

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA Y VALORES ÓPTIMOS DE LAS  
VARIABLES METALÚRGICAS EN EL PROCESO DE GALVANIZADO EN  
CALIENTE POR INMERSIÓN Y CENTRIFUGADO, EN LA PLANTA PILOTO DE  
LA EMPRESA METALLAN S.A.S.**

**ANA MILENA ANGARITA ACOSTA  
DARÍO JOSÉ SALAS CORTÉS  
ANDRÉS FELIPE CRUZ PALACIOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA Y VALORES ÓPTIMOS DE LAS  
VARIABLES METALÚRGICAS EN EL PROCESO DE GALVANIZADO EN  
CALIENTE POR INMERSIÓN Y CENTRIFUGADO, EN LA PLANTA PILOTO DE  
LA EMPRESA METALLAN S.A.S**

**ANA MILENA ANGARITA ACOSTA  
DARÍO JOSÉ SALAS CORTÉS  
ANDRÉS FELIPE CRUZ PALACIOS**

**Trabajo de Grado presentado para optar el título de Ingeniero Metalúrgico**

**Director**

**DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS**

**Ph.D en Corrosión**

**Co-Director**

**EDUARDO NIÑO RUÍZ**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **DEDICATORIA**

*A Dios por darme en cada momento sabiduría, salud y colmarme de bendiciones para lograr uno de mis más grandes sueños.*

*A mi padre Hemel Angarita por ser un padre excepcional, por brindarme una formación ética y moral que ha hecho de mí una mujer íntegra, responsable, respetuosa y soñadora. Por guiarme en cada paso de mi vida y apoyarme en cada una de mis decisiones. A él por ser un padre comprensivo y amoroso.*

*A mi madre Ana Argénida Acosta por estar siempre al pendiente en cada momento de mi vida. Por ser el mejor ejemplo de una dama y madre inigualable. Tu amor y confianza me han guiado por este largo trayecto en el que seguiré hasta cumplir mis metas propuestas.*

*A mis hermanos Roberto y María Angélica, por compartir durante todo este tiempo alegrías y experiencias increíbles. Por ser pacientes y estar en cada momento.*

*A mi abuela Ana Helena, mi tía Maritza y mi tío Ramiro, que a pesar de la distancia han estado siempre interesados por mi bienestar y mi formación como profesional. Infinitas gracias por su apoyo incondicional.*

*Agradezco a todos mis compañeros por acompañarme durante este camino. Con ellos compartí agradables momentos que hicieron que el transcurso en el alma mater fuera sin duda difícil de olvidar.*

*A mis amigas Paula Ramírez, Ginna Gómez y Lina Naranjo, porque desde que nos conocimos en el comienzo de esta experiencia de vida hemos permanecido juntas. Gracias por cada momento compartido.*

*A Mercy mendoza, Cíndy Gutierrez, Laura Almeyda, Valeria Posada y Derly Rivera, porque a pesar de coincidir tarde en nuestra formación como ingenieras metalúrgicas, pasamos muy buenos momentos expresando nuestros puntos de vista en nuestro club de lectura.*

*A él, porque desde el momento en que nos conocimos ha estado en cada instante de mi vida. Por ayudarme a crecer como persona, a confiar en mí misma. Por ser una compañía increíble y por brindarme siempre su amor y apoyo. Gracias Víctor.*

*Los quiero*

*Anita*

## **DEDICATORIA**

*A mi papá, José De Jesús Salas González por ser ejemplo de fortaleza y ser constante apoyo en la búsqueda de mis metas, enseñándome a perseguirlas por el camino correcto, sintiéndose siempre orgulloso de lo que soy y de lo que he logrado.*

*A mi querida madre, Nuvia Cortés Bolaño quien es sinónimo de amor incondicional y esmero por sacar adelante a su hijo. Por ser esa mujer que ha inculcado en mí los valores que me hacen ser quien soy.*

*Gracias padres, porque son la inspiración que me impulsa a salir adelante, porque no tengo palabras para describir cuan importantes son en mi vida y porque aunque han estado lejos siempre los he sentido junto a mí. Los quiero, más de lo que puedan saber y más de lo que pueda demostrarles.*

*A mis familiares que siempre se preocupan y alegran por cada paso que doy en la vida y estar en esos momentos de necesidad.*

*A mi novia, Claudia Rodríguez que con su cariño y amor me ha acompañado y ha sido un aliento para lograr este objetivo.*

*A mis compañeros, Andrés Felipe y Ana con quienes además de una buena amistad, formamos un excelente grupo de trabajo, siempre responsables y comprometidos con este proyecto.*

*Y por último a mis amigos, con los que reí, celebré, sufrí y disfruté, haciendo mucho más agradable este recorrido. Me llevo de cada uno de ellos una enseñanza y un grato recuerdo de este paso por la universidad.*

*A todos, gracias.*

*Darío José Salas Cortés.*

## **DEDICATORIA**

*Le agradezco primeramente a Dios por haberme guiado y acompañado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de experiencias, aprendizajes y lo más importante felicidad.*

*Le doy gracias a mis padres José Luis y Sandra Inés por el apoyo brindado en los momentos que más los necesitaba, por estar presente siempre para lo que necesitara, por haberme dado una excelente educación, por los valores que me han inculcado y lo más importante por el gran ejemplo que son para mí.*

*A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y representar la unión familiar. A Carolina por ser mi ejemplo de desarrollo profesional, por el apoyo que toda la vida me ha brindado y por ser para mí una gran compañera de guerra, A Johan y Lizeth por llenar mi vida de alegrías y amor en los momentos importantes.*

*A todos mis tíos en especial Fernando y Rosario por acompañarme y apoyarme en los momentos que más lo necesitaban, por el apoyo que me han dado durante toda mi vida y por ser como mis segundos padres.*

*Al Dr. Milton Salazar y la Dra. Natalia Jaramillo por ser una parte muy importante de mi vida, por el apoyo brindado durante toda mi carrera, por la confianza que han depositado en mí y lo más importante por ser un excelente ejemplo a seguir.*

*A Darío y Ana Milena por haber sido excelentes compañeros de tesis y amigos, por haberme tenido la paciencia necesaria y por motivarme para seguir adelante en los momentos de desesperación.*

*A todos mis amigos en especial: Jeison Manco, Zayda Castro, Jean Chacón, Brian Chacón, Carlos Varela, Heber Bueno, y Roger Bueno por creer en mí y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré y sobre todo por el apoyo brindado en los momentos que más lo necesitaba.*

*Andrés Palacios.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la empresa METALLAN S.A.S. Al ingeniero Eduardo Niño por la confianza depositada en nosotros para la realización de este proyecto y su acompañamiento como codirector durante su desarrollo.*

*A nuestro director el profesor Darío Peña por su apoyo y por creer en nuestro desempeño como grupo de trabajo.*

*Al jefe de planta Pablo Acuña y los operarios de la empresa por su gran ayuda en la realización de las pruebas necesarias para llevar a cabo el proyecto.*

*A los profesores de la escuela de ingeniería metalúrgica por la formación brindada y en especial al profesor Custodio Vásquez por su gran aporte en el conocimiento para el desarrollo de este proyecto.*

*A los técnicos de los laboratorios de la escuela por las enseñarnos cada una de sus experiencias que fueron de gran aporte para nuestra formación como ingenieros.*

*Al laboratorio de microscopía del parque tecnológico Guatiguará por su colaboración con los servicios prestados.*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	21
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	23
1.1. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PIEZAS .....	25
1.1.1. Limpieza y desengrase .....	25
1.1.2. Decapado. ....	26
1.1.3. Tratamientos con flujo.....	26
1.1.4. Secado y precalentamiento.....	27
1.2. INMERSIÓN DE LAS PIEZAS EN EL BAÑO DE CINC.....	27
1.2.1. Composición química del baño de cinc .....	27
1.2.2. Temperatura del baño de cinc .....	28
1.2.3. Velocidad de inmersión y de retiro de las piezas del baño de cinc.....	28
1.2.4. Velocidad de centrifugado.....	29
1.2.5. Tiempo de permanencia en el baño.....	29
1.3. INSPECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD.....	30
1.3.1. Reparación de piezas galvanizadas.....	31
1.3.1.1. Metalización (termo-rociado).....	31
1.3.1.2. Estañar la superficie. ....	31
1.3.1.3. Aplicación de pinturas. ....	31
2. OBJETIVOS .....	33
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	33
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
3. METODOLOGÍA.....	34
3.1. VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES DEL PROCESO .....	34

3.1.1. Temperatura de precalentamiento de las piezas.....	34
3.1.2. Temperatura del baño de cinc .....	35
3.1.3. Velocidad de centrifugado.....	35
3.1.4. Tiempo de permanencia en el baño.....	35
3.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	36
3.3. REALIZACIÓN DE PRUEBAS .....	37
3.3.1. Desengrase .....	39
3.3.2. Decapado .....	39
3.3.3. Tratamiento con flujo .....	41
3.3.4. Precalentamiento .....	42
3.3.5. Galvanizado.....	42
3.3.6. Centrifugado .....	44
3.3.7. Enfriamiento.....	45
3.3.8. Medición de espesores .....	45
3.4. MANEJO DE RESIDUOS .....	46
3.4.1. Desengrase .....	46
3.4.2. Decapado .....	47
3.4.3. Tratamiento con flujo .....	47
3.4.4. Matas de cinc.....	47
3.5. OPTIMIZACIÓN .....	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	49
4.1. RESULTADOS REALIZACIÓN DE PRUEBAS .....	49
4.1.1. Resultados galvanizado por centrifugado .....	49
4.1.2. Resultados galvanizado por inmersión.....	51
4.1.3. Promedios de medidas de espesor .....	52
4.2. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	53
4.2.1. Análisis estadístico galvanizado por centrifugado .....	53
4.2.2. Análisis estadístico galvanizado por inmersión .....	57
4.3. RESULTADOS MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM) .....	60

4.3.1. SEM del galvanizado por centrifugado.....	61
4.3.2. SEM del galvanizado por inmersión.....	62
5. CONCLUSIONES .....	63
6. RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama binario Hierro-Cinc.....	23
Figura 2. Fases formadas en el proceso de galvanizado en caliente. ....	24
Figura 3. Etapas del proceso de galvanizado. ....	25
Figura 4. Micrografías de la microestructura del material base de las arandelas determinadas por microscopía óptica. (a) 500X. (b) 2000X.....	38
Figura 5. Des-Ox usado en la etapa de desengrase de las piezas a galvanizar .....	39
Figura 6. KLEANEX DEC AC12-LE usado en la etapa de decapado de las piezas a galvanizar. ....	40
Figura 7. Flux BYC Zn-5 usado en la preparación de las piezas a galvanizar. ...	41
Figura 8. Etapa de precalentamiento. (a) precalentamiento piezas galvanizadas por centrifugado. (b) precalentamiento piezas galvanizadas por inmersión. ....	42
Figura 9. Microestructura del cinc utilizado en el baño para el recubrimiento. ...	43
Figura 10. Etapa de galvanizado por centrifugado. (a) entrada en el baño del cinc. (b) salida del baño de cinc. ....	44
Figura 11. Etapa de galvanizado por inmersión. (a) entrada en el baño del cinc. (b) salida del baño de cinc. ....	44
Figura 12. Etapa de centrifugado .....	45
Figura 13. Enfriamiento de las piezas galvanizadas. (a) por centrifugado. (b) por inmersión. ....	45
Figura 14. Medición de espesores con el medidor de espesores POSITECTOR. ....	46
Figura 15. Puntos de medición de espesor de la arandela. (a) cara frontal. (b) cara posterior. ....	46
Figura 16. Arandelas galvanizadas. (1) por centrifugado. (2) por inmersión.....	49

Figura 17. SEM del recubrimiento de cinc, de la arandela galvanizada por centrifugado.5000X.....61

Figura 18. SEM del recubrimiento de cinc de la arandela galvanizada por inmersión.5000X.....62

## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Grafica 1. Espesores obtenidos de experiencias reales en plantas de galvanizado para iguales condiciones con diferente tiempo de permanencia en el baño.....	36
Grafica 2. Diagrama de Pareto estandarizada para espesor de piezas galvanizadas por centrifugado .....	56
Grafica 3. Diagrama de Pareto estandarizada sin las variables excluidas para espesor de piezas galvanizadas por centrifugado.....	56
Grafica 4. Efectos de las variables del proceso de galvanizado por centrifugado, sobre el espesor .....	57
Grafica 5. Diagrama de Pareto estandarizada para espesor de piezas galvanizadas por inmersión.....	59
Grafica 6. Efectos de las variables del proceso de galvanizado por inmersión, sobre el espesor .....	60

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Algunos defectos aceptados y rechazados de piezas galvanizadas.....	30
Tabla 2. Diseño de experimentos para galvanizado por inmersión .....	37
Tabla 3. Diseño de experimentos para galvanizado por centrifugado .....	37
Tabla 4. Composición química de la materia prima determinada por espectroscopía de emisión atómica en el laboratorio del INCITEMA-UPTC, Tunja .....	38
Tabla 5. Propiedades físico químicas del KLEANEX DEC AC12-LE.....	40
Tabla 6. Condiciones de operación del KLEANEX DEC AC12-LE .....	40
Tabla 7. Propiedades físico químicas del Flux BYC Zn-5.....	41
Tabla 8. Composición química del cinc.....	43
Tabla 9. Resultados de medición de espesores de piezas galvanizadas por centrifugado.....	49
Tabla 10. Resultados de medición de espesores de piezas galvanizadas por inmersión.....	51
Tabla 11. Promedios de espesores de piezas galvanizadas por centrifugado.....	52
Tabla 12. Promedios de espesores de piezas galvanizadas por inmersión.....	52
Tabla 13. Coeficientes de regresión para Espesor para galvanizado por centrifugado .....	53
Tabla 14. Resultados estimados para espesor para galvanizado por centrifugado.....	54
Tabla 15. Valores óptimos de las variables del proceso de galvanizado en caliente por centrifugado.....	54
Tabla 16. Análisis de varianza.....	55
Tabla 17. Coeficientes de regresión para Espesor para galvanizado por inmersión .....	57
Tabla 18. Resultados estimados para espesor para galvanizado por inmersión.....	58

Tabla 19. Valores óptimos de las variables del proceso de galvanizado en caliente por inmersión. ....	58
Tabla 20. Análisis de varianza. ....	59
Tabla 21. Composición química del punto especificado en la figura 17 (fase Zeta), en el recubrimiento de cinc por centrifugado, determinado por SEM EDS .....	61
Tabla 22. Composición química del punto especificado en la figura 18 (fase Zeta), en el recubrimiento de cinc por centrifugado, determinado mediante SEM EDS.....	62

## RESUMEN

**TÍTULO:** DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA Y VALORES ÓPTIMOS DE LAS VARIABLES METALÚRGICAS EN EL PROCESO DE GALVANIZADO EN CALIENTE POR INMERSIÓN Y CENTRIFUGADO, EN LA PLANTA PILOTO DE LA EMPRESA METALLAN S.A.S.<sup>1</sup>

**AUTORES:** ANA MILENA ANGARITA ACOSTA, DARÍO JOSÉ SALAS CORTÉS, ANDRÉS FELIPE CRUZ PALACIOS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Galvanizado en caliente, centrifugado, cinc.

