



Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana

Azcapotzalco

INGENIERÍA METALÚRGICA

Proyecto de integración

**“SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CAPA
PROTECTORA DE ALEACIONES DE ZN-AL OBTENIDA
POR INMERSIÓN EN CALIENTE.”**

Presenta

MARTÍNEZ ZARZA KAREN ITZEL

Matrícula: 2143034120

Con asesoría del

Mtro. ROBERTO TITO HERNÁNDEZ LÓPEZ

Trimestre 22-P

Ciudad de México, Septiembre del 2022

Declaratoria

Yo, Roberto Tito Hernández López, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Yo, **Karen Itzel Martínez Zarza**, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Agradecimientos.

Gracias a mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco; por permitirme formarme profesionalmente en ella, por medio de todas las personas que fueron partícipes directa o indirectamente de este desarrollo durante mi estancia, gracias por el tiempo, por facilitarme las instalaciones y equipos necesarios para llevar a cabo la culminación del presente proyecto.

Agradezco el aporte de cada uno de mis profesores durante mi paso en esta gran casa de estudios, y el apoyo del comité de la licenciatura por permitirme realizar este proyecto de investigación.

Agradecimientos especiales al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la División de CBI, a la Dra. Rosa María Luna Sánchez por su ayuda y tiempo en el empleo del Microscopio Electrónico de Barrido. Así como a mi asesor, el Mtro. Roberto Tito Hernández López por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto guiada por sus conocimientos y el brindarme su apoyo constante en todo momento, y por impulsarme a lo largo de este proceso.

A Dios gracias por ser el inspirador y darme firmeza cada día para continuar en este proceso y no rendirme en todo este tiempo hasta obtener uno de mis anhelos más deseados.

A mis padres; Imelda Zarza y Octaviano Martínez por la vida, por ser mi luz y guía en mi camino, por brindarme todas y cada una de las herramientas aún más allá de sus posibilidades, de hacer hasta lo imposible para lograr alcanzar este objetivo. Por ser el principal motor de mis sueños, el pilar de mi existencia y por confiar y creer en mí en todo momento.

A mis hermanas; Yuritzi y Kassandra por ser mi soporte y mi fuerza, por su apoyo incondicional, por su compañía y motivación no solo en esta etapa, sino en todo lo que va de vida.

A ti, Andrea Nefertary por aguantar todas esas tardes de explotar de estrés, por darme fortaleza cuando sentía no poder más, por alentarme a seguir adelante, y por no soltarme ni un solo día desde que llegaste a mi vida.

Gracias Aurea Lidia por hacer más llevadera y divertida mi estancia en la universidad, por ser más allá que un paño de lágrimas y una confidente, por ser ese regalo invaluable que me ha dejado esta etapa y que permanecerá a través del tiempo.

A todos ellos, con mucho amor y cariño les dedico todo mi esfuerzo y trabajo puesto en el desarrollo de este proyecto.

Gracias a la vida por este nuevo logro.

ÍNDICE

Introducción	5
Antecedentes.....	9
Justificación.....	12
Objetivos.	13
Resumen.....	14
Desarrollo Experimental.	15
Material y Equipo.	15
1. Preparación de probetas de acero 1018.....	17
2. Preparación de aleaciones Zn-Al.....	17
3. Inmersión en el baño Zn-Al	19
4. Prueba simple de sondeo de adhesión.....	20
5. Medición de Espesores de Capa.	20
6. Caracterización Metalográfica.	21
7. Prueba de Microdureza Vickers.	22
8. Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido.....	22
Resultados y Análisis de resultados.	24
Medición de Espesores de Capa.	25
Prueba simple de sondeo de adhesión.....	25
Caracterización por metalografía convencional.	27
Prueba de Microdureza Vickers.	31
Caracterización por MEB.	33
Conclusiones.	37
Referencias Bibliográficas.....	38

Introducción

Los aceros son aleaciones formadas principalmente de Fe y con hasta un 2% en peso de C, también pueden contener otros elementos. Estas aleaciones son inestables en el medio ambiente, ya que varios elementos, principalmente los metales, tienden a buscar su estado de equilibrio formando otros compuestos y así recuperar su estado natural inicial. Dada su reactividad, en presencia de medios agresivos estas aleaciones propenden a degradarse, lo cual se conoce como corrosión. Que puede tener consecuencias en las aplicaciones de estos materiales y por ello se busca proteger a los aceros con una variedad de métodos que van desde la incorporación de otros elementos en la aleación interna, hasta ciertas pinturas o recubrimientos que protejan el metal de este proceso. En los procesos de protección, el galvanizado es uno de los más destacados, éste puede hacerse en frío o en caliente.

Las tecnologías y los mercados de productos de acero revestidos que cambian rápidamente están afectando a los revestimientos de aleaciones galvanizadas por inmersión en caliente y los revestimientos electrogalvanizados, que normalmente dan como resultado revestimientos más delgados. Hoy en día, hay muchos recubrimientos comerciales galvanizados en caliente de uso generalizado, y están surgiendo más del laboratorio. Estos recubrimientos de aleación de próxima generación están diseñados para mejorar el rendimiento del producto o responder a las propiedades cambiantes del acero subyacente que están diseñados para proteger. Este recubrimiento no estaba disponible hace 20 o incluso 10 años. Hasta entonces, el galvanizado por inmersión en caliente con una capa protectora de zinc relativamente puro era el método de elección, y lo ha sido desde 1741.

El químico francés Malouin demostró en 1742 que la inmersión del acero en zinc fundido creaba sobre la superficie del acero una capa de protección ante la corrosión. Fue así como en 1836, los estudios de Stanislaus Sorel dieron lugar a la utilización industrial de un procedimiento nuevo de protección del acero; el cual sería la galvanización en caliente. Fue el propio Sorel quien manifestó el efecto de protección galvánica que proporciona los recubrimientos de zinc, y de este modo se descubrió la protección catódica. El desarrollo de este procedimiento fue la base para la protección del acero, cuya utilización y tecnología no ha dejado de desarrollarse y mejorarse a través del paso del tiempo.

(Romea, 2019)

A partir de entonces, el proceso de galvanización en caliente ha demostrado ser efectivo y rentable en muchas aplicaciones de protección para aceros al carbono, como en la industria papelera, petroleras, química, automotriz, entre otras. Las aleaciones de zinc como recubrimientos sobre acero, es una de las técnicas más empleadas para proteger los materiales de acero expuestos a la corrosión ambiental. Tecnológicamente hablando, la galvanización desde sus inicios se ha

mantenido invariable a través del tiempo. Siendo su eficiencia, el motor de búsqueda para nuevas aplicaciones en las industrias automotrices y de construcción, por lo que actualmente se han reportado investigaciones importantes de las variables dentro del proceso de galvanización y en variante de recubrimientos de base zinc. (S. Shibli, y otros, 2015))

Usualmente se busca proteger contra la corrosión a las superficies de metal con algún tipo de recubrimiento, como las pinturas. Es importante recalcar que las pinturas no son impermeables a la humedad y se puede oxidar si el tiempo de exposición a la humedad es suficientemente largo, o antes, si la humedad contiene químicos corrosivos. Por lo que son más recomendados algún tipo de recubrimiento sobre el material. Los recubrimientos galvanizados (obtenidos por baños en zinc fundido) protegen el acero proporcionando una barrera impermeable que no permita que la humedad entre en contacto con el acero, ya que sin humedad no hay corrosión. Éstos, no se degradan (agrietan, ampollan o pelan) como suelen hacerlo las pinturas. (Nuñez, 2015)

El proceso de galvanizado en caliente consiste en sumergir las piezas de acero o hierro que se buscan proteger, en un baño líquido de zinc fundido, el cual se mantiene a temperaturas de entre 450°-500°C aproximadamente. Contando con dicha temperatura, se da lugar a la adhesión y difusión del zinc en el acero, formando así, una capa de zinc y pegada a ésta se forman aleaciones de zinc-hierro sobre la superficie de las piezas. Las piezas a proteger son previamente sometidas a un proceso de limpieza química que va desde el desengrasado, decapado en una solución ácida, baño en sales, y por último el secado.

Los recubrimientos que se obtienen de este proceso, están básicamente compuestos por tres capas de aleación zinc-hierro (siendo este compuesto, una de las principales ventajas que ofrece este procedimiento, ya que aporta durezas elevadas y disminuye las propiedades mecánicas del metal, aumentando su fragilidad y adquiriendo tonalidades grisáceas opacas) que se identifican por sus diferentes estructuras cristalográficas, su contenido de hierro y una capa exterior de zinc puro. En las capas protectoras de aleaciones de zinc-aluminio mediante inmersión en caliente, son la adherencia en húmedo y la viscosidad del baño para inmersión, quienes determinan el espesor del recubrimiento. Siendo la norma UNE EN ISO 1461 quien especifica las propiedades generales y los métodos de ensayo de estos revestimientos. (Norma Española UNE-EN ISO 1461, 1999)

En el proceso convencional de galvanización en caliente con zinc puro y pequeñas cantidades de otros elementos de aleación, las fases formadas en el recubrimiento pueden asignarse al sistema Zn-Fe. La Figura 1 muestra la región rica en Zn del diagrama de fase de equilibrio Zn-Fe y las fases formadas en el sistema.

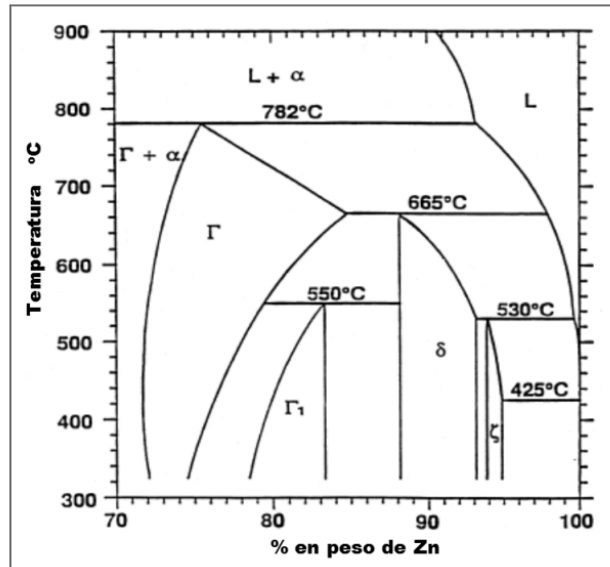


Fig 1. Zona rica en Zinc, del diagrama de fases Zn-Fe en equilibrio.

En la actualidad, se conocen reportes de investigaciones sobre los efectos de la adición de diferentes elementos al baño de zinc para galvanizar, siendo algunos de estos el magnesio, el silicio, el cobre, el aluminio, el estaño, el níquel y otros elementos de aleación en menor proporción.

El aluminio es uno de los elementos aleantes más relevantes empleados en los baños de zinc para el proceso de galvanización. Éste es agregado al baño líquido para disminuir la reactividad del zinc con el hierro y limitar la formación de fases Zn-Fe, que son compuestos que disminuyen la resistencia mecánica del recubrimiento y su ductilidad. Si el material cuenta con un recubrimiento de gran espesor y este sufre deformación, estaría favoreciendo el agrietamiento del recubrimiento. Se hace la adición de aluminio al baño de zinc buscando mejoras en la adhesión del revestimiento a la superficie del metal a proteger, así como el aspecto del brillo de la capa, y la reducción de la oxidación del baño, pero principalmente con el fin de inhibir la formación de los compuestos intermetálicos Zn-Fe.

