sustrato

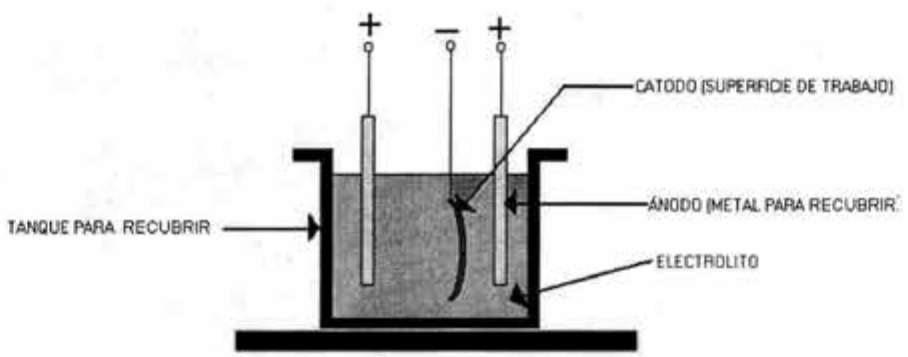



Figura. 3.2 Disposición de elementos para la electrodeposición

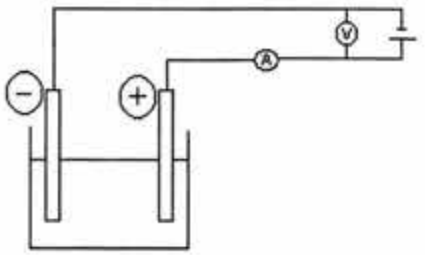


Figura 3.3 Representación esquemática de la instalación del anodizado del aluminio

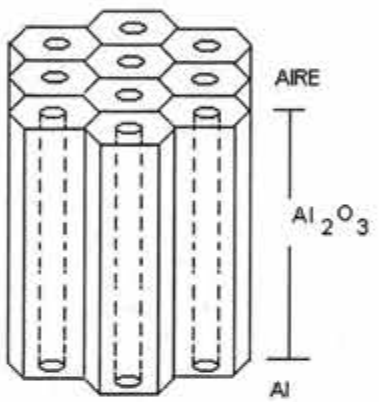



Figura 3.4 Capas presentes en el aluminio después de haber sido sometido al procedimiento de la anodizació

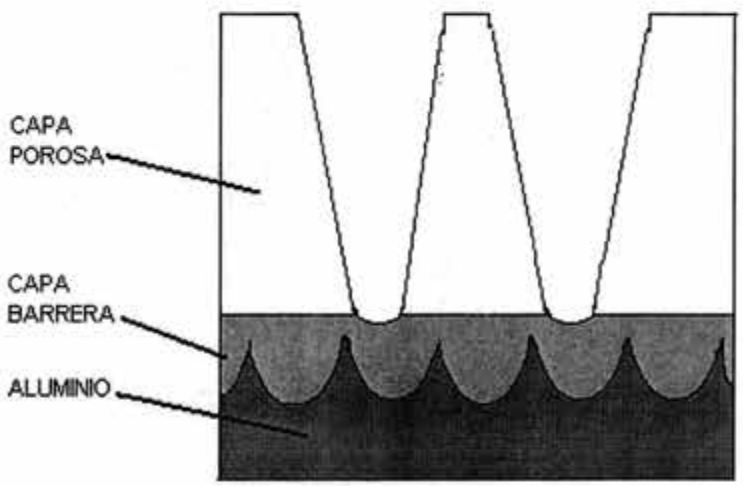



Figura 3.5 Estructura celular de la capa porosa del aluminio anodizado

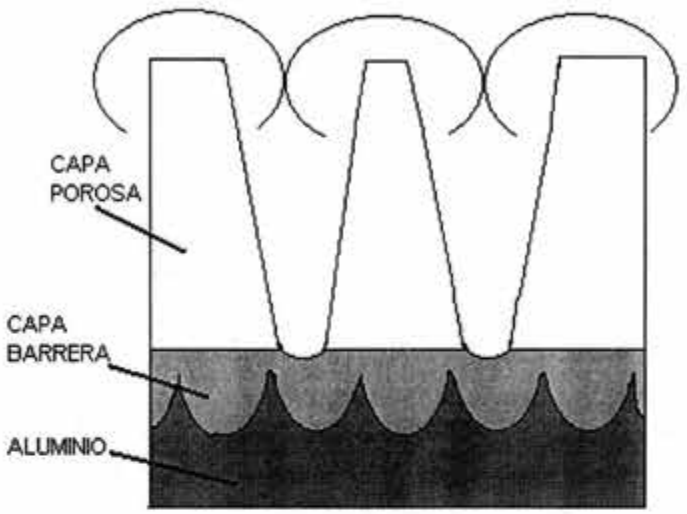



Figura 3.6 Representación esquemática del anodizado del aluminio después de colmatar

Tabla 3.7 composición de baños utilizados para el anodizado del aluminio [30]

| Proceso | Ácido (%) | Densidad de corriente ($A/dm^2$) | Voltaje (V) | Temp. ($^0C$) | Tiempo (min.) | Tipo de película |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ácido Crómico | 3-10 | 0.4-0.6 | 15 | 40 | 60-30 | gris-blanco opaco |
| Ácido Sulfúrico | 14-20 | 1.2-1.5 | 15 | 18-20 | 30-40 | poco translúcido<br>normal translúcido |
| Ácido Oxálico | 5-15 | 0.5-1.5 | 30-60 | 35-40 | 30-60 | amarillo- pálido<br>amarillo- fuerte<br>incoloro |

Tabla 3.8 Resumen de procesos por deposición física a partir de la fase vapor [53]

| PROCESO DE DEPOSICION | CARACTERISTICAS | MATERIALES DE RECUBRIMIENTO |
|---|---|---|
| Evaporación al vacío | El equipo tiene un costo relativamente bajo y es muy sencillo.<br>La deposición de compuestos es difícil.<br>La adhesión del recubrimiento no es muy buena. | Ago, Al, Au, Cr, Cu, Mo, W |
| Bombardeo de partículas atómicas (sputtering) | Mejor descarga de energía y adhesión del recubrimiento que en la evaporación al vacío.<br>Posibilidad de recubrir compuestos.<br>Velocidades de deposición más lentas y un control del proceso más difícil que el de vacío. | $Al_2O_3$, Au, Cr, Mo, $SiO_2$, $Si_3N_4$, TiC, TiN |
| Recubrimiento iónico | La mejor cobertura de adhesión del recubrimiento hablando de proceso de deposición física.<br>El control del proceso es muy complejo.<br>Velocidades de deposición más altas que la deposición electrolítica. | Ag, Au, Cr, Mo, $Si_3N_4$, TiC, TiN |

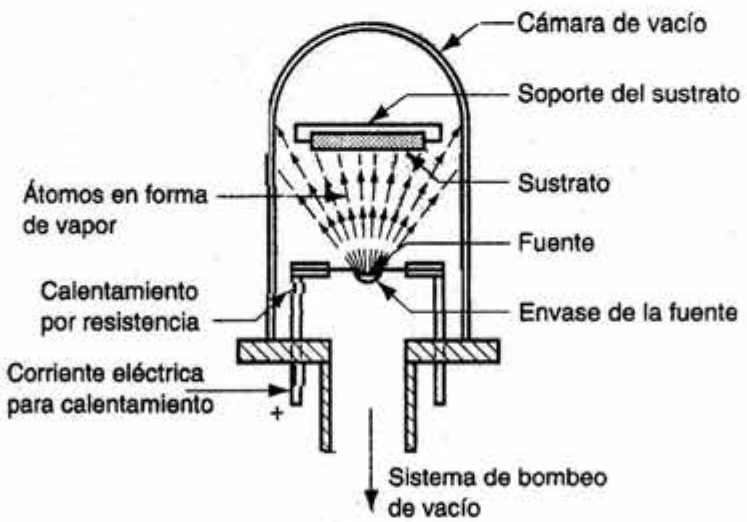



Figura 3.9 Instalación para la deposición física de vapor por evaporación al vacío

Figura 3.10 Esquema de evaporación

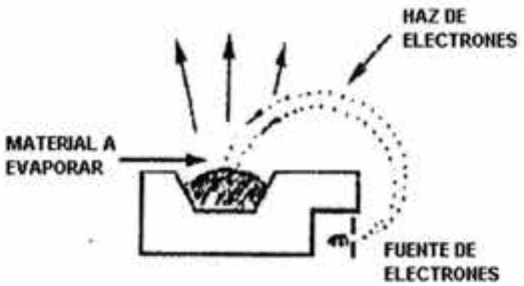



Figura 3.11 Haz de electrones

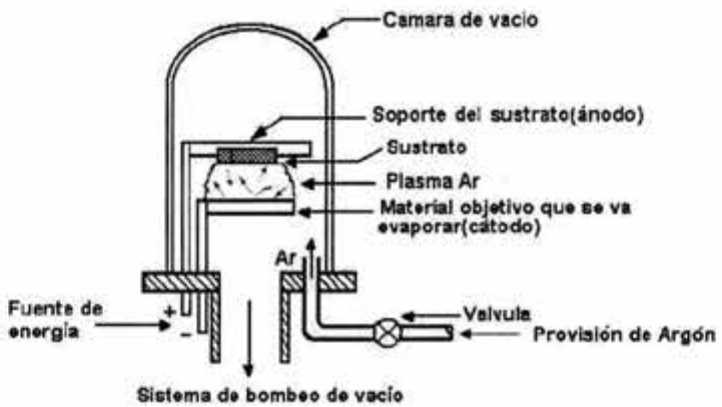



Figura 3.12 Instalación para el bombardeo de partículas atómicas (sputtering), una forma de deposición física de vapor

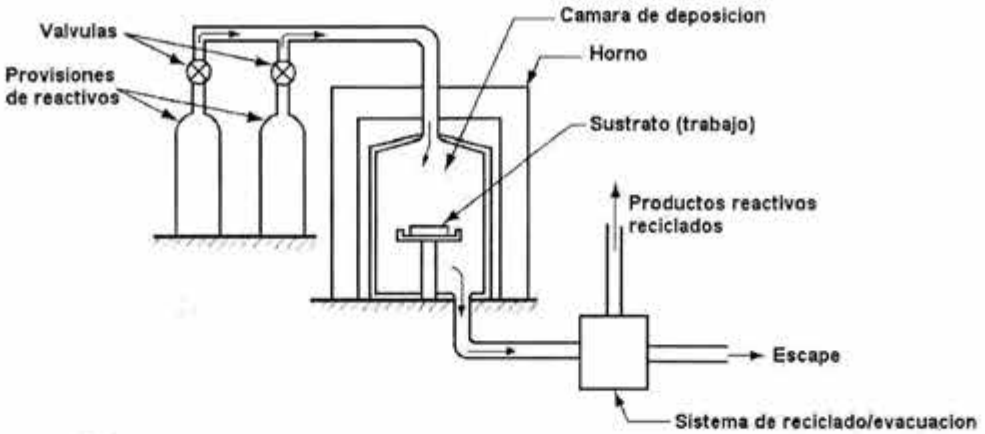



Figura 3.13 Reactor común usado en la deposición química de vapor

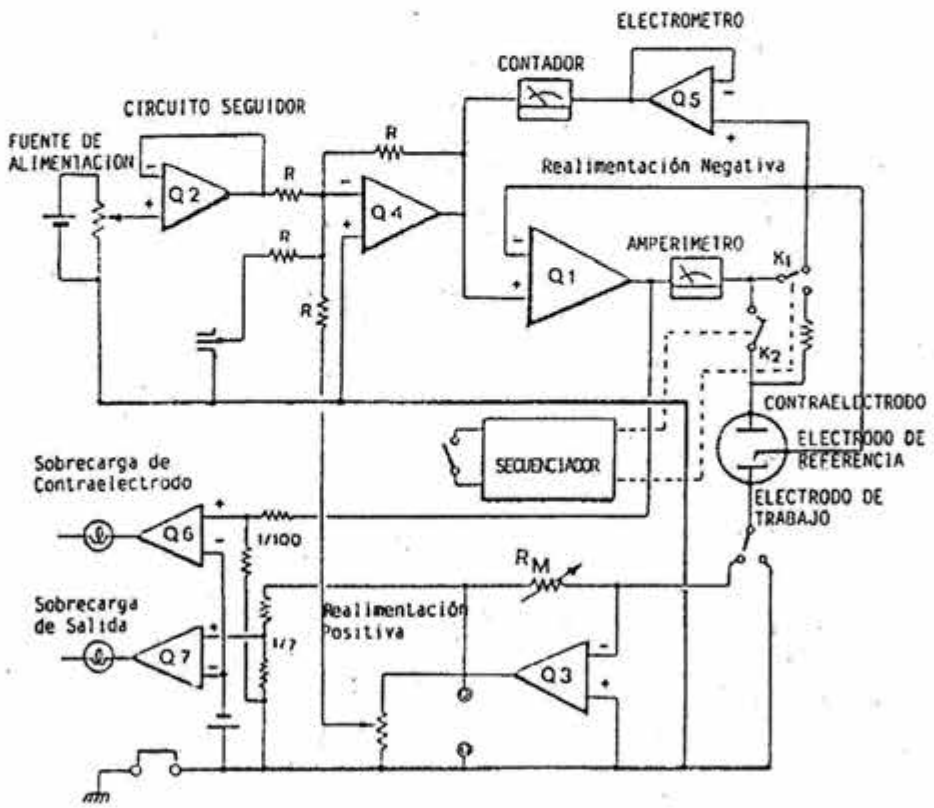



Figura 4.1 Esquema de potenciostáto

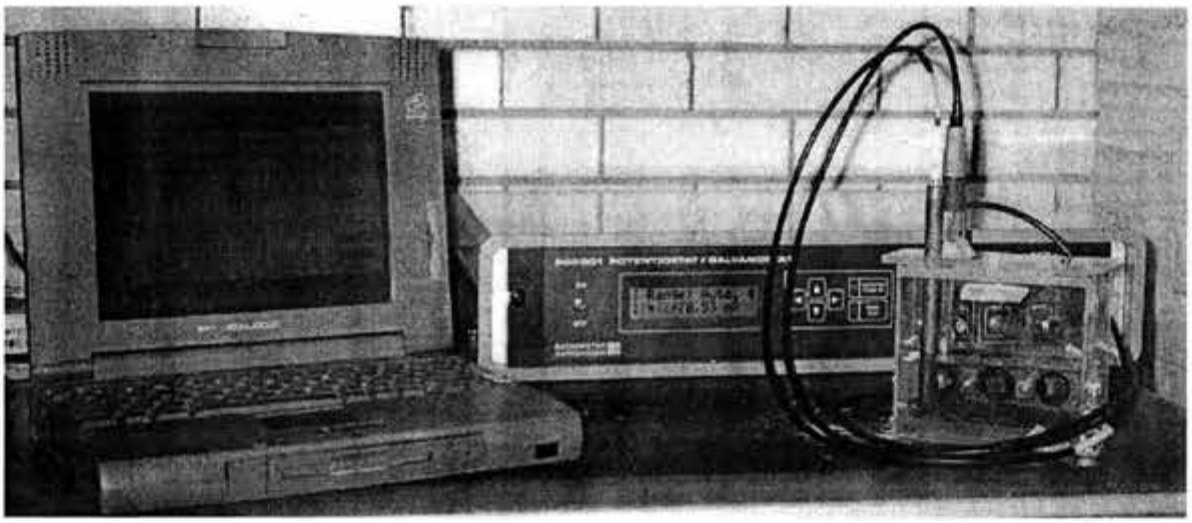


Figura 4.2 Potenciostáto utilizado

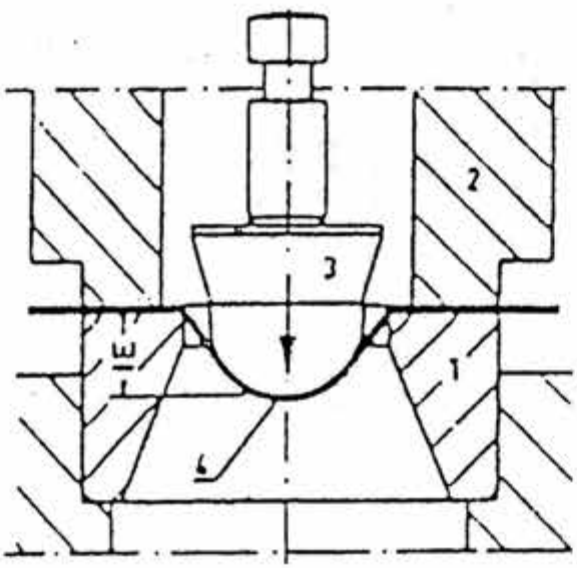
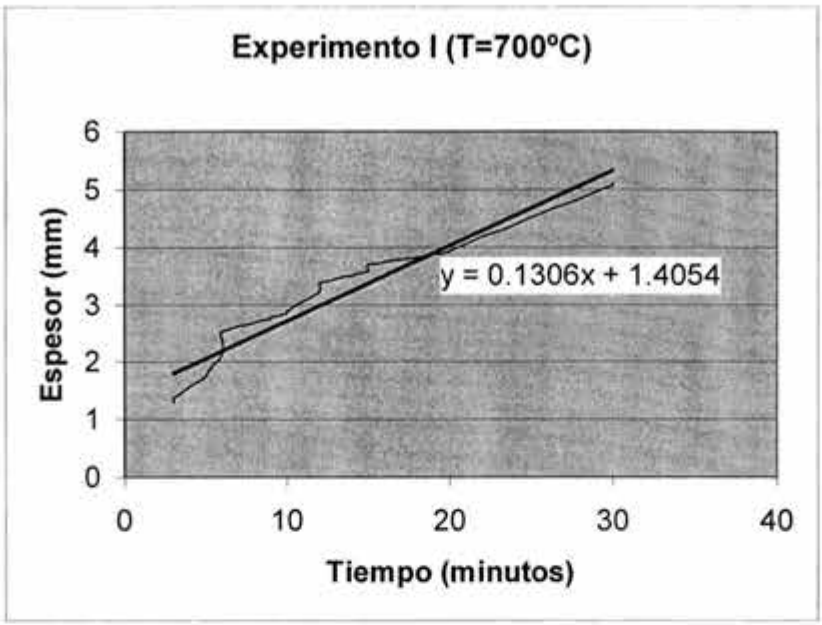



Figura 4.3 Esquema del ensayo de embutición
1.- Matriz 2.- Pisador 3.- punzón esférico

Tabla 4.4 Experimento 1 Variación del tiempo de inmersión del acero en Zinalco fundido a 700 °C

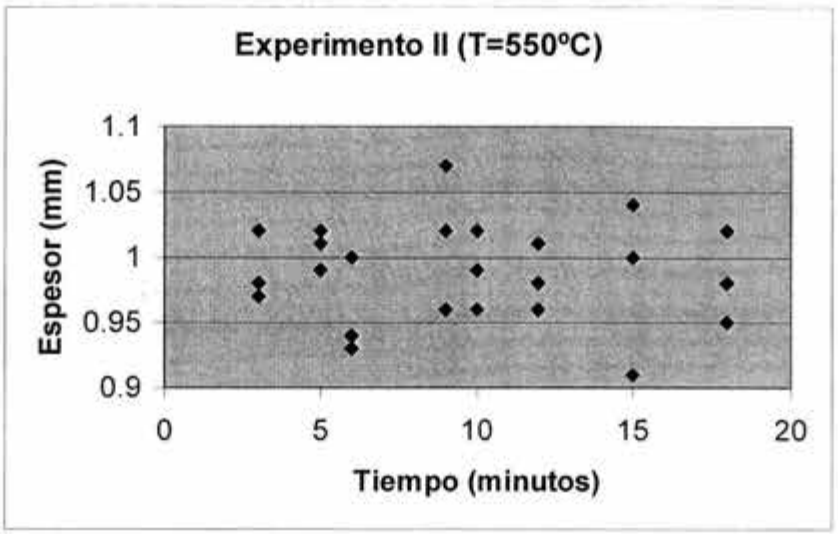
| | No. Probeta | Temperatura (°C) | Tiempo (minutos) | Espesor (mm) |
|---|---|---|---|---|
| EXPERIMENTO 1 | 1 | 700 | 3 | 1.30 |
| | 2 | 700 | 3 | 1.35 |
| | 3 | 700 | 3 | 1.37 |
| | 4 | 700 | 5 | 1.75 |
| | 5 | 700 | 5 | 1.76 |
| | 6 | 700 | 5 | 1.79 |
| | 7 | 700 | 6 | 2.13 |
| | 8 | 700 | 6 | 2.38 |
| | 9 | 700 | 6 | 2.54 |
| | 10 | 700 | 9 | 2.75 |
| | 11 | 700 | 9 | 2.77 |
| | 12 | 700 | 9 | 2.78 |
| | 13 | 700 | 10 | 2.85 |
| | 14 | 700 | 10 | 2.86 |
| | 15 | 700 | 10 | 2.88 |
| | 16 | 700 | 12 | 3.21 |
| | 17 | 700 | 12 | 3.35 |
| | 18 | 700 | 12 | 3.37 |
| | 19 | 700 | 15 | 3.57 |
| | 20 | 700 | 15 | 3.58 |
| | 21 | 700 | 15 | 3.68 |
| | 22 | 700 | 20 | 3.90 |
| | 23 | 700 | 20 | 3.93 |
| | 24 | 700 | 20 | 3.94 |
| | 25 | 700 | 30 | 5.07 |
| | 26 | 700 | 30 | 5.08 |
| | 27 | 700 | 30 | 5.10 |



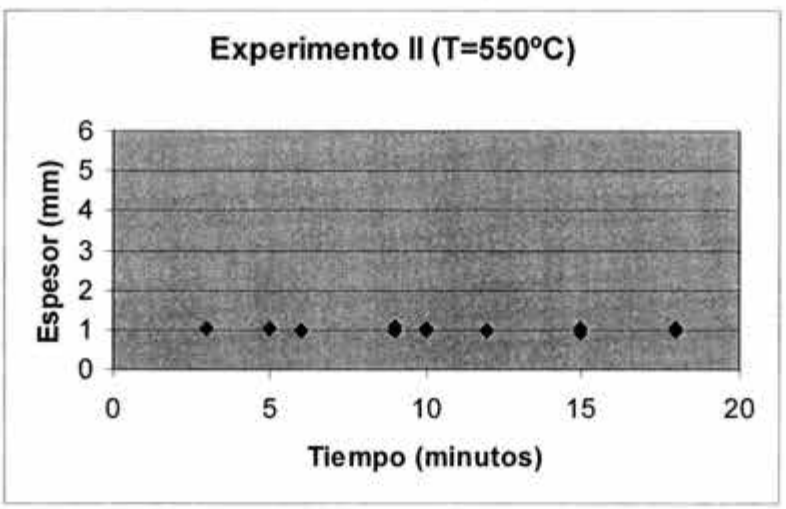

Gráfica 4.5 Resultados de la serie de ensayos del experimento I para el zinalco.

Tabla 4.4.1 Experimento 2 Variación del tiempo de inmersión del acero en Zinalco fundido a 550 °C

| | N0. probeta | Temperatura (°C) | Tiempo (minutos) | Espesor (mm) |
|---|---|---|---|---|
| EXPERIMENTO 2 | 28 | 550 | 3 | 0.97 |
| | 29 | 550 | 3 | 0.98 |
| | 30 | 550 | 3 | 1.02 |
| | 31 | 550 | 5 | 1.01 |
| | 32 | 550 | 5 | 0.99 |
| | 33 | 550 | 5 | 1.02 |
| | 34 | 550 | 6 | 0.93 |
| | 35 | 550 | 6 | 0.94 |
| | 36 | 550 | 6 | 1.00 |
| | 37 | 550 | 9 | 1.02 |
| | 38 | 550 | 9 | 0.96 |
| | 39 | 550 | 9 | 1.07 |
| | 40 | 550 | 10 | 0.99 |
| | 41 | 550 | 10 | 1.02 |
| | 42 | 550 | 10 | 0.96 |
| | 43 | 550 | 12 | 1.01 |
| | 44 | 550 | 12 | 0.98 |
| | 45 | 550 | 12 | 0.96 |
| | 46 | 550 | 15 | 1.00 |
| | 47 | 550 | 15 | 0.91 |
| | 48 | 550 | 15 | 1.04 |
| | 49 | 550 | 18 | 1.02 |
| | 50 | 550 | 18 | 0.95 |
| | 51 | 550 | 18 | 0.98 |



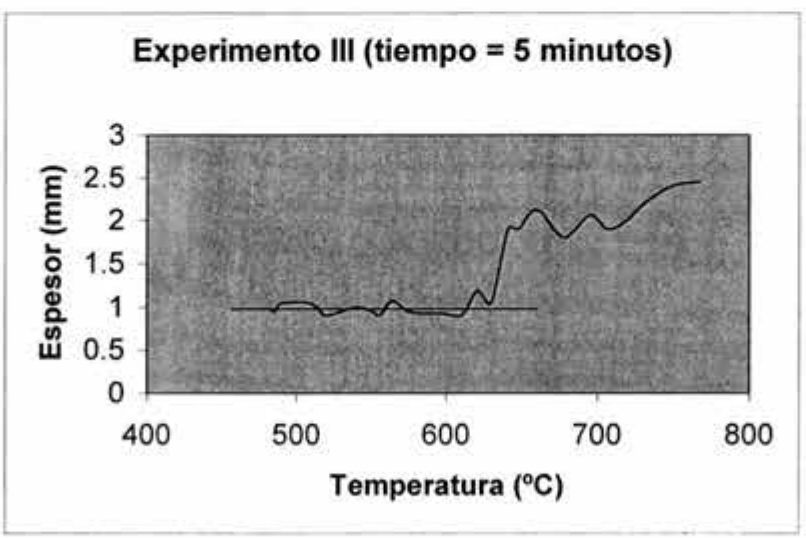

Gráfica 4.6 Resultados de la serie de ensayos del experimento II para el zinalco.




Gráfica 4.7 Resultados de la serie de ensayos del experimento I I para el zinalco

Tabla 4.8 Experimento 3 Variación de la temperatura de inmersión del acero en Zinalco fundido desde 768 hasta 481°C

| | No. Probeta | Temperatura (°C) | Tiempo (s) | Espesor (mm) |
|---|---|---|---|---|
| EXPERIMENTO 3 | 1 | 768 | 5 | 2.45 |
| | 2 | 749 | 5 | 2.40 |
| | 3 | 730 | 5 | 2.18 |
| | 4 | 720 | 5 | 2.00 |
| | 5 | 707 | 5 | 1.90 |
| | 6 | 695 | 5 | 2.06 |
| | 7 | 678 | 5 | 1.80 |
| | 8 | 660 | 5 | 2.12 |
| | 9 | 648 | 5 | 1.90 |
| | 10 | 641 | 5 | 1.90 |
| | 11 | 630 | 5 | 1.06 |
| | 12 | 621 | 5 | 1.19 |
| | 13 | 611 | 5 | 0.91 |
| | 14 | 599 | 5 | 0.92 |
| | 15 | 588 | 5 | 0.92 |
| | 16 | 574 | 5 | 0.95 |
| | 17 | 564 | 5 | 1.07 |
| | 18 | 556 | 5 | 0.90 |
| | 19 | 549 | 5 | 0.96 |
| | 20 | 540 | 5 | 1.00 |
| | 21 | 527 | 5 | 0.93 |
| | 22 | 518 | 5 | 0.91 |
| | 23 | 510 | 5 | 1.04 |
| | 24 | 490 | 5 | 1.04 |
| | 25 | 486 | 5 | 0.95 |
| | 26 | 481 | 5 | 0.98 |




Gráfica 4.9 Resultados de la serie de ensayos del experimento III para el zinalco

Gráfica 4.10 Resumen de experimentos 1, 2 y 3 variación del recubrimiento de aluminio al variar el tiempo y la temperatura

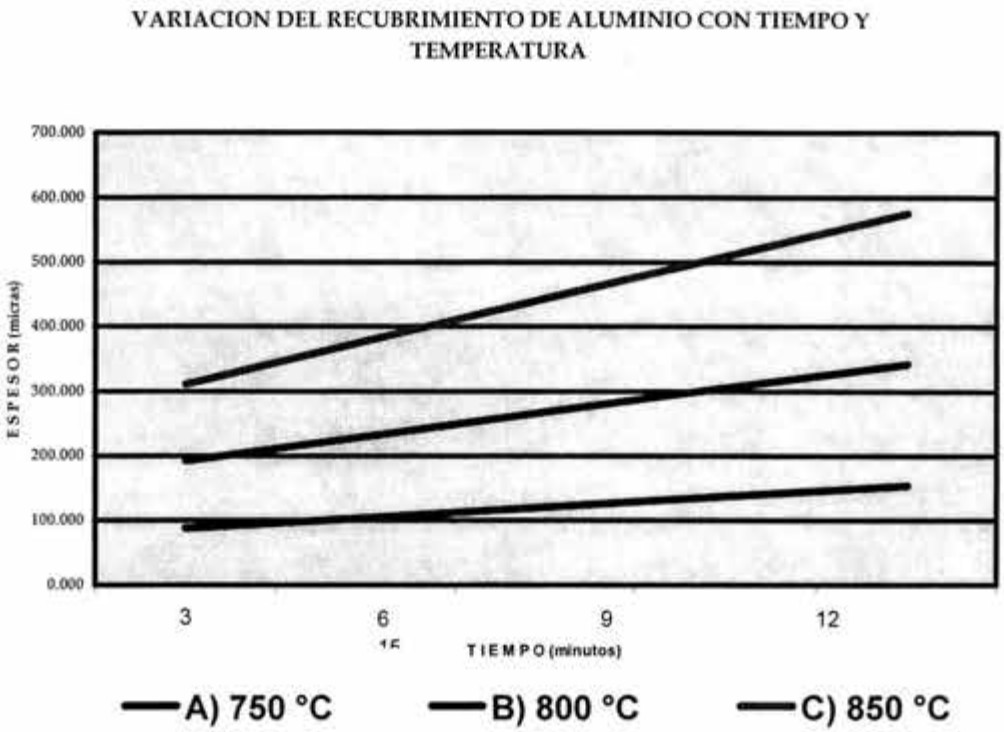



Tabla 4.10.1 Experimento 1 variación del tiempo de inmersión del acero en aluminio fundido a 750 °C

| | No. de probeta | Temperatura (°C) | Tiempo (minutos) | Espesor (micras) |
|---|---|---|---|---|
| EXPERIMENTO 1 | 1 | 750 | 3 | 88.000 |
| | 2 | 750 | 3 | 87.500 |
| | 3 | 750 | 3 | 87.500 |
| | 4 | 750 | 6 | 104.375 |
| | 5 | 750 | 6 | 104.381 |
| | 6 | 750 | 6 | 104.398 |
| | 7 | 750 | 9 | 121.250 |
| | 8 | 750 | 9 | 121.256 |
| | 9 | 750 | 9 | 121.273 |
| | 10 | 750 | 12 | 138.125 |
| | 11 | 750 | 12 | 138.142 |
| | 12 | 750 | 12 | 138.148 |
| | 13 | 750 | 15 | 155.006 |
| | 14 | 750 | 15 | 155.017 |
| | 15 | 750 | 15 | 155.028 |

Tabla 4.10.2 Experimento 2 Variación del tiempo de inmersión del acero en aluminio fundido a 800 °C

| | No. de probeta | Temperatura (°C) | Tiempo (minutos) | Espesor (micras) |
|---|---|---|---|---|
| EXPERIMENTO 2 | 1 | 800 | 3 | 104.200 |
| | 2 | 800 | 3 | 105.010 |
| | 3 | 800 | 3 | 105.170 |
| | 4 | 800 | 6 | 125.758 |
| | 5 | 800 | 6 | 125.841 |
| | 6 | 800 | 6 | 125.869 |
| | 7 | 800 | 9 | 146.506 |
| | 8 | 800 | 9 | 146.520 |
| | 9 | 800 | 9 | 146.541 |
| | 10 | 800 | 12 | 167.254 |
| | 11 | 800 | 12 | 167.351 |
| | 12 | 800 | 12 | 167.448 |
| | 13 | 800 | 15 | 188.002 |
| | 14 | 800 | 15 | 188.043 |
| | 15 | 800 | 15 | 188.085 |

Tabla 4.10.3 Experimento 3 Variación del tiempo de inmersión del acero en aluminio fundido a 850 °C

| | No. de probeta | Temperatura (°C) | Tiempo (minutos) | Espesor (micras) |
|---|---|---|---|---|
| EXPERIMENTO 3 | 1 | 850 | 3 | 118.90 |
| | 2 | 850 | 3 | 120.00 |
| | 3 | 850 | 3 | 119.30 |
| | 4 | 850 | 6 | 148.110 |
| | 5 | 850 | 6 | 148.147 |
| | 6 | 850 | 6 | 148.260 |
| | 7 | 850 | 9 | 176.220 |
| | 8 | 850 | 9 | 176.229 |
| | 9 | 850 | 9 | 176.248 |
| | 10 | 850 | 12 | 204.330 |
| | 11 | 850 | 12 | 204.461 |
| | 12 | 850 | 12 | 204.527 |
| | 13 | 850 | 15 | 232.440 |
| | 14 | 850 | 15 | 232.524 |
| | 15 | 850 | 15 | 232.581 |

Tabla 4.11 Resumen de actividades realizadas a las probetas de zinalquizado

| No. Probeta | Tiempo de inmersión min | Enfriamiento | Temperatura de inmersión °C | Temperatura de recocido °C | Laminación % | Recocido hrs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | ambiente | 600 | **** | **** | **** |
| 6 | 5 | ambiente | 600 | 350 | **** | 1 |
| 11 | 5 | ambiente | 600 | 350 | **** | 2 |
| 16 | 5 | ambiente | 600 | 350 | **** | 3 |
| 21 | 5 | ambiente | 600 | 350 | **** | 4 |
| 26 | 5 | ambiente | 600 | 350 | **** | 5 |
| 31 | 5 | ambiente | 600 | **** | 20% | **** |
| 36 | 5 | ambiente | 600 | **** | 40% | **** |
| 41 | 5 | ambiente | 600 | 350 | 20% | 2 |
| 46 | 5 | ambiente | 600 | 350 | 40% | 2 |

Tabla 4.12 Resumen de actividades realizadas a las probetas aluminizadas

| No. Probeta | Tiempo de inmersión min | Enfriamiento | Temperatura de inmersión °C | Temperatura de recocido °C | Laminación % | Recocido hrs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 5 | ambiente | 800 | **** | **** | **** |
| 56 | 5 | ambiente | 800 | 550 | **** | 1 |
| 61 | 5 | ambiente | 800 | 550 | **** | 2 |
| 66 | 5 | ambiente | 800 | 550 | **** | 3 |
| 71 | 5 | ambiente | 800 | 550 | **** | 4 |
| 76 | 5 | ambiente | 800 | 550 | **** | 5 |
| 81 | 5 | ambiente | 800 | **** | 20% | **** |
| 86 | 5 | ambiente | 800 | **** | 40% | **** |
| 91 | 5 | ambiente | 800 | 550 | 20% | 2 |
| 96 | 5 | ambiente | 800 | 550 | 40% | 2 |

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 1)

Figura 5.1 MEB 400X Vista general de la probeta solo inmersión en metal fundido. Se aprecia la región correspondiente al acero perfectamente delimitada. Los granos están bien definidos. El espesor de la zona de intermetálico es homogéneo.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 1)

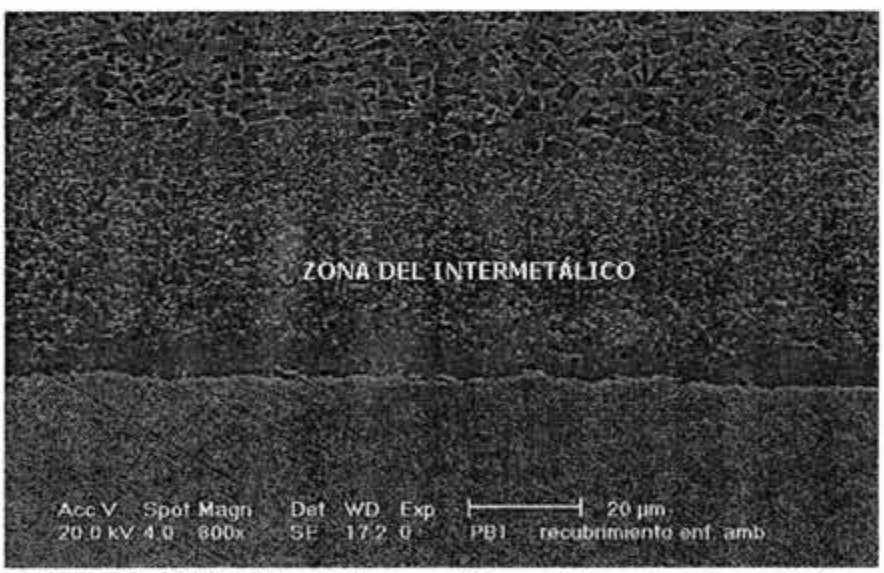



Figura 5.2 MEB 800X Vista del intermetálico y del recubrimiento de la probeta solo inmersión en metal fundido. Puede observarse la zona externa constituida de una fase oscura (rica en Al) y otra clara (rica en Zinc). La zona intermetálica con alto contenido de Al, donde se generan compuestos intermetálicos Fe-Al.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 6)

