

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA
CORROSIÓN INDUSTRIAL

**ESTUDIO COMPARATIVO DE PRODUCTOS ANTICORROSIVOS BASE AGUA
APLICADOS EN LÁMINAS LISAS GALVANIZADAS**

PRESENTADO POR:

RAMÍREZ ALFARO, ILSIA BERALÍ

ZALDAÑA UMANZOR, EVELYN XIOMARA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2022.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

INGRA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA
CORROSIÓN INDUSTRIAL**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE PRODUCTOS ANTICORROSIVOS BASE AGUA
APLICADOS EN LÁMINAS LISAS GALVANIZADAS**

Presentado por:

RAMÍREZ ALFARO, ILSIA BERALÍ
ZALDAÑA UMANZOR, EVELYN XIOMARA

Docente asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

SAN SALVADOR, FEBRERO 2022.

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

AGRADECIMIENTOS GENERALES

Le damos gracias a Dios por habernos permitido llegar al final de una de las etapas más importantes de nuestras vidas y el inicio de nuestras carreras como profesionales. El camino no fue fácil pues estuvo lleno de dificultades, pero sabemos que, con la confianza puesta en Dios, con esfuerzo y dedicación nada es imposible

Agradecemos de manera muy especial a los docentes de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador por todos los conocimientos transmitidos durante nuestra formación. Que Dios los bendiga y les permita seguir enseñando a muchas generaciones más.

Agradecimientos al Ing. Héctor Guerra Pérez coordinador del Curso de especialización “Introducción al Control de la Corrosión Industrial” por su paciencia, tiempo, dedicación y conocimientos transmitidos durante este año

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios y la Virgencita María por permitirme culminar un sueño que veía muy lejano. El camino estuvo lleno de dificultades, momentos tristes, pero también momentos llenos de alegría y satisfacción y doy infinitas gracias porque todo ha servido para ampliar mis conocimientos y ser mejor persona cada día. Me comprometo a ser una INGENIERO QUIMICO integral y ayudar a las personas dentro y fuera de mi profesión.

Especiales gracias a mis padres porque con su ayuda y apoyo económico durante todos estos años hoy puedo decir ¡Si se pudo!, gracias por siempre confiar en mi aun en los momentos que me sentí derrotada, a mis abuelitos por haberme cuidado desde pequeña y siempre darme su amor, a mis tíos, a mi hermana, primo y primas, gracias por todo siempre estaré en deuda con todos ustedes y espero algún día poder corresponderles como ustedes se merecen

Gracias Dios por haberme permitido conocer a muchas personas que se convirtieron en mis amigos a los que hoy tengo especial cariño (Moisés, Diana, Angie, Abner, Chris, Keila, Rebe, Mario y Néstor), especiales gracias para Beralí por su dedicación y esfuerzo con quien estuve trabajando muy de cerca durante el último año, mis mejores deseos para todos ustedes siempre

Gracias a mi mejor amigo Roberto, por sus consejos y todos los buenos momentos que hemos tenido la dicha de compartir y finalmente gracias Jonathan por siempre estar conmigo, animarme cuando lo necesito y demostrarme tu amor día a día, estoy segura que vienen muchas cosas buenas para nosotros.

Con todo mi cariño y gratitud,

Xiomara Zaldaña

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta este momento en mi vida en el que graduarme como Ingeniero Químico, una meta que tomó un largo camino alcanzar, está finalmente a menos de un paso de distancia.

Agradezco, aunque no sea suficiente, a mi madre por todos los sacrificios que ha realizado por mí y mi hermana desde el inicio de nuestras vidas. Le agradezco por ser la persona que durante mi proceso de crecimiento nunca se rindió en mí y siempre ha estado apoyándome. El aporte que ella ha tenido a mi vida hace que la obtención de esta meta no sea solo un logro mío, sino también de ella.

Agradezco también a mi hermana. Recuerdo que nunca se quejó de mis noches/madrugadas de estudio a pesar de que se tuvo que adaptar a dormir con luces encendidas. Ella recientemente desempeña un nuevo papel, por lo que deseo que en sus días futuros solo encuentre un camino repleto de bendiciones y sabiduría.

Doy gracias a todos los compañeros y profesores que conocí durante mis años de estudio. Agradezco especialmente a Moisés y Angélica por guiarme muchas veces cuando estaba perdida.

Por último, agradezco y envío bendiciones a mi compañera de trabajo Xiomara por estar conmigo durante este trabajo que da culminación a nuestra vida estudiantil.

Beralí Alfaro

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo comparar el desempeño de recubrimientos anticorrosivos base agua para láminas galvanizadas, razón por la cual se eligieron 3 pinturas anticorrosivas base agua que se comercializan en el mercado salvadoreño.

El experimento fue desarrollado basándose en la norma ASTM B117 “Standard Practice for Operating Salt (Fog) Apparatus”. Para realizar la investigación se acondicionó un recipiente plástico provisto de una base de madera donde se colocaron las láminas de acero galvanizado a evaluar durante 5 semanas, es decir 840 horas.

Los resultados obtenidos mediante la realización del experimento se analizaron comparándolos con la Norma ASTM D610 “Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces”, la norma SSPC-VIS 2 “Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces” y con la norma ASTM D714 “Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints”.

Aunque no se presentó corrosión en las láminas de los diferentes productos estudiados, los resultados mostraron que el mejor recubrimiento base agua es Corrostyl ya que durante las 840 horas del experimento las láminas no presentaron imperfecciones y este producto posee el mayor espesor de película. El segundo lugar lo obtuvieron las láminas pintadas con DTM y finalmente, en tercer lugar, las láminas pintadas con Acqua100 que se caracterizaron por su bajo espesor de película y ampollamiento.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1 : Planteamiento del problema	2
1.1 Definición del problema	2
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Alcances.....	5
1.4 Justificación	6
1.5 Delimitación y limitaciones de la investigación	7
1.6 Antecedentes.....	8
Capítulo 2 : Marco teórico.....	10
2.1 Corrosión	10
2.1.1 Tipos de corrosión.....	11
2.1.1.1 Corrosión uniforme	12
2.1.1.2 Corrosión por picadura.....	13
2.1.1.3 Corrosión galvánica.....	14
2.1.2 Factores que afectan la corrosión	15
2.1.2.1 Naturaleza del metal.....	15
2.1.2.2 Naturaleza del entorno de corrosión.....	16
2.1.3 Control de la corrosión.....	16
2.2 Recubrimientos	17
2.2.1 Tipos de recubrimientos	18
2.2.1.1 Orgánicos	18
2.2.1.2 Inorgánicos.....	18
2.2.1.3 Metálicos	19
2.3 Pintura.....	19
2.3.1 Formación de película	20
2.3.1.1 Secado	21
2.3.1.2 Curado	21
2.3.2 Tipos de pintura.....	22
2.3.3 Pigmentos blancos.....	24
2.3.3.1 Dióxido de titanio.....	24
2.4 Pinturas base agua.....	25

2.4.1	Proceso de pinturas base agua	26
2.5	Pinturas anticorrosivas	27
2.6	Acero galvanizado	28
2.6.1	Láminas de acero galvanizado.	31
2.6.2	La corrosión en el acero galvanizado.....	31
2.6.3	Protección del acero galvanizado contra la corrosión.....	34
2.6.4	Recubrimientos post galvanizado.....	35
2.7	Pruebas de corrosión y sus normas	36
2.7.2	Norma ASTM B117	37
Capítulo 3 :	Metodología y análisis	39
3.1	Consideraciones previas	39
3.2	Productos evaluados	39
3.3	Dimensionamiento de las probetas utilizadas	41
3.4	Metodología	42
3.4.1	Preparación de la superficie.	43
3.4.2	Identificación y proceso de pintado.....	43
3.4.3	Procedimiento experimental.....	46
3.4.3.1	Preparación de la solución.....	48
3.4.3.2	Preparación de los especímenes.	51
3.4.3.3	Procedimientos finales.	55
3.5	Análisis de resultados	57
3.5.1	Primera visita.....	57
3.5.2	Segunda visita	67
3.5.3	Tercera visita.....	71
3.5.4	Cuarta visita.....	74
3.5.5	Quinta visita	78
Conclusiones.....		93
Recomendaciones		95
Bibliografía.....		96
ANEXOS		99
Anexo A:	Medición de espesores	99
Anexo B:	Ficha técnica del Cloruro de Sodio	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Tipo de corrosión de acuerdo a NACE (Forms of Corrosion, s. f.).....	11
Figura 2-2: Representación de los diferentes tipo de corrosión (Roberge, 2008).....	12
Figura 2-3: Métodos de control de la corrosión (adaptado de Forms of Corrosion, s. f.)	17
Figura 2-4: Proceso de fabricación de pintura base agua (Calderón et al., 2016, p.34).....	27
Figura 2-5: Apilamiento de láminas lisas de acero galvanizado.....	31
Figura 2-6: Etapa de la corrosión en el acero galvanizado (Gil, 2020).....	33
Figura 2-7: Productos de zinc formados por la exposición a diferentes medios (Gil, 2020)	34
Figura 2-8: Esquema de un recubrimiento Dúplex (autocromes (s.f)).....	35
Figura 2-9: Tipos de pruebas de corrosión (Guerra 2021)	37
Figura 3-1: Productos de estudio.....	40
Figura 3-2 Láminas utilizadas durante la prueba	41
Figura 3-3: Diagrama del proceso experimenta	42
Figura 3-4: Separación de la lámina es tres grupos.....	44
Figura 3-5: Medición del tiempo de caída de los productos de estudio.....	44
Figura 3-6: Medición de las partes de pintura y agua	45
Figura 3-7: Aplicación de pintura con pistola.....	45
Figura 3-8: Secado de láminas después de la aplicación de la primera capa de pintura.....	46
Figura 3-9: Recipiente de plástico utilizado para simular una cámara de niela salina.....	47
Figura 3-10: Listón madera Brasil utilizado como soporte para las láminas.....	48
Figura 3-11: Sal tipo industrial.....	48
Figura 3-12: Pesaje de la sal en la báscula	50
Figura 3-13: Balanza utilizada para pesar la sal.....	50
Figura 3-14: Realización de un corte en el recubrimiento.....	52
Figura 3-15: Preparación del marco para los bordes de lámina.....	52
Figura 3-16: Adición de la cinta tapagoterías a las láminas.....	53
Figura 3-17: Corte realizado a la lámina.....	53
Figura 3-18: Láminas y soporte con la identificación respectiva.....	54
Figura 3-19: Láminas lista para sumergirse en la solución salina.....	55
Figura 3-20: Láminas inmersas en la solución salina.....	56
Figura 3-21: pH-metro utilizado para el control del pH.....	57
Figura 3-22: Estado de la solución salina tras la primera semana de inmersión.....	58
Figura 3-23: Estándar presentado en la norma ASTM D610.....	59
Figura 3-24: Estándar presentado en el norma SSPC-VIS 2.....	60
Figura 3-25: Frecuencia en tamaño 2 de ampollamiento	65
Figura 3-26: Frecuencia en tamaño de ampollamiento 4	66
Figura 3-27: Cinta tapagoterías presionada con un listón de madera.....	67
Figura 3-28: Soporte de pino utilizado a partir de la semana cuatro.....	74
Figura 3-29: Condición de la solución durante la última evaluación.....	78
Figura 3-30: Área marcada para retirar la pintura aplicada.....	91
Figura 3-31: Estado del acero tras retirar la capa de pintura.....	91
Figura A.1: Resumen de los resultados de medición de espesores de película seca.....	99
Figura A.2: Histograma de espesores de película seca de los productos analizados.....	99

Figura A.3: Láminas preparadas para la medición de su espesor de película seca.....	100
Figura A.4: Medición del espesor de película seca del producto A.....	100
Figura A.5: Medición de espesor de película del producto B.....	101
Figura A.6: Medición del espesor de película del producto C.....	101
Figura A.7: Tabulación de los espesores de película seca de las láminas estudiadas.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Tipos de acero galvanizado y sus aplicaciones.....	30
Tabla 3-1: Características de los productos de estudio.	40
Tabla 3-2 Composición de mezcla solvente-pintura:	45
Tabla 3-3: Equipo y materiales utilizados.....	47
Tabla 3-4: Preparación de la solución salina.....	51
Tabla 3-5: Espesores de película.....	54
Tabla 3-6: Estado de las láminas tras 168 horas de inmersión.....	62
Tabla 3-7: Estado de las láminas tras 336 horas de inmersión.....	68
Tabla 3-8: Estado de las láminas tras 504 horas de inmersión.....	71
Tabla 3-9: Estado de las lámina tras 672 horas de inmersión.	75
Tabla 3-10: Estado de las láminas tras 840 horas de inmersión.....	79
Tabla 3-11: Resultados para el producto A.....	82
Tabla 3-12: Resultados para el producto B.....	85
Tabla 3-13: Resultados para el producto C.....	88
Tabla B.1: Ficha Técnica Cloruro de Sodio.....	103

Introducción

El acero es una combinación formada entre el hierro, una pequeña cantidad de carbono y otros elementos en menor proporción como son el silicio, zinc y el cromo. Este material es de los más utilizados a nivel mundial ya que reúne características deseables como: resistencia, plasticidad y versatilidad. Es muy difícil imaginarnos la vida actual sin el acero ya que está presente en edificios e infraestructuras, transporte, producción y distribución de energía, comida, agua, herramientas y maquinaria, etc.

En el Salvador es muy común utilizar el acero galvanizado (una de las variantes del acero) como principal material para techos o para diferentes estructuras. La interacción entre los metales y el ambiente en el que se encuentran da lugar a su destrucción gradual, dando como resultado al fenómeno que se conoce como corrosión. Por esta razón es muy importante utilizar métodos para prevenir y controlar potenciales daños en el metal, las pinturas son recubrimientos anticorrosivos ideales para este propósito.

El presente trabajo de investigación titulado “Estudio comparativo de productos anticorrosivos base agua aplicados en láminas lisas galvanizadas” presenta la metodología requerida para llevar a cabo una prueba de corrosión acelerada conforme a la norma ASTM B117.

El reporte se divide en tres capítulos: En el capítulo I se establece el planteamiento del problema y se presentan los objetivos, justificación, así como también las limitaciones de la investigación. En el capítulo II se desarrolla la fundamentación teórica de todos los factores involucrados en la temática.

En el capítulo III se detalla la metodología realizada para la puesta en marcha del experimento, por lo cual se describen los materiales, equipos y procedimientos necesarios para su realización; además, se exponen los resultados obtenidos y el análisis de los mismos. Para finalizar, en base a los resultados y objetivos, se plantean las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 1 : Planteamiento del problema

1.1 Definición del problema

En su forma más habitual la corrosión se define como la degradación de un metal o aleación metálica causado por agentes oxidantes como el oxígeno del aire. Esta degradación es debida a que todo metal muestra una tendencia inherente a reaccionar con el medio ambiente (atmósfera, agua, suelo, etc.) para volver a su forma original.

Un proceso de corrosión es por lo tanto un proceso natural y espontáneo. Esto implica que cuanta más energía es necesario invertir en la extracción del metal puro del mineral de procedencia, más fácilmente puede producirse la reacción de corrosión que da lugar a la formación de cationes metálicos, los cuales se combinan con oxígeno produciendo las temidas capas superficiales de óxido sobre los metales.

Este fenómeno se traduce en importantes pérdidas económicas, dichos costos son difíciles de calcular, sin embargo existe información que muestra que dichos valores son tan altos que usualmente impactan a todos los sectores de la sociedad, desde el patrimonio familiar hasta la infraestructura productiva que mantiene la economía de cualquier país y además podría significar la destrucción de monumentos históricos u obras de arte, con la consiguiente desaparición de patrimonio cultural imposible de reparar.

Por las razones antes descritas el combate contra la corrosión requiere de la aplicación de diversos métodos de protección, los cuales también tienen un costo, pero que al final producen ahorros que se pueden optimizar cuando se combinan con una buena planeación de los programas de mantenimiento y con un buen programa de inversión. Algunas de las posibles medidas son:

- A. Utilizar materiales más resistentes, como los galvanizados, aleaciones de zinc y aluminio.

B. Utilizar los nuevos recubrimientos anticorrosivos base agua, poliuretano o el polisiloxano, con pigmentos inhibidores para proteger la infraestructura metálica expuesta a la intemperie.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Comparar el desempeño de anticorrosivos base agua para láminas galvanizadas

Objetivos Específicos

- 1) Evaluar la eficacia de los anticorrosivos base agua para láminas galvanizadas.
- 2) Describir los cambios observados en el material de acuerdo al anticorrosivo empleado.
- 3) Determinar los anticorrosivos con mejor desempeño.

1.3 Alcances

1. Contrastar el rendimiento de los anticorrosivos seleccionados.
2. Identificar la corrosión generada en las láminas de acero galvanizado de acuerdo a la Norma SSPC-VIS 2 “Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces”, la Normas ASTM D714 “Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints” y la Normas ASTM D610 “Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces”.
3. Determinar y caracterizar el anticorrosivo destacado.

1.4 Justificación

Los efectos de la corrosión en la vida diaria se vuelven tan normales y cotidianos que en algunas ocasiones no se les da la importancia debida, a pesar del costo que implica el mantenimiento y reposición de la infraestructura dañada. Es necesario que el ciudadano común deba preocuparse por cuidar el patrimonio familiar adoptando una filosofía de la protección anticorrosiva de los equipos y herramientas que utiliza en casa o que emplea en su trabajo y buscar la aplicación de métodos y procedimientos que minimicen dichos costos y que alarguen la vida útil de los materiales metálicos

Las láminas galvanizadas son ampliamente utilizadas en diferentes áreas de la industria de la construcción ya que responden a las necesidades de resistencia y durabilidad en cualquier lugar donde se instalan, pues tienen las siguientes características: resistencia a la lluvia, viento, sol, nieve o granizo; son de fácil y rápida instalación gracias a su ligereza, y de ser necesario, también pueden desmontarse fácilmente. Por estas razones este material es uno de los más utilizados en el territorio salvadoreño.

El recubrimiento de zinc presentado en las láminas galvanizadas es uno de los diferentes métodos existentes para el control de la corrosión, el cual puede ser reforzado cuando aplicamos un recubrimiento orgánico como pinturas sobre él. El uso de las pinturas anticorrosivas base agua, las cuales brindan un acabado final en un solo paso. Su formulación es de rápido secado y tienen excelente adherencia en hierro, acero, aluminio y galvanizado. Son utilizadas en ambientes industriales moderados y son amigables con el medio ambiente como principal ventaja.

Por las razones mencionadas anteriormente se procedió a realizar la experimentación aplicando diferentes pinturas anticorrosivas base agua a láminas de acero galvanizado las cuales son muy utilizadas en los hogares e industrias.

1.5 Delimitación y limitaciones de la investigación

Para la realización del experimento se estudiaron tres pinturas anticorrosivas base agua de diferentes marcas: Corrostyl, DTM y Acqua100, con el objetivo de evaluar cual presenta mejores resultados después de terminado el tiempo de duración del experimento al haber sido sumergidas en una solución de *NaCl* al 5% *p/v*

El experimento se replicó de la mejor manera posible, sin embargo, existieron algunas deficiencias que pudieron afectar los resultados finales, entre ellas podemos destacar:

- 1) La actual situación de crisis sanitaria que vive nuestro país ocasionada por el COVID-19, ha generado la implementación de medidas de distanciamiento y restricciones necesarias para la población. La Universidad de El Salvador en su búsqueda de salvaguardar la salud de sus estudiantes también ha fomentado el cumplimiento de dichas normas. De esta manera antes de poder hacer uso de cualquiera de sus instalaciones, se debe pedir los permisos y esperar una respuesta favorable a estos. Por las razones antes mencionadas el uso de los laboratorios, para la realización de este trabajo el uso de la planta piloto perteneciente a la facultad de Ingeniería y Arquitectura, es limitado. Por tanto, para realizar las tomas de pH, temperatura y toma de resultados solo se contaba con el acceso a una visita semanal.
- 2) La duración inicial del experimento era de 1000 horas, pero debido a razones ajenas a nuestro alcance no se pudo cumplir con este tiempo, Sin embargo, el experimento tuvo una duración de 5 semanas, lo que equivale a 840 horas y que representa un 84% del tiempo inicial.
- 3) El recipiente de plástico que se acondicionó para colocar las muestras, no cumplía con muchas de las especificaciones de la norma por lo cual fue una fuente significativa de error.