(Marder, 2000)

En los últimos años se ha incrementado la demanda de las diversas aplicaciones de estos recubrimientos y por ello se ha buscado el desarrollo de químicas de baño de inmersión encaminadas a cambiar significativamente la microestructura de los recubrimientos y por ende sus propiedades mecánicas.

El aluminio es probablemente el elemento de aleación más importante en el baño de zinc utilizado en el proceso de galvanizado. La adición de aluminio al baño de zinc da

En la figura 1, se puede observar el diagrama de fases del Zn-Al en el cual se pueden observar las transformaciones que ocurren en este sistema, así como su comportamiento ante la variación de temperaturas. Las fases β' y β representan porciones ricas en Al y Zn respectivamente, de una solución sólida de aluminio con estructura cristalina FCC. La fase η representa una solución sólida terminal rica en Zn. Es importante destacar una zona crítica de inmiscibilidad de las fases β' y β , que origina la transformación monotectoide a una temperatura de 277 °C.



8

Antecedentes.

En su investigación, Caballero Contreras demuestra que la adición de aluminio al baño de zinc genera cambios importantes en la morfología de la capa de protección del acero, puesto que de presentar granos pequeños ricos en hierro y con alta dureza (hasta 255.6 Vickers), se obtienen ahora granos poliédricos de mayor tamaño y con durezas menores (siendo 183.2 Vickers la máxima alcanzada). Con lo que demuestra el papel que juega el aluminio dentro de la morfología e inhibición de las fases ricas en hierro y, por lo tanto, en el comportamiento mecánico del recubrimiento sin afectar la adherencia de este recubrimiento. Menciona que es sabido que no se puede evitar tajantemente la difusión del hierro y la afinidad de este elemento con el zinc, pero si es posible disminuir el porcentaje de hierro en las fases formadas con el zinc al añadir aluminio, el cual posee una mayor afinidad a formar compuestos con el hierro sin disminuir las propiedades que se obtienen al galvanizar un acero.

(Caballero Contreras, 2015)

Salas Márquez en colaboración con otros autores, comprueban la mejora en su resistencia al desgaste adhesivo de un acero SAE 1018 (pasando de 20.7×10^{-3} K a 8.23×10^{-3} K) al someterlo a un galvanizado con inmersión en caliente. Relacionan la mejora obtenida con la presencia de compuestos intermetálicos Al-Fe-Zn de dureza elevada en las zonas del recubrimiento cercanas al sustrato. Reportan que este tipo de tecnología permite obtener un recubrimiento a bajo costo, resistente a la corrosión y al desgaste. Este último, en muchos casos constituye el principal factor que limita la vida y el rendimiento de los componentes de máquinas. *(Salas Márquez, y otros, 2008)*

Posteriormente en 2011, Barba Pingarrón y otros autores estudian un acero 1018 galvanizado en caliente mediante la inmersión en un baño de aleación de Zn-Al-Cu, Mediante microscopia electrónica de barrido señalan algunas características importantes, como la presencia de subcapas o zonas en el recubrimiento obtenido, las cuales se modifican a medida que se desplaza hacia el sustrato. En la siguiente microscopia muestran el revestimiento producido por la aleación Zn-Al-Cu en la que son visibles las diversas regiones mencionadas, con lo que queda demostrada la presencia de una fase clara y otra oscura, (siendo la clara rica en zinc y la oscura, rica en aluminio).

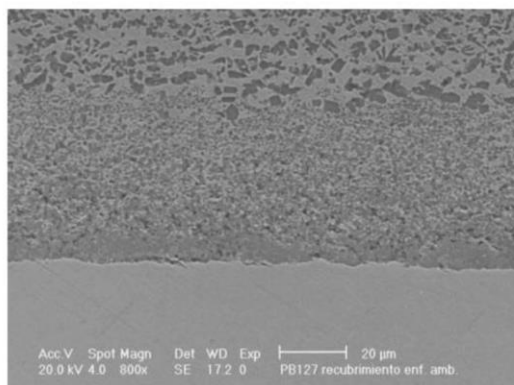


Fig 3. Imagen de microscopía electrónica de barrido de una capa de zinalquizado por inmersión en caliente. Electrones secundarios. 800X.

Por lo que el enfoque de su aplicación principalmente está asociado a su uso como revestimiento protector de la corrosión.

(Barba Pingarrón , y otros, 2011)

Frías, en su investigación resalta categóricamente las ventajas del empleo de recubrimientos ricos en zinc, entre ellas la revolución de los sistemas de protección anticorrosiva tradicionales de los que se tiene conocimiento, los cuales han aumentado la vida de los mismos, y aún más, contribuyen al ahorro de varios miles de millones de pesos anuales en pérdidas de material por corrosión. Así mismo, menciona que, entre los recubrimientos ricos en zinc, él prefiere el uso de inorgánicos bases solventes, con respecto a los de base acuosa por sus menores cualidades en la aplicación, su mayor tolerancia a la humedad y el menor costo de mano de obra para su aplicación.

(Frías, 1984)

Dentro de su artículo de investigación para la Revista de Ciencia y Tecnología, Hernández y Suárez concluyen la influencia de la composición química de los baños para el galvanizado sobre las características microestructurales de los recubrimientos. Reportan que los aumentos de la resistencia a la corrosión de los recubrimientos ricos en zinc tienden a cambiar la composición química de los baños, lo cual amplía la variedad de aplicaciones de estos recubrimientos en ambientes más agresivos como los cloruros. Mencionan que el aumento de la resistencia a la corrosión de los revestimientos de zinc, puede darse si se añaden al baño elementos como el magnesio o el aluminio, los cuales son más activos que el zinc, permitiendo que se formen capas pasivas las cuales retardan el proceso de corrosión. Comprobando que los recubrimientos de aleación Zn-Al-Mg tiene comportamientos a la corrosión del orden de 10 a 20 veces respecto al recubrimiento de Zn y de 2 a 5 respecto a los de Zn-Al, siendo éste el más favorable de estos casos. *(Hernández & Suárez, 2020)*

Ruiz Gallegos y otros autores señalan en su investigación en el año 2020, las diferentes estructuras del zinc en las capas de recubrimiento en aceros de bajo carbono obtenido por galvanizado en caliente, producto de una inmersión en medio ácido provocando una hidrólisis de hierro y extracción de fósforo y azufre de la matriz de acero. Mencionan que es posible atribuir el cambio de microestructura cristalina a un factor específico del proceso: la duración de inmersión de las piezas en la solución ácida donde fueron sometidas para su limpieza previa al galvanizado, y esto favoreció una mejor adherencia del recubrimiento sobre la lámina de hierro. Reiteran que en próximos estudios podrían tomar el enfoque a investigar a detalle el efecto del tiempo y otros factores sobre la adherencia de estos recubrimientos. Aplicando ensayos de dureza descubrieron la presencia de hierro diluido en el baño y la relacionan con el incremento de la aparición de compuestos intermetálicos zinc-hierro, dando como resultado un aumento de dureza, con una diferencia de 50 HV. Por lo que sugieren buscar condiciones óptimas o mejoras para inhibir esta disolución y evitar el efecto del aumento de la presencia de estos compuestos. La norma ASTM D3359 permite evaluar que los recubrimientos presenten buena adherencia a sustratos metálicos. (Este tipo de prueba es subjetiva, pero permite evaluar los daños en la superficie, tomando como criterio de rechazo el desprendimiento del recubrimiento).

(Ruiz-Gallegos, y otros, 2020)

En 2005, Torres, Pérez y otros hacen estudios de cables de acero empleados para usos de construcción (no especifican el tipo de acero), galvanizados por inmersión en caliente en baño líquido de zinc puro. Reportan que la primera capa presenta un contenido de Fe del 21-28% siendo el resto zinc, posee estructura cúbica y una dureza de 70HV. La siguiente, contiene del 7-12% de Fe, estructura hexagonal y 179 HV de dureza. La tercera capa, la cual contiene entre 5.8 y 6.8% de Fe, siendo esta la capa más gruesa, presentando cristales monoclinicos asimétricos y una dureza de 244 HV. Mientras que la última es la capa externa de zinc puro y no la consideran una capa de aleación, esta presenta dureza de 244 HV. Finalmente, el acero base posee 159 HV de dureza.

(Torres, Pérez, Martínez, & Herrera, 2005)

En 2011, J Mendala realizó un estudio de recubrimientos Zn-55% Al, variando los tiempos y métodos de enfriamientos posteriores a la inmersión en el baño líquido. En el cual destaca que, el enfriamiento en agua reduce hasta un 25% del grosor de los recubrimientos generados, en comparación con un enfriamiento al aire quieto. Los recubrimientos enfriados al aire presentan crecimiento de dendritas y un engrosamiento de las áreas interdendríticas. Mientras que el enfriamiento en agua, induce el agrietamiento de la capa exterior de los recubrimientos, por lo que concluye que, es más factible efectuar enfriamientos al aire libre en la obtención de este tipo de recubrimientos.

(Mendala, 2011)

Justificación.

Mejorar las propiedades mecánicas superficiales del acero 1018 con la adherencia de las aleaciones Zn-3% Al, Zn-5% Al y Zn-7% Al, obtenidas por la técnica de inmersión en caliente y los compuestos intermetálicos formados durante este proceso. Con estas aleaciones se pretende evitar el inicio de agrietamiento de la capa protectora y mejorar la dureza superficial. Se realizará la comparación; morfológica, y mecánica de las tres aleaciones zinc-aluminio en las cuales se variarán los contenidos de aluminio.

En este proyecto de integración se busca evaluar el efecto en las morfologías de las capas protectoras Zn-Al (variando la cantidad de aluminio), sobre una barra de acero 1018, mediante inmersión en caliente. Valorando este efecto, se verificará que el crecimiento de una capa de aleación de Fe-Zn está restringido gracias a la función del aluminio de inhibir tal reacción, de manera que esto permitirá reportar que tanto varía la dureza del recubrimiento adherido a la superficie del acero, buscando evitar el agrietamiento sobre las capas protectoras generadas, y tener parámetros adecuados para, si es posible, optimizar futuros procesos de protección de los metales para mejorar las propiedades mecánicas superficiales de los recubrimientos, y con ello utilizar el acero en nuevas y actuales aplicaciones, de acuerdo a las necesidades prácticas.

Los aceros inoxidables también presentan altas durezas y protección contra la corrosión, pero para muchas aplicaciones su utilización resulta costosa. Por lo que, la protección por medio de las capas de Zn mediante inmersión en caliente es una alternativa más económica.

Objetivos.

GENERAL

- Sintetizar y caracterizar capas protectoras de aleaciones de Zn-Al, con 3, 5 y 7% peso de aluminio, sobre una barra de acero 1018 mediante inmersión en caliente.

