

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Recubrimientos Base Zinc Para Control De Corrosión En Aceros

Jhoan Sebastian Umaña Caballero

Trabajo de Grado para Optar por al Título de
Ingeniero Metalúrgico

Director

Sandra Judith García Vergara

PhD Corrosion Science and Engineering

Co-Directora

María De Los Ángeles Arenas Vara

Doctora en Ciencias Físicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado primeramente a Dios y a todos aquellos que han sido faros en mi travesía académica, guiándome con su sabiduría y apoyo inquebrantable.

A mi madre, cuyo amor incondicional y sacrificio ha sido la fuerza motriz detrás de cada paso que he dado, a mi Abuela que me observa desde el cielo sigo intentando cumplir con tus palabras, a mi querido hermano gracias por tu apoyo. Vuestra confianza en mí me ha dado la fortaleza para perseguir mis sueños y alcanzar este hito.

A mis profesores y mentores, quienes no solo compartieron su conocimiento conmigo, sino que también me inspiraron a desafiarme a mí mismo y a alcanzar nuevos horizontes. Vuestra orientación y estímulo han sido invaluable para mi desarrollo académico y personal.

A mis amigos Daniela, Coley, Carolina, Gonzalo y Laudy, y seres queridos Jenny, Alejandra, Mafe y Gustavo, quienes han sido mi roca en los momentos de duda y mi fuente de alegría en los momentos de celebración. De manera especial a mi Primo Gerardo que nos impulsó emocional y económicamente para alcanzar una formación profesional que sin su ayuda no habría sido posible, gracias por tu ejemplo y generosidad.

A mis compañeros de clase José, Juan y Diego, con quienes compartí risas, desafíos y momentos de descubrimiento. Nuestro trabajo en equipo y camaradería han enriquecido mi experiencia educativa de manera inigualable. A todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a este proyecto, ya sea brindando su apoyo emocional, intelectual o logístico, les estoy profundamente agradecido. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro es tanto suyo como mío, por su paciencia y amor incondicional les estoy agradecido.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Agradecimientos

Con gran emoción y profunda gratitud, me dirijo a ustedes para expresar mi más sincero agradecimiento por todo el apoyo, orientación y aliento brindado durante el desarrollo de mi proyecto de grado.

Profesores de Escuela agradezco por el valioso aprendizaje y crecimiento personal que me brindaron. Desde el inicio de este viaje académico, ustedes estuvieron ahí, ofreciendo su sabiduría, experiencia y motivación constante, lo cual fue fundamental para alcanzar este hito.

Agradezco especialmente a Copromat por el material brindado para este proyecto, la UIS por las instalaciones y materiales de laboratorios, al GIC que me instruyo y me brindo conocimientos respecto a temas de corrosión, a mis directoras de proyecto Sandra García y María Arenas por el tiempo brindado en las correcciones. Cada una de sus intervenciones contribuyó significativamente a la calidad y solidez de mi trabajo.

Asimismo, quiero expresar mi gratitud a mi familia y seres queridos por su inquebrantable respaldo y comprensión a lo largo de este proceso. Su apoyo incondicional fue mi mayor fortaleza en los momentos más desafiantes.

Hoy, al culminar esta etapa, reflexiono con gratitud sobre el camino recorrido y el conocimiento adquirido. Este proyecto no solo representa un logro académico, sino también el inicio de nuevos horizontes y oportunidades que estoy emocionado por explorar. Una vez más, gracias por creer en mí, por inspirarme y por acompañarme en este viaje hacia la realización de mis metas y sueños. Espero poder seguir contando con su guía y mentoría en el futuro.

Con profundo agradecimiento Jhoan Sebastian Umaña Caballero.

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 <i>Objetivo general</i>	12
1.2 <i>Objetivos específicos</i>	12
2. Fundamentación teórica	13
3. Metodología Experimental	18
3.1 <i>Diagrama de flujo experimental</i>	18
3.2 <i>Material</i>	18
3.3 <i>Preparación metalográfica</i>	19
3.4 <i>Caracterización física de los recubrimientos mediante microscopía óptica</i>	20
3.4.1 <i>Medición de espesor del recubrimiento</i>	20
3.5 <i>Evaluación de la resistencia a la corrosión por pérdida de masa</i>	20
3.5.1 <i>Ensayo de inmersión en una solución de sintética de agua de mar</i>	20
4. Resultados y discusión	24
4.1 <i>Morfología y espesor de los recubrimientos</i>	24
4.2 <i>Determinación de la velocidad de corrosión</i>	28
4.2.1 <i>Efectos de magnesio y aluminio en las capas de galvanizado</i>	31
5. Conclusiones	33
Referencias bibliográficas	34

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Lista De Tablas

Tabla 1. Muestras y nomenclatura usada	19
Tabla 2. Reactivos para la preparación de mar sintético.....	21
Tabla 3. Constantes para varias unidades de velocidad de corrosión.	23
Tabla 4. Medida del espesor para el recubrimiento para las muestras A, B, C, D, E y F. Se midió el espesor en con especímenes de cada muestra.	28
Tabla 5. Valores de pérdida de masa y área superficial de cada una de las muestras estudiadas.	29
Tabla 6. Valores de la velocidad de corrosión calculada por medio de la norma ASTM G31 de las muestras estudiadas, luego de su inmersión en solución sintética de agua de mar por 40 días.	30

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de un recubrimiento	14
Figura 2. Etapas de un proceso corrosivo.....	17
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso experimental.....	18
Figura 4. Muestras del ensayo de Inmersión.	22
Figura 5. Diagrama equilibrio de fases Zn-Mg.....	24
Figura 6. Micrografías ópticas de las muestras de acero galvanizado. a) y b) muestra A, c) y d) muestra B, e) y f) muestra C, g) y h) muestra D, i)y, j) muestra E y k) y l) muestra F.	25

Glosario

Corrosión blanca: es una sustancia de color blanco que se forma sobre los aceros galvanizados, se produce por condiciones de almacenamiento inadecuadas produciendo óxido de zinc. (Inelca, 2020)

Dendrita: es una estructura en forma de árbol que se forma durante la etapa de enfriamiento de metales fundidos. Suelen producirse por el enfriamiento rápido de los metales.

HDG: son las siglas del inglés Hot Dip Galvanized, se refiere al proceso de galvanización por inmersión en caliente.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Resumen

Título: Recubrimientos Base Zinc Para Control De Corrosión En Aceros*

Autor: Jhoan Sebastian Umaña Caballero**

Palabras Clave: Aceros, Corrosión, Recubrimiento, Zinc.

En este trabajo de investigación se evaluará la resistencia a la corrosión de recubrimientos producidos por galvanizado en caliente sobre acero al carbono mediante ensayos metalográficos y ensayos de pérdida de masa para establecer la velocidad de corrosión de cada una de las muestras. El acero galvanizado es útil para la construcción de estructuras expuestas a ambientes agresivos, ya que la corrosión es un problema permanente que requiere investigación continua en el desarrollo de sistemas de protección eficientes que minimizar los daños. La selección del método de protección depende del entorno en el cual las estructuras metálicas estarán expuestas y de las propiedades mecánicas requeridas. El galvanizado no es el único método utilizado para protección contra la corrosión del acero sin embargo es de los más utilizados industrialmente debido a la protección que ofrece una capa galvanizada superando los 25 años en la mayoría de las atmosferas, excepto las más ácidas donde su vida útil se ve reducida. Los recubrimientos de aleación de zinc con magnesio y aluminio se comercializan desde finales de los años noventa.