1.6 Antecedentes

Tesis de Pregrado, presentado por la Universidad de El Salvador, El Salvador: Estudio de corrosión en niebla salina sobre placas de acero dulce pintadas y secadas al horno. Saravia Osorio, M. (2020). Estudio de corrosión sobre placas de acero dulce recubiertas con pintura de poliuretano con diferentes tiempos de secado y temperaturas de secado al horno. Se aplicó la norma ASTM B117 para los ensayos y la norma ASTM D 610 para el análisis de resultados

Tesis de Pregrado, presentado por la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala: Propiedades anticorrosivas de un aceite para su aplicación en productos de acero negro y galvanizado. Gil Méndez, A. (2020). Análisis de la corrosión mediante ambiente húmedo con sal y cama de agua utilizando una bolsa hermética, con el objetivo de cuantificar el óxido presente en cada una de las muestras.

Tesis de Pregrado, presentado por la Universidad Pontificia Bolivariana, Venezuela: Velocidad de corrosión por inmersión y cámara de niebla salina. Covelli Cuéllar, J. (2018). Se realizó un estudio experimental en acero común SAE 1020 en el cual se aplicaron recubrimientos de carburo de tungsteno, alúmina y dióxido de titanio, la experimentación se realizó utilizando la cámara de niebla salina durante 168 horas y por inmersión en ácido clorhídrico al 30% durante 240 horas. El estudio se basó en las normas ASTM G-31 y B-117

Revista Técnica "Ingeniería, Investigación y tecnología, Universidad Autónoma de México, México: Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. Suárez Corrales, X. (2013). Se evalúa el comportamiento a la corrosión de diferentes productos de acero galvanizado con y sin recubrimiento para las condiciones de un clima tropical húmedo, así como también la importancia de la adherencia para su eficaz comportamiento

Tesis de Pregrado, presentado por la universidad de El Salvador, El Salvador: Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión. Dabhura Ramos, L. (2012). El objetivo de la investigación es diseñar y construir una cámara de niebla salina en base a la norma ASTM B-117 así como también establecer el proceso ideal de operación y limpieza del equipo

Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, Venezuela: Evaluation of duplex coatings system in tropical marine environments. Romero, N. (2007). En este trabajo se seleccionaron nueve perfiles de acero galvanizado de diferentes empresas de trayectoria reconocida y se realizaron ensayos acelerados de corrosión utilizando la norma ISO 11474. El principal objetivo del trabajo es demostrar la eficiencia de los sistemas Dúplex.

Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Universidad de Cádiz, España: Comportamiento anticorrosivo de pinturas de base agua aplicadas en aceros. Bethencourt, M. (2004). Estudio del comportamiento de una pintura acrílica de base agua, no agresiva con el medio ambiente, aplicada sobre un acero de uso preferente en la industria naval. Empleando técnicas electroquímicas y de polarización lineal con el objetivo de evaluar el deterioro del recubrimiento

Capítulo 2 : Marco teórico

2.1 Corrosión

La corrosión es un fenómeno natural que se define comúnmente como el deterioro de un material, generalmente un metal, que resulta de una reacción química o electroquímica con su entorno (*What Is Corrosion*, s. f.). Puede manifestarse de distintas formas pues existen mecanismos específicos que causan diferentes tipos de ataque al material, por ello, hay diversas maneras de medirla y predecirla, así como varios métodos que pueden utilizarse para controlar cada una de sus formas.

De acuerdo al artículo web “*What Is Corrosion*” (s. f.), todos los tipos de corrosión, excepto algunos tipos a alta temperatura, se producen por la acción de la célula electroquímica. Por lo cual, es necesario conocer cuáles son los elementos comunes a todas las células de corrosión. Estos se presentan a continuación:

- a) Un ánodo donde se produce la oxidación y la pérdida del metal.
- b) Un cátodo donde se produce la reducción y los efectos protectores.
- c) Caminos metálicos y electrolíticos entre el ánodo y el cátodo por los que fluye la corriente electrónica e iónica.
- d) Una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo que impulsa la célula. Esta puede ser el resultado de las diferencias entre las características de los metales disímiles, las condiciones de la superficie y el entorno como las concentraciones químicas.

De acuerdo al artículo previamente citado, el mecanismo para el funcionamiento de la célula de corrosión, se inicia cuando los electrones fluyen a través de un camino metálico desde los lugares donde se producen las reacciones anódicas hasta los lugares se producen las reacciones catódicas. Relativamente al mismo tiempo, debido a que el movimiento de los electrones es rápido, los iones (partículas cargadas) fluyen a través del electrolito para equilibrar el flujo de electrones. Esto se da a través de los aniones (iones con carga negativa procedentes de las reacciones catódicas) que fluyen hacia el ánodo y de los cationes (iones

con carga positiva procedentes del propio ánodo) que fluyen hacia el cátodo. En consecuencia, el ánodo se corroe y el cátodo no.

2.1.1 Tipos de corrosión

La corrosión se presenta en varias formas, y es raro que una estructura o componente que se corroe sufra sólo una forma. La combinación de metales utilizados en un sistema y la amplia gama de entornos que se encuentran a menudo causan más de una forma de ataque. Incluso una misma aleación puede sufrir corrosión de más de una forma dependiendo de su exposición a diferentes ambientes en diferentes puntos dentro de un sistema. (*What Is Corrosion*, s. f.). Las diferentes formas de corrosión se pueden clasificar en tres grupos por la forma en que se identifican, como se muestra en la figura 2-1

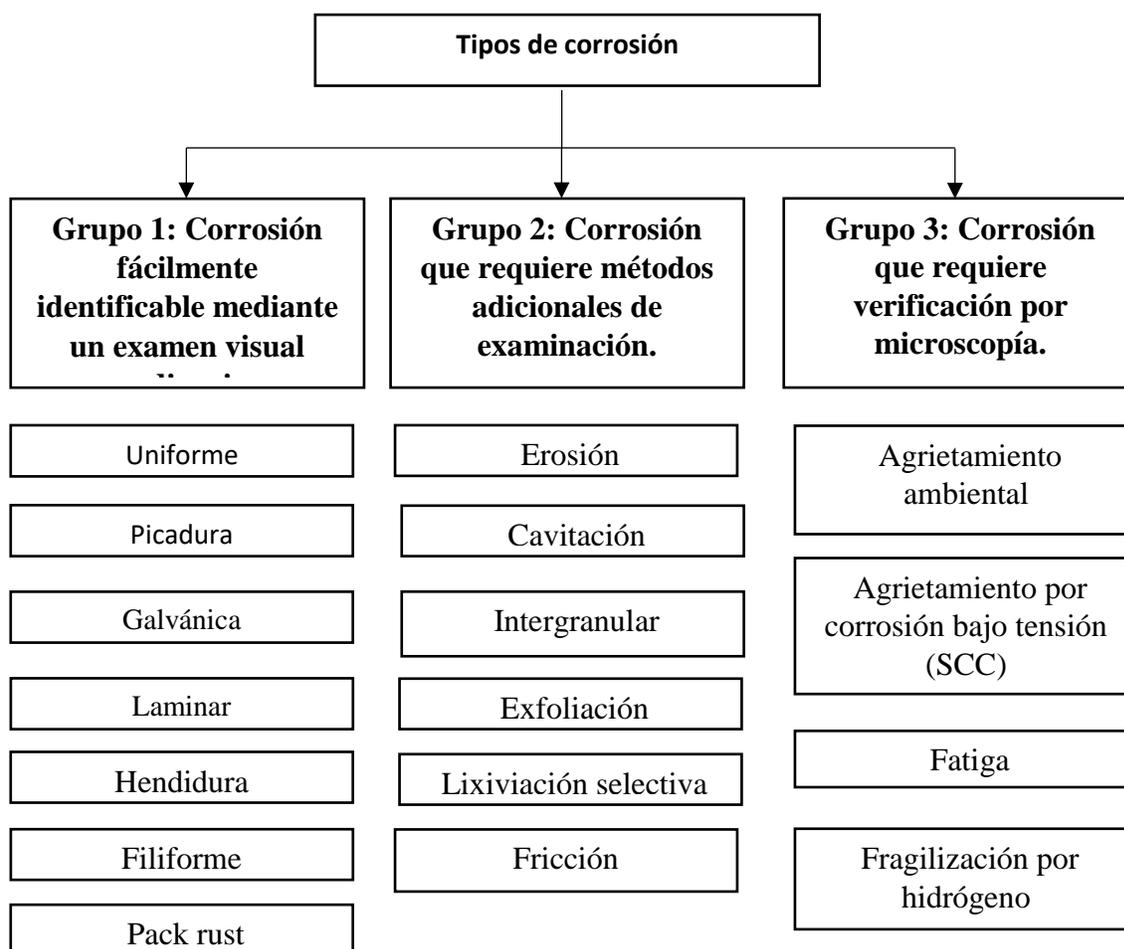


Figura 2-1: Tipo de corrosión de acuerdo a NACE (*Forms of Corrosion*, s. f.)

En la figura 2-2 se muestra la representación gráfica de algunos de los tipos de corrosión mencionados en la figura 2.1.

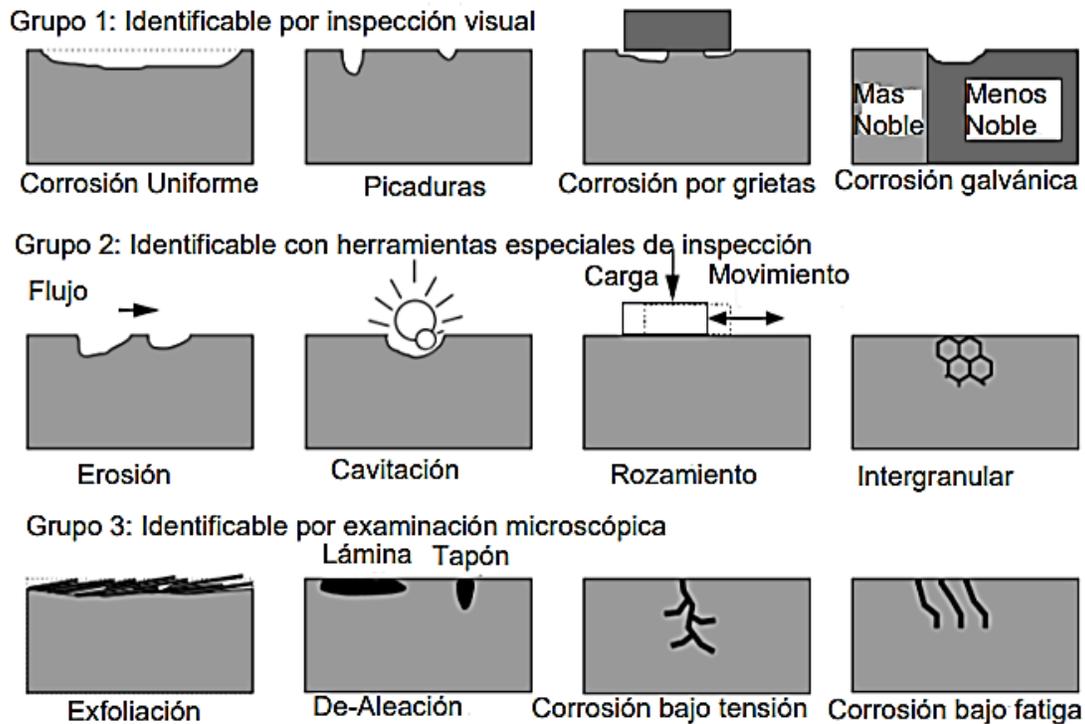


Figura 2-2: Representación de los diferentes tipo de corrosión (Roberge, 2008).

En este trabajo es de interés algunos de los tipos de corrosión incluidos dentro del primer grupo de la clasificación presentada, por lo que a continuación se mencionarán algunas de sus características descritas en el artículo web “Forms of Corrosion” (s.f).

2.1.1.1 Corrosión uniforme

La corrosión uniforme se caracteriza por el ataque corrosivo que se produce de manera uniforme en toda la superficie, o en una gran fracción de la superficie total. Se produce un adelgazamiento general hasta el fallo. En base al tonelaje desperdiciado, esta es la forma más importante de corrosión.

Sin embargo, la corrosión uniforme es relativamente fácil de medir y predecir, por lo que los fallos desastrosos son relativamente raros. En muchos casos, es objetable que solo es un

inconveniente desde el punto de vista de la apariencia. Como la corrosión se produce de manera uniforme en toda la superficie del componente metálico, se puede controlar mediante la protección catódica, el uso de revestimientos o pinturas, o simplemente especificando una tolerancia a la corrosión. En otros casos, la corrosión uniforme añade color y atractivo a una superficie. Dos clásicos en este aspecto son la pátina creada por el deslustre natural de los tejados de cobre y las tonalidades de óxido producidas en los aceros sometidos a la intemperie.

La ruptura de los sistemas de revestimiento protector de las estructuras suele provocar esta forma de corrosión. El embotamiento de una superficie brillante o pulida, el grabado por limpiadores ácidos o la oxidación (decoloración) del acero son ejemplos de corrosión superficial. Las aleaciones resistentes a la corrosión y los aceros inoxidable pueden empañarse u oxidarse en entornos corrosivos. Sin embargo, la corrosión superficial puede indicar una ruptura en el sistema de revestimiento protector y debe ser examinada de cerca para detectar un ataque más avanzado. Si se permite que la corrosión superficial continúe, la superficie puede volverse áspera y la corrosión superficial puede conducir a tipos de corrosión más graves.

2.1.1.2 Corrosión por picadura

La corrosión por picadura es una forma de corrosión localizada por la que se producen cavidades o "agujeros" en el material. Las picaduras se consideran más peligrosas que los daños por corrosión uniforme porque son más difíciles de detectar, predecir y diseñar contra ellas. Los productos de la corrosión suelen cubrir las picaduras. Una pequeña y estrecha picadura con una mínima pérdida global de metal puede provocar el fallo de todo un sistema de ingeniería.

La corrosión por picadura, que, por ejemplo, es casi un denominador común de todos los tipos de ataque por corrosión localizada, puede adoptar diferentes formas como semiesférica o copa. Puede producir fosas con la boca abierta (descubierta) o cubiertas con una membrana semipermeable de productos de corrosión.

Las picaduras se inician por:

- a) Daños químicos o mecánicos localizados en la película de óxido protectora; los factores químicos del agua que pueden causar la ruptura de una película pasiva son la acidez, las bajas concentraciones de oxígeno disuelto (que tienden a hacer menos estable la película de óxido protectora) y las altas concentraciones de cloruro (como en el agua de mar).
- b) Daños localizados o una mala aplicación del revestimiento protector.
- c) La presencia de des-uniformidades en la estructura metálica del componente, por ejemplo, inclusiones no metálicas.

Teóricamente, una célula local que conduce a la iniciación de una picadura puede ser causada por un sitio anódico anormal rodeado por una superficie normal que actúa como cátodo, o por la presencia de un sitio catódico anormal rodeado por una superficie normal en la que habrá desaparecido una picadura debido a la corrosión. En el segundo caso, el examen posterior debería revelar el cátodo local, ya que permanecerá impermeable al ataque de la corrosión. Se cree que la mayoría de los casos de picaduras son causados por sitios catódicos locales en una superficie que por lo demás es normal.

Además de la pérdida de espesor localizada, las picaduras de corrosión también pueden ser perjudiciales al actuar como elevadores de tensión. La fatiga y el agrietamiento por corrosión bajo tensión pueden iniciarse en la base de las picaduras de corrosión.

2.1.1.3 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica (también llamada "corrosión de metales disímiles" o, erróneamente, "electrólisis") se refiere al daño por corrosión inducido cuando dos materiales disímiles se acoplan en un electrolito corrosivo. Puede ser una de las formas más comunes de corrosión, así como una de las más destructivas.

La fuerza motriz de este tipo de corrosión es una diferencia de potencial entre los distintos materiales, por lo que cuando se forma un par galvánico, uno de los metales de la pareja se convierte en el ánodo y se corroe más rápido de lo que lo haría por sí solo, mientras que el

otro se convierte en el cátodo y se corroe más lentamente de lo que lo haría solo. El acoplamiento galvánico es la base de muchas técnicas de control de la corrosión.

2.1.2 Factores que afectan la corrosión

De acuerdo al artículo de Harsimran et al. (2021), la velocidad de corrosión depende principalmente de dos factores:

1. La naturaleza del metal.
2. La naturaleza del entorno de corrosión.

2.1.2.1 Naturaleza del metal

Depende de:

- a) **Posición en la serie galvánica:** Cuando tenemos dos metales de diferentes tipos y se conectan eléctricamente en un electrolito determinado, el metal con mayor potencial de oxidación, o el metal que se encuentra en una posición más alta en la serie galvánica, se corroe mientras que el resto está protegido. Esto se debe a que la velocidad de corrosión es directamente proporcional a la diferencia de posición de los dos metales, es decir, a mayor diferencia, mayor velocidad de corrosión.
- b) **Pureza del metal:** Generalmente, la velocidad de corrosión aumenta con el aumento de la adición de impurezas. Esto se debe a que las impurezas forman pequeñas células electroquímicas en las que la parte anódica se corroe. Por ejemplo: El Zn que contiene impurezas como el Fe o el Pb se corroe más rápidamente.
- c) **Naturaleza de la película superficial:** Todos los metales se cubren con una fina película superficial de óxido metálico en una atmósfera aireada. La relación entre los volúmenes de óxido metálico y el metal determina el efecto de la película superficial. Se conoce como "relación de volumen específico". A mayor proporción, menor es la tasa de oxidación. Por ejemplo: La relación de volumen específico de Ni, Co y W es de 1,6, 2,0 y 3,6 respectivamente. La tasa de oxidación del W es menor incluso a una temperatura elevada.
- d) **Naturaleza del producto corrosivo:** La corrosión procede comparativamente a un ritmo más rápido si el producto formado es soluble en el medio corrosivo. Además,

si el producto corrosivo es volátil, se evapora tan pronto como se forma, con lo que la superficie del metal queda expuesta a nuevos ataques; de este modo, la corrosión se extiende.

2.1.2.2 Naturaleza del entorno de corrosión

Depende de:

- a) **Temperatura:** La velocidad de corrosión aumenta con el aumento de la temperatura. Se espera que la velocidad de corrosión sea casi el doble por cada 100° C de aumento de temperatura, siempre que se mantengan constantes otras condiciones biológicas (Levy, 1995). Sin embargo, en varios casos, el cambio de temperatura modifica también la influencia de otros factores.
- b) **La humedad del aire:** También juega un gran papel a la hora de decidir la velocidad de corrosión. La tasa de corrosión aumenta bruscamente por encima de un punto especial de humedad relativa. Este punto se denomina humedad crítica. Las razones de este aumento de la corrosión con la humedad son que la película de óxido tiene la tendencia a absorber la humedad creando así otra corrosión electroquímica. Además, la humedad presente en la atmósfera proporcionará agua al electrolito, lo que es esencial para el establecimiento de una célula electroquímica.
- c) **Efecto del pH:** Es el factor más importante para determinar la velocidad de corrosión. Generalmente, cuanto más bajo es el pH, mayor es la corrosión. Esto demuestra que los medios ácidos con un pH inferior a 7 son más corrosivos que los medios alcalinos o neutros

2.1.3 Control de la corrosión

Debido a las implicaciones económicas, de seguridad y de conservación de materiales, que envuelven los efectos negativos de los procesos de corrosión (Schweitzer, 2010), actualmente se ha investigado y desarrollado diferentes tipos de métodos para el control de este fenómeno, lo que permite proteger los materiales expuestos a este.