PARTICULARES

- Fabricar por fundición, tres aleaciones de Zn-Al (de 400gr cada una) con cantidades de 3, 5 y 7% en peso de aluminio.
- Caracterizar las aleaciones de Zn-Al mediante microscopia electrónica de barrido, para verificar que las aleaciones tengan las cantidades específicas establecidas inicialmente.
- Obtener el recubrimiento de aleación Zn-Al por inmersión en caliente sobre la superficie previamente limpia de las barras de acero 1018.
- Realizar la caracterización microestructural mediante microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido, para comparar las morfologías y espesores de las capas protectoras.
- Determinar mediante Microscopia Óptica si se tienen diferentes fases y/o defectos en las capas protectoras obtenidas.
- Analizar mediante microscopia electrónica de barrido los compuestos cristalinos que se formen por difusión cerca de la superficie del acero.
- Obtener la dureza en escala Vickers, de las probetas ya recubiertas por las aleaciones Zn-Al con las distintas composiciones establecidas.
- Discutir y analizar los resultados obtenidos de las probetas con las 3 diferentes composiciones de las capas protectoras.

Resumen.

En el presente proyecto se busca contribuir a los conocimientos de los recubrimientos de aleaciones Zn-Al, sobre una barra de acero 1018 mediante la técnica de inmersión en caliente. Se describen y detallan los estudios desarrollados para generar y caracterizar recubrimientos de aleaciones de base Zinc, con diferentes contenidos de Aluminio. El trabajo incluye la selección del proceso de preparación y la determinación de parámetros importantes que permiten la obtención del recubrimiento deseado.

Las muestras estudiadas se caracterizaron de manera microestructural y composicional mediante análisis de microscopía óptica y electrónica de barrido, fueron sometidas a pruebas de microdureza, prueba (cualitativa) de la navaja y la medición de los espesores de los recubrimientos obtenidos sobre el acero; permitiendo así, la comparación de la influencia de la variación de contenido de Al en los recubrimientos generados.

Desarrollo Experimental.

Material y Equipo.

10 muestras de Acero 1018 de dimensiones: 5 cm de largo y $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro.

Para preparación de las probetas de acero:

- Cortadora para metales de disco abrasivo (*metkon METACUT-M 250*)
- Desbastadora (con papeles abrasivos de diferente calibre).
- Pulidora de disco con paño para materiales ferrosos.
- Alúmina de 0.5.
- Nital al 2% de concentración como reactivo de ataque químico.
- 60g/L de cloruro de amonio.
- Tinas y pinzas de ataque.
- Algodón.
- Alcohol.
- Secadora.

Para baño ultrasónico de las probetas:

- Vaso de precipitados de 500ml.
- 250ml de alcohol.
- 250ml de acetona.
- Limpiador ultrasónico (*Branson 1510 ultrasonic cleaner*).
- Desecador al vacío.
- Guantes de látex.

Para la obtención de las aleaciones para los recubrimientos:

- 1.162 kg de Zn 99% (pureza comercial).
- 38 gr de Al 99% (pureza comercial).
- Balanza semianalítica (*VE-3000*).
- Horno vertical (*LINDBERG*).
- Crisol de carburo de Silicio, barnizado con tintura de zirconia.
- Pinzas para crisol.
- Guantes y mandil de asbesto.
- Careta de protección.
- Arco con segueta.
- Alambre inoxidable para manipular las muestras.

Para el montaje de las probetas recubiertas:

Resina epóxica y catalizador.

Moldes de montaje en frío.

Varilla de vidrio.

Vaso de precipitados de 250ml.

Para caracterización de las muestras.:

Probetas con previa preparación metalográfica.

Microscopio con cámara digital (*OLYMPUS*)

Microscopio electrónico de barrido (Zeiss Supra 55VP).

Micro durómetro Vickers.

Medidor de espesor ultrasónico de alta precisión (WT100A).

Navaja convencional.

1. Preparación de probetas de acero 1018.

- 1.1 Mediante la cortadora de metales con disco abrasivo (*Metkon METECUT-M 250*), se cortaron 10 probetas de acero 1018, con dimensiones de 5 cm de largo y $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro; de las cuales 9 se emplearon para la inmersión en el baño metálico y 1 usada como probeta testigo.
- 1.2 Se desbastaron las probetas usando papeles abrasivos de calibre: 80, 180, 220, 320, 400 y 600, las probetas se giraron 90° y hasta borrar las líneas del papel abrasivo anterior, obteniendo una superficie sin rayas profundas ni en distintas direcciones.
- 1.3 Se pulieron en forma elíptica las probetas mediante una pulidora mecánica buscando eliminar la mayoría las líneas producidas por el desbaste anterior, hasta obtener superficies efecto espejo, empleando paños de billar y polvos abrasivos de alúmina de 0.5 micras de tamaños suspendidos en agua.
- 1.4 Se enjuagaron las probetas con agua y secar con aire tibio.
- 1.5 Decapado de probetas. Se sumergieron las probetas en una disolución de ácido clorhídrico al 2% de concentración con agitación constante durante 5 minutos y se sumergieron durante 1 minuto en una solución de 60 g/L de cloruro de amonio (lo cual mejora y hace uniforme la transferencia de calor) y dejar secar a temperatura ambiente.

2. Preparación de aleaciones Zn-Al.

- 2.1 Se hicieron los cálculos para establecer la cantidad en gramos que se ocuparon para cada aleación. (*Ver nota pág.19*) Las cantidades específicas de cada elemento de acuerdo al cálculo fueron las siguientes:

Tabla 1 Composición en gramos para cada aleación establecida.

Aleación	Gramos de Zn	Gramos de Al
Zn-1.5% Al	394	6
Zn-3% Al	388	12
Zn-5% Al	380	20
Zn-7% Al	372	28

2.2 Se cortaron los minerales (zinc y aluminio) empleando un arco con segueta y posteriormente se pesaron las cantidades exactas a utilizar para cada baño metálico.



Figura 4. Corte de las cantidades específicas para la elaboración de las aleaciones para el baño metálico.

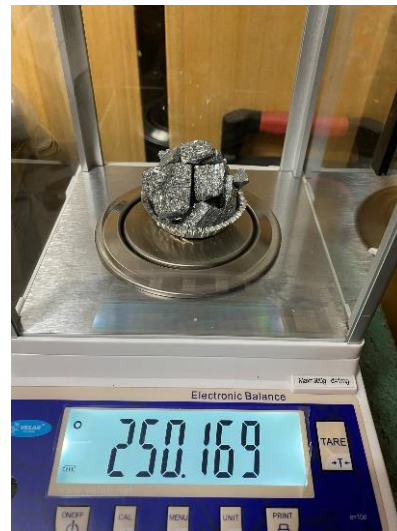


Figura 5. Pesaje de los elementos en balanza electrónica

2.3 Empleando un horno vertical Linderbeg, se fundió primero el Zinc para cada aleación.

2.4 Una vez fundido el Zinc, se agregaron las cantidades de Aluminio en trozos pequeños hasta obtener una mezcla líquida de ambos componentes.



Figura 6. Horno vertical Lindberg empleado para la fundición de las aleaciones.

3. Inmersión en el baño Zn-Al

3.1 Una vez fundidas las aleaciones, se suspendieron sobre el baño metálico (no inmersas) durante 4 minutos, esto con el fin de que las muestras adquirieran gradualmente la temperatura del horno y no de manera abrupta, lo cual podría ocasionar un choque térmico en ellas y verse reflejado a nivel microestructural. Una vez cumplido este tiempo, se hizo la inmersión de tres probetas (una por una) de acero 1018 en el baño metálico de diferente composición, con una duración de 10 minutos dentro del baño líquido.

3.2 Dejar enfriar las probetas al aire quieto.

Nota: Al realizar la fundición de la aleación Zn-7% Al, se generó una reacción atípica en la cual la aleación no se fundió de manera homogénea. Generando después de unos minutos una combustión misma de la propia aleación, donde se observó un cambio de coloración del contenido del crisol y la aleación que se esperaba fuera líquida, adquirió una textura anormal que se asemejaba a una especie de “ceniza”. Debido a este fenómeno, se optó por hacer nuevamente el corte y el pesaje de los elementos para volver a fundir la aleación y por segunda vez reaccionó de la misma manera, lo cual hizo imposible la generación de recubrimientos sobre las probetas de acero, ya que, al hacer la inmersión, de acuerdo a los tiempos empleados en los otros dos casos de contenidos diferentes de aluminio, este baño líquido no se adhería a las muestras. Por lo anteriormente descrito, se optó por cambiar la composición inicial de 7% a 1.5% en peso de aluminio, para seguir considerando 3 variaciones y continuar con el proceso de caracterización y comparación entre los recubrimientos obtenidos.

4. Prueba simple de sondeo de adhesión.

Esta prueba de carácter cualitativo, se llevó a cabo empleando una navaja convencional. Se basa en la evaluación de la dificultad para desprender el revestimiento y la cantidad de revestimiento que se separa de las probetas de acero.

4.1 Para este sondeo, se hicieron dos cortes en uno de los costados de las probetas ya recubiertas, formando una "X".

4.2 En el vértice de intersección de la marca "X", se intentó levantar el recubrimiento con la punta de la navaja.

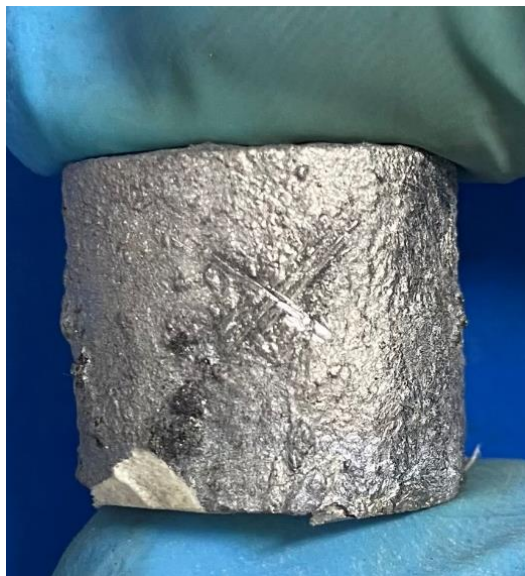


Figura 7. Ejemplo del marcaje X del sondeo simple de adhesión.

5. Medición de espesores de capa.

5.1 Se empleó el dispositivo medidor de espesor ultrasónico digital de alta precisión (WT100A), el cual se configuró para detectar Zn-Al. Este equipo arroja dos mediciones, la primera cuando recién se llena el cilindro con un líquido tipo glicerina, la segunda medición se obtiene después de colocar en forma horizontal la probeta recubierta, cuando los números en pantalla se estabilizan. El resultado de la resta de estas dos cifras, es el espesor del recubrimiento.



Figura 8. Dispositivo para medir el espesor de capa.

6. Caracterización Metalográfica.

6.1 Para un mejor manejo de las probetas recubiertas, fueron montadas en frío utilizando resina epóxica. Los moldes para montaje fueron recubiertos en su interior por vaselina (para evitar que la resina se pegue al molde). Se prepararon 350ml de mezcla de resina (3/4 partes) y el catalizador (1/4 de parte). Se mezclaron en un vaso de precipitados de 500ml con una varilla de vidrio, hasta obtener una mezcla homogénea de los dos componentes y casi sin burbujas.