A pesar de la importancia tecnológica del acero galvanizado en caliente, existen muchos menos datos sobre el comportamiento y efecto protector de los recubrimientos de aleaciones de zinc desarrollados por galvanizado en caliente debido a los cambios atmosféricos actuales, se resaltan los compromisos actuales en su estudio.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director Sandra Judith García Vergara. Codirector María de los Ángeles Arenas Vara

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Abstract

Title: Zinc-Based coatings for corrosion control in Steel*

Author: Jhoan Sebastian Umaña Caballero**

Keywords: Coating, Corrosion, Steel, Zinc.

In this research work, the corrosion resistance of coatings produced by hot-dip galvanizing on carbon steel will be evaluated by means of metallographic tests and mass loss tests to establish the corrosion rate of each of the samples. Galvanized steel is useful for the construction of structures exposed to aggressive environments, since corrosion is a permanent problem that requires continuous research in the development of efficient protection systems that minimize damage. The selection of the protection method depends on the environment in which the metal structures will be exposed and the required mechanical properties. Galvanizing is not the only method used for corrosion protection of steel, however it is one of the most widely used industrially due to the protection offered by a galvanized coating exceeding 25 years in most atmospheres, except the most acidic ones where its lifetime is reduced. Zinc alloy coatings with magnesium and aluminum have been commercialized since the late 1990s.

Despite the technological importance of hot-dip galvanized steel, there is much less data on the behavior and protective effect of zinc alloy coatings developed by hot-dip galvanizing due to current atmospheric changes, current commitments in their study are highlighted.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director Sandra Judith García Vergara. Codirector María de los Ángeles Arenas Vara

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Introducción

El acero galvanizado es normalmente utilizado para la construcción de estructuras que van a estar expuestas a ambientes agresivos, dada su alta resistencia a la corrosión atmosférica. La agresividad de ambiente está asociada a cambios climáticos o de composición atmosférica, principalmente asociados con la industrialización. Lo anterior ocasiona que la vida útil de las estructuras de acero disminuya, con el consecuente incremento de los costos de mantenimiento. El costo global de la corrosión se estima en US \$2.5 billones anuales, esto equivale al 3.4% PIB mundial (NACE, 2016). Teniendo en cuenta lo anterior, el control de la corrosión de las estructuras metálicas es un problema permanente que requiere de investigación continua en el desarrollo de sistemas de protección eficientes que minimicen los daños.

El galvanizado no es el único método empleado para la protección contra la corrosión del acero, también están el cromado, la aplicación de pinturas tanto epoxicas como resinas y la protección catódica. La selección del método de protección dependerá en gran medida del entorno en el cual las estructuras metálicas vayan a ser instaladas y de las prestaciones mecánicas requeridas. El galvanizado consiste en la inmersión de piezas de acero en zinc fundido puede ser en caliente, por inmersión o al fuego. El proceso se realiza a una temperatura aproximada de 450°C hasta lograr un recubrimiento de 7-42 micras (recubrimiento bajo, regulado por la norma UNE EN ISO 10346) o de 45-200 micras (de alta duración, regulado por la norma UNE EN ISO 1461). La protección del zinc es doble: actúa como barrera física frente a los agentes agresivos y como ánodo de sacrificio debido a su potencial menos noble que el del acero. La protección que ofrece una capa galvanizada supera los 25 años en la mayoría de las atmósferas, excepto las más ácidas. Pero además el galvanizado confiere resistencia a la abrasión y a los golpes.

Los recubrimientos producidos por galvanizado en caliente contienen una pequeña cantidad de Al para suprimir la formación de las fases Zn-Fe durante la galvanización. Se han

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

desarrollado recubrimientos de zinc con aluminio para mejorar aún más la resistencia a la corrosión. Los recubrimientos de aleación de zinc con magnesio y aluminio se comercializan desde finales de los años noventa. Los primeros recubrimientos desarrollados, como Zn-11Al-3Mg-0,2Si (Super Dyma) y Zn-6Al-3Mg (ZAM), eran relativamente gruesos y se utilizaban principalmente en condiciones corrosivas agresivas y en la construcción de edificios (T. Tsujimura et al., Galvatech 2001). Sin embargo, recientemente se ha introducido en el mercado el ZnAlMg continuo por inmersión en caliente. Estos recubrimientos presentan mejores propiedades en comparación con el acero galvanizado por inmersión en caliente y el acero en niebla salina y corrosión cíclica (S. Schurz et al., 2009).

A pesar de la gran importancia tecnológica del acero galvanizado en caliente la mayoría de las investigaciones sobre corrosión atmosférica se han realizado sobre recubrimientos de zinc metálico, existen muchos menos datos sobre el efecto protector de los recubrimientos de aleaciones de zinc desarrollados por galvanizado en caliente. En el presente trabajo de investigación se evaluará la resistencia a la corrosión de recubrimientos producidos por galvanizado en caliente sobre acero al carbono. Se estudiarán muestras cuyos recubrimientos están compuestos solo por zinc y muestras que contienen recubrimientos de aleaciones zinc-magnesio-aluminio. Se realizaron ensayos de inmersión en una solución que simula el agua de mar sintético. Los resultados muestran que la presencia de magnesio en los recubrimientos mejora la resistencia a la corrosión de los recubrimientos.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la resistencia a la corrosión de recubrimientos base zinc con adiciones de magnesio sobre acero al carbono en un ambiente agresivo mediante técnicas de pérdida de masa.

1.2 Objetivos específicos

1. Identificar y caracterizar metalográficamente los productos de corrosión de aleaciones base zinc con adiciones de magnesio en medios altamente corrosivos.

2. Establecer el efecto del espesor del recubrimiento galvánico en la resistencia a la corrosión.

3. Evaluar el efecto de magnesio sobre la microestructura de la capa galvanizada.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

2. Fundamentación teórica

El acero al carbono, más conocido comercialmente como acero de construcción, es el material metálico más utilizado para construir estructuras que operan a la intemperie por su bajo costo y su notable resistencia mecánica. Estos aceros contienen un 1% de elementos aleantes (silicio y manganeso) e impurezas. Las estructuras de acero que operan a la intemperie o en zonas costeras, experimentan deterioro principalmente por corrosión atmosférica (Morcillo Linares & Morcillo Linares, 2018, p. 28).

La *Corrosión* es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas (Koch et al. (n.d.)). La corrosión tiene muchas repercusiones a nivel económico, de seguridad y de conservación de materiales, por lo que su estudio y mitigación es de suma importancia. Actualmente se ha investigado y desarrollado diferentes tipos de métodos para el control de este fenómeno, que en general involucran: Diseño de materiales o componentes, Selección de materiales, Inhibidores, Recubrimientos y Protección catódica.