De acuerdo al artículo presentado en la página web de NACE (*How to Protect Metals from Corroding*, s. f.) antes de determinar el problema específico y/o la solución para la prevención y el control de la corrosión deben considerarse muchos factores, entre los que se incluyen

- a) Las condiciones ambientales (resistividad del suelo, humedad y exposición al agua salada en diversos tipos de materiales).
- b) El tipo de producto que se va a procesar, manipular o transportar.
- c) La vida útil requerida de la estructura o el componente.
- d) La proximidad de los fenómenos que provocan la corrosión

La figura 2-3 muestra algunos de los métodos para la protección contra la corrosión.

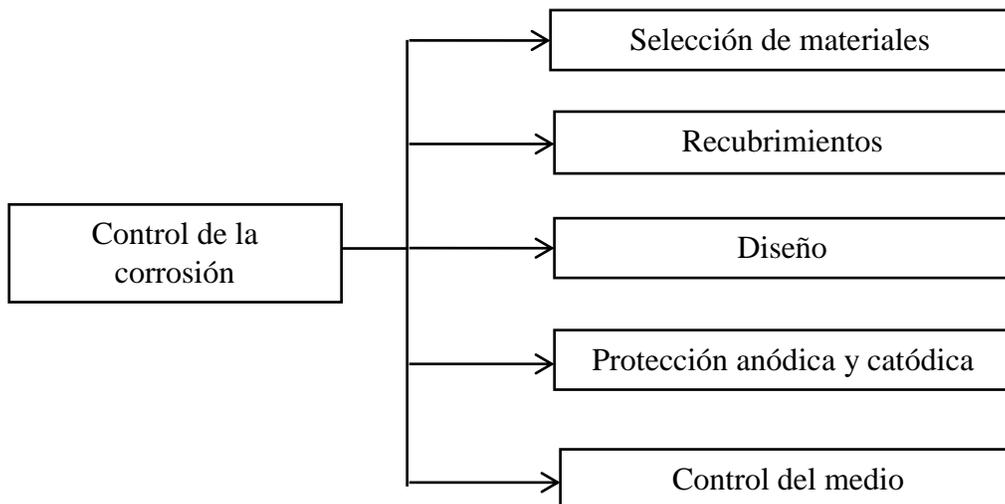


Figura 2-3: Métodos de control de la corrosión (adaptado de Forms of Corrosion, s. f.)

2.2 Recubrimientos

Los recubrimientos son materiales transparentes o pigmentados que forman películas sólidas para proteger las superficies a las que se aplican de los efectos del ambiente. Este es el método para el control de la corrosión más común pues puede ser utilizado tanto en el interior como en el exterior del material (Orozco, 2011).

Los recubrimientos protegen contra la corrosión de una de las siguientes maneras: impiden que los elementos necesarios se unan para iniciar el proceso de corrosión, impiden activamente que se produzca la reacción electroquímica o dirigen el proceso de corrosión en una dirección que no dañará el activo. (*Protective Coatings for Corrosion Control*, s. f.)

Los tipos de protección por recubrimiento incluyen:

- a) **Barrera:** Protegen impidiendo que el agua, el oxígeno y los electrolitos entren en contacto con un metal subyacente.
- b) **Inhibitivo:** Recubrimientos que contienen sustancias químicas que actúan para dificultar la corrosión.
- c) **Sacrificial:** Se aplican capas metálicas delgadas que tienen valores de potencial de electrodo más bajos o que tienen niveles más altos en la serie electroquímica.
- d) **Combinación.**

2.2.1 Tipos de recubrimientos

Según Roberge (2008), si bien los recubrimientos protectores suelen referirse a sistemas integrados multifuncionales que pueden combinar más de un tipo de recubrimientos, es importante el conocer las tres clases generales de recubrimientos: orgánicos, inorgánicos y metálicos. Las características de cada uno se detallan a continuación:

2.2.1.1 Orgánicos

Los recubrimientos orgánicos protegen más el peso del metal que cualquier otro método de protección contra la corrosión. Además de proporcionar protección creando una barrera física entre el metal y el entorno, estos recubrimientos pueden contener también inhibidores de la corrosión u otros aditivos para sofocar los procesos de corrosión. Los recubrimientos orgánicos incluyen pinturas, resinas lacas y barnices

2.2.1.2 Inorgánicos

Los recubrimientos inorgánicos incluyen esmaltes, recubrimientos de vidrio y recubrimientos de conversión. Los recubrimientos de esmalte de porcelana son inertes al agua, resistentes a la mayoría de las condiciones climáticas y son habituales en los electrodomésticos y las

instalaciones de fontanería. Los recubrimientos de vidrio se utilizan en las industrias de procesos en las que preocupa la corrosión o la contaminación del producto. Los recubrimientos de conversión se producen corroyendo intencionadamente la superficie del metal de forma controlada. Esto se hace para producir un producto de corrosión adherente que proteja el metal de una mayor corrosión, por ejemplo, la anodización del aluminio, una de las técnicas de recubrimiento de conversión más utilizadas, produce una película protectora de óxido de aluminio sobre el metal de aluminio.

2.2.1.3 Metálicos

Los recubrimientos metálicos también crean una barrera entre el sustrato metálico y el medio ambiente. Los recubrimientos metálicos y otros revestimientos inorgánicos se fabrican mediante técnicas como la inmersión en caliente, la galvanoplastia, pulverización térmica, deposición química de vapor o modificación de la superficie mediante haces de energía dirigida (láser o iones).

El método de recubrimiento metálico más utilizado para la protección contra la corrosión es el galvanizado, que consiste en la aplicación de zinc metálico al acero al carbono para controlar la corrosión. La galvanización en caliente El galvanizado en caliente es el proceso más común y, como su nombre indica, consiste en sumergir la pieza de acero en un baño de agua de zinc fundido.

2.3 Pintura

Según Carbonell (2009), de forma general, una pintura se define como una mezcla heterogénea de varias sustancias o productos que, una vez aplicada y seca, se transforma en una película continua de características adecuadas a las aplicaciones para las que ha sido concebida. La palabra pintura abarca una variedad de productos tan extensa que, a menudo, sus coincidencias son menores que sus diferencias.

De acuerdo a Carbonell (2009), los componentes de la pintura varían en gran manera en función del tipo de acabado que se requiera y de las condiciones de aplicación y secado. No obstante, la composición genérica de una pintura, aun cuando algunos tipos pueden no contener todos los ingredientes, es la siguiente:

- a) **Pigmentos:** Son compuestos orgánicos o inorgánicos cuya misión es proporcionar a la pintura color y poder de cubrición. Los pigmentos son opacos tanto en estado seco como húmedo.
- b) **Cargas (no imperativos):** Son, en general, de naturaleza inorgánica, aportan cuerpo, materia sólida, y dan estructura, viscosidad y reología a la pintura. Las cargas son opacas cuando están secas, pero son translucidas en estado húmedo.
- c) **Ligante o resina:** Son productos cuya misión es la de mantener unidas las partículas sólidas, pigmentos y cargas, una vez la pintura está seca. Según el tipo de resina utilizada la pintura tendrá unas características de secado y resistencias determinadas. La terminología en el campo de las pinturas y recubrimientos es variada y por ello no debe extrañarnos encontrar indistintamente los términos resina, ligante, polímero, etc.
- d) **Disolventes (no imperativo):** Se llama así al agua y otros productos de naturaleza orgánica cuya misión es la de dar a la pintura una viscosidad óptima según el método de aplicación que debe utilizarse. Los disolventes se utilizan además para solubilizar las resinas y regular la velocidad de evaporación. La utilización de disolventes que no disuelven al ligante es frecuente en la formulación de pinturas en- este caso se les nombra como co-solventes.
- e) **Aditivos:** Son productos que se dosifican en pequeñas cantidades para facilitar el proceso de fabricación de la pintura, aportar unas características concretas a la pintura seca, crear las condiciones adecuadas para que el secado se produzca de forma correcta y para estabilizar la pintura en el periodo de almacenamiento.

2.3.1 Formación de película

Las pinturas se aplican en capas delgadas sobre un soporte y tienen la propiedad de transformarse en una película sólida, continua y adherente por evaporación de la mezcla solvente, y en algunos casos, además por transformaciones químicas de la sustancia formadora de película (Giudice & Pereyra, 2009).

Según el estudio de Giudice & Pereyra (2009), el proceso por el cual se forma la película está relacionado con el tipo de material resinoso empleado en la elaboración del ligante. El mecanismo puede ser de naturaleza estrictamente física y/o química a través de:

2.3.1.1 Secado

Involucra el pasaje de la película de pintura líquida, en forma de capa delgada aplicada sobre un sustrato, al estado sólido por la evaporación de la mezcla solvente. Las propiedades fisicomecánicas de la película (flexibilidad, dureza, adhesión, etc.) dependen fundamentalmente del componente resinoso que conforma el ligante.

Composiciones que forman película exclusivamente por cambios físicos (evaporación de los disolventes y diluyentes) se las denomina termoplásticas. Estas películas no convertibles se caracterizan porque se re-disuelven en contacto con solventes similares a los empleados en la elaboración.

Las pinturas de naturaleza termoplástica exhiben en general un rápido secado. Además, el espesor final de la película tiene una relación directa con el contenido de sólidos en volumen del producto; se basan en materiales poliméricos de elevado peso molecular dado que las propiedades de la película seca en general son directamente proporcionales a este último. Sin embargo, el grado de polimerización está limitado por la solubilidad en las mezclas solventes usualmente empleadas en la industria de la pintura: se deben alcanzar adecuados contenidos de sólidos en volumen.

2.3.1.2 Curado

La etapa de formación de la película sólida, adherente, elástica y de buena resistencia de algunas pinturas involucra, además de la evaporación de los solventes, reacciones químicas de diferente complejidad con elementos del medio ambiente o con agentes que se incorporan a la formulación.

En resumen, el curado se define como el conjunto de cambios físicos y químicos que transforman el material de su estado termoplástico original (líquido o sólido, soluble y de peso molecular finito) a una condición final termoestable (sólido, insoluble, infusible y de peso molecular infinito). Las pinturas que completan la formación de película a través de reacciones químicas (mecanismo combinado se secado/curado) se las denomina pinturas convertibles.

Las pinturas de conversión parten de reactivos (base y convertidor) de bajo peso molecular y consecuentemente de alta solubilidad, lo que permite la formulación de productos de alto contenido de sólidos (bajo en volátiles orgánicos contaminantes). Las reacciones de curado incrementan sustancialmente el tamaño del polímero y prácticamente eliminan la presencia de los grupos funcionales libres.

2.3.2 Tipos de pintura

La clasificación de las pinturas puede realizarse de diferentes maneras de acuerdo al enfoque deseado para su estudio y a otras consideraciones pertinentes. Para el propósito de este trabajo de investigación, se considera apropiada la siguiente clasificación presentada en el estudio de Parrilla (2011).

A. Pintura base agua

Llamadas también de agua o hule, su principal característica es ser diluible con agua. Su secado es por coalescencia y se pueden encontrar acabados mate, satinado, brillante.

Es resistente al exterior una vez curadas y su secado es rápido. Existen diferentes tipos de pinturas látex, dependiendo su uso se tiene:

- a) Selladores.
- b) Impermeabilizantes.
- c) Anticorrosivos.

B. Pinturas base solvente

Llamadas también pinturas de aceite o base solvente. Su secado es por evaporación y posterior proceso de oxidación que depende de la resina usada, este proceso generalmente dura un rango de 2 y 4 horas. Tiene buena resistencia al exterior.

Son diluibles en solventes fuertes como el thinner o solvente mineral. Se encuentran acabados brillantes y mates. Los tipos de pinturas alquídicas que encontramos son:

- a) Anticorrosivos.
- b) Especialidades.

C. **Pinturas de nitrocelulosa:**

Su secado es rápido y por medio de evaporación, no es resistente al exterior. Son utilizadas en diferentes tipos de acabado como:

- a) Selladores.
- b) Lacas.
- c) Fondos automotrices.

Las pinturas también pueden clasificarse según su acabo. Los tipos de acabado mencionado en el artículo “*Tipos de pintura: cuáles son y para qué sirven*” (2019) son:

- A. **Pintura mate:** Se caracteriza por no tener brillo al secarse. Ayuda a disimular las imperfecciones diminutas de la pared, permite realzar aspectos decorativos por su opacidad y, si se aplica de la forma tradicional, evitará marcas de brocha o rodillo. Es recomendada para paredes donde haya muchas imperfecciones, ya que tiende a disimularlas. Los espacios ideales para usarla son las habitaciones, la sala de estudio o el lavadero. Es especial para lugares donde no haya mucho tránsito.

- B. **Pintura satinada:** Al secarse, tiene un acabado entre opaco y brillante, por lo cual ayuda a mejorar el aspecto decorativo y es más fácil de limpiar. El reflejo de la luz que genera este acabado le da al lugar una mejor iluminación y mayor sutileza. Es recomendable que la superficie donde se aplique no tenga imperfecciones, porque se verán resaltadas. Se recomienda para habitaciones de niños, pasillos, exteriores, cocinas y baños.

- C. **Pintura brillante o seda:** Como su nombre lo indica, tiene un brillo que destaca, logrando que el ambiente se vea elegante y llamativo. Permite que la superficie se mantenga limpia. Es muy común en decoraciones modernas. Esta pintura es ideal para madera, ya que logra que los muebles se destaquen por su acabado brillante. Entre las de uso común, se destacan el esmalte sintético, la laca, las poliuretánicas y los barnices. Se usa también para espacios externos expuestos al agua, humedad, sol y diversos agentes climáticos porque es muy duradera. Además, soporta el uso de detergentes, con lo cual puede limpiarse y extirpar su vida útil.

2.3.3 Pigmentos blancos

El efecto óptico de los pigmentos blancos está sustentado en su muy reducida absorción de la luz incidente y en la dispersión de la misma por reflexión de la mayor parte de la luz, ambos altamente no selectivos respecto de las longitudes de onda de la zona visible del espectro. En general, poseen un índice de refracción más elevado que el del medio en el cual se encuentran dispersos; en resumen, estos pigmentos le confieren color a la película y además opacidad, la cual se incrementa a medida que aumenta la diferencia entre los índices de refracción de los componentes fundamentales del sistema. El criterio más importante para la selección de un pigmento lo constituye su índice de refracción (Giudice & Pereyra, 2009).

Desde un punto de vista químico, los pigmentos blancos se pueden clasificar fundamentalmente en óxidos [TiO_2 , ZnO , As_2O_3 , etc.] y sulfuros [ZnS , ZnS^+ , $BaSO_4$].

2.3.3.1 Dióxido de titanio.

El dióxido de titanio (TiO_2), es globalmente considerado como uno de los pigmentos blancos de mayor importancia en la industria de los recubrimientos y su versatilidad para ser empleado en diferentes aplicaciones se debe a su alta eficiencia para dispersar la luz, proveer brillo y opacidad a las formulaciones, brindando la más excepcional blancura (Palet, 2002).

Es un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética cerca de la región UV. Es anfótero, muy estable químicamente y no es atacado por la mayoría de los agentes orgánicos e inorgánicos; disolviéndose en ácido sulfúrico concentrado y en ácido hidrofúrico. Básicamente tiene 3 clases de cristales; el Rutílico (tetragonal), el Anatásico (octaédrico) y Brookita (ortorrómbico); de los cuales es el Rutílico el de mayor índice de refracción, es decir, que provee una mejor opacidad a la película de pintura (Hill & Kolb, 1999).

La citada absorción de la fracción UV indica una satisfactoria capacidad protectora tanto de los sustratos como del propio material formador de película de la pintura. Esto fundamenta la reducida degradación fotoquímica de las películas aplicada en exteriores (sólo unos pocos

micrómetros por año), expresada en pérdida de brillo, tizado, facilidad de ensuciamiento, amarilleo, etc. (Giudice & Pereyra, 2009).

2.4 Pinturas base agua

El desarrollo de productos libres de solvente es uno de los adelantos más significantes en la industria de la pintura. Actualmente, las pinturas basadas en agua se usan de manera mundial en aplicaciones como en la decoración de interiores, fachadas y estructuras de concreto. (Calderón et al., 2016). Las pinturas al agua son recubrimientos emulsionados que usan como solvente el agua y como aglutinante cola animal o vegetal. (Ramírez, 2016).

En realidad, de acuerdo al estudio de Giudice & Pereyra (2009), en la formulación y elaboración de pinturas y recubrimientos de base acuosa se emplean, desde un punto de vista conceptual, látices (plural de látex) como materiales formadores de película. En consecuencia, el término “emulsión” se emplea erróneamente.

Lo anterior se debe a que los látices se fabrican a través de la polimerización por emulsión. En ella, los monómeros que la conforman, tales como butil acrilato, ácido acrílico, estireno, vinil acrílico, se mezclan con agua, agentes estabilizantes, surfactantes e iniciadores, formándose con ellos, una emulsión estable, a través de mezcla. Cada gota de emulsión contiene una fracción equivalente de cada material, que es polimerizada, de manera individual, con ayuda de la temperatura, dando origen al látex (Agudelo, 2021).

Para McGuckin (2020) las ventajas de este tipo de pinturas son:

- a) Menor contenido orgánico volátil (COV), lo que resulta en un menor impacto en el medio ambiente.
- b) Poco olor. Una ventaja primordial cuando se pintan interiores o áreas poco ventiladas.
- c) Tiempos de secado rápidos que facilitan la aplicación de una segunda capa.
- d) Excelente durabilidad.
- e) Menor o nulo riesgo de incendio por la manipulación de disolventes inflamables.
- f) Una limpieza fácil y segura.
- g) Eliminación menos peligrosa.

h) Rendimiento probado en aplicaciones residenciales e industriales.

En la literatura se pueden encontrar diferentes clasificaciones para este tipo de pintura, la cual a veces es referida como pintura plástica, látex o arquitectónica. En el artículo “*Qué es la pintura al agua y cuáles son sus ventajas*” (2019) se subdivide, en función de su composición, en dos tipos a las pinturas base agua:

- a) **Pintura acrílica:** Están formuladas con pigmentos suspendidos en una emulsión de polímero acrílico. Se caracterizan por secarse muy rápidamente, aunque suelen perder un poco de color tras el secado. A pesar de que se diluyen en agua, se vuelven muy resistentes a esta sustancia una vez se han secado.
- b) **Pintura vinílica:** Estas pinturas tienen un olor más suave que las acrílicas, además son más fáciles de aplicar para obtener un buen acabado. Otra ventaja de la pintura vinílica es que ofrece una buena lavabilidad, además de resistencia a roces y manchas que se pueden eliminar fácilmente frotando con un trapo con agua y jabón.