6.1.1 Una vez lista la mezcla, se colocaron las muestras dentro de los pequeños moldes para montaje y se procedió a vaciarla dentro de los moldes.

6.1.2 Se dejaron secar durante 24 horas aproximadamente.

6.2 Una vez listo el montaje en frío de las probetas recubiertas, se prepararon las 10 muestras metálicas (incluyendo la testigo) mediante el proceso convencional de Metalografía; se realizó desbaste con papeles abrasivos del calibre número 80, 120, 180, 220, 320, 400 y 600, y pulido mediante un paño para materiales ferrosos a 400 rpm, usando polvo de alúmina de diámetro promedio de partícula de 0.5 μm .

6.3 Después se atacaron químicamente por un tiempo entre 15 y 20 segundos, las 10 probetas con Nital al 2% de concentración y se analizaron microestructuralmente. Se tomaron fotografías a distintos aumentos (50X, 100X, 200X) con el fin de observar en un rango amplio, mediante una cámara digital conectada al microscopio Olympus PMG 3, de varias zonas buscando tener un punto de comparación entre las capas encontradas.

7. Pruebas de Microdureza Vickers.

7.1 Ya analizadas metalográficamente las 9 probetas recubiertas, se les aplicó el ensayo de microdureza Vickers y también a la testigo, para esto se buscaron distintas zonas de las probetas: en el centro, en la intersección del acero-recubrimiento y en el recubrimiento total.

7.2 Se relacionó y comparó la microdureza en escala Vickers de las capas obtenidas de cada composición.



Figura 9. Microdurómetro empleado para las pruebas de dureza.

8. Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido.

8.1 Para el análisis mediante el microscopio electrónico de barrido (Zeiss Supra 55VP), previamente se realizó el desmontaje y corte de 3 muestras seleccionadas (1 de cada aleación) para reducirlas a un tamaño de 2 cm de alto aproximadamente, esto como requisito para un mejor manejo de las probetas durante el análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido.

8.2 Seguido del corte, se efectuó la limpieza de las muestras mediante un baño ultrasónico. Se llenó la tina ultrasónica con agua por debajo del nivel marcado (una vez introducidas las muestras, el nivel llegaría al marcaje).

8.2.1 Empleando guantes de látex, se introdujeron las probetas dentro de un vaso de precipitados con 250ml de acetona, se cubrió el vaso con papel aluminio y se accionó el temporizador de la tina a una duración de 10 minutos.



Figura 10. Tina de limpieza ultrasónica con las muestras dentro del vaso de precipitados.

- 8.2.2 Una vez concluido el tiempo en acetona, se tomaron las muestras y se cambió el baño, a 250ml de alcohol durante 10 minutos nuevamente.
- 8.2.3 Terminando la limpieza ultrasónica, las 3 muestra se introdujeron en un desecador al vacío para esperar el análisis en MEB.
- 8.3 Se realizó la caracterización microestructural mediante Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica de Barrido (para distinguir los compuestos que constituyen la capa, su morfología, si se tienen defectos y composición química) y se verificó que la aleación de los recubrimientos cumpliera con las cantidades/porcentajes establecidos inicialmente.
- 8.4 Por medio de la Microscopia Electrónica de Barrido se logró observar y medir el espesor de la capa adherida y de las capas que resultan de la difusión.
- 8.5 Empleando el análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS), se evaluó la composición química de cada capa, se observó la presencia de grietas entre los límites de las capas que influyen en el comportamiento mecánico de la capa adherida.

Resultados y Análisis de resultados.

Respecto a la reacción inesperada (ocurrida en dos ocasiones) durante la fusión de la aleación Zn-7% en peso de Al, en la literatura, los investigadores Ali Maleki, Masoud Panjepour, Behzad Niroumand, Mahmood Meratian reportan en el 2010, su artículo “Mechanism of zinc oxide–aluminum aluminothermic reaction” una reacción similar a la que se sucedió durante la fundición de esta aleación específica, donde explican que, debido a los altos rangos de temperatura por encima de sus puntos de fusión y la presencia de partículas de óxidos de zinc en contacto directo con partículas de aluminio, en una película de óxido circundante que impide el contacto entre el aluminio fundido y partículas de óxido de zinc; se da lugar a la reacción aluminotérmica, como ellos lo denominan. Esta reacción de desplazamiento entre un metal y un óxido metálico motiva a formar un óxido más estable y el correspondiente metal del óxido reactivo, que en este caso es el aluminio; lo cual es termodinámicamente posible debido a la energía libre de la reacción.

(Maleki, Panjepour, Niroumand, Meratian, 2010)

En la figura 8 se muestra el crisol que contenía las cantidades para formar la aleación Zn- 7% en peso de Aluminio, donde es posible observar la consistencia granulosa muy distinta a lo que se espera fuera una aleación en estado líquido. Se presentaron cambios de coloración de los elementos presentes. La textura causó una adherencia del recubrimiento sobre las barras, casi nula como se muestra en la figura 9.



Figura 11. Cambio de coloración de la aleación Zn-7% Al dentro del crisol.



Figura 12. Debido a la consistencia granulosa (ver figura 3) del baño que se esperaba fuera líquido; éste no tenía buena adherencia a las probetas de acero 1018.

Medición de espesor de recubrimiento.

Esta medición se hizo empleando el dispositivo medidor de espesor ultrasónico digital de alta precisión (WT100A)

Para obtener una mejor aproximación de los espesores, se tomaron 3 mediciones por cada probeta, es decir, un total de 27 unidades cuantitativas. Para una mejor representación, la tabla 2 muestra los promedios por los tres tipos de recubrimiento y un promedio general por composición.

Tabla 2. Resultados de la medición de espesores de acuerdo a la composición del recubrimiento.

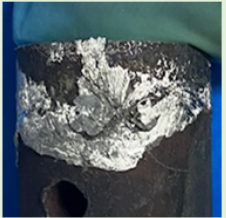
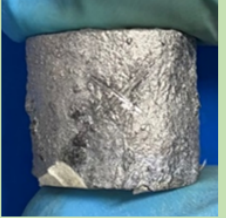
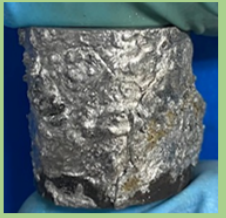
RECUBRIMIENTO	PROM. POR PROBETA	PROMEDIO GENERAL
Zn-1.5% Al	0.865	1.083
	1.11	
	1.275	
Zn-3% Al	1.38	1.851
	2.362	
	1.813	
Zn-5% Al	3.077	2.638
	2.323	
	2.515	

De las mediciones de espesor de los recubrimientos generados sobre las barras de acero (ver tabla 2), se obtuvo que la aleación con mayor contenido en peso de Aluminio, produjo un recubrimiento de mayor grosor. Visualmente, los recubrimientos con composición Zn-1.5% Al fueron los más delgados en comparación de las aleaciones restantes. Estos espesores aumentaron proporcionalmente al contenido de aluminio dentro del baño metálico con el cual se generaron. Gracias al mayor espesor producido, se lograron identificar mayor número de capas, de las cuales se obtuvieron las microdurezas de cada una de ellas.

Prueba simple de sondeo de adhesión.

Esta prueba es totalmente cualitativa, es decir no se obtiene alguna cifra numérica, pero si una escala que nos indica que tan fácil resulta el “rayado” y desprendimiento del recubrimiento generado sobre las probetas.

Tabla 3. Resultados cualitativos (de acuerdo a su composición) del sondeo de adhesión del recubrimiento sobre las muestras de acero 1018

Contenidos.	Muestras	Dificultad de rayado			Desprendimiento de capa		Imagen del sondeo
		Baja	Media	Alta	Si	No	
1.5% en peso Al	1.1	X			X		
	1.2	X			X		
	1.3	X			X		
3% en peso Al	3.1		X			X	
	3.2		X			X	
	3.3		X			X	
5% en peso Al	5.1			X		X	
	5.2			X		X	
	5.3			X		X	

La tabla 3 nos presenta la evaluación de las cualidades del recubrimiento de cada muestra. De acuerdo a su composición, los tres grupos mostraron similitudes en cuanto a cada una de las muestras con el mismo contenido. Es decir, las probetas con 1.5% en peso de Aluminio presentaron en general, baja dificultad de rayado, al momento de efectuar el marcaje de la X el recubrimiento se desprendió con gran facilidad, cabe mencionar que, este grupo de muestras presentaron el recubrimiento de espesor más delgado visualmente comparado con los otros dos grupos.

El grupo con composición 3% en peso de Aluminio presentó una dificultad media al rayado, la marca estuvo bien definida y al intentar desprender el recubrimiento, éste no cedió, por lo que no presentó afectaciones en la capa depositada sobre las muestras. Mientras tanto, las probetas pertenecientes a la composición de recubrimiento 5% en peso de Aluminio presentaron la mayor resistencia al rayado sobre su capa, no se logró plasmar de manera definida la marca, ni presentó desprendimiento del recubrimiento, de los tres grupos de aleaciones, esta composición presentó mejores características en cuanto a adhesión del recubrimiento, presentando también el espesor más grueso de entre las 9 muestras estudiadas.

Caracterización por metalografía convencional.

En la tabla 4 se muestra la composición química del acero 1018, que es el tipo de acero empleado para la ejecución de este proyecto.

Tabla 4. Composición química del acero 1018.

