

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto Técnico

“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE CONTROL PARA
EL PROCESO DE METALIZADO SOBRE LA SOLDADURA DE TUBOS PRE
GALVANIZADOS DE UNA PULGADA DE DIÁMETRO”

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de
Ingeniero Mecánico.

Autores:

Juan Fernando Alvarez Coronel

Alvaro Rodrigo Cuji Fajardo

Tutor:

Ing. Luis Marcelo Lopez Lopez

Cuenca, Agosto 2017

Cesión de Derechos de Autor

Nosotros, *Juan Fernando Alvarez Coronel*, con documento de identificación N° 0105083877y *Alvaro Rodrigo Cuji Fajardo*, con documento de identificación N° 0104300454, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “*Determinación de los Parámetros Óptimos de Control Para el Proceso de Metalizado Sobre la Soldadura de Tubos Pre Galvanizados de una Pulgada de Diámetro*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Juan Fernando Alvarez Coronel
0105083877



Alvaro Rodrigo Cuji Fajardo
0104300454

Certificación

Yo declaro que bajo mi “tutoría”, fue desarrollado el trabajo de titulación: *"Determinación de los Parámetros Óptimos de Control Para el Proceso de Metalizado Sobre la Soldadura de Tubos Pre Galvanizados de una Pulgada de Diámetro"*, realizado por: *Juan Fernando Alvarez Coronel* y *Alvaro Rodrigo Cuji Fajardo*, obteniendo el “Proyecto Técnico”, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.



Ing. Luis Marcelo Lopez Lopez
C.I. 0102906971

Declaratoria de Responsabilidad

Nosotros, *Juan Fernando Alvarez Coronel*, con número de cédula 0105083877y *Alvaro Rodrigo Cuji Fajardo*, con número de cédula 0104300454, autores del proyecto técnico de titulación "*Determinación de los Parámetros Óptimos de Control Para el Proceso de Metalizado Sobre la Soldadura de Tubos Pre Galvanizados de una Pulgada de Diámetro*", certificamos que el total contenido del "Proyecto Técnico", es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.



Juan Fernando Alvarez Coronel
C.I. 0105083877



Alvaro Rodrigo Cuji Fajardo
C.I. 0104300454

DEDICATORIAS

Este proyecto se la dedico

A Dios por todas las oportunidades que me ha brindado y bendecirme con una excelente familia.

A mis padres pues ellos son el pilar principal para la construcción de mi vida profesional, inculcaron en mi bases de responsabilidad y compromiso, con objetivos siempre de superación.

A mis hermanos que son personas que me han entregado el amor y la calidez de una gran familia a la cual amo pertenecer.

Juan Fernando

Este proyecto se la dedico

A mi esposa Geovanna y a mis hijas Lilith y Marla, por ser mi razón de vivir.

Alvaro

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, por bendecirme y permitirme llegar hasta estas instancias en mi vida, porque bajo su protección y guía puedo hacer realidad este sueño tan esperado.

Agradezco a mi familia, que son siempre mi apoyo y mi fortaleza, A mis padres que gracias al sacrificio que ellos han realizado me permiten cumplir una meta más, por haberme enseñado el valor de las cosas, a que siempre debo seguir hacia delante para conseguir mis metas a pesar de las dificultades. A mis hermanos que están siempre en todo momento para extenderme su mano y darme fuerzas para continuar.

Juan Fernando

Agradecimientos

Agradezco a mi padre por ser el pilar fundamental de mi vida y por siempre estar presente brindándome su apoyo incondicional.

A mis hermanos por el apoyo, comprensión y cariño que han dado durante estos años.

A mi compañero y amigo Juan Fernando con quien curse la universidad y finalmente concluimos nuestra tesis.

Alvaro

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Resumen

El presente proyecto presenta el proceso con el cual se llevo acabo una caracterización del recubrimiento de zinc (Zn) sobre la soldadura de los tubos de plancha pre galvanizada; aplicando la metodología de Taguchi variando 4 parámetros del proceso a dos niveles cada uno (velocidad desplazamiento del tubo [m/min], amperaje [A], voltaje [V] y presión de gas [psi]), obteniendo un total de 8 ensayos; las muestras fueron adquiridas directamente y de forma aleatoria de la línea de producción industrial, posteriormente se aplicó un ensayo en cámara salina para evaluar la resistencia a la corrosión, y con el propósito de determinar la resistencia mecánica después del metalizado se aplicaron los ensayos destructivos de tracción y flexión, igualmente se realizaron pruebas metalográficas para observar el estado del recubrimiento y un ensayo no destructivo de tintas penetrantes para observar las fallas en el recubrimiento. Los resultados obtenidos muestran que las probetas no cuentan con una buena resistencia a la corrosión puesto que a los 15 días de exposición a la niebla salina todos los ensayos presentaron corrosión, en este ensayo el resultado que presentó la menor pérdida de masa fue el que se fabricó con la menor velocidad y el menor amperaje, que según el análisis estadístico estos son los parámetros más relevantes dentro del proceso de producción, en los ensayos destructivos las pruebas de flexión no brindaron resultados relevantes, pero los de tracción mostraron una relación con la velocidad a la que se fabrican los tubos, puesto que las muestras fabricadas a 59 m/min presentaron mayor resistencia, el análisis metalográfico realizado a las probetas que presentaron la mayor y menor resistencia a la corrosión, brindó un mayor entendimiento debido a que se observó la presencia de grietas que permiten se degrade de manera prematura el recubrimiento, esto fue corroborado con un ensayo no destructivo de tintas penetrantes donde se observó las fallas presentes en el Zn metalizado sobre la soldadura.

Palabras clave: Metalizado por arco, corrosión, recubrimiento de zinc, propiedades mecánicas, resistencia, cámara salina

Abstract

This present project was done to find one characterization of the Zn coating over the welding of the tubes of pre galvanized sheet; applying the experimental design of Taguchi varying 4 parameters of the process to two levels each one (velocity of the tube m/min, amperage A, voltage V, and gas pressure Psi) obtaining a total of 8 trials; the results were acquired directly, and at random of the industrial production, then a salt spray test was applied to evaluate the corrosion resistance, and for the purpose of determining the mechanical resistance after the metallization the tensile and flexural tests were applied, also metallographic tests were carried out to observe the state of the coating, and a non-destructive test of penetrating inks to examine coating failures. The results obtained show that the tests do not have a good resistance to corrosion since the 15 days of exposure into the saline chamber, all the tests presented corrosion, in these tests the smallest loss of mass was the one that was manufactured with the lowest speed and the lowest amperage, that according to the statistical analysis these are the most relevant parameters within the production process, from the destructive tests the flexion analysis did not give relevant results, but the traction showed a relation with the speed at which the tubes are made, in consideration of the samples manufactured at 59 m/min showed greater resistance, the metallographic analysis performed on the samples that presented the smallest and largest loss of mass, gave a greater understanding because we observed the presence of cracks that allow the premature degradation of the coating, this was corroborated with a non-destructive test of penetrating inks where were observed the failures present in the metallized Zn on the welding.

Keywords: Arc spray, corrosion, zinc coating, mechanical properties, resistance, saline chamber

Índice

	<u>Pág.</u>
Índice	X
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
1 Determinación de los Parámetros Óptimos de Control Para el Proceso de Metalizado Sobre la Soldadura de Tubos Pre Galvanizados de una Pulgada de Diámetro	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.2.1 Antecedentes	2
1.2.2 Importancia y alcances	2
1.2.3 Delimitación	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Thermal spray	4
1.4.2 Arc Spraying	4
1.4.3 Parámetros del proceso	5
1.5 Marco Metodológico	6
1.5.1 Tipo de investigación	6
1.5.2 Diseño de la investigación	6
1.5.3 Diseño Estadístico	10
1.5.4 Tamaño de muestra	12
1.6 Resultados	13
1.6.1 Identificación de las características del recubrimiento	13
1.6.2 Párametros de control idóneos	14
1.6.3 Caracterización mecánica después del metalizado	17
1.7 Conclusiones	24
1.8 Recomendaciones	24
Referencias bibliográficas	25
Anexos	28
Anexo A.1 Características del equipo TAF A ARC SPRAY ZINC WIRE-02Z	29

Anexo A.2 Características del equipo TERAPRESS TP-7000	30
Anexo A.3 Características del equipo FEMTO 1000 POLISHING HEAD	31
Anexo A.4 Características del equipo OLYMPUS BX51M	32
Anexo A.5 Características del Acero Galvanizado ASTM A653 CS	33
Anexo A.6 Características del Salt Spray Tester	34

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Esquemá de una instalación de pulverización de arco. Fuente Tomado de: Pawlowski [1].	4
Figura 1.2 – Diseño del proceso para el análisis en la empresa. Fuente: Autores.	7
Figura 1.3 – Diseño del proceso para ensayo de cámara salina. Fuente: Autores.	7
Figura 1.4 – Diseño del proceso para ensayos destructivos. Fuente: Autores.	8
Figura 1.5 – Diseño del proceso para análisis metalográfico. Fuente: Autores.	9
Figura 1.6 – Diseño del proceso para ensayo de tintes penetrantes. Fuente: Autores.	9
Figura 1.7 – Esquema del análisis de las varaibales involucradas. Fuente: Autores.	10
Figura 1.8 – Bidones de cartón para el alambre de zinc Fuente: Autores.	14
Figura 1.9 – Proceso ensayo de cámara salina. Fuente: Autores.	15
Figura 1.10–Resultados del ensayo de cámara salina con porcentajes de pérdida de masa. Fuente: Autores.	16
Figura 1.11–Resultado cámara salina. Fuente: Autores.	18
Figura 1.12–Proceso del ensayo de tracción. Fuente: Autores.	19
Figura 1.13–Ensayo de flexión. Fuente: Autores	20
Figura 1.14–Ensayo de metalografía. Fuente: Autores.	21
Figura 1.15–Medición del espesor de la capa de recubrimiento. Fuente: Autores	22
Figura 1.16–Medición del espesor de la capa de recubrimiento por galvanización en caliente. Fuente: Autores.	22
Figura 1.17–Ensayo tintes penetrantes. Fuente: Autores.	23
Figura 1.18–Resultados de tintes penetrantes. Fuente: Autores.	24

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1.1 – Variables y constantes del proceso de Metalizado. Fuente: Autores.	11
Tabla 1.2 – Factores y niveles del experimento. Fuente: Autores.	11
Tabla 1.3 – Arreglo ortogonal L_8 . Fuente: Autores.	12
Tabla 1.4 – Sustitución de parámetros. Fuente: Autores.	12
Tabla 1.5 – Propiedades del alambre de zinc. Fuente: ANBRUSS S.A.©	13
Tabla 1.6 – Composición química del alambre. Fuente: ANBRUSS S.A.©	14
Tabla 1.7 – Parámetros del equipo de cámara salina. Fuente: ASTM B117 [2].	15
Tabla 1.8 – Masa inicial de las probetas (g) Fuente: Autores.	15
Tabla 1.9 – Masa final de las probetas (g). Fuente: Autores.	16
Tabla 1.10–Resultados del ensayo de cámara salina. Fuente: Autores.	17
Tabla 1.11–Análisis de varianza de medias. Fuente: Autores.	17
Tabla 1.12–Resultados del ensayo de tracción. Fuente: Autores.	18
Tabla 1.13–Resultados del ensayo de flexión. Fuente: Autores.	20

Determinación de los Parámetros Óptimos de Control Para el Proceso de Metalizado Sobre la Soldadura de Tubos Pre Galvanizados de una Pulgada de Diámetro

1.1 Introducción

A comienzos del siglo XX se desarrollaron estudios para resolver el problema de la corrosión sobre distintos materiales en varios países. En la época actual el fenómeno de la corrosión es analizado en los aceros; debido a su gran importancia dentro del campo de la ingeniería; estos componen una considerable parte de las estructuras que se encuentran expuestas a las condiciones atmosféricas. En vista que las condiciones atmosféricas varían de acuerdo al lugar de aplicación, no se llega a conocer completamente el impacto que tendrá la corrosión sobre los aceros, lo que conlleva a la utilización de recubrimientos que garanticen que el acero no se oxide. Uno de los métodos más utilizados es el galvanizado [3, 4].