### CONTENIDO:

Con el objetivo de mejorar la resistencia a la corrosión del hierro y el acero, se emplean diversos procesos, en los cuales se obtiene un recubrimiento de metal que ayuda a prevenir la corrosión y que actúa como elemento protector, lo cual evita que se lleven a cabo las reacciones corrosivas. Uno de esos procesos es la galvanización en caliente. Esta técnica consiste en la formación de un recubrimiento de cinc y/o de aleaciones de cinc-hierro sobre productos de hierro y acero, el cual se consigue mediante la inmersión de los productos o piezas, con una previa preparación de su superficie, en un baño de zinc fundido. La empresa METALLAN S.A.S produce piezas hechas a partir de fundición y perfiles de acero usadas en aplicaciones eléctricas. Estas requieren una protección contra la corrosión que aumente su vida útil. Para ello, la empresa realiza en las piezas un proceso de galvanizado en caliente, el cual anteriormente era delegado a otras empresas por fuera de Santander, lo que generaba costos adicionales por transporte, coste de la técnica y eliminación de imperfecciones. Debido a esto, la empresa decidió implementar una planta de galvanizado por inmersión en caliente. Para garantizar el espesor requerido del recubrimiento es necesario el control de las variables que intervienen en el proceso; Para ello se realizaron una serie de pruebas mediante un diseño de experimentos, que ayudaron a determinar estadísticamente los valores óptimos de dichas variables. Además se establecieron los procedimientos adecuados para la preparación de las piezas, el manejo de residuos químicos y control de calidad de los recubrimientos obtenidos en el proceso.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado. Modalidad Investigación.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímica, Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D Darío Yesid Peña Ballesteros. Codirector: Ing. Eduardo Niño Ruíz.

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF THE INFLUENCE AND OPTIMUM VALUES OF THE METALLURGICAL VARIABLES IN HOT-DIP AND CENTRIFUGED GALVANIZING PROCESS, IN THE PROTOTYPE PLANT OF METALLAN S.A.S COMPANY.<sup>2</sup>

**AUTHORS:** ANA MILENA ANGARITA ACOSTA, DARÍO JOSÉ SALAS CORTÉS, ANDRÉS FELIPE CRUZ PALACIOS\*\*

**KEYWORDS:** Hot-dip galvanizing, centrifuged, zinc.

### DESCRIPTION:

In order to improve the corrosion resistance of iron and steel, different processes are employed, in which a metal coating that helps prevent corrosion and acts as a protective element is obtained, which prevents to be carried out corrosive reactions. One such process is hot dip galvanizing. This technique consists in the formation of a coating of zinc and / or zinc-iron alloys on iron and steel, which is obtained by immersing the product or part, with a previous preparation of the surface in a bath of molten zinc

METALLAN S.A.S Company produces parts made from cast iron and steel profiles used in electrical applications. These require corrosion protection to increase its useful life. To do this, the company carries on the pieces a process of hot dip galvanizing, which was previously delegated to other companies outside of Santander, generating additional costs for transportation, technical costs and elimination of imperfections. Because of this, the company decided to implement a hot-dip galvanizing plant. To ensure the required thickness of the coating, it is necessary to control the variables involved in the process, for this, a series of tests were performed using a experiments design that helped to statistically determine the optimum values of these variables. Besides, adequate procedures were established for pieces preparation, the chemical residues management and quality control of coatings obtained in the process.

---

<sup>2</sup> Bachelor Thesis. Investigation modality.

\*\* Faculty of Physical-Chemistry Engineering School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Ph.D Darío Yesid Peña Ballesteros. Co-director: Eng. Eduardo Niño Ruíz.

## INTRODUCCIÓN

El hierro y el acero son materiales ampliamente utilizados por su versatilidad y propiedades físicas. La exposición continua a los ambientes normales de trabajo, hacen que estos materiales puedan llegar a sufrir el fenómeno de corrosión. Esta corrosión es una oxidación espontánea del metal, que se produce a través de reacciones químicas o electroquímicas [1]. Con el objetivo de mejorar la resistencia a la corrosión de estos metales en específico, se emplean diversos procesos, en los cuales se obtiene un recubrimiento de metal que ayuda a prevenir la corrosión y que actúa como elemento protector, lo cual evita que se lleven a cabo dichas reacciones. Uno de esos procesos es la galvanización en caliente. Esta técnica consiste en la formación de un recubrimiento de cinc y/o de aleaciones de cinc-hierro sobre productos de hierro y acero, el cual se consigue mediante la inmersión de los productos o piezas, con una previa preparación de su superficie, en un baño de zinc fundido [2]. Además, se estima que el galvanizado en caliente es posiblemente el proceso más ecológico para evitar la corrosión por lo que se ha venido realizando con mucha frecuencia en la industria metalúrgica. El galvanizado representa el uso eficiente del cinc para proteger el acero durante largos períodos, lo que significa un ahorro de recursos con un impacto mínimo en el medio ambiente [3].

Para obtener un recubrimiento adecuado de cinc, es necesario realizar una preparación de las piezas que serán sometidas a la técnica para evitar defectos posteriores en las mismas. Dentro de la preparación se incluyen tres etapas. La primera es la etapa de la limpieza y el desengrase, en la cual ocurre la remoción de aceites y residuos de grasa provenientes de anteriores procesos de fabricación. La siguiente etapa es el decapado en la que se elimina la cascarilla y óxidos presentes en la superficie de la pieza a galvanizar. Y, la tercera y última etapa de

preparación de las muestras es el tratamiento con fundentes, el cual tiene por objeto limpiar los posibles óxidos formados luego de los procesos anteriores y así mismo preparar la superficie, para garantizar una adherencia uniforme y satisfactoria de cinc sobre el metal a galvanizar.

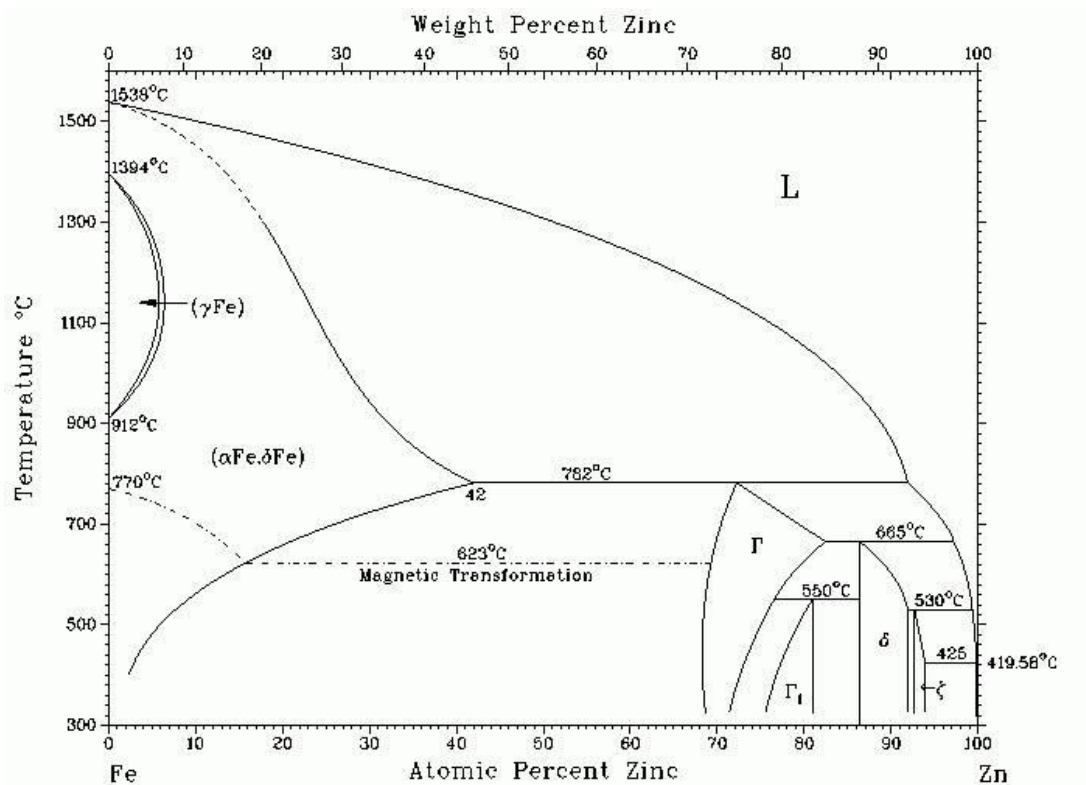
Luego de la preparación de la superficie, las piezas son sumergidas en el baño de cinc, a una temperatura aproximadamente de 450°C durante un corto periodo de tiempo a una determinada velocidad. Para el caso de piezas pequeñas y roscadas, se efectúa, además de las anteriores etapas una operación de centrifugado con el fin de eliminar el cinc remanente. Para dar como finalizado el proceso, se debe hacer un enfriamiento de las piezas y el almacenamiento de las mismas para ser distribuidas para cumplir con sus servicios. [4]

La empresa METALLANN S.A.S produce piezas hechas a partir de fundición y perfiles de acero usadas en aplicaciones eléctricas. Estas requieren una protección contra la corrosión que aumente su vida útil. Para ello, la empresa ha venido realizando en las piezas un proceso de galvanizado en caliente, el cual está siendo delegado a otras empresas por fuera de Santander, lo que genera costos adicionales por transporte, coste de la técnica y eliminación de imperfecciones. Debido a esto, la empresa ha decidido implementar una planta de galvanizado por inmersión en caliente. El presente proyecto, busca determinar los valores mejores de las variables que intervienen en el proceso, para lograr el espesor requerido para cada pieza. También se establecerán los procedimientos adecuados para la preparación de las piezas, el manejo de residuos químicos y control de calidad de los recubrimientos obtenidos en el proceso.

## 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La galvanización en caliente es un proceso mediante el que se obtienen recubrimientos de cinc, sobre hierro o acero, por inmersión en un baño de cinc fundido, a una temperatura aproximada de 450°C. Es el resultado de un proceso físico-químico que consigue una verdadera unión entre el hierro y el cinc, consiguiendo de este modo que el material férreo adquiera unas propiedades superficiales equivalentes a las del cinc, lo que conjunta una mejor resistencia frente a determinados medios corrosivos con las características mecánicas del metal base [6]. La reacción química entre el hierro base y el cinc del baño produce una estructura compleja formada por diferentes fases, de acuerdo con el diagrama binario de equilibrio hierro-cinc. (Figura 1)

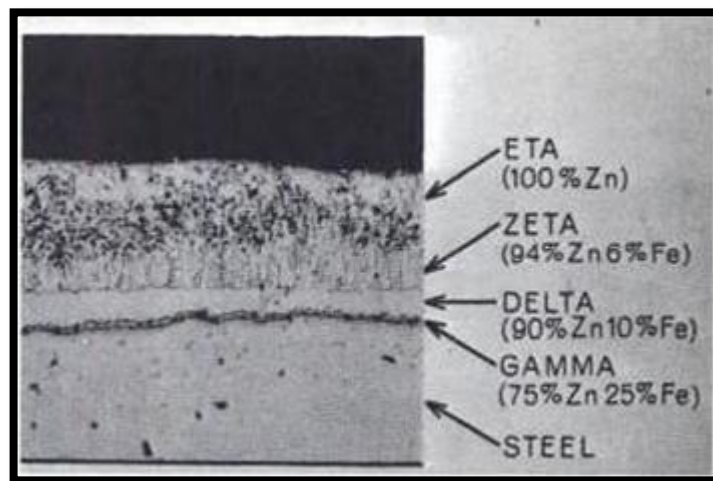
**Figura 1.** Diagrama binario Hierro-Cinc.