Acero 1018	Composición química				
	C	Mn	Si	P máx.	S máx.
	0.15-0.20 %	0.60-0.90 %	0.15-0.30 %	0.04%	0.05%

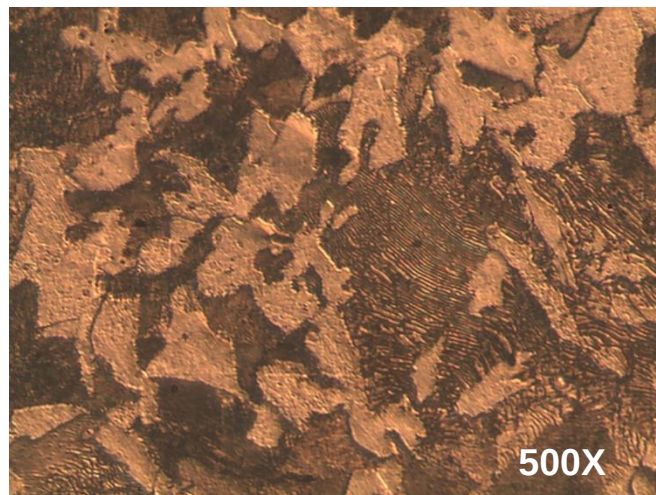
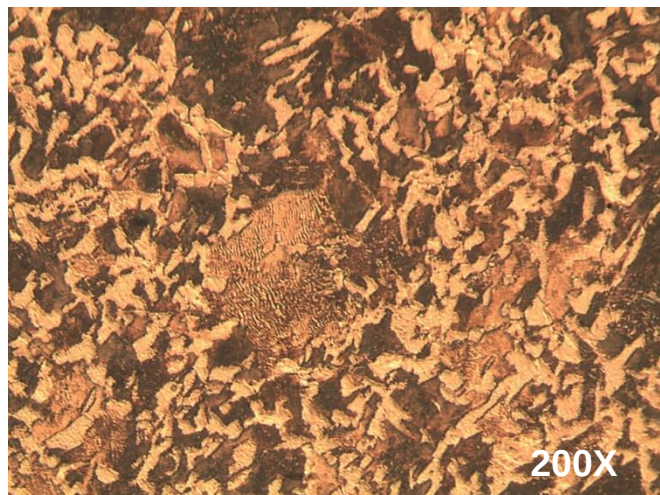
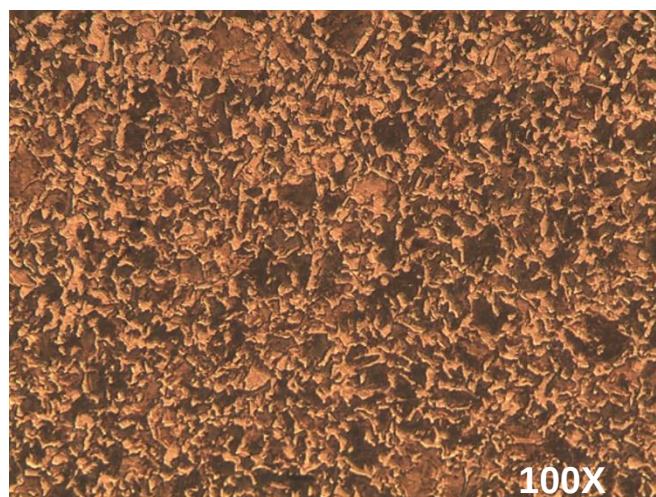
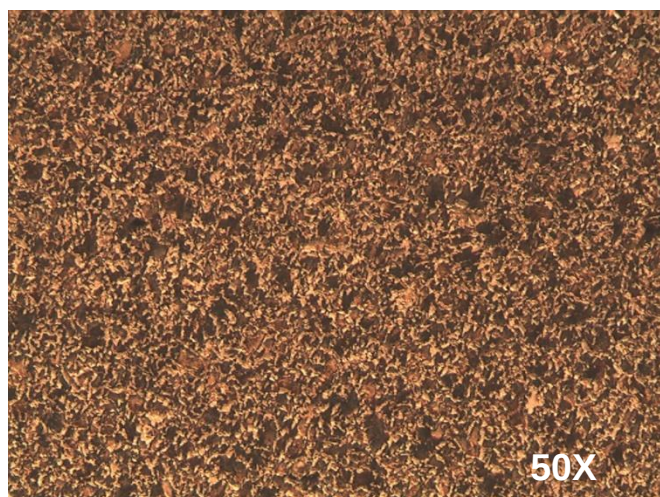


Figura 13. Microestructuras de un acero 1018, a diferentes aumentos indicados.

Para el análisis general del acero 1018, se hizo la caracterización metalográfica, donde se obtuvieron imágenes a diferentes magnificaciones en el microscopio, las cuales se encuentran señaladas en la figura 9 (compuesta por 4 micrografías tomadas a distintos aumentos). Los recubrimientos obtenidos fueron continuos y presentaron buena adherencia al sustrato. Se identificó en las imágenes una microestructura básica de este tipo de acero; donde las zonas claras son ferrita, mientras que las zonas oscuras corresponden a la fase perlita. Son claramente visibles las fronteras de los granos presentes. Mientras que, a mayores aumentos (200X y 500X) se detectaron algunos granos de perlita laminar.

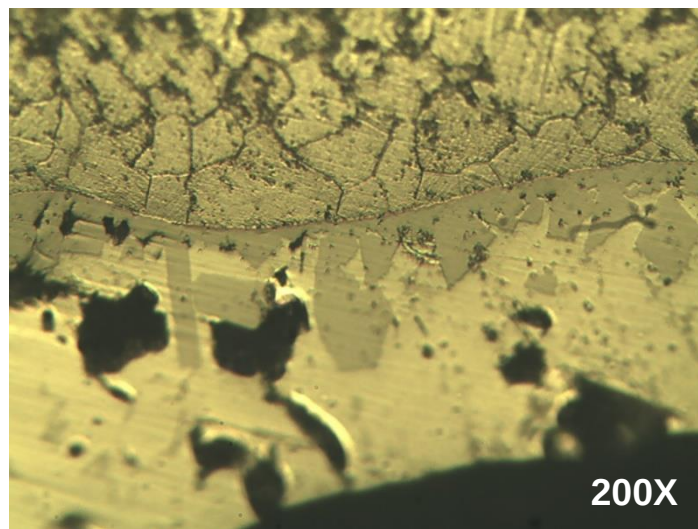
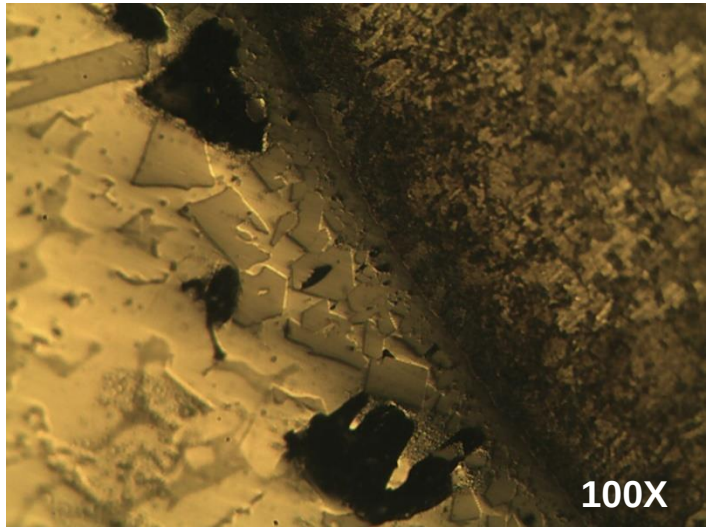
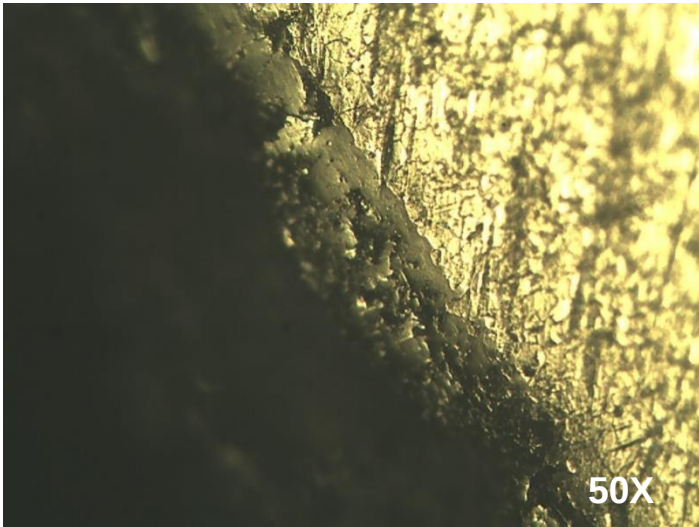


Figura 14. Recubrimientos de composición Zn-1.5% Al.

La figura 11 está conformada por las micrografías del recubrimiento compuesto de Zn-1.5% Al. A 50X apenas se logra visualizar el límite del borde del acero, y el comienzo del borde del recubrimiento. A 100X ya se identifican los granos del recubrimiento. Mientras que a 100X y 200X el aspecto del inicio del recubrimiento puede distinguirse claramente, se observan granos uniaxiales, los cuales constituyen una fase que podría denominarse “intermetálica”, que constan de una combinación de Al-Fe-Zn dada por la difusión de estos elementos en la zona colindante al sustrato del acero. Debido al bajo contenido de aluminio, éste contenido va difundiendo de la capa más interna hasta la más externa, siendo esta ultima una capa mayormente, sino es que totalmente compuesta por Zinc. Las coloraciones más oscuras dentro del recubrimiento son porosidades debido a que no se logró obtener un recubrimiento totalmente homogéneo. En las 3 micrografías se observa la microestructura del acero.

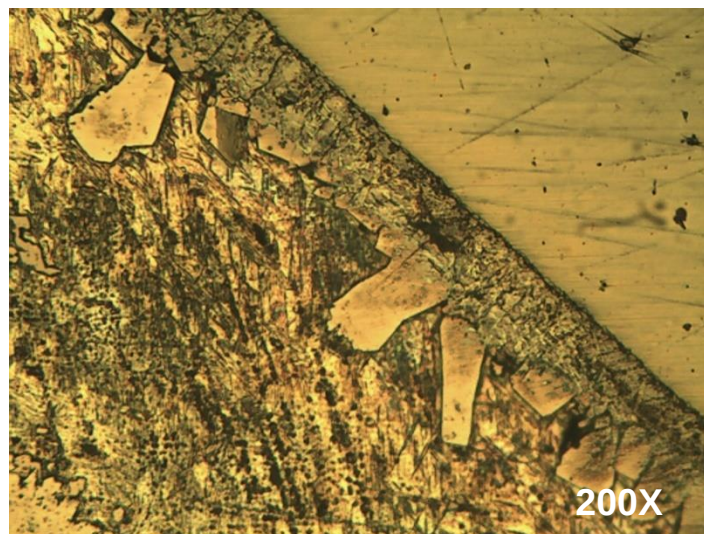
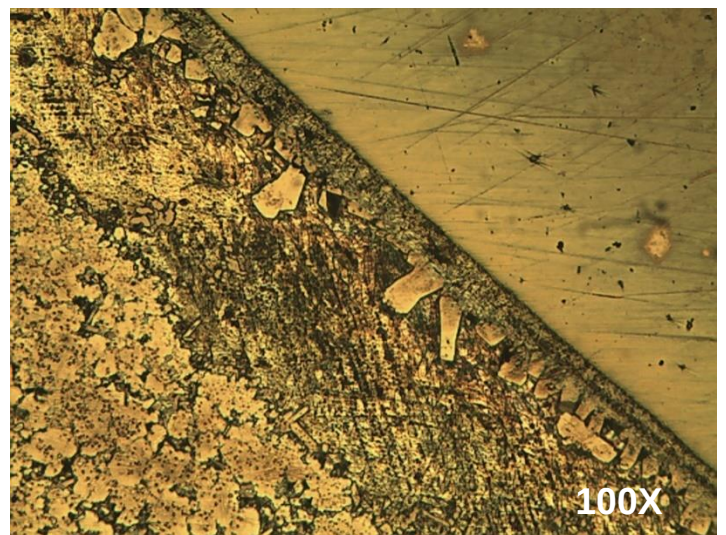
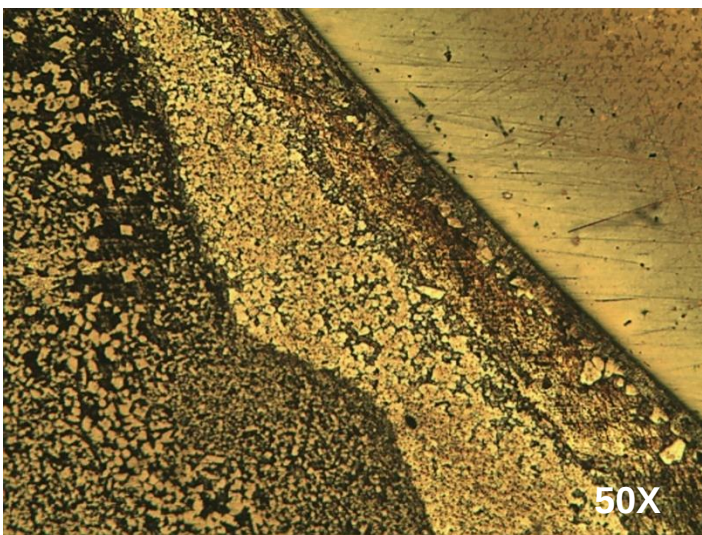


Figura 15. Recubrimientos de composición Zn-3% Al.