El galvanizado es un proceso electroquímico utilizado con el fin de dar un recubrimiento a un metal con otro. El proceso más comúnmente empleado consiste en dar una capa de zinc (Zn) sobre el hierro (Fe), cuyo espesor depende de la aplicación para la cual es requerido; puesto que el zinc es más oxidable y menos noble que el hierro, esto genera un óxido sumamente estable que brinda una lámina protectora contra la oxidación. Existen diferentes métodos para cubrir el hierro con zinc, los más utilizados son: la galvanización en caliente, la galvanización en frío, el galvanizado por laminación y el metalizado por arco o por llama [3, 5–8].

En este caso el estudio se centra en el metalizado por arco, que es uno de los métodos aplicados en las líneas de galvanización continua, que ha facilitado en gran medida a la producción de recubrimientos de zinc uniformes a grandes velocidades. La mayoría de las líneas de galvanización se basan en un operario, el cual se encarga del ajuste en la presión del gas y la posición del rociado con relación a la superficie a recubrir, con el fin de controlar el espesor del recubrimiento. Esto da una eficiencia considerable siempre que el operario esté atento y posea indicadores precisos para la medición de la capa de recubrimiento. La información sobre el metalizado por arco es muy escasa, lo que ha llevado a una experimentación en gran medida de la velocidad de la banda, la presión del cabezal de rociado y del espacio entre el cabezal y la banda [9–12].

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Antecedentes

Este proyecto nace con el fin de brindar una caracterización del proceso de metalizado, puesto que hasta la actualidad y en el caso específico de la zona productiva de Cuenca no se ha realizado un estudio previo para su aplicación dentro del campo industrial, debido a la falta de recursos económicos, tecnológicos y de personal capacitado se ha dejado un poco de lado este proceso, manteniendo los procesos tradicionales como el galvanizado por inmersión en caliente.

Por este motivo y con el firme propósito de brindar un aporte para la mejora en la aplicación industrial, teniendo en cuenta que se debe reducir los recursos utilizados, haciendo más viable la implementación del metalizado de Zinc (Zn) por arco eléctrico. Uno de los beneficios de este proceso es la obtención de una mejor calidad del producto terminado a un menor costo y menor tiempo de producción.

1.2.2 Importancia y alcances

El presente trabajo contribuirá en el campo tecnológico con una base de los parámetros de control necesarios en el proceso de metalizado, que servirá como punto de partida para nuevos trabajos de investigación en esta línea, brindado al sector investigativo un análisis comparativo, que brindará con una metodología que permita determinar el control óptimo dentro del proceso, en donde se incluyan las propiedades de los materiales utilizados y las características de la máquina de metalizado por arco. Además, se realizará un análisis cuantitativo y cualitativo de los efectos que tienen las variables del proceso sobre la adherencia del recubrimiento.

A nivel industrial, se aportará con información que permitirá una adecuada producción, debido a que el escaso conocimiento del control de metalizado genera problemas en su implementación y en la calidad de los productos, aumentando los costos de producción y perdiendo territorio en el mercado.

La Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, cuenta actualmente con un laboratorio de Metalografía, el mismo que brinda los recursos necesarios para la caracterización de los materiales, permitiendo analizar las muestras de tubería pre galvanizada y aportar los datos necesarios para el estudio de las variables involucradas.

1.2.3 Delimitación

Este proyecto será desarrollado en dos etapas, en la primera tiene que ver con la experimentación, la misma que será llevada a cabo en las instalaciones de TUGALT para la obtención de las muestras. La segunda etapa se desarrollará dentro de los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, donde se realizarán los análisis de las muestras previamente obtenidas. Además con el apoyo de la empresa Vanderbilt se utilizará el equipo de cámara salina, con el cual se realizará un ensayo de corrosión y poder determinar la pérdida de masa de la tubería.

Se debe limitar este proyecto a la utilización de los parámetros de configuración que permite el equipo de metalizado por arco marca TAFE modelo BP-400, este cuenta con la información y estudios necesarios para la realización de los ensayos y validación de resultados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar los parámetros de control para el recubrimiento de zinc sobre la soldadura de tubos pre galvanizados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar las características mecánicas del recubrimiento aplicado sobre el material base en el proceso de metalizado.
- Establecer los parámetros de control idóneos requeridos en el metalizado para alcanzar una mejor adherencia.
- Establecer las características mecánicas del material de la tubería después del proceso de metalizado.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Thermal spray

La aspersión o pulverización térmica, es un proceso empleado para crear recubrimientos mediante la proyección de gotas fundidas de distintos materiales como metales, cerámicos o polímeros.

Las técnicas de proyección térmica han tenido un amplio desarrollo y entre ellas consta la pulverización por llama (flame spraying), pulverización de plasma atmosférico (atmospheric plasma spraying), pulverización por arco (arc spraying), pulverización con pistola de detonación (detonation-gun spraying), pulverización con oxi-combustible a alta velocidad (high-velocity oxy-fuel spraying), pulverización con plasma de vacío (vacuum plasma spraying), pulverización con plasma de atmosfera controlada (controlled-atmosphere plasma spraying), pulverización con método de gas frio (cold-gas spraying method), entre otras [1, 13].

1.4.2 Arc Spraying

En la Figura 1.1, se presenta el proceso de pulverización con arco eléctrico o por sus siglas en ingles AS, este proceso consta de dos cables de alimentación continua, que convergen en un punto del espacio. Los cables estan cargados con potenciales eléctricos distintos con el fin de crear el arco eléctrico, convirtiendo a los cables en electrodos consumibles, que se funden y aportan material a la superficie a recubrir. Para el chorro de gas se utiliza generalmente aire comprimido para atomizar el material fundido [1, 13–15].

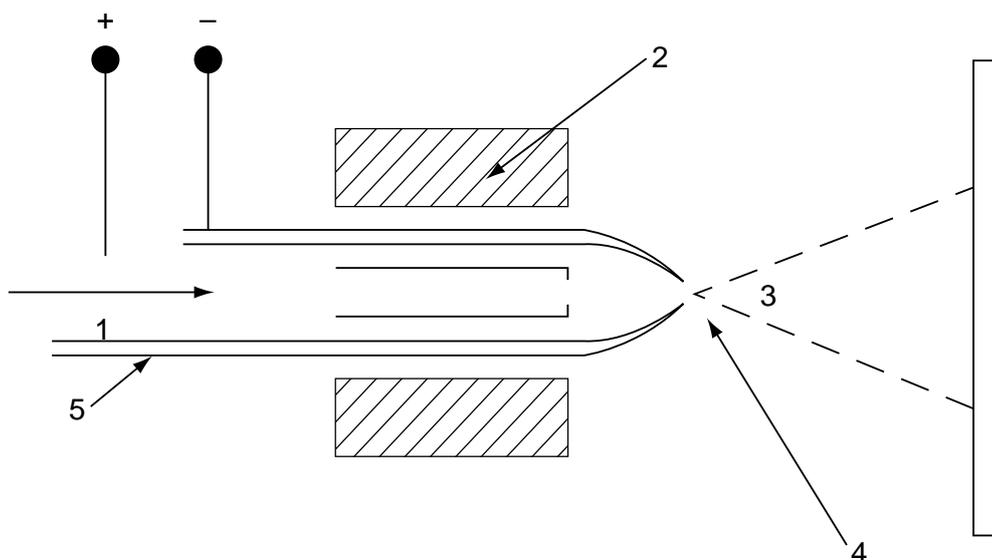


Figura 1.1 – Esquemá de una instalación de pulverización de arco: (1) El flujo de gas de atomización; (2) La antorcha blindaje exterior; (3) Flujo de partículas fundidas; (4) Arco eléctrico; (5) Electrodo de arco consumibles. **Fuente:** Tomado de Pawlowski [1].

1.4.3 Parámetros del proceso

1.4.3.1 Arco eléctrico

- Energía eléctrica: en el rango de 5-10 kW
- Temperatura de Arco: puede llegar a 6100K con una corriente de arco de 280A [16]
- Voltaje del arco: en el rango de 20V - 40V - una tensión cada vez mayor corresponde a los aumentos en los tamaños de las gotas pulverizadas.

1.4.3.2 Materiales

- Materiales: todos los materiales conductores de la electricidad son aplicables. Estos son tradicionalmente metales, tales como zinc (Zn), aluminio (Al), o aleaciones de molibdeno (Mo), níquel (Ni) y cromo (Cr) entre las aleaciones más comunes tenemos NiCr, NiAl o NiCrAl. [17–19].
- Diámetro: entre 1,6 mm - 5,0 mm.
- Velocidad de las partículas: partículas fundidas formadas de hilos puede alcanzar velocidades de hasta 150 m/s. [20].

1.4.3.3 Parámetros principales del proceso

- La tasa de deposición está en el intervalo de 50 a 1000 *g/min*.
- La distancia de pulverización: 50-170 *mm*.
- La atmósfera pulverización es aire, pero se puede instalar una bomba de vacío a la antorcha, o atmósferas reactivas o inertes.
- El gas de atomización es normalmente aire, pero puede ser nitrógeno o una mezcla de oxígeno con el gas combustible.
- Presión de gas de atomización está en el intervalo 0,2 a 0,7 *MPa*.
- El caudal de gas de atomización está en el rango amplio de 20 a 1300 *l/min*.
- Se puede aplicar un post-tratamiento de la pulverización por recocido en horno con el fin de mejorar las densidades y resistencias de unión de los recubrimientos.

1.4.3.4 Propiedades del recubrimiento

La resistencia de la unión a la tracción está en el intervalo de 10 a 30 *MPa* para Zn y recubrimientos de Al [21], pero puede alcanzar un valor de 70 *MPa* para los recubrimientos de NiAl o para NiCr + SiC compuestos pulverizados utilizando SonarcTM. La porosidad se encuentra en el intervalo de 10 a 20%. Los espesores de los revestimientos están en la gama de 100 a 2000 μm .

1.5 Marco Metodológico

1.5.1 Tipo de investigación

Para poder realizar un análisis de las variables involucradas en el proceso de metalizado con zinc sobre la soldadura en tubos pre galvanizado, la investigación que se va a realizar es de tipo experimental:

Experimental: donde los efectos producidos por la manipulación de las variables independientes presentan la mejor eficiencia en la adherencia del recubrimiento. Constará de dos análisis, el primero correspondiente a uno del tipo descriptivo y el segundo es un análisis correlacional.

1.5.2 Diseño de la investigación

1.5.2.1 Metalizado (TUGALT)

El equipo utilizado para desarrollar la experimentación es TAF A ARC SPRAY ZINC WIRE-02Z modelo PB400, el cual se encuentra disponible en las instalaciones de la empresa TUGALT, las características del equipo se indican en el Anexo A1. Los materiales base y de recubrimiento de esta experimentación fueron proporcionados por la empresa TUGALT los mismo que se detallan a continuación:

El material base es un Acero Galvanizado ASTM A653 CS tipo B [22], los datos técnicos se encuentran en el Anexo A5. El material del recubrimiento es el Alambre a base de Zinc.

En la Figura 1.2, se muestra la metodología implementada para la obtención de las muestras dentro de la línea de producción de la empresa.