Los recubrimientos permiten separar el metal del medio, evitando el contacto directo con agentes corrosivos (Figura 1). Existen distintos tipos de recubrimientos para el control de la corrosión que se pueden clasificar como orgánicos, metálicos y no metálicos. Los recubrimientos proporcionan protección contra la corrosión mediante uno o una combinación de tres mecanismos principales: proporcionando una barrera física (recubrimientos de barrera); pasivando la superficie metálica (recubrimientos inhibidores); o proporcionando protección galvánica de sacrificio (recubrimientos de sacrificio) (Kurth et al., 2019, p. 6). El galvanizado es un tipo de recubrimiento metálico en el cual el material por proteger se sumerge en un baño del metal de recubrimiento, el cual tienen un mayor potencial electroquímico. En el caso del acero el tipo de baño más usado es

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

de zinc fundido. Los recubrimientos galvanizados se pueden obtener por procesos en continuo o discontinuo, y técnicas de aplicación como inmersión, electrodeposición o fijación de polvos.

Figura 1

Diagrama de un recubrimiento



La morfología y características de formación del recubrimiento van a depender de la temperatura del baño, la composición del acero y del baño de zinc. Así mismo, es importante realizar una adecuada limpieza superficial del acero previo al galvanizado. La norma UNE EN ISO 14713:1999 establece una guía para la selección de recubrimientos de zinc para la protección de la corrosión en estructuras de acero para periodos superiores a 20 años sin realizar mantenimiento.

El origen del buen comportamiento de los aceros galvanizados en la protección de la corrosión se debe al efecto barrera que proporciona el zinc. En el momento en el que se diluye el zinc se forma una capa protectora sobre el sustrato cuya estabilidad depende de manera directa de las características del medio corrosivo. Primero, la formación de esta capa protectora se ve impedida en rangos de pH comprendido entre 5.5 y 12.5 ocasionando ataques severos sobre el recubrimiento. Segundo, la temperatura es un factor importante que considerar, al estar aproximadamente a 40°C la velocidad de corrosión aumenta. (Arenas, n.d.).

El galvanizado es uno de los procesos de control de corrosión más eficaces industrialmente. El principal problema de un recubrimiento galvanizado son los ambientes altamente corrosivos a los que se ven expuestos los aceros, como lo son las zonas industriales o marítimas. De ahí que actualmente existan un gran interés por optimizar el recubrimiento, y se haya encontrado que una

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

ruta en la combinación del zinc con otros elementos aleantes que mejoren su eficiencia en la protección, sin embargo, todavía la información es limitada. Por otro lado debido a la demanda relativamente alta de zinc y al constante aumento de su consumo por lo cual también aumenta la cantidad de elementos y estructuras que requieren de sistemas eficientes en la protección contra la corrosión, las reservas mundiales de zinc sólo podrán cubrir la demanda durante los próximos 17 años. Esto exige una gestión racional de los recursos de zinc disponibles y una investigación continua para el desarrollo de nuevas y más eficaces sistemas de protección obtenidas por un método igualmente económico, que es el galvanizado en caliente (Kania, 2023, p. 3).

Uno de los primeros aditivos usados para producir aceros galvanizados fue el aluminio, dada por su capacidad de disminuir la reactividad de los aceros procesados con o sin silicio, ya que este elemento disminuye el espesor del recubrimiento dejando zonas desnudas.(Arenas, n.d.). Los recubrimientos de aleación base zinc con aluminio y magnesio han estado disponibles desde finales de la década de 1990, se ha buscado la mejora de estos recubrimientos ya que algunos tienen altos espesores, lo cual incrementa el costo en su producción reservándose para aplicaciones altamente corrosivas.

Wang et al. (2018) estudiaron el comportamiento de recubrimientos de aleaciones Zn-Mg en una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se observó la formación de capas estables de óxido que ofrecen buena protección en comparación con recubrimientos que solo contenían zinc. Este comportamiento también se observó en recubrimientos de Zn-Al-Mg evaluados en zonas urbanas, rurales y marinas (Thierry et al. (2019)). El zinc por defecto tiene propiedades anticorrosivas eficientes, la adición de magnesio en bajas cantidades mejora la resistencia a la corrosión, por la formación de una capa exterior y una doble capa interior, esta última responsable de la mejora de la resistencia a la corrosión y depende del contenido de Mg (Lee et al., 2013).

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Además, la protección contra la corrosión que brindan los recubrimientos con aleaciones que contienen Mg son significativamente eficaces en comparación con los recubrimientos galvanizados en caliente evaluados en condiciones atmosféricas y entornos de corrosión acelerada. Los efectos de la corrosión en el sustrato pueden producir capas pasivas de óxido, termodinámicamente estables y esto beneficia en la resistencia a la corrosión, el problema es cuando estos óxidos son solubles y desgastan el sustrato de recubrimiento con el tiempo. Por este motivo se hace necesario el estudio de las propiedades y de comportamiento de los productos de corrosión. Las aleaciones Zn-Al presentan una morfología de varias fases, las zonas ricas en Zn sufren ataques de corrosión localizada, y puede verse acelerado por la presencia de agentes oxidantes. Se destaca la importancia del proceso de reducción de oxígeno siendo una reacción determinante en la velocidad de corrosión de los recubrimientos. Los recubrimientos obtenidos por galvanizado en caliente presentaron una reducción de oxígeno más elevada en comparación con las muestras de los aceros recubiertas con aleaciones ZnAlMg; por otra parte, el contenido de carbonatos presente en los productos de corrosión fue hasta dos veces mayor en los aceros recubiertos de ZnAlMg en comparación con HDG. (Stoulil et al., 2015)

Cuando el zinc se combina con el magnesio, se producen partículas de segunda fase α -Mg y $MgZn_2$ (Yao et al., 2014). La presencia de productos de corrosión como el $MgZn_2$, la formación de grano y la variación de su tamaño son factores que favorecen la resistencia a la corrosión de estos sistemas. Conociendo la importancia que tienen los productos insolubles de corrosión en la mejora de su resistencia y el papel de estos como inhibidores de corrosión con base zinc que se forman en el sustrato. Los esfuerzos actuales están en la implementación de recubrimientos de sacrificio que brinden resistencia y durabilidad frente a otros métodos de protección.

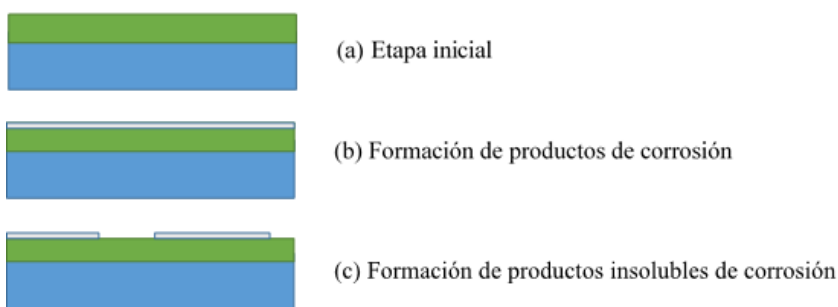
La protección de la corrosión puede darse tal como se muestra en la Figura 2 primeramente el sustrato del revestimiento estará expuesto a la intemperie (a) y se corroe directamente por esta

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

exposición. En esta etapa el ataque de la corrosión depende directamente de las propiedades protectoras de la barrera, si se producen compuestos de corrosión insolubles y estables han de incrementar su resistencia a la corrosión y la velocidad de corrosión disminuye (b). Si la barrera resultante es soluble creara zonas descubiertas y por estas zonas es más susceptible que la corrosión penetre gradualmente el revestimiento (c).