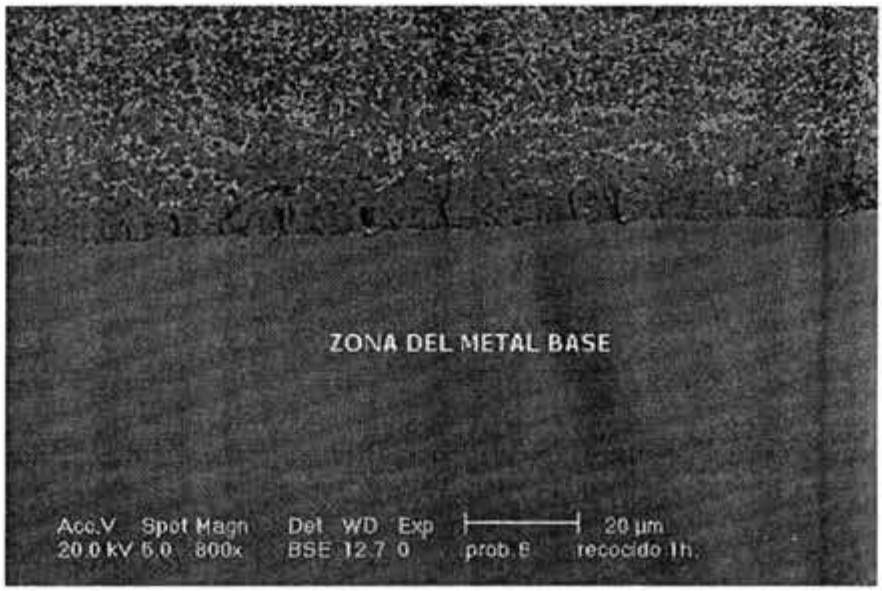



Figura 5.3 MEB 800X Vista general de la probeta recocida una hora. El espesor del intermetálico es menor que en el caso anterior, pero bastante homogéneo. Se presentan algunas grietas a lo largo de todo el intermetálico.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 6)

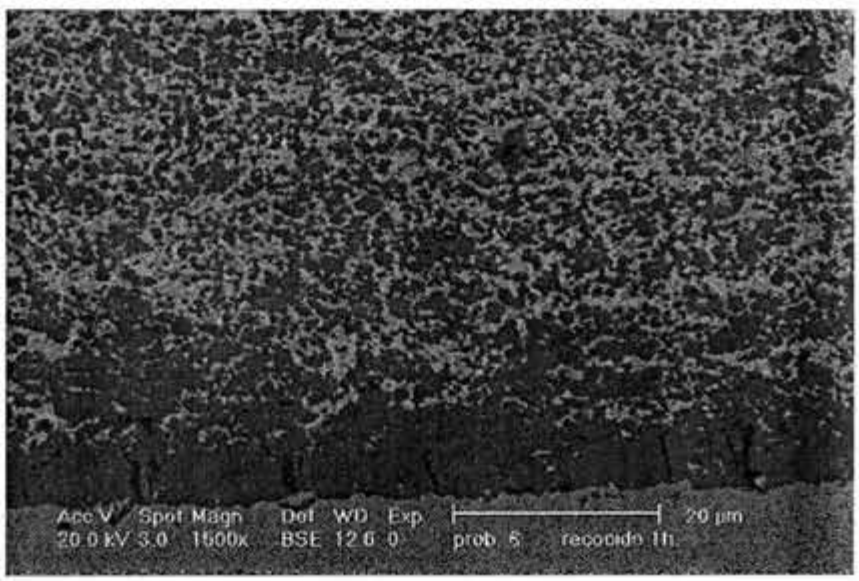



Figura 5.4 MEB 1500X Acercamiento de las zonas de la probeta recocida una hora. Se observan granos bien consolidados y compactos se tiene gran presencia de Zn en los limites de grano.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 11)

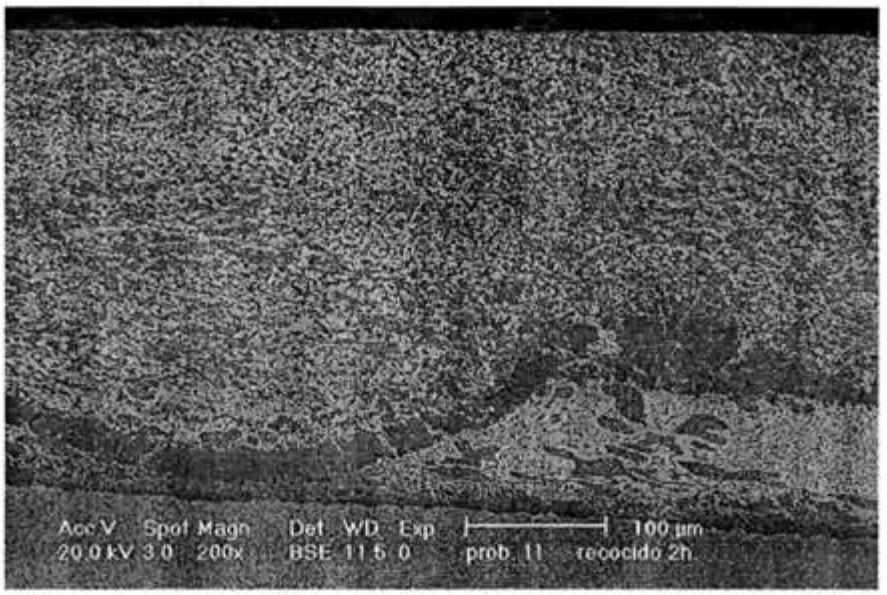



Figura 5.5 MEB 200X Vista general de la probeta recocida dos horas.
Se nota un desplazamiento del intermetálico hacia la zona superior del recubrimiento. Se presentan formas geométricas debido a la difusión del aluminio contenido en esta zona hacia el recubrimiento.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 11)

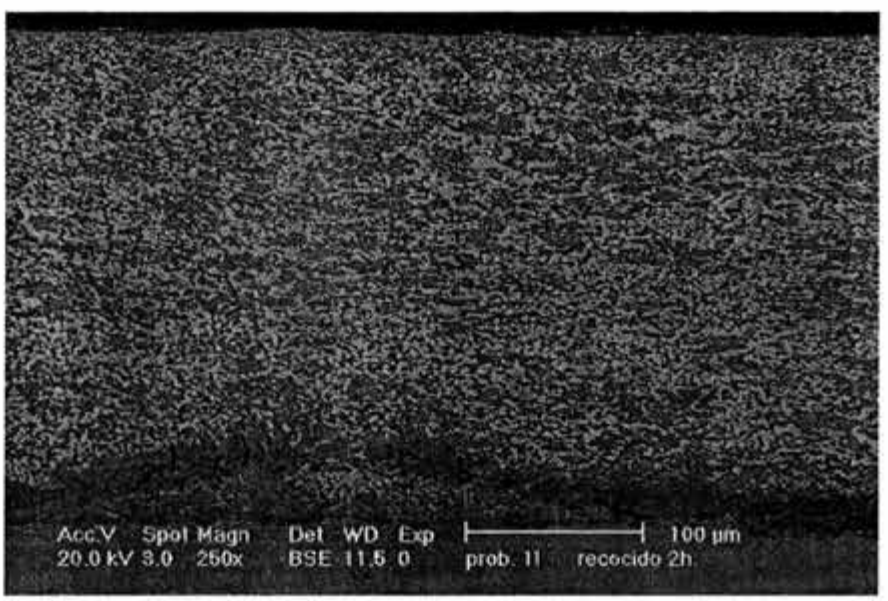



Figura 5.6 MEB 250X Acercamiento del intermetálico en la probeta recocida dos horas, se tienen algunas porosidades en el recubrimiento, el tamaño es homogéneo.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 11)

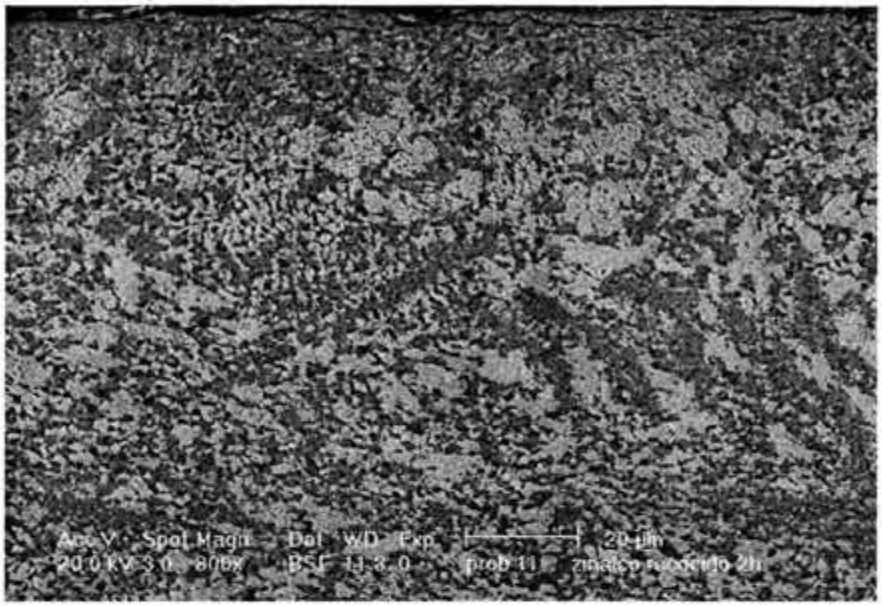


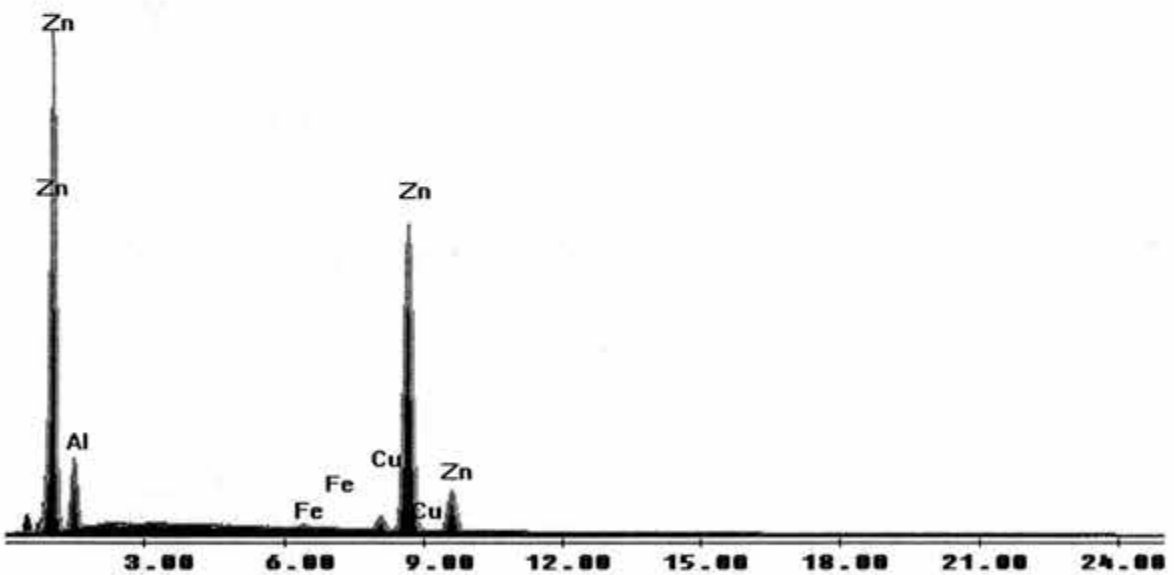

Figura 5.7 MEB 800X Vista del recubrimiento zona superior de la probeta recocida dos horas. Presencia de porosidades.

Tablas y graficas 5.8 Análisis del recubrimiento en la zona exterior, media e intermetálico de la (probeta 11) recocida dos horas

**Composición química de la probeta 11 zona externa del recubrimiento:**

| Elemento | Wt % | At % |
|---|---|---|
| Al | 10.12 | 21.41 |
| Fe | 0.37 | 0.37 |
| Cu | 3.08 | 2.77 |
| Zn | 86.43 | 75.45 |
| Total | 100 | 100 |

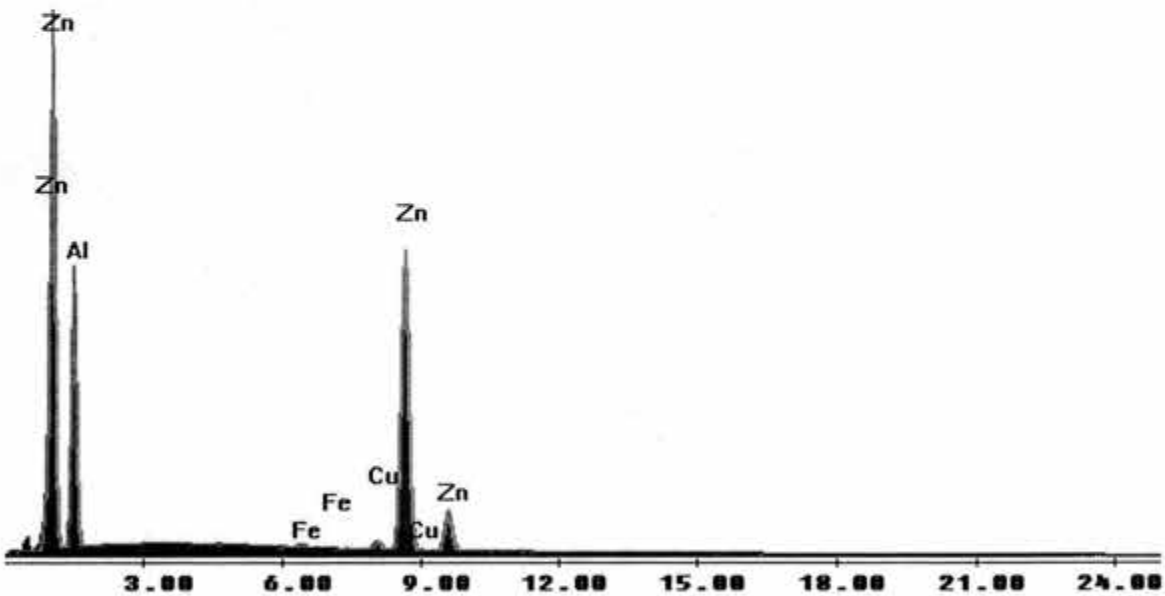
**Gráfica del análisis químico en la zona externa de la probeta 11**



**Composición química en la zona media del recubrimiento probeta 11:**

| Elemento | Wt % | At % |
|---|---|---|
| Al | 27.82 | 48.26 |
| Fe | 0.32 | 0.27 |
| Cu | 1.72 | 1.27 |
| Zn | 70.14 | 50.21 |
| Total | 100 | 100 |

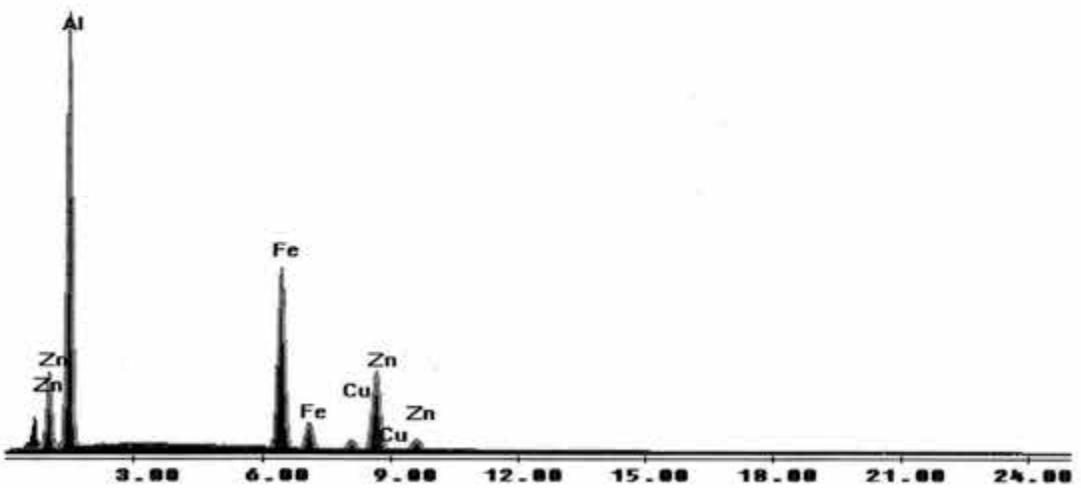
**Gráfica del análisis químico en la zona media de la probeta 11**



**Composición química en la zona de intermetálico probeta 11:**

| Elemento | Wt % | At % |
|---|---|---|
| Al | 43.57 | 63.26 |
| Fe | 28.26 | 19.82 |
| Cu | 2.17 | 1.34 |
| Zn | 26 | 15.58 |
| Total | 100 | 100 |

**Gráfica del análisis químico en la zona del intermetálico de la probeta 11**



Recubrimiento Zinalco. (Probeta 16)

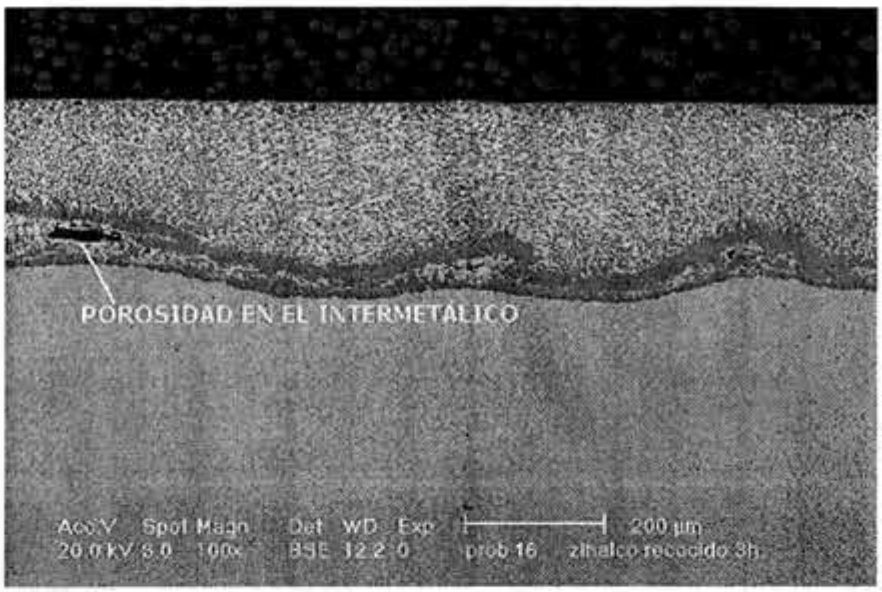



Figura 5 .9 MEB 100X Vista general de la probeta recocida tres horas. El espesor no es homogéneo. Se forman algunas ondulaciones debido a la difusión del aluminio contenido en esta zona hacia el recubrimiento, existen porosidades en esta zona y algunas cavidades.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 16)

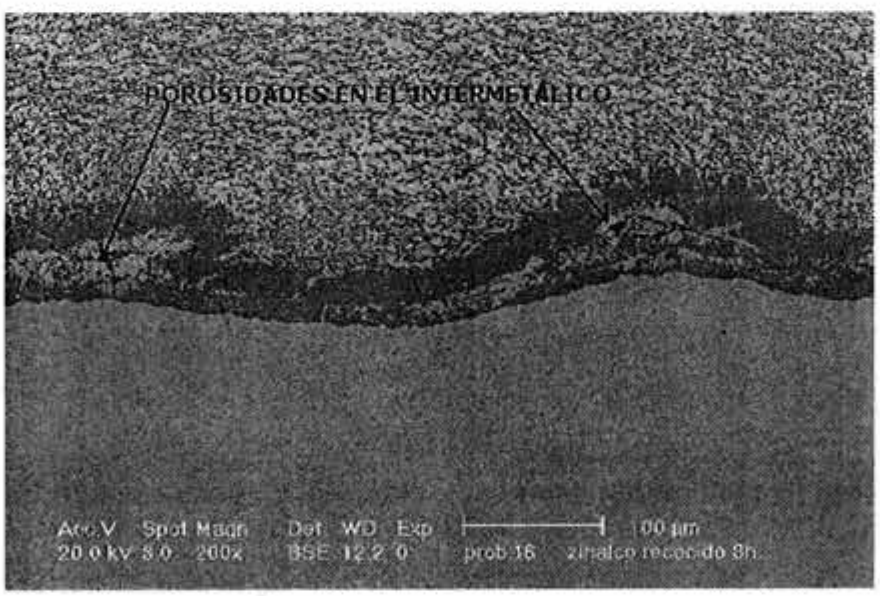



Figura 5.10 MEB 200X Acercamiento de las porosidades existentes en el intermetálico de la probeta recocida tres horas.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 21)

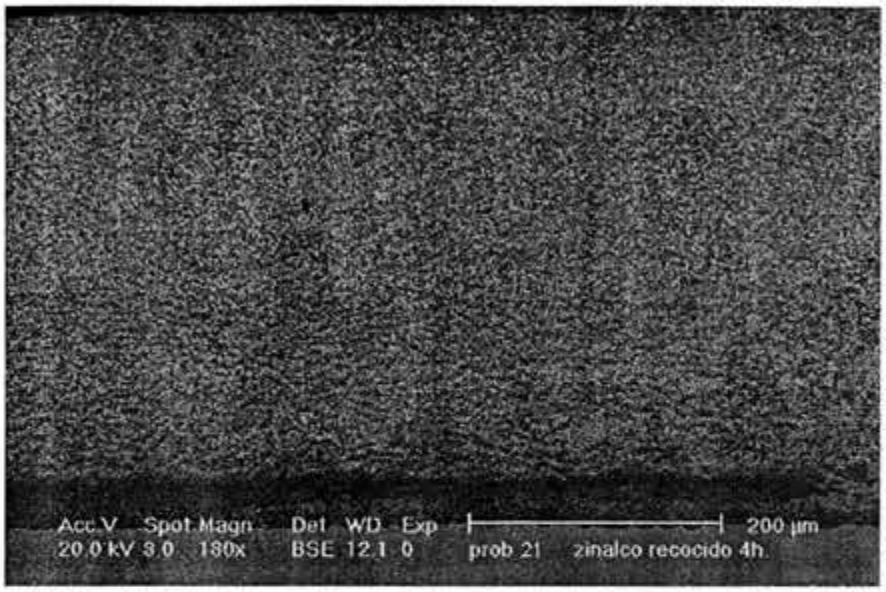



Figura 5.11 MEB 180X Vista general de la probeta recocida cuatro horas. El espesor es homogéneo, se concentran grandes cantidades de porosidades y cavidades.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 21)

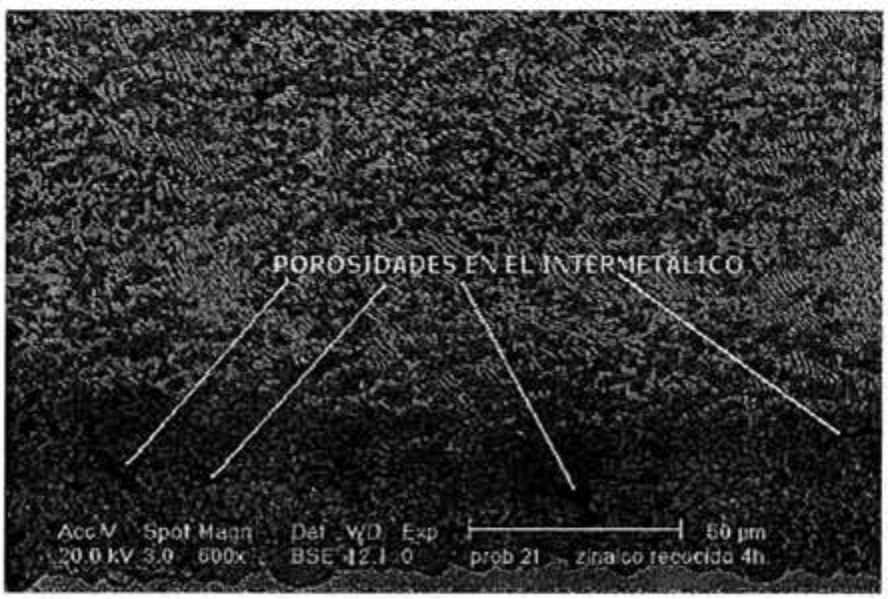



Figura 5.12 MEB 600X Notable presencia de porosidades en todo el recubrimiento. Acercamiento en la probeta recocida cuatro horas.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 26)

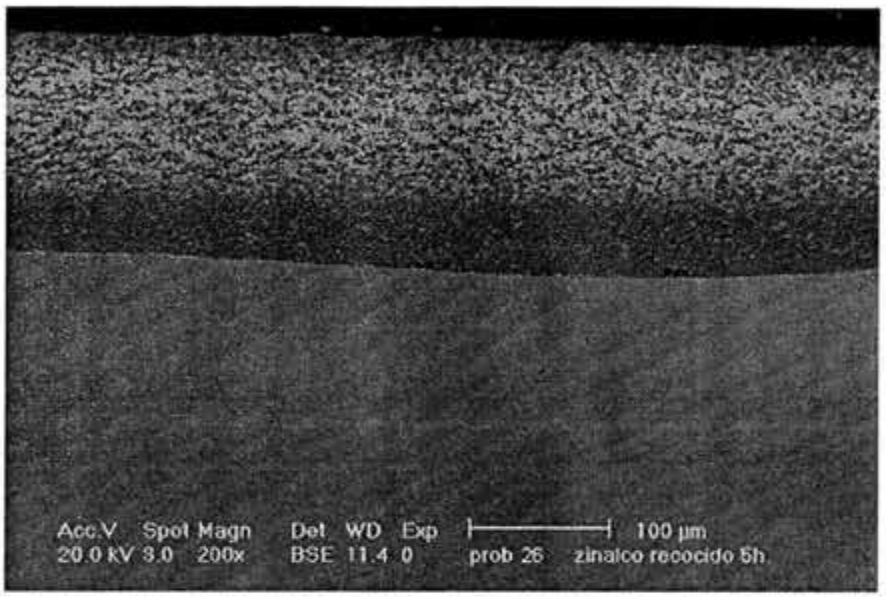



Figura 5.13 MEB 200X Vista general de la probeta recocida cinco horas. El espesor del intermetálico es homogéneo, hay una gran concentración de porosidades y se presentan cavidades cerca del metal base.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 26)

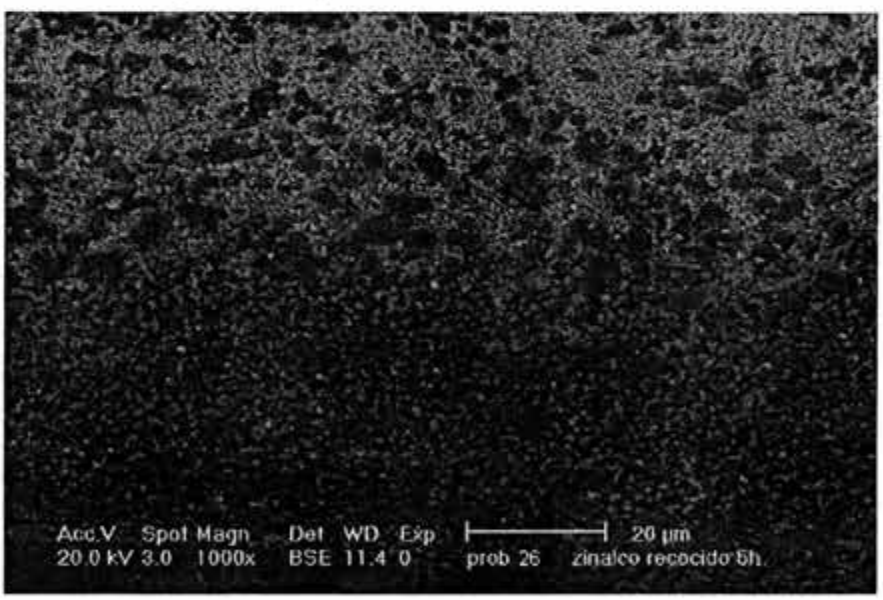



Figura 5.14 MEB 1000X Acercamiento del intermetálico de la probeta recocida cinco horas. Presencia de porosidades en aumento en relación con el tiempo de recocido.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 31)

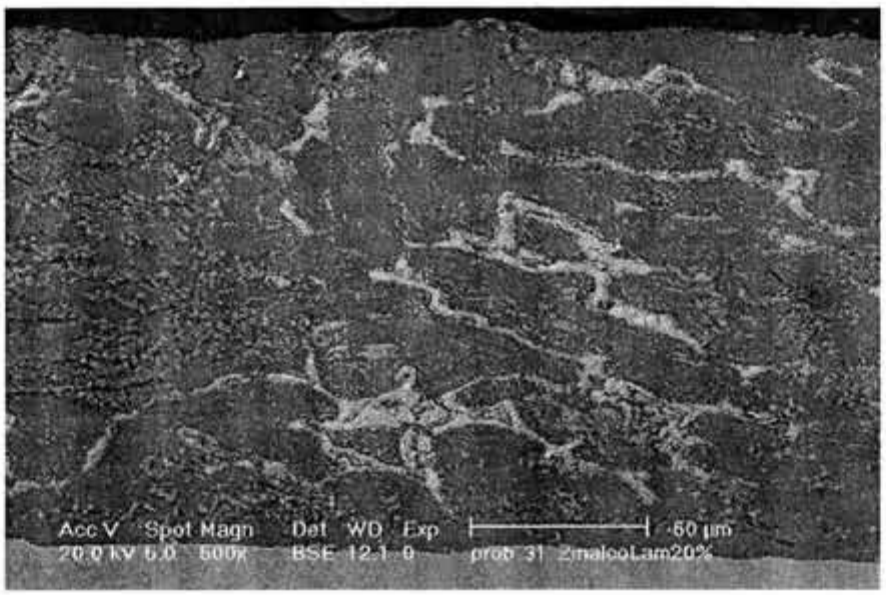



Figura 5.15 MEB 500X Vista general de la probeta laminada 20%.
El intermetálico presenta un espesor pequeño pero homogéneo, se observa la difusión del aluminio existente en ésta zona hacia el metal base.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 31)

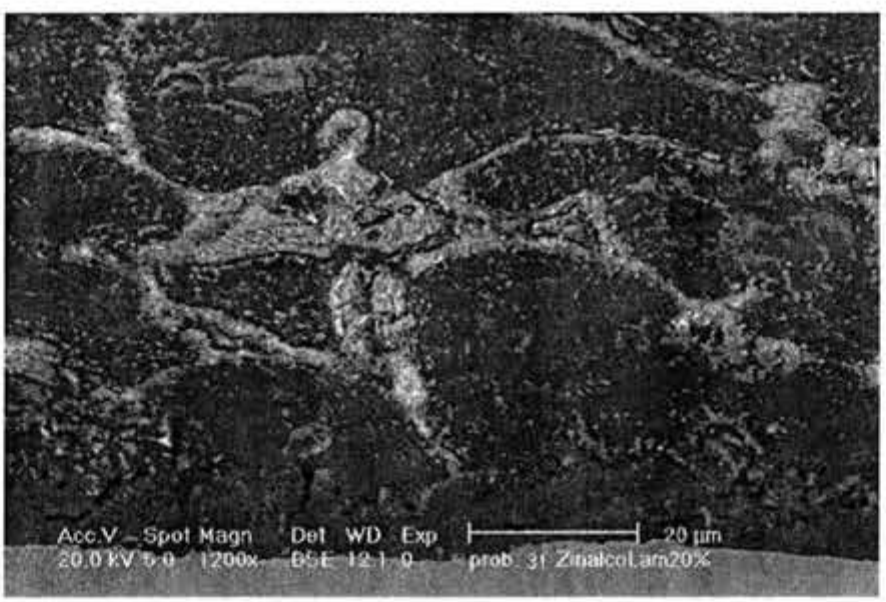



Figura 5.16 MEB 1200X Vista general de la probeta laminada 20%.
Se aprecian granos bien definidos, grandes y alargados.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 36)

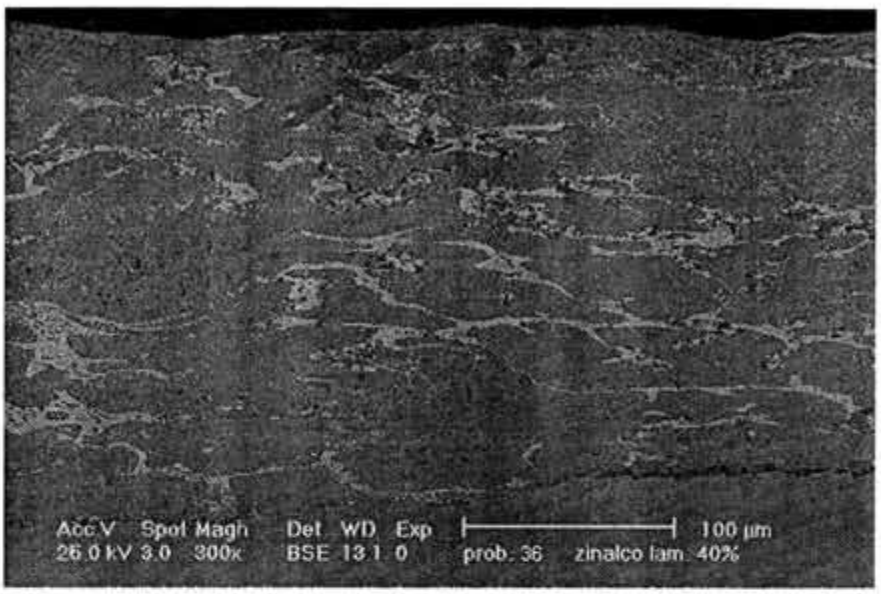



Figura 5.17 MEB 300X Vista general de la probeta laminada 40%.
Se presenta un intermetálico muy delgado y en algunas zonas se puede observar que no hay intermetálico, se observan pocas grietas.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 36)

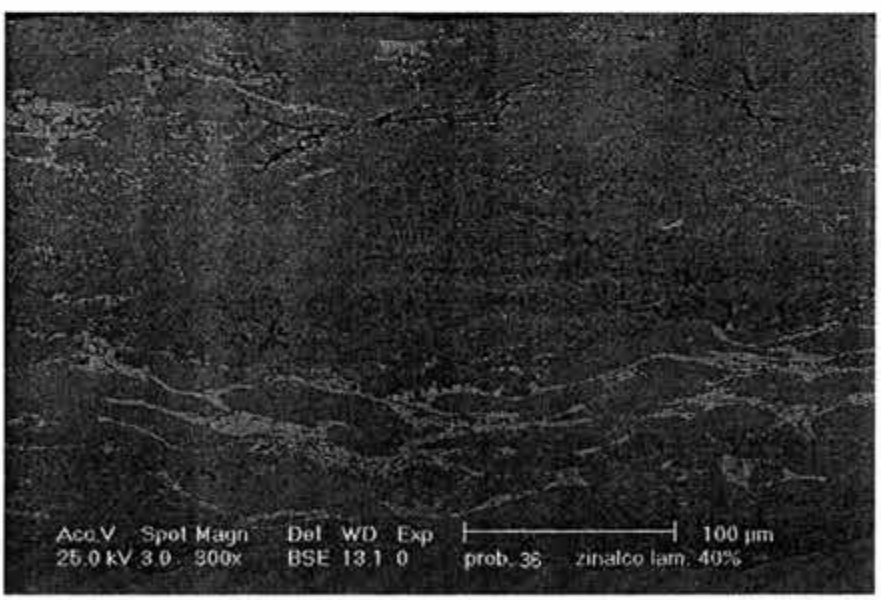



Figura 5.18 MEB 300X Intermetálico de la probeta laminada 40%.
Es notoria la deformación de los granos debido a la laminación. Se muestran granos grandes y alargados, contiene algunas pequeñas grietas.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 41)

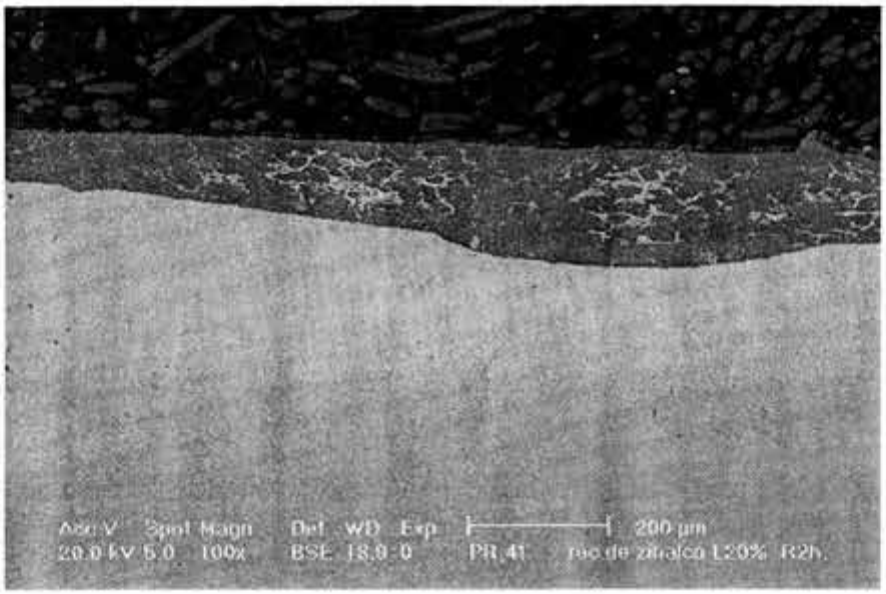



Figura 5.19 MEB 100X Vista general de la probeta laminada 20% y recocida 2 horas. El intermetálico tiene un espesor pequeño el cual en algunos sitios desaparece. La línea de unión con el metal base es muy irregular.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 41)

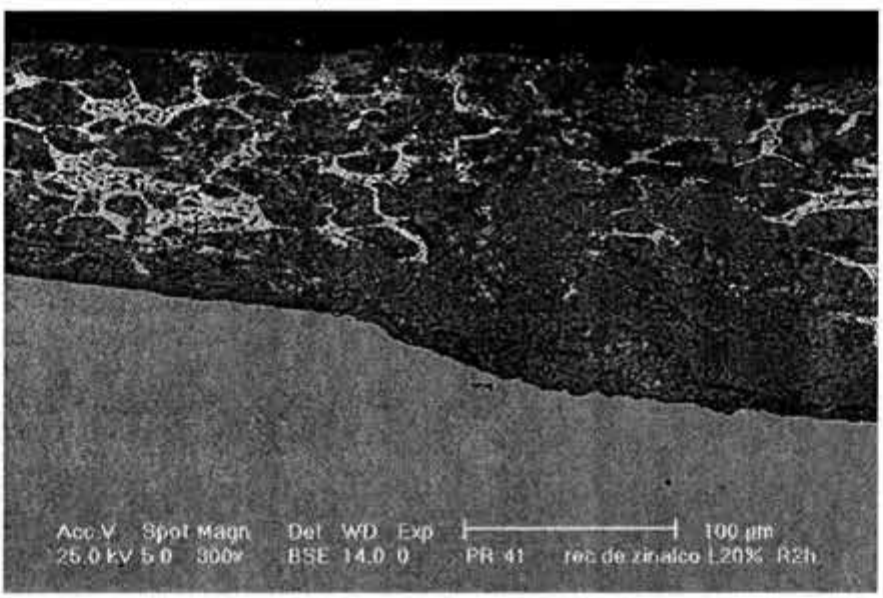



Figura 5.20 MEB 300X Acercamiento del intermetálico de la probeta laminada 20% y recocida 2 horas. Se tiene granos alargados y grandes, presenta zonas que contienen porcentajes similares de Al y Zn.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 46)

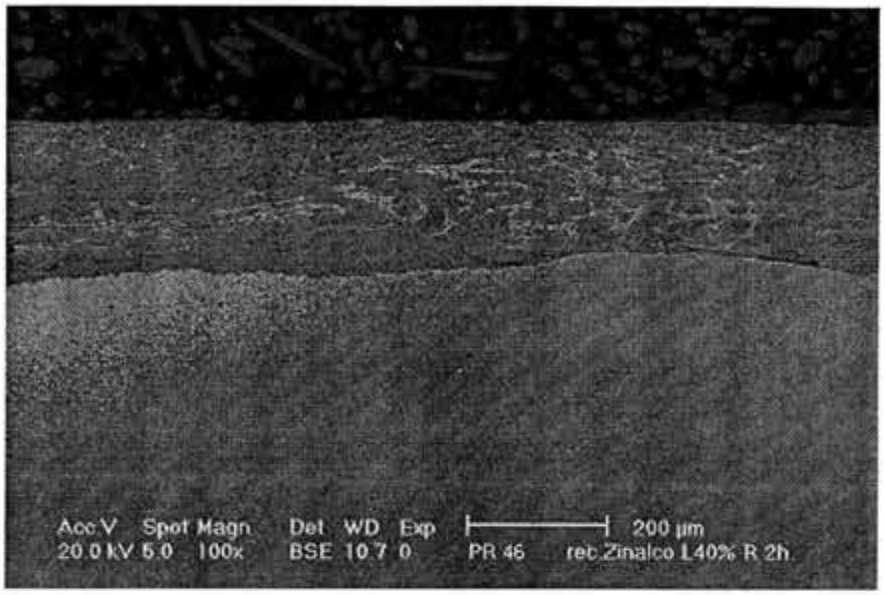



Figura 5.21 MEB 100X Vista general de la probeta laminada 40% y recocida 2 horas. En algunas zonas no hay intermetálico, hay algunas porosidades y las regiones son bien definidas.