1.5.2.2 Ensayo Cámara Salina (VANDERBILT)

Para el ensayo en la cámara salina se basa su desarrollo en el uso de la norma ASTM-B117 "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus" [2] en el cual se especifican los parámetros a los que se deben someter las probetas para posteriormente ser analizadas y lograr una correcta recolección de los datos. Entre los parámetros que deben ser monitoreados tenemos:

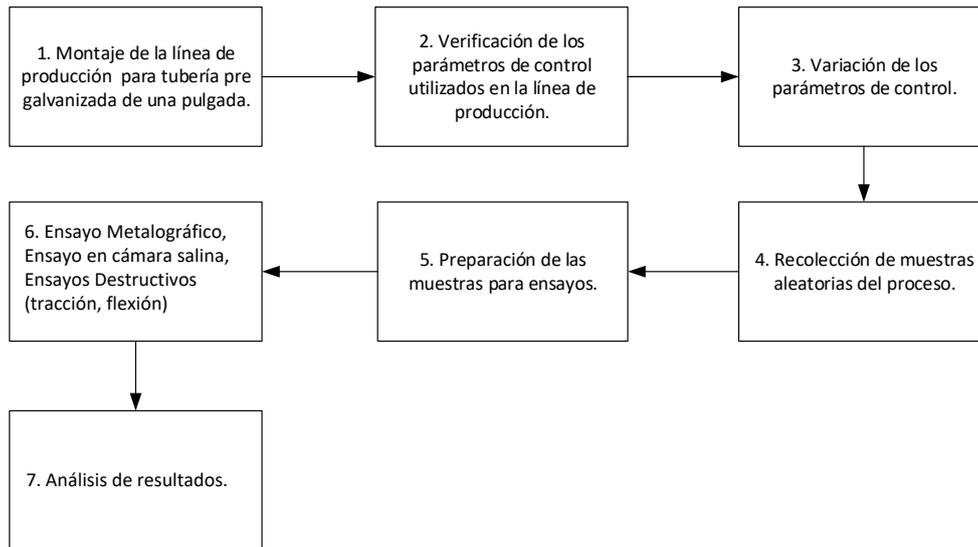


Figura 1.2 – Diseño del proceso para el análisis en la empresa. **Fuente:** Autores.

- La temperatura a la que se encuentran las probetas dentro de la cámara.
- La composición de la niebla utilizada en el ensayo.
- El tiempo de permanencia de las probetas en la cámara salina.
- La presión interna de la cámara salina.

En la empresa VANDERBILT perteneciente al Grupo Industrial Graiman de la ciudad de Cuenca, cuenta con la maquinaria y los materiales necesarios para realizar el ensayo. La maquina utilizada es Salt Spray Tester modelo YSST-108B fabricado por la compañía Dongguan Yuanyao Electronics Technology Co. Ltd, las especificaciones de este equipo se encuentran en el Anexo 6.

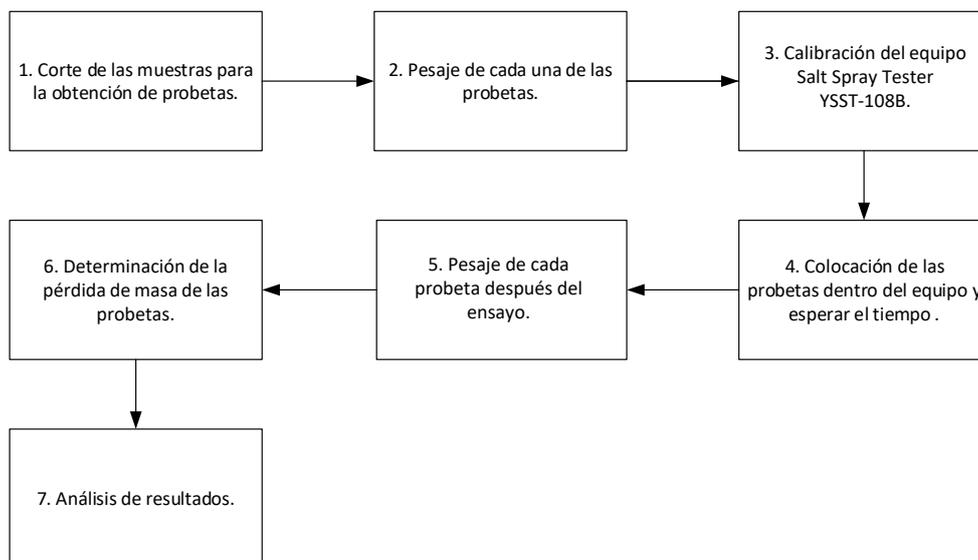


Figura 1.3 – Diseño del proceso para ensayo de cámara salina. **Fuente:** Autores.

1.5.2.3 Ensayos Destructivos (tracción, flexión)

Estos estudios se llevaron a cabo, con la finalidad de determinar si existe una variación en la resistencia a la tracción y flexión en la tubería pre galvanizada, cuando se modificaron los parámetros de control dentro del proceso de metalizado. Para el desarrollo de las pruebas de tracción se utilizó el laboratorio de ensayos destructivos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, el cual tiene a su disposición la Máquina Universal de ensayos de 600kN marca Metro Com Engineering S.P.A de procedencia italiana. La preparación de probetas y el ensayo de tracción se realizaron bajo la norma ASTM E8 "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials" [23].

Para el ensayo de flexión se cuenta con la Máquina Universal de ensayos de 200kN marca Metro Com Engineering S.P.A de procedencia italiana. La preparación de probetas y el ensayo se realizaron bajo la norma ASTM E290 "Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility" [24].

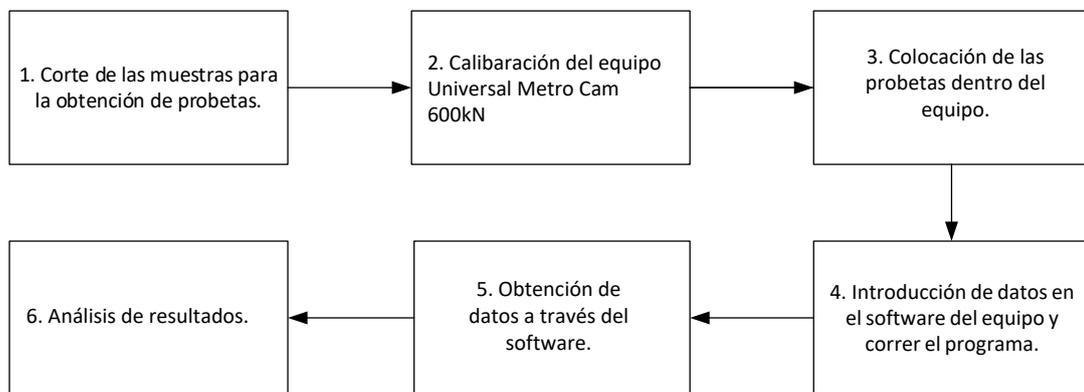


Figura 1.4 – Diseño del proceso para ensayos destructivos. **Fuente:** Autores.

1.5.2.4 Metalografía (Laboratorios UPS)

Para el desarrollo de esta metodología tiene importancia el uso de la norma internacional ASTM E3-01 "Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens" [25] que describe las adecuadas técnicas para la preparación de muestras metalográficas, y lograr una recolección de datos correcta. La metodología propuesta presenta las características esenciales para conseguir la información necesaria y lograr los objetivos propuestos.

El laboratorio de Ensayos Metalográficos brinda las facilidades para que esta experimentación se pueda realizar con la metodología planteada, puesto que cuenta con los equipos necesarios recurrentes en la norma citada. Para el Embebido de las probetas se utilizará el Equipo TERAPRESS TP-7000 el cual se detalla en el Anexo A2, para el pulido se cuenta con el Equipo FEMTO 1000 POLISHING HEAD cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo A3, y finalmente para el análisis microscópico se dispone de un microscopio digital Olympus BX51M, ver Anexo A4.

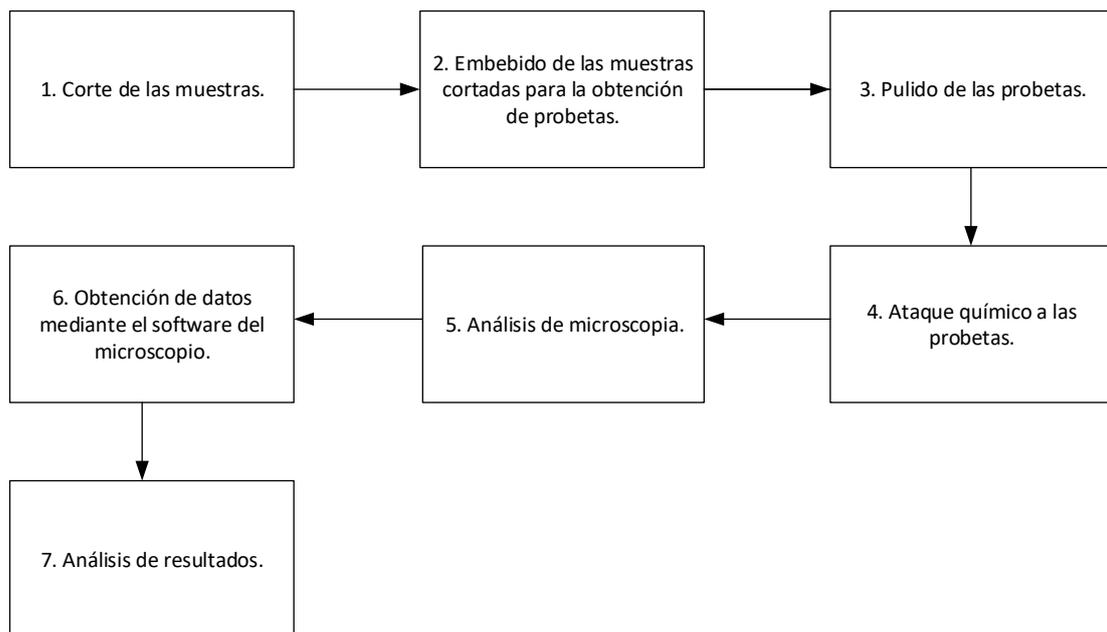


Figura 1.5 – Diseño del proceso para análisis metalográfico. **Fuente:** Autores.

1.5.2.5 Tintes penetrantes (Laboratorios UPS)

Para efectuar este ensayo y poder obtener datos reales se utilizó la guía de la norma internacional ASTM E165 / E165M-12 "Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry" [26], en la misma se detallan las técnicas y el tratamiento adecuado con el cual se debe aplicar los diferentes reactivos sobre cada una de las muestras que se pretende analizar, y así poder visualizar el estado del recubrimiento de zinc sobre la soldadura del tubo.

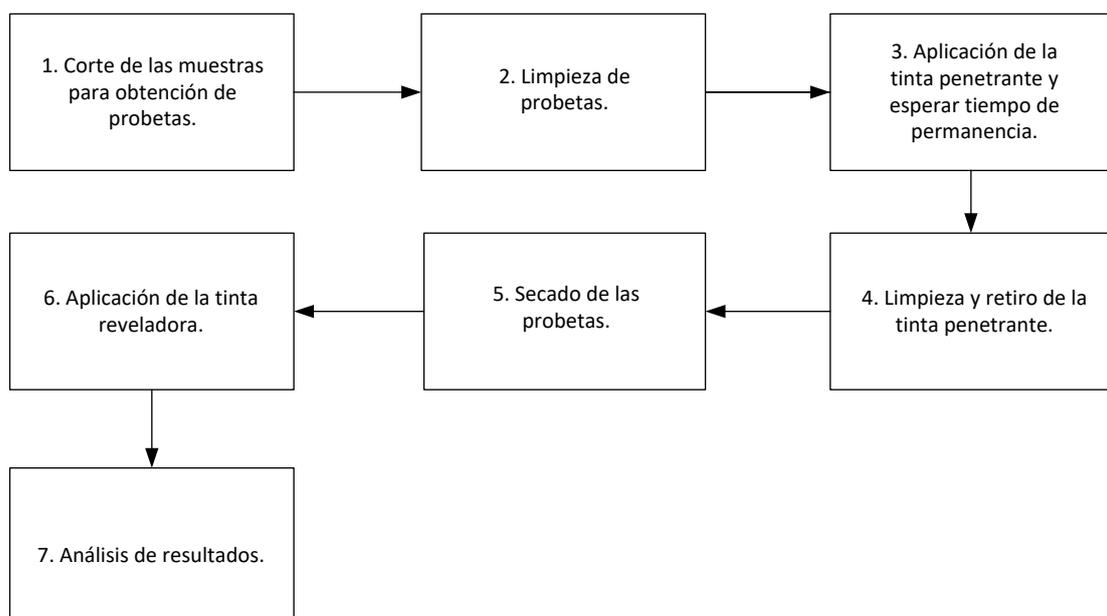


Figura 1.6 – Diseño del proceso para ensayo de tintes penetrantes. **Fuente:** Autores.