2.4.1 Proceso de pinturas base agua.

De acuerdo a Noruega (2021), la fabricación de la pintura a base de agua sigue los siguientes pasos:

- a) El proceso se inicia con la adición de agua, amoníaco y agentes dispersantes dentro de un tanque de pre-mezcla, luego se van adicionando los pigmentos y agentes extensores.
- b) Al finalizar la pre-mezcla, se pasa la pasta por un proceso de molienda donde ocurre la dispersión, para luego pasar a un tanque de mezclado con agitación donde se adicionan las resinas, plastificantes, preservantes y anti espumantes, para finalizar con la adición de la emulsión de resinas.
- c) Luego de que todo esté integrado, se adiciona agua hasta lograr la consistencia deseada. Finalmente, se hace pasar la pintura por un proceso de filtración para remover pigmentos no disueltos, para luego, envasar y embalar (Noguera, 2021).

Cabe destacar, que sólo los esmaltes al agua pasan por la molienda (como se indica en la figura 2-4). Los látex y pastas, se dispersan y terminan en el tanque de mezclado (Noguera, 2021).

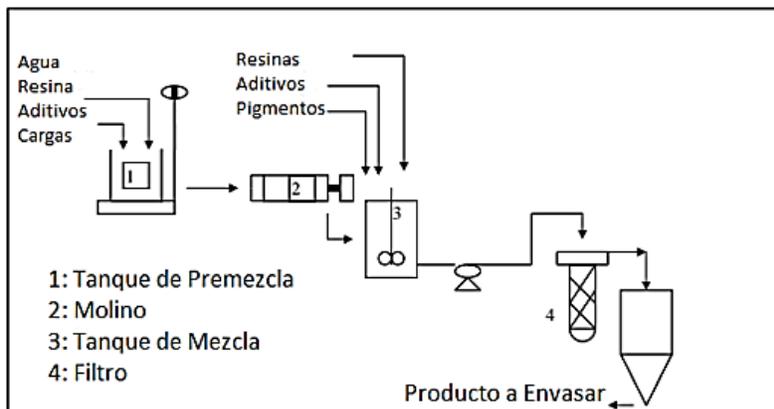


Figura 2-4: Proceso de fabricación de pintura base agua (Calderón et al., 2016, p.34).

2.5 Pinturas anticorrosivas

Las pinturas protectoras deben presentar tolerancia a los defectos de preparación de superficies, facilidad de aplicación por métodos diversos, aptitud para un secado / curado adecuado y rápido en diferentes medios ambientales, cumplimentar las exigencias en servicio y fácil reparación de las zonas dañadas. Los aspectos económicos y ecológicos también resultan fundamentales (Giudice & Pereyra, 2009).

De acuerdo Giudice & Pereyra (2009), estas composiciones tienen como función fundamental controlar el fenómeno de corrosión para prolongar la vida útil del sustrato. Una propiedad esencial es la adhesión al metal, la cual es función del material formador de película; su naturaleza depende de la pintura intermedia o de terminación seleccionada según las exigencias del medio ambiente

Las principales características de las pinturas anticorrosivas son el bajo brillo para facilitar la adhesión de la capa posterior; la reducida permeabilidad para controlar el proceso de corrosión y evitar simultáneamente la formación de ampollas; óptima adhesión al sustrato de base y finalmente una elevada eficiencia del pigmento inhibidor de la corrosión,

particularmente los solubles ya que requieren el medio electrolítico para desarrollar su mecanismo de acción (Giudice & Pereyra, 2009).

2.6 Acero galvanizado

De acuerdo a Vásquez (2018), el acero es una aleación, una mezcla en estado sólido, donde los principales componentes son hierro y carbono. El contenido de carbono puede variar entre alrededor de 0,05% y normalmente hasta menos de un 2% en peso y para obtener alguna propiedad determinada, se pueden sumar a la mezcla otros elementos de aleación específicos, tales como el cromo o el níquel.

Existen diferentes tipos de aceros y también numerosas maneras de agruparlos y clasificarlos, como por ejemplo por su composición, su dureza, su ductilidad, su resistencia a la abrasión o alguna otra propiedad. En términos generales, se pueden mencionar las siguientes categorías: aceros al carbono, aceros aleados, aceros ultrarresistentes de baja aleación y aceros inoxidable (Vásquez, 2018).

Según Acesco (2000), galvanizar es recubrir con zinc fundido la superficie del acero. El zinc es el recubrimiento metálico más utilizado debido a que ofrece protección galvánica al actuar como ánodo de sacrificio, lo cual lo hace ideal para proteger al acero base de la corrosión.

Ginza (2015), menciona como el galvanizado está constituido por varias capas de aleaciones zinc-hierro. Tiene 100% de penetración puesto que cubre la totalidad de la superficie de la pieza galvanizada, así como otras áreas superficiales de las piezas que no son accesibles por otros métodos de protección contra la corrosión. Este material presenta las siguientes características:

- a) **Resistencia a la abrasión:** El galvanizado es una unión metalúrgica de buena adherencia. Está formado por capas de aleaciones zinc-hierro, más duras incluso que el acero, y por una capa externa de zinc que es más blanda; formando así un sistema muy resistente a los golpes y la abrasión.
- b) **Restauración de zonas desnudas (autocurado):** Los productos de corrosión del zinc taponan las pequeñas zonas sin galvanizar, protegiéndolas de la oxidación.

- c) **Protección contra la corrosión atmosférica:** La duración de la protección que proporcionan los recubrimientos galvanizados frente a la corrosión atmosférica es extremadamente alta y depende de las condiciones climatológicas del lugar.
- d) **Protección para la corrosión en agua dulce:** El acero galvanizado resiste bien ya que el anhídrido carbónico, las sales cálcicas y magnésicas que normalmente llevan en disolución este tipo de agua, ayudan a la formación de las capas de pasivación del zinc, que son inertes e insolubles, y aíslan al recubrimiento de zinc del subsiguiente contacto con el agua.
- e) **Protección para la corrosión en agua de mar:** Los recubrimientos galvanizados resisten bastante bien el ataque corrosivo del agua de mar. Ello se debe a que los iones Mg y Ca presentes en el agua inhiben la acción corrosiva de los iones de cloruro y favorecen la formación de capas protectoras

Existen dos métodos básicos para obtener el acero galvanizado: galvanización por inmersión en caliente (hot dip) y electrodeposición o galvanizado electrolítico (Acesco, 2000). Las características generales de estos métodos son:

- a) **Inmersión en caliente:** El proceso consiste básicamente en sumergir el acero a recubrir en una cuba donde se encuentra el zinc fundido. Se utilizan diferentes tipos de aleaciones de zinc con otros metales.
- b) **Galvanizado electrolítico:** La lámina de acero se transporta en forma continua a través del tanque de galvanización y electroquímicamente se le aplica un recubrimiento de zinc. En el tanque de galvanización se recubre por medio de corriente eléctrica. La electro-galvanización se lleva a cabo a temperatura normal y alta velocidad, por lo que aún después de galvanizar, los productos retienen virtualmente todas las propiedades básicas del metal base, conservando así excelentes características mecánicas para trabajarla. Sin embargo, debido a su recubrimiento de zinc relativamente bajo (3 a 40 g/m² por cada lado), presenta menor resistencia a la corrosión que el galvanizado por inmersión en caliente.

De la elección del método de obtención se deriva una gama de productos que hacen del acero galvanizado un producto de múltiples posibilidades, pues la diversificación y sofisticación en su uso han logrado que la producción del acero galvanizado esté en constante incremento. Por estas razones se hace necesaria la modernización tecnológica en los procesos de producción que garanticen al cliente un producto de alta calidad para los diferentes propósitos, desde el producto galvanizado estándar hasta los productos con propiedades especiales con diseños estéticos (Acesco, 2000).

Los principales tipos de acero galvanizado se presentan en la tabla 2-1

Tabla 2-1 *Tipos de acero galvanizado y sus aplicaciones*

PROCESO	APLICACIONES
Galvanizado tradicional (99% Zinc)	Lamina para techos, industria de refrigeración y aire acondicionado, carrocerías, vallas y múltiples usos adicionales.
Galvano-recocido con recubrimiento Fe-Zn	Industria automotriz. También se utiliza en la fabricación de elementos eléctricos y materiales para construcción
Con recubrimiento <i>Zn al 45% y Al 55%</i> (Galvalum) o <i>Zn 95% y Al 5%</i> (Galfan)	Productos para techos y cerramientos exteriores
Con otros recubrimientos (<i>Zn – Ni</i>), (<i>Zn – Ni – Co</i>), (<i>Zn – Co – Cr</i>), (<i>Zn – Co – Mo</i>)	Para uso automotriz
Electro-galvanización	Divisiones interiores, paneles decorativos, partes de automóviles, electrodomésticos y muebles metálicos.

Fuente Acesco (2020)

2.6.1 Láminas de acero galvanizado.

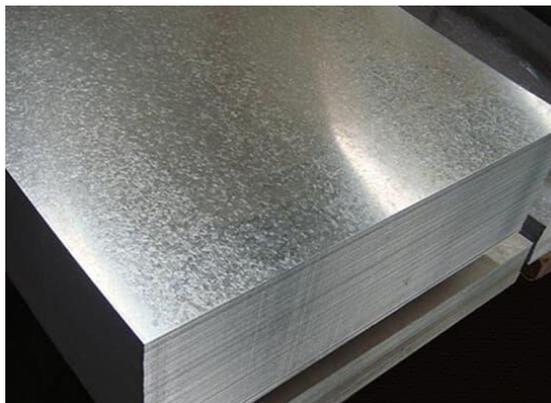


Figura 2-5: Apilamiento de láminas lisas de acero galvanizado.

Según Atsa (2019), la lámina galvanizada se somete a un proceso de inmersión en caliente que recubre la lámina al 100% de zinc. Se trata de un tratamiento que se le aplica al metal para dotarlo de alta resistencia contra la oxidación. El recubrimiento de zinc se adhiere químicamente a la base del acero por una reacción química metalúrgica ocasionando una capa de aleación más dura que el acero, lo que impide que las partes estructurales se debiliten por causas ambientales como la humedad, la corrosión o las atmósferas contaminantes.

La lámina con acabado zintro, también conocido como galvanizado, puede ser aplicada en una variedad de sectores tales como construcción, automotriz, fabricación de herramientas y en aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión. Las láminas se pueden utilizar desnudas, pre-pintadas o pintadas (Atsa, 2019).

2.6.2 La corrosión en el acero galvanizado

De acuerdo a Gil (2020), la corrosión en el acero y en otros metales, no es más que el desgaste que sufren los metales por la continua exposición a los factores climáticos o externos que alteran la composición eléctrica del metal, logrando así que se deterioren las moléculas y partículas del mismo. Este proceso terminará con una completa destrucción de las propiedades físicas y de la resistencia que ofrece el metal, convirtiéndolo en un material débil y nada resistente a la tensión y a la exposición que debe soportar este tipo de estructuras a cualquier

construcción.

Para Gil (2020), el proceso de corrosión del acero galvanizado es complejo y ha sido descrito en 3 etapas. La figura 2-6, esquematiza tales etapas. En la primera etapa toma lugar la disolución de la capa de zinc, la cual es reemplazada progresivamente por la formación de productos de corrosión del zinc, principalmente del óxido de zinc, la cual forma una capa adherente, porosa, de color blanco. Además, en esta etapa, la protección galvánica que el zinc otorga al acero ocurre cuando pequeñas áreas del acero son expuestas al medio ambiente debido a rasguños u otras imperfecciones. En la segunda etapa, se evidencia un incremento en el espesor de la capa de productos de corrosión, mientras que el zinc se agota. Durante esta etapa, el frente de corrosión alcanza la capa de aleación de $Zn - Fe$ y el acero galvanizado experimenta un cambio de su potencial de corrosión a valores más nobles. Por último, en la tercera fase, la velocidad de corrosión del hierro incrementa rápidamente, debido a la ausencia de la capa de zinc y sus óxidos correspondientes, que protegían al sustrato.

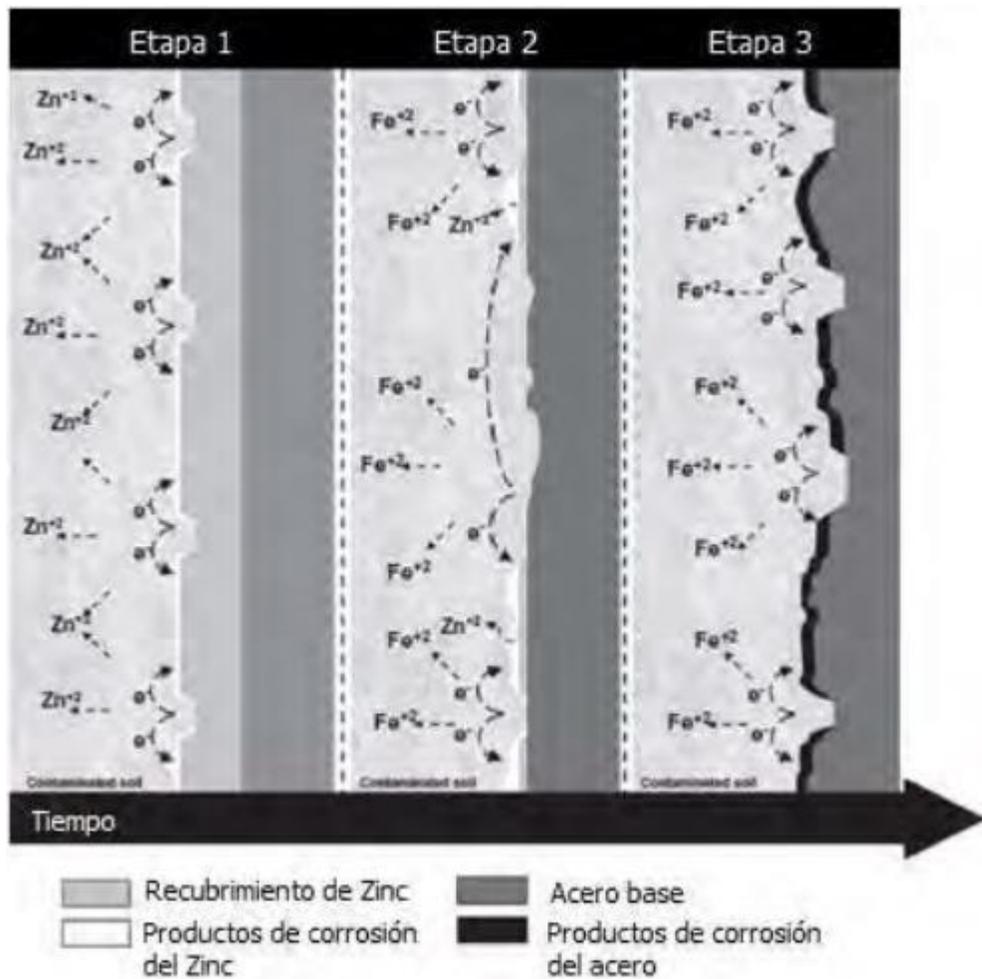


Figura 2-6: Etapa de la corrosión en el acero galvanizado (Gil, 2020).

Los productos de corrosión del zinc expuesto a la atmósfera son influenciados por la presencia de los constituyentes del aire, tales como CO_2 , SOX y Cl^- y por la humedad presente. Los productos de reacción más frecuentes son presentados en la figura 2-7. De los productos generados, resalta la pátina de zinc, compuesta por el hidróxido de zinc (producto de la reacción entre el zinc y la humedad), y las sales básicas de zinc formadas. Por consiguiente, la composición de la pátina de zinc dependerá del medio de exposición y también del tiempo al que estará expuesto el material. Entre ellas, la pátina de zinc compuesta por una película básica de carbonato de zinc (formada por el CO_2 del medio) se caracteriza por ser una capa muy adherente, relativamente insoluble y responsable de la protección tipo barrera contra la corrosión. (Gil, 2020).

Principales reacciones en medio urbano	
Formación de óxido de zinc:	$2Zn + O_2 \rightarrow 2ZnO$
Formación de hidróxido de zinc:	$2Zn + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2Zn(OH)_2$
Formación de la pátina de zinc:	$5Zn(OH)_2 + 2CO_2 \rightarrow 2ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2 + 2H_2O$
Principales reacciones en atmosfera salina y marina	
Formación de Cloruro de zinc	$2Zn + 2H_2O + O_2 + 2NaCl \rightarrow ZnCl_2 + Zn(OH)_2 + 2NaOH$
Formación de Oxiclورو de zinc	$2Zn + 2H_2O + 4NaCl + 3O_2 \rightarrow 2Zn(OCl)_2 + 4NaOH$
Bajo depósito de sales	$NaCl \leftrightarrow Na^+ + Cl^-$ (Incrustación de sales en la superficie)
Principales reacciones en atmosfera industrial	
Formación de Sulfato de zinc	$Zn + O_2 + SO_2 \rightarrow ZnSO_4$
Disolución de la pátina de zinc	$2Zn(HCO_3)_2 + O_2 + 2SO_2 \rightarrow 2ZnSO_4 + 4CO_2 + 2H_2O$
Hidrólisis del sulfato de zinc	$2ZnSO_4 + 2SO_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2ZnSO_4 + 4CO_2 + 2H_2O$

Figura 2-7: Productos de zinc formados por la exposición a diferentes medios (Gil, 2020)

En un ambiente marino, que es húmedo y salobre, tienden a formarse en la superficie cloruros de zinc y oxiclورuros, que junto a las partículas de sales precipitadas aceleran la corrosión del sustrato. Por otro lado, en una atmósfera ácida, generada en una zona industrial, la capa de zinc se disuelve relativamente de manera rápida formando sulfato de zinc. Este compuesto se hidroliza con la humedad del ambiente, reduciendo rápidamente la capa protectora de galvanizado (Gil, 2020).

2.6.3 Protección del acero galvanizado contra la corrosión

La efectividad del acero galvanizado contra la corrosión se debe a la combinación de tres distintos mecanismos:

- Efecto de protección barrera:** Se basa en el aislamiento del acero con el ambiente y los electrolitos, el sistema de barrera será eficiente mientras el recubrimiento de zinc permanezca intacto e impenetrable.
- Efecto de protección barrera debido a los productos de corrosión de zinc:** La reacción del recubrimiento de zinc con la atmósfera forma una capa de productos de corrosión, entre ellos la pátina de zinc, que impermeabiliza el metal a proteger de los agentes externos.

- c) **Protección catódica** (también es conocido como protección por sacrificio): El zinc por ser un metal más activo que el hierro actúa como ánodo y el hierro por ser más noble actúa como cátodo. Por tal motivo, al estar conectados eléctricamente el zinc y acero, y en presencia de un electrolito el zinc empieza a consumirse (corroerse), mientras que el acero es protegido. Debido a la protección catódica, el galvanizado será capaz de proteger al acero cuando este es expuesto a la atmósfera, por posibles arañazos, cortes, entre otros (Gil, 2020).

2.6.4 Recubrimientos post galvanizado

Dado que el zinc, al ser expuesto en ambientes marinos incrementa la vida útil del acero base, pero no lo suficiente para evitar el deterioro en el tiempo sufrido por corrosión, se hace necesario mejorar su comportamiento en servicio recubriéndolo con una película de pintura, formando así, un sistema como el de la figura 2-8 conocido como Dúplex (Fe/Zn/Pintura). Ambos recubrimientos actúan en forma sinérgica incrementando el tiempo de vida útil del acero en medios marinos e industriales (Pérez et al., 2000).