Fuente: Tomado de <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Fe-Zn.php>

Como consecuencia de la temperatura de galvanizado, la estructura de la capa sólida superficial puede presentar las siguientes fases: hierro base, gamma, delta prima, zeta y eta (en orden decreciente en contenido de hierro). Este mismo orden es el encontrado al observar una sección transversal del recubrimiento (Figura 2) aunque sus proporciones relativas estén en función de la temperatura del baño, del tiempo de inmersión y de las condiciones del metal base. [6]

**Figura 2.** Fases formadas en el proceso de galvanizado en caliente.



**Fuente:** Tomado de Porter Frank, ZINC HANDBOOK properties, processing and use in design.

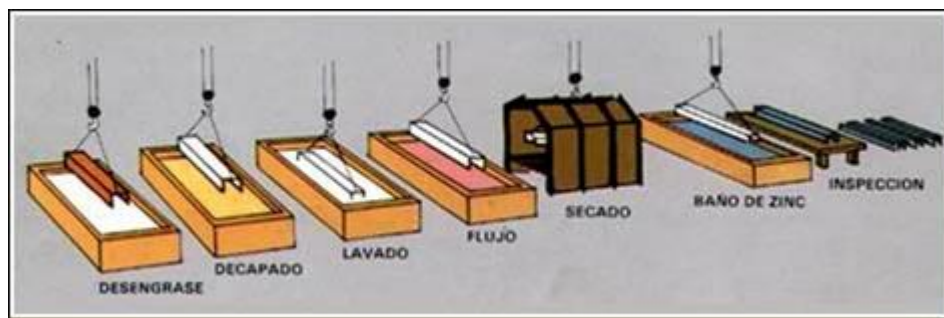
Página 233.

La **Fase Gamma ( $\Gamma$ )** es apreciable cuando se galvaniza con un tiempo de inmersión grande, debido a que requiere un tiempo de incubación, en la mayoría de los casos, sólo se observa como una línea entre el Acero y fase Delta. Tiene un amplio rango de solubilidad en estado sólido y sus límites han sido descritos como  $\text{FeZn}_3\text{-Fe}_5\text{Zn}_{21}$ , dando una composición “promediada” de  $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ . Las fases **Delta ( $\delta$ )**, aproximadamente  $\text{FeZn}_{10}$ , y **Zeta ( $\zeta$ )**, aproximadamente  $\text{FeZn}_{13}$ , son visibles e intermedias, a menos que se haya añadido Aluminio al baño de galvanización ya que este disminuye notablemente la reactividad del cinc y se limita la formación de estas fases. Estos compuestos son frágiles, y, si el material se deforma teniendo un gran espesor de recubrimiento, se formarían grietas en el depósito. La fase **Eta**

( $\eta$ ), corresponde a una capa de cinc prácticamente puro, puede desaparecer si el material después de galvanizado, se somete a un tratamiento térmico que favorece el crecimiento de la fase Zeta a expensas de la Eta. [14]

El proceso de galvanizado se realiza en diferentes etapas (Figura 3). La primera es la preparación de la superficie de las piezas. La siguiente etapa es la inmersión de las piezas en el baño de cinc para lograr el recubrimiento de las mismas; para el caso de piezas roscadas y de menor tamaño, es necesario realizar un proceso de centrifugado. Como última etapa del proceso se realiza la inspección y control de calidad del recubrimiento, con el fin de determinar si son necesarios procedimientos de reparación.

**Figura 3.** Etapas del proceso de galvanizado.



**Fuente:** Tomado de WordPress Galvanizado en caliente. Protección contra la corrosión para el acero <https://galvanizadoencaliente.wordpress.com/2011/06/24/galvanizadoencaliente/>

## 1.1. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PIEZAS

Esta etapa es fundamental para la obtención de una adecuada adherencia del recubrimiento de cinc en la superficie y se lleva a cabo en tres pasos:

**1.1.1. Limpieza y desengrase.** El desengrase tiene por objeto remover aceites y residuos de grasa que se encuentran en la superficie de la pieza debido a anteriores procesos de fabricación. Para ello, se emplean diferentes métodos de

limpieza, dentro de los cuales se encuentran el desengrase alcano y limpieza por detergente. El primero es usado para la remoción de grasas pesadas, pinturas, lacas y barnices empleado a una temperatura entre 65 y 90°C, y el tiempo de inmersión de la carga puede variar entre 1 y 20 minutos, dependiendo del grado de contaminación. El segundo, se utiliza para remoción de aceites ligeros y se lleva a cabo a una temperatura de 60°C; es importante realizar un enjuague con agua luego de la limpieza, pues de lo contrario la solución alcalina se llevara al baño de decapado afectando su acidez y por tanto su efectividad. [4]

**1.1.2. Decapado.** Es el método por el cual la cascarilla y el óxido son removidos de la superficie de los componentes y requiere el uso de soluciones ácidas [4]. Generalmente las piezas son sumergidas en ácido sulfúrico o ácido clorhídrico. La selección suele realizarse por factores económicos. El ácido sulfúrico cuesta menos pero requiere calentamiento, mientras que el ácido clorhídrico es usado en una concentración aproximada de 14 % en peso, y ácido sulfúrico a 10-14 % y temperatura de 60-80°C. Algunos inhibidores son añadidos al ácido para que cuando el óxido sea removido, ocurra un ataque muy pequeño al metal base. La actividad de la solución corrosiva es mantenida haciendo adiciones periódicas de ácido fresco, pero el contenido de acero va aumentando lo que baja la efectividad del corrosivo, el cual debe ser eventualmente remplazado. [5]

**1.1.3. Tratamientos con flujo.** Este tratamiento se emplea para remover cualquier traza remanente de óxido de cinc o acero y estabiliza el contacto metal-metal cuando la pieza o el objeto es sumergida en el baño de cinc, así la reacción ocurre uniformemente sobre la superficie para dar un recubrimiento continuo. Existen 3 procesos fundamentales usados en la industria conocidos como: el seco antiguo, seco y húmedo [5].

El proceso seco antiguo consiste en sumergir las piezas en el baño de cinc, tal como venían en el baño de decapado, sin más precaución que un simple secado.

El procedimiento seco supone la introducción de un lavado con agua, un tratamiento con flujo, antes de introducir la pieza en el baño de cinc. El flujo es, generalmente, una mezcla de cloruro de cinc y de cloruro amónico. Y por último, en el proceso por vía húmeda, el baño de cinc se encuentra cubierto por una capa de flujo fundido, que flota sobre el cinc líquido. La inmersión de los materiales a tratar tiene lugar pasando a través de la capa de flujo. La operación de extracción puede hacerse bien retirando la capa de flujo, bien volviendo a pasar por ella. [6]

**1.1.4. Secado y precalentamiento.** El secado es requerido antes del proceso de inmersión con el fin de eliminar la humedad de las piezas y evitar explosiones en el momento de la inmersión [3]. El precalentamiento es necesario realizarlo, ya que disminuye el choque térmico [4]. Si las piezas han sido tratadas con flujo, la temperatura del horno no debe exceder los 150°C o el flujo comenzará a descomponerse [5]. Además, a temperaturas muy altas, hay mayor reacción con el oxígeno, provocando oxidación en las piezas.

## **1.2. INMERSIÓN DE LAS PIEZAS EN EL BAÑO DE CINCO.**

Esta etapa es fundamental en el proceso de galvanizado, puesto que proporciona el material del recubrimiento. En esta etapa se deben tener en cuenta varios variables que influyen directamente sobre el espesor de cinc resultante del proceso de galvanizado.

**1.2.1. Composición química del baño de cinc.** Al baño de cinc se le añaden ciertos elementos aleantes con el fin de mejorar las propiedades del recubrimiento y para la protección del crisol. Dentro de los elementos más usados en la industria del galvanizado se encuentran:

**Aluminio.** Según la literatura, es recomendable adicionar 0,005% de aluminio al baño de cinc con el fin de obtener un aspecto más brillante en el recubrimiento, además de reducir la velocidad de oxidación del cinc fundido.[4]

**Plomo.** Es recomendable añadir al baño de cinc hasta un 1% de plomo, con el fin de ayudar a la eliminación de las matas de cinc. Debido al mayor peso específico del plomo, el fondo del baño se cubre totalmente con plomo líquido. De esta forma se protege el baño contra la formación de matas. [18]

**Silicio.** El silicio suele añadirse en el baño de cinc en cantidades equivalentes entre 0,025 y 0,035%, con el fin de que este reaccione con el hierro presente en el baño, produciendo de esta manera partículas de ferro-silicio las cuales son virtualmente insolubles en cinc y se acumulan como escoria. [4]

**1.2.2. Temperatura del baño de cinc.** El baño de cinc fundido es generalmente operado a una temperatura de 445°C a 465°C. Por encima de 480°C, la velocidad de crecimiento será lineal con el tiempo en aceros ordinarios; sin embargo, la formación de escoria será muy alta y el ataque a la cuba de cinc será dramático y reducirá su tiempo de vida útil. Por debajo de los 445°C la velocidad de reacción llega a ser muy lenta e ineficiente. La temperatura óptima es la más baja de forma que permita un libre drenaje del cinc durante la retirada: entre 445°C y 465°C. [4]

**1.2.3. Velocidad de inmersión y de retiro de las piezas del baño de cinc.** Ambas velocidades tienen importancia en el espesor de la cobertura lograda. La velocidad de retiro, cuanto más baja sea, permite un mayor escurrimiento del cinc sobre la pieza galvanizada. La velocidad de inmersión, (que debe ser lo más alta posible), permite que el tiempo total de inmersión de la pieza, sea menor. La Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas A.G (ASIMET), sugiere una velocidad de inmersión de 3 a 4 m/min. Y recomienda una velocidad de retiro de 0.6 a 0.8 m/min. Por otra parte, José G. Albarracín Aldana, en su tesis [4] muestra un estudio acerca de las velocidades retiro en el proceso de galvanizado en caliente, con valores de 0.5, 0.1 y 1.2 m/min.

**1.2.4. Velocidad de centrifugado.** En pocas palabras, el proceso de galvanizado por centrifugación ofrece protección compresiva contra la corrosión para pequeñas o intrincadas piezas de acero mediante el giro mecánico durante el proceso de galvanizado. Los componentes pre-tratados, se giran en una canasta a alta velocidad luego de ser retirados del cinc fundido. Esto previene el exceso de cinc en la superficie del producto y es particularmente útil para componentes roscados o productos tales como clips, bisagras o pernos que necesitan espacio entre ellos [7]. El doctor Thomas H. Cook, menciona en un foro [8] que la velocidad de rotación que ha visto en la industria va de 500 a 1000 RPM, y que prefiere el primer valor ya que es posible alcanzar dicha velocidad de rotación mucho más rápido. También cree, que la mínima potencia eléctrica del motor de rotación debe ser de 10 HP, con muy buenos frenos y sistema de rotación hidráulica debido al mayor torque generado. Geoff Crowley, sugiere [9] que cerca de 600 RPM resulta adecuado pero algunas veces se puede trabajar a 720 RPM. También dice que es importante girar el material tan pronto sea posible, después de retirar del cinc para no perder demasiada temperatura. Por otra parte, la patente US 3699918 de William H. Garrison [10], indica que se han encontrado resultados satisfactorios cerca de las 725 RPM. En aplicaciones específicas esta puede aumentar, pero generalmente 725 RPM es un máximo valor adecuado.

**1.2.5. Tiempo de permanencia en el baño.** En la industria del galvanizado en caliente, generalmente se usan 3 tiempos de permanencia en el baño de cinc posteriores al cese del burbujeo: 1 minuto, 2 minutos y tres minutos. Al primer minuto de inmersión, el recubrimiento de cinc está compuesto básicamente por las tres primeras capas que se forman ( $\gamma$ ,  $\delta$  y  $\zeta$ ), las cuales son las de menor espesor, mientras que la capa  $\eta$  presenta el mayor espesor (26,16  $\mu\text{m}$ ). Sin embargo, a medida que se incrementa el tiempo de inmersión aumenta el espesor de las capas aleadas que se forman por la difusión entre los átomos de cinc y los de hierro en el estado sólido, proceso que entre otros factores está regularizado por el tiempo y la temperatura (2ª Ley de Fick). Después del primer

minuto, y casi hasta el segundo minuto, el espesor de cada una de las tres capas aleadas del recubrimiento (las más cercanas al metal base), continúan creciendo en forma equitativa mientras que la capa exterior esta crece muy suavemente. Como resultado final se obtiene un incremento del espesor del recubrimiento galvanizado para 2 y 3 minutos de inmersión. [15]

### 1.3. INSPECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD

La inspección de las piezas galvanizadas se realiza por medio de la búsqueda de defectos provenientes del proceso como los mostrados en la tabla 1 y la medición de los espesores de cinc obtenidos en las piezas. Dicha medición se lleva a cabo con la ayuda de equipos especializados tales como sondas de medición de espesores en materiales base ferrosa o con la ayuda de análisis metalográfico.