El laboratorio de Ensayos No Destructivos presenta las facilidades para realizar el análisis de tintes penetrantes, se dispone de tres tipos de solventes marca SPOTCHECK, los cuales son utilizados para limpieza donde se aplica el tipo SKC-S, el SKL-WP2 liquido penetrante que produce un contraste de color rojo visible para la identificación de discontinuidad, y el SKD-S2 liquido revelador, el mismo que posee partículas blancas de secado rápido que producen un revestimiento blanco opaco para un fondo contrastante alrededor del tinte penetrante.

1.5.3 Diseño Estadístico

El diseño planteado para la resolución del problema esta basado en el diseño experimental de Taguchi, debido a que algunas de sus fortalezas son los análisis de desempeño en el campo aplicativo con el fin de incluir las variables de ruido y la mejora de productos. La metodología de Taguchi emplea la función pérdida y la relación señal-ruido con la finalidad de disminuir la variabilidad, es decir, el número de ensayos necesarios. El modelo matemático al que se rige esta metodología lo vemos en la Ecuación 1.1, donde se puede ver claramente la aditividad de los factores principales y que en conjunto con la irrelevancia que le da a las interacciones, los arreglos ortogonales que no son más que arreglos factoriales fraccionados y la media de variabilidad, conocida como razón señal ruido (S/N) nos permiten realizar el análisis de resultados [27, 28].

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1x_1 + \alpha_2x_2 + \alpha_3x_3 + \dots + \alpha_ix_i \quad (1.1)$$

El análisis de las diferentes variables que intervienen en esta investigación se indican en la Figura 1.7.

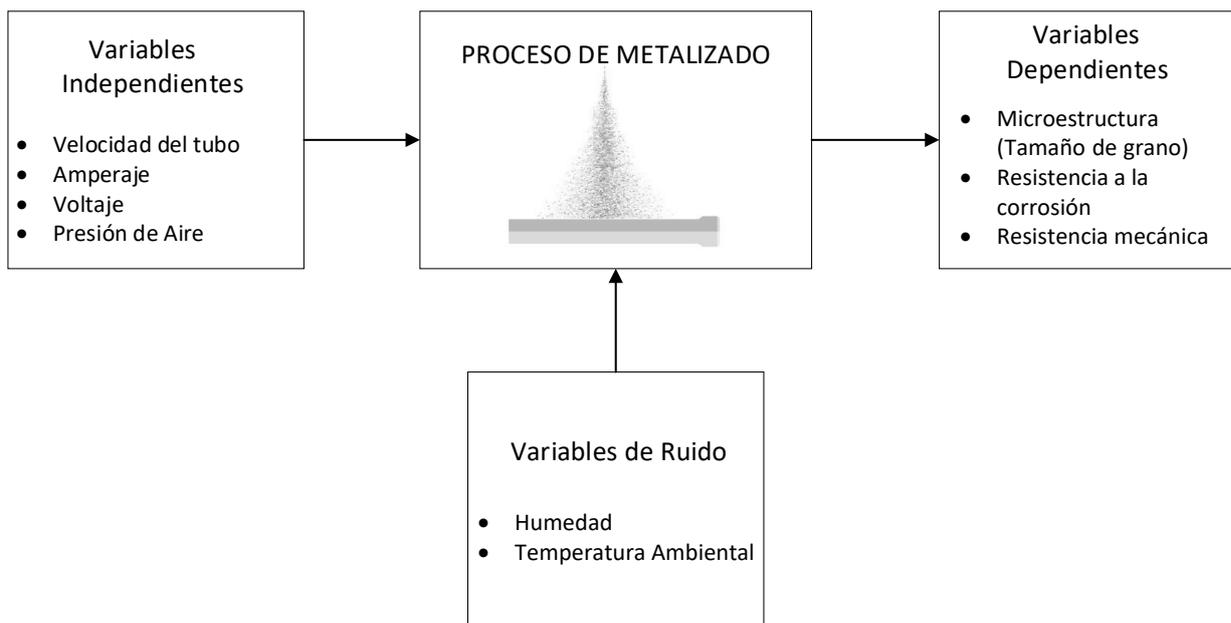


Figura 1.7 – Esquema del análisis de las variables involucradas. **Fuente:** Autores.

Para el desarrollo de esta parte de la investigación se utilizaron los recursos proporcionados por la empresa TUGALT S.A., entre los cuales tenemos la línea de formado de tubería pre galvanizada, plancha de Acero Galvanizado ASTM A653 CS tipo B [22], alambre a base de Zinc para el recubrimiento, equipo para recubrimiento TAFE Arc Spray Feeder PF400R, la calibración de estos equipos se resume en la Tabla 1.1. Se realizó la toma de medida de otros datos que intervienen en el proceso como la temperatura del tubo y la posición de la antorcha.

Tabla 1.1 – Variables y constantes del proceso de Metalizado. **Fuente:** Autores.

Variables del Proceso	Calibración
Velocidad del Tubo	55 m/min
Amperaje	60 A
Voltaje	22 V
Presión	60 psi
Constantes del Proceso	Medición
Altura de la Antorcha	30 mm
Ángulo de la Antorcha	90°
Temperatura del tubo antes del recubrimiento	78 °C
Temperatura del tubo después del recubrimiento	64.5 °C
Variables de ruido	Medición
Temperatura ambiente	21 °C
Humedad	42%

Partiendo de la obtención de estos valores se procedió a manipular las variables del proceso aplicando el diseño experimental de Taguchi, con el fin de obtener muestras aleatorias, para luego analizarlas en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana y poder determinar cómo influyen cada una de ellas. En base al diseño experimental se plantean los arreglos ortogonales dependiendo del número de factores a utilizar, para este estudio se tienen cuatro factores a dos niveles cada uno como se puede ver en la Tabla 1.2, por lo tanto, se usará un arreglo ortogonal L_8 , el mismo que se muestra en la Tabla 1.3.

Tabla 1.2 – Factores y niveles del experimento. **Fuente:** Autores.

Factor	Descripción	Nivel 1	Nivel 2
A	Velocidad del tubo (m/min)	52	59
B	Voltaje (V)	20	24
C	Amperaje (A)	57	63
D	Presión del aire (psi)	57	63

En la Tabla 1.3, se presenta el arreglo ortogonal donde e_1 y e_2 hacen referencia a la evaluación del error aleatorio para el análisis de la varianza que se realizará en este estudio.

Tabla 1.3 – Arreglo ortogonal L_8 . **Fuente:** Autores.

No.	A	B	C	D	e_1	e_2
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2
3	1	2	1	2	2	2
4	1	2	2	1	1	1
5	2	1	1	2	1	2
6	2	1	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	1
8	2	2	2	2	1	2

La sustitución de los parámetros del proceso en el arreglo ortogonal se presenta en la Tabla 1.4, mismos con los que se procederá en la experimentación en la línea de producción de la empresa TUGAL.

Tabla 1.4 – Sustitución de parámetros. **Fuente:** Autores.

No.	A	B	C	D
1	52	20	57	57
2	52	20	63	63
3	52	24	57	63
4	52	24	63	57
5	59	20	57	63
6	59	20	63	57
7	59	24	57	57
8	59	24	63	63

1.5.4 Tamaño de muestra

La empresa TUGAL produce en promedio al mes 2900m, es decir aproximadamente 16 toneladas de tubería de 1 pulgada de diámetro a base de plancha pre galvanizada con recubrimiento de Zn. Para este estudio debemos limitar el tamaño poblacional a la producción diaria de tubos que sería de alrededor de 103.5m \approx 104m. Dado que tenemos una población finita se utilizará la Ecuación 1.2.

$$n = \frac{Nz_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 pq}{\epsilon^2(N-1) + z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 pq} \quad (1.2)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra.

N = Tamaño de la población.

$z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ = Nivel de confianza.

e = Límite aceptable de error muestral.

p = Probabilidad a favor de que el evento ocurra.

q = Probabilidad en contra de que el evento ocurra ($q = 1 - p$).

Considerando un nivel de confianza de 95% (1.96), un límite de error muestral de 5% y $p = 95\%$, se calcula el tamaño de muestra reemplazando los valores.

$$n = \frac{104 \cdot 1.96^2 \cdot 0.95 \cdot 0.05}{0.05^2(104 - 1) + 1.96^2 \cdot 0.95 \cdot 0.05} = 43,133 \approx 43$$

Debido a los costos que representaría para la empresa realizar 43 ensayos de cada arreglo propuesto con el método Taguchi y la disponibilidad del equipo, se restringirá esta investigación a 4 muestras por cada arreglo, con una longitud de 1.2 m cada una.

1.6 Resultados

1.6.1 Identificación de las características del recubrimiento

1.6.1.1 Propiedades mecánicas del alambre para recubrimiento

En la identificación de las características mecánicas del recubrimiento aplicado sobre la soldadura de tubos pre galvanizados dentro del proceso de metalizado se recolecto la información que se presenta en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 – Propiedades del alambre de zinc. **Fuente:** ANBRUSS S.A.©

Item	Descripción
Densidad	7,142g/cm ³
Dureza	2.5Mohs
Punto de Ebullición	907°C
Punto de Fusión	419,58°C
Resistencia a la Tracción	14kg/mm ²
Limite Elástico	7kg/mm ²

1.6.1.2 Composición del alambre para recubrimiento

Su análisis químico debe ir de acuerdo a los valores que se presentan en la Tabla 1.6 :

Tabla 1.6 – Composición química del alambre. **Fuente:** ANBRUSS S.A.©

Item	Valor
Zinc (Zn)	99.99% <i>max.</i>
Plomo (Pb)	0.003% <i>max.</i>
Cadmio (Cd)	0.003% <i>max.</i>
Hierro (Fe)	0.002% <i>max.</i>
Cobre (Cu)	0.001% <i>max.</i>
Estaño (Sn)	0.001% <i>max.</i>

1.6.1.3 Presentación comercial del alambre para recubrimiento

La presentación del producto es en forma de alambre o hilo (redondo) bajo las normas: JIS H2107-57 "Zinc Metal R(197)" [29], ASTM B6-13 "Standard Specification for Zinc" [30]. El diámetro del alambre es de 2mm, con una tolerancia de $\pm 0.05mm$. El alambre que es utilizado en el metalizado llega en bidones de cartón de 500kg y 580mm de diámetro exterior (apto para campana de guiado), como se muestra en la Figura 1.8. Para una mejor calidad el material debe estar libre de impurezas y no presentar oxidación en su superficie.