Recubrimiento Zinalco. (Probeta 46)

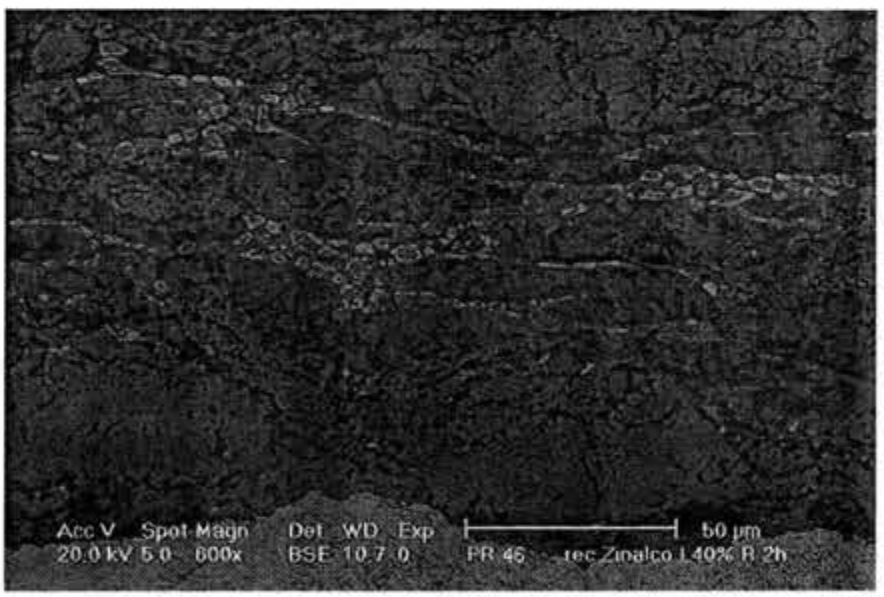



Figura 5.22 MEB 600X Acercamiento del recubrimiento e intermetálico de la probeta laminada 40% y recocida 2 horas. Hay granos alargados y grandes. Gran parte del recubrimiento esta áreas constituido por Al.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 50)

Figura 5.23 MEB 300X Vista general de la probeta solo inmersión en metal fundido. Su espesor es homogéneo. Presenta porosidades que inician en la superficie y se prolongan a la zona media del recubrimiento. Existe agrietamiento multidireccional.

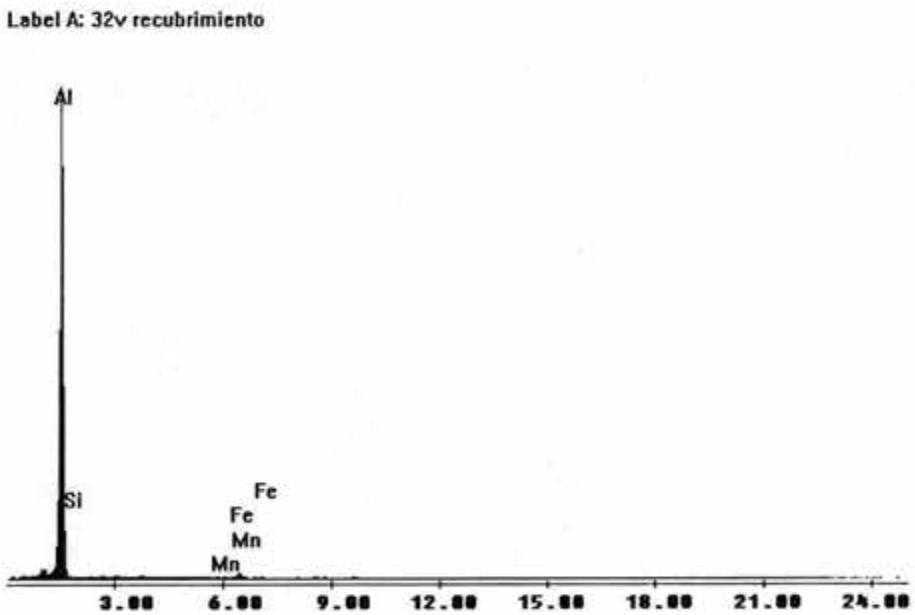
Recubrimiento Aluminio. (Probeta 50)

Figura 5.24 MEB 200X Acercamiento del intermetálico de la probeta solo inmersión en metal fundido. Se tiene un espesor homogéneo. Se muestran pequeñas grietas en el espesor del intermetálico.

**Composición química de la probeta 50 zona externa del 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 |

**Gráfica del análisis químico en la zona externa de la probeta 50**

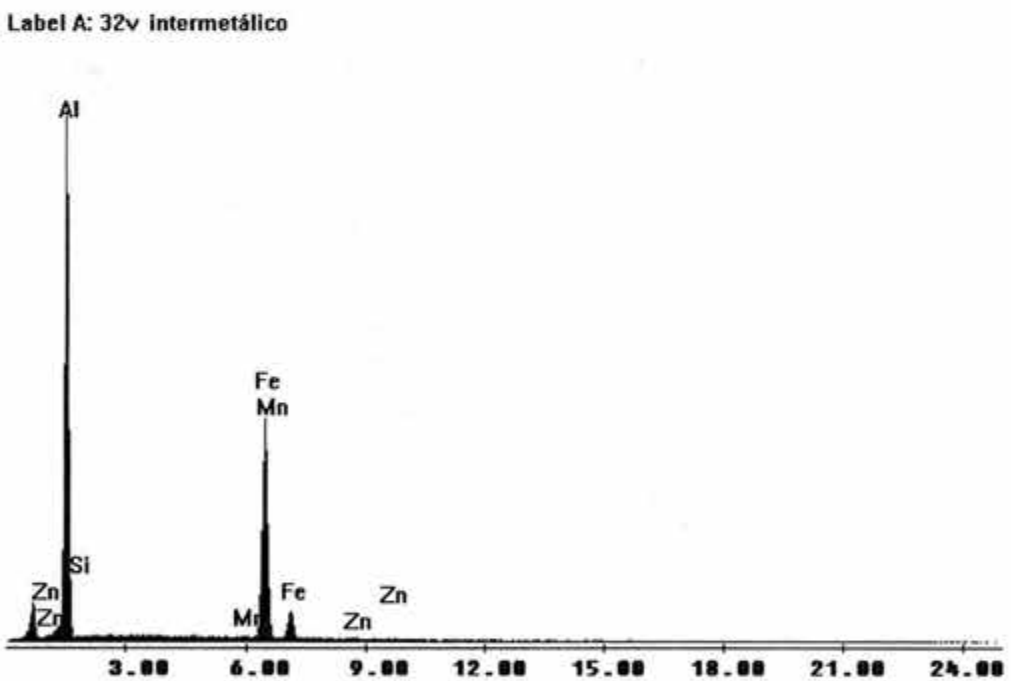



Realizado a 100x. Electrones retrodispersados (BSE), 15.0 KV

**Composición química de la probeta 50 zona del 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 |

**Gráfica del análisis químico en la zona del intermetálico de la probeta 50**

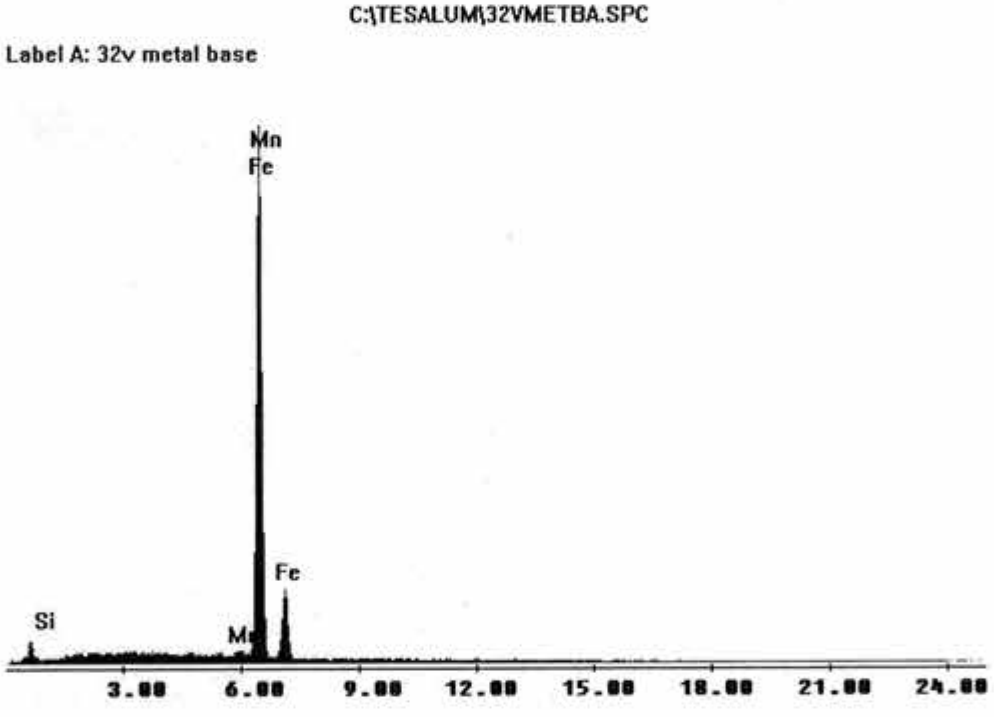



Realizado a 200x. Electrones retrodispersados (BSE), 20.0 KV

**Composición química de la probeta 50 zona del metal 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 |

**Gráfica del análisis químico en la zona del metal base de la probeta 50**




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

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 56)

Figura 5.25 MEB 200X Vista general de la probeta recocida una hora. El espesor es homogéneo. Se muestra claramente como se forma el intermetálico por la difusión de Al hacia el metal base.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 56)

Figura 5.26 MEB 300X Acercamiento de la fractura en el intermetálico debido al corte de la probeta recocida una hora.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 61)

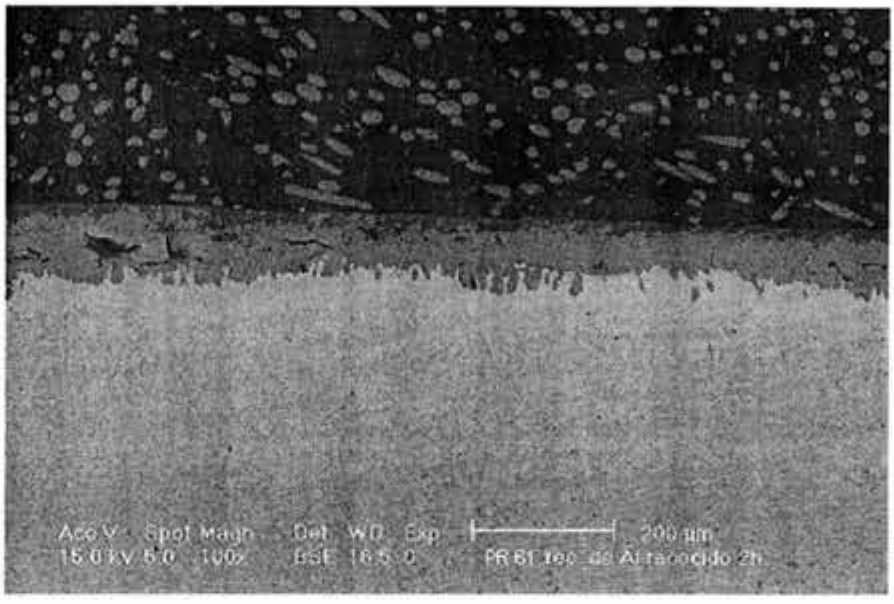


Figura 5.27 MEB 100X Vista general de la probeta recocida dos horas. Se observan difusiones aisladas de aluminio hacia el metal base en forma de gruesos cristales columnares.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 61)

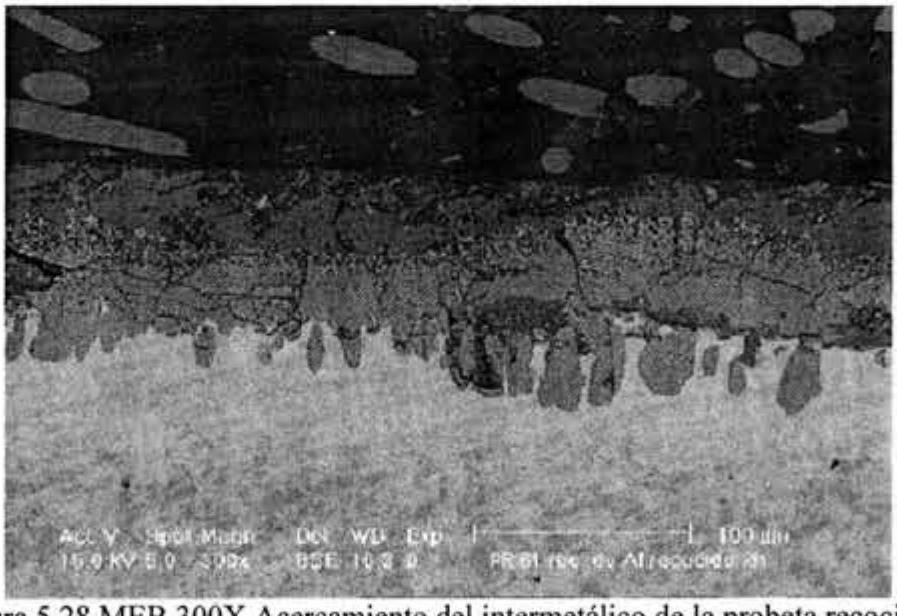


Figura 5.28 MEB 300X Acercamiento del intermetálico de la probeta recocida dos horas. El espesor es variable. Existen áreas fracturadas, con grietas que van del intermetálico hacia el metal base, se observan estructuras columnares bien definidas ocasionadas por la difusión del aluminio.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 66)

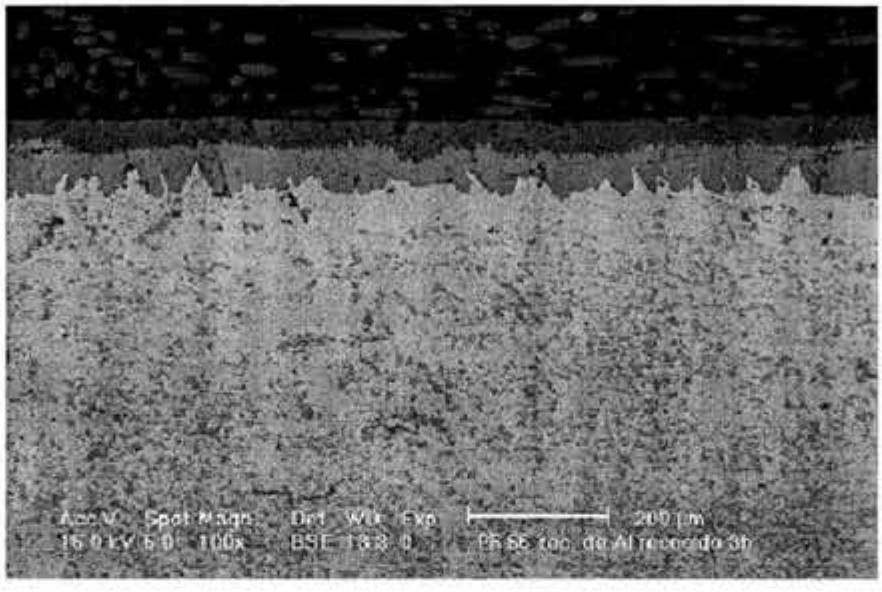


Figura 5.29 MEB 100X Vista general de la probeta recocida tres horas.
Se aprecia el crecimiento columnar del intermetálico.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 66)

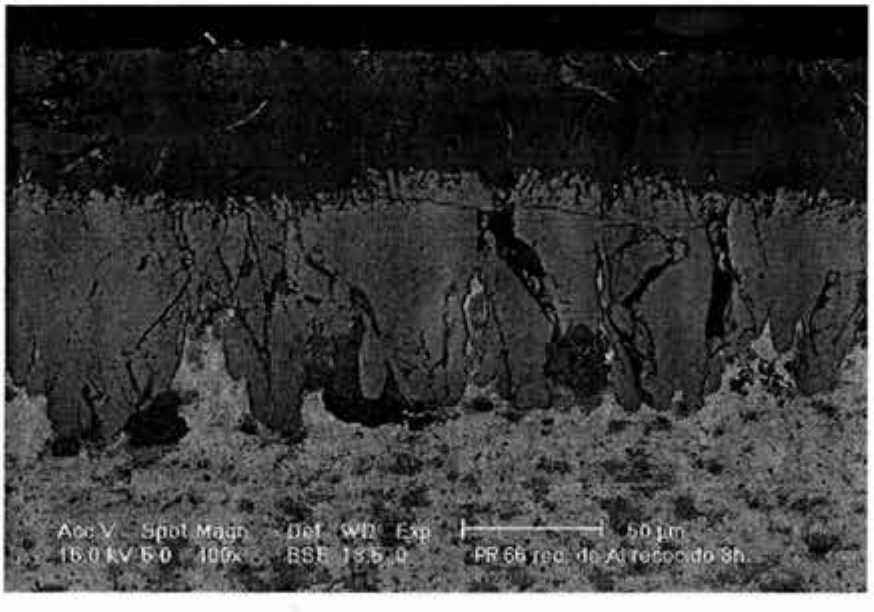


Figura 5.30 MEB 400X Acercamiento a las estructuras columnares de la probeta recocida tres horas. Se genera una gran densidad de porosidad en la región del recubrimiento.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 71)

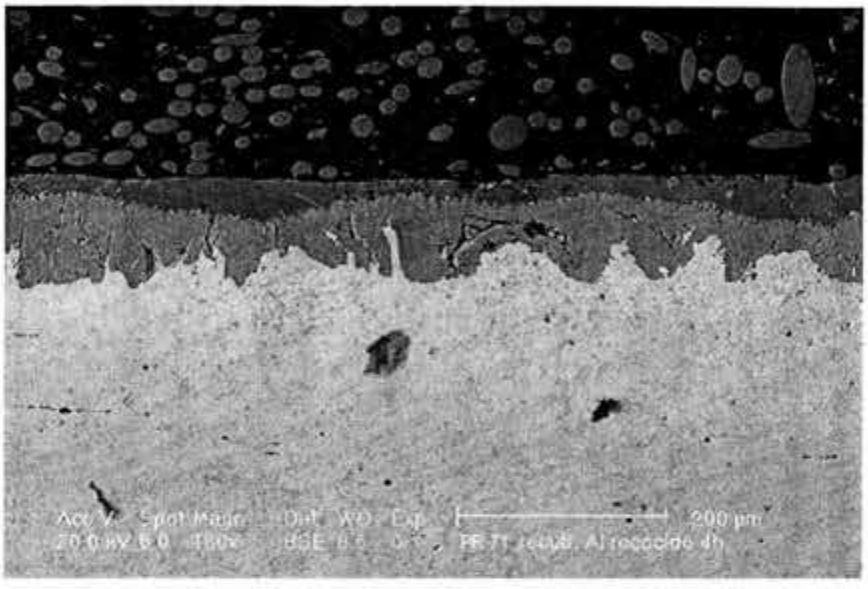


Figura 5.31 MEB 150X Vista general de la probeta recocida cuatro horas.
Las porosidades aumentan en tamaño y van desde la superficie hacia la zona media del recubrimiento, en algunas zonas el espesor es muy delgado.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 71)

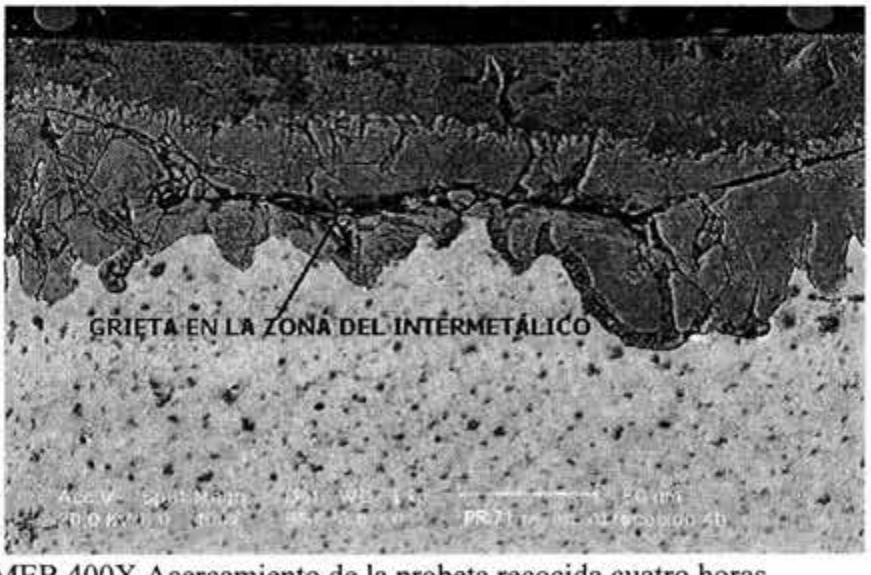



Figura 5.32 MEB 400X Acercamiento de la probeta recocida cuatro horas.
Hay grietas a lo largo del recubrimiento, y algunas grietas pequeñas a lo ancho, el espesor no es homogéneo, el intermetálico tiende al crecimiento y se observan algunas regiones con porosidades.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 76)

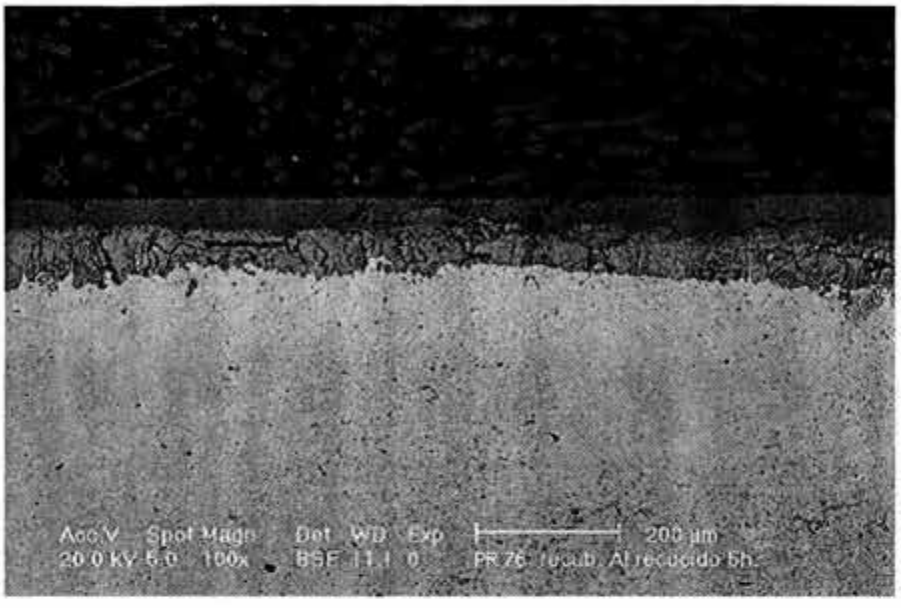



Figura 5.33 MEB 100X Vista general de la probeta recocida cinco horas.
Su espesor vuelve a ser homogéneo, se tiene grietas muy grandes en todas direcciones, existen agrupamientos de estructuras columnares y en algunas zonas existen porosidades.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 76)

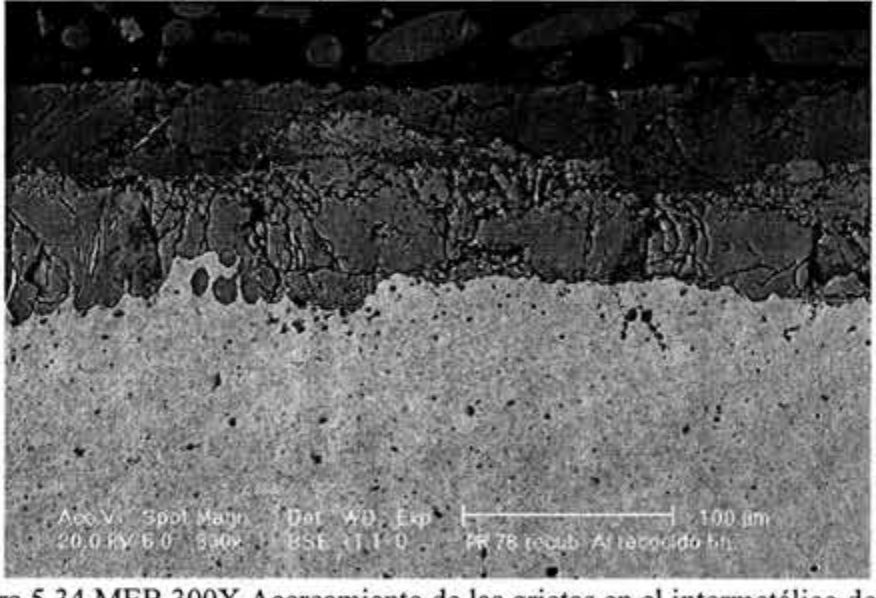



Figura 5.34 MEB 300X Acercamiento de las grietas en el intermetálico de la probeta recocida cinco horas. Existen grietas que van de la superficie a la parte media del recubrimiento, hay gran cantidad de porosidades, su espesor no es homogéneo.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 81)

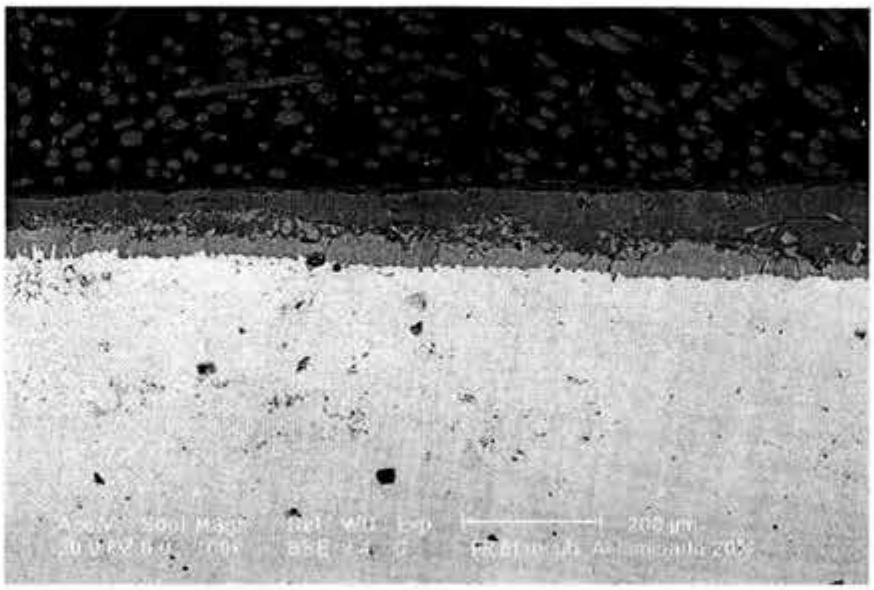


Figura 5.35 MEB 100X Vista general de la probeta recubierta con aluminio y laminada 20%

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 81)

Figura 5.36 MEB 300X Probeta laminada 20%. Grietas que surgen desde la superficie hacia el intermetálico, no hay porosidades. No se observan las estructuras columnares obtenidas en las piezas recocidas.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 86)

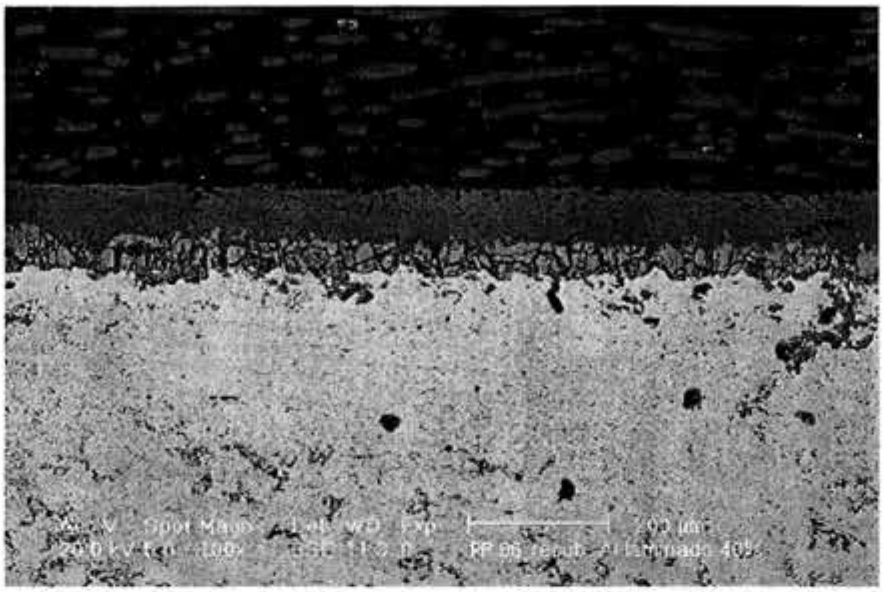


Figura 5.37 MEB 100X Vista general de la probeta laminada 40%. La zona de Intermetálico se encuentra muy fracturada, hay agrietamientos severos, su espesor es homogéneo.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 86)

Figura 5.38 MEB 300X Acercamiento de las grietas de la probeta laminada 40%. Grietas ocasionadas por la laminación que van desde la superficie hasta el intermetálico, hay grandes porosidades sobre todo en la superficie.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 91)

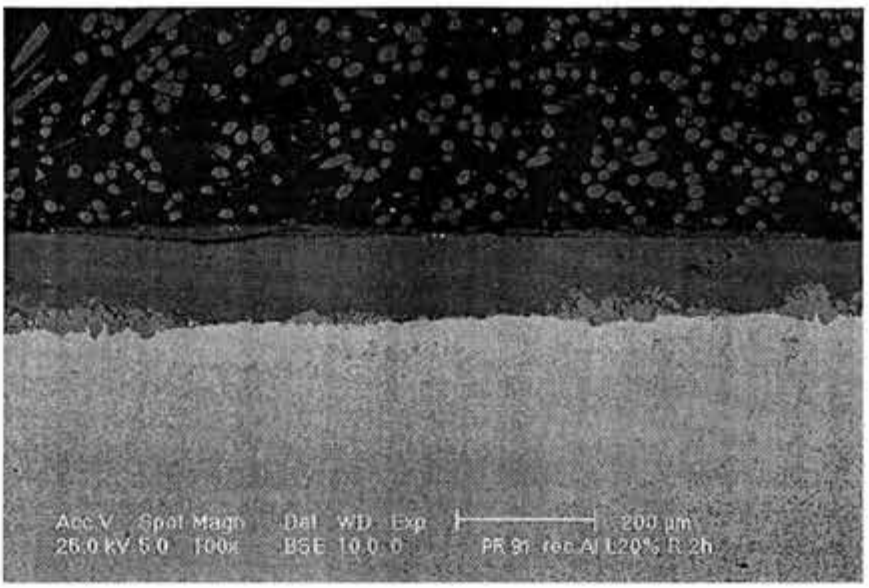



Figura 5.39 MEB 100X Vista general de la probeta laminada 20% y recocida 2 horas. No existen grietas en la zona del recubrimiento, hay porosidades dispersas en casi toda la superficie del recubrimiento y en la parte media. Su espesor tiende a ser homogéneo.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 91)

Figura 5.40 MEB 300X Vista general de la probeta laminada 20% y recocida 2 horas. El poco intermetálico que hay se encuentra agrietado en la parte media, su espesor no es homogéneo y en algunas zonas tiende a desaparecer.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 96)

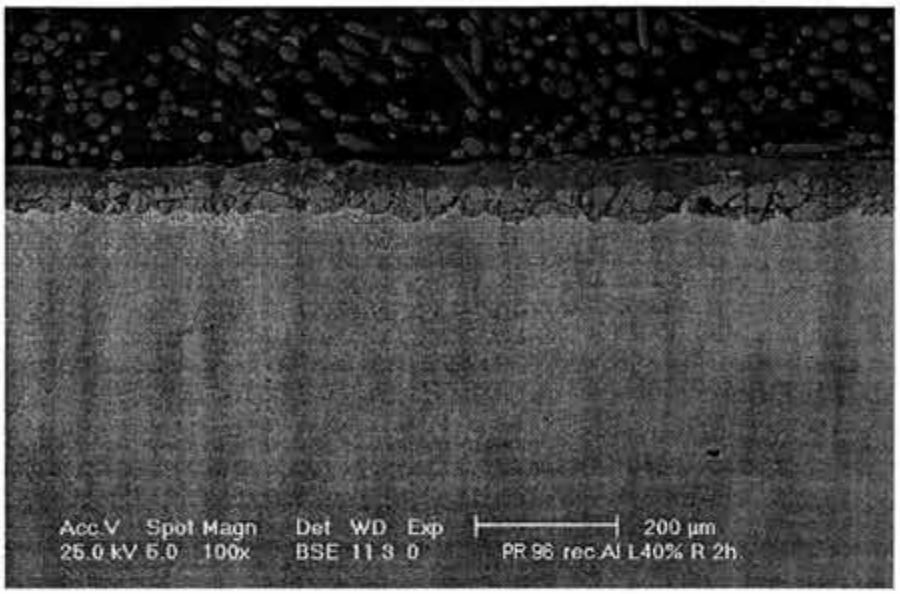



Figura 5.41 MEB 100X Vista general de la probeta laminada 40% y recocida 2 horas.

Recubrimiento Aluminio. (Probeta 96)

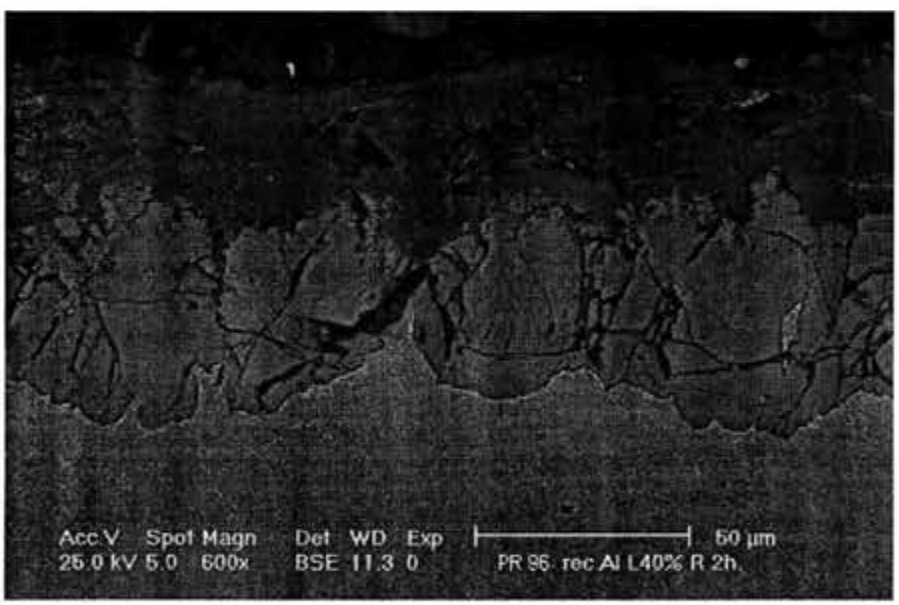



Figura 5.42 MEB 600X Probeta laminada 40% y recocida 2 horas. Se encuentra grietas de gran tamaño a lo largo de toda la zona, aparentemente ocasionadas por la laminación. Tendencia a la formación de estructuras columnares.