Figura 2

Etapas de un proceso corrosivo.



Otro aspecto importante que tienen los aceros galvanizados es el acabado superficial que puede tener el revestimiento, los brillantes de zinc que se forman superficialmente de los procesos en continuo son denominados flor, la flor minimizada o sin flor presenta un brillo menor representado por patrones de grano visible, cuando se tienen floreados regulares representan tamaño de grano menores a 1 mm aproximadamente, las aleaciones en las que se controla el floreado va desde la G90 e inferiores (Padilla, n.d.).

La función principal de este recubrimiento es proporcionar mayor durabilidad y resistencia a la corrosión, tener en cuenta que la estabilidad del recubrimiento viene acompañada de la inspección de cada uno de los elementos que están en funcionamiento a la intemperie.

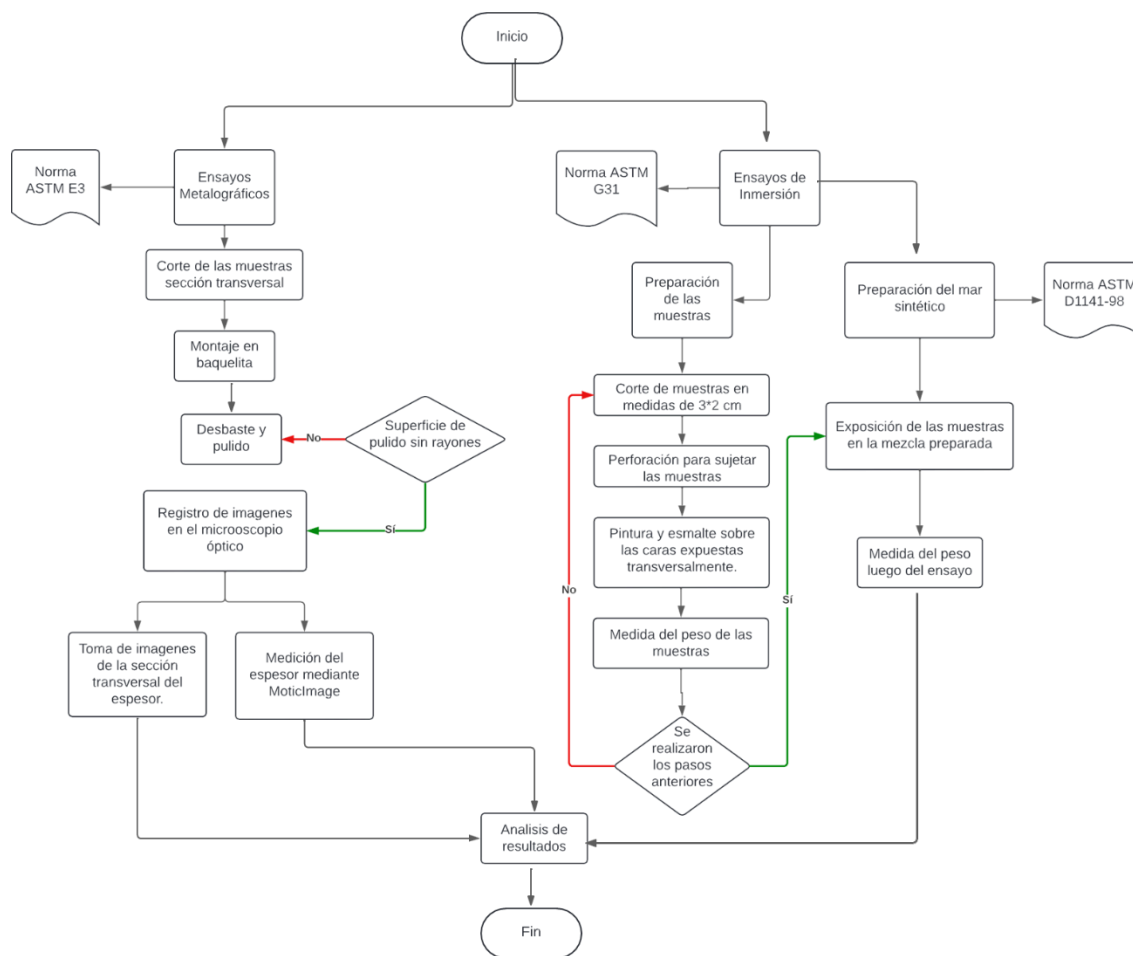
3. Metodología Experimental

3.1 Diagrama de flujo experimental

La metodología usada para el desarrollo del presente trabajo se puede observar en la Figura 3.

Figura 3

Diagrama de flujo del proceso experimental.



3.2 Material

Para el desarrollo del presente trabajo se usaron muestras de acero al carbono que fueron galvanizadas. La Tabla 1 presenta la descripción de las muestras usadas con la composición del recubrimiento depositado. Se asignó una nomenclatura para facilitar el registro de los resultados.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Las muestras fueron suministradas por una empresa fabricante de acero galvanizado, localizada en España.

Tabla 1

Muestras y nomenclatura usada

Nomenclatura	Descripción	Composición
A	ZMP4 – Zn-Mg Posco 430	Zn-3%Mg-2.5%Al
B	GC2 (Z275)	Zn
C	ZMR310-Arcelor 310	Zn-3%Mg-3.8%Al
D	GC4 (Z450)	Zn
E	Posco 310	Zn-3%Mg-2.5%Al
F	GD4-Galvanizado DIS4	No suministrada

Nota: Los datos de composición fueron brindados por la empresa. La composición de recubrimiento de la muestra F no fue suministrada.

3.3 Preparación metalográfica

El corte y la preparación metalográfica de las muestras de acero galvanizado, se realizó bajo las especificaciones de la norma ASTM E3. El corte se realizó con un disco de carburo de silicio. Se obtuvieron cortes de la sección transversal de las muestras, y para facilitar el análisis metalográfico se montaron en baquelita. La preparación superficial de las muestras se realizó con lijas de desbaste #80, #120, #200, #400, #600, #1200 y #1500, posteriormente se realizó un pulido con paños de disco para obtener la superficie tipo espejo usando una suspensión de alúmina de 3 μ m y 1 μ m. Los cortes transversales de las muestras fueron usados para determinar el espesor del recubrimiento.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Se analizaron las superficies obtenidas microscópicamente guardando imágenes representativas de las mismas en magnificaciones de 5X, 10X, 20X y 50X, lo anterior se realizó para todas las muestras sin ataque, posteriormente se realiza ataque con Nital (2%).

3.4 Caracterización física de los recubrimientos mediante microscopía óptica

3.4.1 Medición de espesor del recubrimiento

La determinación del espesor de los recubrimientos se realizó utilizando las micrografías ópticas de las muestras tomadas con el microscopio óptico de marca Optimus. Se usó el programa MoticImage que tiene herramientas de medición de imagen. Se realizaron tres medidas en tres puntos distintos para cada lado de cada una de las muestras y su promedio determinó el espesor de cada recubrimiento.