**Tabla 1.** Algunos defectos aceptados y rechazados de piezas galvanizadas

Apariencia	Aceptabilidad de la protección (No necesariamente de la apariencia)
Recubrimiento en gris opaco (No contiene cinc libre, solo aleación de hierro y cinc)	Aceptable
Exceso de cinc acumulado	Aceptable, siempre que no comprometa la funcionalidad de la pieza
Manchas de óxido	Aceptable (quitar fácilmente con cepillo rígido)
Aspereza general	Aceptable
Sin uniformidad y drenaje (drenaje desigual)	Aceptable
Grumos (grano)	Aceptable, siempre que la contaminación con sedimento no sea excesiva
Corrosión blanca	Aceptable, siempre que no comprometa el espesor del revestimiento ABNT NBR 6323
Mancha de flujo	Aceptable, siempre que sea retirada y el cinc permanezca intacto
Puntos de vista	inaceptable, zonas dañadas se pueden retocar según ABNT NBR 6323

**Fuente:** Tomado de Asociación Latinoamericana de Cinc (LATIZA). Guía para la galvanización por inmersión en caliente, 2014, <http://www.arquitecturaenacero.org/attachments/article/412/Guia-de-galvanizacal.pdf>

Los defectos encontrados y los espesores medidos deben ser evaluados para su aceptación o rechazo de acuerdo a las normas internacionales que se estén siguiendo.

**1.3.1. Reparación de piezas galvanizadas.** En algunos casos, el proceso de galvanizado presenta ciertas imperfecciones generadas principalmente por una inadecuada preparación de las superficies, haciéndose necesaria la reparación de este tipo de piezas. Como métodos de reparación existen los siguientes procesos: metalización (termo-rociado), estañar la superficie, aplicación de pinturas. [11]

**1.3.1.1. Metalización (termo-rociado).** La Metalización es un proceso metalúrgico para añadir a un cuerpo metálico capas de metales a manera de recubrimiento, con el propósito de crear en él propiedades de resistencia a la corrosión mejores que los de un metal uniforme. En este caso el zinc fundido u otra aleación como zinc-aluminio, es rociado sobre el acero en pequeñas gotas. Esto se realiza con el uso de una pieza especial que funde el zinc proveniente de barras o en polvo y lo vaporiza en pequeñas gotas sobre la superficie. Efectivamente, en este procedimiento de recubrimiento el zinc, en forma de alambre o polvo, alimenta una pistola de proyección en la que es fundido por la presencia de un arco eléctrico o de una llama, y se proyecta sobre la superficie del substrato con ayuda de un gas pulverizador [12]. Este procedimiento es recomendable para áreas muy grandes, es muy costoso en su aplicación y mantenimiento de equipos, y es necesaria la aplicación de selladores finales [11].

**1.3.1.2. Estañar la superficie.** Este procedimiento consiste en fundir barras de aleaciones de cinc (50% Zn- 49% Sn- 1% Cu), que se depositan en la superficie a reparar. El área a reparar necesita ser precalentado a una temperatura aproximadamente de 315 °C [13]. Este procedimiento proporciona una alta resistencia a la corrosión, una excelente resistencia abrasiva y sobresaliente adhesión, con una apariencia final parecida a la del galvanizado [11].

**1.3.1.3. Aplicación de pinturas.** Este método es el más utilizado debido a su bajo costo y fácil aplicación. Existen dos tipos de pintura que difieren en la forma de las partículas de cinc. Las primeras son pinturas a base de polvo de cinc, con más de

90% de cinc en película seca; son excelentes para áreas grandes donde se puede preparar adecuadamente la superficie como estructuras instaladas que requieren mantenimiento, se requiere sellar los poros con pintura, en tonos grisáceos no iguala muy bien la tonalidad del galvanizado, tienen pobre adherencia en superficies no preparadas adecuadamente y difícil aplicación por su alto peso específico. El segundo tipo de pinturas, son pinturas a base de hojuelas de cinc, con 40 % de cinc en película seca. Este tipo de pinturas no requiere acabado (sellador) ya que cumple las dos funciones, son excelentes para reparaciones de fallas en superficies galvanizadas, tanto en la planta como en la obra, su tonalidad es muy parecida a la del galvanizado, tienen sobresaliente adherencia y fácil aplicación hasta con pistola. [11]

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar los valores óptimos de las variables metalúrgicas que intervienen en el proceso de galvanizado en caliente por inmersión y centrifugado de las piezas de producción, para obtener un espesor requerido, mediante pruebas experimentales realizadas en la planta diseñada por la empresa METALLAN S.A.S.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Determinar las condiciones apropiadas para las etapas de preparación de la superficie de las piezas a galvanizar por medio de investigación.
- ✓ Establecer el diseño de experimentos para fijar el número de pruebas a efectuar usando la teoría de diseños factoriales  $2^k$  y un paquete estadístico.
- ✓ Determinar los valores de la temperatura de precalentamiento, la temperatura del baño de cinc, el tiempo de inmersión en el baño y la velocidad de centrifugado de las piezas, que serán empleados en el funcionamiento de la planta de galvanizado.
- ✓ Desarrollar un procedimiento para el manejo adecuado de los residuos resultantes del proceso de galvanizado, en especial de las etapas de preparación de las piezas tales como el desengrase, el decapado y el tratamiento con flujo.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES DEL PROCESO

Mediante revisión bibliográfica, se encontró un gran número de variables que influyen en el espesor del recubrimiento, el cual corresponde a la variable dependiente del proceso. Sin embargo, las condiciones de la planta de la empresa METALLAN S.A.S, solo permiten modificar los valores de algunas de estas. Las variables independientes que fueron controladas en el desarrollo del proyecto y sus respectivos rangos de operación fueron:

**3.1.1. Temperatura de precalentamiento de las piezas.** Esta variable tiene una gran influencia en la formación de las capas que componen el recubrimiento. Velásquez y col. [16] recomiendan “precalentar las piezas a la misma temperatura del baño para lograr una buena adherencia y evitar el choque térmico entre la probeta y la cubierta de flujo al ser sumergida en el baño de cinc”. Esta temperatura no es recomendada, puesto que eleva los costos de operación del proceso debido a los gastos energéticos. Y probablemente, se utiliza en procesos antiguos de galvanizado donde no se involucra el tratamiento con flujo como una etapa previa al baño. La Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmeccánicas A.G (ASIMET) [17], menciona que “la temperatura a elevar las piezas, no debe superar los 100°C. La capa de sal flux se degrada sobre los 120°C, por lo que no se debe sobrepasar ese límite de temperatura para mantener las propiedades y beneficios del fluxado”. Frank Porter [5] dice que “si el material ha sido prefluxado, la temperatura del horno no debe exceder 150°C o el flux comenzará a descomponerse”. Por lo tanto se concluye que la composición del flux incidirá directamente en la temperatura de precalentamiento. Además, también se tendrá en cuenta que a una mayor temperatura mayor gastos económicos para la

empresa. Con esto, se recomienda trabajar esta etapa en un rango de temperatura entre los 90 y 100°C.

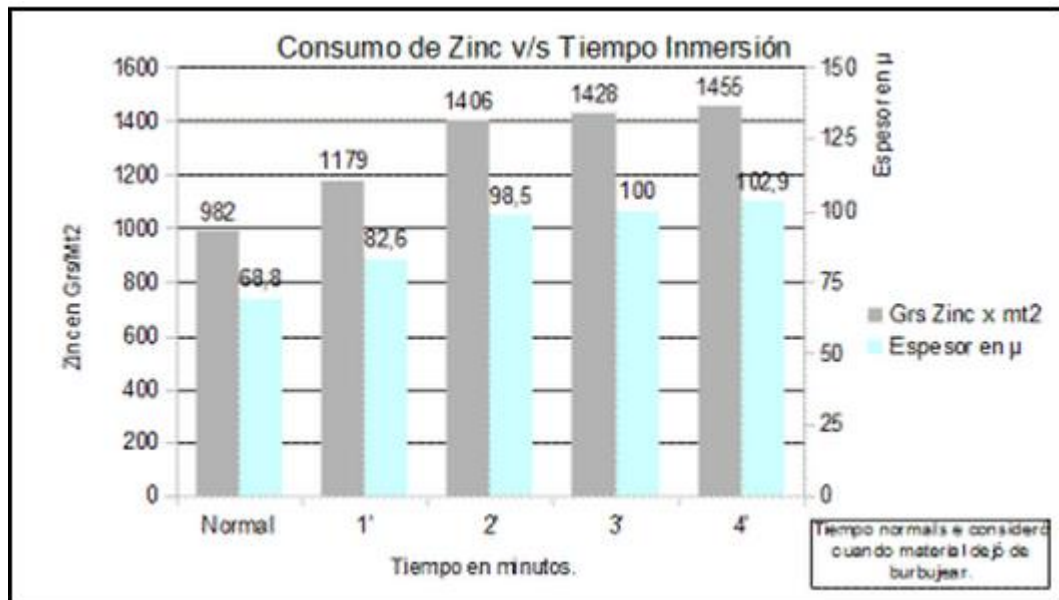
**3.1.2. Temperatura del baño de cinc.** La temperatura del baño de cinc es una de las principales variables que influyen en el resultado final. Aldana sugiere que el “baño de cinc fundido debe ser operado a temperatura de 445 a 465°C. Por encima de 480° la velocidad de crecimiento será lineal con el tiempo en aceros ordinarios; sin embargo, la formación de escoria será muy alta y el ataque a la cuba de cinc será dramático y reducirá su tiempo de vida. Por debajo de los 445°C la velocidad de reacción llega a ser muy lenta e ineficiente” [4]. De igual manera, LATIZA [3] (Asociación Latinoamericana de Cinc) menciona que la temperatura del baño suele trabajarse a 450°C. Debido a que la temperatura del baño influye en la difusión de hierro y cinc, por lo tanto esto afecta directamente el espesor del recubrimiento. Con base en esto, la temperatura del baño se toma como variable dependiente del proceso, y el rango a utilizar estará comprendido entre 445°C y 455°C.

**3.1.3. Velocidad de centrifugado.** Como fue mencionado en el marco teórico, en el apartado 1.2.3, el Doctor Thomas H. Cook menciona que la velocidad de rotación que ha visto en la industria va de 500 a 1000 RPM, y que prefiere el primer valor ya que es posible alcanzar dicha velocidad de rotación mucho más rápido. Dadas las condiciones de operación de los equipos de centrifugado de la empresa METALLAN S.A.S, el rango de velocidad de centrifugado que se empleará para la realización de pruebas, estará comprendido entre 400 y 500 RPM.

**3.1.4. Tiempo de permanencia en el baño.** El tiempo de inmersión, juega un papel importantísimo en el espesor de la cobertura. A mayor tiempo de inmersión se verifica una mayor cobertura.

La gráfica 1 publicada por La Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmeccánicas A.G (ASIMET), muestra los espesores resultantes de experiencias reales en plantas de galvanizado para iguales condiciones con diferente tiempo de permanencia en el baño.

**Grafica 1.** Espesores obtenidos de experiencias reales en plantas de galvanizado para iguales condiciones con diferente tiempo de permanencia en el baño.



Con base en esto, el tiempo de inmersión en el baño a utilizar para obtener el espesor del recubrimiento que la empresa requiere, se empleará un rango de tiempos equivalente al normal (cese del burbujeo) hasta normal más un minuto.

### 3.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para la realización del diseño de experimentos, se usó un paquete estadístico el cual trabaja con base en la teoría del diseño factorial  $2^k$ , y estudia el efecto de K factores considerando dos niveles en cada uno. Cada réplica de este diseño consiste de  $2^k$  combinaciones o tratamientos. De acuerdo a lo anterior, se

introdujeron las variables y sus respectivos rangos, obteniendo los diseños de experimentos mostrados en las tablas 2 y 3:

**Tabla 2.** Diseño de experimentos para galvanizado por inmersión

prueba	T° cinc [°C]	T° precalentamiento [°C]	Tiempo de inmersión [min]
1	445	90	0
2	445	100	1
3	445	100	0
4	445	90	1
5	450	95	0,5
6	455	90	0
7	455	100	0
8	455	90	1
9	455	100	1

**Tabla 3.** Diseño de experimentos para galvanizado por centrifugado

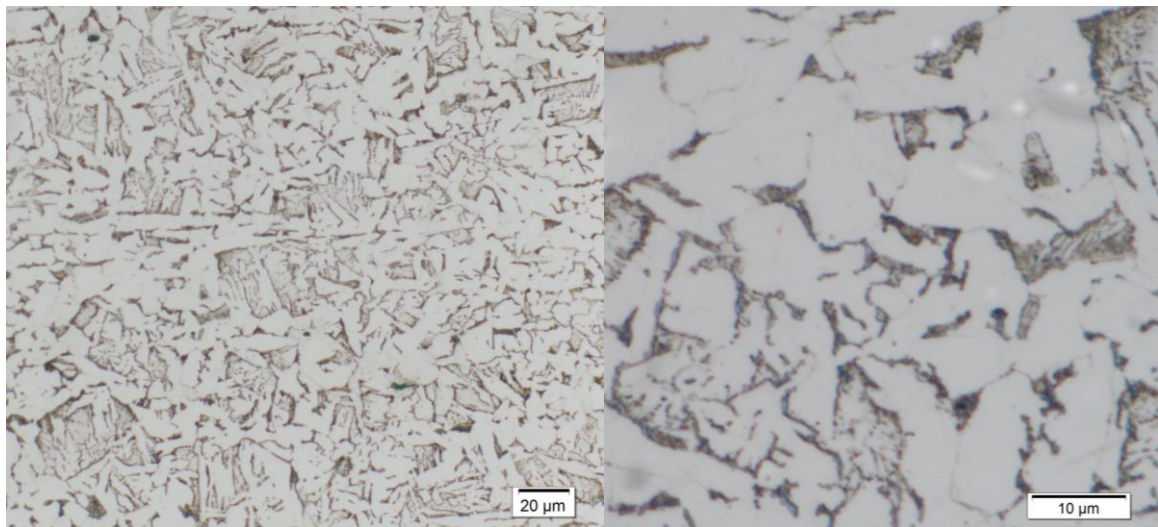
prueba	T° cinc [°C]	T° precalentamiento [°C]	velocidad de centrifugado [RPM]	Tiempo de inmersión [min]
1	455	90	400	0
2	455	100	400	0
3	455	90	400	1
4	455	100	400	1
5	455	100	500	1
6	455	100	500	0
7	455	90	500	1
8	455	90	500	0
9	450	95	450	0,5
10	445	90	400	1
11	445	100	400	1
12	445	90	400	0
13	445	100	400	0
14	445	100	500	1
15	445	100	500	0
16	445	90	500	1
17	445	90	500	0

### 3.3. REALIZACIÓN DE PRUEBAS

Las piezas que se usaron para la realización de las pruebas del diseño de experimentos, fueron arandelas, las cuales se usan generalmente sobre pernos de máquina espárragos, espigos, pernos de anclaje y varillas de anclaje. Para las

pruebas de galvanizado por centrifugado se usaron 15 arandelas, mientras que para el galvanizado por inmersión, se usaron 12 arandelas. En la figura 4 se observa las micrografías del material base de las arandelas y en la tabla 4 su composición química.