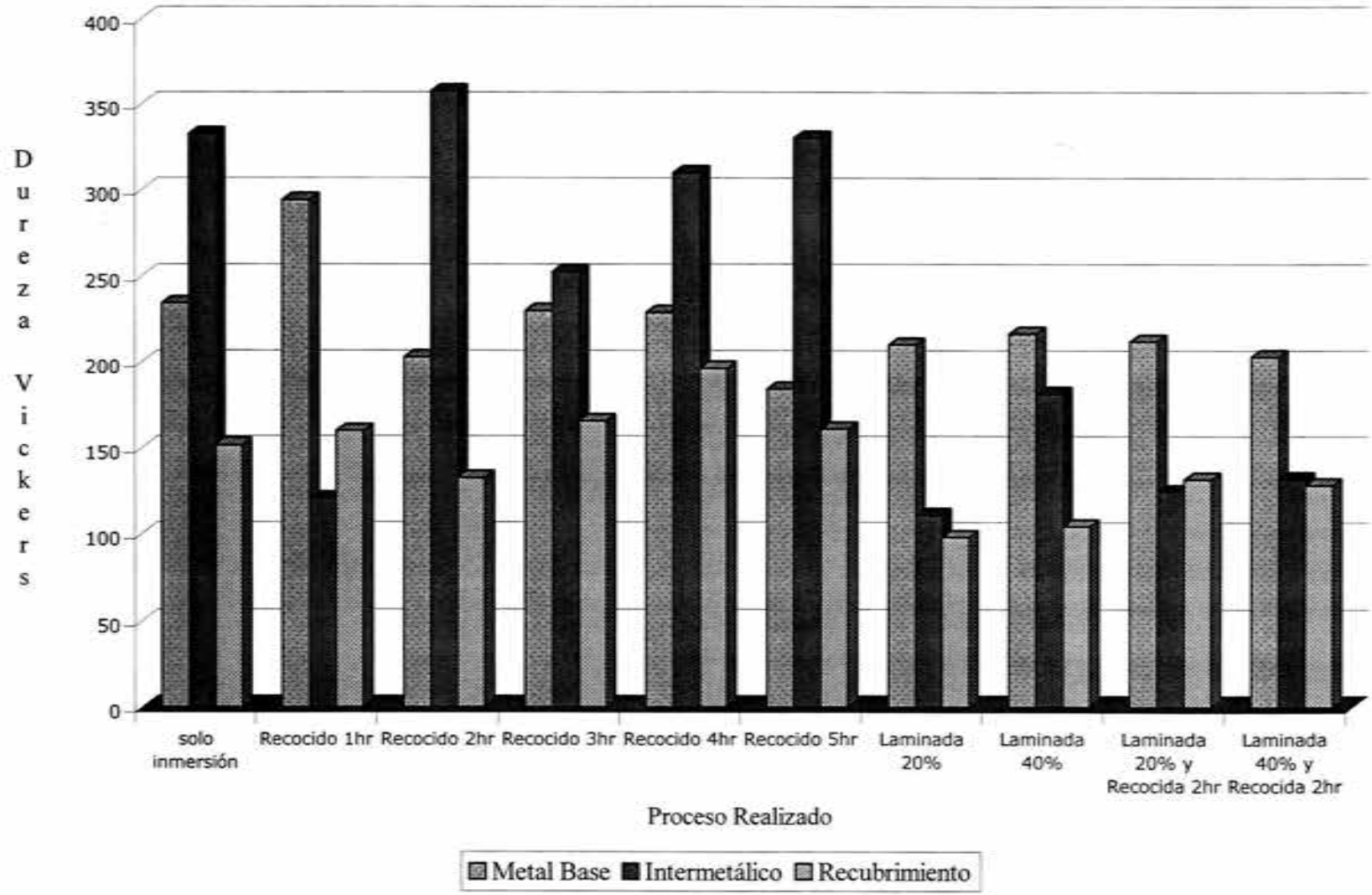
Tabla 5.43 Microdureza Vickers de las Muestras con Recubrimiento de Zinalco

| Probeta No. | *Zona* | DUREZA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Lectura 1 | Lectura 2 | Lectura 3 | Lectura 4 | Lectura 5 | Promedio |
| 1 | Metal base | 228 | 237 | 238 | 245 | 217 | 234.33 |
| | Intermetálico | 464 | 186 | 319 | 357 | 322 | 332.66 |
| | Recubrimiento exterior | 137 | 206 | 142 | 140 | 173 | 151.66 |
| 6 | Metal base | 221 | 182 | 179 | 213 | 193 | 294.00 |
| | Intermetálico | 116 | 139 | 143 | 105 | 107 | 120.66 |
| | Recubrimiento exterior | 150 | 172 | 167 | 163 | 145 | 160.00 |
| 11 | Metal base | 203 | 217 | 189 | 194 | 212 | 203.00 |
| | Intermetálico | 450 | 213 | 380 | 336 | 357 | 357.66 |
| | Recubrimiento exterior | 151 | 119 | 149 | 130 | 117 | 132.66 |
| 16 | Metal base | 274 | 193 | 221 | 245 | 224 | 230.00 |
| | Intermetálico | 237 | 254 | 264 | 240 | 270 | 252.66 |
| | Recubrimiento exterior | 176 | 181 | 160 | 162 | 151 | 166.00 |
| 21 | Metal base | 219 | 245 | 240 | 215 | 228 | 229.00 |
| | Intermetálico | 179 | 302 | 464 | 309 | 319 | 310.00 |
| | Recubrimiento exterior | 174 | 187 | 228 | 135 | 238 | 196.33 |
| 26 | Metal base | 156 | 222 | 181 | 216 | 153 | 184.33 |
| | Intermetálico | 363 | 304 | 336 | 297 | 351 | 330.33 |
| | Recubrimiento exterior | 146 | 192 | 144 | 146 | 195 | 161.33 |
| 31 | Metal base | 182 | 237 | 206 | 188 | 240 | 210.33 |
| | Intermetálico | 237 | 101 | 105 | 116 | 112 | 111.00 |
| | Recubrimiento exterior | 87.6 | 97.1 | 110 | 85.8 | 112 | 98.23 |
| 36 | Metal base | 189 | 193 | 251 | 206 | 256 | 216.66 |
| | Intermetálico | 193 | 186 | 139 | 165 | 194 | 181.33 |
| | Recubrimiento exterior | 100 | 110 | 97.1 | 111 | 104 | 104.66 |
| 41 | Metal base | 193 | 192 | 215 | 228 | 237 | 212.00 |
| | Intermetálico | 116 | 113 | 120 | 138 | 145 | 124.66 |
| | Recubrimiento exterior | 167 | 137 | 128 | 126 | 131 | 132.00 |
| 46 | Metal base | 203 | 206 | 188 | 209 | 201 | 203.33 |
| | Intermetálico | 124 | 116 | 142 | 133 | 140 | 132.33 |
| | Recubrimiento exterior | 110 | 121 | 132 | 133 | 140 | 128.66 |

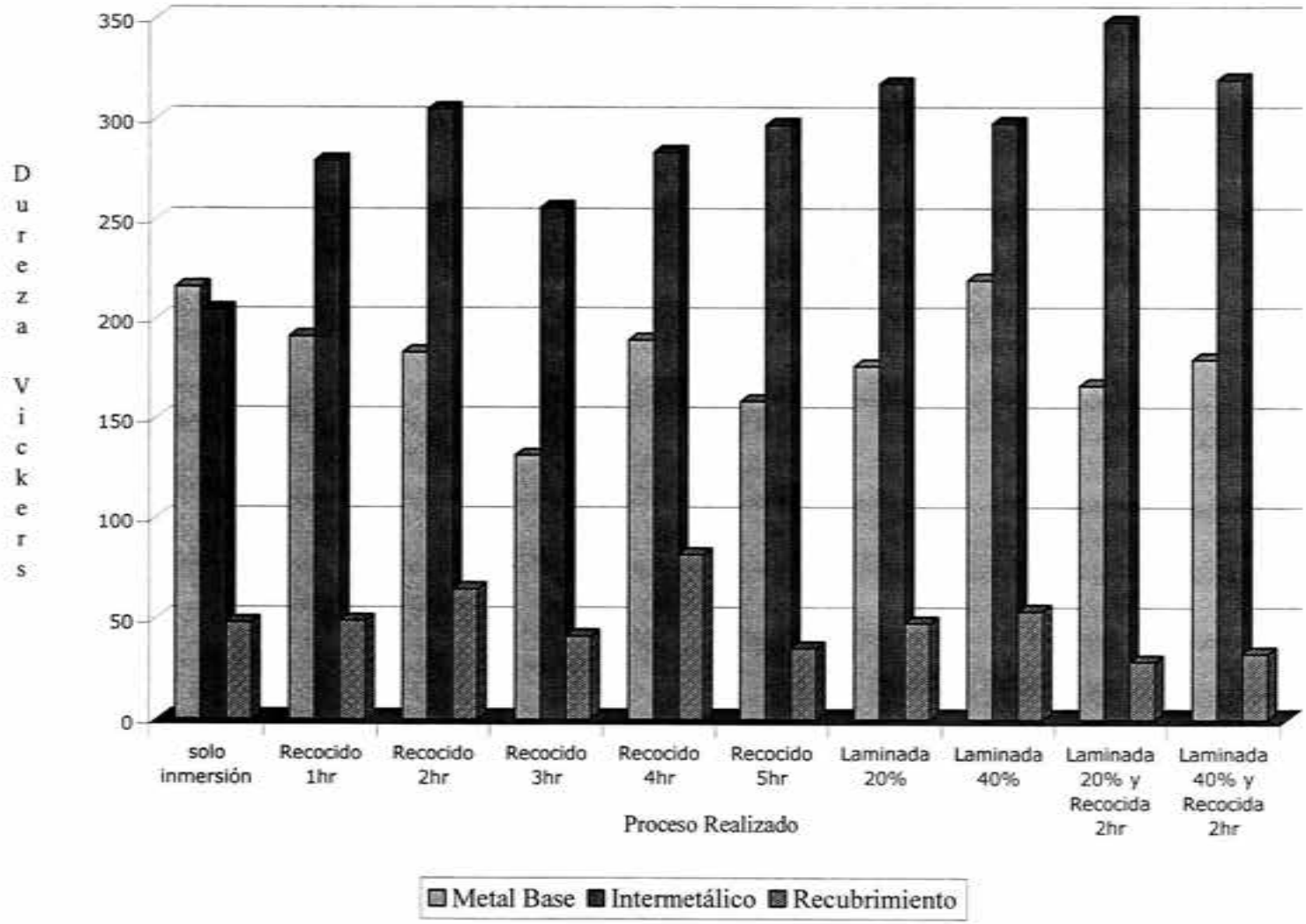
Tabla 5.44 Microdureza Vickers de las Muestras con Recubrimiento de Aluminio

| Probeta No. | *Zona* | *DUREZA* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Lectura 1 | Lectura 2 | Lectura 3 | Lectura 4 | Lectura 5 | Promedio |
| 50 | Metal base | 207 | 237 | 186 | 219 | 222 | 216.00 |
| | *Intermetálico* | 230 | 272 | 203 | 168 | 181 | 204.66 |
| | *Recubrimiento exterior* | 51.1 | 41.7 | 48.4 | 45.7 | 50.2 | 48.10 |
| 56 | *Metal base* | 206 | 198 | 187 | 185 | 189 | 191.33 |
| | *Intermetálico* | 169 | 283 | 380 | 272 | 283 | 279.33 |
| | *Recubrimiento exterior* | 51.5 | 46.6 | 46.0 | 48.4 | 56.9 | 48.83 |
| 61 | *Metal base* | 183 | 186 | 181 | 180 | 199 | 183.33 |
| | *Intermetálico* | 322 | 209 | 256 | 336 | 464 | 304.66 |
| | *Recubrimiento exterior* | 71.3 | 64.1 | 58.5 | 75.7 | 46.0 | 64.63 |
| 66 | *Metal base* | 116 | 133 | 138 | 143 | 123 | 131.33 |
| | *Intermetálico* | 212 | 274 | 228 | 266 | 322 | 256.00 |
| | *Recubrimiento exterior* | 40.9 | 46.4 | 51.5 | 36.7 | 34.6 | 41.33 |
| 71 | *Metal base* | 254 | 172 | 180 | 173 | 215 | 189.33 |
| | *Ínter-metálico* | 221 | 309 | 254 | 287 | 325 | 283.33 |
| | *Recubrimiento exterior* | 67.8 | 93.2 | 84.7 | 45.1 | 100 | 81.90 |
| 76 | *Metal base* | 151 | 161 | 168 | 160 | 155 | 158.66 |
| | *Intermetálico* | 227 | 221 | 454 | 342 | 322 | 297.00 |
| | *Recubrimiento exterior* | 33.9 | 32.4 | 36.8 | 35.4 | 41.2 | 35.36 |
| 81 | *Metal base* | 186 | 198 | 173 | 170 | 169 | 176.33 |
| | *Intermetálico* | 397 | 238 | 330 | 348 | 274 | 317.33 |
| | *Recubrimiento exterior* | 47.5 | 47.0 | 47.5 | 58.1 | 48.7 | 47.83 |
| 86 | *Metal base* | 207 | 242 | 168 | 254 | 209 | 219.33 |
| | *Intermetálico* | 464 | 266 | 319 | 304 | 270 | 297.66 |
| | *Recubrimiento exterior* | 48.2 | 51.5 | 67.3 | 55.5 | 54.7 | 53.90 |
| 91 | *Metal base* | 151 | 180 | 213 | 140 | 169 | 166.66 |
| | *Intermetálico* | 363 | 370 | 311 | 401 | 216 | 348.00 |
| | *Recubrimiento exterior* | 29.0 | 31.4 | 28.2 | 29.0 | 28.3 | 28.76 |
| 96 | *Metal base* | 155 | 206 | 268 | 157 | 176 | 179.66 |
| | *Intermetálico* | 297 | 272 | 325 | 336 | 383 | 319.33 |
| | *Recubrimiento exterior* | 29.9 | 35.4 | 32.8 | 35.8 | 30.4 | 32.86 |

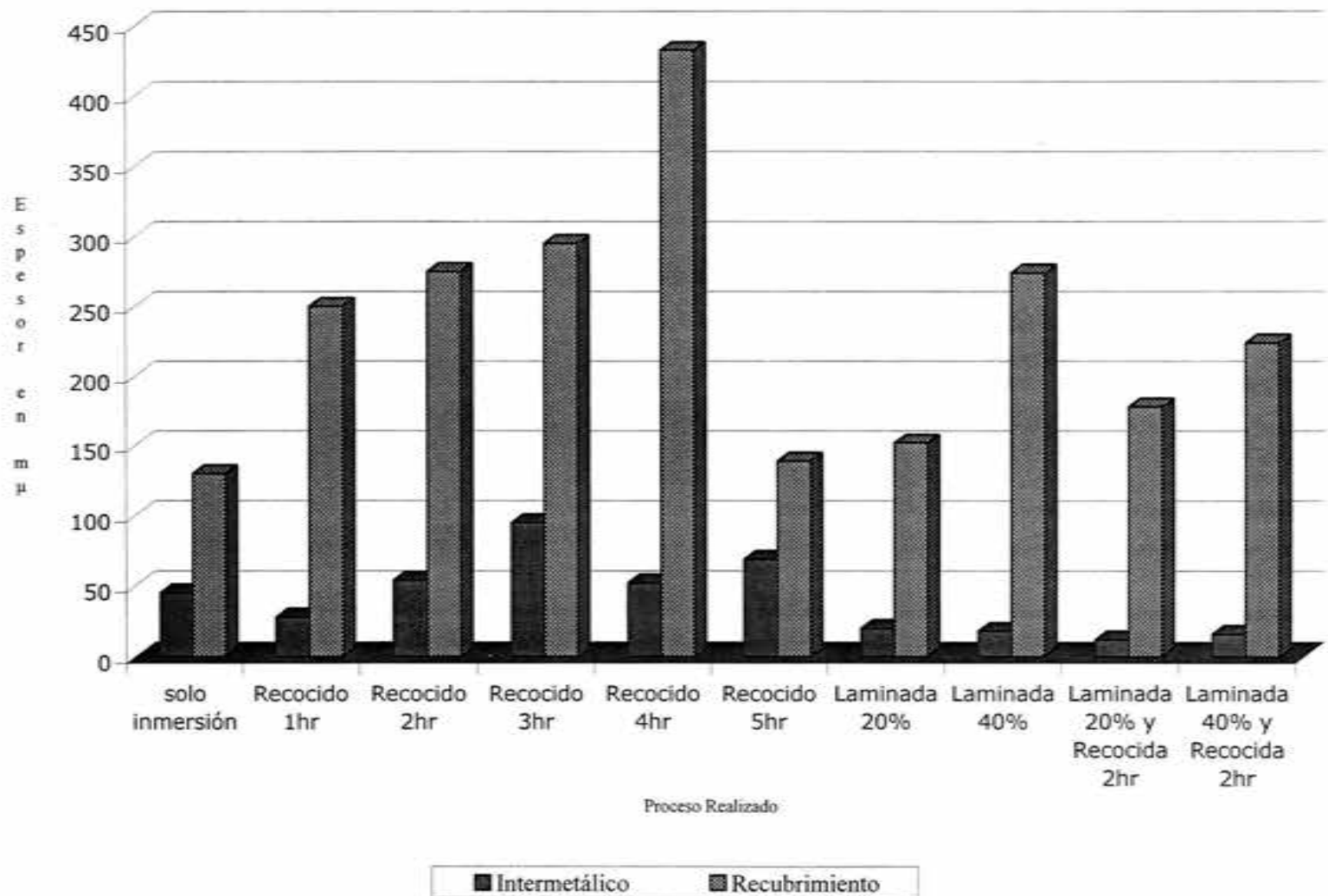
Gráfica 5.45 Microdureza en las probetas de zinalco en sus diferentes zonas



Gráfica 5.46 Microdureza en las probetas de aluminio en sus difrentes zonas



**GRAFICA 5.47 VARIACIÓN DE ESPESORES DEL RECUBRIMIENTO DE ZINALCO**



Gráfica 5.48 Variación de espesores del recubrimiento de aluminio

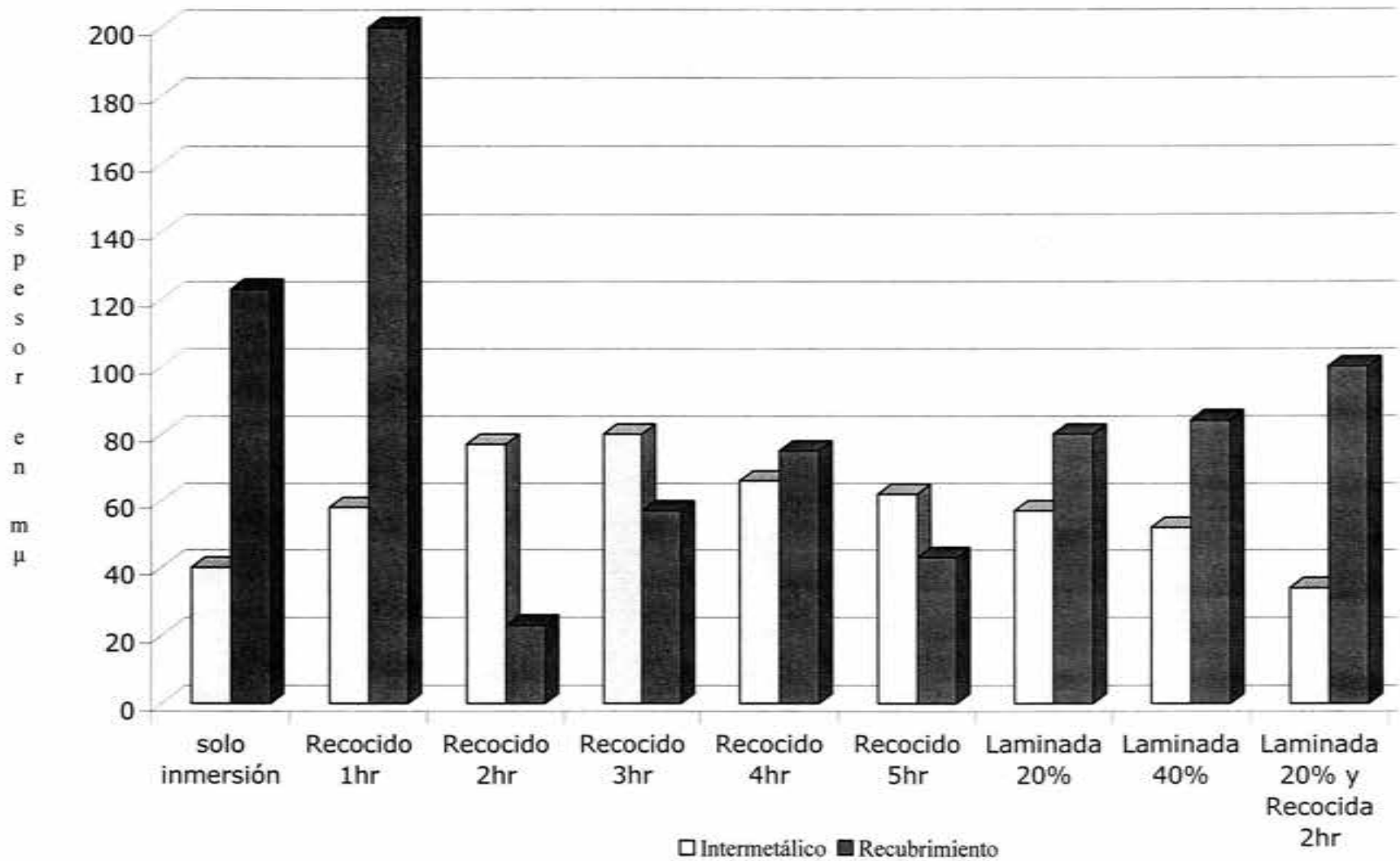


Tabla 5.49 Potencial de corrosión para los diferentes materiales manejados inmersos en sulfato de sodio como electrolito y usando un electrodo de calomel saturado como electrodo de referencia

**Erep [mV]** **Sulfato de Sodio**

**Acero 1018**

| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | -744 | -752 | -757 |
| 2 | -760 | -761 | -767 |
| 3 | -768 | -774 | -751 |
| 4 | -765 | -759 | -749 |

**Aluminizado**

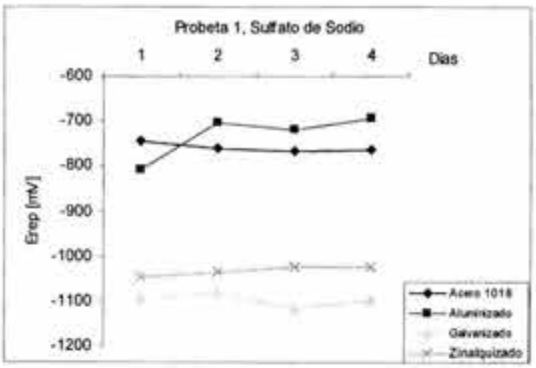
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | -810 | -730 | -768 |
| 2 | -704 | -690 | -706 |
| 3 | -719 | -654 | -671 |
| 4 | -694 | -671 | -688 |

**Galvanizado**

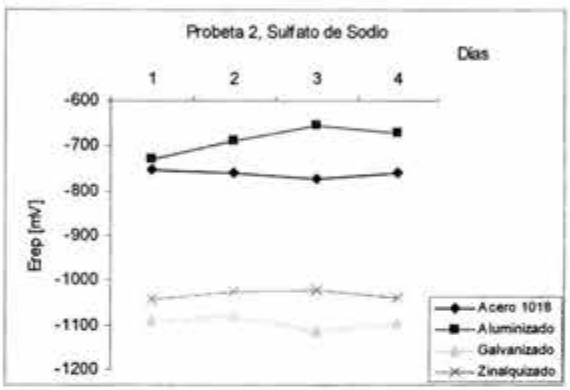
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | -1093 | -1090 | -1069 |
| 2 | -1081 | -1080 | -1071 |
| 3 | -1118 | -1114 | -1069 |
| 4 | -1098 | -1098 | -1103 |

**Zinalquizado**

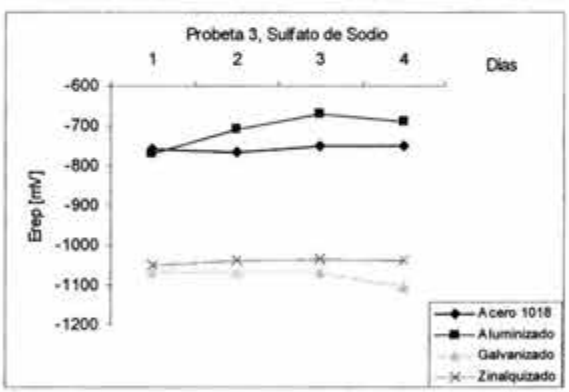
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | -1045 | -1042 | -1050 |
| 2 | -1036 | -1027 | -1039 |
| 3 | -1024 | -1023 | -1036 |
| 4 | -1022 | -1039 | -1039 |




Gráfica 5.51 Potencial de reposo contra el tiempo de probeta 1 en sulfato de sodio




Gráfica 5.52 Potencial de reposo contra el tiempo de probeta 2 en sulfato de sodio




Gráfica 5.53 Potencial de reposo contra el tiempo de probeta 3 en sulfato de sodio

Tabla 5.50 Potencial de Corrosión para los diferentes materiales manejados inmersos en cloruro de sodio como electrolito y usando un electrodo de calomel saturado como electrodo de referenci

**Erep mV ECS Cloruro de sodio**

**Acero 1018**

| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -766 | -749 | -678 | -684 |
| 2 | -785 | -754 | -696 | -771 |
| 3 | -778 | -753 | -724 | -773 |
| 4 | -780 | -754 | -726 | * |

**Aluminizado**

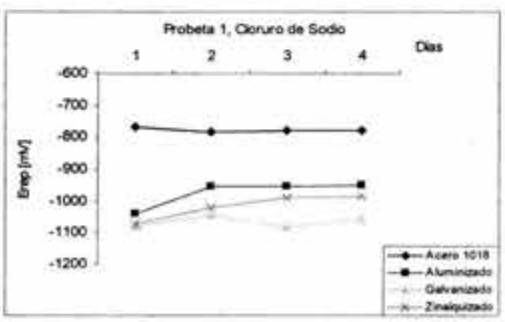
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -1039 | -1036 | -1042 | -985 |
| 2 | -954 | -953 | -959 | -977 |
| 3 | -956 | -957 | -957 | -975 |
| 4 | -952 | -953 | -956 | * |

**Galvanizado**

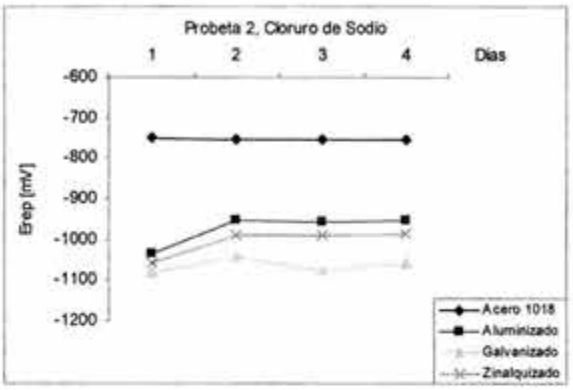
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -1080 | -1080 | -1068 | -1057 |
| 2 | -1043 | -1042 | -1035 | -1099 |
| 3 | -1083 | -1078 | -1030 | -1075 |
| 4 | -1057 | -1057 | -1057 | * |

**Zinalquizado**

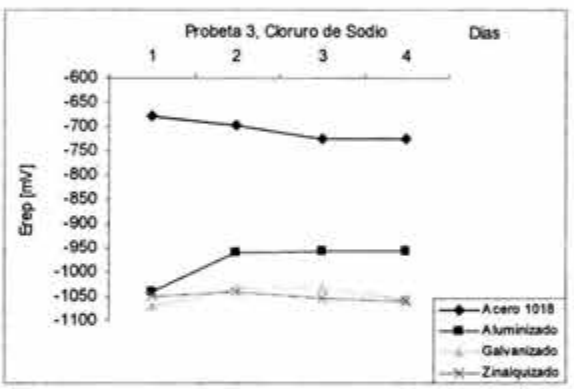
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -1072 | -1058 | -1051 | -1088 |
| 2 | -1022 | -990 | -1040 | -1050 |
| 3 | -988 | -990 | -1052 | -1041 |
| 4 | -984 | -987 | -1060 | * |



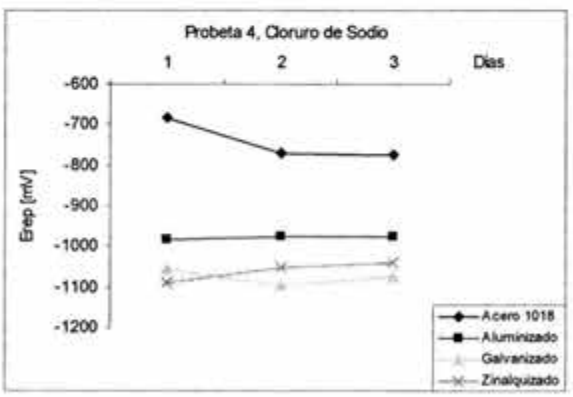

Gráfica 5.54 Potencial de reposo contra el tiempo de probeta 1 en cloruro de sodio




Gráfica 5.55 Potencial de reposo contra el tiempo de probeta 2 en cloruro de sodio




Gráfica 5.56 Potencial de reposo contra el tiempo de probeta 3 en cloruro de sodio




Gráfica 5. 57 Potencial de reposo contra el tiempo de probeta 4 en cloruro de sodio

Tabla 5.58 Resistencia de polarización para los diferentes materiales manejados inmersos en sulfato de sodio como electrolito

**Rp** **kohm cm²** **Sulfato de sodio**

**Acero 1018**

| Día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | 2.373 | 1.807 | 2.082 |
| 2 | 1.499 | 1.936 | 2.408 |
| 3 | 2.065 | 1.909 | 2.242 |
| 4 | 1.814 | 2.080 | 1.696 |

**Aluminizado**

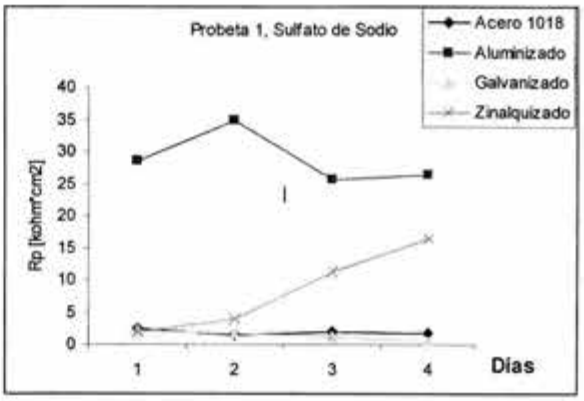
| Día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | 28.600 | 27.910 | 49.460 |
| 2 | 34.930 | 42.020 | 39.800 |
| 3 | 25.700 | 51.570 | 32.310 |
| 4 | 26.320 | 41.100 | 28.990 |

**Galvanizado**

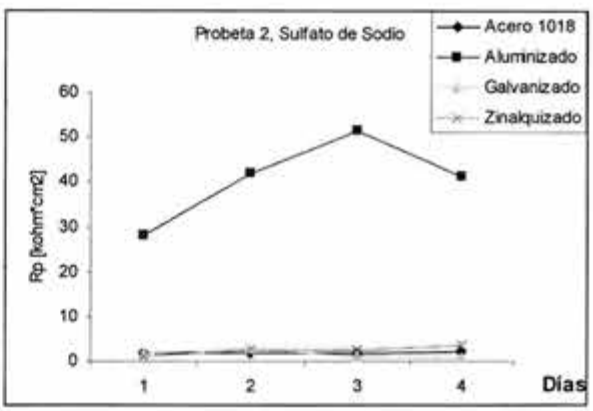
| Día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | 2.299 | 1.928 | 1.432 |
| 2 | 1.823 | 2.868 | 2.009 |
| 3 | 1.106 | 1.088 | 1.198 |
| 4 | 0.571 | 0.541 | 1.101 |

**Zinalquizado**

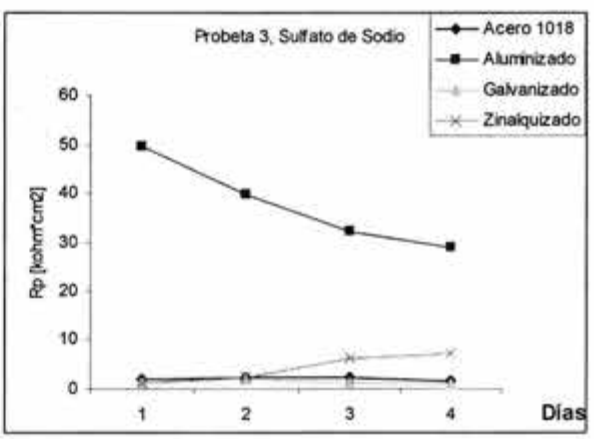
| Día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.878 | 1.231 | 1.411 |
| 2 | 4.007 | 2.571 | 2.373 |
| 3 | 11.300 | 2.600 | 6.078 |
| 4 | 16.260 | 3.700 | 7.245 |
| | | | |




Gráfica 5.60 Resistencia de polarización contra el tiempo de probeta 1 en sulfato de sodio




Gráfica 5.61 Resistencia de polarización contra el tiempo de probeta 2 en sulfato de sodio




Gráfica 5.62 Resistencia de polarización contra el tiempo de probeta 3 en sulfato de sodio

Tabla 5.59 Resistencia de polarización para los diferentes materiales manejados inmersos en cloruro de sodio como electrolito

**Rp kohm cm² Cloruro de sodio**

**Acero 1018**

| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.502 | 1.590 | 1.270 | 3.105 |
| 2 | 3.790 | 1.658 | 0.961 | 1.768 |
| 3 | 2.439 | 1.881 | 0.997 | 1.901 |
| 4 | 1.496 | 1.421 | 0.826 | * |

**Aluminizado**

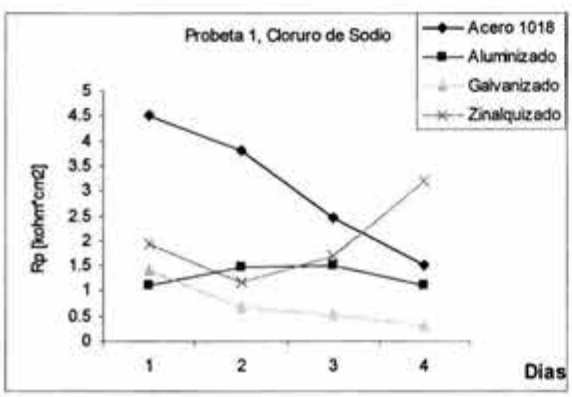
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.117 | 1.369 | 1.233 | 3.988 |
| 2 | 1.463 | 1.219 | 1.508 | 1.003 |
| 3 | 1.510 | 1.029 | 1.382 | 1.997 |
| 4 | 1.089 | 1.176 | 1.904 | * |

**Galvanizado**

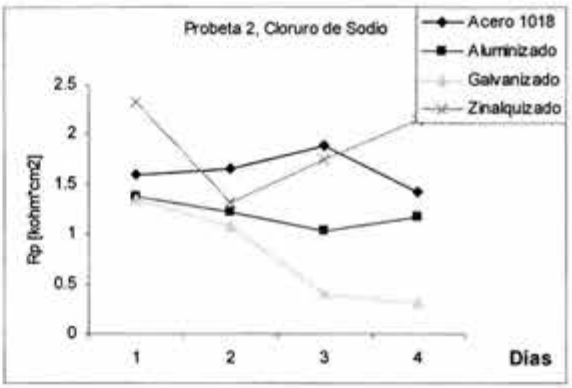
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.423 | 1.346 | 1.432 | 2.512 |
| 2 | 0.670 | 1.085 | 1.231 | 0.835 |
| 3 | 0.530 | 0.408 | 1.094 | 0.412 |
| 4 | 0.315 | 0.309 | 0.732 | * |

**Zinalquizado**

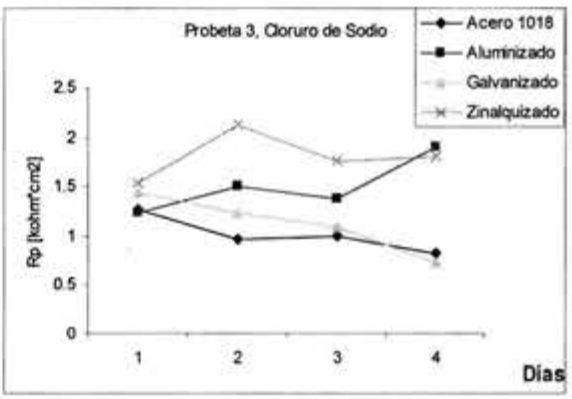
| día | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Probeta 4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.926 | 2.321 | 1.540 | 0.758 |
| 2 | 1.154 | 1.310 | 2.127 | 0.397 |
| 3 | 1.692 | 1.739 | 1.754 | 0.299 |
| 4 | 3.188 | 2.145 | 1.796 | * |