3.5 Evaluación de la resistencia a la corrosión por pérdida de masa

3.5.1 Ensayo de inmersión en una solución de sintética de agua de mar

Para determinar la resistencia a la corrosión de las muestras de acero con los recubrimientos galvanizados se usó la técnica de pérdida de masa, luego de ensayos de inmersión en una solución que simula la composición del agua de mar. Todo el proceso se realizó siguiendo la norma ASTM G31. Las muestras fueron desengrasadas y limpiadas antes del ensayo de inmersión. Se elaboraron muestras de 20x30mm. Los bordes de las muestras se cubrieron con pintura y esmalte para definir el área de exposición.

La solución de agua de mar sintética se preparó de acuerdo con la norma ASTM D1141-98, usando agua destilada. La Tabla 2 presenta la composición de la solución.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Tabla 2

Reactivos para la preparación de mar sintético

Reactivo	[g/L]	Masa Sólido (5L)
NaCl	24,53	122,65
MgCl₂	5,2	26
Na₂SO₄	4,09	20,45
CaCl₂	1,16	5,8
KCl	0,695	3,475
NaHCO₃	0,201	1,005
KBr	0,101	0,505
H₃BO₃	0.027	0,135
SrCl₂	0.025	0.125
NaF	0.003	0.015

Nota: la masa de reactivo en la tabla es la necesaria para la preparación de los 5 litros de solución necesaria para el ensayo.

Se prepararon 5 L de solución sintética de agua de mar y en 12 recipientes individuales fueron sumergidas las muestras de acero galvanizado, en posición vertical. Para asegurar que se mantuvieran fijas a cada una se le realizó una perforación en la parte superior (Figura 4). Todas las muestras fueron pesadas antes de sumergirlas en la solución de ensayo, usando una balanza de peso al vacío de la marca PRECISA con una precisión de 0.0001 gramos. Así mismo, el área de cada una de las muestras se midió utilizando un calibrador digital de pie de rey. Las muestras estuvieron en la solución sintética de agua de mar por un periodo de 40 días (960 horas). Luego de este tiempo cada muestra fue sacada de la solución, limpiada con agua destilada y almacenada por

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

24 horas en un desecador para posteriormente proceder a pesar. La pérdida de masa se calculó a partir de la diferencia en peso de las muestras antes y después del ensayo de inmersión. Los ensayos se realizaron por duplicado.

Figura 4

Muestras del ensayo de Inmersión



La determinación de la velocidad de corrosión se realizó siguiendo lo indicado en la norma ASTM G31 (pág. 9). Como modelo matemático se usó la ecuación 2 que describe la velocidad de corrosión en función de la masa, área, densidad y tiempo de exposición, asumiendo corrosión uniforme:

$$CR = \frac{k * W}{A * T * D}$$

Donde k es una constante y su valor se tomó de la norma (Figura 5). W es la pérdida de masa en g, A es el área expuesta de las muestras en cm^2 , T el tiempo en horas del ensayo y D la densidad del acero, 0.0786 g/cm^3 . Se omitió la densidad del recubrimiento porque su espesor es pequeño en comparación con la muestra base de acero.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Tabla 3

Constantes para varias unidades de velocidad de corrosión.

	Unidades de velocidad de corrosión deseadas	Constante (K) en la ecuación de la velocidad de corrosión
Espesor (Penetración) Unidades de pérdida	milésimas de pulgada al año (mpy)	$3.45 \cdot 10^6$
	pulgadas al año (ipy)	$3.45 \cdot 10^3$
	pulgadas al mes (ipm)	$2.87 \cdot 10^2$
	milímetros por año (mm/y)	$8.76 \cdot 10^4$
	micrómetros por año ($\mu\text{m}/\text{y}$)	$8.76 \cdot 10^7$
	picómetros por segundo (pm/s)	$2.78 \cdot 10^6$
Unidades de pérdida de masa	gramos por metro cuadrado por hora ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	$1.00 \cdot 10^4 \cdot D^A$
	miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd)	$2.40 \cdot 10^6 \cdot D^A$
	microgramos por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$2.78 \cdot 10^6 \cdot D^A$

^A La densidad no es necesaria para calcular la velocidad de corrosión en la constante K anula la densidad en la ecuación de la velocidad de corrosión.

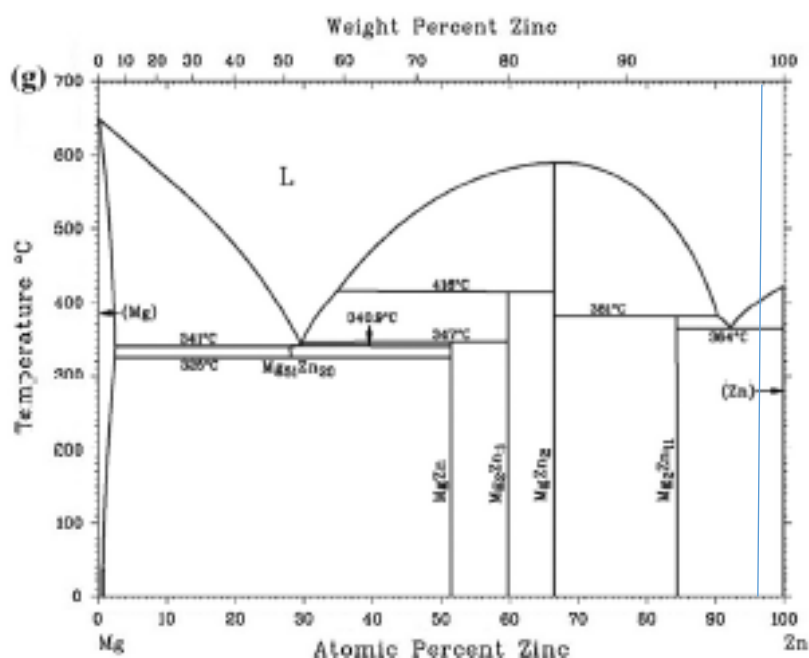
Nota: Tomada de la norma ASTM G 31.

4. Resultados y discusión

Las muestras de acero galvanizado utilizadas en este proyecto se encuentran en valores cercanos a la línea trazada sobre el diagrama de equilibrio de fases del sistema Zn-Mg (Figura 5). De esta forma se pueden predecir los constituyentes que puedan presentarse.