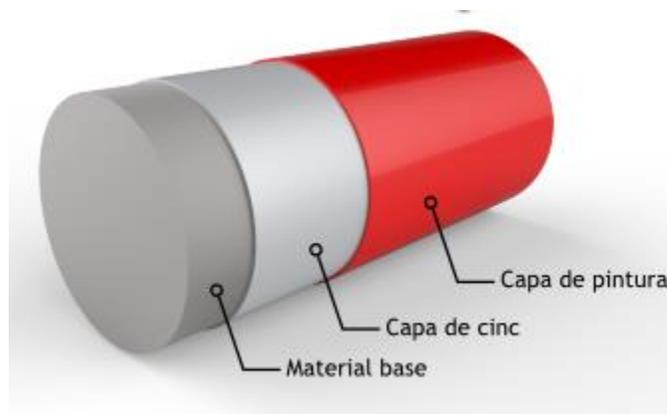


Figura 2-8: Esquema de un recubrimiento Dúplex (autocromes (s.f))

Los recubrimientos de pintura poseen normalmente poros y micro grietas que permiten el paso de la humedad ambiental. Si estos recubrimientos se aplican directamente sobre la superficie del acero, el óxido de hierro que se forma inicialmente debajo de la capa de pintura tiende a agrandar estas grietas, por ser voluminoso y, por tanto, facilita la penetración de los agentes agresivos hacia la superficie del acero, con la consiguiente formación de nuevas cantidades de óxido y ampollamiento de la pintura (Vera et al., 1999).

Sin embargo, cuando las pinturas se aplican sobre recubrimientos galvanizados, aunque la humedad penetre igualmente a través de los poros y micro grietas de la pintura, ésta dará lugar a la formación de productos de corrosión de cinc compactos y adherentes que rellenan las grietas, prolongando la duración de la película de pintura. Este comportamiento trae como consecuencia que los sistemas Dúplex presenten un tiempo de vida útil mayor que el obtenido en cada sistema por separado (Vera y Cañas, 2005).

No obstante, es importante considerar que cuando se produzcan discontinuidades en la película de pintura, por envejecimiento o por daño mecánico, el recubrimiento galvanizado ejercerá su acción protectora y se irá consumiendo gradualmente a una velocidad que estará determinada por las condiciones de exposición (Vera y Cañas, 2005).

2.7 Pruebas de corrosión y sus normas

Las pruebas de corrosión mostradas en la figura 2-9 son procedimientos de experimentación, en los que determinadas muestras son expuestas a condiciones corrosivas que permiten simular ambientes corrosivos de forma artificial con el fin de determinar la resistencia de los metales recubiertos bajo condiciones controladas, (*Pruebas de Corrosión y sus normas - Ebook - Metalinspec Laboratorios, 2021*).

Se usan para garantizar y conocer la durabilidad de las capas pasivas o protectoras de metales como el acero, aluminio, titanio, plomo, cobre y aleaciones compuestas. Por tanto, las pruebas de corrosión son parte del proceso de control de calidad ya que detectan fallas, comparan materiales y determinan cuales son los más indicados para cada entorno. Además, sirven para analizar el funcionamiento de diversos procesos corrosivos (*Pruebas de Corrosión y sus normas - Ebook - Metalinspec Laboratorios, 2021*).

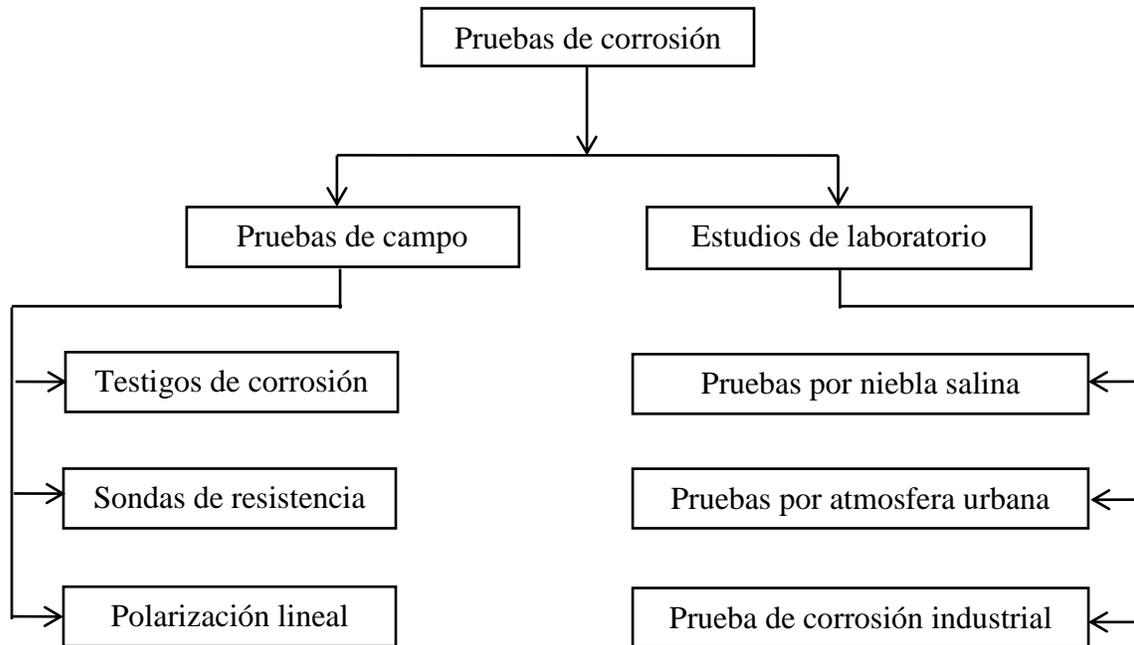


Figura 2-9: Tipos de pruebas de corrosión (Guerra 2021)

2.7.1 Ensayo de niebla salina

Los ensayos de corrosión por niebla salina se rigen por una extensa variedad de normas internacionales, entre las que cabe destacar la norma ASTM B-117 la cual es el punto de partida de todas las demás. Se denomina de niebla salina porque en su interior se atomiza una solución salina de $NaCl$ en agua, a temperatura controlada en una proporción aproximada de 35 gr/l, que es la concentración media existente en el agua del mar que rodea la tierra (Guerra, 2021).

2.7.2 Norma ASTM B117

Esta prueba implica la introducción de niebla salina vaporizada en una cámara que contiene un ambiente de temperatura única. Es utilizada para probar la resistencia relativa a la corrosión de muestras metálicas con y sin recubrimiento (*Pruebas de Corrosión y sus normas - Ebook - Metalinspec Laboratorios, 2021*)

Esta práctica cubre los aparatos, procedimiento, y las condiciones requeridas para crear y mantener el entorno de prueba de pulverización de sal (niebla). La reproducibilidad de los

resultados dependerá del tipo de muestras sometidas a ensayo y los criterios de evaluación seleccionados, así como el control de las variables de funcionamiento (norma ASTM B117)

En general, de acuerdo a lo presentado en el ebook “*Pruebas de Corrosión y sus normas*” (2021), la metodología para para la realización de esta prueba consiste en los siguientes pasos:

1. Las muestras a probar se colocan en una cámara cerrada.
2. Se exponen a una vaporización indirecta continua de solución salina (con pH 6.5 a 7.2)
3. El rociado de la niebla debe de presentar una velocidad de $\frac{1 \text{ ml}}{80 \text{ cm}^2}$ a $\frac{2 \text{ ml}}{80 \text{ cm}^2}$ por hora.
4. La cámara debe estar a una temperatura de 35°C, este clima se mantiene en condiciones de estado estable constante.
5. La duración de la prueba varía de acuerdo a las necesidades.

Capítulo 3 : Metodología y análisis

Se presenta en este capítulo los pasos seguidos para el alcance de los objetivos. Por consiguiente, se especifica la metodología desarrollada a nivel de laboratorio para llevar a cabo una prueba de corrosión acelerada de acuerdo a la norma ASTM B117; se describe la influencia de los diferentes factores involucrados en el proceso y por último se presenta el análisis parcial y final de los resultados.

3.1 Consideraciones previas

El estándar para la operación de una cámara de niebla salina, identificado como ASTM B117, es una regulación para la realización de una práctica que proporciona un entorno corrosivo controlado, para producir información sobre la resistencia a la corrosión relativa en especímenes de metales y metales expuestos en una cámara de ensayo determinada.

La primera metodología experimental contemplaba como paso fundamental el uso de un equipo específicamente diseñado para cumplir con las especificaciones del estándar mencionado, pero debido a un repunte de casos de COVID-19 se restringió el acceso frecuente a las instalaciones de la universidad y por ende el acceso al equipo. Por otro parte, no se contó con el tiempo suficiente para gestionar permisos para el uso de equipo especializado de la universidad, por lo que la nueva metodología se creó como una adaptación de la norma ASTM B117 a nivel de laboratorio, basada en el uso de materiales y equipos más simples.

Por tanto, la metodología presentada es una aplicación en la que no se pudo tener un control estricto de todas las variables, como por ejemplo la temperatura, la cual fue variando conforme lo hacía la presente en el ambiente. Además, debido a las normativas de seguridad sanitaria de la universidad, la duración del ensayo disminuyó de 1000 horas a 840 horas.

3.2 Productos evaluados

Desde la planificación del tema de investigación se definió como principal propósito del mismo el comparar la efectividad de productos anticorrosivos en el acero galvanizado. Si bien existen diversos tipos de productos anticorrosivos, se seleccionaron pinturas base agua

como los productos de estudio por su facilidad de adquisición y aplicación. Además, estos productos cuentan con la garantía del fabricante sobre su aptitud para el uso en el material de análisis. Los productos de estudio se muestran en la figura 3-1

- a) DTM.
- b) Corrostyl
- c) Acqua 100



Figura 3-1: Productos de estudio

En la tabla 3-1 se describen las características generales de cada uno de ellos.

Tabla 3-1: Características de los productos de estudio.

Característica	DTM	Corrostyl	Acqua 100
Color	Blanco	Blanco	Blanco
Acabado	Mate	Mate	Brillante
Uso	Para interiores y uso industrial moderado.	Interiores y exteriores techados.	Interiores.
Sólidos por peso (%)	51% ± 2%	61-63 %	40%-50%
VOC (g/l)	227.89	0	250
Sólidos por volumen	36% ± 2%	46% -48%	28%-37%

Continua...

Tabla 3-1: Características de los productos de estudio (Continuación)

Rendimiento teórico ($m^2/galón$)	54	70 m^2 (1 mil)	22.7-30.3
Espesor seco	2.0-3.0 mils	1.5 mils	1.0 - 2.0 mils
Tiempo de curado	1 día	5 a 7 días	7 días

Fuente: Hojas técnicas de las pinturas anticorrosivas Corrostyl, Acqua 100 y DTM obtenidas de los sitios web de SUR, Comex y Sherwin Williams.

3.3 Dimensionamiento de las probetas utilizadas

Para la ejecución del ensayo se dispuso de 12 láminas de acero galvanizado (como se indica en la figura 3-2) de 1/16 con las siguientes dimensiones.

- Largo 15 cm.
- Ancho: 7.5 cm.
- Grosor ¼ de pulgada.



Figura 3-2 Láminas utilizadas durante la prueba

3.4 Metodología

A continuación, se presenta el diagrama (figura 3-3) el cual detalla el proceso experimental seguido para el desarrollo de la prueba.

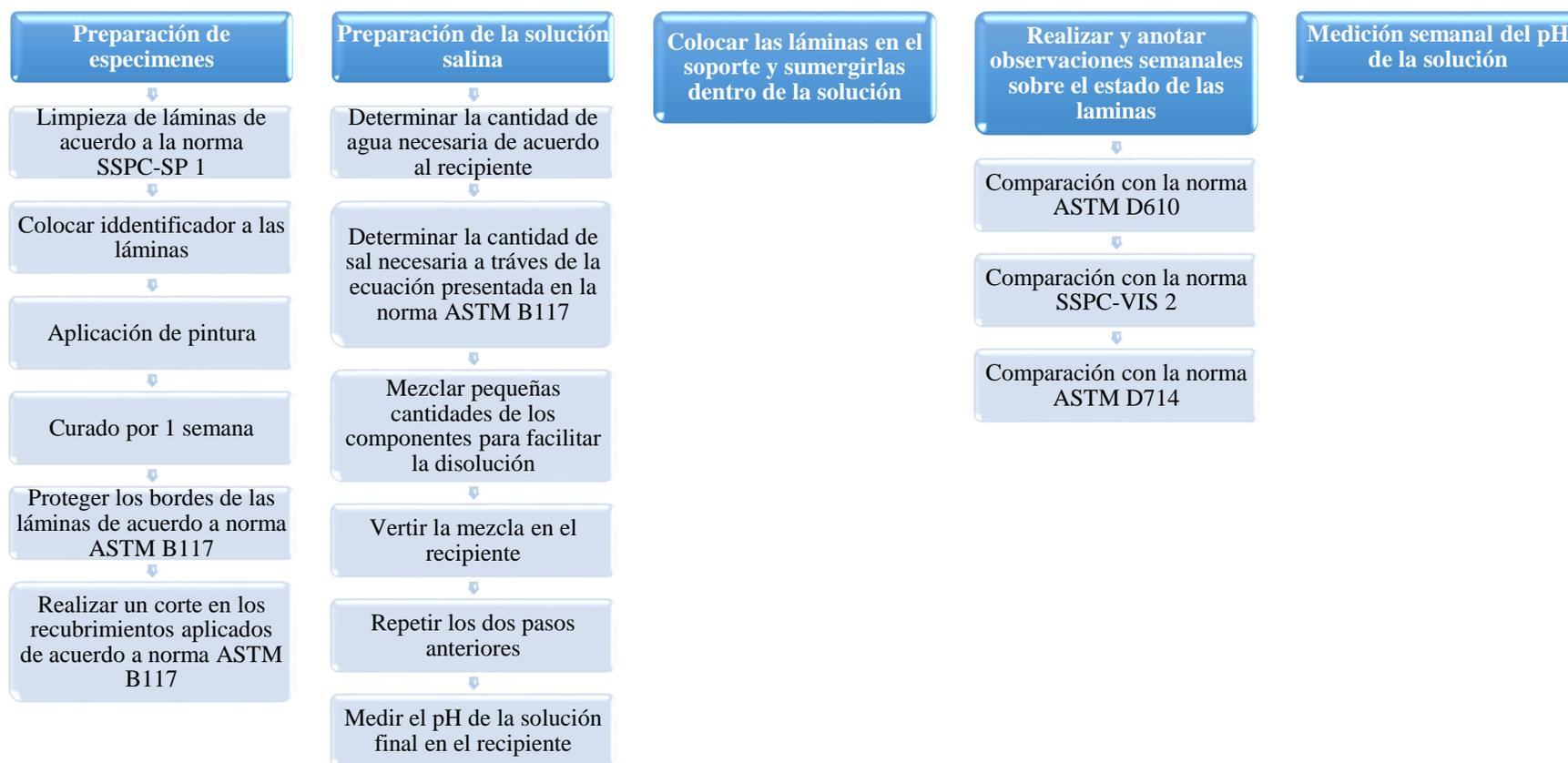


Figura 3-3: Diagrama del proceso experimenta

3.4.1 Preparación de la superficie.

Los recubrimientos deben de adherirse de manera adecuada al sustrato para presentar un buen rendimiento, en virtud de ello, antes de aplicar cualquier tipo de recubrimiento se debe realizar una limpieza en la superficie del material. La norma ASTM B117 establece que el método para la limpieza dependerá del tipo de superficie y de los contaminantes presentes en esta.

Hay diferentes organizaciones que regulan las normas de limpieza, pero en este trabajo se tomó como referencia la SSPC (Steel Structures Painting Council, Pittsburgh USA), por lo que después de un examen visual y sensorial de los especímenes de estudio, se determinó que debía hacerse uso de la norma SSPC-SP-1.

Esta norma corresponde a la preparación de superficie o limpieza utilizando solventes, vapor de agua, soluciones alcalinas, emulsiones jabonosas, detergentes y solventes orgánicos que remueven del sustrato contaminantes como: grasa, aceite, polvo y sales solubles en el agente limpiador. Para este trabajo el producto de limpieza seleccionado fue el NAPHTHA R1K3.

3.4.2 Identificación y proceso de pintado.

Después de cerciorarse que las láminas se encontraran totalmente secas, se separó el total de láminas en tres grupos (como se indica en la figura 3-4), formados por cuatro láminas cada uno. Esta división fue hecha para concordar con el número de productos de estudio.



Figura 3-4: Separación de la lámina es tres grupos.

Antes de realizar la aplicación de cada uno de los productos a las láminas de acero galvanizado, se mezcló cada uno de ellos con agua para facilitar su aplicación en las probetas. A fin de determinar la cantidad de partes de agua necesarias, se consideró la viscosidad de los productos, la magnitud de este aspecto se conoció a través de la medición del tiempo que le tomaba a la pintura moverse una distancia corta desde un recipiente elevado a otro apoyado en una mesa. Para calcular la proporción adecuada de agua y pintura se utilizó una copa Ford, como se muestra en la figura 3-5



Figura 3-5: Medición del tiempo de caída de los productos de estudio.

Las proporciones empleadas en la mezcla pintura-solvente se muestran en la tabla 3-2.

Tabla 3-2 Composición de mezcla solvente-pintura:

A: Producto	B: Solvente	Composición de la mezcla A:B
DTM	Agua	5:1
Corrostyl		6:2
Acqua 100		6:1

Para medir la composición de pintura y agua utilizamos una regla de aluminio como la mostrada en la figura 3-6.



Figura 3-6: Medición de las partes de pintura y agua

Al terminar el proceso de mezclado para cada uno de los productos anticorrosivos, se procedió a iniciar con la aplicación de la pintura mediante el empleo de una pistola. La figura 3-7 nos ilustra el proceso.



Figura 3-7: Aplicación de pintura con pistola.

Las pinturas base agua tienen un tiempo de secado corto por lo que después de esperar 1 hora, se aplicó a cada grupo una segunda capa de recubrimiento. La figura 3-8 muestra el proceso de secado.



Figura 3-8: Secado de láminas después de la aplicación de la primera capa de pintura.

Como identificador del producto utilizado en cada lámina se estimó conveniente utilizar las primeras letras del alfabeto. De esta forma se rotularon las láminas con una letra A si se trataban de las probetas rociadas con DTM, con una letra B si habían sido las muestras pintadas con Corrostyl y con una letra C las recubiertas con el producto Acqua 100.

Para tener un proceso de curado óptimo se esperaron siete días para dar inicio a la prueba por corrosión salina.

3.4.3 Procedimiento experimental.

Después de cumplir con el tiempo de curado convenido, el desarrollo del experimento se efectuó en la Planta Piloto de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. Durante la primera visita al laboratorio universitario, se preparó la solución salina y se inició el periodo de inmersión de las láminas en la misma. En la tabla 3-3 se detallan los materiales y equipos proporcionados por la Planta Piloto en esta visita.

Tabla 3-3: *Equipo y materiales utilizados*

Cristalería y equipo usado	Cantidad
Balanza analítica	1
Vidrio reloj	1
Beaker 1000 ml	2
pH metro	1
Termómetro	1
Espátula	1
Frasco lavador	1
Agitador	2
Bascula	1

Para la adecuada simulación de una cámara de niebla salina, se consideró necesario usar un recipiente que pudiese ser sellado. La figura 3-9 muestra el recipiente utilizado durante las pruebas.



Figura 3-9: Recipiente de plástico utilizado para simular una cámara de niebla salina.

Para asegurar las láminas dentro del recipiente era necesario contar con un soporte donde colocar los especímenes. En la norma ASTM B117 se menciona que una buena opción como material de soporte para las láminas es la madera, además, añade que “Los listones de madera con ranuras son adecuados para el soporte de paneles planos”. Por ello, el soporte utilizado en el ensayo fue un listón de madera Brasil (figura 3-10), al cual se le efectuaron cortes con una sierra para encajar las láminas en ellos.