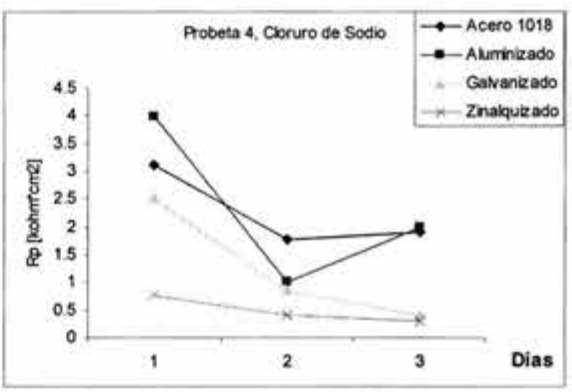

Gráfica 5.63 Resistencia de polarización contra el tiempo de probeta 1 en cloruro de sodio



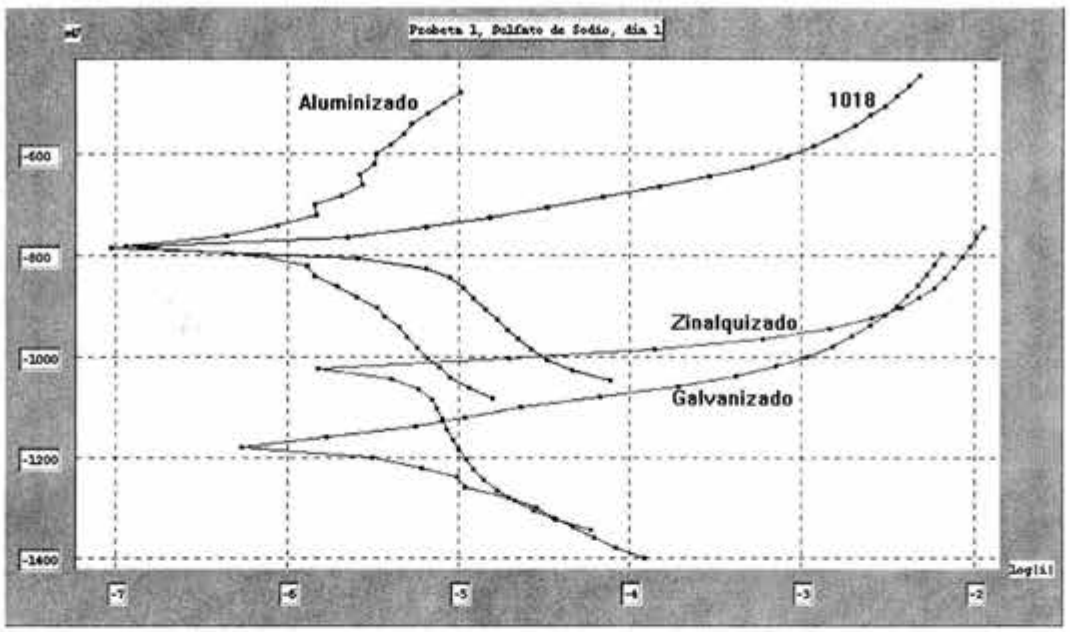

Gráfica 5.64 Resistencia de polarización contra el tiempo de probeta 2 en cloruro de sodio



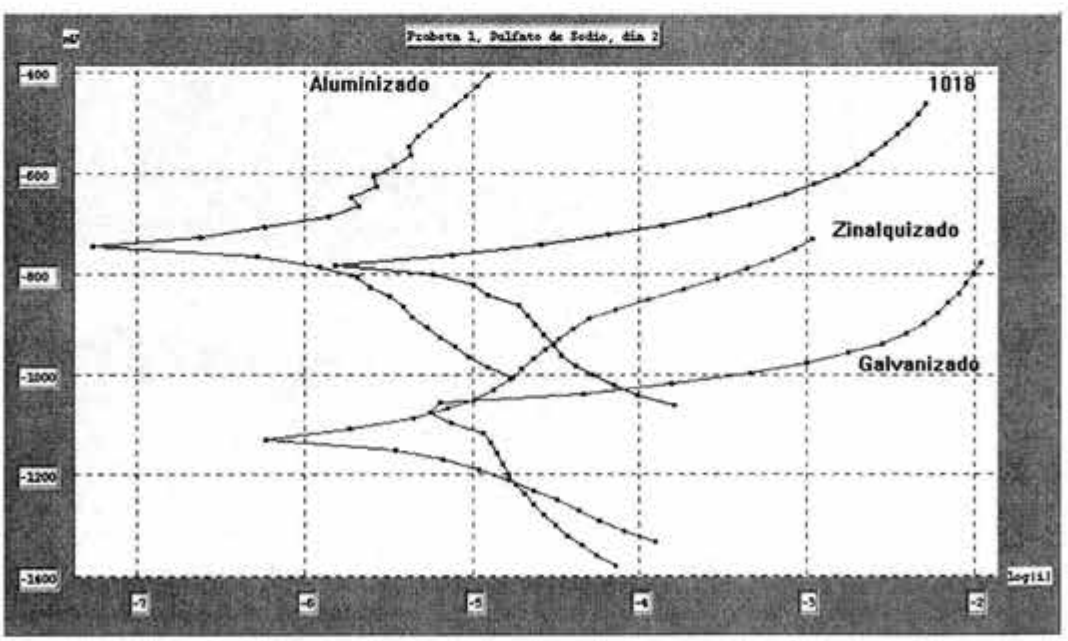

Gráfica 5.65 Resistencia de polarización contra el tiempo de probeta 3 en cloruro de sodio



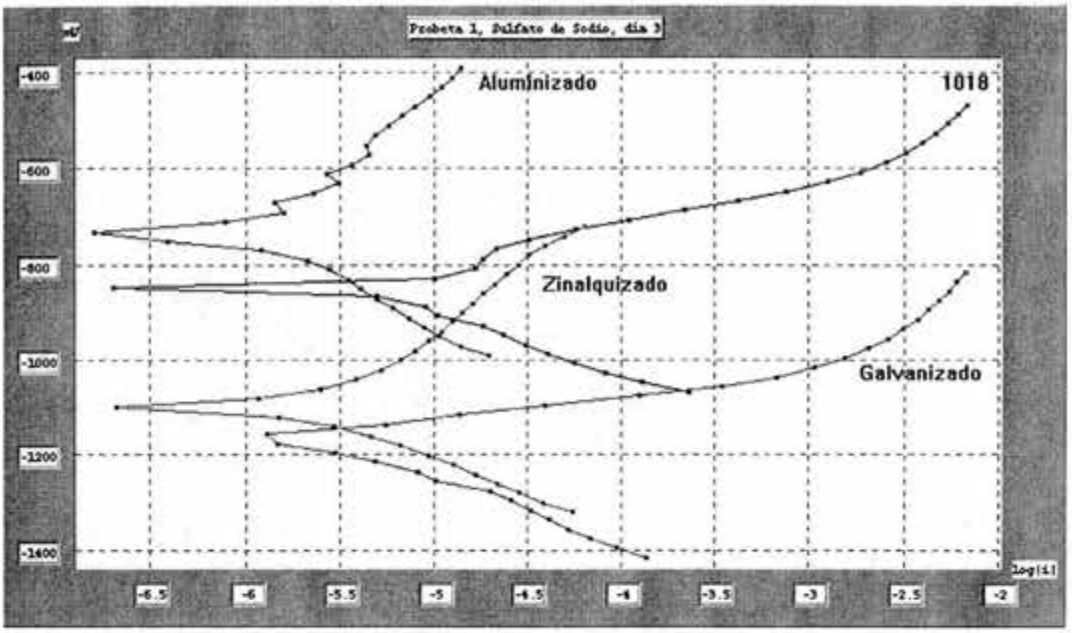

Gráfica 5.66 Resistencia de polarización contra el tiempo de probeta 4 en cloruro de sodio.



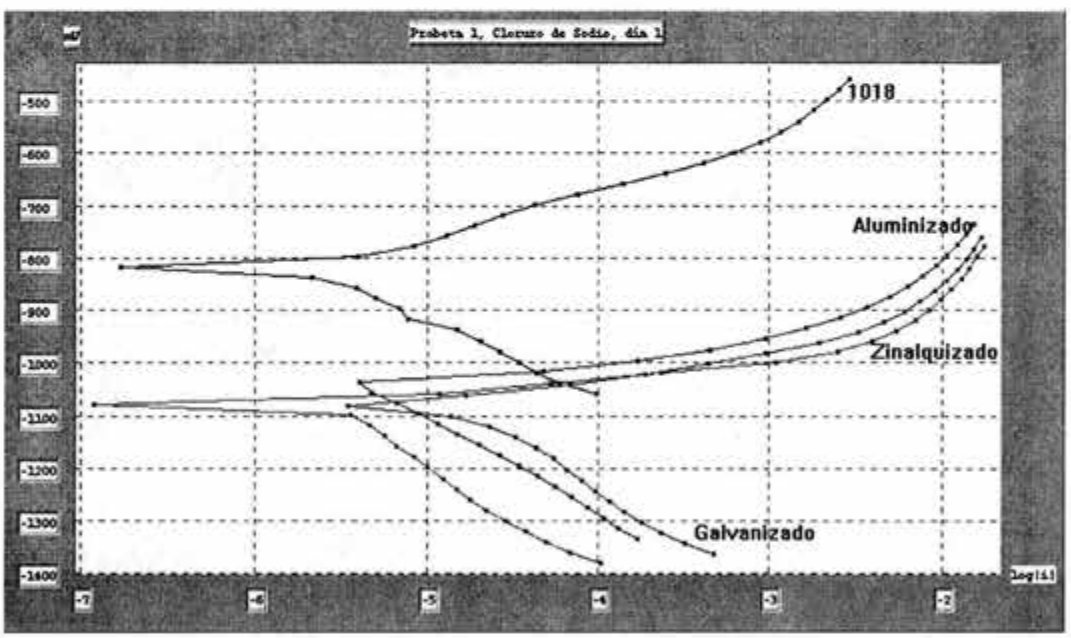

Gráfica 5.67 Curvas de polarización probetas número 1 en sulfato de sodio, día 1 (Potencial en mV, Corriente en mA)



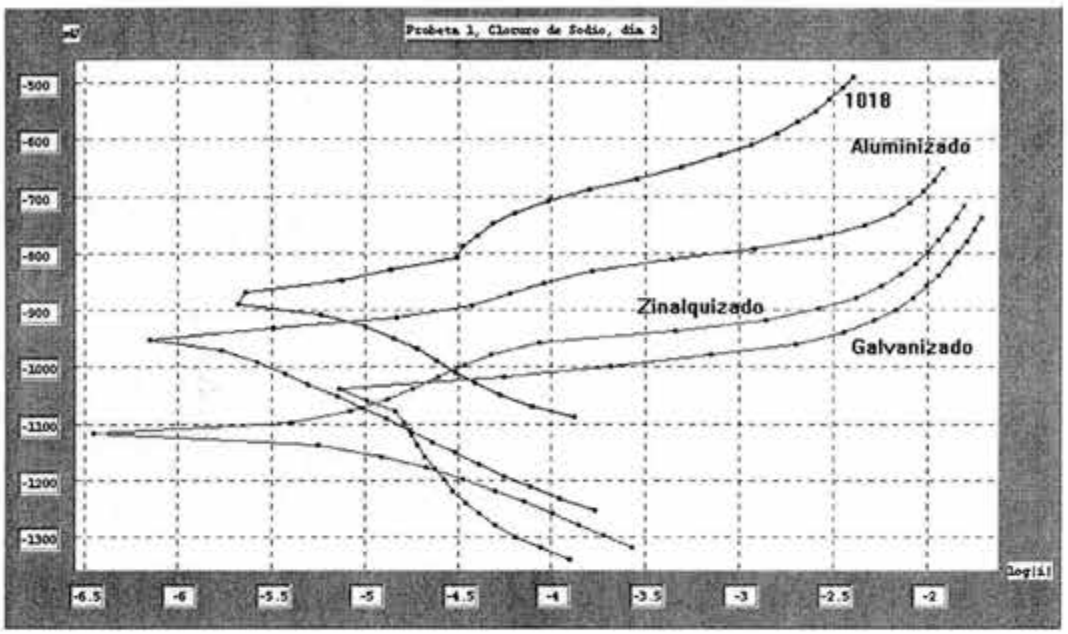

Gráfica 5.68 Curvas de polarización probetas número 1 en sulfato de sodio, día 2 (Potencial en mV, Corriente en mA)



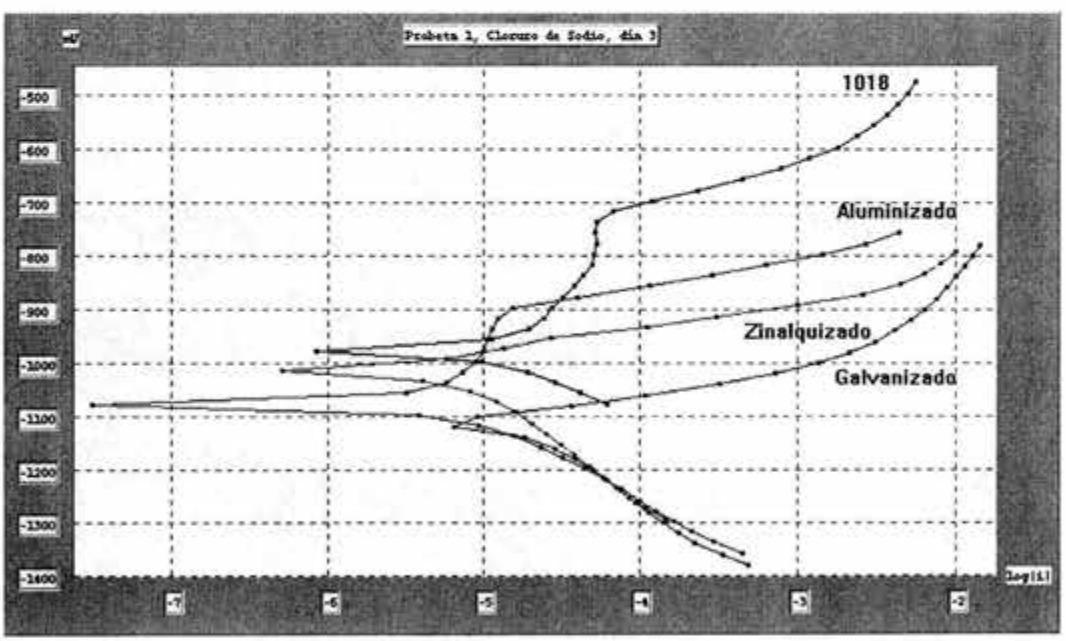

Gráfica 5.69 Curvas de polarización probetas número 1 en sulfato de sodio, día 3 (Potencial en mV, Corriente en mA)



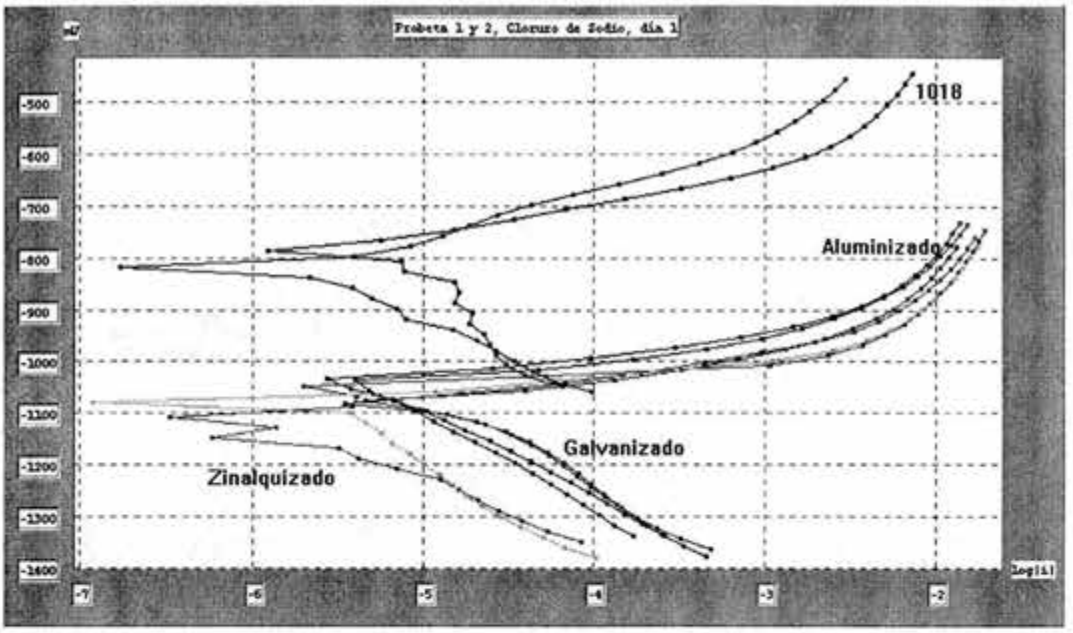

Gráfica 5.70 Curvas de polarización probetas número 1 en cloruro de sodio, día 1 (Potencial en mV, Corriente en mA)



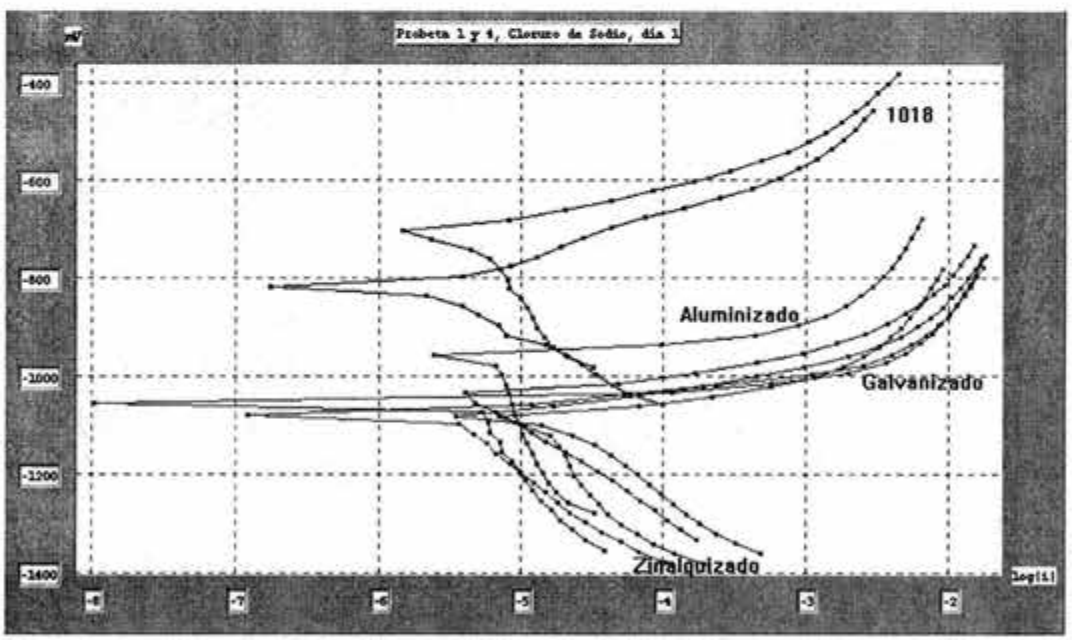

Gráfica 5.71 Curvas de polarización probetas número 1 en cloruro de sodio, día 2
(Potencial en mV, Corriente en mA)




Gráfica 5.72 Curvas de polarización probetas número 1 en cloruro de sodio, día 3
(Potencial en mV, Corriente en mA)




Gráfica 5.73 Curvas de polarización probetas número 1 y 2 en cloruro de sodio, día 1
(Potencial en mV, Corriente en mA)




Gráfica 5.74 Curvas de polarización probetas número 1 y 4 en cloruro de sodio, día 1
(Potencial en mV, Corriente en mA)

Tabla 5.75 Comparación de la velocidad de corrosión del acero AISI 1018, en solución de sulfato de sodio según formas empleadas

| VELOCIDAD DE CORROSION EN SULFATO DE SODIO (mm/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta 1 | Acero 1018 | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.127 | 0.213 | 0.185 | 2.539 |
| 2 | 0.201 | 0.222 | 0.393 | 3.860 |
| 3 | 0.146 | 0.164 | 0.274 | 4.555 |
| 4 | 0.166 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 2 | Acero 1018 | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.167 | 0.224 | 0.409 | 4.594 |
| 2 | 0.156 | 0.236 | 0.445 | 4.923 |
| 3 | 0.158 | 0.208 | 0.349 | 4.450 |
| 4 | 0.145 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 3 | Acero 1018 | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.145 | * | * | * |
| 2 | 0.125 | * | * | * |
| 3 | 0.135 | * | * | * |
| 4 | 0.178 | | | |

Tabla 5.76 Comparación de la velocidad de corrosión del acero AISI 1018 en solución de cloruro de sodio según formas empleadas

| VELOCIDAD DE CORROSION EN CLORURO DE SODIO (mm/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta 1 | Acero 1018 | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.067 | 0.086 | 0.091 | 1.430 |
| 2 | 0.080 | 0.099 | 0.095 | 0.090 |
| 3 | 0.124 | 0.117 | 0.073 | 0.035 |
| 4 | 0.202 | * | * | * |
| | | | | |
| Probeta 2 | Acero 1018 | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.190 | 0.400 | 0.365 | 5.814 |
| 2 | 0.182 | 0.320 | 0.329 | 5.322 |
| 3 | 0.160 | 0.270 | 0.285 | 5.639 |
| 4 | 0.212 | * | * | * |
| | | | | |
| Probeta 3 | Acero 1018 | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.238 | * | * | * |
| 2 | 0.314 | * | * | * |
| 3 | 0.303 | * | * | * |
| 4 | 0.366 | * | * | * |
| | | | | |
| Probeta 4 | Acero 1018 | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.097 | 0.192 | 0.141 | 1.928 |
| 2 | 0.171 | 0.366 | 0.353 | 3.458 |
| 3 | 0.159 | 0.275 | 0.446 | 3.434 |

Tabla 5.77 Comparación de la velocidad de corrosión del aluminizado, en solución de sulfato de sodio según las diferentes formas empleadas

| VELOCIDAD DE CORROSION EN SULFATO DE SODIO (mm/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta 1 | Aluminizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.010 | 0.024 | 0.011 | 0.010 |
| 2 | 0.008 | 0.018 | 0.011 | 0.013 |
| 3 | 0.011 | 0.024 | 0.013 | 0.020 |
| 4 | 0.011 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 2 | Aluminizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.010 | 0.023 | 0.012 | 0.012 |
| 2 | 0.007 | 0.016 | 0.012 | 0.017 |
| 3 | 0.005 | 0.017 | 0.010 | 0.011 |
| 4 | 0.007 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 3 | Aluminizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.006 | * | * | * |
| 2 | 0.007 | * | * | * |
| 3 | 0.009 | * | * | * |
| 4 | 0.010 | | | |
| | | | | |

Tabla 5.78 Comparación de la velocidad de corrosión del alumminizado en solución de cloruro de sodio según las diferentes formas empleadas.

| VELOCIDAD DE CORROSION EN CLORURO DE SODIO (mm/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta 1 | Aluminizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.253 | 0.451 | 0.925 | 9.268 |
| 2 | 0.193 | 0.178 | 0.034 | 5.888 |
| 3 | 0.187 | 0.102 | 0.009 | 4.419 |
| 4 | 0.260 | * | * | * |
| | | | | |
| Probeta 2 | Aluminizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.207 | 0.354 | 1.250 | 11.410 |
| 2 | 0.232 | 0.302 | 0.399 | 8.106 |
| 3 | 0.275 | 0.256 | 0.058 | 0.134 |
| 4 | 0.241 | * | * | * |
| | | | | |
| Probeta 3 | Aluminizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.230 | * | * | * |
| 2 | 0.188 | * | * | * |
| 3 | 0.205 | * | * | * |
| 4 | 0.149 | | | |
| | | | | |
| Probeta 4 | Aluminizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.071 | 0.204 | 0.601 | 4.353 |
| 2 | 0.282 | 0.450 | 0.898 | 5.459 |
| 3 | 0.142 | 0.214 | 0.417 | 5.573 |

Tabla 5.79 Comparación de la velocidad de corrosión del galvanizado, en solución de sulfato de sodio según las diferentes formas empleadas

| VELOCIDAD DE CORROSION EN SULFATO DE SODIO (mm/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta 1 | Galvanizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.169 | 0.320 | 0.977 | 7.167 |
| 2 | 0.213 | 0.196 | 0.579 | 9.894 |
| 3 | 0.352 | 0.056 | 1.023 | 8.047 |
| 4 | 0.682 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 2 | Galvanizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.202 | 0.522 | 0.956 | 8.655 |
| 2 | 0.136 | 0.238 | 0.297 | 10.680 |
| 3 | 0.357 | 0.258 | 0.903 | 7.478 |
| 4 | 0.719 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 3 | Galvanizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.272 | * | * | * |
| 2 | 0.194 | * | * | * |
| 3 | 0.325 | * | * | * |
| 4 | 0.353 | * | * | * |
| | | | | |

Tabla 5.80 Comparación de la velocidad de corrosión del galvanizado, solución de cloruro de sodio según las diferentes formas empleadas.

| VELOCIDAD DE CORROSION EN CLORURO DE SODIO (mm/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta 1 | Galvanizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.273 | 0.493 | 2.223 | 19.740 |
| 2 | 0.581 | 1.269 | 2.493 | 21.900 |
| 3 | 0.735 | 1.340 | 2.448 | 16.580 |
| 4 | 1.233 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 2 | Galvanizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.289 | 0.530 | 1.681 | 14.790 |
| 2 | 0.358 | 0.803 | 2.123 | 24.260 |
| 3 | 0.953 | 1.964 | 3.212 | 18.520 |
| 4 | 1.260 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 3 | Galvanizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.272 | * | * | * |
| 2 | 0.316 | * | * | * |
| 3 | 0.356 | * | * | * |
| 4 | 0.531 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 4 | Galvanizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.155 | 0.415 | 2.387 | 12.560 |
| 2 | 0.466 | 0.756 | 1.770 | 17.380 |
| 3 | 0.945 | 1.861 | 2.614 | 12.740 |

Tabla 5.81 Comparación de la velocidad de corrosión del Zinalquizado, en solución de sulfato de sodio según las diferentes formas empleadas.

| VELOCIDAD DE CORROSION EN SULFATO DE SODIO (mm/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta 1 | Zinalquizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.229 | 0.458 | 1.011 | 16.710 |
| 2 | 0.107 | 0.105 | 0.018 | 0.059 |
| 3 | 0.038 | 0.063 | 0.040 | 0.058 |
| 4 | 0.026 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 2 | Zinalquizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.349 | 0.779 | 1.500 | 15.470 |
| 2 | 0.167 | 0.162 | 0.032 | 0.072 |
| 3 | 0.165 | 0.215 | 0.059 | 0.114 |
| 4 | 0.116 | * | * | * |
| | | | | |
| | | | | |
| Probeta 3 | Zinalquizado | | | |
| dia | 0.026/Rp | ba*bc/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.304 | * | * | * |
| 2 | 0.181 | * | * | * |
| 3 | 0.071 | * | * | * |
| 4 | * | * | * | * |
| | | | | |

Tabla 5.82 Comparación de la velocidad de corrosión del Zinalquizado, en solución de cloruro de sodio según las diferentes formas empleadas

VELOCIDAD DE CORROSION EN CLORURO DE SODIO (mm/año)

| Probeta 1 | Zinalquizado | | | |
|---|---|---|---|---|
| dia | 0.026/Rp | B/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.223 | 0.401 | 1.740 | 22.260 |
| 2 | 0.372 | 0.456 | 1.316 | 24.350 |
| 3 | 0.254 | 0.352 | 0.451 | 5.169 |
| 4 | 0.135 | * | * | * |

| Probeta 2 | Zinalquizado | | | |
|---|---|---|---|---|
| dia | 0.026/Rp | B/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.185 | 0.294 | 5.150 | 20.180 |
| 2 | 0.328 | 0.523 | 2.313 | 17.420 |
| 3 | 0.247 | 0.373 | 1.078 | 11.270 |
| 4 | 0.200 | * | * | * |

| Probeta 3 | Zinalquizado | | | |
|---|---|---|---|---|
| dia | 0.026/Rp | B/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.279 | * | * | * |
| 2 | 0.202 | * | * | * |
| 3 | 0.245 | * | * | * |
| 4 | 0.239 | * | * | * |

| Probeta 4 | Zinalquizado | | | |
|---|---|---|---|---|
| día | 0.026/Rp | B/Rp | Mixto | Voltamaster |
| 1 | 0.567 | 1.142 | 2.197 | 14.580 |
| 2 | 1.082 | 1.403 | 2.056 | 8.284 |
| 3 | 1.438 | 1.993 | 1.487 | 15.460 |

Fotografía 5.83 Cámara de niebla salina con el aspersor funcionando

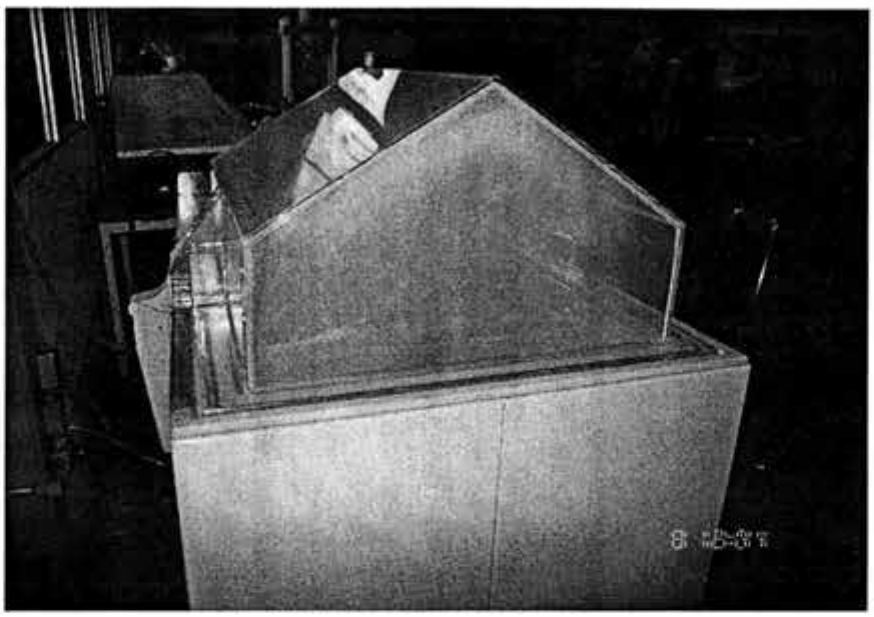
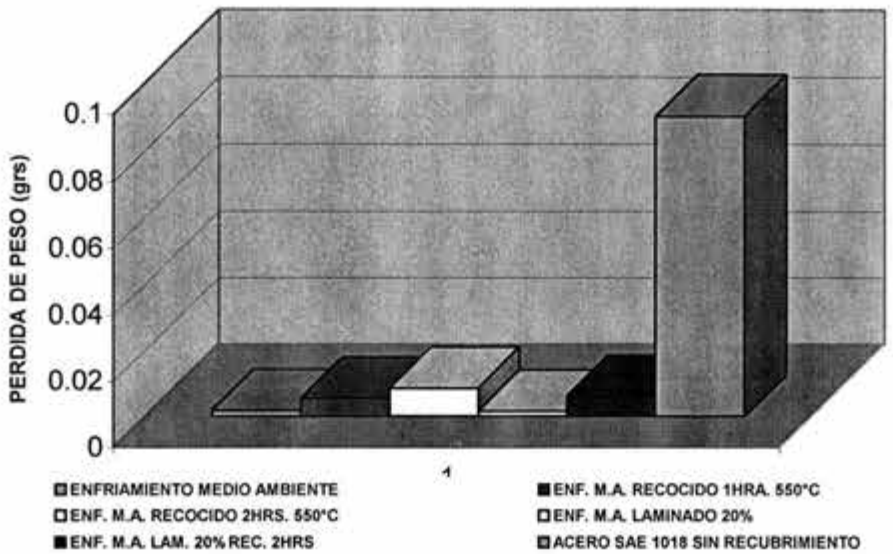


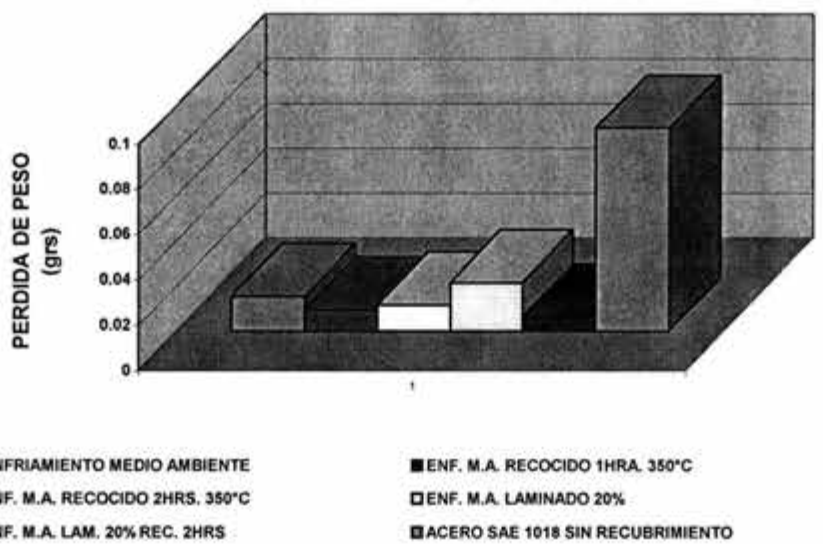
Tabla 5.84 Valores de pérdida en peso durante el ensayo en la cámara de niebla salina

| Resultados de la prueba de corrosión en la cámara de niebla salina | | | |
|---|---|---|---|
| **Numero de probeta y características** | **Pérdida de peso en gramos (8 días)** | **Numero de probeta y características** | **Pérdida de peso en gramos (8 días)** |
| 1.- Enfriamiento medio ambiente | 0.0152 | 50.- Enfriamiento medio ambiente | 0.0018 |
| 6.- Enf. m.a. recocido 1 hra. 350°C | 0.0091 | 56.- Enf. m.a. recocido 1 hra. 550°C | 0.0055 |
| 11.- Enf. m.a. recocido 2 hrs. 350°C | 0.0114 | 61.- Enf. m.a. recocido 2 hrs. 550°C | 0.0086 |
| 31.- Enf. m.a. laminada 20% | 0.021 | 81.- Enf. m.a. laminada 20% | 0.0016 |
| 41.- Enf. m.a. laminada 20% recocido 2 hrs. | 0.006 | 91.- Enf. m.a. laminada 20% recocido 2 hrs. | 0.006 |
| Acero AISI 1018 sin recubrimiento | 0.09 | Acero AISI 1018 sin recubrimiento | 0.09 |

Grafica 5.85 Pérdida de peso de probetas recubiertas con aluminio vs acero SAE 1018 sin recubrir




Gráfica 5.86 Pérdida de peso de probetas recubiertas con zinalco vs acero SAE 1018 sin recubrimiento



Gráfica 5.87 Recubrimientos zinalco, aluminio y acero sin recubrir

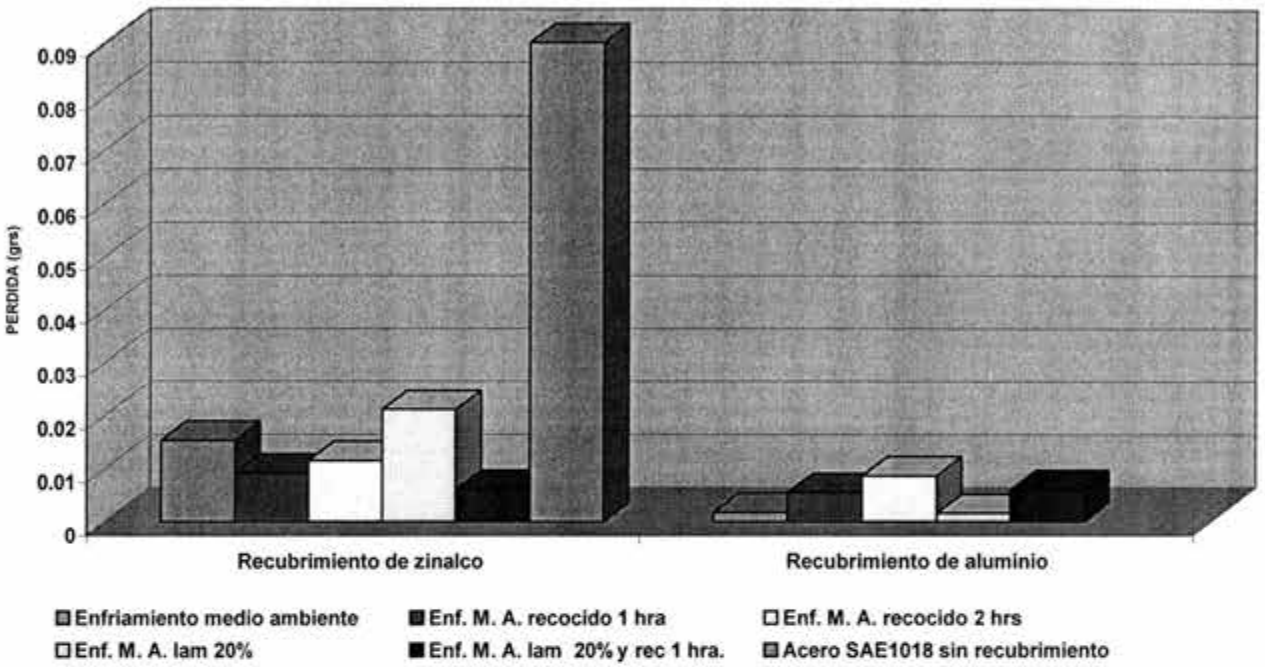



Tabla 5.88.Características del material estudiado en conformabilidad

| Probeta | Descripción | Composición química | Calibre | Estado metalúrgico |
|---|---|---|---|---|
| 1-15 | Acero AISI 1018 sin recubrimiento | C – 0.18%<br>Si – 0.25%<br>Mn – 0.75% | 18 | recocido |
| 16-30 | Acero AISI 1018 recubrimiento de aluminio | Al -1100 | 18 | recocido |
| 31-45 | Acero AISI 1018 recubrimiento de zinalco | Zinalco | 18 | recocido |