Figura 5

Diagrama equilibrio de fases Zn-Mg



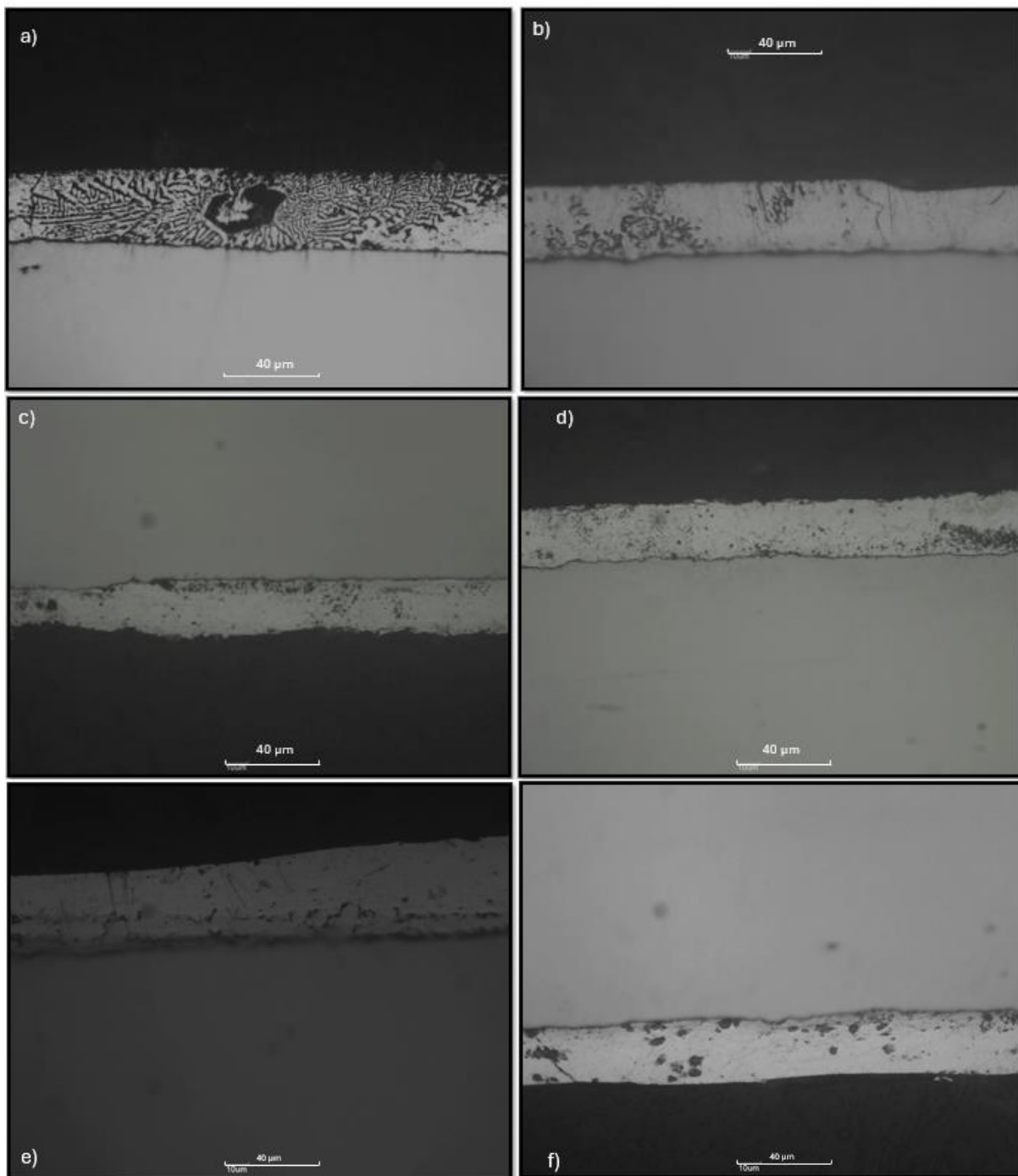
4.1 Morfología y espesor de los recubrimientos

Las micrografías ópticas de la sección transversal de las muestras sin ataque presentan mayor claridad comparadas con las imágenes de las muestras posteriores al ataque. Se pudo visualizar un oscurecimiento rápido del recubrimiento, y se puede observar con claridad la continuidad de cada recubrimiento, y de esta forma determinar su espesor. La Figura 7 presenta las micrografías ópticas de las muestras previa su inmersión en la solución sintética de agua de mar, usando la nomenclatura descrita en la Tabla 1.

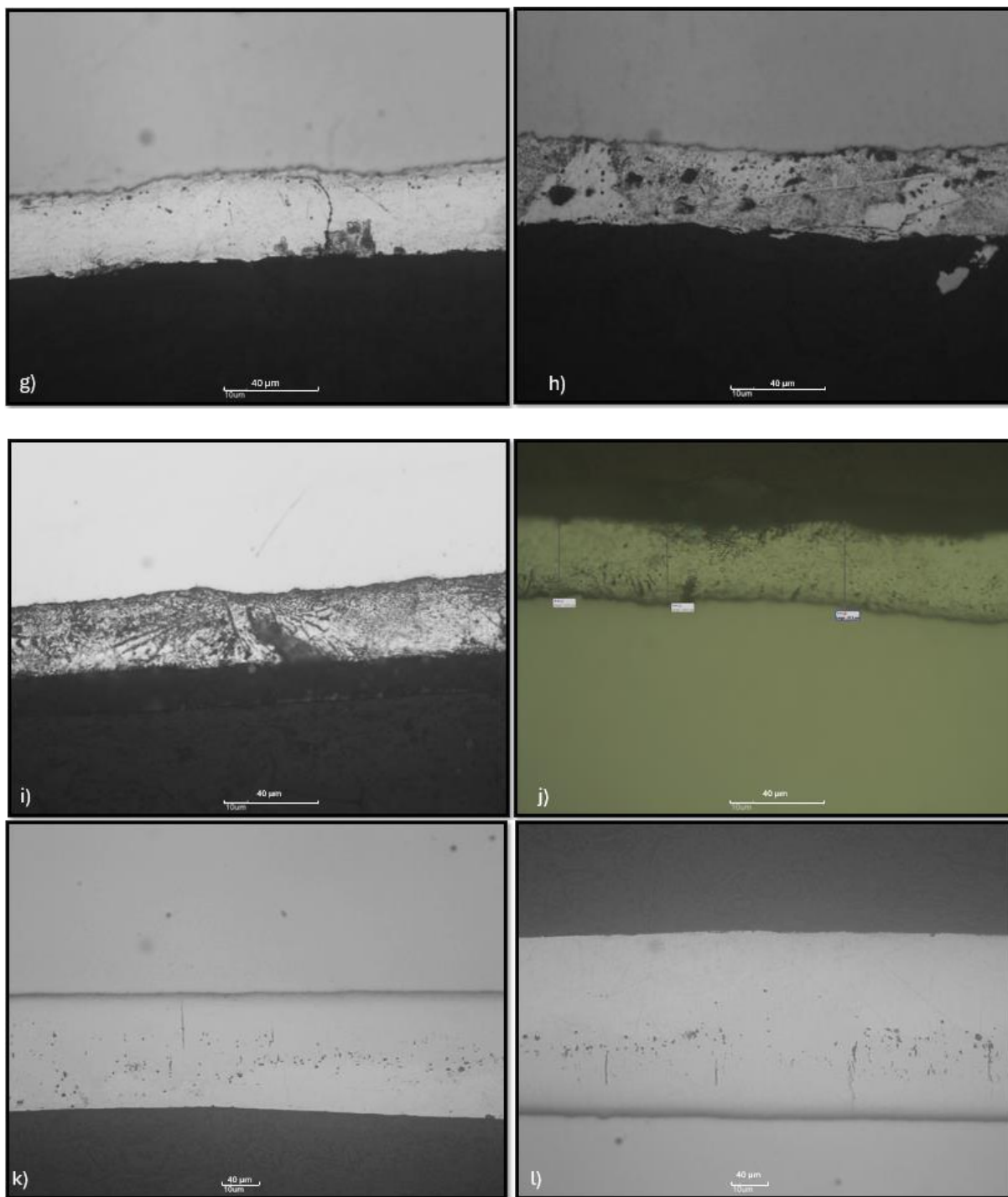
RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Figura 6