**Figura 4.** Micrografías de la microestructura del material base de las arandelas determinadas por microscopía óptica. (a) 500X. (b) 2000X.



(a)

(b)

En la micrografía de la figura 4 se observa una microestructura correspondiente a un acero laminado en caliente que fue sometido a un proceso de normalizado por austenización y enfriado al aire. La imagen presenta una estructura Widmanstätten donde las zonas claras corresponden a la ferrita y las zonas oscuras a la perlita.

**Tabla 4.** Composición química de la materia prima determinada por espectroscopía de emisión atómica en el laboratorio del INCITEMA-UPTC, Tunja.

<b>Elemento</b>	<b>Al</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Ca</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
Composición %	0,00523	0,00168	0,207	0,0018	0,0311	0,0869	0,324	98,3	0,678
<b>Elemento</b>	<b>Mo</b>	<b>N</b>	<b>Nb</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Sb</b>	<b>Si</b>	<b>Sn</b>
Composición %	0,0101	<0,001	0,0168	0,0597	0,0174	0,0389	0,012	0,14	0,029
<b>Elemento</b>	<b>T</b>	<b>V</b>	<b>W</b>						
Composición %	0,0022	0,0021	0,0574						

Para el galvanizado por centrifugado y por inmersión, el procedimiento de preparación superficial fue el mismo y consiste en las siguientes etapas:

**3.3.1. Desengrase.** Esta etapa se llevó a cabo, con el fin de eliminar la grasa usada como lubricante en el proceso de corte y conformado de las arandelas. Para esto, se usaron 4 litros del compuesto químico Des-Ox diluidos en 4 litros de agua (figura 5). El tiempo de duración de las piezas dentro del compuesto químico fue de 5 minutos

**Figura 5.** Des-Ox usado en la etapa de desengrase de las piezas a galvanizar  
Terminada la etapa de desengrase, las piezas fueron sumergidas en agua limpia para enjuagar.



**3.3.2. Decapado.** Para la realización de esta etapa, se emplearon 65 litros de KLEANEX DEC AC12-LE (figura 6), decalaminador para metales ferrosos. Este producto fue suministrado por BYCSA, y cuyas propiedades fisicoquímicas y condiciones de operación se muestran en las tablas 5 y 6. El tiempo usado en esta etapa fue de 15 minutos para cada prueba.

**Tabla 5.** Propiedades físico químicas del KLEANEX DEC AC12-LE

<b>Propiedades Físico Químicas</b>	
Aspecto	Líquido verdoso
Estado físico	Líquido
Olor	Penetrante
Color	verdoso
Densidad	1,10 – 1,18
Acidez total (%v/v ácido)	65-75
Solubilidad en agua	Completa
pH	<1,0
Naturaleza Química	Ácido

**Figura 6.** KLEANEX DEC AC12-LE usado en la etapa de decapado de las piezas a galvanizar.



**Tabla 6.** Condiciones de operación del KLEANEX DEC AC12-LE

<b>Condiciones de operación</b>	
Concentración	Listo para uso, 50%V/V
Temperatura	Ambiente
Tiempo de inmersión	Dependiendo del óxido, calamina, grasa o incrustación a remover.

Terminada la etapa de desengrase-decapante, las piezas fueron sumergidas en agua limpia para enjuagar.

**3.3.3. Tratamiento con flujo.** El flujo utilizado en esta etapa fue FLUX BYC Zn-5 (figura 7) suministrado por BYCSA. Este es un producto en polvo de color blanco-verdoso cristalino, que mezcla cuidadosamente cloruros y aditivos que mejoran las propiedades de los baños de tratamientos con flujo habitualmente usados, disminuyendo la formación de matas e imprimiendo una mejor adherencia del revestimiento de cinc. Las propiedades físico químicas se muestran en la tabla 7 y posteriormente se describe las condiciones de operación utilizadas.

**Figura 7.** Flux BYC Zn-5 usado en la preparación de las piezas a galvanizar.



**Tabla 7.** Propiedades físico químicas del Flux BYC Zn-5.

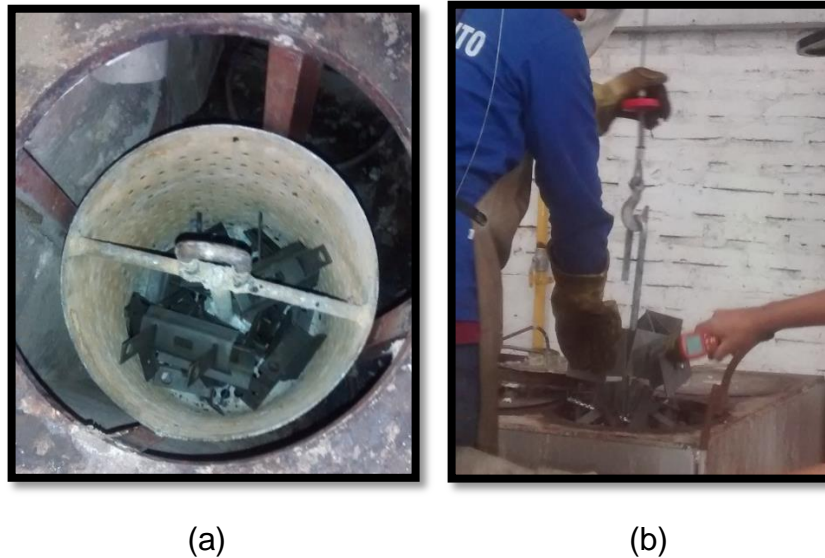
<b>Propiedades fisicoquímicas</b>	
Aspecto	Sólido blanco – verdoso
Estado físico	Polvo
Color	Sólido blanco – verdoso
Solubilidad en agua	Completa
Naturaleza química	Ácido

Para operar este producto en la preparación de las piezas, se tomó una concentración de 550 gramos por cada litro empleado, en este caso se usaron 180 litros de agua, por tanto se adicionaron 99 kg de soluto.

En las pruebas, las piezas fueron introducidas y retiradas instantáneamente del flujo.

**3.3.4. Precalentamiento.** En esta etapa, se aprovechó la temperatura proveniente del crisol para retirar la humedad y precalentar las piezas, con el fin de evitar un choque térmico durante la etapa de inmersión. Los bastidores y canastas, también fueron precalentados con el mismo objetivo. Debido a que la cámara de precalentamiento de la empresa METALLAN S.A.S, no cuenta con un control de temperatura, fue necesario utilizar un pirómetro láser para asegurar que las piezas alcanzaran la temperatura requerida para cada prueba. En la figura 8, se puede observar el proceso realizado para el galvanizado tanto por inmersión como centrifugado.

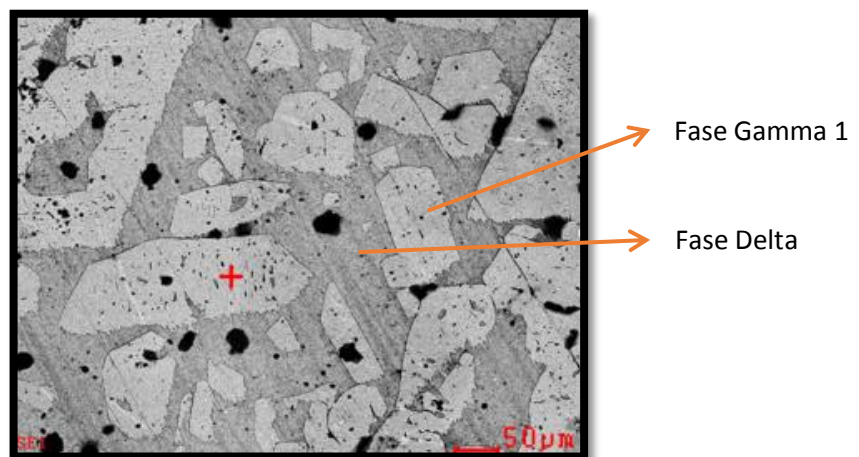
**Figura 8.** Etapa de precalentamiento. (a) precalentamiento piezas galvanizadas por centrifugado. (b) precalentamiento piezas galvanizadas por inmersión.



**3.3.5. Galvanizado.** Posterior a las etapas de preparación de la superficie de las piezas a galvanizar, estas fueron sumergidas en un baño de cinc con una composición química y microestructura mostrada en la figura 9 y en la tabla 8,

correspondientemente. Antes de la inmersión de las piezas, es necesario retirar la ceniza de cinc formada en la superficie del baño, debido a la perturbación de la superficie de cinc fundido en contacto con el aire, el cual atrapa al cinc en una película de cinc oxidada [18]. El tiempo de inmersión fue considerado a partir del cese de burbujeo, este se tomó como tiempo cero minutos y corresponde al tiempo mínimo de permanencia en el baño. Y como tiempo máximo, se tomó un minuto después del cese del burbujeo. Luego de alcanzar el tiempo de inmersión requerido para cada prueba, se retiró de nuevo la ceniza formada en la superficie, para evitar que se adhiriera durante el izaje de las piezas. En las figuras 10 y 11 se puede observar el procedimiento descrito.

**Figura 9.** Microestructura del cinc utilizado en el baño para el recubrimiento.



En la micrografía de la figura 9, se observan granos de la fase Gamma 1 en una matriz de fase Delta según el diagrama de fases Fe-Zn mostrado en la figura 1 y la composición de cinc de 86 % (Tabla 8).

**Tabla 8.** Composición química del cinc determinada mediante EDS.

Elemento	Wt%	At%
C	1,12	5,01
O	4,91	16,53
Fe	7,88	7,59
Zn	86,09	70,89

**Figura 10.** Etapa de galvanizado por centrifugado. (a) entrada en el baño del cinc. (b) salida del baño de cinc.



(a)

(b)

**Figura 11.** Etapa de galvanizado por inmersión. (a) entrada en el baño del cinc. (b) salida del baño de cinc.



(a)

(b)

**3.3.6. Centrifugado.** Posterior al izaje de las piezas contenidas en la canasta de centrifugado, se hizo girar la canasta hasta alcanzar la velocidad determinada para cada prueba y se detuvo justo en ese instante. Luego se invirtió el sentido de giro y se repitió el mismo procedimiento. En la figura 12 se muestra esta etapa del proceso de galvanizado.

**Figura 12.** Etapa de centrifugado



**3.3.7. Enfriamiento.** Terminada la etapa de galvanizado, las piezas fueron enfriadas en un baño de agua hasta alcanzar la temperatura ambiente. En la figura 13 se muestra el enfriamiento de las piezas galvanizadas por inmersión y centrifugado.

**Figura 13.** Enfriamiento de las piezas galvanizadas. (a) por centrifugado. (b) por inmersión.



(a)



(b)

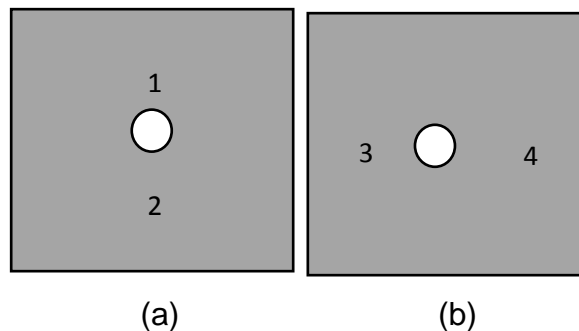
**3.3.8. Medición de espesores.** En esta etapa, se escogieron 5 piezas al azar de cada producto galvanizado para cada prueba. Utilizando el medidor de espesores

**POSITECTOR** se tomaron 4 mediciones por cada pieza (figura 14). En la arandela se tomaron mediciones en ambas caras (figura 15). Los resultados fueron registrados y promediados para realizar el correspondiente análisis estadístico.

**Figura 14.** Medición de espesores con el medidor de espesores POSITECTOR.



**Figura 15.** Puntos de medición de espesor de la arandela. (a) cara frontal. (b) cara posterior.



### 3.4. MANEJO DE RESIDUOS

Las etapas de preparación de las piezas se llevan a cabo usando compuestos químicos, que como se sabe, representan un riesgo ambiental, si son vertidos sin su correspondiente neutralización.