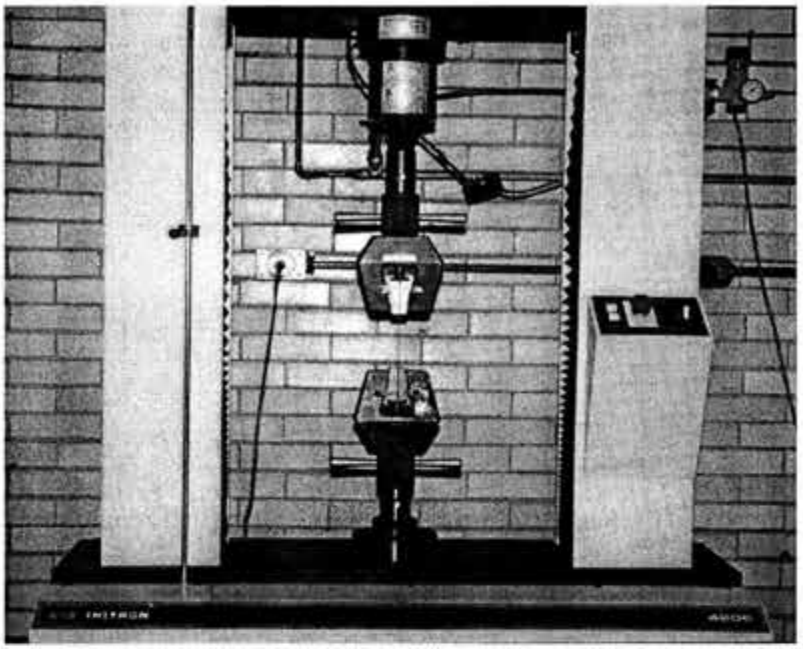


Figura 5.89 Máquina universal de pruebas electromecánica, con el herramental para el ensayo de tracción

Figura 5.89 A) Probeta para ensayo de tensión cuello

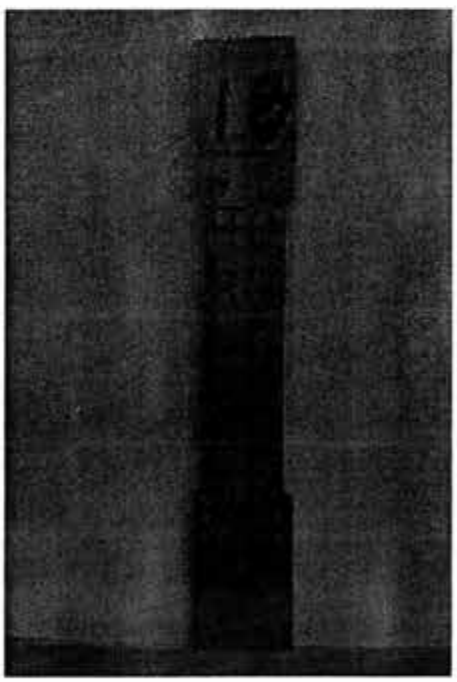


Figura 5.89 B) Zona de formación de

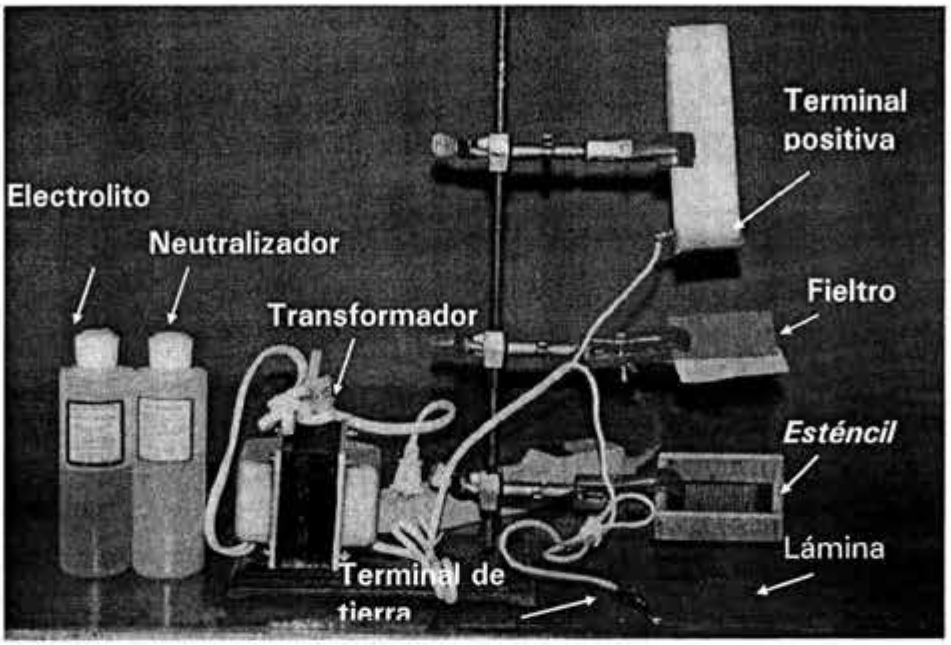



Figura 5.90 Equipo para grabado electroquímico

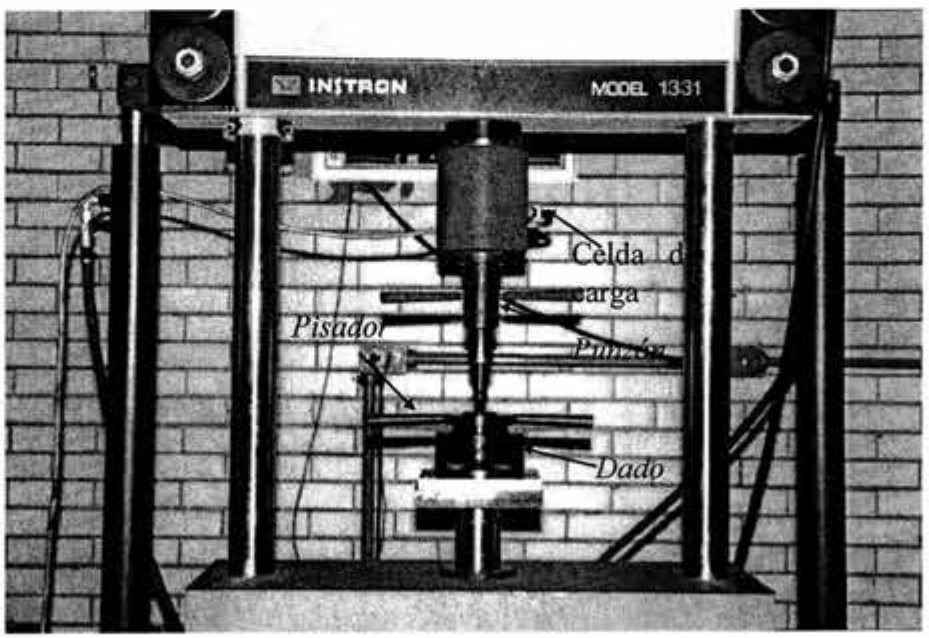



Figura 5.91 a) Máquina universal de pruebas servohidráulica, con el herramental para el ensayo erichsen en frío

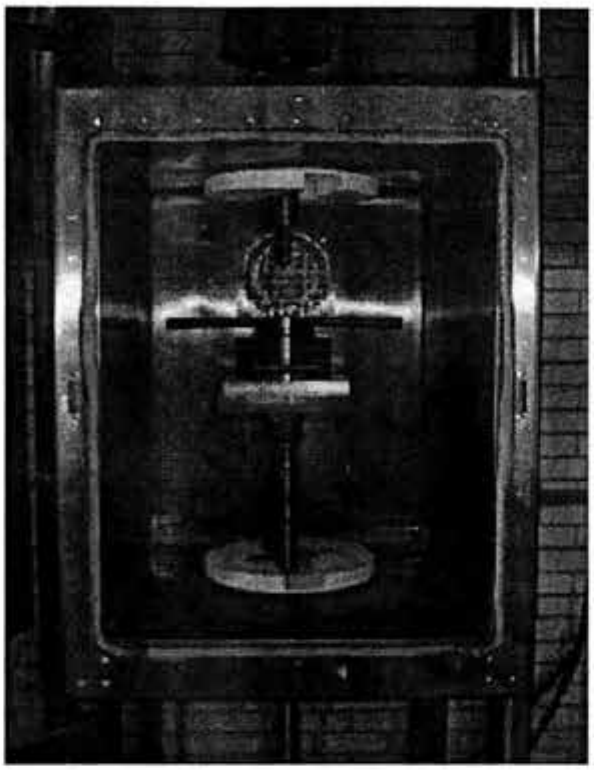


Figura 5.91 b) Máquina universal de pruebas servohidráulica, con el herramental para el ensayo erichsen en caliente

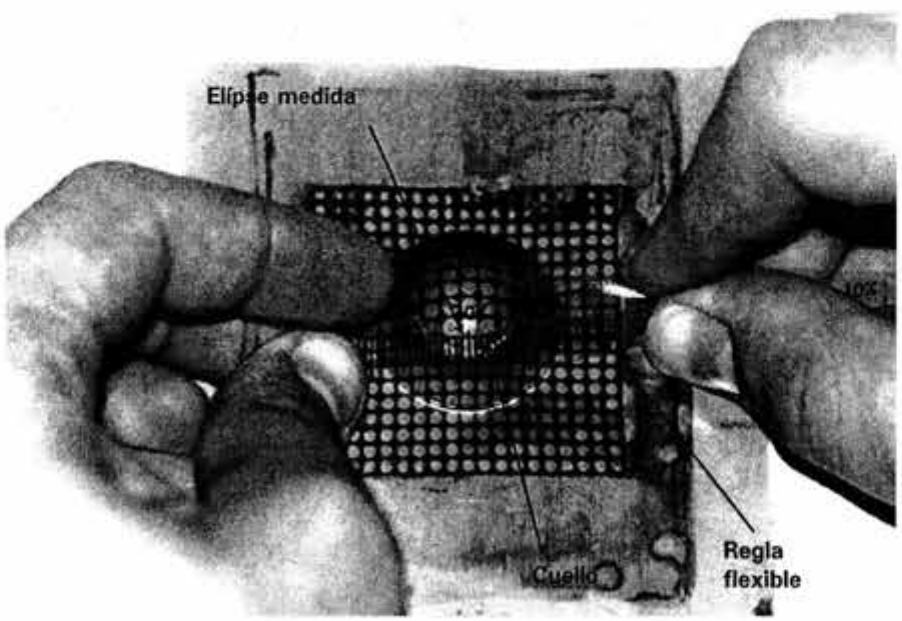



Figura 5.92 Medición de deformación mayor y menor en las elipses

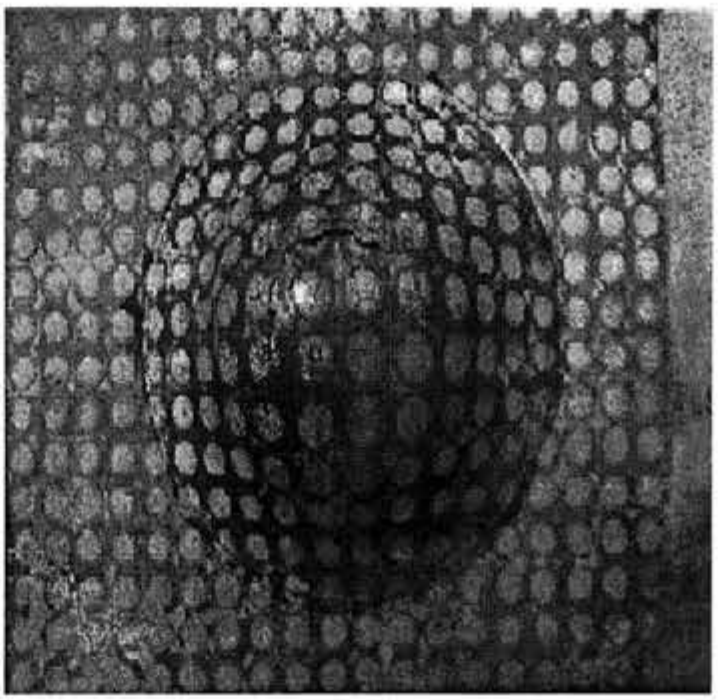


Figura 5.92 A) Zinalquizado en caliente 350°C

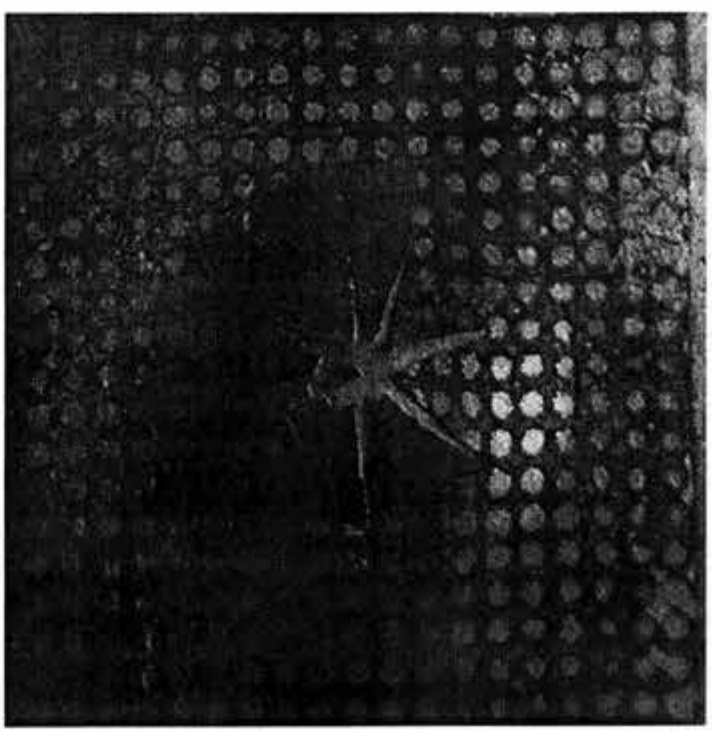


Figura 5.92 B) Zinalquizado en frío

Tablas y gráficas 5.93 Ensayos de tracción del recubrimiento de zinalco a diferentes temperaturas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

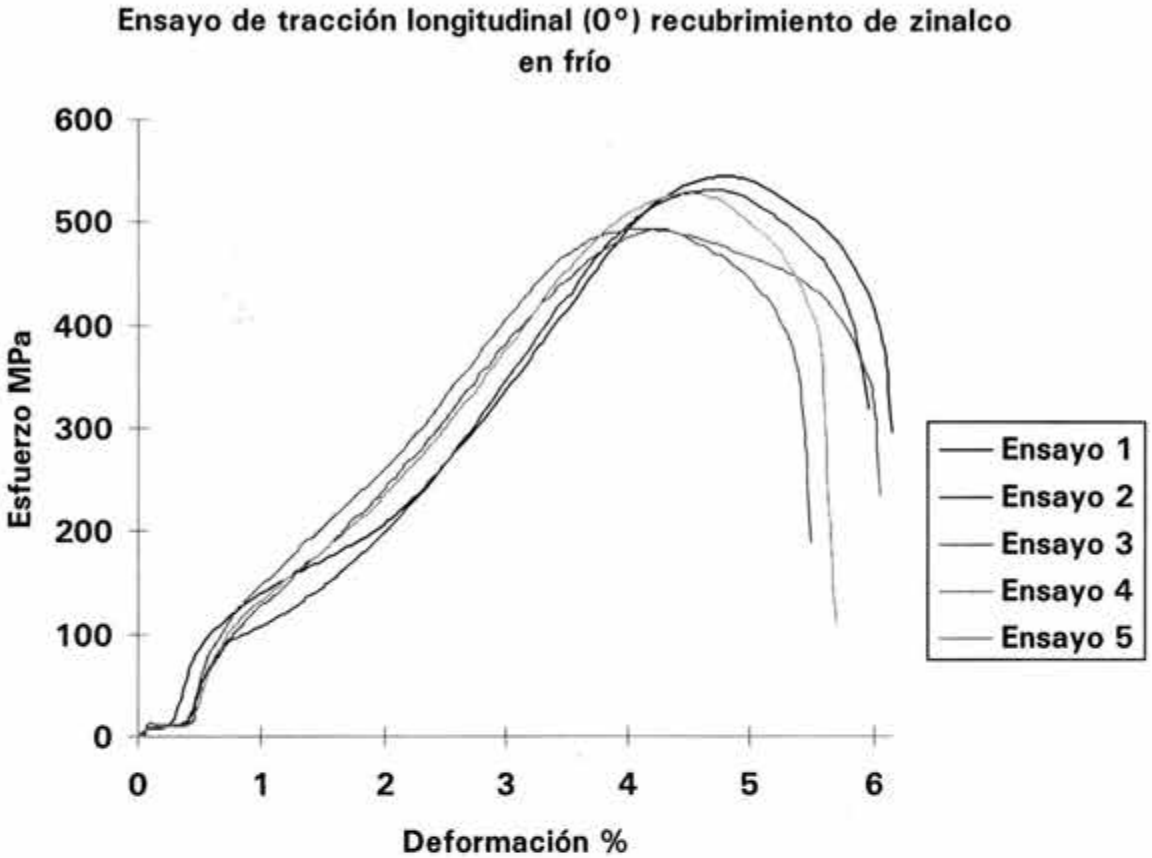
**Prueba de tracción en frío para recubrimiento de zinalco**
Series IX Automated Materials Testing System 1.04
Operator name: AAM
Sample Identification: Ensayo longitudinal(0°)
Interface Type: 4200 Series Sample Type: ASTM
Machine Parameters of test:
Sample Rate (pts/sec): 5.00
Crosshead Speed (mm/min): 10.000

| Dimensions: | Spec. 1 | Spec. 2 | Spec. 3 | Spec. 4 | Spec. 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Width (mm) | 10.53 | 10.50 | 10.56 | 10.61 | 10.51 |
| Thickness (mm) | .720 | .740 | .790 | .760 | .730 |
| Spec gauge len (mm) | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 |
| Grip distance (mm) | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 |

Out of 5 specimens, 0 excluded.

| Specimen number | Desplazto. en máx. carga (mm) | Deforma. en máx. carga (%) | Carga máxima soportada (KN) | Esfuerzo en máx. carga (MPa) | Desplazto. en punto ruptura (mm) | Deforma. en punto ruptura (%) | Carga en punto ruptura (KN) | Esfuerzo en punto ruptura (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.220 | 4.600 | 4.127 | 544.5 | 4.100 | 5.857 | 2.497 | 329.4 |
| 2 | 3.190 | 4.557 | 4.123 | 530.8 | 3.980 | 5.686 | 2.327 | 299.6 |
| 3 | 2.810 | 4.014 | 4.107 | 492.4 | 4.020 | 5.743 | 2.368 | 283.9 |
| 4 | 2.850 | 4.071 | 3.974 | 493.0 | 3.650 | 5.214 | 1.699 | 210.8 |
| 5 | 3.020 | 4.314 | 4.055 | 528.7 | 3.720 | 5.314 | 2.835 | 369.6 |
| Mean: | 3.018 | 4.311 | 4.077 | 517.9 | 3.894 | 5.563 | 2.345 | 298.7 |
| Standard deviation: | .188 | .269 | .064 | 23.8 | .197 | .282 | .413 | 59.0 |

| Specimen number | Desplazto. al 0.2% fluencia (mm) | Deforma. al 0.2% fluencia (%) | Carga al 0.2% fluencia (KN) | Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa) | Módulo de Young (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.008 | 4.298 | 4.071 | 537.1 | 16660. |
| 2 | 2.867 | 4.096 | 4.043 | 520.4 | 17120. |
| 3 | 2.500 | 3.571 | 4.047 | 485.2 | 15850. |
| 4 | 2.630 | 3.757 | 3.890 | 482.5 | 14820. |
| 5 | 2.732 | 3.903 | 3.950 | 515.0 | 16510. |
| Mean: | 2.747 | 3.925 | 4.000 | 508.1 | 16190. |
| Standard deviation: | .199 | .284 | .077 | 23.5 | 890. |


Ensayo de tracción longitudinal (0°) recubrimiento de zinalco en frío
600
500
400
300
200
100
0
Esfuerzo MPa
0
1
2
3
4
5
6
Deformación %
Ensayo 1
Ensayo 2
Ensayo 3
Ensayo 4
Ensayo 5

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

**Prueba de tracción a 250°C para recubrimiento de zinalco**

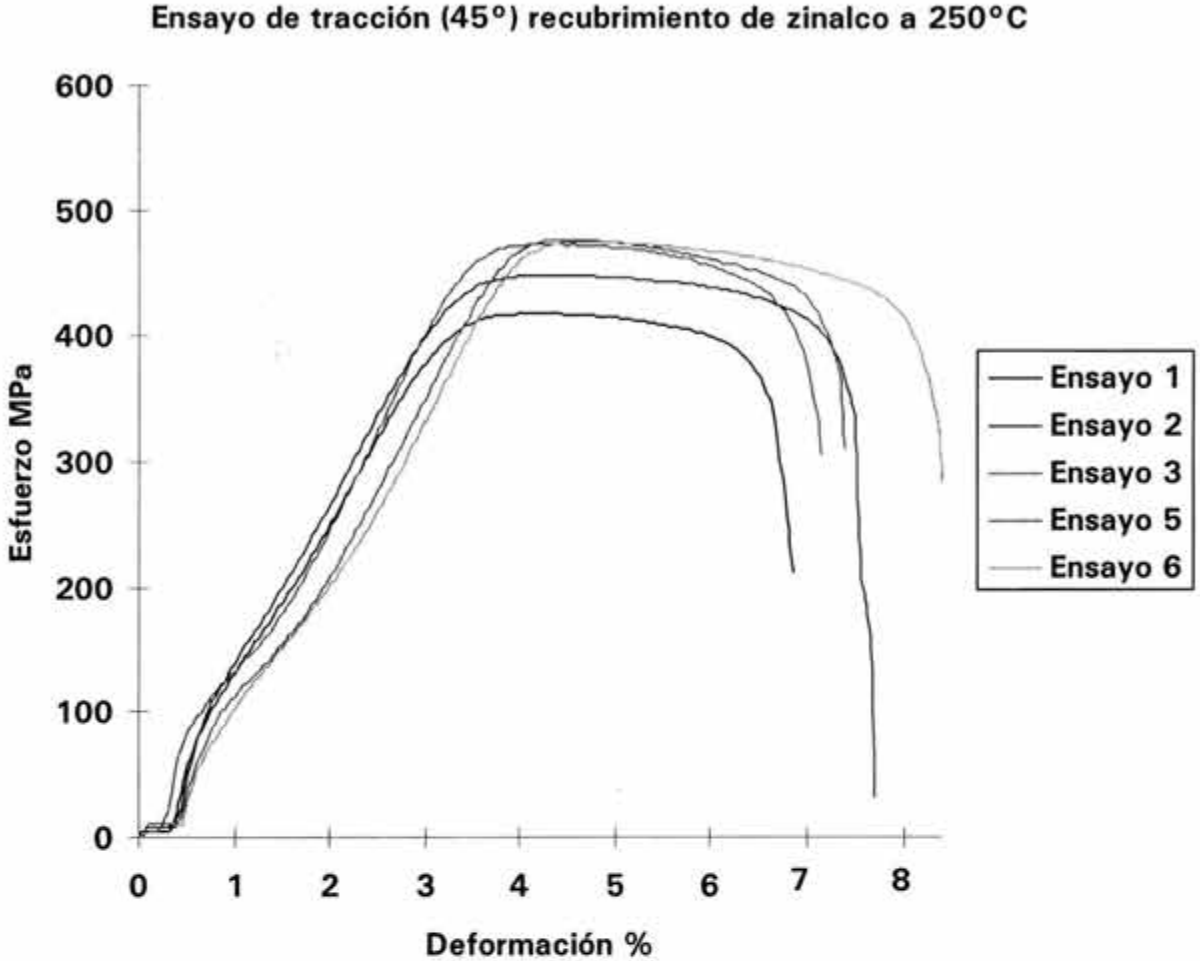
Test type: Tensile — Instron Corporation
Operator name: AAM
Sample Identification: Ensayo 45°
Interface Type: 4200 Series — Sample Type: ASTM
Machine Parameters of test:
Sample Rate (pts/sec): 5.00
Crosshead Speed (mm/min): 10.000

| Dimensions: | Spec. 1 | Spec. 2 | Spec. 3 | Spec. 4 | Spec. 5 | Spec. 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Width (mm) | 11.07 | 11.02 | 10.83 | 10.89 | 10.84 | 10.87 |
| Thickness (mm) | .840 | .770 | .750 | .720 | .740 | .750 |
| Spec gauge len (mm) | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 |
| Grip distance (mm) | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 |

Out of 6 specimens, 1 excluded.

| Specimen number | Desplazto. en máx. carga (mm) | Deforma. en máx. carga (%) | Carga máxima soportada (KN) | Esfuerzo en máx. carga (MPa) | Desplazto. en punto ruptura (mm) | Deforma. en punto ruptura (%) | Carga en punto ruptura (KN) | Esfuerzo en punto ruptura (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| 1 | 2.660 | 3.800 | 3.886 | 418.0 | 4.570 | 6.529 | 1.792 | 192.8 |
| 2 | 2.950 | 4.214 | 3.801 | 448.1 | 5.120 | 7.314 | 1.148 | 135.3 |
| 3 | 2.930 | 4.186 | 3.841 | 473.0 | 4.770 | 6.814 | 2.484 | 305.9 |
| Excluded | 3.670 | 5.243 | 3.874 | 494.2 | 5.790 | 8.271 | 2.722 | 347.2 |
| 5 | 3.070 | 4.386 | 3.821 | 476.5 | 4.950 | 7.071 | 2.142 | 267.1 |
| 6 | 3.280 | 4.686 | 3.866 | 474.3 | 5.590 | 7.986 | 2.456 | 301.3 |
| | | | | | | | | |
| Mean: | 2.978 | 4.254 | 3.843 | 458.0 | 5.000 | 7.143 | 2.004 | 240.5 |
| Standard deviation: | .226 | .322 | .034 | 25.1 | .388 | .555 | .555 | 74.2 |

| Specimen number | Desplazto. al 0.2% fluencia (mm) | Deforma. al 0.2% fluencia (%) | Carga al 0.2% fluencia (KN) | Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa) | Módulo de Young (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| 1 | 2.2640 | 3.2350 | 3.7810 | 406.700 | 14120. |
| 2 | 0.2336 | .3337 | .0725 | 8.544 | 14430. |
| 3 | 2.4010 | 3.4300 | 3.7530 | 462.200 | 16710. |
| Excluded | 3.3060 | 4.7230 | 3.8090 | 486.000 | 15030. |
| 5 | 2.6990 | 3.8550 | 3.7650 | 469.500 | 15500. |
| 6 | 2.7670 | 3.9530 | 3.8090 | 467.400 | 15690. |
| | | | | | |
| Mean: | 2.0730 | 2.9610 | 3.0360 | 362.900 | 15290. |
| Standard deviation: | 1.0490 | 1.4980 | 1.6570 | 199.800 | 1041. |


Ensayo de tracción (45°) recubrimiento de zinalco a 250°C
600
500
400
300
200
100
0
Esfuerzo MPa
0
1
2
3
4
5
6
7
8
Deformación %
Ensayo 1
Ensayo 2
Ensayo 3
Ensayo 5
Ensayo 6

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

**Prueba de tracción a 350°C para recubrimiento de zinalco**
Test type:Tensile
Operator name: AAM
Sample Identification: Ensayo 90° (transversal)
Interface Type: 4200 Series Sample Type: ASTM
Machine Parameters of test:
Sample Rate (pts/sec): 5.00
Crosshead Speed (mm/min): 10.000

| Dimensions: | Spec. 1 | Spec. 2 | Spec. 3 | Spec. 4 |
|---|---|---|---|---|
| Width (mm) | 13.65 | 13.65 | 13.40 | 13.35 |
| Thickness (mm) | .80 | .80 | .80 | .80 |
| Spec gauge len (mm) | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Grip distance (mm) | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

Out of 4 specimens, 0 excluded.

| Specimen number | Desplazto. en máx. carga (mm) | Deforma. en máx. carga (%) | Carga máxima soportada (KN) | Esfuerzo en máx. carga (MPa) | Desplazto. en punto ruptura (mm) | Deforma. en punto ruptura (%) | Carga en punto ruptura (KN) | Esfuerzo en punto ruptura (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18.28 | 22.85 | 3.548 | 325.0 | 25.10 | 31.38 | 2.5010 | 229.10 |
| 2 | 18.15 | 22.69 | 3.411 | 312.4 | 24.64 | 30.80 | 2.2790 | 208.80 |
| 3 | 18.98 | 23.73 | 3.350 | 312.6 | 25.18 | 31.48 | ---- | ---- |
| 4 | 18.84 | 23.55 | 3.403 | 318.7 | 26.51 | 33.14 | 2.2870 | 214.20 |
| Mean: | 18.56 | 23.20 | 3.428 | 317.2 | 25.36 | 31.70 | 2.3560 | 217.30 |
| Standard deviation: | .41 | .51 | .084 | 6.0 | .80 | 1.00 | .1259 | 10.53 |

| Specimen number | Desplazto. al 0.2% fluencia (mm) | Deforma. al 0.2% fluencia (%) | Carga al 0.2% fluencia (KN) | Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa) | Módulo de Young (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | .7359 | .9199 | 1.933 | 177.0 | 52280. |
| 2 | .7039 | .8799 | 1.736 | 159.0 | 46520. |
| 3 | .6963 | .8704 | 1.740 | 162.3 | 44110. |
| 4 | .7453 | .9316 | 1.804 | 169.0 | 43870. |
| Mean: | .7203 | .9004 | 1.803 | 166.8 | 46700. |
| Standard deviation: | .0239 | .0299 | .092 | 8.0 | 3911. |

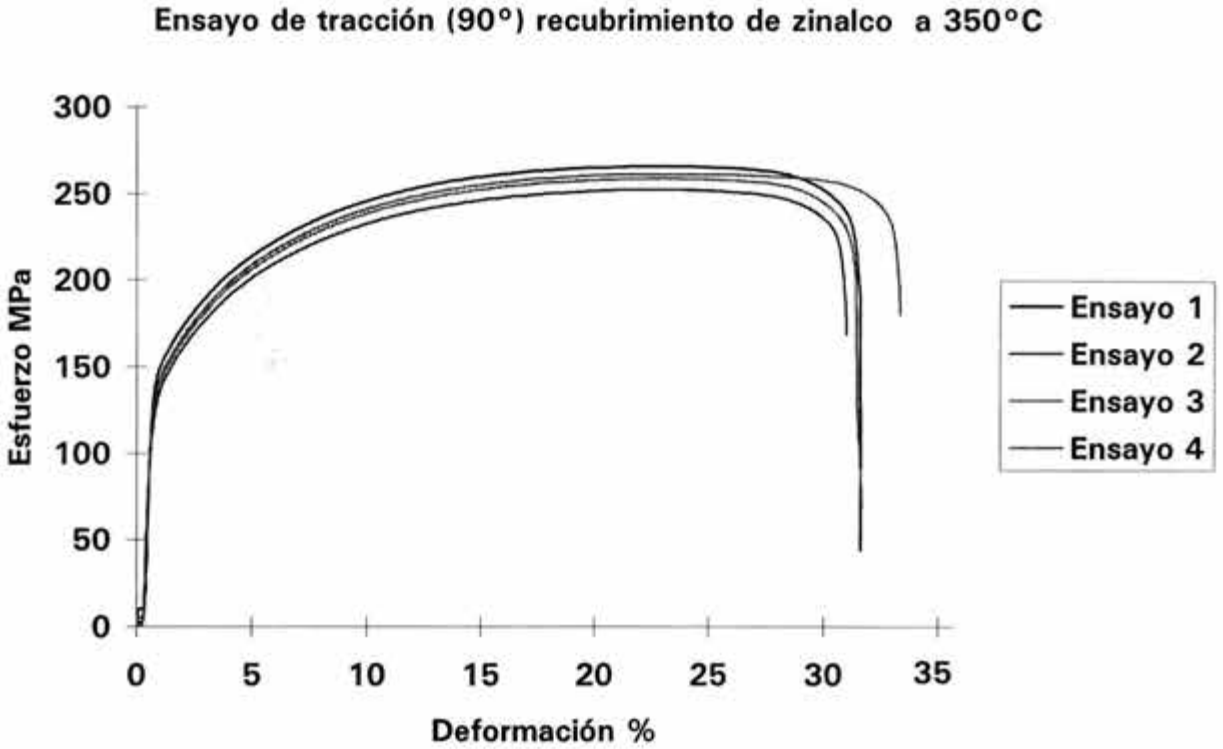

Ensayo de tracción (90°) recubrimiento de zinalco a 350°C
Esfuerzo MPa
300
250
200
150
100
50
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Deformación %
Ensayo 1
Ensayo 2
Ensayo 3
Ensayo 4

Tabla y gráficas 5.94 Ensayos de tracción recubrimiento de aluminio a diferentes temperaturas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

**Prueba de tracción en frío para recubrimiento de aluminio**

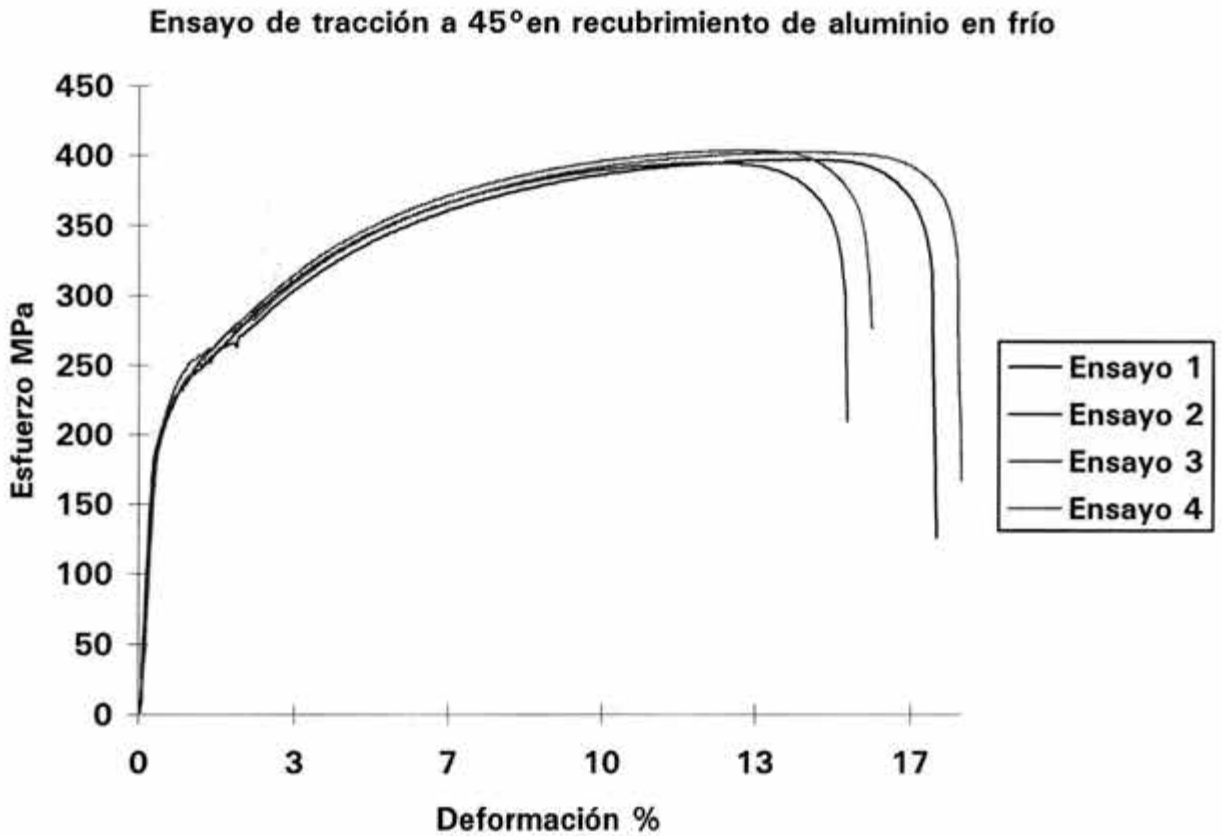
Test type: Tensile — Instron Corporation
Operator name: AAM
Sample Identification: Ensayo 45°
Interface Type: 4200 Series — Sample Type: ASTM
Machine Parameters of test:
Sample Rate (pts/sec): 5.00
Crosshead Speed (mm/min): 10.000

| Dimensions: | Spec. 1 | Spec. 2 | Spec. 3 | Spec. 4 |
|---|---|---|---|---|
| Width (mm) | 8.95 | 9.04 | 9.06 | 8.98 |
| Thickness (mm) | .840 | .830 | .830 | .810 |
| Spec gauge len (mm) | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| Grip distance (mm) | 115.0 | 115.0 | 115.0 | 115.0 |

Out of 4 specimens, 0 excluded.