La figura 12 muestra las micrografías correspondientes al recubrimiento de la segunda aleación, (Zn-3% en peso de Al). En estas fotografías, es posible distinguir un mayor número de capas en comparación del recubrimiento con 1.5% Al. A 50X es posible visualizar mínimo 4 capas con diferente tamaño y orientación de granos, así mismo, se aprecian dos fases de distintas coloraciones; una fase α rica en aluminio y otra fase β rica en zinc, como producto de la aleación constituyente del recubrimiento. De igual forma, se tiene presencia de la fase denominada intermetálica, la cual consta de dos compuestos intermetálicos siendo la subcapa interna Al-Fe-Si-Zn y la subexterna, un compuesto ternario formado por Al-Zn-Fe. Se distingue la presencia del aluminio como granos pequeños dentro de una fase rica en zinc. Mientras que, a mayores aumentos, se observa la presencia de granos similares a los apreciados en los recubrimientos de la primera aleación, granos uniaxiales con notable diferencia de tamaño.

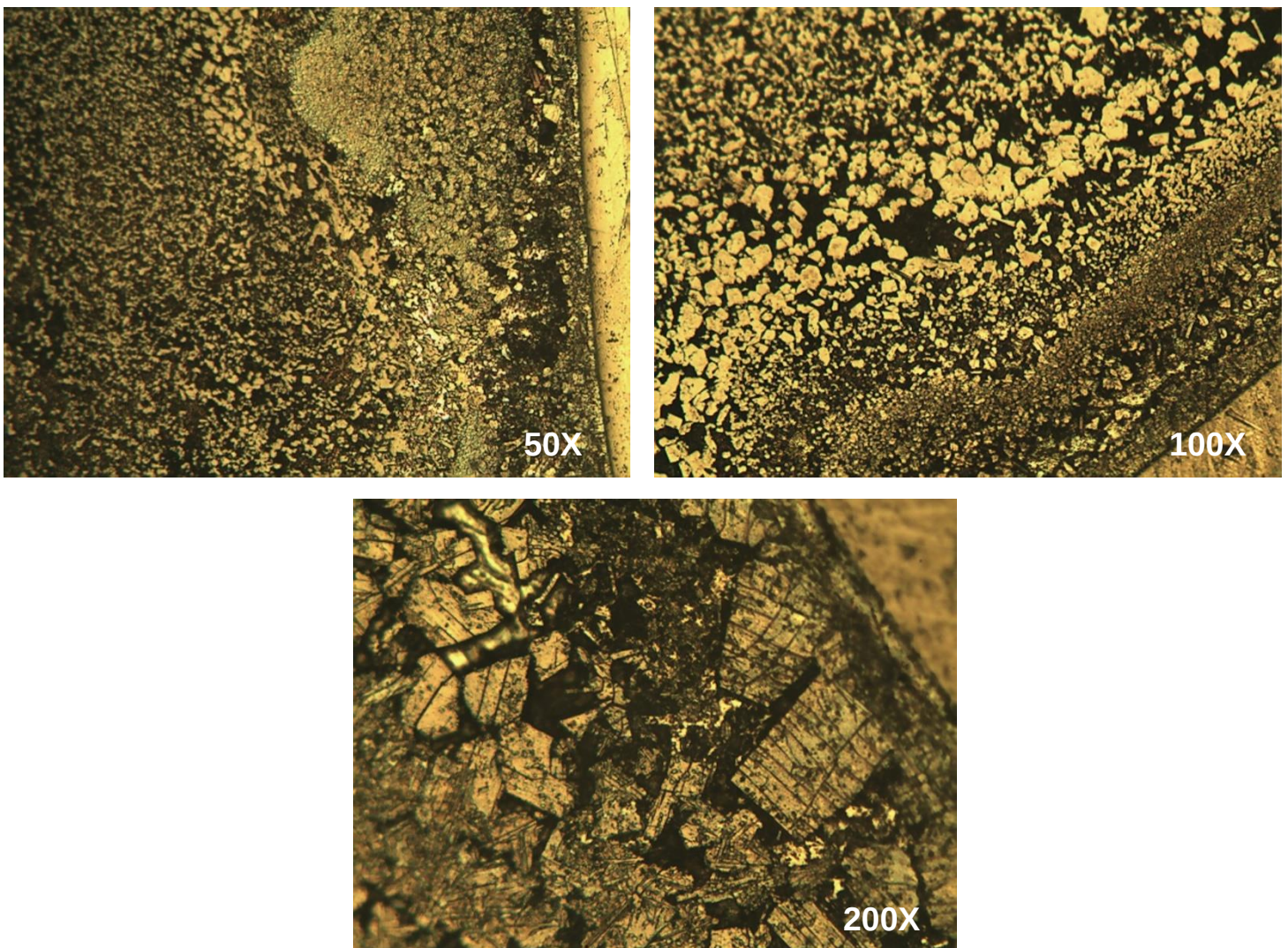
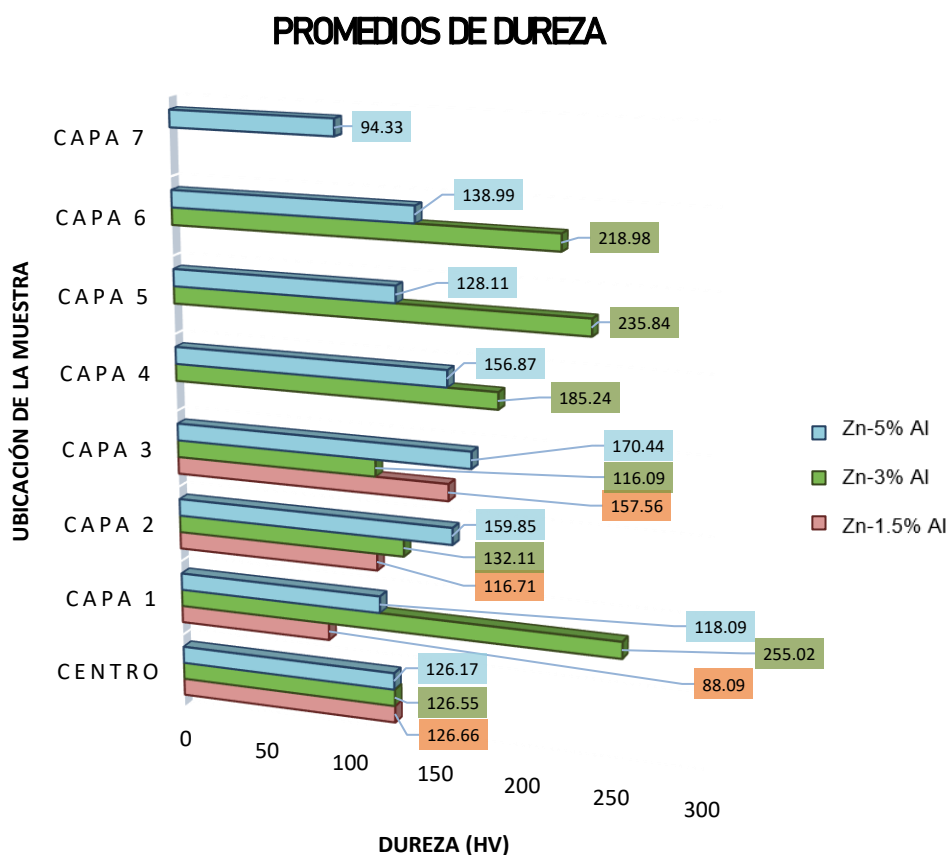


Figura 16. Recubrimientos de composición Zn-5% Al.

En el conjunto de micrografías de la figura 13, se presentan las micrografías del recubrimiento con composición Zn-5% Al, en este caso, se identificó un mayor número de capas presentes. A 50X pueden distinguirse 6 patrones diferentes de granos, lo cual son distintas capas. A diferencia de los recubrimientos anteriores, este contenido específico de Zn-Al recibe el nombre de Galfan, el cual carece de la fase intermetálica frágil que presentan los dos casos anteriores entre el acero y el recubrimiento. La ausencia de esta fase evita la nucleación de grietas en esta interfaz. Además, se identificaron en la capa más externa, granos dispersos de aluminio dentro de una matriz rica en zinc. Debido al contenido de esta capa en específico, se esperaba un mejor desempeño ante la corrosión gracias al alto contenido de aluminio presente en esta zona.

Pruebas de Microdureza Vickers

Para los ensayos de dureza aplicados a las probetas recubiertas, se obtuvieron 3 mediciones por zona, para calcular un promedio más preciso.



Gráfica 1. Promedios de dureza por capa, para las 3 aleaciones de recubrimientos.

En la gráfica 1, se representan los promedios de dureza (en escala HV) por capa de los tres diferentes recubrimientos generados sobre las probetas de acero 1018. La medición obtenida en la zona centro de las probetas en los tres casos, promedia 126.46 HV, lo cual es una cifra cercana a la dureza general de este tipo de acero.

Para el recubrimiento de menor contenido de aluminio (Zn-1.5 % Al) se identificaron 3 capas, en las cuales la dureza fue de comportamiento ascendente de la capa interna a la más externa, siendo la de mayor dureza ésta última con una media de 157.56 HV, ligeramente por encima de la dureza propia del acero 1018.

En el segundo caso (Zn-3% Al) se distinguieron 6 capas diferentes, arrojando como resultado la primer capa con mayor dureza promediada (255.02 HV), mientras que las subsecuentes, fueron ascendiendo de la capa interna hacia la externa, de forma similar que el contenido anterior.

Finalmente para el recubrimiento con mayor contenido de aluminio (Zn-5% Al) se reconocieron 7 capas, siendo este el grupo de probetas recubiertas con mayor número de capas identificadas. Su tendencia fue ascendente hasta la capa número 3, donde se halló un pico de dureza (170.44 HV), subsecuentemente, las durezas fueron disminuyendo. En forma general, se obtuvieron mayor dureza en los recubrimientos con contenido de Zn-3% Al, con un promedio total entre sus capas de 190.55 HV.

Caracterización por MEB

Espesores.