**Figura 1.8** – Bidones de cartón para el alambre de zinc **Fuente:** Autores.

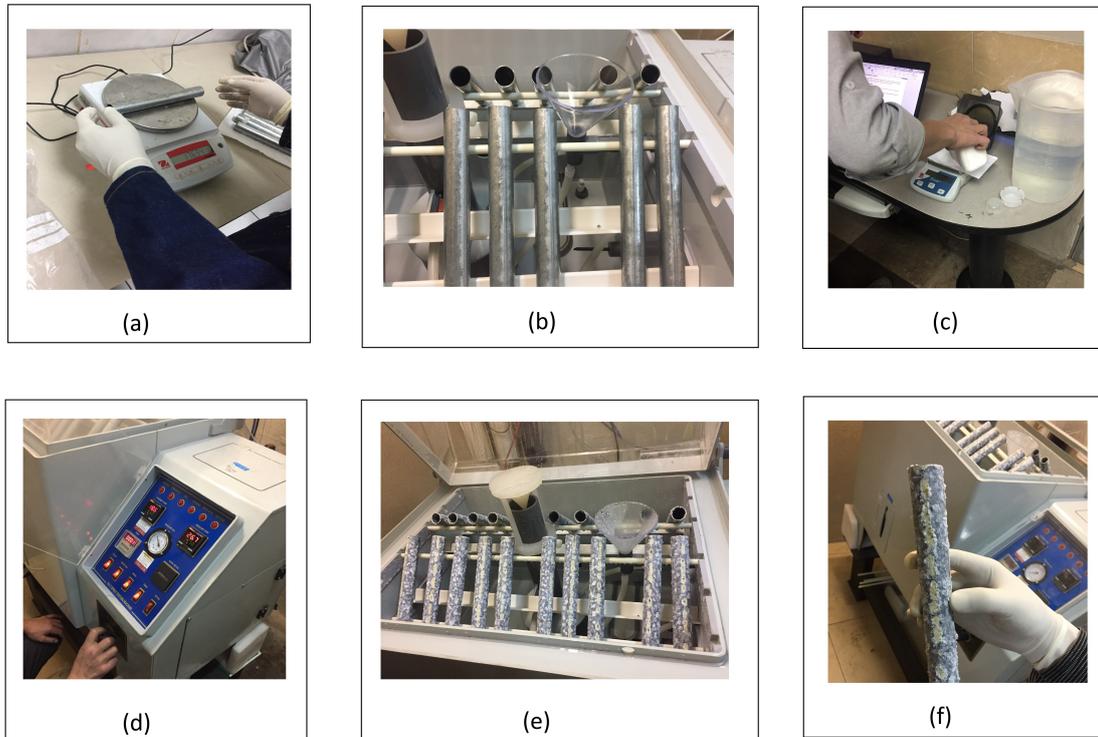
1.6.2 Parámetros de control idóneos

1.6.2.1 Cámara Salina

El ensayo de cámara salina se lo realizó para determinar la pérdida de masa que se genera en la tubería pre galvanizada, se analizaron 4 muestras correspondientes a cada una de las configuraciones propuestas anteriormente en el método estadístico, siendo analizadas un total de 32 probetas. Para el desarrollo de este estudio se realizó primero la preparación de las probetas, cuya longitud fue de 20 cm, en la preparación de la solución salina, se disuelve 5 ± 1 partes de cloruro de sodio en 95 partes de agua destilada tipo IV. Las condiciones para este ensayo se muestran en la Tabla 1.7, según las especificaciones de la norma ASTM B117 [2].

Tabla 1.7 – Parámetros del equipo de cámara salina. **Fuente:** ASTM B117 [2].

Presión de aire	83 kPa
Composición de niebla salina	3711,3 g (H_2O) + 195,3 g ($NaCl$)
Temperatura dentro de la cámara	35°C
Tiempo de permanencia	720 h

**Figura 1.9** – Proceso ensayo de cámara salina: (a) Pesaje inicial de la probeta, (b) Montaje de la probeta en el equipo, (c) Preparación solución salina, (d) Calibración del equipo, (e) Extracción de probetas, (f) Limpieza y pesaje final. **Fuente:** Autores.

En la tabla 1.8 se muestran los pesos iniciales de las probetas antes del ensayo de cámara salina, los pesos finales después del ensayo se presentan en la Tabla 1.9.

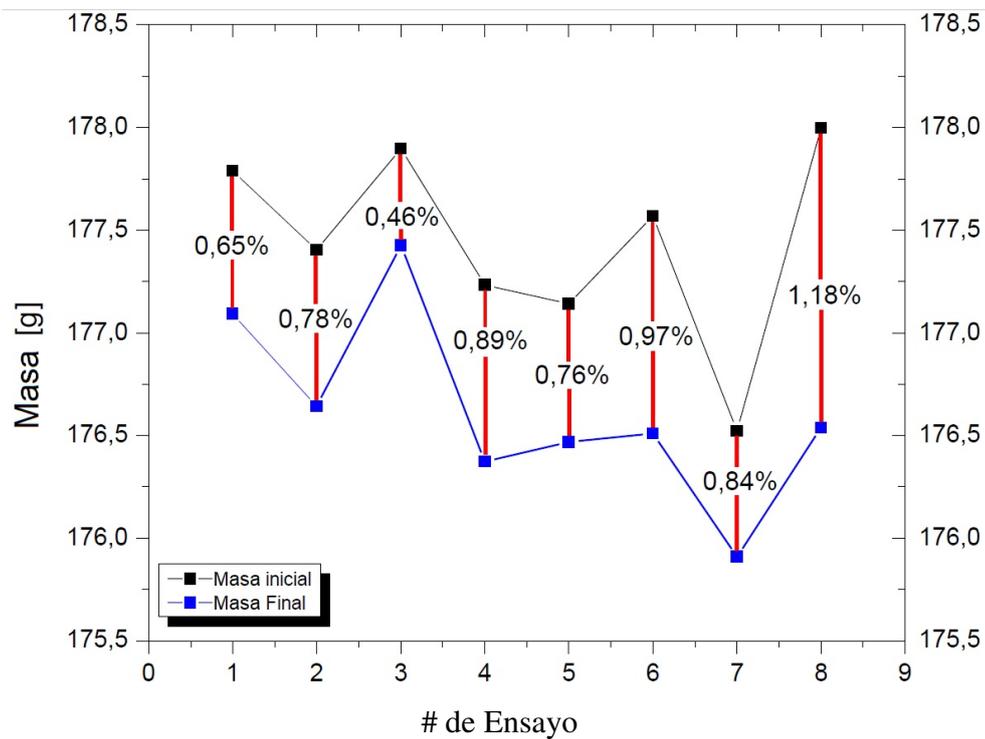
Tabla 1.8 – Masa inicial de las probetas (g) **Fuente:** Autores.

No.	#1	#2	#3	#4
1	177,88	177,76	177,81	177,74
2	177,86	178,62	176,81	176,86
3	177,4	177,13	178,37	178,1
4	177,63	177,4	176,65	177,37
5	176,94	176,85	177,14	177,18
6	176,94	176,95	177,37	178,4
7	178,29	176,86	176,74	175,83
8	177,69	177,69	178,4	177,15

La Figura 1.10, presenta un resumen de los resultados obtenidos del ensayo de cámara salina con un porcentaje de pérdida de masa.

Tabla 1.9 – Masa final de las probetas (g). **Fuente:** Autores.

No.	#1	#2	#3	#4
1	176,70	176,72	176,53	176,52
2	176,68	177,27	175,20	175,43
3	176,51	176,39	177,51	177,32
4	176,05	175,90	175,02	175,78
5	175,50	175,60	175,74	175,87
6	175,19	175,26	175,56	176,76
7	176,84	175,39	175,22	174,33
8	175,50	175,75	176,26	175,06

**Figura 1.10** – Resultados del ensayo de cámara salina con porcentajes de pérdida de masa. **Fuente:** Autores.

En la Tabla 1.10, se muestran los resultados obtenidos de pérdidas de masa en gramos (g) después de que las probetas permanecieran 720 h equivalentes a 15 días dentro de la cámara salina con los que se calcula una media, desviación estándar y la relación señal ruido (S/N).

Con estos resultados se procedió a realizar el análisis estadístico con la ayuda del software Minitab ®, para determinar cuales son los parámetros idóneos del proceso mediante un análisis de medias que se presenta en la Tabla 1.11, donde se puede ver que los factores principales del proceso son la velocidad del tubo y el amperaje.

Tabla 1.10 – Resultados del ensayo de cámara salina. **Fuente:** Autores.

No.	#Y1	#Y2	#Y3	#Y4	Media	Desv. estandar	S/R
1	1,180	1,04	1,28	1,22	1,18	0,10198039	-1,46190073
2	1,180	1,35	1,61	1,43	1,3925	0,17858238	-2,92914769
3	0,890	0,74	0,86	0,78	0,8175	0,06946222	1,726792
4	1,580	1,50	1,63	1,59	1,575	0,05446712	-3,94950483
5	1,440	1,25	1,40	1,31	1,35	0,08602325	-2,6198807
6	1,750	1,69	1,81	1,64	1,7225	0,0736546	-4,72913615
7	1,450	1,47	1,52	1,50	1,485	0,03109126	-3,43595665
8	2,190	1,94	2,14	2,09	2,09	0,10801234	-6,41161663

Tabla 1.11 – Análisis de varianza de medias. **Fuente:** Autores.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F
Velocidad del tubo	1	0,35385	0,35385	0,35385	7,93
Voltaje	1	0,013	0,013	0,013	0,29
Amperaje	1	0,47409	0,47409	0,47409	10,63
Presión de aire	1	0,01221	0,01221	0,01221	0,27
Error residual	3	0,1338	0,1338	0,0446	
Total	7	0,98695			

Según los datos recolectados con este ensayo, se puede observar que la configuración 3, es la que presentó menor pérdida de masa, por otro lado la configuración 8 presentó la mayor pérdida de masa. En la Figura 1.11(a) que representa a la configuración 3 se puede distinguir que en el cordón de la soldadura del tubo existen zonas donde se encuentra aún el recubrimiento, en cambio en la Figura 1.11(b) correspondiente a la configuración 8 se nota claramente como no existe recubrimiento y se aprecia la existencia de óxido sobre el cordón de soldadura.

1.6.3 Caracterización mecánica después del metalizado

1.6.3.1 Resistencia a la tracción

La norma ASTM E8 [23] especifica que la probeta debe tener 2,25 pulgadas de longitud libre mínima, y en el caso de tubos se deberá colocar tapones en los extremos que servirán para la sujeción de las probetas en el equipo, la longitud de las probetas que se utilizaron fue de 200mm, como se muestra en la Figura 1.12.

En la Tabla 1.12 se resumen los resultados del ensayo de tracción para cada uno de los casos planteados en este estudio, principalmente se determinó la carga máxima (Fm) que representa la mayor carga que soporta la probeta, la carga final (Fu) que indica la carga que se aplica en la probeta en el momento de la rotura, y la resistencia a la tracción (Rm) que es la relación del cociente entre la carga máxima y el área de la sección transversal inicial de la probeta. Las probetas de 1 a la 4 son las

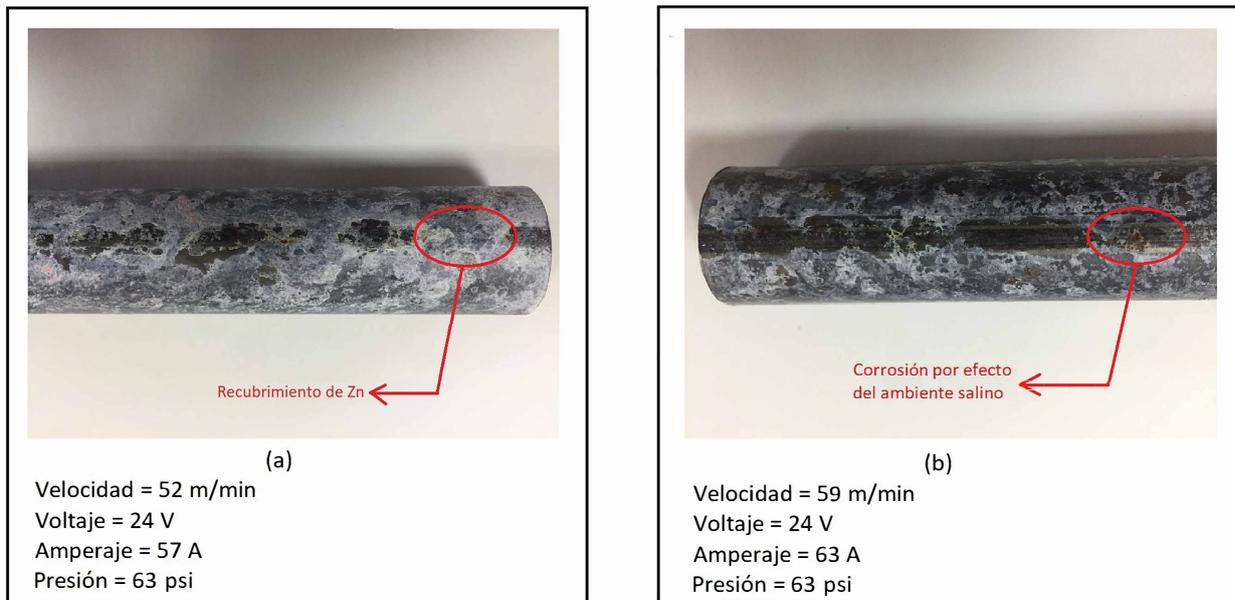


Figura 1.11 – Resultado cámara salina: (a) Probeta menor pérdida de masa, (b) Probeta mayor pérdida de masa. **Fuente:** Autores.

que cuentan con una menor resistencia mecánica que se le puede adjudicar a la velocidad del tubo, debido a que en estos ensayos se empleó el nivel bajo es decir 52 m/min mientras que las probetas de la 5 a la 8 presentan una mayor resistencia mecánica y fueron fabricadas con una velocidad de 59 m/min , siendo la configuración 7 la que cuenta con los valores más altos en resistencia a la tracción y esfuerzo último de $2,92\text{ kN}$ y $2,13\text{ kN}$ respectivamente.