| Specimen number | Desplazto. en máx. carga (mm) | Deforma. en máx. carga (%) | Carga máxima soportada (KN) | Esfuerzo en máx. carga (MPa) | Desplazto. en punto ruptura (mm) | Deforma. en punto ruptura (%) | Carga en punto ruptura (KN) | Esfuerzo en punto ruptura (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| 1 | 14.54 | 14.54 | 2.988 | 397.5 | 17.23 | 17.23 | 1.136 | 151.1 |
| 2 | 12.36 | 12.36 | 2.964 | 395.1 | 15.29 | 15.29 | 2.086 | 278.1 |
| 3 | 13.54 | 13.54 | 3.036 | 403.8 | 15.83 | 15.83 | 2.138 | 284.4 |
| 4 | 15.04 | 15.04 | 2.927 | 402.5 | 17.78 | 17.78 | 1.148 | 157.9 |
| | | | | | | | | |
| Mean: | 13.87 | 13.87 | 2.979 | 399.8 | 16.53 | 16.53 | 1.627 | 217.9 |
| Standard deviation: | 1.18 | 1.18 | .046 | 4.1 | 1.17 | 1.17 | .560 | 73.3 |

| Specimen number | Desplazto. al 0.2% fluencia (mm) | Deforma. al 0.2% fluencia (%) | Carga al 0.2% fluencia (KN) | Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa) | Módulo de Young (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| 1 | .5333 | .5333 | 1.542 | 205.2 | 72400. |
| 2 | .5992 | .5992 | 1.574 | 209.9 | 64380. |
| 3 | .6356 | .6356 | 1.659 | 220.7 | 61930. |
| 4 | .5689 | .5689 | 1.538 | 211.5 | 68080. |
| | | | | | |
| Mean: | .5842 | .5842 | 1.578 | 211.8 | 66700. |
| Standard deviation: | .0436 | .0436 | .056 | 6.5 | 4564. |


Ensayo de tracción a 45°en recubrimiento de aluminio en frío
Esfuerzo MPa
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
3
7
10
13
17
Deformación %
Ensayo 1
Ensayo 2
Ensayo 3
Ensayo 4

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

**Prueba de tracción a 250°C para recubrimiento de aluminio**

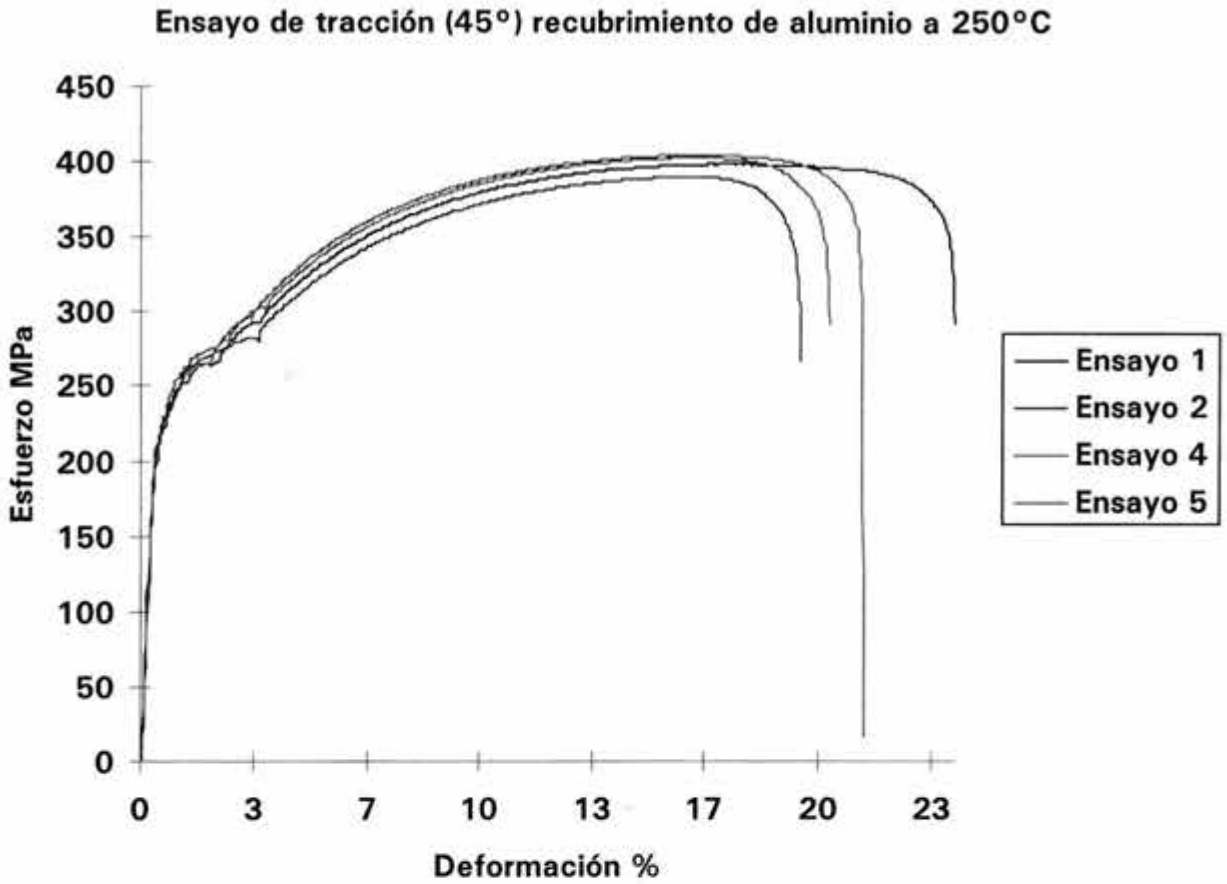
Test type: Tensile — Instron Corporation
Operator name: AAM
Sample Identification: Ensayo 45°
Interface Type: 4200 Series — Sample Type: ASTM
Machine Parameters of test:
Sample Rate (pts/sec): 5.00
Crosshead Speed (mm/min): 10.000

| Dimensions: | Spec. 1 | Spec. 2 | Spec. 3 | Spec. 4 | Spec. 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Width (mm) | 12.00 | 12.01 | 11.95 | 11.95 | 11.95 |
| Thickness (mm) | .80 | .83 | .82 | .8200 | .82 |
| Spec gauge len (mm) | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| Grip distance (mm) | 115.0 | 115.0 | 115.0 | 115.0 | 115.0 |

Out of 5 specimens, 1 excluded.

| Specimen number | Desplazto. en máx. carga (mm) | Deforma. en máx. carga (%) | Carga máxima soportada (KN) | Esfuerzo en máx. carga (MPa) | Desplazto. en punto ruptura (mm) | Deforma. en punto ruptura (%) | Carga en punto ruptura (KN) | Esfuerzo en punto ruptura (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| 1 | 18.3400 | 18.3400 | 3.8250 | 398.500 | 24.0300 | 24.0300 | 2.7950 | 291.2000 |
| 2 | 16.2000 | 16.2000 | 3.8860 | 389.900 | 19.5300 | 19.5300 | 2.8510 | 286.1000 |
| Excluded | .0500 | .0500 | .0604 | 6.165 | .0659 | .0659 | .0081 | .8217 |
| 4 | 16.7300 | 16.7300 | 3.9460 | 402.800 | 20.3700 | 20.3700 | 2.7950 | 285.3000 |
| 5 | 17.4100 | 17.4100 | 3.9580 | 404.000 | 21.3500 | 21.3500 | 2.6820 | 273.8000 |
| | | | | | | | | |
| Mean: | 17.1700 | 17.1700 | 3.9040 | 398.800 | 21.3200 | 21.3200 | 2.7810 | 284.1000 |
| Standard deviation: | .9239 | .9239 | .0612 | 6.371 | 1.9540 | 1.9540 | .0709 | 7.3660 |

| Specimen number | Desplazto. al 0.2% fluencia (mm) | Deforma. al 0.2% fluencia (%) | Carga al 0.2% fluencia (KN) | Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa) | Módulo de Young (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| 1 | .5656 | .5656 | 2.033 | 211.9 | 68670. |
| 2 | .6326 | .6326 | 2.215 | 222.2 | 61790. |
| Excluded | ------ | ------- | ------- | ------- | 2289. |
| 4 | .5966 | .5966 | 2.166 | 221.1 | 68410. |
| 5 | .6329 | .6329 | 2.130 | 217.4 | 61620. |
| | | | | | |
| Mean: | .6069 | .6069 | 2.136 | 218.2 | 65120. |
| Standard deviation: | .0324 | .0324 | .077 | 4.7 | 3945. |


Ensayo de tracción (45°) recubrimiento de aluminio a 250°C
Esfuerzo MPa
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
3
7
10
13
17
20
23
Deformación %
Ensayo 1
Ensayo 2
Ensayo 4
Ensayo 5

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

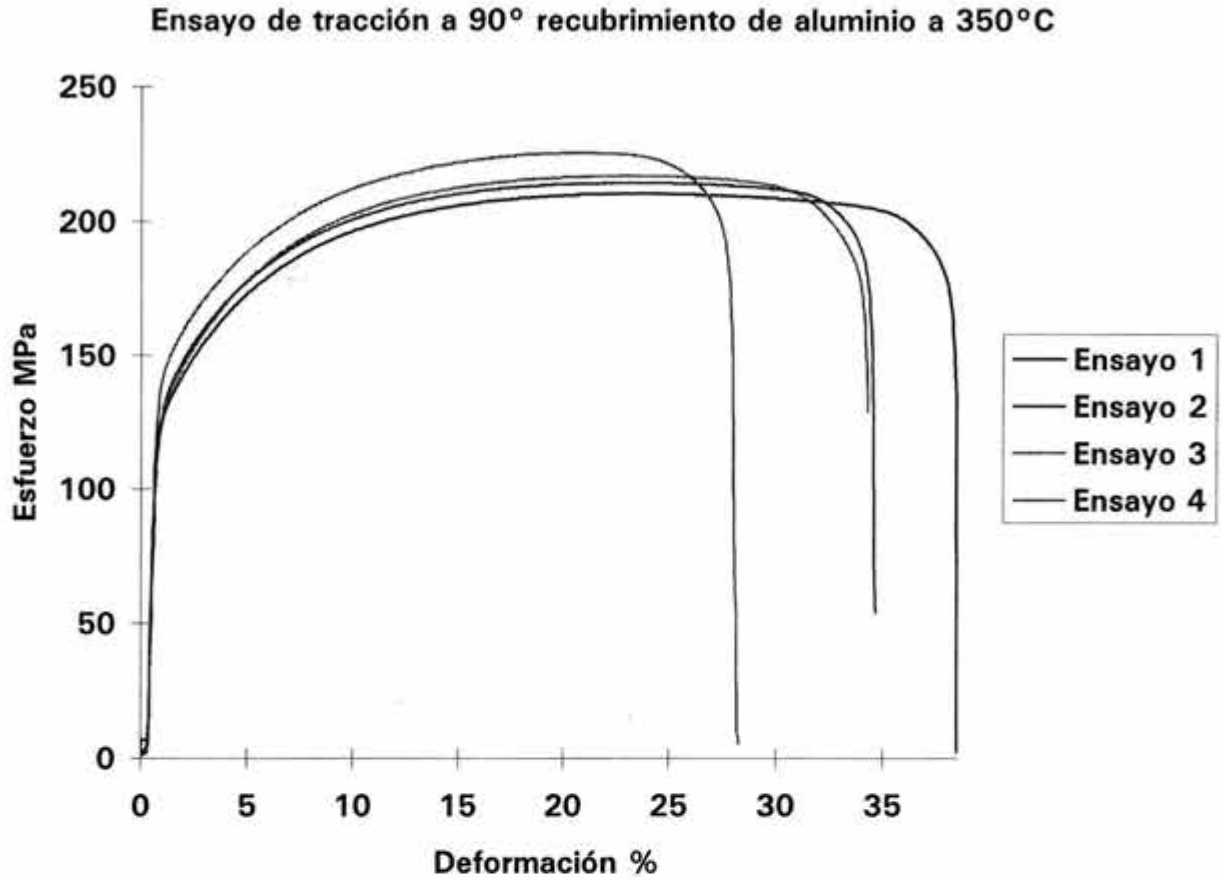
**Prueba de tracción a 350°C para recubrimiento de aluminio** a
Test type: Tensile Instron Corporation
Series IX Automated Materials Testing System 1.04
Operator name: AAM
Sample Identification: Ensayo 90° (transversal)
Interface Type: 4200 Series Sample Type: ASTM
Machine Parameters of test:
Sample Rate (pts/sec): 5.00
Crosshead Speed (mm/min): 10.000

| Dimensions: | Spec. 1 | Spec. 2 | Spec. 3 | Spec. 4 |
|---|---|---|---|---|
| Width (mm) | 13.05 | 13.00 | 13.00 | 13.65 |
| Thickness (mm) | .80 | .80 | .80 | .80 |
| Spec gauge len (mm) | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 |
| Grip distance (mm) | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

Out of 4 specimens, 0 excluded.

| Specimen number | Desplazto. en máx. carga (mm) | Deforma. en máx. carga (%) | Carga máxima soportada (KN) | Esfuerzo en máx. carga (MPa) | Desplazto. en punto ruptura (mm) | Deforma. en punto ruptura (%) | Carga en punto ruptura (KN) | Esfuerzo en punto ruptura (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 19.77 | 24.71 | 2.988 | 286.3 | 30.59 | 38.24 | 1.740 | 166.70 |
| 2 | 19.97 | 24.96 | 2.935 | 282.3 | 27.55 | 34.44 | ---- | ---- |
| 3 | 18.90 | 23.63 | 2.891 | 278.1 | 27.26 | 34.08 | 1.635 | 157.30 |
| 4 | 17.39 | 21.74 | 3.004 | 275.2 | 22.40 | 28.00 | ---- | ---- |
| Mean: | 19.01 | 23.76 | 2.954 | 280.4 | 26.95 | 33.69 | 1.6875 | 162.0 |
| Standard deviation: | 1.17 | 1.47 | .052 | 4.9 | 3.39 | 4.23 | .07424 | 6.647 |

| Specimen number | Desplazto. al 0.2% fluencia (mm) | Deforma. al 0.2% fluencia (%) | Carga al 0.2% fluencia (KN) | Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa) | Módulo de Young (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | .7473 | .9341 | 1.740 | 166.7 | 49510. |
| 2 | .6973 | .8716 | 1.663 | 159.9 | 49240. |
| 3 | .7026 | .8783 | 1.643 | 158.0 | 50170. |
| 4 | .7329 | .9161 | 1.832 | 167.8 | 47410. |
| Mean: | .7200 | .9000 | 1.719 | 163.1 | 49080. |
| Standard deviation: | .0240 | .0300 | .086 | 4.9 | 1182. |


Ensayo de tracción a 90° recubrimiento de aluminio a 350°C
250
200
150
100
50
0
Esfuerzo MPa
0
5
10
15
20
25
30
35
Deformación %
Ensayo 1
Ensayo 2
Ensayo 3
Ensayo 4

### 5.2.1.1 Anisotropía (datos y resultados)

Tabla 5.97 Datos y resultados del estudio de anisotropía

| Material y orientación | $w_0$ (mm) | $wf$ (mm) | $t_0$ (mm) | $t_f$ (mm) | $\varepsilon_w$ | $\varepsilon_w$ | r | $r_m$ | $\Delta r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Aluminizado 0° en frío | 9.03 | 8.7 | 1.55 | 1.51 | -0.0372 | -0.0261 | 1.42394 | 0.85046 | 0.35706 |
| Aluminizado 45° en frío | 8.39 | 7.67 | 1.52 | 1.33 | -0.0897 | -0.1335 | 0.67193 | | |
| Aluminizado 90° en frío | 9.1 | 8.49 | 1.64 | 1.47 | -0.0694 | -0.1094 | 0.63404 | | |
| Aluminizado 0° en caliente a 250°C | 9.05 | 8.4 | 1.75 | 1.52 | -0.0745 | -0.1409 | 0.52896 | 0.55192 | 0.2759 |
| Aluminizado 45° en caliente a 250°C | 8.35 | 7.59 | 1.7 | 1.35 | -0.0954 | -0.2305 | 0.41397 | | |
| Aluminizado 90° en caliente a 250°C | 9.19 | 8.53 | 1.55 | 1.42 | -0.0745 | -0.0876 | 0.85078 | | |
| Aluminizado 0° en caliente a 350°C | 9.17 | 8.33 | 1.75 | 1.5 | -0.0961 | -0.1542 | 0.62325 | 0.76563 | 0.15212 |
| Aluminizado 45° en caliente a 350°C | 8.36 | 7.69 | 1.49 | 1.32 | -0.0835 | -0.1211 | 0.68957 | | |
| Aluminizado 90° en caliente a 350°C | 9.17 | 8.54 | 1.54 | 1.44 | -0.0712 | -0.0671 | 1.06013 | | |
| Zinalquizado 0° en frío | 10.28 | 10.26 | 1.71 | 1.62 | -0.0019 | -0.0541 | 0.03602 | 0.22523 | -0.3413 |
| Zinalquizado 45° en frío | 8.34 | 8.28 | 1.66 | 1.63 | -0.0072 | -0.0182 | 0.3959 | | |
| Zinalquizado 90° en frío | 9.86 | 9.84 | 1.46 | 1.42 | -0.002 | -0.0278 | 0.07309 | | |
| Zinalquizado 0° en caliente a 250°C | 10.54 | 10.47 | 1.7 | 1.67 | -0.0067 | -0.0178 | 0.37426 | 0.20991 | 0.13674 |
| Zinalquizado 45° en caliente a 250°C | 8.44 | 8.41 | 1.61 | 1.57 | -0.0036 | -0.0252 | 0.14154 | | |
| Zinalquizado 90° en caliente a 250°C | 9.87 | 9.81 | 1.52 | 1.47 | -0.0061 | -0.0334 | 0.1823 | | |
| Zinalquizado 0° en caliente a 350°C | 10.61 | 10.55 | 1.84 | 1.76 | -0.0057 | -0.0445 | 0.12758 | 0.1042 | 0.08101 |
| Zinalquizado 45° en caliente a 350°C | 8.33 | 8.31 | 1.62 | 1.56 | -0.0024 | -0.0377 | 0.06369 | | |
| Zinalquizado 90° en caliente a 350°C | 9.89 | 9.82 | 1.63 | 1.56 | -0.0071 | -0.0439 | 0.16182 | | |

Tabla y Gráfica 5.98 Datos y resultados ensayo Erichsen recubrimiento de aluminio

| RECUBRIMIENTO DE ZINALCO 250°C | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta | Datos de la gráfica | | Cálculos a partir de la gráfica | |
| | Desplazamiento máx. (cm) | Carga máx. (cm) | Profundidad de la copa (mm) | Carga máx. (ton) |
| 1.1 | 8.2 | 7.6 | 10.41 | 1.35 |
| 1.2 | 8.1 | 7.6 | 10.29 | 1.35 |
| 1.3 | 8.15 | 7.6 | 10.35 | 1.35 |
| 1.4 | 8.1 | 7.55 | 10.29 | 1.34 |
| 1.5 | 8.1 | 7.4 | 10.29 | 1.31 |
| 1.6 | 8.2 | 7.4 | 10.41 | 1.31 |
| | | Promedio | 10.34 | 1.33 |
| | Desviación estándar | | 0.058 | 0.019 |

Gráfica representativa, ensayo Erichsen, recubrimiento de zinalco 250°C

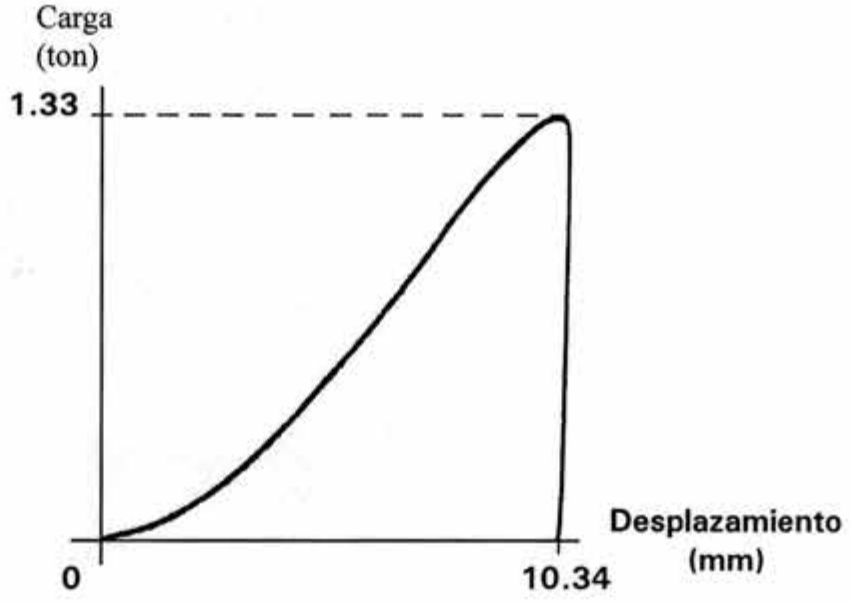



Tabla 5.99 Datos y resultados ensayo erichsen recubrimiento de zinalco temperatura ambiente

| RECUBRIMIENTO DE ZINALCO TEMPERATURA AMBIENTE | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Probeta | Datos de la gráfica | | Cálculos a partir de la gráfica | |
| | Desplazamiento máx. (cm) | Carga máx. (cm) | Profundidad de la copa (mm) | Carga máx. (ton) |
| 2.1 | 6 | 6.2 | 7.62 | 1.10 |
| 2.2 | 5.9 | 6.2 | 7.49 | 1.10 |
| 2.3 | 5.6 | 6.2 | 7.11 | 1.10 |
| 2.4 | 5.8 | 6.2 | 7.37 | 1.10 |
| 2.5 | 6.1 | 6.1 | 7.75 | 1.08 |
| 2.6 | 6 | 6.1 | 7.62 | 1.08 |
| | | Promedio | 7.49 | 1.09 |
| | Desviación estándar | | 0.228 | 0.010 |

Tabla y Gráfica 5.100 Probeta aluminizada deformada en frío y su gráfica de conformabilidad límite

| Lámina aluminizada deformada en frío. | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Erichsen sin falla | | Erichsen sin falla | | Erichsen fallados | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción fallados | |
| e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 |
| 5 | 2 | 4 | 12 | 12 | 22 | -15 | 6 | -10 | 19 | -4 | 8 | -11 | 31 |
| 4 | 2 | 4 | 16 | 15 | 24 | -14 | 10 | -9 | 10 | -4 | 8 | -11 | 35 |
| 3 | 4 | 4 | 12 | 18 | 23 | -14 | 8 | -9 | 11 | -4 | 18 | -11 | 36 |
| 3 | 1 | 4 | 9 | 19 | 21 | -14 | 7 | -9 | 5 | -4 | 30 | -10 | 26 |
| 3 | 2 | 4 | 9 | 19 | 21 | -14 | 11 | -9 | 13 | -4 | 11 | -10 | 33 |
| 3 | 2 | 4 | 5 | 21 | 22 | -14 | 9 | -9 | 18 | -4 | 3 | -9 | 28 |
| 2 | 4 | 4 | 6 | 22 | 24 | -14 | 12 | -9 | 20 | -4 | 10 | -9 | 27 |
| 2 | 2 | 4 | 7 | 22 | 26 | -14 | 12 | -9 | 9 | -4 | 9 | -7 | 32 |
| 2 | 1 | 5 | 9 | 23 | 43 | -14 | 12 | -8 | 18 | -3 | 11 | -6 | 24 |
| 2 | 8 | 5 | 9 | 24 | 48 | -14 | 7 | -8 | 19 | -3 | 9 | -6 | 21 |
| 2 | 2 | 5 | 9 | 24 | 45 | -14 | 5 | -8 | 11 | -3 | 23 | -6 | 28 |
| 2 | 6 | 5 | 7 | 24 | 54 | -14 | 5 | -8 | 7 | -3 | 5 | -6 | 29 |
| 2 | 6 | 5 | 13 | 25 | 39 | -14 | 6 | -8 | 19 | -3 | 8 | -5 | 21 |
| 2 | 4 | 5 | 14 | 25 | 58 | -14 | 5 | -8 | 6 | -3 | 7 | -5 | 23 |
| 2 | 1 | 5 | 12 | 27 | 54 | -13 | 9 | -7 | 10 | -3 | 5 | -4 | 19 |
| 1 | 5 | 5 | 7 | 28 | 33 | -13 | 9 | -7 | 11 | -3 | 2 | -4 | 20 |
| 1 | 7 | 5 | 6 | 28 | 30 | -13 | 12 | -7 | 18 | -3 | 3 | -4 | 19 |
| 1 | 3 | 5 | 7 | 29 | 44 | -13 | 13 | -7 | 10 | -3 | 9 | -4 | 28 |
| 1 | 7 | 5 | 7 | 30 | 43 | -13 | 10 | -7 | 10 | -3 | 21 | -3 | 24 |
| 1 | 4 | 5 | 7 | 33 | 37 | -13 | 9 | -7 | 18 | -3 | 17 | -3 | 23 |
| 1 | 6 | 6 | 10 | 33 | 46 | -13 | 8 | -7 | 15 | -3 | 14 | -3 | 20 |
| 1 | 5 | 6 | 6 | | | -13 | 6 | -7 | 20 | -3 | 10 | | |
| 1 | 4 | 6 | 11 | | | -13 | 12 | -6 | 10 | -3 | 3 | | |
| 1 | 2 | 6 | 9 | | | -13 | 4 | -6 | 18 | -3 | 3 | | |
| 1 | 1 | 6 | 12 | | | -13 | 5 | -6 | 5 | -2 | 17 | | |
| 0 | 1 | 6 | 11 | | | -13 | 5 | -6 | 10 | -2 | 5 | | |
| 0 | 1 | 6 | 14 | | | -13 | 5 | -6 | 11 | -2 | 4 | | |
| 1 | 1 | 7 | 9 | | | -13 | 5 | -6 | 14 | -2 | 1 | | |
| 1 | 6 | 7 | 10 | | | -12 | 10 | -6 | 14 | -2 | 2 | | |
| 1 | 10 | 8 | 9 | | | -12 | 7 | -6 | 21 | -2 | 2 | | |
| 1 | 5 | 8 | 16 | | | -12 | 19 | -5 | 19 | -2 | 6 | | |
| 1 | 5 | 9 | 14 | | | -12 | 9 | -5 | 7 | -2 | 9 | | |
| 2 | 3 | 9 | 13 | | | -12 | 5 | -5 | 9 | -2 | 9 | | |
| 2 | 9 | 9 | 11 | | | -12 | 5 | -5 | 7 | -2 | 9 | | |
| 2 | 6 | 10 | 15 | | | -12 | 5 | -5 | 14 | -2 | 9 | | |
| 2 | 6 | 10 | 19 | | | -12 | 5 | -5 | 12 | -1 | 13 | | |
| 3 | 13 | 11 | 13 | | | -11 | 7 | -4 | 7 | -1 | 7 | | |
| 3 | 7 | 12 | 13 | | | -11 | 8 | -4 | 22 | -1 | 2 | | |
| 3 | 4 | 13 | 24 | | | -11 | 8 | -4 | 22 | -1 | 2 | | |
| 3 | 5 | 13 | 14 | | | -11 | 8 | -4 | 5 | -1 | 4 | | |
| 3 | 6 | 15 | 29 | | | -11 | 18 | -4 | 12 | -1 | 4 | | |
| 4 | 6 | 16 | 21 | | | -10 | 13 | -4 | 10 | | | | |
| 4 | 6 | 18 | 20 | | | -10 | 11 | -4 | 6 | | | | |
| 4 | 12 | 23 | 24 | | | -10 | 8 | -4 | 13 | | | | |

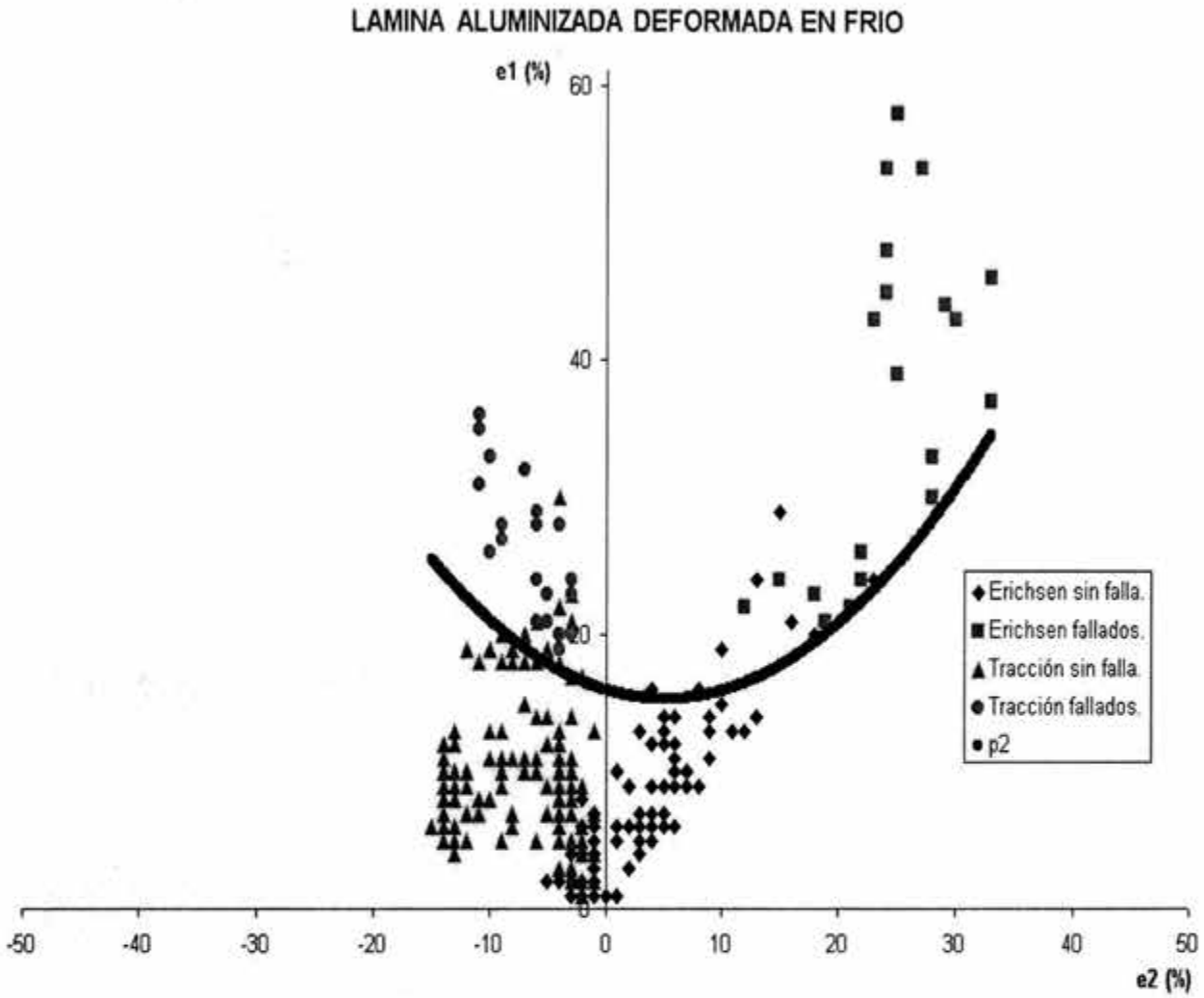

LAMINA ALUMINIZADA DEFORMADA EN FRIO
e1 (%)
60
40
20
0
-50
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
e2 (%)
Erichsen sin falla.
Erichsen fallados.
Tracción sin falla.
Tracción fallados.
p2

Tabla 5.101 Probeta aluminizada deformada a 250°C y su gráfica de conformabilidad límite

| Lámina aluminizada deformada en caliente a 250 grados celcius. | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Erichsen sin falla | | Erichsen sin falla | | Erichsen fallados | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción fallados | |
| e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 |
| 4 | 5 | 3 | 3 | 8 | 23 | .16 | 17 | .8 | 15 | .1 | 4 | .17 | 38 |
| .5 | 3 | 4 | 9 | 9 | 22 | .16 | 13 | .8 | 13 | .1 | 6 | .16 | 35 |
| .2 | 4 | 4 | 5 | 11 | 28 | .15 | 15 | .8 | 9 | .1 | 4 | .15 | 37 |
| .2 | 1 | 4 | 5 | 12 | 22 | .15 | 14 | .8 | 9 | .1 | 2 | .14 | 29 |
| .2 | 4 | 4 | 5 | 12 | 21 | .15 | 21 | .8 | 17 | .1 | 1 | .14 | 36 |
| .1 | 4 | 4 | 7 | 13 | 25 | .15 | 15 | .8 | 16 | .1 | 3 | .13 | 29 |
| .1 | 2 | 4 | 6 | 13 | 26 | .15 | 12 | .7 | 19 | .1 | 4 | .13 | 40 |
| .1 | 2 | 4 | 8 | 13 | 27 | .15 | 17 | .7 | 14 | .1 | 1 | .13 | 28 |
| .1 | 2 | 4 | 4 | 15 | 23 | .15 | 17 | .7 | 14 | .1 | 4 | .12 | 31 |
| .1 | 4 | 4 | 4 | 15 | 26 | .14 | 13 | .7 | 15 | .1 | 6 | .12 | 35 |
| .1 | 2 | 4 | 7 | 17 | 26 | .14 | 12 | .7 | 14 | .1 | 5 | .11 | 25 |
| .1 | 5 | 4 | 5 | 20 | 29 | .13 | 16 | .7 | 9 | .1 | 3 | .11 | 31 |
| .1 | 7 | 5 | 8 | 20 | 25 | .13 | 18 | .7 | 9 | | | .11 | 41 |
| .1 | 1 | 5 | 7 | 21 | 35 | .13 | 13 | .7 | 16 | | | .10 | 27 |
| .1 | 8 | 5 | 8 | 21 | 25 | .13 | 17 | .7 | 12 | | | .10 | 27 |
| .1 | 4 | 5 | 6 | 21 | 27 | .13 | 12 | .7 | 12 | | | .10 | 37 |
| .1 | 3 | 5 | 10 | 22 | 25 | .12 | 19 | .7 | 7 | | | .9 | 23 |
| .1 | 3 | 5 | 6 | 22 | 31 | .12 | 19 | .6 | 10 | | | .9 | 35 |
| .1 | 4 | 5 | 9 | 23 | 34 | .12 | 12 | .6 | 12 | | | .9 | 33 |
| 0 | 1 | 5 | 8 | 24 | 27 | .12 | 19 | .6 | 3 | | | .9 | 26 |
| 0 | 2 | 5 | 9 | 24 | 29 | .11 | 9 | .6 | 12 | | | .9 | 28 |
| 0 | 5 | 5 | 7 | | | .11 | 13 | .6 | 13 | | | .8 | 32 |
| 0 | 2 | 5 | 7 | | | .11 | 14 | .6 | 15 | | | .8 | 32 |
| 1 | 3 | 6 | 10 | | | .11 | 8 | .6 | 17 | | | .8 | 28 |
| 1 | 4 | 6 | 9 | | | .11 | 18 | .6 | 12 | | | .7 | 27 |
| 1 | 15 | 6 | 9 | | | .10 | 20 | .6 | 7 | | | .7 | 33 |
| 1 | 4 | 6 | 10 | | | .10 | 12 | .6 | 9 | | | .5 | 20 |
| 1 | 4 | 6 | 9 | | | .10 | 17 | .6 | 7 | | | .5 | 37 |
| 1 | 2 | 6 | 9 | | | .10 | 12 | .6 | 10 | | | | |
| 2 | 5 | 7 | 8 | | | .10 | 9 | .6 | 13 | | | | |
| 2 | 5 | 7 | 14 | | | .10 | 12 | .5 | 3 | | | | |
| 2 | 4 | 7 | 10 | | | .10 | 20 | .5 | 10 | | | | |
| 2 | 4 | 7 | 9 | | | .10 | 15 | .5 | 5 | | | | |
| 2 | 3 | 7 | 9 | | | .10 | 15 | .5 | 7 | | | | |
| 2 | 3 | 7 | 9 | | | .10 | 13 | .5 | 7 | | | | |
| 2 | 4 | 7 | 9 | | | .10 | 9 | .5 | 9 | | | | |
| 2 | 4 | 8 | 11 | | | .10 | 21 | .4 | 12 | | | | |
| 3 | 4 | 8 | 10 | | | .9 | 18 | .4 | 7 | | | | |
| 3 | 12 | 8 | 10 | | | .9 | 15 | .3 | 18 | | | | |
| 3 | 7 | 8 | 14 | | | .9 | 21 | .3 | 3 | | | | |
| 3 | 6 | 8 | 10 | | | .9 | 15 | .3 | 6 | | | | |
| 3 | 4 | 8 | 12 | | | .9 | 16 | .3 | 6 | | | | |
| 3 | 10 | 8 | 17 | | | .9 | 13 | .2 | 25 | | | | |
| 3 | 7 | 8 | 11 | | | .9 | 13 | .2 | 4 | | | | |
| 3 | 4 | 9 | 15 | | | .9 | 12 | .2 | 4 | | | | |
| 3 | 7 | 9 | 17 | | | .9 | 13 | .2 | 2 | | | | |
| 3 | 5 | 9 | 17 | | | .9 | 7 | .2 | 5 | | | | |
| 3 | 4 | 9 | 12 | | | .9 | 12 | .2 | 6 | | | | |
| 3 | 8 | 9 | 12 | | | .8 | 15 | .2 | 8 | | | | |
| 3 | 6 | 11 | 13 | | | .8 | 17 | .2 | 4 | | | | |
| 3 | 3 | 12 | 20 | | | .8 | 15 | .2 | 4 | | | | |