Micrografías ópticas de las muestras de acero galvanizado. a) y b) muestra A, c) y d) muestra B, e) y f) muestra C, g) y h) muestra D, i), j) muestra E y k) y l) muestra F



RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS



La morfología de muestra A, recubrimiento compuesto por Zn-3%Mg-2.5%Al (Figura 7 (a) y (b)), revela un crecimiento dendrítico en la mayoría de sus zonas, aunque también se observan áreas de crecimiento columnar. El recubrimiento es continuo y muestra un espesor uniforme de aproximadamente $27,7 \mu\text{m}$.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

El recubrimiento base zinc de la muestra B cuya morfología se observa en las Figura 7 (c) y (d), revela un crecimiento columnar. El recubrimiento es uniforme y continuo, con un espesor de aproximadamente 22,5 μm .

El recubrimiento de la muestra C (Figuras 7 (e) y (f)), cuya composición es Zn-3%Mg-3.8%Al, revela un crecimiento columnar, sin presencia de dendritas, lo cual, si se observó en la muestra A, cuyo recubrimiento también contiene magnesio y aluminio. Nuevamente el recubrimiento es continuo y tiene un espesor de aproximadamente 39,6 μm .

La muestra D (Figura 7 (g) y (h)) muestran el recubrimiento base zinc, sin adición de magnesio y aluminio revelando un crecimiento de tipo columnar. El recubrimiento es continuo con un espesor promedio de 35,1 μm .

Se vuelve a observar un crecimiento dendrítico en el recubrimiento de la muestra E (Figura 7 (i) y (j)), cuya composición es Zn-3%Mg-2.5%Al, similar a la morfología de la muestra A. La medida promedio del espesor es de 33,8 μm .

El recubrimiento de la muestra F, compuesto por zinc, se puede observar en las micrografías de la Figura 7 (k) y (l). Se revela un crecimiento columnar. El recubrimiento es continuo con un espesor promedio de 148,7 μm .

El análisis metalográfico de las muestras estudiadas revela el efecto de los elementos aleantes en el crecimiento del recubrimiento, el aluminio parece promover un crecimiento dendrítico. En todas las muestras estudiadas el recubrimiento galvánico es continuo, se puede observar claramente la interfase del recubrimiento con el acero base.

La Tabla 4 presenta un resumen del espesor de capa de galvanizado en las muestras estudiadas.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Tabla 4

Medida del espesor para el recubrimiento para las muestras A, B, C, D, E y F. Se midió el espesor en con especímenes de cada muestra

Muestra	Espesor (μm)
A	27,7
B	22,5
C	39,6
D	35,1
E	33,8
F	148,7

Se observa que las muestras A, B, C, D y E, tienen un espesor similar, lo cual sugiere que los tiempos de inmersión en el baño de galvanizado fueron similares. En el caso de la muestra F, cuyo espesor del recubrimiento es significativamente más grande se puede concluir que el tiempo de exposición en el baño de galvanizado fue más alto.

4.2 Determinación de la velocidad de corrosión

En la Tabla 5 se presentan los valores de pérdida de masa y área total de cada una de las muestras, los ensayos se realizaron por duplicado. La muestra C, cuyo recubrimiento tiene una composición de Zn-3%Mg-3.8%Al presenta una menor pérdida de masa.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Tabla 5*Valores de pérdida de masa y área superficial de cada una de las muestras estudiadas*

Muestra	Pérdida de Masa [g]	Área Superficial [cm²]
A	0.0084	11,1365
B	0.0075	11,2228
C	0.0019	11,0449
D	0.0086	11,0876
E	0.0071	11,1886
F	0.0837	11,3187

Los valores de la velocidad de corrosión se determinaron siguiendo la norma ASTM G31. Se tomó la medida en la pérdida de masa que se registró sobre cada una luego de haber cumplido 40 días de exposición en la solución de mar sintético, en el cual se controlaron las diferentes variables que podrían afectar el comportamiento del ensayo de inmersión como la pérdida de volumen del agua por evaporación, manteniendo el volumen inicial durante la ejecución del ensayo. La velocidad de corrosión para cada muestra se presenta en la Tabla 6.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Tabla 6

Valores de la velocidad de corrosión calculada por medio de la norma ASTM G31 de las muestras estudiadas, luego de su inmersión en solución sintética de agua de mar por 40 días

Muestra	Velocidad de corrosión (g/cm ² * h)	Velocidad de Corrosión Anual (g/cm ² * y)
A	7,85706E-07	0,0069
B	6,96129E-07	0,0061
C	1,79193E-07	0,0016
D	8,07961E-07	0,0071
E	6,61016E-07	0,0058
F	4,94205E-06	0,0433

En concordancia con los resultados de las mediciones de pérdida de masa, la muestra que presenta menor velocidad de corrosión es la muestra que tiene un recubrimiento compuesto por Zn-3%Mg-3.8%Al, es decir la muestra C. Las muestras A y E que también contienen aluminio, pero en menor proporción, 2.5%, tienen una velocidad de corrosión similar entre ellas. La literatura reporta que la adición de magnesio y aluminio a los baños de galvanizado en caliente tiene un efecto positivo para aumentar la resistencia a la corrosión de los recubrimientos. Esto ha sido atribuido a la disolución de Mg²⁺ y Al³⁺ del recubrimiento y la subsecuente formación de productos de corrosión que contienen sulfuros (Thierry et al. (2019)). Es de esperar además que la corrosión de estos recubrimientos sea localizada, específicamente sobre las fases eutécticas.

Sin embargo, debe indicarse que no hay una mejora significativa en la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de las muestras A y E, si se comparan con las muestras B y D, que contienen solo zinc. Cabe anotar que el tiempo de inmersión en la solución sintética de agua de mar fue corto, 40 días. Sería importante realizar estudios con mayores tiempos de inmersión para

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

determinar la efectividad de la adición de magnesio y zinc a los baños de galvanizado. Algunos estudios realizados evaluando la corrosión atmosférica de muestras recubiertas con aleaciones Zn-Mg-Al a tiempos de hasta tres años indican que la pérdida de masa del acero recubierto fue unas 2-3 veces inferior en comparación con el acero galvanizado por inmersión en caliente tras cuatro años de exposición (Thierry et al. (2019)).

4.2.1 Efectos de magnesio y aluminio en las capas de galvanizado

Como se mencionó anteriormente la presencia de magnesio y aluminio en los baños de galvanizado favorece la resistencia a la corrosión del recubrimiento. Sin embargo, también es importante la cantidad de cada elemento, por cuanto la formación de compuestos eutécticos y de segunda fase favorecerán la corrosión localizada. Prosek et al. (2008) indica que la pérdida de masa de los recubrimientos con adiciones de magnesio incrementa en proporción al contenido de magnesio del recubrimiento. En las aleaciones con mayor porcentaje de magnesio los productos de corrosión son más inestables dado que son solubles en medios salinos.