Tabla 1.12 – Resultados del ensayo de tracción. **Fuente:** Autores.

No.	F_m (kN)	F_u (kN)	R_m (N/mm^2)
1	1,16	0,13	10,3
2	1,38	0,14	12,3
3	1,70	0,18	15,1
4	1,30	0,13	11,5
5	2,13	1,78	18,9
6	2,34	1,88	20,8
7	2,92	2,13	25,9
8	2,52	1,95	22,4

Con base a los resultados obtenidos tanto en tracción y flexión se puede decir que la resistencia mecánica de la tubería no presenta una relación con el recubrimiento de Zn, puesto que la configuración 3 que obtuvo la menor pérdida de masa en el ensayo de cámara salina, pertenece al grupo de probetas que mostró la menor resistencia mecánica. Por este motivo en los ensayos posteriores se analiza las probetas con menor y mayor pérdida de masa (probeta 3 y probeta 8) para caracterizar al recubrimiento.

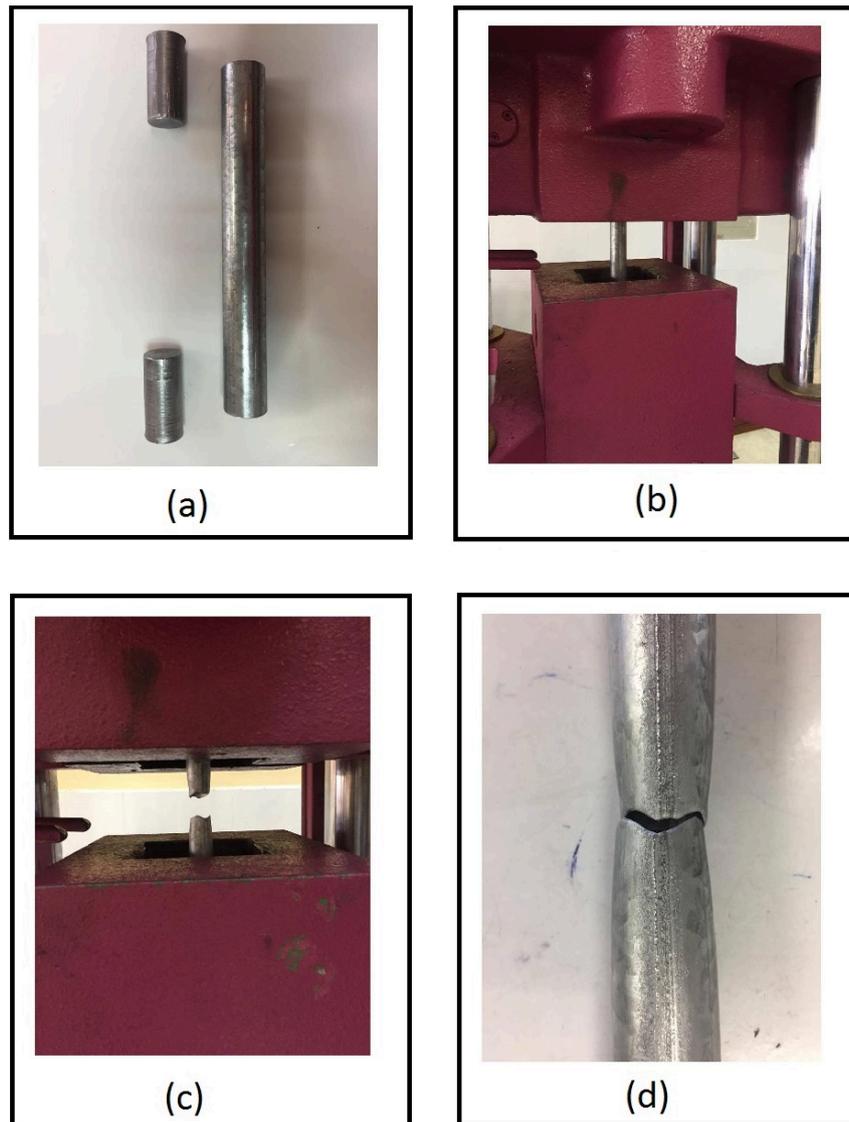


Figura 1.12 – Proceso del ensayo de tracción: (a) Preparación de probeta, (b) Montaje de la probeta, (c) Fractura de la probeta, (d) Resultado del ensayo. **Fuente:** Autores.

1.6.3.2 Resistencia a la flexión

Las especificaciones para este ensayo según la norma ASTM E290 [24], delimitan las dimensiones y para el caso de tubería se deberá garantizar que la probeta no sufra ningún tipo de deslizamiento, para obtener un resultado adecuado, en la Figura 1.13 se muestra el procedimiento que se siguió para este ensayo.

En la Tabla 1.13 se resumen los resultados de la prueba de flexión para cada uno de los casos planteados en este estudio, principalmente se determinó la carga máxima (F_m) que representa la mayor carga que soporta la probeta, la flecha máxima (F) que indica la distancia vertical entre la posición inicial y final de la probeta en el momento de la rotura, y la resistencia a la flexión (R_{fm}) de la probeta.

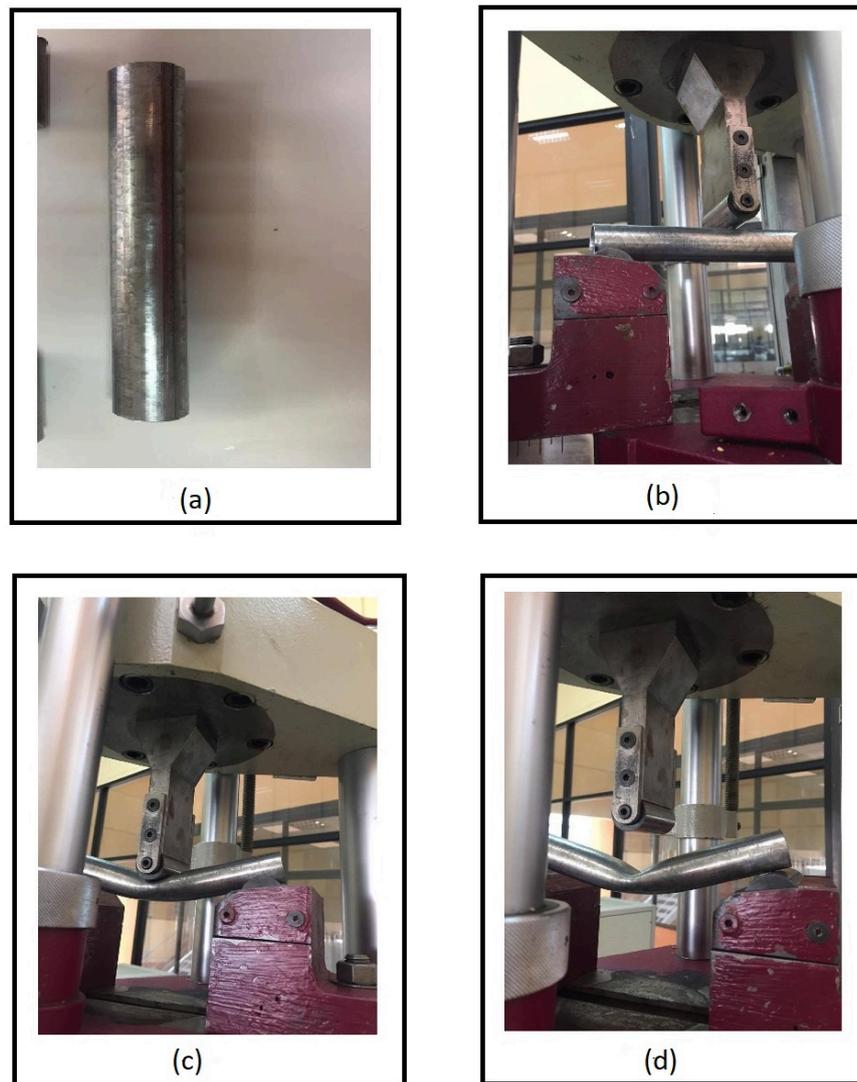


Figura 1.13 – Ensayo de flexión (a) Preparación de probeta, (b) Montaje de la probeta, (c) Fractura de la probeta, (d) Resultado del ensayo **Fuente:** Autores.

Tabla 1.13 – Resultados del ensayo de flexión. **Fuente:** Autores.

No.	Fm (kN)	F (mm)	Rfm (N/mm ²)
1	5,22	9,88	1557,4
2	5,23	6,98	1561,4
3	5,23	9,73	1559,4
4	5,33	8,61	1589,5
5	5,12	8,73	1527,2
6	5,28	9,17	1574,45
7	5,23	8,34	1561,4
8	5,21	9,69	1555,4

1.6.3.3 Metalografía

Para la medición del espesor de la capa del recubrimiento sobre la soldadura del tubo se llevó a cabo el procedimiento que se muestra en la Figura 1.14

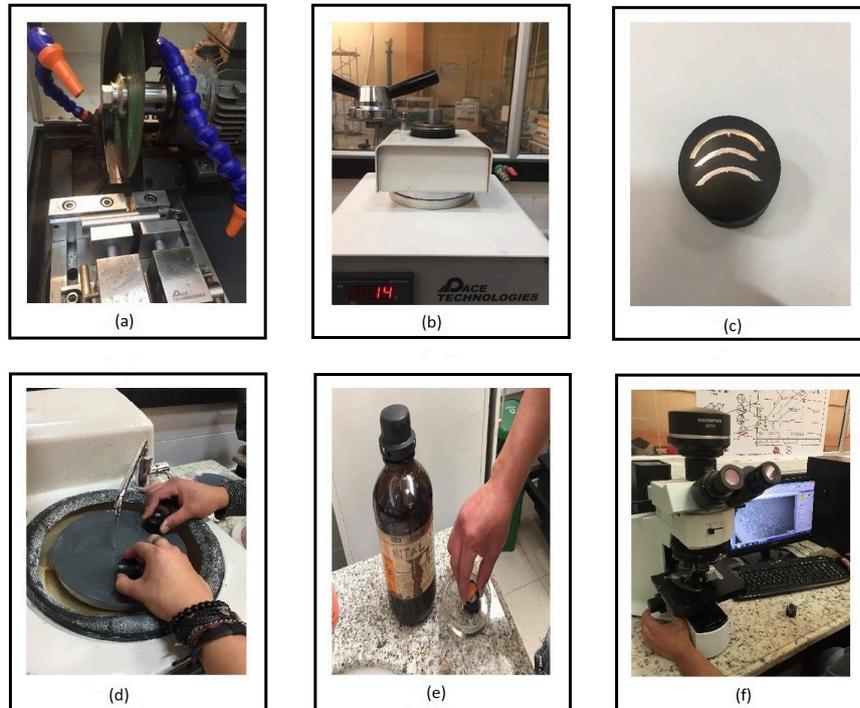


Figura 1.14 – Ensayo de metalografía: a) Corte de las probetas, b) Embebido, c) Resultado del embebido, d) Pulido e) Ataque químico y f) Análisis de microscopía. **Fuente:** Autores.