LAMINA ALUMINIZADA DEFORMADA EN CALIENTE A 250° C

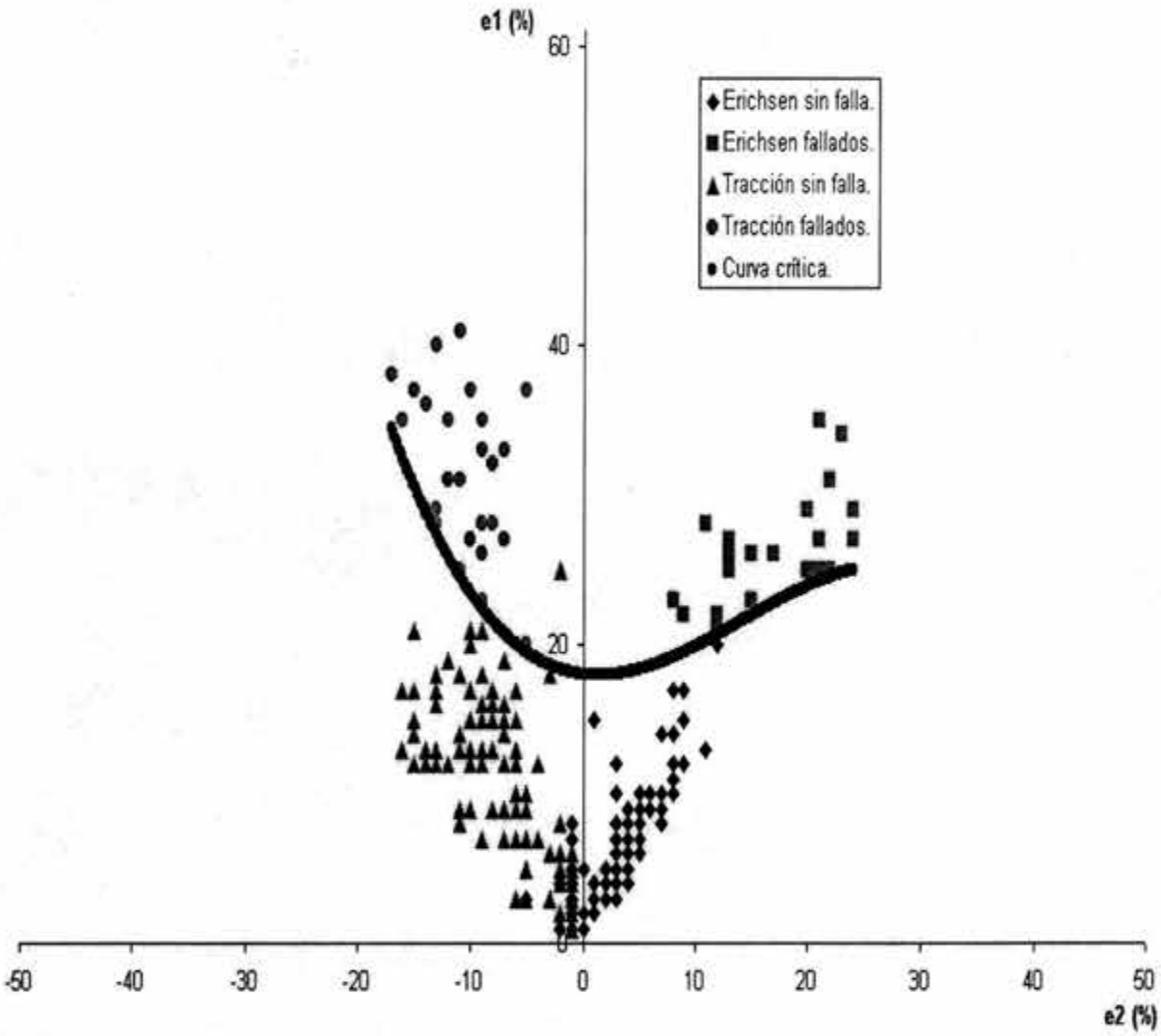


Tabla y Gráfica 5.102 Probeta aluminizada deformada a 350°C y su gráfica de conformabilidad límite

| Lámina aluminizada deformada en caliente a 350 grados celcius. | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Erichsen sin falla | | Erichsen sin falla | | Erichsen fallados | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción fallados | |
| e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 |
| -10 | 4 | 19 | 29 | 30 | 45 | -17 | 35 | -9 | 14 | -3 | 19 | -14 | 65 |
| -9 | 5 | 20 | 20 | 30 | 45 | -16 | 24 | -8 | 39 | -3 | 47 | -13 | 66 |
| -5 | 0 | 21 | 26 | 30 | 47 | -16 | 22 | -8 | 41 | -3 | 11 | -12 | 68 |
| -4 | 6 | 22 | 23 | 32 | 47 | -16 | 18 | -8 | 25 | -3 | 17 | -12 | 68 |
| -4 | 6 | 23 | 24 | 32 | 50 | -15 | 28 | -8 | 17 | -3 | 15 | -10 | 66 |
| -3 | 5 | 24 | 25 | 35 | 52 | -15 | 24 | -8 | 41 | -3 | 11 | -10 | 66 |
| -3 | 9 | 24 | 30 | 35 | 45 | -15 | 20 | -8 | 15 | -3 | 5 | -10 | 70 |
| -2 | 8 | 24 | 32 | 35 | 48 | -15 | 26 | -8 | 12 | -3 | 7 | -10 | 70 |
| -2 | 4 | 25 | 30 | 37 | 55 | -15 | 27 | -7 | 23 | -3 | 19 | -8 | 48 |
| -2 | 4 | 26 | 30 | 38 | 57 | -15 | 26 | -7 | 25 | -3 | 43 | -8 | 45 |
| 3 | 5 | 27 | 30 | 40 | 68 | -15 | 26 | -7 | 39 | -3 | 35 | -8 | 56 |
| 3 | 4 | 28 | 34 | 40 | 60 | -15 | 32 | -7 | 23 | -3 | 29 | -8 | 58 |
| 5 | 14 | 29 | 25 | 40 | 50 | -15 | 18 | -7 | 23 | -3 | 21 | -7 | 42 |
| 5 | 14 | 29 | 47 | 43 | 55 | -15 | 22 | -7 | 39 | -3 | 7 | -7 | 46 |
| 6 | 9 | 29 | 33 | 44 | 50 | -14 | 25 | -7 | 33 | -3 | 7 | -6 | 48 |
| 8 | 15 | 30 | 33 | 45 | 52 | -14 | 32 | -7 | 43 | -2 | 35 | -6 | 40 |
| 8 | 15 | 31 | 57 | 47 | 54 | -14 | 20 | -7 | 23 | -2 | 11 | -6 | 38 |
| 8 | 9 | 31 | 37 | | | -14 | 20 | -7 | 39 | -2 | 9 | -6 | 56 |
| 8 | 17 | 33 | 41 | | | -14 | 26 | -7 | 13 | -2 | 3 | -4 | 48 |
| 8 | 14 | 34 | 45 | | | -14 | 28 | -7 | 23 | -2 | 5 | -4 | 46 |
| 8 | 12 | 34 | 44 | | | -14 | 22 | -6 | 25 | -2 | 5 | -4 | 40 |
| 9 | 16 | 35 | 40 | | | -14 | 20 | -6 | 31 | -2 | 13 | | |
| 9 | 13 | 35 | 40 | | | -14 | 18 | -6 | 31 | -2 | 19 | | |
| 9 | 21 | 36 | 46 | | | -14 | 28 | -6 | 45 | -2 | 19 | | |
| 9 | 13 | 38 | 45 | | | -14 | 26 | -6 | 41 | -2 | 19 | | |
| 10 | 14 | | | | | -14 | 37 | -6 | 17 | -2 | 19 | | |
| 10 | 13 | | | | | -14 | 22 | -6 | 21 | 0 | 27 | | |
| 11 | 17 | | | | | -14 | 16 | -6 | 17 | 0 | 15 | | |
| 11 | 13 | | | | | -14 | 40 | -6 | 31 | 0 | 5 | | |
| 11 | 22 | | | | | -14 | 20 | -6 | 27 | 0 | 5 | | |
| 12 | 13 | | | | | -14 | 29 | -4 | 17 | 0 | 9 | | |
| 12 | 13 | | | | | -14 | 38 | -4 | 47 | 0 | 9 | | |
| 13 | 20 | | | | | -13 | 30 | -4 | 47 | | | | |
| 13 | 18 | | | | | -13 | 33 | -4 | 13 | | | | |
| 13 | 19 | | | | | -12 | 17 | -4 | 27 | | | | |
| 13 | 18 | | | | | -12 | 19 | -4 | 23 | | | | |
| 13 | 22 | | | | | -12 | 19 | -4 | 15 | | | | |
| 14 | 24 | | | | | -12 | 19 | -4 | 29 | | | | |
| 14 | 16 | | | | | -12 | 39 | -4 | 19 | | | | |
| 14 | 20 | | | | | -11 | 29 | -4 | 19 | | | | |
| 14 | 18 | | | | | -11 | 25 | -4 | 39 | | | | |
| 15 | 15 | | | | | -11 | 19 | -4 | 63 | | | | |
| 15 | 17 | | | | | -11 | 41 | -4 | 25 | | | | |
| 16 | 25 | | | | | -10 | 23 | -4 | 9 | | | | |
| 16 | 22 | | | | | -10 | 25 | -4 | 21 | | | | |
| 16 | 18 | | | | | -10 | 13 | -4 | 19 | | | | |
| 16 | 21 | | | | | -10 | 29 | -3 | 23 | | | | |
| 17 | 20 | | | | | -10 | 39 | -4 | 19 | | | | |
| 18 | 23 | | | | | -10 | 43 | -4 | 19 | | | | |
| 19 | 27 | | | | | -10 | 21 | -4 | 39 | | | | |

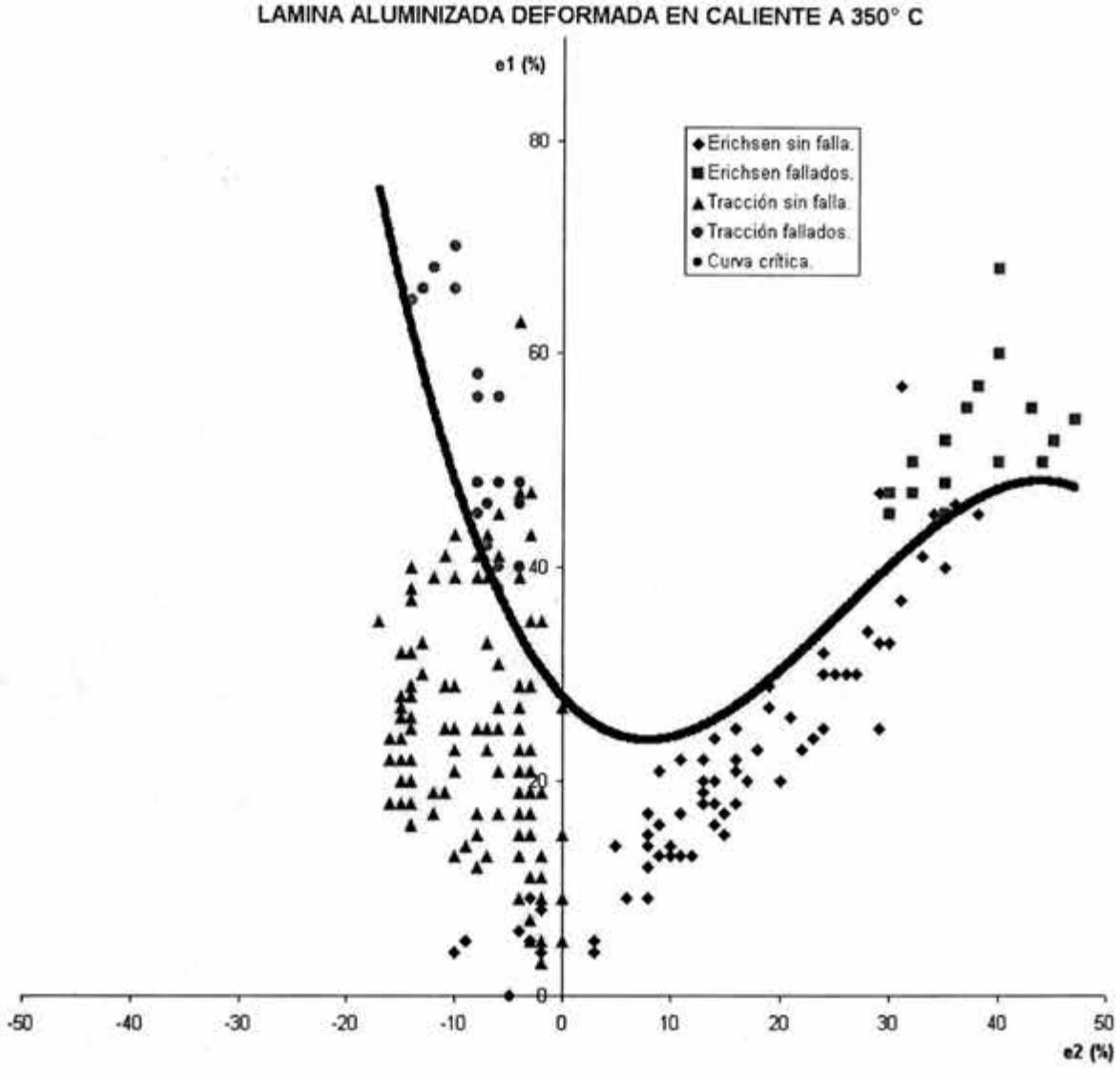

LAMINA ALUMINIZADA DEFORMADA EN CALIENTE A 350° C
e1 (%)
e2 (%)
Erichsen sin falla.
Erichsen fallados.
Tracción sin falla.
Tracción fallados.
Curva crítica.
80
60
40
20
0
-50
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50

Tabla y Gráfica 5.103 probeta zinalquizada deformada en frío y su gráfica de conformabilidad límite

| Lámina zinalquizada deformada en frío. | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Erichsen sin falla | | Erichsen sin falla | | Erichsen fallados | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción fallados | |
| e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 |
| -12 | 6 | 8 | 10 | 10 | 50 | -12 | 7 | -6 | 4 | -4 | 3 | -19 | 25 |
| -12 | 6 | 9 | 9 | 10 | 25 | -12 | 7 | -5 | 3 | -4 | 3 | -18 | 28 |
| -10 | 4 | 9 | 12 | 13 | 25 | -12 | 8 | -5 | 5 | -4 | 3 | -18 | 23 |
| -9 | 5 | 10 | 9 | 15 | 35 | -11 | 7 | -5 | 7 | -4 | 3 | -17 | 31 |
| -9 | 5 | 10 | 20 | 15 | 25 | -10 | 7 | -5 | 6 | -4 | 4 | -17 | 21 |
| -8 | 8 | 10 | 8 | 15 | 31 | -10 | 7 | -5 | 7 | -3 | 2 | -17 | 28 |
| -7 | 6 | 10 | 20 | 17 | 30 | -10 | 6 | -5 | 7 | -3 | 2 | -15 | 21 |
| -7 | 10 | 10 | 15 | 19 | 32 | -10 | 7 | -5 | 7 | -3 | 1 | -15 | 30 |
| -7 | 4 | 10 | 15 | 19 | 27 | -10 | 7 | -5 | 7 | -3 | 2 | -15 | 30 |
| -7 | 5 | 10 | 10 | 19 | 28 | -10 | 7 | -5 | 7 | -3 | 2 | -15 | 27 |
| -6 | 6 | 10 | 12 | 20 | 40 | -10 | 7 | -5 | 6 | -3 | 2 | -14 | 24 |
| -6 | 8 | 10 | 20 | 22 | 28 | -10 | 7 | -5 | 6 | -3 | 2 | -14 | 23 |
| -5 | 5 | 10 | 12 | 22 | 35 | -9 | 7 | -5 | 6 | -3 | 4 | -14 | 23 |
| -5 | 3 | 10 | 12 | 24 | 33 | -9 | 7 | -5 | 6 | -3 | 4 | -13 | 30 |
| -5 | 3 | 10 | 10 | | | -9 | 7 | -5 | 4 | -3 | 4 | -12 | 22 |
| -5 | 8 | 10 | 15 | | | -8 | 7 | -5 | 4 | -3 | 4 | -11 | 22 |
| -5 | 6 | 11 | 15 | | | -8 | 3 | -5 | 4 | -3 | 4 | -7 | 20 |
| -4 | 3 | 12 | 8 | | | -8 | 3 | -5 | 4 | -3 | 3 | -7 | 20 |
| -4 | 3 | 12 | 18 | | | -8 | 3 | -5 | 4 | -3 | 3 | -7 | 20 |
| -4 | 3 | 12 | 14 | | | -8 | 3 | -5 | 4 | -3 | 3 | -7 | 20 |
| -4 | 2 | 13 | 12 | | | -8 | 3 | -5 | 4 | -3 | 3 | | |
| -4 | 5 | 13 | 15 | | | -8 | 5 | -5 | 4 | -3 | 3 | | |
| -3 | 2 | 13 | 15 | | | -8 | 5 | -5 | 3 | -3 | 2 | | |
| -3 | 2 | 13 | 18 | | | -8 | 5 | -5 | 3 | -3 | 3 | | |
| -3 | 5 | 14 | 12 | | | -7 | 5 | -5 | 3 | -3 | 3 | | |
| -3 | 6 | 14 | 15 | | | -7 | 6 | -5 | 5 | -3 | 5 | | |
| -3 | 3 | 14 | 20 | | | -7 | 6 | -5 | 5 | -3 | 5 | | |
| -3 | 5 | 15 | 12 | | | -7 | 6 | -4 | 3 | -3 | 5 | | |
| -2 | 2 | 15 | 13 | | | -7 | 4 | -4 | 3 | -3 | 3 | | |
| -2 | 1 | 15 | 18 | | | -7 | 6 | -4 | 4 | -3 | 3 | | |
| -2 | 2 | 15 | 17 | | | -7 | 7 | -4 | 2 | -3 | 3 | | |
| 3 | 5 | 15 | 15 | | | -7 | 7 | -4 | 4 | -3 | 2 | | |
| 4 | 12 | 15 | 17 | | | -7 | 4 | -4 | 4 | -2 | 0 | | |
| 4 | 10 | 16 | 18 | | | -6 | 5 | -4 | 4 | -2 | 0 | | |
| 4 | 5 | 16 | 17 | | | -6 | 5 | -4 | 6 | -1 | 0 | | |
| 5 | 12 | 16 | 18 | | | -6 | 5 | -4 | 6 | -1 | 0 | | |
| 5 | 15 | 17 | 20 | | | -6 | 5 | -4 | 6 | -1 | 0 | | |
| 5 | 15 | 17 | 17 | | | -6 | 4 | -4 | 6 | 0 | 0 | | |
| 5 | 12 | 17 | 18 | | | -6 | 4 | -4 | 6 | | | | |
| 5 | 8 | 17 | 18 | | | -6 | 4 | -4 | 6 | | | | |
| 5 | 9 | 17 | 17 | | | -6 | 4 | -4 | 6 | | | | |
| 5 | 5 | 18 | 20 | | | -6 | 4 | -4 | 6 | | | | |
| 6 | 13 | 18 | 20 | | | -6 | 5 | -4 | 6 | | | | |
| 6 | 10 | 20 | 22 | | | -6 | 7 | -4 | 5 | | | | |
| 6 | 12 | 20 | 30 | | | -6 | 7 | -4 | 5 | | | | |
| 6 | 7 | 22 | 25 | | | -6 | 7 | -4 | 7 | | | | |
| 7 | 11 | 25 | 25 | | | -6 | 7 | -4 | 7 | | | | |
| 7 | 15 | 25 | 30 | | | -6 | 7 | -4 | 7 | | | | |
| 7 | 22 | 28 | 35 | | | -6 | 7 | -4 | 7 | | | | |
| 7 | 10 | 30 | 32 | | | -6 | 7 | -4 | 4 | | | | |
| 8 | 12 | 30 | 30 | | | -6 | 7 | -4 | 5 | | | | |
| 8 | 14 | 35 | 37 | | | -6 | 7 | -4 | 5 | | | | |
| 8 | 16 | 35 | 37 | | | -6 | 6 | -4 | 6 | | | | |
| 8 | 10 | 36 | 37 | | | -6 | 7 | -4 | 6 | | | | |
| 8 | 8 | 38 | 40 | | | -6 | 6 | -4 | 6 | | | | |
| 8 | 13 | 39 | 40 | | | -6 | 6 | -4 | 6 | | | | |

LAMINA ZINALQUIZADA DEFORMADA EN FRIO

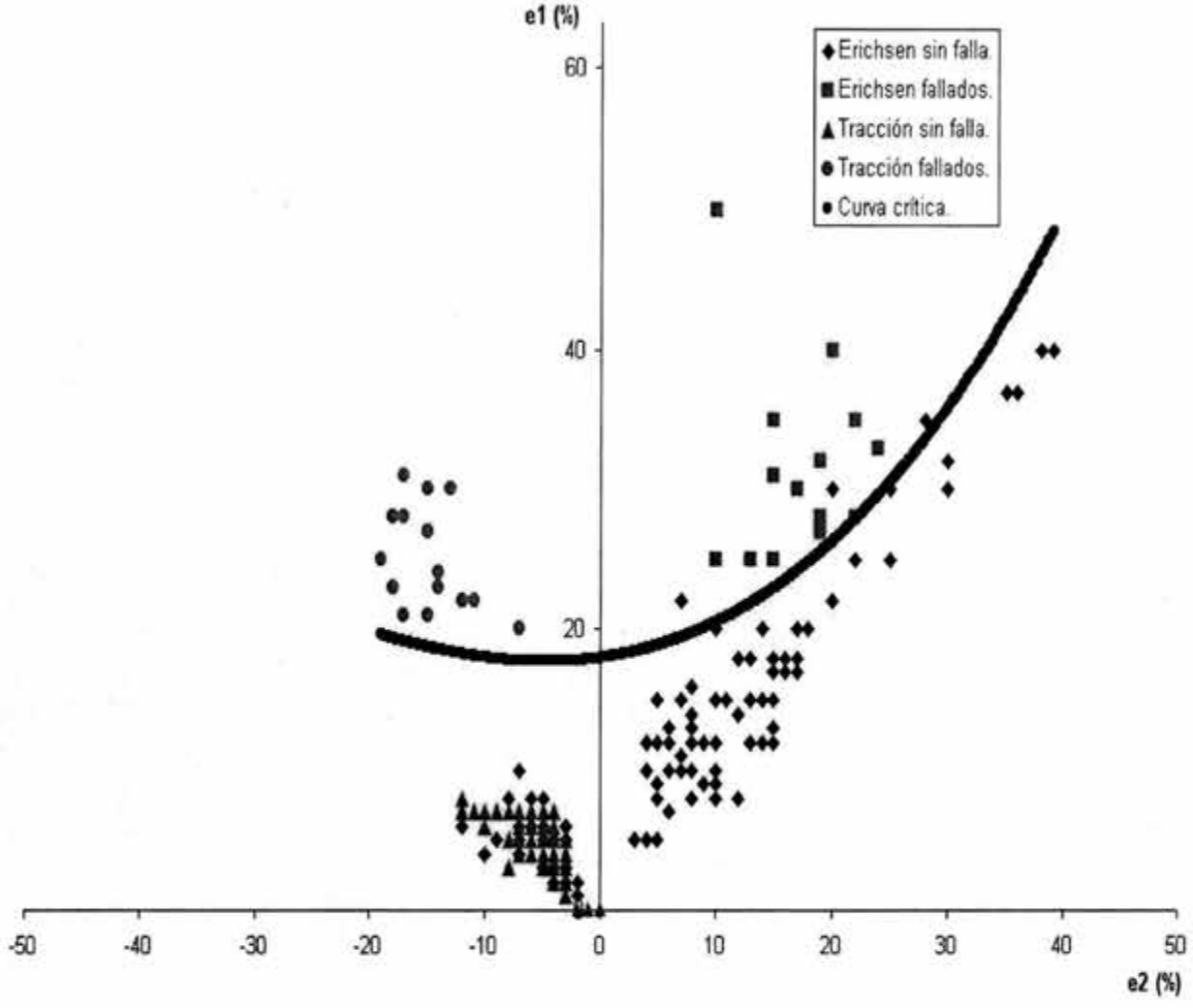


Tabla y Gráfica 5.104 probeta zinalquizada deformada a 250°C y su gráfica de conformabilidad límite

| Lámina zinalquizada deformada en caliente a 250 grados celcius. | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Erichsen sin falla | | Erichsen sin falla | | Erichsen fallados | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción fallados | |
| e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 |
| -6 | 6 | 12 | 17 | 6 | 23 | -12 | 16 | -7 | 14 | -14 | 17 |
| -6 | 4 | 12 | 15 | 6 | 29 | -12 | 13 | -7 | 5 | -14 | 12 |
| -6 | 3 | 12 | 12 | 6 | 17 | -12 | 10 | -7 | 13 | -13 | 15 |
| -6 | 3 | 12 | 15 | 7 | 24 | -12 | 15 | -7 | 9 | -13 | 21 |
| -5 | 5 | 12 | 20 | 7 | 20 | -12 | 12 | -6 | 9 | -12 | 12 |
| -5 | 2 | 12 | 14 | 8 | 17 | -12 | 12 | -6 | 12 | -12 | 17 |
| -3 | 5 | 13 | 17 | 8 | 21 | -11 | 13 | -6 | 7 | -12 | 16 |
| -3 | 7 | 13 | 18 | 8 | 30 | -11 | 14 | -6 | 3 | -12 | 15 |
| -3 | 3 | 14 | 14 | 13 | 21 | -11 | 17 | -5 | 3 | -12 | 13 |
| -2 | 4 | 14 | 19 | 13 | 21 | -11 | 10 | -5 | 7 | -11 | 16 |
| -2 | 4 | 14 | 21 | 13 | 23 | -11 | 10 | -5 | 9 | -9 | 14 |
| -2 | 6 | 15 | 15 | 15 | 21 | -10 | 10 | -5 | 6 | -8 | 18 |
| 2 | 4 | 15 | 21 | 15 | 20 | -10 | 9 | -5 | 12 | -8 | 18 |
| 2 | 7 | 15 | 20 | 15 | 23 | -10 | 12 | -5 | 18 | -8 | 21 |
| 2 | 7 | 15 | 15 | 17 | 27 | -10 | 14 | -4 | 8 | -7 | 19 |
| 2 | 9 | 15 | 17 | 17 | 26 | -10 | 12 | -4 | 6 | -7 | 14 |
| 5 | 17 | 15 | 27 | 17 | 21 | -10 | 6 | -4 | 2 | -4 | 15 |
| 5 | 19 | 15 | 19 | 19 | 26 | -10 | 5 | -4 | 4 | -4 | 16 |
| 5 | 13 | 16 | 19 | 19 | 25 | -10 | 9 | -4 | 4 | -3 | 18 |
| 5 | 7 | 16 | 20 | 19 | 27 | -9 | 9 | -4 | 7 | -3 | 15 |
| 5 | 5 | 16 | 25 | 19 | 30 | -9 | 8 | -4 | 10 | -3 | 20 |
| 5 | 5 | 16 | 23 | 20 | 26 | -9 | 12 | -4 | 4 | | |
| 7 | 7 | 16 | 18 | 20 | 33 | -9 | 13 | -3 | 7 | | |
| 7 | 15 | 16 | 19 | 20 | 25 | -9 | 7 | -3 | 9 | | |
| 7 | 21 | 16 | 17 | 20 | 28 | -9 | 6 | -3 | 8 | | |
| 7 | 13 | 17 | 19 | | | -9 | 6 | -3 | 8 | | |
| 7 | 14 | 17 | 23 | | | -9 | 7 | -2 | 6 | | |
| 7 | 9 | 17 | 17 | | | -9 | 4 | -2 | 12 | | |
| 8 | 9 | 17 | 22 | | | -9 | 2 | -2 | 8 | | |
| 8 | 10 | 18 | 18 | | | -9 | 5 | -2 | 7 | | |
| 8 | 14 | 18 | 20 | | | -8 | 5 | -2 | 3 | | |
| 8 | 17 | 18 | 18 | | | -8 | 9 | -2 | 3 | | |
| 9 | 17 | 19 | 21 | | | -8 | 12 | | | | |
| 9 | 21 | 19 | 19 | | | -8 | 10 | | | | |
| 9 | 13 | 19 | 20 | | | -8 | 9 | | | | |
| 9 | 16 | 20 | 23 | | | -8 | 7 | | | | |
| 9 | 12 | 20 | 21 | | | -7 | 7 | | | | |
| 9 | 15 | 20 | 21 | | | -7 | 12 | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

LAMINA ZINALQUIZADA DEFORMADA EN CALIENTE A 250° C

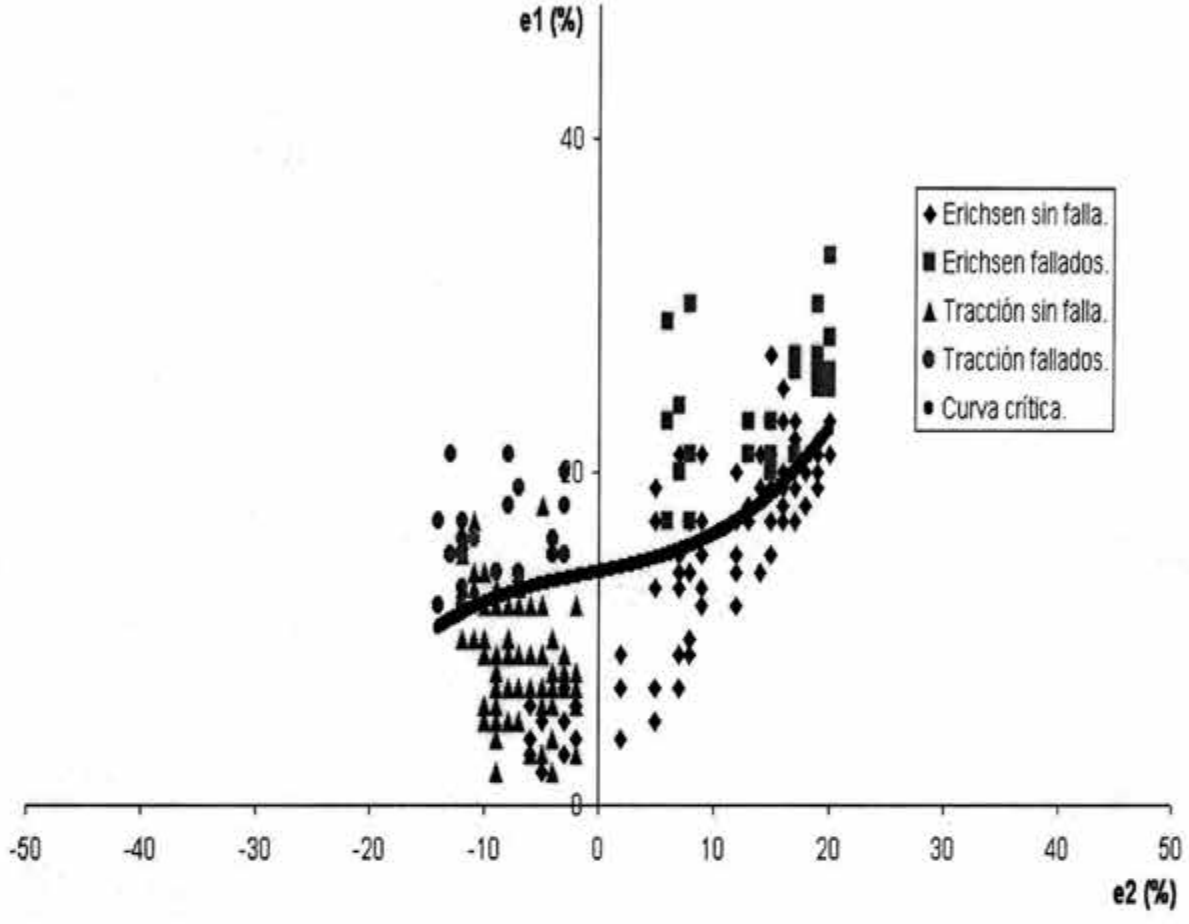


Tabla y Gráfica 5.105 Probeta zinalquizada deformada a 350°C y su gráfica de conformabilidad límite

| Lámina zinalquizada deformada en caliente a 350 grados celcius. | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Erichsen sin falla | | Erichsen sin falla | | Erichsen fallados | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción sin falla | | Tracción fallados | |
| e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 | e2 | e1 |
| -4 | 10 | 15 | 25 | 24 | 46 | -20 | 34 | -13 | 20 | -7 | 6 | -20 | 46 |
| -2 | 11 | 16 | 19 | 28 | 44 | -20 | 35 | -12 | 29 | -7 | 9 | -19 | 40 |
| -2 | 6 | 18 | 19 | 28 | 40 | -20 | 30 | -12 | 12 | -7 | 14 | -19 | 47 |
| -2 | 7 | 19 | 34 | 30 | 47 | -20 | 28 | -12 | 17 | -7 | 10 | -19 | 38 |
| -2 | 6 | 19 | 16 | 32 | 45 | -20 | 37 | -12 | 18 | -7 | 7 | -18 | 40 |
| -2 | 9 | 19 | 21 | 32 | 47 | -20 | 36 | -12 | 22 | -7 | 6 | -17 | 43 |
| -2 | 5 | 19 | 25 | 33 | 41 | -19 | 30 | -12 | 24 | -7 | 12 | -17 | 47 |
| -1 | 5 | 19 | 20 | 34 | 54 | -19 | 32 | -12 | 20 | -7 | 10 | -17 | 39 |
| 1 | 4 | 19 | 25 | 34 | 48 | -19 | 34 | -12 | 18 | -7 | 23 | -13 | 43 |
| 3 | 6 | 20 | 25 | 35 | 42 | -19 | 30 | -12 | 17 | -7 | 18 | -12 | 33 |
| 5 | 10 | 22 | 29 | 35 | 47 | -18 | 28 | -11 | 11 | -7 | 14 | -11 | 50 |
| 5 | 11 | 22 | 24 | 36 | 48 | -18 | 37 | -11 | 18 | -6 | 11 | -10 | 45 |
| 8 | 16 | 23 | 28 | 36 | 50 | -18 | 30 | -11 | 19 | -6 | 9 | -10 | 38 |
| 8 | 30 | 23 | 29 | 38 | 47 | -18 | 32 | -10 | 22 | -6 | 6 | -8 | 44 |
| 8 | 30 | 24 | 30 | | | -17 | 34 | -10 | 20 | -6 | 4 | -7 | 37 |
| 9 | 19 | 24 | 31 | | | -17 | 27 | -10 | 15 | -6 | 5 | -7 | 47 |
| 9 | 28 | 25 | 35 | | | -17 | 29 | -10 | 14 | -6 | 7 | -6 | 35 |
| 9 | 16 | 25 | 30 | | | -17 | 32 | -10 | 12 | -6 | 9 | | |
| 9 | 15 | 25 | 28 | | | -16 | 30 | -10 | 19 | -6 | 8 | | |
| 10 | 13 | 27 | 32 | | | -16 | 32 | -10 | 23 | -6 | 12 | | |
| 10 | 20 | 28 | 30 | | | -16 | 34 | -10 | 18 | -6 | 6 | | |
| 10 | 28 | 28 | 30 | | | -16 | 28 | -10 | 14 | -6 | 9 | | |
| 10 | 15 | 28 | 34 | | | -15 | 25 | -9 | 9 | -6 | 14 | | |
| 13 | 15 | 28 | 35 | | | -15 | 29 | -9 | 7 | -6 | 12 | | |
| 13 | 24 | 32 | 36 | | | -15 | 30 | -9 | 12 | -6 | 10 | | |
| 13 | 26 | 32 | 38 | | | -15 | 27 | -9 | 16 | -5 | 9 | | |
| 13 | 25 | 32 | 36 | | | -15 | 22 | -9 | 20 | -5 | 7 | | |
| 13 | 15 | 32 | 35 | | | -15 | 26 | -9 | 22 | -5 | 8 | | |
| 13 | 25 | 33 | 35 | | | -14 | 28 | -9 | 12 | -5 | 4 | | |
| 14 | 20 | 33 | 35 | | | -14 | 26 | -9 | 10 | -5 | 9 | | |
| 14 | 34 | 34 | 34 | | | -14 | 30 | -9 | 8 | -5 | 3 | | |
| 15 | 20 | 34 | 40 | | | -14 | 18 | -9 | 7 | -5 | 4 | | |
| 15 | 28 | 34 | 40 | | | -14 | 24 | -9 | 25 | -5 | 2 | | |
| 15 | 25 | 35 | 35 | | | -14 | 28 | -9 | 20 | -5 | 10 | | |
| 15 | 34 | 37 | 40 | | | -14 | 31 | -8 | 14 | -5 | 17 | | |
| 15 | 28 | 37 | 42 | | | -14 | 27 | -8 | 9 | -5 | 14 | | |
| 15 | 31 | 38 | 48 | | | -13 | 26 | -8 | 8 | -5 | 13 | | |
| 15 | 25 | 38 | 38 | | | -13 | 24 | -8 | 12 | -5 | 12 | | |
| | | | | | | -13 | 20 | -8 | 17 | -4 | 2 | | |
| | | | | | | -12 | 29 | -8 | 9 | -4 | 7 | | |
| | | | | | | -12 | 12 | -8 | 8 | -4 | 5 | | |
| | | | | | | -12 | 17 | -8 | 20 | -4 | 2 | | |
| | | | | | | -12 | 18 | -8 | 12 | -4 | 1 | | |
| | | | | | | -12 | 22 | -8 | 16 | -4 | 9 | | |
| | | | | | | -12 | 24 | -8 | 20 | -4 | 15 | | |
| | | | | | | -12 | 20 | -8 | 22 | -4 | 18 | | |
| | | | | | | -12 | 18 | -8 | 14 | -4 | 12 | | |
| | | | | | | -12 | 17 | -7 | 9 | -3 | 7 | | |
| | | | | | | -11 | 11 | -7 | 13 | -3 | 3 | | |
| | | | | | | -11 | 18 | -7 | 5 | -3 | 6 | | |

LAMINA ZINALQUIZADA DEFORMADA EN CALIENTE A 350°C