Figura 3-10: Listón madera Brasil utilizado como soporte para las láminas.

3.4.3.1 Preparación de la solución.

De acuerdo a la norma ASTM B117, la solución salina se debe preparar disolviendo 5 ± 1 partes de masa de cloruro de sodio en 95 partes de agua. El tipo de agua corresponde al tipo IV de la especificación D1193 y se recomienda que la sal no debe poseer más del 0.3% de impurezas totales.

Con el fin de cumplir lo establecido en la norma ASTM B117 con respecto al agua, se hizo uso de agua desmineralizada. En cuanto a la sal se empleó del tipo industrial (figura 3-11), por tener mayor facilidad para su adquisición.



Figura 3-11: Sal tipo industrial

La cantidad de agua fue determinada esencialmente por la capacidad de almacenamiento del recipiente y la consideración que, al introducir el soporte con las láminas, se desplazaría cierto volumen de agua. Por estas razones, aunque el recipiente contaba con una capacidad de 16 l, inicialmente se utilizaron 14 l de agua desmineralizada como solvente.

Por otra parte, la cantidad de sal utilizada se determinó a través del uso de la ecuación presentada en el apartado 8 de la norma ASTM B117. Esta ecuación se muestra a continuación:

$$0.053 * \text{Cantidad de agua} = \text{Masa de NaCl requerida}$$

La ecuación anterior es descrita en la norma ASTM B117 como una fórmula común para calcular, a partir de una cantidad de agua conocida, la cantidad de requerida en masa de sal para lograr una solución salina al 5%. Para aplicar esta ecuación se considera que la masa de agua en 1 ml es un 1 g, es decir que para obtener gramos de sal se debe expresar el volumen de agua en ml.

Tomando como base la ecuación 1, el cálculo para la solución salina se llevó a cabo de la siguiente manera:

$$0.053 * 14 \text{ l} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} = 742 \text{ g de NaCl}$$

Para pesar los gramos de sal requeridos se utilizó una báscula y una balanza, las cuales se muestran en las figuras 3-12 y 3-13. En un principio solo se iba a hacer uso de la báscula, pero al percatarse que este equipo medía los kg con dos cifras decimales, se prefirió medir en él 720 g y luego se utilizó una balanza para medir los gramos restantes.



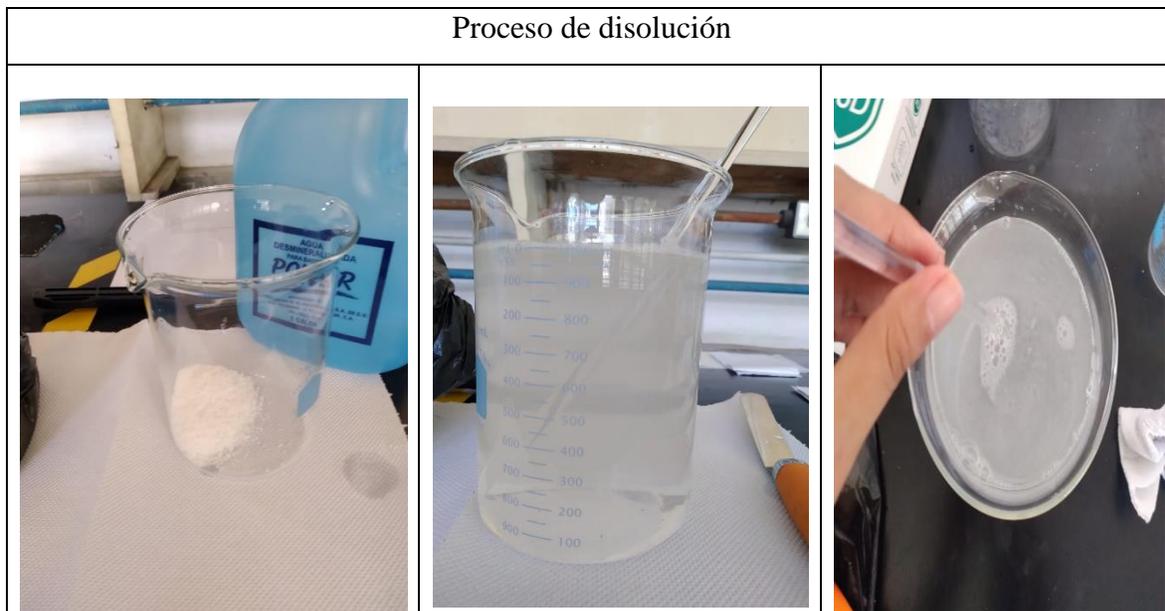
Figura 3-12: Pesaje de la sal en la báscula



Figura 3-13: Balanza utilizada para pesar la sal.

Al tener los componentes listos, se procedió con la preparación de la disolución. Para ello, como primer paso se agregó sal en un beaker de 1000 ml, a continuación, se añadió agua hasta aforar en la marca de 1000 ml, inmediatamente después la mezcla se agitó hasta lograr la completa dilución de la sal añadida y, por último, la solución fue vertida en el recipiente designado para simular una cámara de niebla salina. Este proceso se muestra en la tabla 3-4 y se repitió hasta utilizar las cantidades totales de sal y agua previamente mencionadas.

Tabla 3-4: Preparación de la solución salina



3.4.3.2 Preparación de los especímenes.

Antes de introducir las probetas a la solución, se ejecutó la preparación de los especímenes. En primer lugar, se separó una lámina de cada uno de los tres grupos de estudio para ejercer el rol de testigo al finalizar el experimento; seguidamente, a las otras tres láminas se les colocó un número del 1 al 3 para poder identificarlas con mayor facilidad. Como medida preventiva, en caso el identificador no fuese visible en las láminas después de pasar días inmersas en la solución, también se añadió el identificador de cada espécimen en la posición que tomaría en el soporte.

El apartado seis de la norma ASTM B117 establece que “Siempre que se desee determinar el desarrollo de corrosión de una zona desgastada en la pintura o en el revestimiento orgánico, antes de la prueba se hará un rasguño o una línea de trazado a través del revestimiento con un instrumento afilado para exponer el metal subyacente”; dicho procedimiento se muestra en la figura 3-14. El corte en forma de “X” realizado en cada una de las láminas escogidas para ser inmersas en la solución se muestra en la figura 3-17,



Figura 3-14: Realización de un corte en el recubrimiento.

Otro aspecto importante descrito en el apartado 6 de la norma ASTM B117 sugiere que: “A menos que se especifique lo contrario, los bordes cortados de los materiales chapados revestidos o dúplex y las zonas que contengan marcas de identificación o estén en contacto con los soportes se protegerán con un revestimiento adecuado y estable para las condiciones de la práctica”. Por lo tanto, acatando la indicación citada, se cortaron trozos de cinta tapagoteras, como se muestra en la figura 3-15, para ser usados como recubrimiento en los bordes de las muestras integrantes del ensayo.

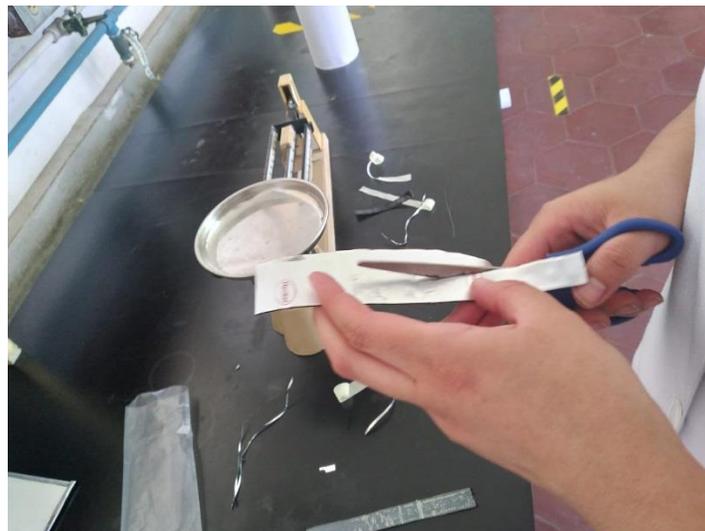


Figura 3-15: Preparación del marco para los bordes de lámina.

Luego se forró todo el perímetro de las láminas como se muestra en la figura 3-16



Figura 3-16: Adición de la cinta tapagotas a las láminas.

El resultado después de cumplir con ambas recomendaciones se muestra en la figura 3-17



Figura 3-17: Corte realizado a la lámina

Como siguiente paso se insertaron todas las láminas en el listón de madera previamente rotulado, como se indica en la figura 3-18

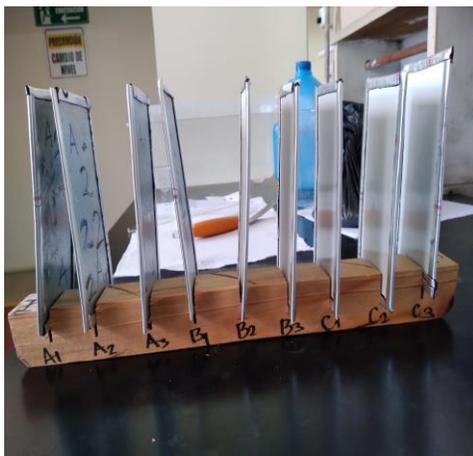


Figura 3-18: Láminas y soporte con la identificación respectiva.

Al tener las láminas listas para la inmersión se midieron los espesores de película, los datos obtenidos se muestran en la tabla 3-5

Tabla 3-5: *Espesores de película*

Espesores de película seca de acuerdo al producto en mils				
A				Promedio
A1	2.98	3.22	2.95	3.05
A2	2.8	2.81	3.08	2.90
A3	2.82	2.82	2.74	2.79
B				Promedio
B1	4.58	4.09	4.00	4.22
B2	4.08	4.00	4.18	4.09
B3	3.62	4.09	4.07	3.93
C				Promedio
C1	1.5	1.54	1.6	1.55
C2	1.96	2.03	2.11	2.03
C3	2.13	2.08	2.14	2.12

3.4.3.3 Procedimientos finales.

Seguidamente, se llevó a cabo la inmersión de los especímenes en la solución, como se muestra en las figuras 3-19 y 3-20. Se tomó como fecha de inicio del proyecto el jueves 7 de octubre a las 1 de la tarde y como fecha de finalización del mismo el jueves 11 de noviembre a las 11 de la mañana. Por tanto, la duración del experimento fue de 35 días, el cual a convertirlo a horas da:

$$35 \text{ día} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 840 \text{ horas}$$

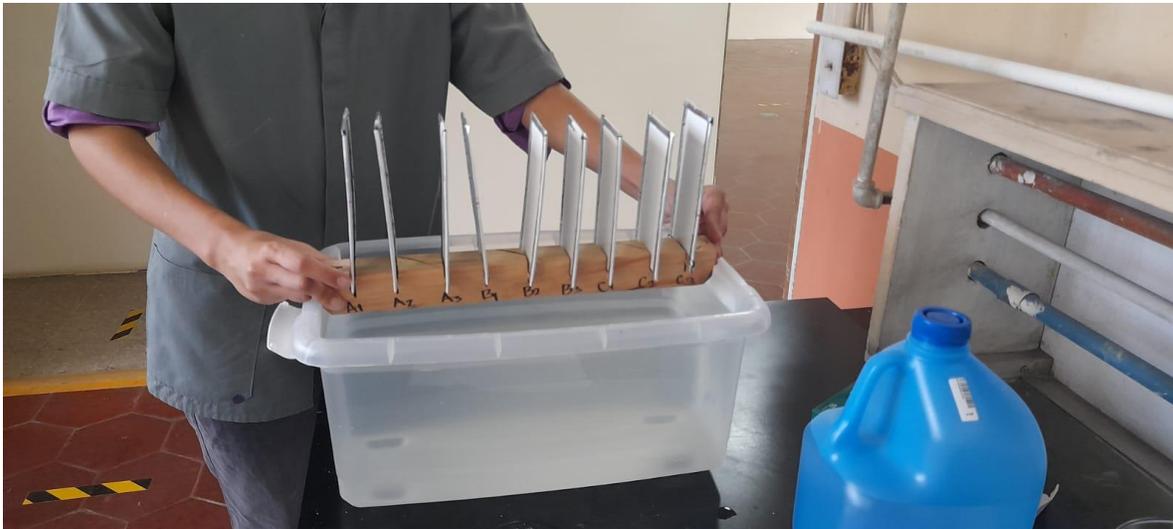


Figura 3-19: Láminas lista para sumergirse en la solución salina.

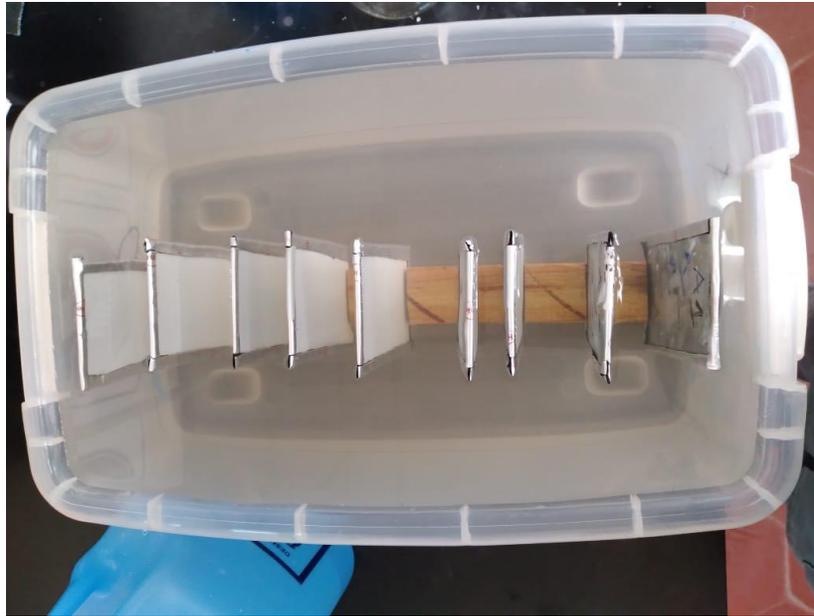


Figura 3-20: Láminas inmersas en la solución salina.

Después de sumergir las probetas, se observó como la disolución no recubría totalmente la parte superior de las mismas. Para solucionar este problema se decidió agregar 500 ml de agua y su correspondiente cantidad de sal. Nuevamente, para conocer los gramos de sal se empleó la ecuación 1.

$$0.053 * 500 \text{ ml} = 26.5 \text{ g d NaCl}$$

Para dar como finalizada la puesta en marcha del ensayo de corrosión acelerada, se realizó la medición del pH de la solución. Se tomaron 80 ml de solución y se analizó su pH a través de un pH-metro mostrado en la figura 3-21.

La norma ASTM B117 indica que “El pH de la solución salina deberá ser tal que cuando atomizada a 35°C (95°F) la solución recogida estará en el pH de 6.5 a 7.2”. Pese a que el ensayo se desarrolló a temperatura ambiente, este se trabajó con el rango de pH propuesto por la norma ASTM B117. Por otra parte, debido a que el número de visitas al laboratorio era limitado, no fue posible el realizar una medición diaria de pH como se recomienda en la norma ASTM B117.



Figura 3-21: pH-metro utilizado para el control del pH

En la primera medición de pH el resultado obtenido fue de 6.9. Dicho valor se encuentra dentro del rango permitido por el estándar, por lo que se aceptó como válido.

3.5 Análisis de resultados

En conformidad con los permisos obtenidos para el uso del recinto, la inspección del posible avance de la corrosión en los especímenes fue planificada para llevarse a cabo una vez por semana durante cinco semanas. Para evaluar el grado de corrosión en las láminas se utilizó la Norma ASTM D610 “Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces” y la Norma SSPC-VIS 2 “Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces”.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las inspecciones, donde se expresa el tiempo transcurrido en horas (1 semana equivale a 168 horas).

3.5.1 Primera visita

En esta visita, el primer aspecto notable fue el cambio en la tonalidad de la solución (figura 3-22). Después de buscar información al respecto, se descubrió que el cambio sucedió por los taninos liberados por la madera. Los taninos son unos compuestos presentes en las plantas que se mueven hacia la superficie de estas cuando se humedecen, ocasionando la aparición de coloración. Este proceso se conoce comúnmente como el sangrado de la madera.

Por otra parte, al abrir el recipiente se notó como el recubrimiento en los bordes de las láminas se había desprendido. Por tanto, fue necesario el recubrir nuevamente todas las láminas con cinta tapagoteras.



Figura 3-22: Estado de la solución salina tras la primera semana de inmersión.

Al tener las láminas fuera de la solución, se procedió a realizar una comparación visual del estado de estas con las normas ASTM D610 y SSPC-VIS 2. A continuación, se presentan parte de los estándares presentados en cada una de las normas (figura 3-23 y 3-24), los cuales tienen como propósito el determinar el tipo de corrosión y el porcentaje que este fenómeno ocupa en la superficie del acero pintado.