Los resultados del presente trabajo de investigación sugieren que el aumento en la cantidad de aluminio favorece la resistencia a la corrosión de los recubrimientos. Stoulil et al., (2015), al estudiar las propiedades electroquímicas de los productos de corrosión formados sobre recubrimientos de zinc aleados con aluminio y magnesio en soluciones salinas, indicó que los productos de corrosión formados sobre estos recubrimientos aleados tienen menor conductividad eléctrica y mejor efecto barrera, ya que evitan la formación de óxido de zinc.

Otro de los efectos del magnesio como aleante es el afino de la microestructura según Romzi et al. (2021), debido a la misma estructura cristalina HCP entre el Zn y el Mg. Las partículas de Zn se difunden en la matriz de Mg y forman un compuesto intermetálico, debido a esto se puede comprender el cambio en el tamaño de grano en la microestructura de los recubrimientos de Zn

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

con adiciones de Mg. Así mismo el tipo de productos de corrosión que se generen depende del ambiente al que estén expuestas las estructuras de acero galvanizado bien sea marina o industrial.

En relación con lo antes expuesto la baja pérdida de masa de las muestras permite establecer que dan buena resistencia frente a la corrosión formando compuestos no solubles que protegen el acero. Este factor es determinante para la selección del recubrimiento al presentar una mayor resistencia a la corrosión indica una menor pérdida de masa al exponerse a medios corrosivos. En consecuencia, el porcentaje de magnesio en las muestras puede ofrecer regiones de pasividad por medio de las cuales se obtiene una mejora en la resistencia de la corrosión y el desprendimiento de material superficial se ve reducido con base en los análisis realizados por Lee et al. (2013).

5. Conclusiones

Las muestras analizadas indican que la adición de magnesio y aluminio en bajas cantidades a los baños de galvanizado aumenta la resistencia a la corrosión de los recubrimientos y por ende son una alternativa viable para proteger las estructuras de acero. La mejora en la resistencia a la corrosión está relacionada con la formación de productos de corrosión estables sobre la superficie del recubrimiento.

La presencia de magnesio y aluminio en el recubrimiento afecta su morfología, presentando estructuras dendríticas.

Es importante controlar la cantidad de magnesio y aluminio que se adicione al baño de galvanizado pues la formación de partículas de segunda fase puede favorecer la corrosión localizada.

Para la evaluación de los efectos del magnesio en los recubrimientos base zinc se recomienda el aumento en el tiempo de exposición de las muestras en medios salinos debido al comportamiento de los fenómenos corrosivos, por esta razón los resultados de algunas muestras pueden terminar siendo relevantes al aumentar los productos de corrosión y favorecer la formación de productos insolubles formando una capa protectora que pasiva la superficie y disminuya la velocidad de corrosión.

Referencias bibliográficas

Arenas, M. (n.d.). .2. *EL ACERO GALVANIZADO*.

Inelca. (2020). *Tipos de corrosión | INELCA Recubrimientos superficies metálicas*.

<https://www.inelca.es/tipos-de->

[corrosion/#:~:text=La%20corrosi%C3%B3n%20blanca%20es%20una,propiedades%20no](https://www.inelca.es/tipos-de-corrosion/#:~:text=La%20corrosi%C3%B3n%20blanca%20es%20una,propiedades%20no)

[%20se%20vean%20afectadas](https://www.inelca.es/tipos-de-corrosion/#:~:text=La%20corrosi%C3%B3n%20blanca%20es%20una,propiedades%20no%20se%20vean%20afectadas).

Kania, H. (2023). Corrosion and Anticorrosion of Alloys/Metals: The Important Global Issue. In

Coatings (Vol. 13, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/coatings13020216>

Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y. P., & Payer, J. H. (n.d.).

“Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States.”

Kurth, J. C., Krauss, P. D., & Foster, S. W. (2019). Corrosion Management of Maritime

Infrastructure. In *Transportation Research Record* (Vol. 2673, Issue 12, pp. 2–14). SAGE

Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0361198119855333>

Lee, M. H., Kim, Y. W., Lim, K. M., Lee, S. H., & Moon, K. M. (2013). Electrochemical

evaluation of zinc and magnesium alloy coatings deposited on electrogalvanized steel by

PVD. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 23(3), 876–880.

[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62542-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62542-X)

Morcillo Linares, M., & Morcillo Linares, M. (2018). *La corrosión atmosférica del acero al*

carbono en ambientes costeros. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones

Científicas. <https://elibro.net/es/lc/uis/titulos/41921>

NACE. (2016). International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion

Technologies Study. *NACE International*, A-19.

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Padilla, E. (n.d.). *El acero galvanizado, los grados y la flor.*

<https://blog.laminasyaceros.com/blog/el-acero-galvanizado-los-grados-y-la-flor>

Prosek, T., Nazarov, A., Bexell, U., Thierry, D., & Serak, J. (2008). Corrosion mechanism of model zinc-magnesium alloys in atmospheric conditions. *Corrosion Science*, 50(8), 2216–2231. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.008>

Romzi, M. A. F., Alias, J., & Ramli, M. I. M. (2021). Effect of zinc (Zn) on the microstructure and corrosion behaviour of magnesium (Mg). *Materials Today: Proceedings*, 48, 1873–1879. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.261>

S. Schurz, G.H. Luckeneder, K. Preis, T. Haunschmied, G. Mori, & A.C. Kneissl. (2009). Corros. Sci. 51. *Corrosion Science*, 51, 2355–2363.

Stoullil, J., Prosek, T., Nazarov, A., Oswald, J., Kriz, P., & Thierry, D. (2015). Electrochemical properties of corrosion products formed on Zn-Mg, Zn-Al and Zn-Al-Mg coatings in model atmospheric conditions. *Materials and Corrosion*, 66(8), 777–782. <https://doi.org/10.1002/maco.201408058>

T. Tsujimura, A. Komatsu, & A. Andoh. (2001). 01, International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel. In Proc. Galvatech (Ed.), *Galvatech* (pp. 145–152). Galvatech.

Thierry, D., Persson, D., Luckeneder, G., & Stellnberger, K. H. (2019). Atmospheric corrosion of ZnAlMg coated steel during long term atmospheric weathering at different worldwide exposure sites. *Corrosion Science*, 148(December 2018), 338–354. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.12.033>

RECUBRIMIENTOS BASE ZINC PARA CONTROL DE CORROSIÓN EN ACEROS

Wang, Y. qi, Kong, G., Che, C. shan, Weng, T. yu, & Sun, Z. wen. (2018). Corrosion behavior of Zn-Mg alloys in saturated Ca(OH)₂ solution. *Corrosion Science*, 136(November 2016), 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.032>

Yao, C., Wang, Z., Tay, S. L., Zhu, T., & Gao, W. (2014). Effects of Mg on microstructure and corrosion properties of Zn-Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 602, 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.025>