En la Figura 1.15(a), se presenta la medición del espesor de la capa del recubrimiento sobre la soldadura del ensayo con menor pérdida de masa que fue el #3 con un promedio de $36.654 \mu m$; cabe destacar que se nota claramente la presencia de grietas en el recubrimiento que van desde la superficie externa hasta la interfaz, es decir la superficie del acero.

La medición del espesor de capa del ensayo que presentó la mayor pérdida de masa siendo este el #8 se muestra en la Figura 1.15(b), con un promedio de $16.394 \mu m$, igualmente se puede observar grietas.

Los resultados aquí obtenidos respaldan las mediciones e imágenes obtenidas del ensayo de cámara salina, puesto que a pesar del espesor del recubrimiento del ensayo #3, la presencia de grietas permite que se genere corrosión.

Por otra parte en la Figura 1.16, se presenta la medición del espesor del galvanizado en caliente donde se nota un espesor casi constante con un promedio de $17.59 \mu m$ y una ausencia completa de grietas, lo cual permite a este recubrimiento pese a ser fino brindar una mayor protección frente a la corrosión.

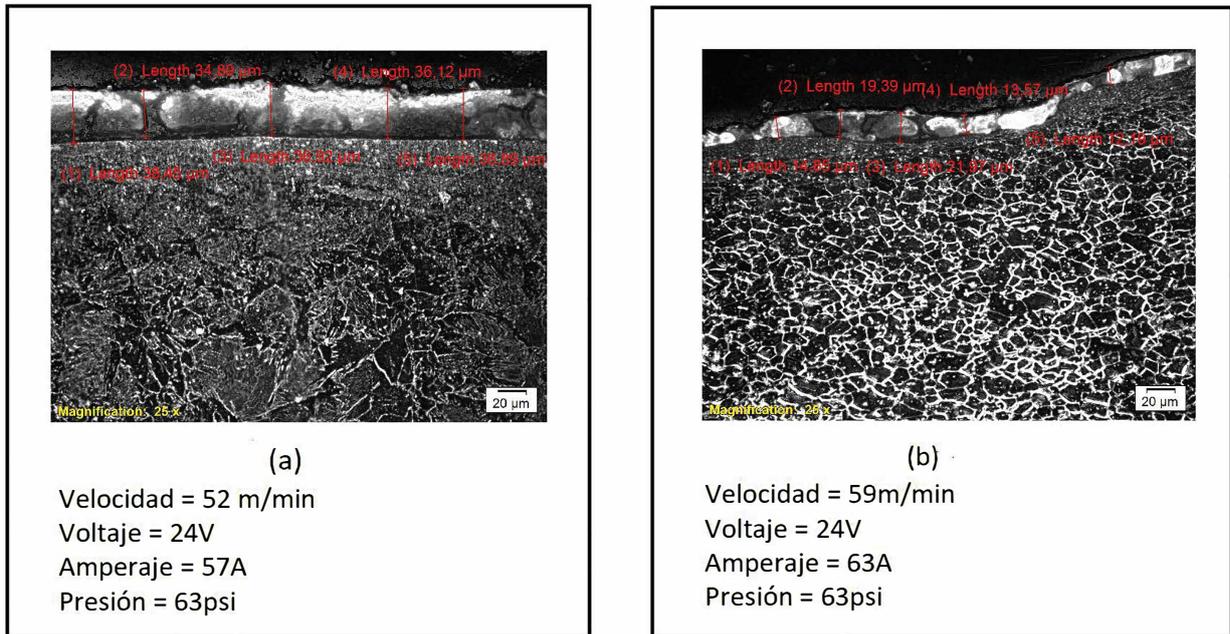


Figura 1.15 – Medición del espesor de la capa de recubrimiento: a) Probeta del ensayo #3, b) Probeta del ensayo #8. **Fuente:** Autores.

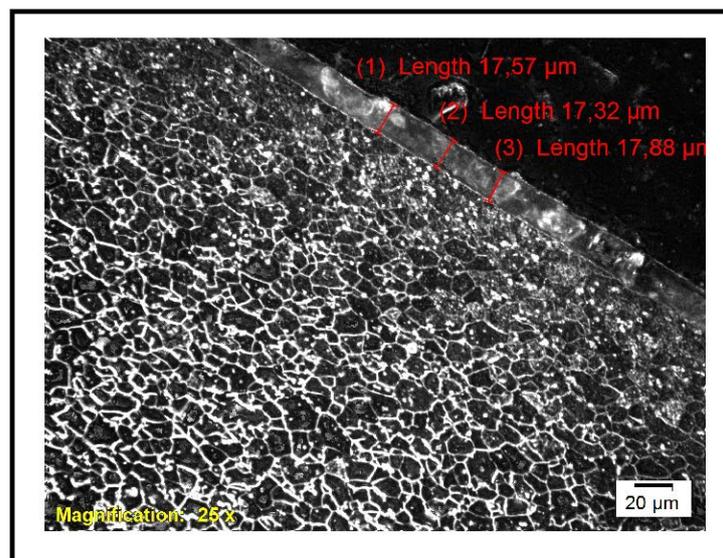


Figura 1.16 – Medición del espesor de la capa de recubrimiento por galvanización en caliente. **Fuente:** Autores.

1.6.3.4 Tintes penetrantes

El ensayo de tintes penetrantes se lo realizó con el propósito de verificar el estado del recubrimiento, con el cual se pudo observar y diferenciar las zonas del tubo que presentan grietas, es decir en donde el recubrimiento no se depositó por completo, ocasionando que en un futuro se presente oxidación en dichas zonas. El procedimiento con el cual se desarrolló este ensayo se presenta en la Figura 1.17. Las probetas utilizadas disponían de una longitud de 200mm.

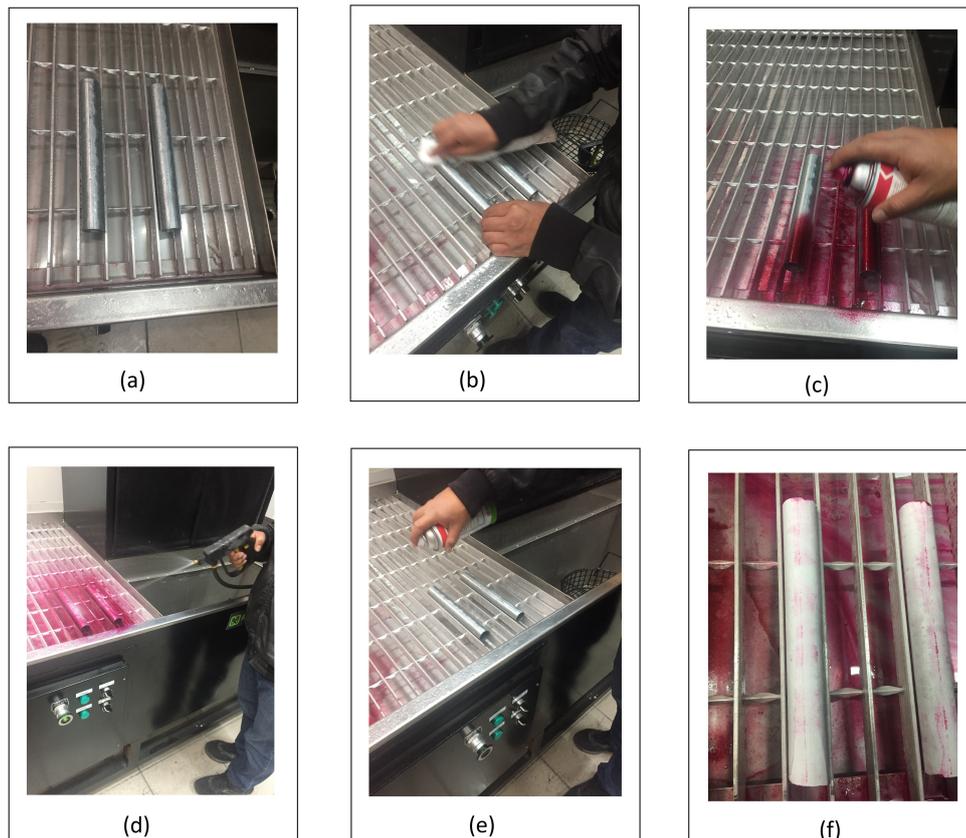


Figura 1.17 – Ensayo tintes penetrantes: a) Preparación de probetas, b) Limpieza de probetas, c) Aplicación tinte penetrante, d) Remoción de la tinta, e) Aplicación tinta reveladora, f) Resultado del ensayo. **Fuente:** Autores.

En la Figura 1.18(a), se presentan las grietas encontradas entre la soldadura y el recubrimiento tanto del ensayo con menor pérdida de masa, que en este estudio corresponde a la configuración #3. En cambio, en la Figura 1.18(b), se encuentra el resultado obtenido sobre el peor experimento, siendo la configuración #8; cabe destacar que entre las dos figuras se nota claramente que existe una gran diferencia entre el número de grietas que presenta cada una de las probetas, con estos resultados se respaldan las mediciones e imágenes obtenidas en las pruebas metalográficas.



Figura 1.18 – Resultados de tintes penetrantes: a) Probeta del ensayo #3, b) Probeta del ensayo #8. **Fuente:** Autores.

1.7 Conclusiones

- En la identificación de las características mecánicas del alambre de zinc se tiene que su densidad es de 7.14 g/cm^3 , una dureza de 2,5 en la escala de Mohs, una resistencia a la tracción de 14 kgf/mm^2 y su límite elástico de 7 kgf/mm^2 .
- Mediante el ensayo de cámara salina se estableció que la probeta #3 presenta los parámetros de control idóneos con una velocidad de 52 m/min, un amperaje de 57 A, un voltaje de 24 V y una presión de gas de 63 psi, puesto que es la probeta con menor pérdida de masa.
- Se estableció que la resistencia a la tracción de las probetas fabricadas con una velocidad de 52m/min tienen en promedio 1,385 kN, mientras que las fabricadas a una velocidad mayor de 59m/min obtiene en promedio 2,477 kN , siendo la probeta #7 la que presentó mayor resistencia con 2,92 kN. En la resistencia a la flexión no obtuvo resultados significativos puesto que la diferencia entre las probetas de menor y mayor resistencia es de 0,21 kN.
- Se determinó los parámetros de control siendo la velocidad del tubo y el amperaje los más relevantes estadísticamente. A demás a las probetas #3 y # 8 que presentaron una menor y mayor pérdida de masa respectivamente se les aplicó un análisis metalográfico y de tintes penetrantes para corroborar los resultados obtenidos.

1.8 Recomendaciones

- Realizar un estudio más detallado en cámara salina con el objetivo de obtener una curva de degradación de la tubería.
- Añadir a las variables del proceso como la altura y ángulo de la antorcha, para realizar así un estudio más completo de los parámetros ideales del proceso.
- Utilizar los ensayos de rayos X y ultrasonido con la finalidad de observar fallas en el recubrimiento de Zn metalizado sobre la superficie del tubo y en la soldadura.