**3.4.1. Desengrase.** En esta etapa se usó el compuesto químico Des-Ox, el cual está compuesto principalmente por detergentes industriales que al ser altamente diluidos no representan ningún daño severo de contaminación al ambiente. Por

tanto, el manejo que se le dará a este compuesto químico será diluirlo en agua para su posterior vertimiento.

**3.4.2. Decapado.** Para realizar el decapado de la superficie de las piezas, se usó KLEANEX DEC AC12-LE, el cual es un producto ácido proporcionado por BYCSA. El proceso descrito en su ficha técnica para el manejo de residuos, consiste en neutralizar la solución con soda caustica, y por ultimo verter. Este procedimiento se realizará siempre que la solución supere una concentración de 75 gramos /litro. Si la concentración de hierro es menor, se requerirá aumentar la acidez inicial del producto; para ello, se agregarán 15 cm<sup>3</sup>/litro para aumentar un punto de acidez.

**3.4.3. Tratamiento con flujo.** El compuesto químico usado en esta etapa de preparación de superficies a galvanizar fue FLUX BYC Zn-5, el cual es una mezcla de cloruros y aditivos. Esta mezcla de compuestos químicos representa una amenaza ambiental por lo que es necesario realizar un control de residuos. Con base en la ficha técnica del producto proporcionado por BYCSA, se debe diluir y neutralizar con ayuda de soda caustica antes de su vertimiento. Este procedimiento se realizará siempre que la solución supere una densidad de 36°Be (escala de concentración Baumé). Si la densidad es menor, se debe realizar el respectivo mantenimiento descrito por el proveedor, el cual consiste en adiciones del producto hasta alcanzar la densidad inicial del mismo.

**3.4.4. Matas de cinc.** La mata de cinc es un residuo sólido que consiste en una aleación de cinc-hierro, cuya composición es aproximadamente de un 95% de cinc y un 5% de hierro. Se produce por el arrastre de las piezas hasta el baño de galvanizado de restos del decapado y del tratamiento con flujo, reaccionando los componentes de hierro y/o acero de la superficie de la pieza con el cinc fundido.

También puede ocurrir que algunas piezas caigan al fondo del baño de galvanizado, dando lugar también a la producción de matas de cinc [18]. Las matas obtenidas en el crisol de la empresa METALLAN S.A.S son reprocesadas en un horno de crisol a una temperatura de 350°C, y se retira la mayor cantidad de cenizas generadas y el producto fundido es vertido en lingoteras, para posteriormente ser introducidas de nuevo en el baño de galvanizado.

### **3.5. OPTIMIZACIÓN**

Para comenzar a realizar el proceso de optimización, se promediaron las medidas tomadas en ambas caras de la arandela, y posteriormente los valores fueron introducidos a su respectiva prueba, determinada en el diseño de experimentos. Haciendo uso de un paquete estadístico, se realizó el análisis estadístico del experimento, brindando valores óptimos para las variables que influyen en el proceso, y el efecto que estas tienen sobre el resultado.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. RESULTADOS REALIZACIÓN DE PRUEBAS

En la figura 16 se puede observar la comparación de las piezas galvanizadas tanto por centrifugado (1) como por inmersión (2).

**Figura 16.** Arandelas galvanizadas. (1) por centrifugado. (2) por inmersión.



**4.1.1. Resultados galvanizado por centrifugado.** Al llevar a cabo las pruebas descritas en la metodología y al realizar las respectivas mediciones en las piezas galvanizadas, se obtuvieron los resultados descritos en la tabla 9.

**Tabla 9.** Resultados de medición de espesores de piezas galvanizadas por centrifugado.

Prueba Pieza	espesores arandelas [micras]				
	1	2	3	4	5
1	76	64	72	68	70
	70	50	74	68	64
	62	76	86	90	68
	66	64	76	74	74
2	76	74	84	78	70
	80	78	88	74	78

**Tabla 10.** Continuación

	74	90	78	82	78
	72	78	88	90	82
3	92	92	94	100	98
	100	100	100	102	100
	100	100	94	108	102
	94	104	98	100	96
	100	106	106	84	108
4	98	112	102	94	104
	100	130	104	86	96
	108	136	106	94	104
	103	110	99	112	102
5	120	114	100	115	100
	116	98	95	101	92
	96	102	94	96	98
	86	84	94	98	86
6	98	90	94	94	94
	94	104	98	82	90
	92	98	102	88	94
	86	94	98	96	92
7	84	92	90	100	80
	80	96	88	102	108
	96	94	100	94	94
	56	62	60	52	54
8	48	60	60	60	56
	64	58	58	59	66
	48	64	54	52	56
	40	47	40	45	41
9	38	43	45	46	49
	39	40	42	42	40
	42	47	44	44	41
	54	47	45	49	50
10	50	47	46	41	49
	47	52	42	44	46
	50	45	47	42	46
	52	47	43	46	44
11	49	46	44	44	54
	54	47	46	48	46
	45	54	43	49	45
	46	41	45	45	45
12	48	45	47	44	41
	48	50	42	43	46
	46	47	46	49	44
	48	49	39	40	39
13	45	47	42	42	43
	42	54	38	39	40
	40	40	39	38	43
	52	52	48	49	50
14	48	54	52	49	50
	49	49	52	46	50
	48	47	56	58	49
	54	49	50	50	50
15	54	49	50	50	50

**Tabla 11.** Continuación

	47	50	52	52	48
	50	46	49	47	47
	49	49	52	50	44
16	47	45	45	52	47
	46	50	48	52	49
	47	40	47	54	45
	48	52	47	52	47
17	48	46	48	46	46
	52	47	43	48	46
	52	48	47	43	44
	50	45	44	41	41

**4.1.2. Resultados galvanizado por inmersión.** En la tabla 10, se muestran los resultados de las mediciones de espesores realizados a las piezas galvanizadas por inmersión.

**Tabla 12.** Resultados de medición de espesores de piezas galvanizadas por inmersión.

prueba	Espesores arandelas [micras]				
	1	2	3	4	5
1	64	72	72	62	62
	62	60	58	64	66
	70	68	62	64	66
	60	74	64	64	68
2	82	84	96	86	90
	86	96	90	86	80
	72	82	98	82	94
	76	88	90	82	90
3	46	54	52	46	52
	52	50	52	56	56
	48	48	52	43	45
	44	50	52	56	58
4	54	58	56	62	52
	50	56	54	58	56
	52	62	54	60	64
	52	72	52	54	49
5	43	56	45	42	45
	41	44	44	43	43
	41	47	49	44	42
	43	43	41	50	44
6	42	44	52	52	46
	39	50	48	48	52
	44	45	49	43	49
	49	52	41	54	45
7	44	58	54	52	46
	43	43	45	48	54

**Tabla 10.** Continuación

	52	52	50	49	49
	44	50	52	50	54
8	49	54	45	54	54
	52	43	44	42	43
	50	42	49	52	56
	42	41	49	43	50
9	66	58	52	66	60
	58	56	52	58	66
	58	50	50	54	66
	60	58	49	56	52

**4.1.3. Promedios de medidas de espesor.** En las tablas 11 y 12 se exponen los promedios de las mediciones de espesores realizadas en cada prueba de galvanizado por centrifugado e inmersión respectivamente, para llevar a cabo el análisis estadístico.

**Tabla 13.** Promedios de espesores de piezas galvanizadas por centrifugado.

Prueba	Promedio
1	70,6
2	79,6
3	98,7
4	103,9
5	103,15
6	93
7	93,2
8	57,35
9	42,75
10	46,95
11	47,3
12	45,4
13	42,35
14	50,4
15	49,25
16	48
17	46,25

**Tabla 14.** Promedios de espesores de piezas galvanizadas por inmersión.

Prueba	Promedio
1	65,1
2	86,5
3	50,6
4	56,35
5	44,5
6	47,2

**Tabla 12.** Continuación

7	49,45
8	47,7
9	57,25

## 4.2. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Con los espesores promedio contenidos en las tablas 11 y 12, se efectúa la ecuación de los modelos que se ajustan a los datos mediante el paquete estadístico. Además, se optimiza, mostrando los valores óptimos para cada tipo de galvanizado.

La especificación técnica ET462 Arandelas de acero galvanizado de CODENSA menciona que el espesor recomendado para este tipo de piezas oscila entre 48 y 56,6 micras. Con base en esto, y por requerimiento de la empresa METALLAN S.A.S., se toma un valor óptimo de espesor igual a 55 micras.

**4.2.1. Análisis estadístico galvanizado por centrifugado.** Mediante la regresión se obtienen los coeficientes de la ecuación de ajuste para el proceso de galvanizado en caliente por centrifugado, observados en la tabla 13.

**Tabla 15.** Coeficientes de regresión para Espesor para galvanizado por centrifugado.

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	4238,07
A: Temperatura de Cinc	-8,60375
B: Temperatura de precalentamiento	-67,5662
C: Tiempo de inmersión	-913,113
D: Velocidad de centrifugado	1,10662
AB	0,14275
AC	2,225
AD	-0,0045
BC	-0,6675
BD	0,009875
CD	-0,025

La ecuación del modelo ajustado con un  $R^2 = 92,0436\%$  es:

$$\begin{aligned} \text{Espesor} = & 4238,07 - 8,60375 * A - 67,5662 * B - 913,113 * C + 1,10662 * D \\ & + 0,14275 * A * B + 2,225 * A * C - 0,0045 * A * D - 0,6675 * B \\ & * C + 0,009875 * B * D - 0,025 * C * D \end{aligned}$$

Utilizando la ecuación anterior, se obtienen los valores ajustados mostrados en la tabla 14.

**Tabla 16.** Resultados estimados para espesor para galvanizado por centrifugado.

	<i>Observados</i>	<i>Ajustados</i>	<i>Error Estnd.</i>
<i>Fila</i>	<i>Valores</i>	<i>Valores</i>	<i>para Pronóstico</i>
1	103,9	103,024	14,262
2	42,75	65,7735	11,3095
3	46,25	42,011	14,262
4	49,25	50,961	14,262
5	48,0	46,4485	14,262
6	46,95	49,661	14,262
7	93,0	85,1735	14,262
8	79,6	80,511	14,262
9	42,35	41,7985	14,262
10	98,7	96,3485	14,262
11	45,4	42,7235	14,262
12	103,15	105,186	14,262
13	70,6	67,161	14,262
14	93,2	88,636	14,262
15	50,4	48,7235	14,262
16	47,3	42,061	14,262
17	57,35	61,9485	14,262

Por medio del paquete estadístico se determinan las condiciones óptimas para este experimento, utilizando 55 micras como valor de referencia. Estos valores óptimos se consignan en la tabla 15.

**Tabla 17.** Valores óptimos de las variables del proceso de galvanizado en caliente por centrifugado.

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Temperatura de Cinc	445,0	455,0	447,184
Temperatura de precalentamiento	90,0	100,0	96,0297
Tiempo de inmersión	0,0	1,0	0,515423
Velocidad de centrifugado	400,0	500,0	454,288

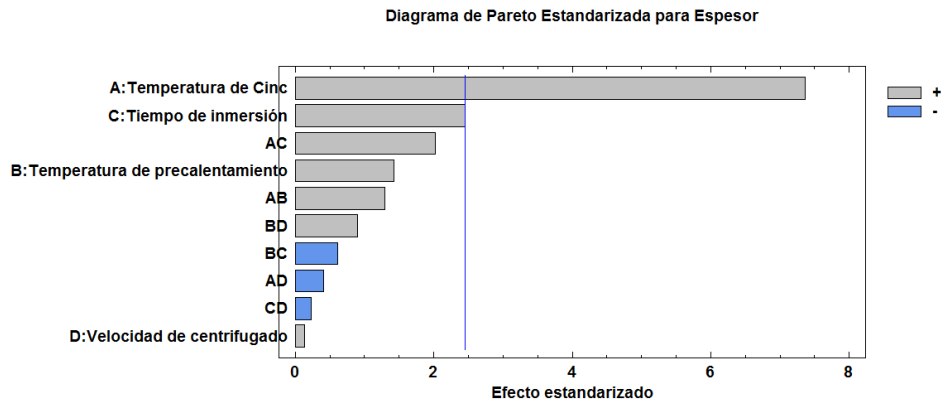
Ingresando los valores óptimos de la tabla 15 en la ecuación del modelo ajustado, se obtiene un valor de 55,0062 micras.