Mediante espectrometría de electrones retrodispersados se realizó el análisis de 3 probetas seleccionadas (1 por cada recubrimiento de aleación diferente). En primer lugar, se obtuvieron las medidas de los espesores de las muestras analizadas, las cuales se muestran en las siguientes imágenes.

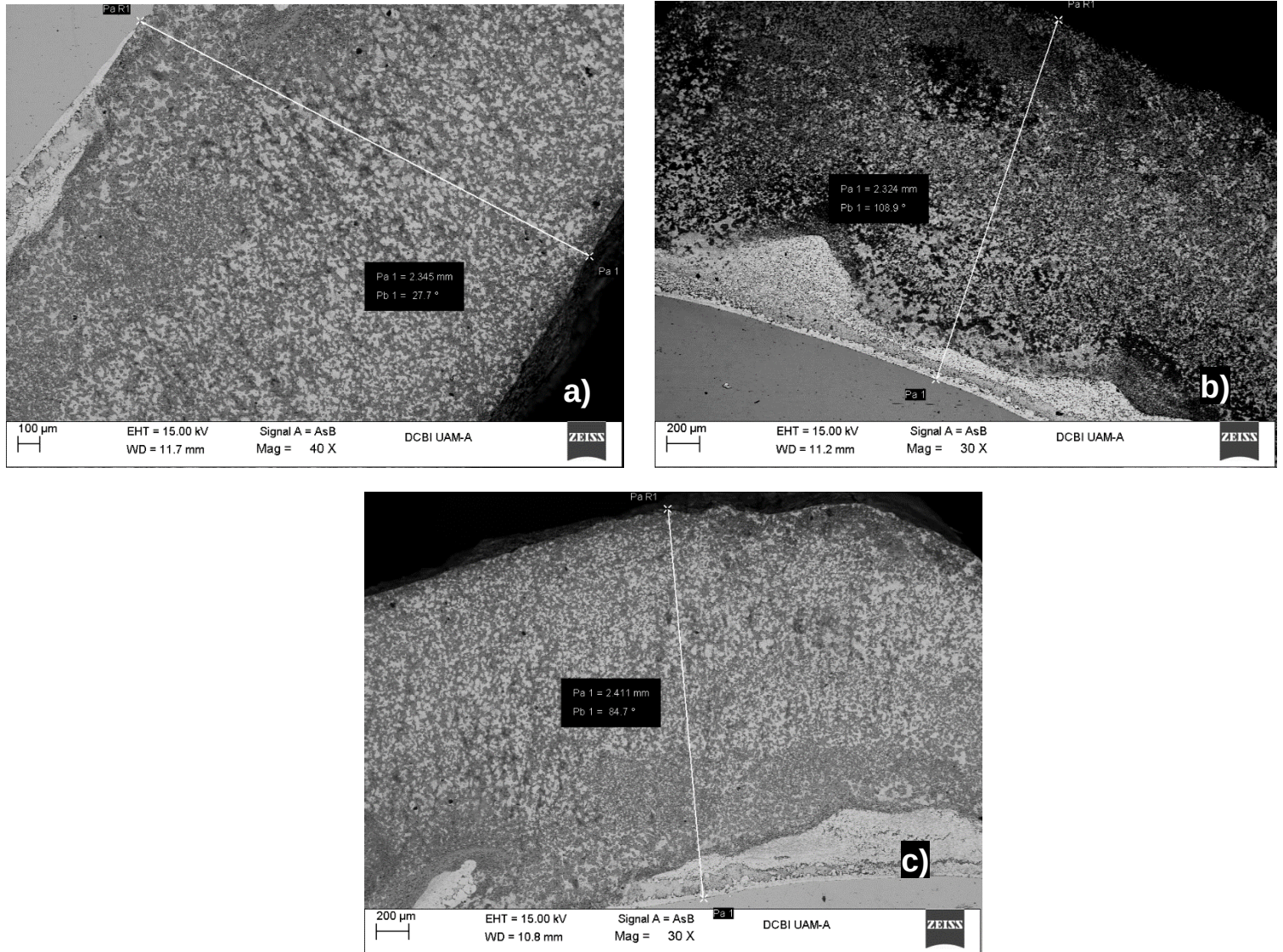


Fig. 17. Conjunto de micrografías de los espesores obtenidos mediante Espectrometría de Electrones Retrodispersados.

En la figura 14 se muestran las imágenes correspondientes a la medición de espesores, en el inciso a) se presenta el recubrimiento de Zn-1.5% Al, para el cual se obtuvo que el espesor en esa zona fue de 2.345 mm, mientras que, en el inciso b) se obtuvo 2.324 mm para el contenido Zn-3% Al, y finalmente la aleación Zn-5% Al se presenta en el inciso c) para el cual se obtuvo la mayor magnitud de espesor, con

2.411 mm en este caso. Estas medidas fueron obtenidas a 30X para poder apreciar adecuadamente el espesor de los recubrimientos, a un voltaje de 15.00 kV, ya que por ser muy conductor el material, no fue necesario emplear tanto voltaje

Morfología.

Gracias a la espectrometría de electrones retrodispersados se logró obtener un bosquejo o mapeo en imágenes de alta resolución, la composición y topografía superficial de las muestras.

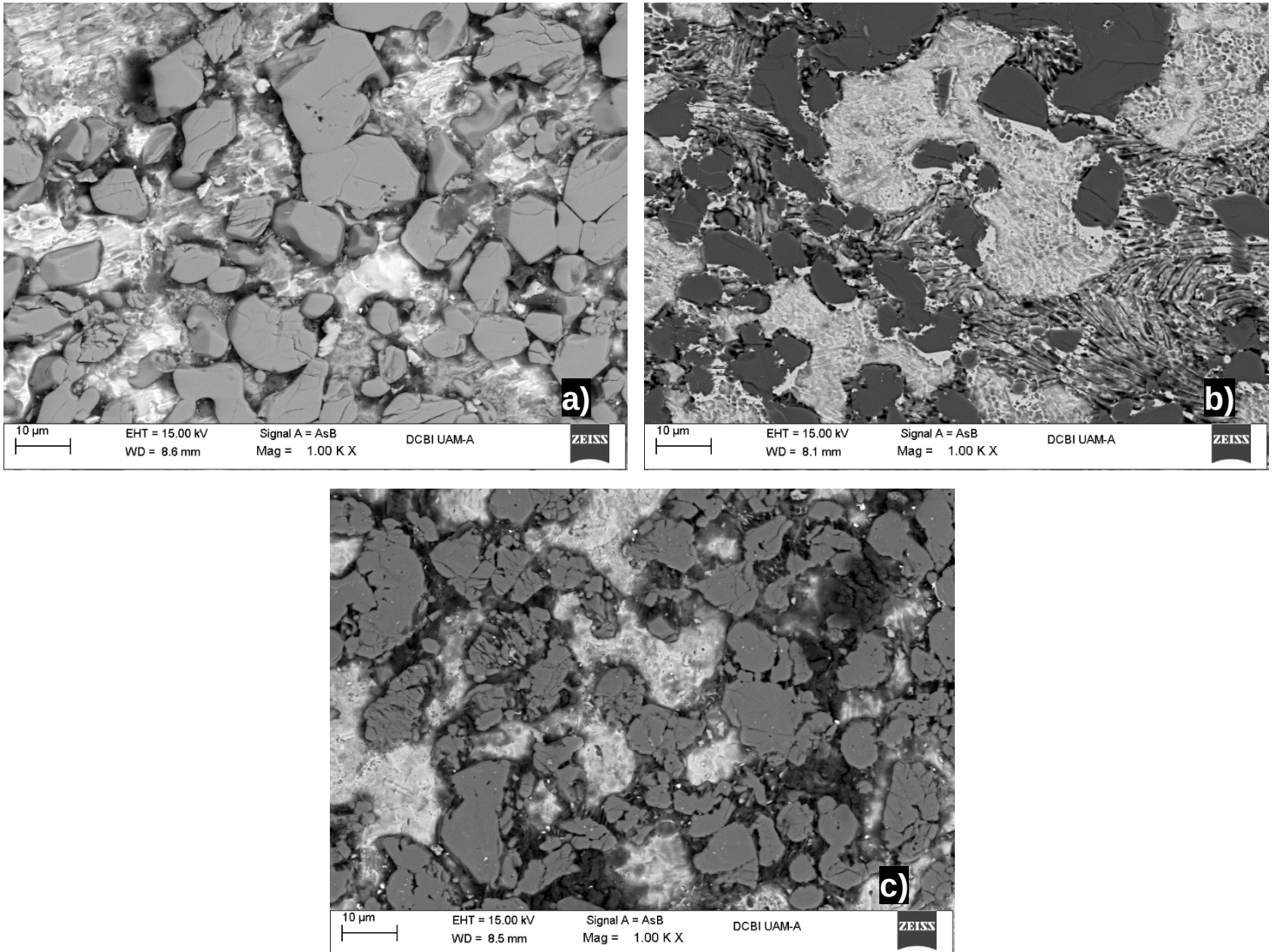


Fig. 18 Micrografías obtenidas a 1000X mediante espectrometría de electrones retrodispersados.

En la figura 15 se muestran las morfologías superficiales que presentó cada recubrimiento. Mediante el detector de electrones retrodispersos, el cual, gracias a las variaciones en el número atómico de los elementos encontrados en la superficie se tiene la variación en tonos grises, donde las zonas más claras corresponden al elemento más pesado, ya que este emite mayor cantidad de energía y presenta una

coloración “más brillante”. En general, se analizaron las fases de distinta coloración obteniendo que, los granos más oscuros son de Aluminio, la matriz “blanca” está constituida por Zinc, mientras que las zonas de color gris intermedio, están compuestas por Zinc en mayor cantidad y un bajo contenido de Aluminio. El inciso a) corresponde al recubrimiento Zn-1.5% Al, presentando una concentración de granos de Aluminio con granos de tamaño medianamente uniforme, el inciso b) corresponde al revestimiento Zn-3% Al, donde se hallaron zonas más grandes, ricas en Zinc y granos de menor tamaño de Aluminio en una matriz compuesta por Zn-Al. Mientras que, para el tercer caso Zn-5% Al se pueden observar grupos de granos de Aluminio, los cuales tienen la apariencia de estar “rayados”, lo cual, no se presentó en las morfologías anteriores.

Defectos.