Referencias bibliográficas

- [1] L. Pawlowski, *The science and engineering of thermal spray coatings*. John Wiley & Sons, 2008.
- [2] ASTM B117-16, “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus,” *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2016. [Online]. Disponible en: www.astm.org
- [3] E. C. Bedoya, C. B. Vega, A. H. Restrepo, J. Delgado, J. G. Castaño, and F. Echeverría, “Corrosión del acero al carbono, acero galvanizado y aluminio en diferentes atmósferas colombianas,” *Scientia Et Technica*, vol. 1, no. 36, 2007.
- [4] Q. Jiang, M. Qiang, T. Fei, X. Yi, B.-l. Ren, Z.-m. Liu, and Z.-j. Yao, “Electrochemical corrosion behavior of arc sprayed al–zn–si–re coatings on mild steel in 3.5% nacl solution,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 8, pp. 2713–2722, 2014.
- [5] T. Gomez and E. Águeda, *Mecanizado Básico para electromecánica*, J. García and M. Navarro, Eds. S.A. EDICIONES PARANINFO, 2011.
- [6] A. Marder, “The metallurgy of zinc-coated steel,” *Progress in materials science*, vol. 45, no. 3, pp. 191–271, 2000.
- [7] F. J. M. de Pisón Ascacibar, *Optimización mediante técnicas de minería de datos del ciclo de recocido de una línea de galvanizado*. Universidad de La Rioja, 2003.
- [8] R. Vera and F. Cañas, “Comportamiento frente a la corrosión en ambiente marino de acero galvanizado y acero galvanizado pintado (duplex),” *Información tecnológica*, vol. 16, no. 4, pp. 53–58, 2005.
- [9] W. Edwards, A. Carlton, G. Harvey, R. Evans, and P. McKerrow, “Coating mass control system design for a continuous galvanizing line,” *Automatica*, vol. 12, no. 3, pp. 225–235, 1976.
- [10] D. Varacalle Jr, D. Zeek, V. Zanchuck, E. Sampson *et al.*, “Experimental studies of twin-wire electric arc sprayed zinc/aluminum alloy coatings,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 7, no. 4, p. 513, 1998.
- [11] H.-D. Steffens, Z. Babiak, and M. Wewel, “Recent developments in arc spraying,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 18, no. 6, pp. 974–979, 1990.

- [12] M. Planche, H. Liao, and C. Coddet, "Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions," *Surface and Coatings Technology*, vol. 182, no. 2, pp. 215–226, 2004.
- [13] L. M. Chang, T. Zayed, and J. D. Fricker, "Steel bridge protection policy: metalization of steel bridges: research and practice," 1999.
- [14] T. Bernecki, G. Michols, D. Prine, G. Shubinsky, and A. Zdunek, "Issues impacting bridge painting: An overview. final report," Tech. Rep., 1995.
- [15] H. E. Boyer and T. L. Gall, "Metals handbook; desk edition," 1985.
- [16] D. Marantz, "Basic principles of electric-arc spraying," *Science and Technology of Surface Coatings, Academic Press, London, Eng. and New York, N. Y. 1974, 308-321*, 1974.
- [17] H. Drzeniek and H.-D. Steffens, "Cored tube wires for arc and flame spraying.(retroactive coverage)," *Thermal Spray: Advances in Coatings Technology*, pp. 33–40, 1987.
- [18] E. Sampson, "Advances in thermal spray coatings broaden their applications," *Welding Journal (Miami);(United States)*, vol. 72, no. 7, 1993.
- [19] H.-D. Steffens and K. Nassenstein, "The "sonarc" process: combination of arc and hvof spraying," in *TS 96. Thermal Spraying Conference(Thermische Spritzkonferenz)*, 1996, pp. 53–57.
- [20] G. J. Rudzki, "Surface finishing systems," *G. J. Rudzki, Price: 64. 00(including postage within Australia)*, Available from: *Australasian Institute of Metal Finishing, 191 Royal Parade, Parkville, 3052 Australia*, 1987.
- [21] H. Schmidt and D. Matthäus, "Stage of development of the arc metal spraying systems new experiences and data," in *Proceedings of the 9th International Thermal Spray Conference (The Netherlands)*, 1980, pp. 225–231.
- [22] ASTM A653 / A653M-00, "Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2001. [Online]. Disponible en: www.astm.org
- [23] ASTM E8/E8M-16a, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2016. [Online]. Disponible en: www.astm.org
- [24] ASTM ASTM E290-14, "Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2014. [Online]. Disponible en: www.astm.org
- [25] ASTM E3-01, "Standard Practice for Preparation of Metallographics Specimens," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2001. [Online]. Disponible en: www.astm.org

- [26] ASTM E165 / E165M-12, “Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry,” *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2016. [Online]. Disponible en: www.astm.org
- [27] E. A. Cruz Restrepo, J. E. Restrepo Correa, and P. D. Medina Varela, “Comparación de las metodologías clásica y taguchi del diseño experimental en un ingenio azucarero del valle del cauca,” *Tecnura*, vol. 12, no. 23, 2008.
- [28] T. Goh, “Use of dummy values in analyzing incomplete experimental design data,” *Quality Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 397–401, 1997.
- [29] JIS H 2107-57, “Zinc Metal R(197),” *Japanese Standards Association (JSA)*, 2015.
- [30] ASTM B6-13, “Standard Specification for Zinc,” *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2013. [Online]. Disponible en: www.astm.org

Anexos

Anexo A.1 Características del equipo TAFE ARC SPRAY ZINC WIRE-02Z



Composición	
Zinc	99.99min
Cobre	0.004max
Propiedades Físicas del Recubrimiento	
Tamaño del Alambre	1/16" (1.6 mm), 2.0 mm
Eficiencia del deposito	70%
Punto de fusión	788°F (420°C) (approx.)
Resistencia a la adherencia	1,224 psi blasted steel surface (8.4 MPa) 350-1000 psi blasted plastic surface (2.4-6.9 MPa)
Dureza	R _{15T} 80-85 (R _B 60-73 Converted)
Densidad del revestimiento	6.36 gm/cm ³ (91%)****
Peso del revestimiento	0.54 oz/ft ² /mil = 0.66/Kg/m ² /100 microns
Coefficiente de expansión	22.2 micro-in/in/°F = 331 micron/cm/°C
Coefficiente de contracción	0.001 in/in (cm/cm)
Resistencia	8.2 Micro ohms/cm (N ₂) 9.8 Micro ohms/cm (Aire)
Pulverización	
Flujo masico	21 lbs/hr/100 amps = (9.53 Kg/hr/100 amps)
Cobertura (consume de alambre)	0.9 oz/ft ² /mil (approx.)* (1.10 kg/m ² /100 microns)
Longitud del alambre por libra	106 ft (1/16"), 66 ft (2 mm)

Anexo A.2 Características del equipo TERAPRESS TP-7000



A.2.1 Descripción General

- Tipo de equipo: Prensa de compresión automatizada
- Modelo: TP-7000
- Tensión de alimentación: 110 voltios (220V opcional)
- Frecuencia: 60 Hz
- Manual Fecha de revisión: 10 de diciembre de, 2010

A.2.2 Especificaciones Técnicas

- Poder de calefacción: 900 Watts
- Gama de termostatos: la temperatura ambiente hasta 575°F (300°C)
- Minutero: 0 - 99 minutos
- Tamaños de moldes: 1 - 1,25 - 1,5 y 2 pulgadas
- Peso: 55 lbs (25 kg)
- Dimensiones (An): 12" x 16" x 26" (305 mm x 400 mm x 635 mm)
- Temperatura de trabajo: (0 °C - 40 °C) (32 °F - 100 ° F)
- Conexión de suministro de agua: 8 mm conexión
- Conexión de drenaje de agua: manguera del calentador de 1/4"
- Conexión de suministro de aire: 6 mm

Anexo A.3 Características del equipo FEMTO 1000 POLISHING HEAD



A.3.1 Descripción General

- Tipo de equipo: Cabezal de pulido semi-automatizado
- Modelo: FEMTO 1000
- Tensión de alimentación: 110/220 voltios (monofásica)
- Frecuencia: 50/60 Hz
- Potencia del motor: 120W
- Manual Fecha de revisión: 3 de diciembre de, 2011

A.3.2 Especificaciones Técnicas

- Número de muestras: 1-6 muestras de 1 pulgada de diámetro y 1,5 pulgadas. 1-3 muestras de 2 pulgadas de diámetro.
- Aplicación de la fuerza: pistón individual
- Pulido velocidad del cabezal de ulido: 0 a 200 rpm (velocidad variable)
- Peso: Aprox. 25 kg (55 lbs)
- Dimensiones (An): Aprox. (330 mm x 450 mm x 450 mm) (13" x 18" x 18")
- Temperatura de trabajo: (0° C - 40 ° C) (32 ° - 100 ° F)

Anexo A.4 Características del equipo OLYMPUS BX51M



A.4.1 Descripción General

- Tipo de equipo: Microscopio Digital
- Marca: OLYMPUS
- Modelo: BX51M
- Tensión de alimentación: 110 voltios
- Frecuencia: 50/60 Hz

A.4.2 Especificaciones Técnicas

- Sistema Óptico: UIS2
- Iluminación transmitida: halógeno 100W condensadores de larga distancia de trabajo, transmite filtros de luz (LBD, ND25, ND6)
- Tipo de Iluminación: reflejada y transmitida.
- Fuente de luz: 12 V 100 W, indicador del interruptor de tensión LED de PRESET Reflejada, interruptor de cambio a transmitida.
- Max. altura de la probeta: 65mm
- Iluminación Reflejada: lámpara de mercurio de 100 W, 75 W lámpara de xenón 6 posición unidad de espejo torreta (estándar: WB, WG, WU + BF etc) con FS, AS (con mecanismo de centrado).
- Iluminación transmitida: halógeno 100W condensadores de larga distancia de trabajo, transmite filtros de luz (LBD, ND25, ND6).

Anexo A.5 Características del Acero Galvanizado ASTM A653 CS

A.5.1 Especificaciones Técnicas

- La presentación del producto es en forma de bobinas de acero estructural laminadas al frío y galvanizadas por el método de inmersión en caliente bajo la norma ASTM A653 G100 (305 g/m^2), equivalente a 43 μm .
- Este material es utilizado para la fabricación de tubería estructural.
- Su análisis químico debe dar:
 - C (0.12%) max.
 - Mn (0.60%) max.
 - P (0.03%) max.
 - S (0.035%) max.
- El ancho de la lámina y sus tolerancias para 1.50mm de espesor debe ser:
 - Tolerancia en espesor: $\pm 0.03mm$
 - Ancho de bobina: 1000 mm ó 1220 mm
 - Tolerancia ancho: $+5 / - 2mm$
- El ancho de la lámina y sus tolerancias para 1.80mm de espesor debe ser:
 - Tolerancia en espesor: $\pm 0.03mm$
 - Ancho de bobina: 1000 mm ó 1220 mm
 - Tolerancia ancho: $+5 / - 2mm$
- Las propiedades mecánicas en calidad de suministro en 1.50mm de espesor debe ser:
 - Resistencia a la tracción Re: $>205 MPa$
 - Resistencia a la tracción Rm: $360 MPa$
 - Elongación 50mm(%): >20
- Las propiedades mecánicas en calidad de suministro en 1.80mm de espesor debe ser:
 - Resistencia a la tracción Re: $>205 MPa$
 - Resistencia a la tracción Rm: $360 MPa$
 - Elongación 50mm(%): >20

Anexo A.6 Características del Salt Spray Tester



A.6.1 Descripción General

- Dimension interna de la cámara
 - $600 \times 400 \times 450mm$
- Dimension externa de la cámara
 - $1250 \times 1050 \times 910mm$
- El spray cuenta con las siguientes funciones:
 - Guía ajustable de la altura de la torre de asperción.
 - Niebla salina.
 - Pulverización de niebla salina.
 - Sedimentación natural.
 - Cristalización de la sal en la boquilla.
 - Volumen de sedimentación ajustable.
- Su boquilla patentada y la dispersión cónica aseguran una pulverización uniforme.
- Dispone de una pantalla táctil para el control que facilita la interfaz con el operador.
- Cuenta con un deposito de solución salina de gran capacidad.

A.6.2 Especificaciones Técnicas

- Temperatura máxima de operación
 - Interior de la cámara 50°C , $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
 - Aire 63°C , $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
 - Agua Salina 50°C , $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- Presión de Aire Saturada entre 0.8 - 2.0 kg/m
- PH de la solución salina entre 6.5 - 7.2.
- PH del acetato de cobre entre 3.0 - 3.2.