**Tabla 18.** Análisis de varianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Temperatura de Cinc	6544,81	1	6544,81	54,18	0,0003
B: Temperatura de precalentamiento	244,141	1	244,141	2,02	0,2050
C: Tiempo de inmersión	726,303	1	726,303	6,01	0,0497
D: Velocidad de centrifugado	2,1025	1	2,1025	0,02	0,8994
AB	203,776	1	203,776	1,69	0,2417
AC	495,063	1	495,063	4,10	0,0894
AD	20,25	1	20,25	0,17	0,6964
BC	44,5556	1	44,5556	0,37	0,5659
BD	97,5156	1	97,5156	0,81	0,4035
CD	6,25	1	6,25	0,05	0,8276
Error total	724,791	6	120,798		
Total (corr.)	9109,56	16			

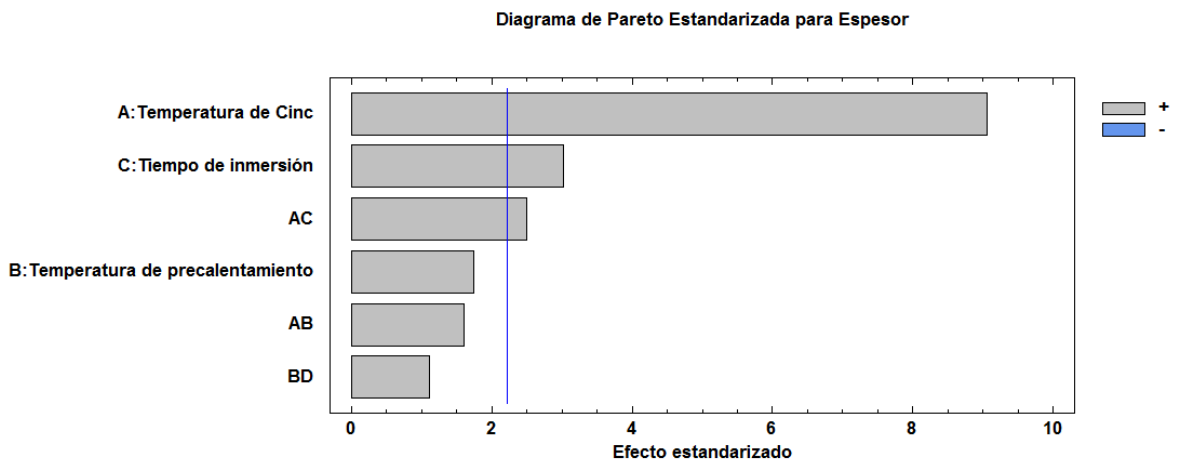
El análisis de varianza del estudio estadístico se muestra en la tabla 16, los valores en rojo indican las variables que más influyen estadísticamente en el proceso de galvanizado, debido a que el valor p está por debajo del nivel de significancia equivalente a 0,05. De igual forma, la gráfica 2 expone el efecto que las variables en estudio tienen sobre el espesor del recubrimiento. En ella se observa claramente que la variable que más influye en el resultado es la temperatura del baño de cinc. Esto se ve evidenciado en la tabla 11, donde las pruebas 1 a la 8 fueron realizadas a la más alta temperatura de operación (455°C), las cuales mostraron valores promedio de espesores superiores a las pruebas realizadas a la mínima temperatura (445°C). Este fenómeno obedece a la segunda ley Fick donde a mayor temperatura mayor difusión de los átomos de cinc al sustrato, y viceversa.

**Grafica 2.** Diagrama de Pareto estandarizada para espesor de piezas galvanizadas por centrifugado



En el diagrama de Pareto de la gráfica 2, se pueden omitir las variables que menos influencia estadística presentan sobre el resultado transformando sus valores en error para mostrar con mayor exactitud las variables más influyentes en el proceso. La gráfica 3 muestra el nuevo diagrama de Pareto.

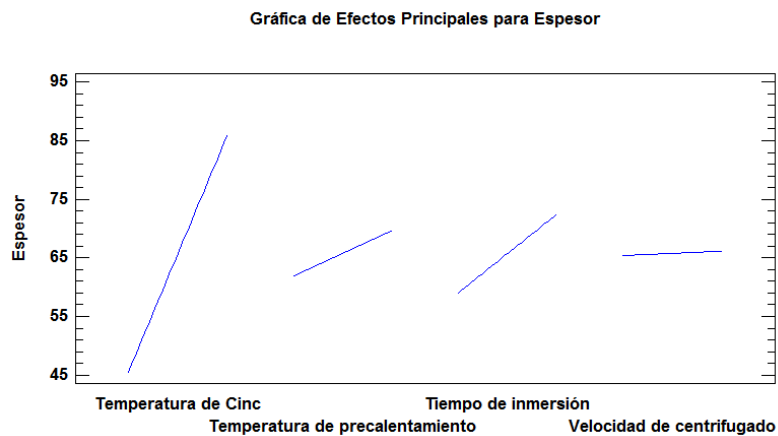
**Grafica 3.** Diagrama de Pareto estandarizada sin las variables excluidas para espesor de piezas galvanizadas por centrifugado



En la gráfica 4 se observa mejor el efecto de cada variable en estudio. En ella se comprueba que la temperatura del baño de cinc es la más influyente, debido a que

tiene la mayor pendiente. También se muestra que a una mayor temperatura de precalentamiento y un mayor tiempo de permanencia en el baño, se obtiene un mayor espesor, debido a que estas variables están directamente relacionadas con la segunda ley de Fick, como se explicó anteriormente. Además, la velocidad de centrifugado no muestra una gran influencia en el proceso, debido a que la pendiente no es tan considerable.

**Grafica 4.** Efectos de las variables del proceso de galvanizado por centrifugado, sobre el espesor



Los efectos de las variables de la gráfica 4 están restringidos por la linealidad del diseño de experimentos factorial  $2^k$ , puesto que se toman como referencia los extremos de los rangos de las variables en estudio.

**4.2.2. Análisis estadístico galvanizado por inmersión.** Mediante la regresión se obtienen los coeficientes de la ecuación de ajuste para el proceso de galvanizado en caliente por inmersión, observados en la tabla 17.

**Tabla 19.** Coeficientes de regresión para Espesor para galvanizado por inmersión

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	-284,484
A: Temperatura de Cinc	0,87625
Temperatura de precalentamiento	8,05
Tiempo de inmersión	186,225
AB	-0,01925

**Tabla 17.** Continuación

AC	-0,9425
BC	2,5975

La ecuación del modelo ajustado con un  $R^2 = 76,1939$  es:

$$\begin{aligned} \text{Espesor} = & -284,484 + 0,87625 * A + 8,05 * B + 186,225 * C - 0,01925 * A * B \\ & - 0,9425 * A * C + 2,5975 * B * C \end{aligned}$$

Utilizando la ecuación anterior, se obtienen los valores ajustados mostrados en la tabla 18.

**Tabla 20.** Resultados estimados para espesor para galvanizado por inmersión.

	<i>Observados</i>	<i>Ajustados</i>	<i>Error Estnd.</i>
<i>Fila</i>	<i>Valores</i>	<i>Valores</i>	<i>para Pronóstico</i>
1	50,6	53,8222	17,3914
2	86,5	80,3847	17,3914
3	44,5	56,0722	13,4378
4	65,1	58,9847	17,3914
5	49,45	43,3347	17,3914
6	47,2	50,4222	17,3914
7	57,25	60,4722	17,3914
8	56,35	59,5722	17,3914
9	47,7	41,5847	17,3914

Por medio del paquete estadístico se determinan las condiciones óptimas para este experimento, utilizando 55 micras como valor de referencia. Estos valores óptimos se consignan en la tabla 19.

**Tabla 21.** Valores óptimos de las variables del proceso de galvanizado en caliente por inmersión.

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
A: Temperatura de Cinc	445,0	455,0	450,505
B: Temperatura de precalentamiento	90,0	100,0	94,6926
C: Tiempo de inmersión	0,0	1,0	0,48087

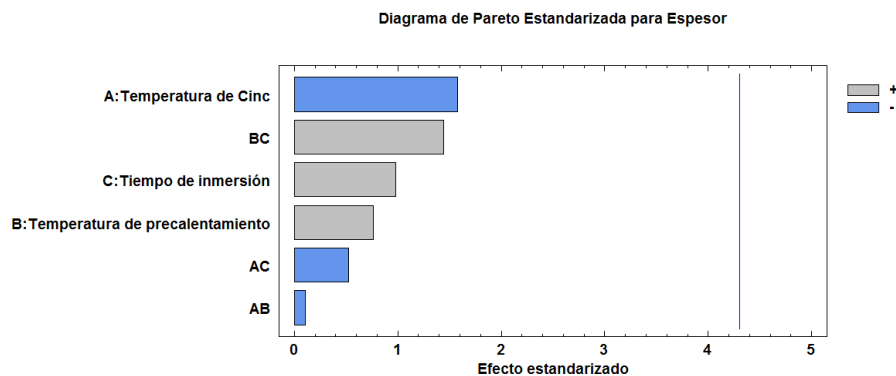
Ingresando los valores óptimos de la tabla 19 en la ecuación del modelo ajustado, el resultado del espesor es 55,0001 micras.

**Tabla 22.** Análisis de varianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Temperatura de Cinc	405,413	1	405,413	2,49	0,2550
B: Temperatura de precalentamiento	94,1878	1	94,1878	0,58	0,5260
C: Tiempo de inmersión	157,088	1	157,088	0,97	0,4292
AB	1,85281	1	1,85281	0,01	0,9247
AC	44,4153	1	44,4153	0,27	0,6533
BC	337,35	1	337,35	2,08	0,2863
Error total	325,034	2	162,517		
Total (corr.)	1365,34	8			

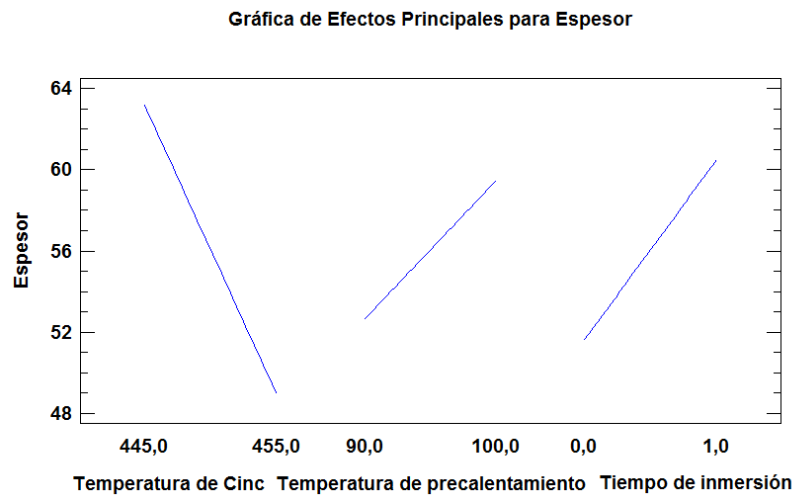
El análisis de la varianza de la tabla 20, no muestra valores en rojo, lo que indica que las variables no tienen una fuerte influencia estadística en el espesor debido a que los valores p son mayores que nivel de significancia (0,05). Sin embargo, la gráfica 5 muestra que la temperatura de baño de cinc fue la más influyente en este caso, pero a diferencia del centrifugado, a medida que se aumenta la temperatura disminuye el espesor (gráfica 6). Esto puede ser un error debido a que el control de la temperatura del crisol no es el más adecuado, ya que en algunos casos estando programado a cierta temperatura, en realidad se encontraba a una temperatura mayor.

**Grafica 5.** Diagrama de Pareto estandarizada para espesor de piezas galvanizadas por inmersión.



En la gráfica 5, se puede apreciar que la influencia de las variables fue el mismo que en el caso del centrifugado, exceptuando la temperatura del baño de cinc, por las razones ya mencionadas.

**Grafica 6.** Efectos de las variables del proceso de galvanizado por inmersión, sobre el espesor



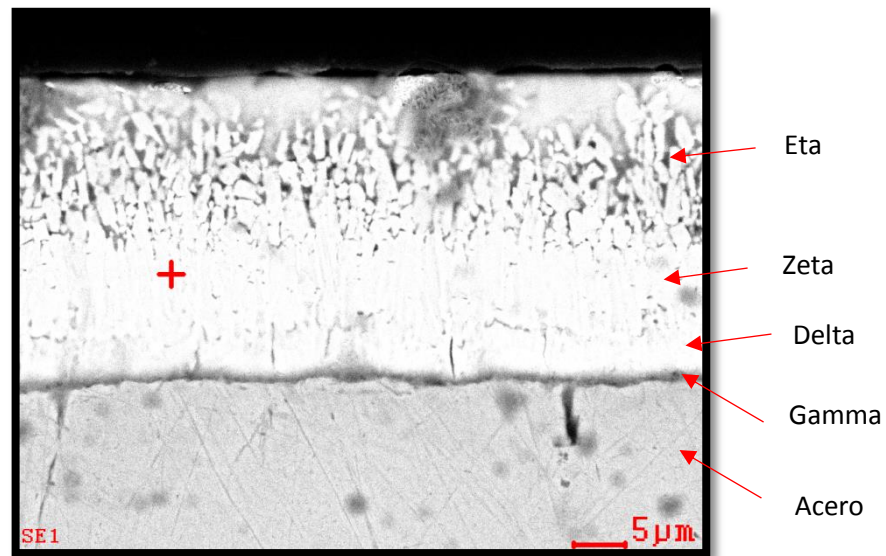
### 4.3. RESULTADOS MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM)

Luego de los resultados obtenidos con el análisis estadístico mostrado anteriormente, se procede a realizar un análisis químico y microestructural de cada uno de los procesos realizados, tanto por centrifugado como por inmersión.

Para analizar las muestras mediante SEM es necesario realizar un recubrimiento de carbono, luego, mediante el Microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 FEG ambiental (ESEM) y la técnica de Detector BSED de electrones retrodispersados para modo de alto y bajo vacío, se identifican las micrografías y las composiciones químicas elementales de las muestras.

**4.3.1. SEM del galvanizado por centrifugado.** En la figura 17 y en la tabla 21, se muestra el SEM del recubrimiento y la composición química del mismo.