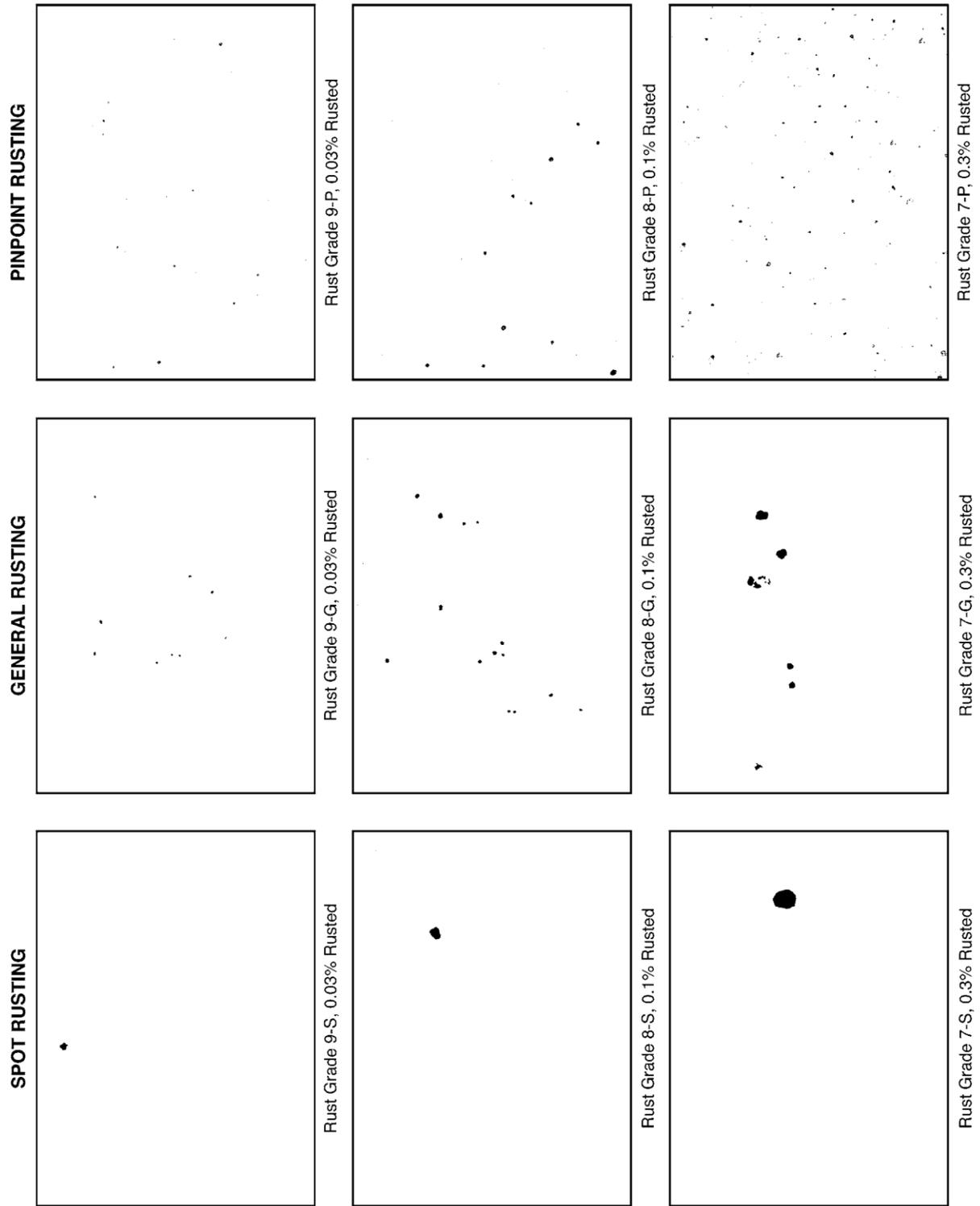


Figura 3-23: Estándar presentado en la norma ASTM D610

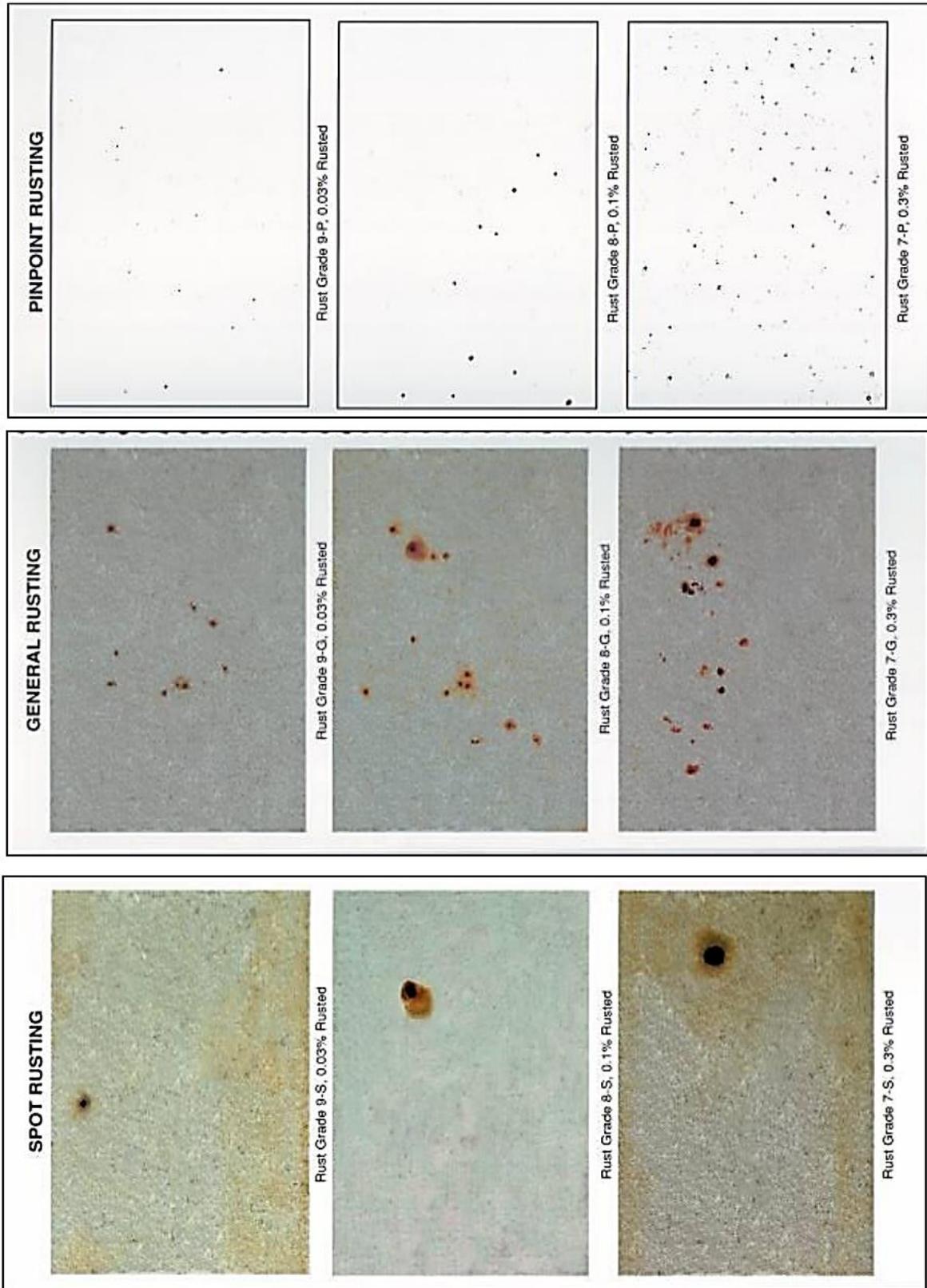


Figura 3-24: Estándar presentado en el norma SSPC-VIS 2

Al finalizar la comparación de cada una de las láminas con cada norma, se concluyó que ninguna de ellas presentaba alguna forma de corrosión y que la mayoría de los cambios estéticos habían sido causados por los taninos.

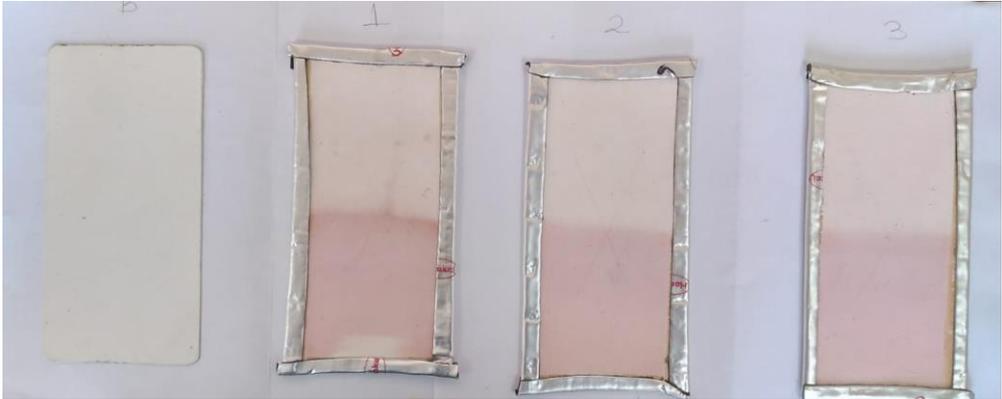
Como se aprecia en las fotografías de la tabla 3-6, los taninos lograron traspasar la capa de pintura en todos los productos de estudio. Esto sucedió porque poseen un tamaño de partícula menor que el del pigmento y porque se facilita su accionar en pinturas de tono claro.

Tabla 3-6: Estado de las láminas tras 168 horas de inmersión

Aspecto de las láminas después de 168 horas de inmersión			
Producto A			
			
A1	A2	A3	
			
<p>En las probetas del producto A se aprecia una coloración rojiza en forma de puntos de distintos tamaños a lo largo de toda la superficie, además, las láminas presentan una débil tonalidad roja en la parte inferior de su extensión.</p>			

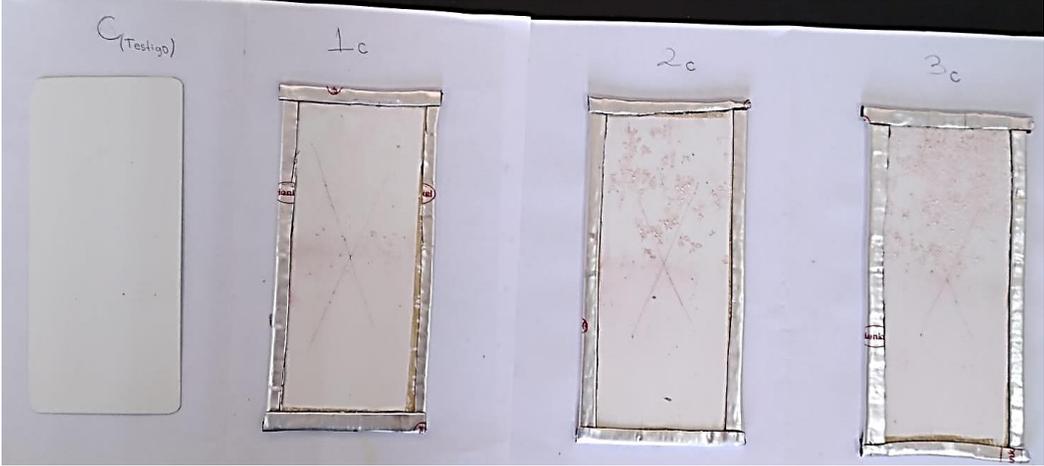
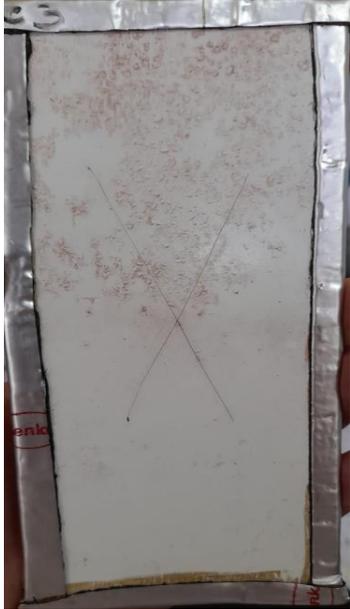
Continua...

Tabla 3-6: Estado de las láminas tras 168 horas de inmersión (continuación)

Producto B		
		
B1	B2	B3
		
<p>En las muestras del producto B no se presentó ataque por corrosión, pero se aprecia la coloración rojiza-opaca de la parte inferior de la superficie de las láminas. Mientras tanto, en la parte superior no hubo cambios.</p>		

Continua...

Tabla 3-6: Estado de las láminas tras 168 horas de inmersión (continuación)

Producto C		
		
C1	C2	C3
		

En las láminas del producto C se notó la aparición de ampollamiento, causado por la pérdida de adhesión o el levantamiento de una capa inferior de pintura y por el exceso de humedad. Para identificar la magnitud de este fenómeno se realizó un examen visual por medio de la

norma ASTM D714, la cual es el estándar para la identificación de la evaluación del grado de ampollamiento presentado en las pinturas.

El examen visual determinó que el ampollamiento correspondía con el tamaño 2 y 4 de la norma ASTM D714. Para su comparación se muestran las figuras 3-25 y 3-26.

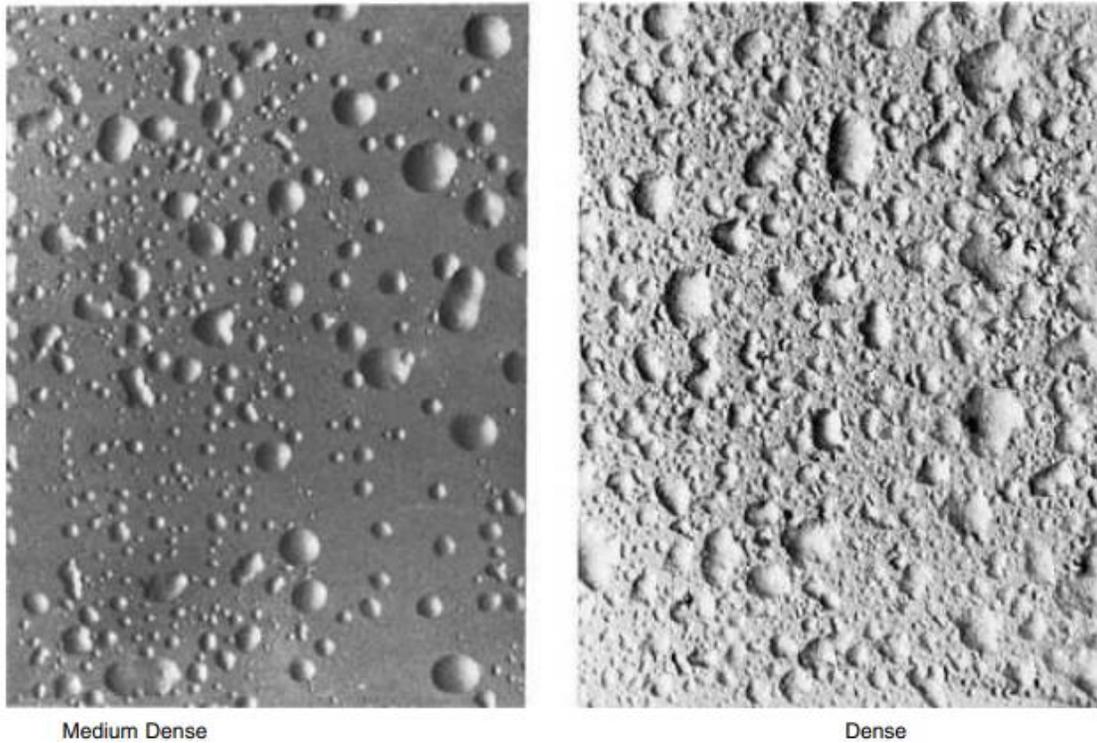


Figura 3-25: Frecuencia en tamaño 2 de ampollamiento

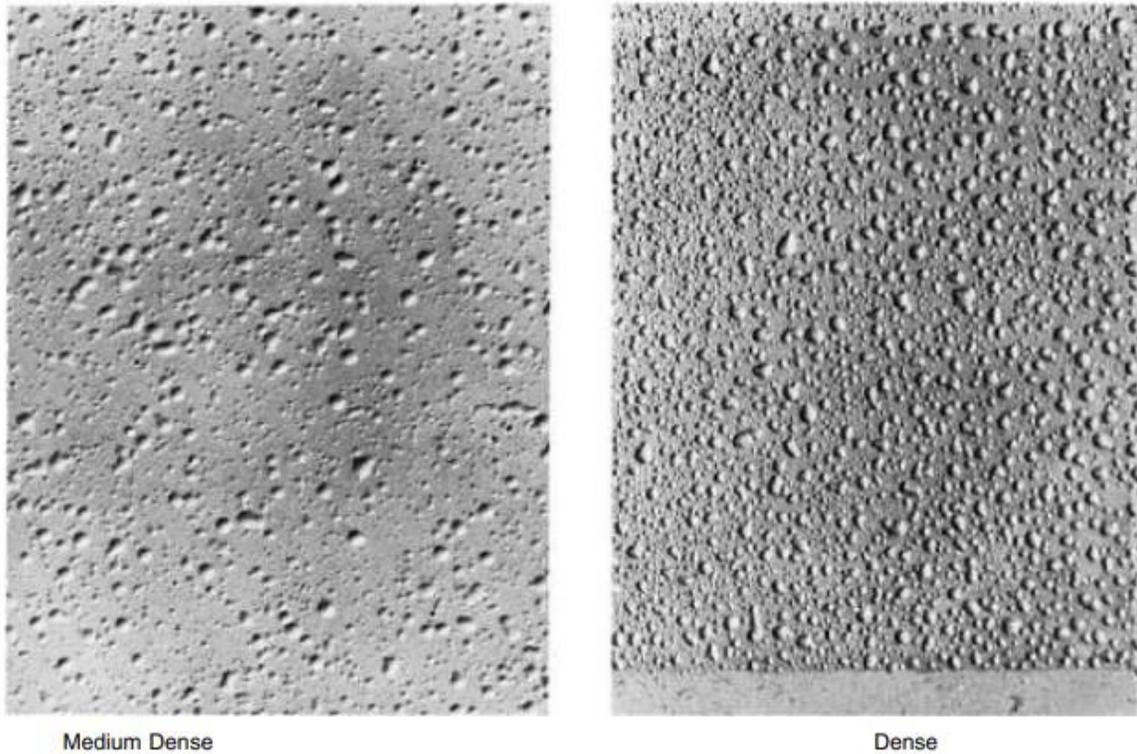


Figura 3-26: Frecuencia en tamaño de ampollamiento 4

La clasificación de los especímenes del producto c es la siguiente:

- a) C1: Presenta una distribución de ampollamiento tamaño 4 del tipo medio denso
- b) C2: Presenta una distribución medianamente densa de tamaño 2.
- c) C3: Presenta una distribución densa de tamaño 2.

Después de terminar la evaluación del estado de las láminas estas podían ser introducidas nuevamente al recipiente con la solución, pero antes fue necesario recubrir sus bordes. La cinta tapagotas se mantuvo como material protector, pero un cambio realizado en el procedimiento incluyó la aplicación de presión por medio de un trozo de madera para afirmar los trozos de cinta colocado en cada uno de los bordes, como se indica en la figura 3-27.



Figura 3-27: Cinta tapagoteras presionada con un listón de madera.

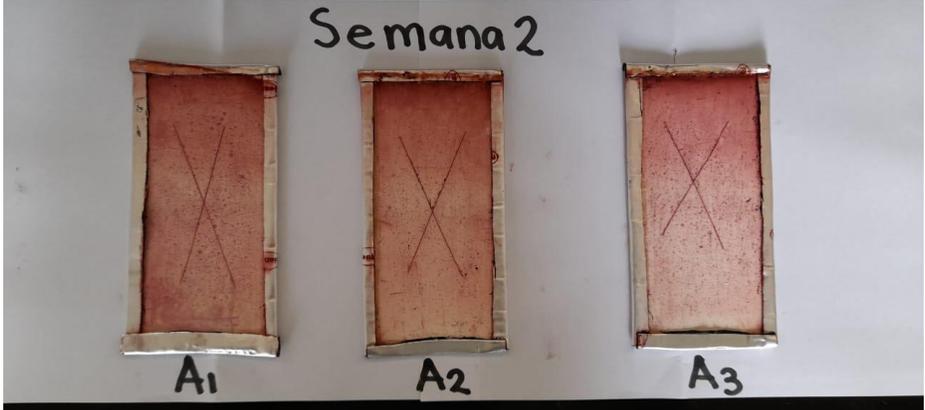
Por otra parte, la medición del pH arrojó un valor de 6.8, por lo que no se necesitó la ajustar la solución.

3.5.2 Segunda visita

En esta visita solo se observó un aumento en la intensidad del color rojo de la solución, no se presentó corrosión de acuerdo al examen visual comparativo realizado con las normas ASTM D610 y SSPC-VIS 2. Por otra parte, la medición del pH siguió estando dentro del rango aceptado por la norma ASTM B117.

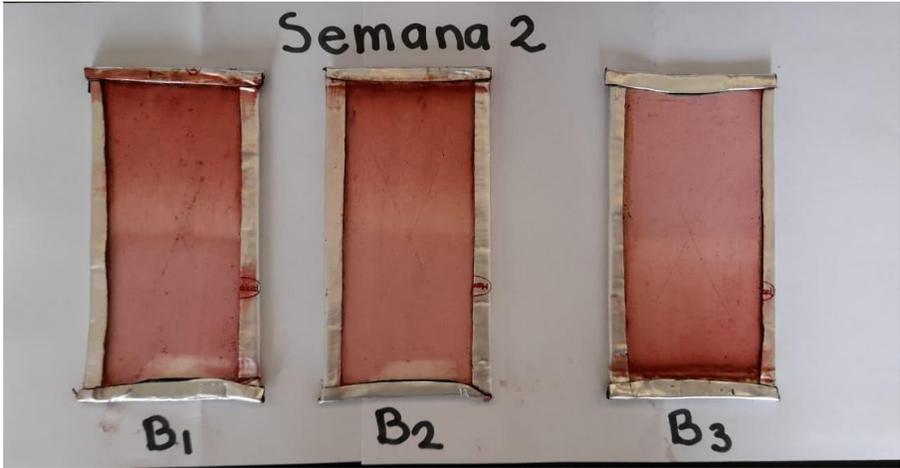
La tabla 3-7 muestra el estado de las láminas después de haber transcurrido 336 horas de inmersión.