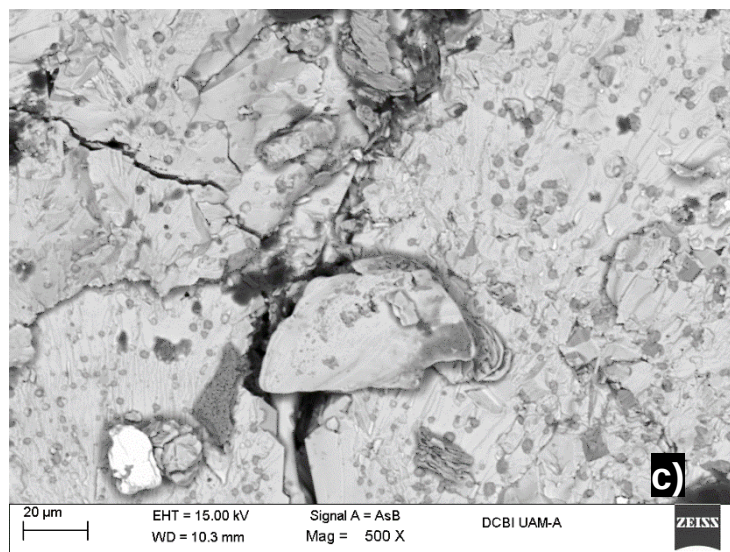
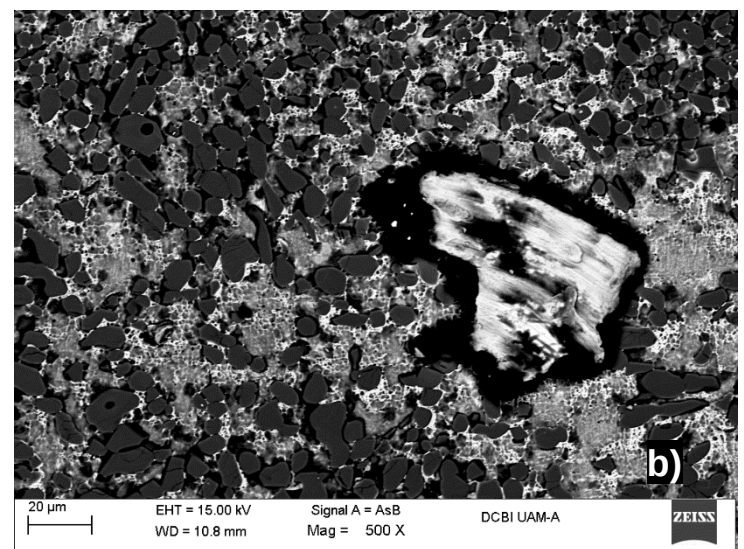
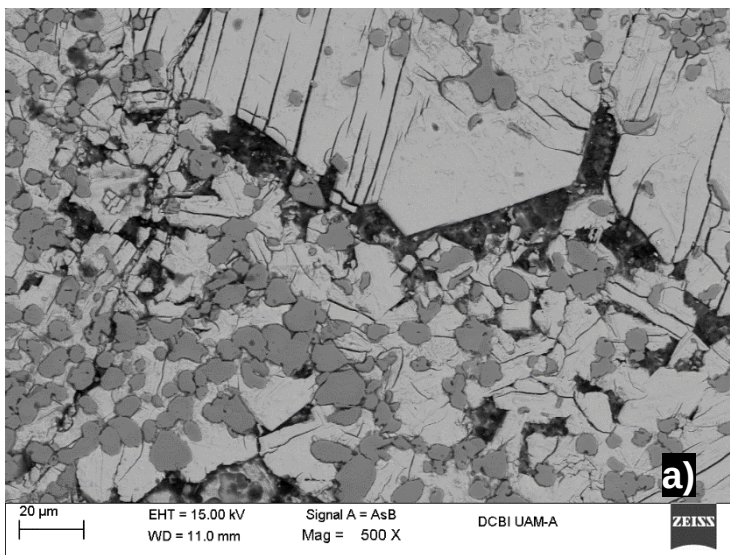


Fig. 19 Micrografías de los defectos hallados en las diferentes composiciones de los recubrimientos estudiados.

En la figura 16, se muestran los defectos hallados en las superficies de los recubrimientos, en el inciso a) y c), de contenido Zn-1.5% Al y Zn-5% Al respectivamente presentaron una grieta notable y la propagación de las mismas, lo cual es una condición indeseable ya que esto podría favorecer el proceso de corrosión en la aplicación industrial de este tipo de materiales. Lo cual pudo por las condiciones de tiempo y forma en que propició el enfriamiento con el cual se generaron estos revestimientos sobre las probetas de acero 1018. En el inciso b), correspondiente a la aleación Zn-3% Al se observó hueco que se atribuye a la “porosidad”, ya que, tanto en espesores como en superficie, no se lograron que los recubrimientos fueran totalmente homogéneos.

Composición química.

Se realizó la caracterización de composición química para comprobar que las aleaciones son que fueron creados los diferentes recubrimientos cumplieron con las especificaciones establecidas inicialmente. En la tabla 5 se muestran los resultados en porcentaje en peso de cada elemento presente obtenidos de este estudio, en el cual se comprueba que los recubrimientos cumplieron de forma aproximada a los valores establecidos al inicio de este proyecto de investigación. Datos destacables de este análisis en que en la primera aleación (Zn-1.5% Al) se detectó la presencia de Cl, el cual no fue identificado en las aleaciones restantes.

Tabla 5 Análisis químico por EDS en porcentaje en peso.

Aleación	Composición química						
	C	O	Al	Si	Fe	Zn	Cl
Zn-1.5% Al	3.92	9.52	1.52	0.38	7.21	97.3	0.19
Zn- 3% Al	2.13	4.52	3.34	0.18	5.02	96.85	-
Zn- 5% Al	5.3	5.96	5.19	0.36	9.84	95.03	-

Conclusiones.

Debido a que no se encuentran estudios reportados de este tipo de procedimientos aplicados a aceros de bajo contenido de carbono, el presente proyecto de investigación permitió estudiar diferentes tipos de recubrimientos compuesto por 3 aleaciones diferentes, generados sobre barras de acero 1018. Si bien, se modificó el contenido de uno de los valores establecidos inicialmente (de 7% Al se redujo al 1.5% Al), esto debido a un fenómeno inesperado y para fines prácticos de la investigación, decidió modificarse. Logrando así el objetivo principal de la comparación de múltiples características y/o propiedades mismas de los revestimientos obtenidos por inmersión en caliente. Así mismo, se obtuvo la adherencia de los recubrimientos y fue posible identificar la presencia de múltiples capas internas de compuestos intermetálicos como se predice en los diagramas de fase.

Se verificaron los contenidos específicos de los recubrimientos, los cuales cumplieron con la composición asentada. Microestructuralmente hablando, el contenido de aluminio logró inhibir la formación del compuesto Fe-Zn (esta aleación permitiría que el proceso de corrosión se acelere). Mediante el análisis químico por EDS, se comprobó el comportamiento del aluminio, de reaccionar primero con el hierro, siendo constituida la primera capa próxima al sustrato de acero por un mayor contenido de aluminio, y este se redujo en cuanto al crecimiento de capas hacia el exterior, con una presencia mínima de aluminio en las últimas capas identificadas. De los 3 casos estudiados, el recubrimiento con composición Zn-5% en peso de Aluminio presentó mejores propiedades en cuanto a una alta dureza, un revestimiento de mayor espesor, y las mejores características de adhesión y baja facilidad de rayado; por lo que, entre las 3 opciones analizadas, este recubrimiento resultaría el más favorable si se busca una mejora en la dureza.

Trabajo a futuro.

Debido al enfoque de este proyecto, durante su desarrollo se han identificado nuevas líneas de investigación a futuro de suma importancia; para los cuales se espera sean retomados los principios de este trabajo con fin de realizar un estudio profundo del comportamiento de estos recubrimientos obtenidos por inmersión en caliente, en una atmósfera o medio corrosivo, para evaluar principalmente esta propiedad que por alcance del proyecto no ha sido posible analizarla a detalle.

Referencias Bibliográficas.

S. Shibli, B. Meena, and R. Remya, A REVIEW ON RECENT APPROACHES IN THE FIELD OF HOT DIP ZINC GALVANIZING PROCESS, *Surface and Coatings Technology*, vol. 262, pp. 210–215, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.054>

Núñez, A. (2015). LUCHANDO CONTRA LA CORROSIÓN. PROTECCIÓN EFICAZ. *FERREPRO RECUBRIMIENTOS*, 2(8), 35,36.

Norma Española UNE-EN ISO 1461, RECUBRIMIENTOS GALVANIZADOS EN CALIENTE SOBRE PRODUCTOS ACABADOS EN HIERRO Y ACERO. Noviembre 1999.

A. Marder, THE METALLURGY OF ZINC-COATED STEEL, *Progress in Materials Science*, vol. 45, no. 3, pp. 191–271, 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00006-1)

Salas Márquez, J., Dénova Reyes, C., Barba Pingarrón, A., Cervantes Cabello, J., Trujillo Barajan, M., Roviroza López, J., & Garduño, E. (2008). *RESISTENCIA AL DESGASTE DE ACEROS ZINALQUIZADOS POR INMERSIÓN EN CALIENTE*, pp. 960-964, 2008. (CENISA), Instituto de investigaciones en materiales, UNAM.

Barba Pingarrón , A., Roviroza López , J., Trujillo Barragán , M., Valdez Navarro , R., Hernández Gallegos, M., & Rojas Morín , A. *EXPERIENCIAS Y PROPUESTAS PARA EL USO DEL ZINC Y SUS ALEACIONES*. Pp. 517-521, 2011. (CENISA), UNAM.

Romea, C. (17 de Enero de 2019). LA GALVANIZACIÓN, UNA RESPUESTA A LA CORROSIÓN. *ZIGURAT Global Institute of Technology*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2021, de <https://www.e-zigurat.com/blog/es/galvanizacion-respuesta-corrosion/>

Caballero Contreras, I. F. (2015). *COMPARACIÓN MICROESTRUCTURAL DE RECUBRIMIENTOS DE ZN Y ZN-15% AL SOBRE UN ACERO 8620 OBTENIDOS POR INMERSIÓN EN CALIENTE*, pp. 10-35, 2015. (Tesis), UAM.

Frías, H. P. (1984). *RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS CON ZINC Y SU APLICACIÓN*, pp. 44-61. (Tesis), IPN.

Hernández, J., & Suárez, M. (2020). EFECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BAÑO EN LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DE ZINC POR INMERSIÓN EN CALIENTE: UNA REVISIÓN. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología* (23),40-52. doi:<https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.04>

Ruiz-Gallegos, M., López-García, R., Hernandez-Ávila, J., Cerecedo-Saenz, E., Salinas-Rodríguez, E., & Maldonado-Reyesa, A. (2020). *ESTRUCTURA Y CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE DE ACEROS DE BAJO CARBONO SUMERGIDOS EN MEDIO ÁCIDO* (VOL. 8). Pp. 106-111, *Pädi Boletín científico*, UA EH.

Torres, A., Pérez, J., Martínez, M., & Herrera, J. (Diciembre de 2005). *ESTADO DEL ARTE EN EL USO DE ACERO GALVANIZADO COMO ELEMENTO DE REFUERZO Y PRESFUERZO EN*

ESTRUCTURAS DE CONCRETO. Sitio electrónico del Instituto Mexicano del Transporte.
Obtenido de <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=289&IdBoletin=98>

Mendala, J. (20 de Mayo de 2011). INFLUENCE OF THE COOLING METHOD ON THE STRUCTURE OF 55ALZN COATINGS. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 22, 1-7.

Maleki, A., Panjepour, M., Niroumand, B. *et al.* MECHANISM OF ZINC OXIDE–ALUMINUM ALUMINOTHERMIC REACTION. *J Mater Sci* 45, 5574–5580 (2010).
<https://doi.org/10.1007/s10853-010-4619-9>