**Figura 17.** SEM del recubrimiento de cinc, de la arandela galvanizada por centrifugado.5000X.



**Tabla 23.** Composición química del punto especificado en la figura 17 (fase Zeta), en el recubrimiento de cinc por centrifugado, determinado por SEM EDS

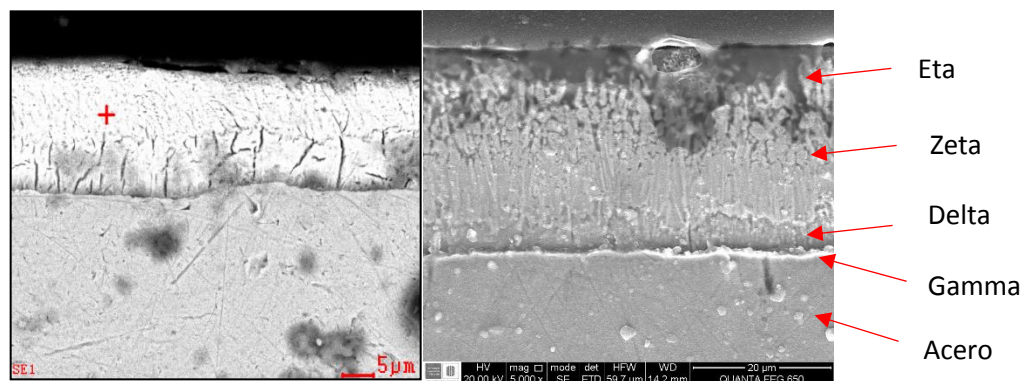
Elemento	Wt%	At%
C	24,35	62,23
O	1,26	2,42
Fe	5,29	2,91
Zn	69,10	32,44

En la figura 17, se identifica la capa de recubrimiento depositada en el material base y en ella se observan las fases de hierro-cinc que teóricamente se deberían formar. La tabla 21 muestra la composición química en porcentaje en peso y porcentaje atómico para un punto ubicado en la fase zeta del recubrimiento obtenido del galvanizado por centrifugado. La figura 2, muestra las composiciones teóricas de cada fase; para el caso de la fase zeta, se tiene un porcentaje de cinc igual a 94 y un porcentaje de hierro igual a 6. Comparando los porcentajes

teóricos, con los resultados experimentales de la tabla 21, se observa una similitud en los porcentajes de hierro y cinc obtenidos.

**4.3.2. SEM del galvanizado por inmersión.** En la figura 18 y tabla 22 se muestra el SEM del recubrimiento y la composición química del mismo.

**Figura 18.** SEM del recubrimiento de cinc de la arandela galvanizada por inmersión.5000X.



**Tabla 24.** Composición química del punto especificado en la figura 18 (fase Zeta), en el recubrimiento de cinc por centrifugado, determinado mediante SEM EDS.

Elemento	Wt%	At%
C	19,81	54,99
O	2,27	4,73
Fe	6,14	3,67
Zn	71,78	36,63

En la figura 18 se muestra la capa y las fases de hierro-cinc formadas en el recubrimiento, y la composición química del punto señalado, el cual corresponde a la fase zeta. Comparando estos resultados con los obtenidos en el galvanizado por centrifugado la fase zeta posee una composición similar. Además, las capas en ambos caso, se pueden identificar claramente.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis estadístico realizado se obtuvieron los valores óptimos para las variables estudiadas en este proyecto (tablas 15 y 18), tomando como valor de referencia 55 micrómetros para el espesor del recubrimiento. Para el galvanizado por centrifugado, la temperatura del baño de cinc es 447,184°C, la temperatura de precalentamiento es 96,0297°C, el tiempo de inmersión 0,515423 minutos y la velocidad de centrifugado es 454,288 RPM. Y para el caso del galvanizado por inmersión, la temperatura del baño de cinc es 450,505 °C, la temperatura de precalentamiento es 94,6926°C y el tiempo de inmersión es 0,48087 minutos. Estos valores a nivel industrial son difíciles de graduar por lo que se sugieren valores aproximados según los equipos a utilizar.

Al ingresar estos valores óptimos obtenidos para cada tipo de galvanizado en las ecuaciones de los modelos ajustados, el resultado fue de 55,0062 micras para galvanizado por centrifugado y 55,0001 micras para galvanizado por inmersión, lo que está dentro del rango aceptado en la especificación técnica ET462 Arandelas de acero galvanizado de CODENSA.

Se demostró con el estudio estadístico que la variable con mayor influencia en el proceso de galvanizado en caliente por centrifugado e inmersión, es la temperatura del baño. Por lo general, entre mayor fue la magnitud de la variable en estudio, mayor fue el espesor obtenido, excepto por la temperatura de cinc en el galvanizado por inmersión, cuyo comportamiento fue inversamente proporcional al espesor. Este fenómeno puede atribuirse a un error en el control de las variables.

Al realizar los análisis de las microestructuras y composiciones químicas de los recubrimientos, se pudieron identificar claramente las fases de hierro cinc que componen la capa, tal como se muestra en las figuras 17 y 18. Al comparar las composiciones químicas entre uno y otro proceso de galvanizado (tablas 19 y 20), no se encontró una mayor diferencia entre los porcentajes de hierro y cinc. Además, estos mismos porcentajes no varían en gran medida con respecto a los porcentajes teóricos correspondientes a la fase zeta (figura 2).

Se estableció un procedimiento para la preparación de la superficie de las piezas a galvanizar, utilizando los diferentes productos proporcionados por la empresa Bycsa, teniendo en cuenta las propiedades y las condiciones de operación estipuladas en sus respectivas fichas técnicas. Además se planteó un procedimiento para el manejo residual de estos productos, de acuerdo a los niveles de acides y concentración de estos.

Con los resultados obtenidos en el análisis estadístico, la empresa METALLAN S.A.S puede trabajar en condiciones cercanas a los valores óptimos anteriormente descritos para lograr un recubrimiento con el espesor requerido (55 micras). Además, con base en el análisis de la influencia de cada variable estudiada, la empresa puede controlar los parámetros para hacer variaciones en el espesor si es necesario.

## 6. RECOMENDACIONES

El manejo de las variables es fundamental en el resultado, por ello se hace necesario un control adecuado de las mismas para garantizar que los valores establecidos sean los correctos. Además, en el baño de cinc se deben mantener las composiciones adecuadas de elementos aleantes que son añadidos para mejorar las propiedades del recubrimiento.

Los compuestos químicos utilizados en las etapas de preparación de la superficie, deben ser los adecuados para el tipo material. Por ejemplo, en la etapa de decapado se recomienda utilizar un agente decapante con una mayor índice de acidez, para asegurar la eliminación completa de la calamina de los productos forjados a galvanizar. Además, se debe hacer un mantenimiento continuo a los compuestos químicos usados en el decapado y tratamiento con flujo, para garantizar el mayor rendimiento de los mismos.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] UAM, Universidad Autónoma de Madrid, 2008, [Online] [consulta: miércoles, 1 de Octubre de 2014] disponible en: <[https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/josem/static/CORROSION.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/josem/static/CORROSION.pdf)>.

[2] Asociación de Fabricantes de Material Eléctrico (AFME). Bandejas portacables metálicas galvanizadas en caliente. AENOR, 2008.

[3] Asociación Latinoamericana de Cinc (LATIZA). Guía para la galvanización por inmersión en caliente, 2014 [Online], [Consulta: 3 de octubre de 2014] disponible en: <<http://www.arquitecturaenacero.org/attachments/article/412/Guia-de-galvanizacal.pdf>>.

[4] Albarracín, José G. Diseño y distribución de una planta de galvanizado en caliente. Bucaramanga. Trabajo de grado (Ingeniería química). Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. pp. 3-21. 2001.

[5] Porter, Frank. Zinc Handbook: Properties, Processing, and Use in Design. Marcel Dekker, Inc. New York. 1991.

[6] Morela, Sola Pere. Recubrimientos de los Metales. Santa Fe de Bogotá: AlfaOmega; Barcelona : Marcombo, 1999.

[7] koverst Galvanisers. Centrifuge Galvanising [Online]. [Consulta 10 noviembre 2014] Disponible en: <<http://www.korvestgalvanisers.com.au/galvanising-process/centrifuge-galvanising/>> 2013.

[8] Crowley, Geoff [Online]. [Consulta: 13 de noviembre 2014] disponible en: <<http://www.finishing.com/520/34.shtml>>. 2009.

[9] Crowley, Geoff [Online]. [Consulta: 13 de noviembre 2014] disponible en: <<http://www.finishing.com/574/01.shtml>>. 2011.

[10] Garrison, Willian H.. [Online]. [Consulta: 18 de noviembre de 2014] disponible en: <<http://www.google.com/patents/US3753762>>. 1973.

[11] Bernhard Maechtel. Reparación de superficies galvanizadas. LATINGALVA. Cartagena de Indias, Colombia. 2010.

[12] Ingemecanica. Protección del acero por galvanizado [Online]. [Consulta: 15 de abril de 2015] disponible en: <<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn104.html#seccion43>>, 2015.

[13] Galvanizeit Online Seminar. Zinc based Solder [Online]. [Consulta: 20 de abril de 2015], disponible en: <<http://www.galvanizeit.org/inspection-course/repair/zinc-based-solder>>, 2015.

[14] Rico, Yraima. Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO. Vice Rectorado Barquisimeto. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Venezuela [Online]. [Consulta: 10 de febrero de 2015], disponible en: <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4208401>>, 2012.

[15] Sánchez, Miguel, et al. Operational factors affecting the hot dip galvanizing Steel. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia [Online]. [Consulta: 24 de abril de 2015] disponible en: <[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702007000400022&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702007000400022&script=sci_arttext)> 2007.

[16] Velásquez, Yaneth y Rivera, José M. Estudio de las principales variables que influyen en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente. Trabajo de grado (Ingeniería Metalúrgica), Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. 1993. Pág. 73.

[17] Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas A.G (ASIMET). Galvanizado tipo Batch [Online]. [Consulta: 6 de noviembre de 2014], disponible en: <<http://www.asimet.cl/galvanizado.htm>> ,2015.

[18] IHOBE. Sociedad Pública Gestión Ambiental. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Galvanizado en caliente [Online]. [Consulta: 18 de marzo de 2015] disponible en: <[http://www.istas.net/risctox/gestion/estructuras/\\_3161.pdf](http://www.istas.net/risctox/gestion/estructuras/_3161.pdf)>.

## BIBLIOGRAFIA

Albarracín, José G. Diseño y distribución de una planta de galvanizado en caliente. Bucaramanga. Trabajo de grado (Ingeniería química). Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. pp. 3-21. 2001.

Asociación de Fabricantes de Material Eléctrico (AFME). Bandejas portacables metálicas galvanizadas en caliente. AENOR, 2008.

Asociación de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas A.G (ASIMET). Galvanizado tipo Batch [Online]. [Consulta: 6 de noviembre de 2014], disponible en: <<http://www.asimet.cl/galvanizado.htm>> ,2015.

Asociación Latinoamericana de Cinc (LATIZA). Guía para la galvanización por inmersión en caliente, 2014 [Online], [Consulta: 3 de octubre de 2014] disponible en: <<http://www.arquitecturaenacero.org/attachments/article/412/Guia-de-galvanizacal.pdf>>.

Bernhard Maechtel. Reparación de superficies galvanizadas. LATINGALVA. Cartagena de Indias, Colombia. 2010.

Crowley, Geoff [Online]. [Consulta: 13 de noviembre 2014] disponible en: <<http://www.finishing.com/520/34.shtml>>. 2009.

Crowley, Geoff [Online]. [Consulta: 13 de noviembre 2014] disponible en: <<http://www.finishing.com/574/01.shtml>>. 2011.

Galvanizeit Online Seminar. Zinc based Solder [Online]. [Consulta: 20 de abril de 2015], disponible en: <<http://www.galvanizeit.org/inspection-course/repair/zinc-based-solder>>, 2015.

Garrison, Willian H... [Online]. [Consulta: 18 de noviembre de 2014] disponible en: <<http://www.google.com/patents/US3753762>>. 1973.

IHOBE. Sociedad Pública Gestión Ambiental. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Galvanizado en caliente [Online]. [Consulta: 18 de marzo de 2015] disponible en: <[http://www.istas.net/risctox/gestion/estructuras/\\_3161.pdf](http://www.istas.net/risctox/gestion/estructuras/_3161.pdf)>.

Ingemecanica. Protección del acero por galvanizado [Online]. [Consulta: 15 de abril de 2015] disponible en: <<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn104.html#seccion43>>, 2015.

Koverst Galvanisers. Centrifuge Galvanizing [Online]. [Consulta 10 noviembre 2014] Disponible en: <<http://www.korvestgalvanisers.com.au/galvanising-process/centrifuge-galvanising/>> 2013.

Morela, Sola Pere. Recubrimientos de los Metales. Santa Fe de Bogotá: AlfaOmega; Barcelona : Marcombo, 1999.

Porter, Frank. Zinc Handbook: Properties, Processing, and Use in Design. Marcel Dekker, Inc. New York. 1991.

Rico, Yraima. Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO. Vice Rectorado Barquisimeto. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Venezuela [Online]. [Consulta: 10 de febrero de 2015], disponible en: <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4208401>>, 2012.

Sánchez, Miguel, et al. Operational factors affecting the hot dip galvanizing Steel. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia [Online]. [Consulta: 24 de abril de 2015] disponible en: <[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702007000400022&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702007000400022&script=sci_arttext)> 2007.

UAM, Universidad Autónoma de Madrid, 2008, [Online] [consulta: miércoles, 1 de Octubre de 2014] disponible en: <[https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/josem/static/CORROSION.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/josem/static/CORROSION.pdf)>.

Velásquez, Yaneth y Rivera, José M. Estudio de las principales variables que influyen en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente. Trabajo de grado (Ingeniería Metalúrgica), Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. 1993. Pág. 73.