Tabla 3-7: Estado de las láminas tras 336 horas de inmersión.

Aspecto después de 336 horas de inmersión		
Producto A		
		
A1	A2	A3
		
<p>No se presentó corrosión, los puntos rojo siguen presentandose a lo largo de toda la superficie y la tonalidad rojiza ahora cubre toda la lámina.</p>		

Continua...

Tabla 3-7: Estado de las láminas tras 336 horas de inmersión (continuación).

Producto B		
		
B1	B2	B3
		
<p>No se presentó corrosión en ninguno de las probetas, pero el color rojizo también se distribuyó en toda la superficie de ellas.</p>		

Continua...

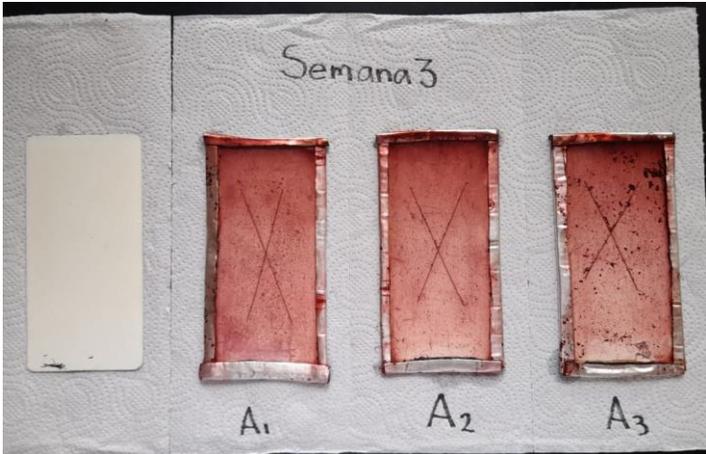
Tabla 3-7: Estado de las láminas tras 336 horas de inmersión (continuación).

Producto C		
		
C1	C2	C3
		
<p>No se presentó corrosión en las láminas. La distribución del ampollamiento no aumentó, solo se hizo más visible por el escurecimiento del tono rojizo de la solución.</p>		

3.5.3 Tercera visita

La tabla 3-8 nos muestra las láminas en estudio después de 504 horas de inmersión

Tabla 3-8: Estado de las láminas tras 504 horas de inmersión.

Aspecto después de 504 horas de inmersión		
Producto A		
		
A1	A2	A3
		
<p>No presentan corrosión. A3: No presenta corrosión, las manchas más oscuras ubicadas en la esquina superior derecha son partículas pertenecientes a la madera.</p>		

Continua...

Tabla 3-8: Estado de las láminas tras 504 horas de inmersión (continuación).

Producto B		
		
B1	B2	B3
		
<p>No hay indicio de corrosión en ninguna de las láminas, pero debido al cambio en la coloración de la solución estas presentan una tonalidad ocre.</p>		

Continua...

Tabla 3-8: Estado de las láminas tras 504 horas de inmersión (continuación).

Producto C		
		
C1	C2	C3
		
No presentan corrosión pero el oscurecimiento de la solución resalta el ampollamiento en las tres láminas.		

El pH de valor 6.5 siguió estando dentro del rango especificado en el estándar. La evaluación con las normas ASTM D610 y SSPC-VIS 2 determinó que no había presencia de corrosión en las láminas.

3.5.4 Cuarta visita

Por el continuo oscurecimiento de la solución, en esta visita se preparó una nueva. La metodología seguida para la preparación de la misma fue de acuerdo a lo descrito anteriormente, el único cambio realizado fue en el soporte, ya que en esta oportunidad se optó por madera de pino. El listón utilizado se muestra en la figura 3-28.

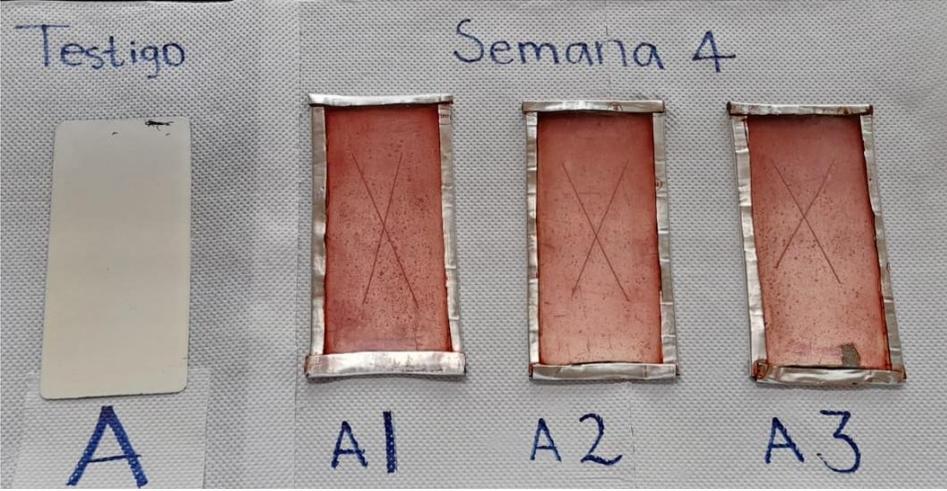
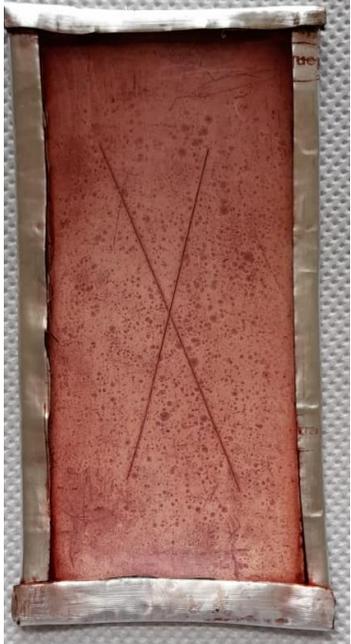


Figura 3-28: Soporte de pino utilizado a partir de la semana cuatro.

Por otra parte, las cantidades de agua y sal industrial utilizadas para esta prueba fueron 15 l y 795 g respectivamente. La medición del pH de la nueva solución fue 6.8.

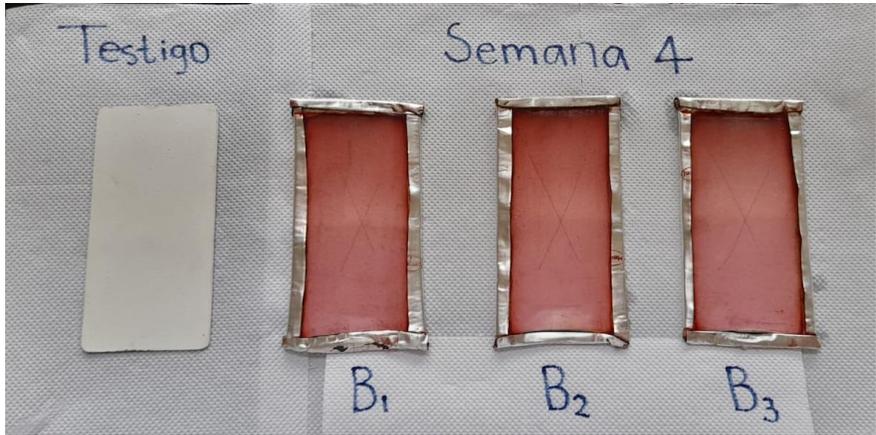
Mediante el uso de las normas ASTM D610 y SSPC-VIS 2 se determinó la ausencia de corrosión en los especímenes por lo que solo se describe el cambio en la coloración de los mismos, como se describe en la tabla 3-9.

Tabla 3-9: Estado de las lámina tras 672 horas de inmersión.

Aspecto después de 672 horas de inmersión			
Producto A			
			
A1	A2	A3	
			
<p>No se presentó corrosión en las láminas. A3 presenta un desprendimiento del recubrimiento debido a la mala extracción del soporte.</p>			

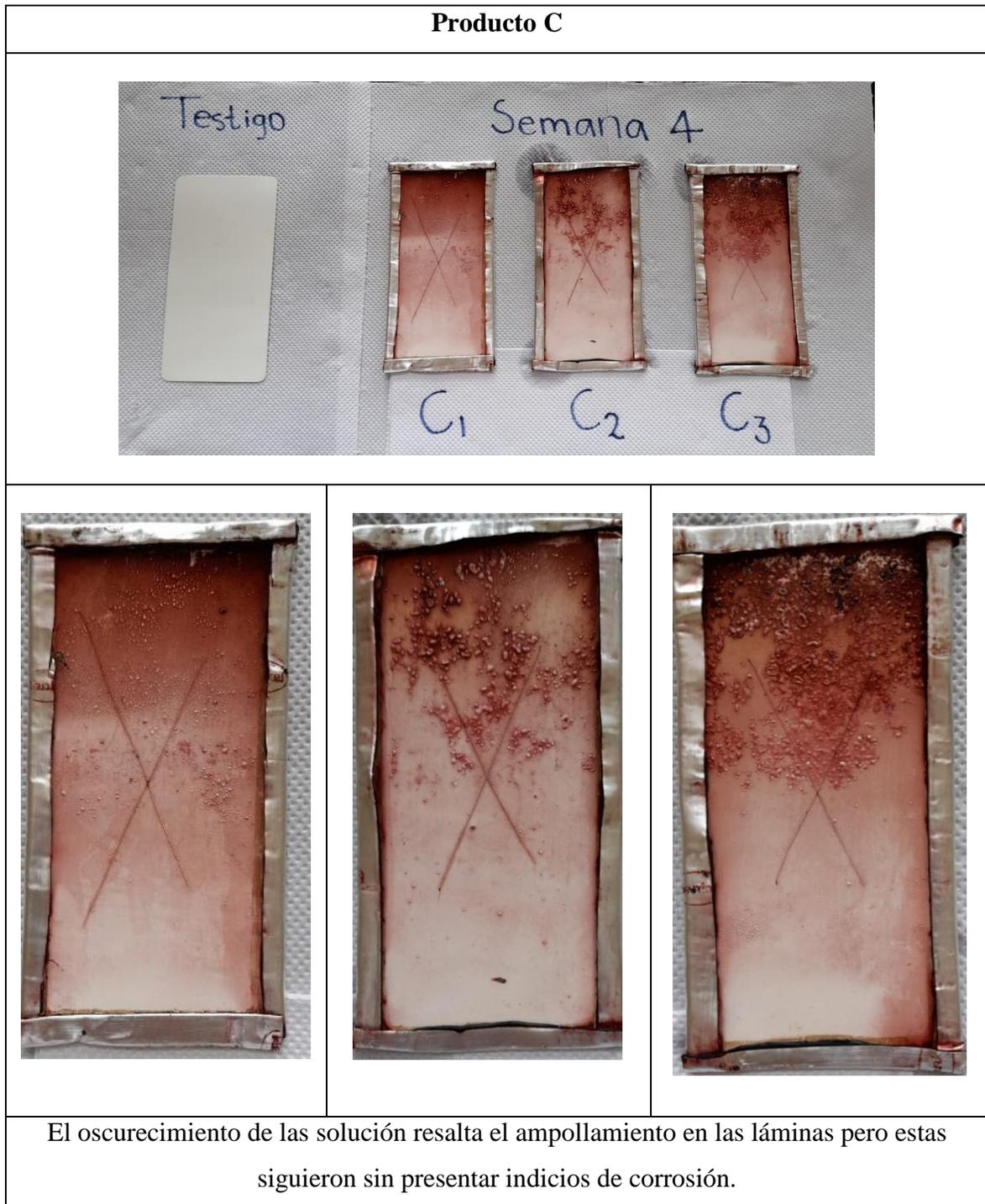
Continua...

Tabla 3-9: Estado de las lámina tras 672 horas de inmersión (continuación).

Producto B		
		
B1	B2	B3
		
No se presentó corrosión, pero la tonalidad de los especímenes es más oscura que en la semana anterior.		

Continua...

Tabla 3-9: Estado de las lámina tras 672 horas de inmersión (continuación).



3.5.5 Quinta visita

Esta visita marcó el final del experimento. Por ello fue indispensable el evaluar el posible grado de corrosión presentado en las láminas. Dicha evaluación se realizó a través de una comparación visual de los especímenes con las normas ASTM D610 y SSPC-VIS 2. El color final de la solución después de sustituir el listón de madera Brasil por un listón de madera de pino se muestra en la figura 3-29.



Figura 3-29: Condición de la solución durante la última evaluación

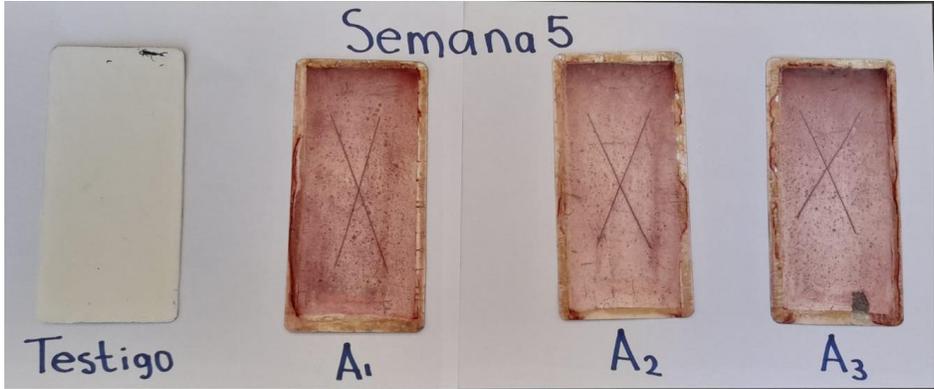
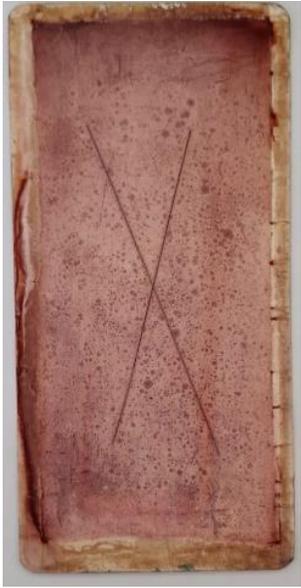
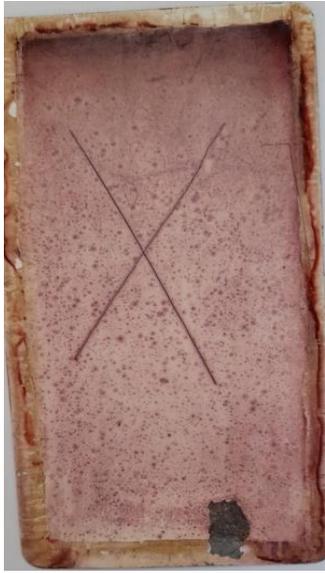
La solución preparada la semana anterior presentaba un poco de coloración grisácea debido al sangrado del pino, pero lo más notable en ella fueron los residuos del pigmento rojo depositados en el fondo del recipiente. Esto se dio debido a que la nueva solución realizó una limpieza en las láminas al eliminar de ellas un poco de la tonalidad que las había impregnado.

Como primer paso en el manejo de los especímenes, se retiró la cinta tapagotas de los bordes de las probetas y luego fueron lavados con agua destilada para eliminar la sal que podría haber quedado estancada en las láminas.

Una vez más se midió el pH de la solución. Su resultado de 6.84 era una disminución con respecto al valor de la semana anterior, lo que pudo deberse a los cambios en la temperatura. El análisis ejecutado con las normas ASTM D610 y SSPC-VIS 2 determinó la ausencia de

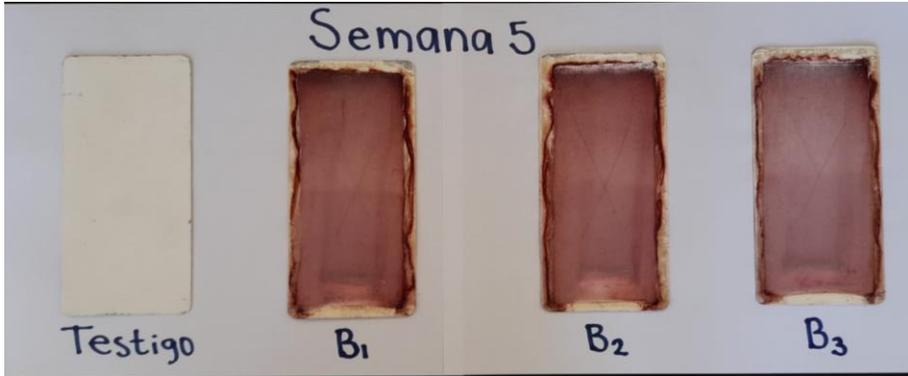
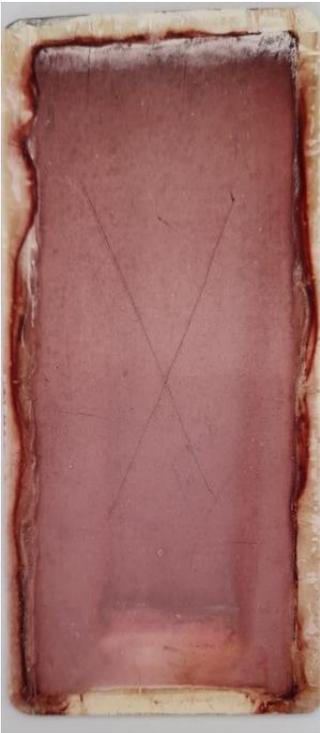
corrosión. La tabla 3-10 nos muestra los resultados obtenidos en las láminas después de 840 horas de inmersión

Tabla 3-10: Estado de las láminas tras 840 horas de inmersión.

Aspecto a las 840 horas de inmersión			
Producto A			
			
A1	A2	A3	
			
<p>No se observan indicios de corrosión en ninguno de los especímenes. El tono rojo generado por los taninos de la madera se mantuvo con la misma intensidad que la semana anterior.</p>			

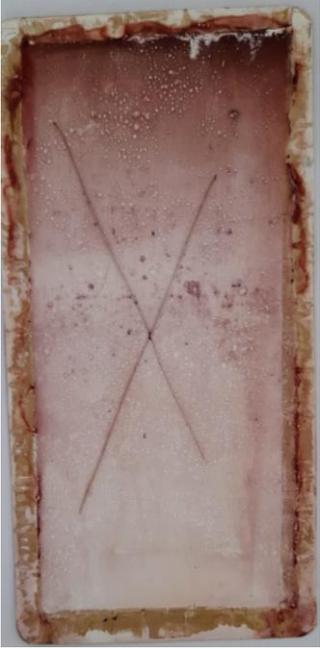
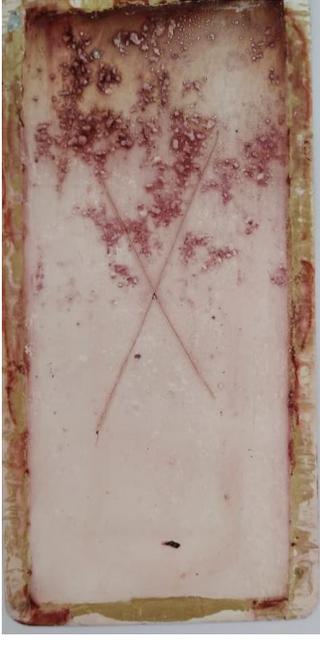
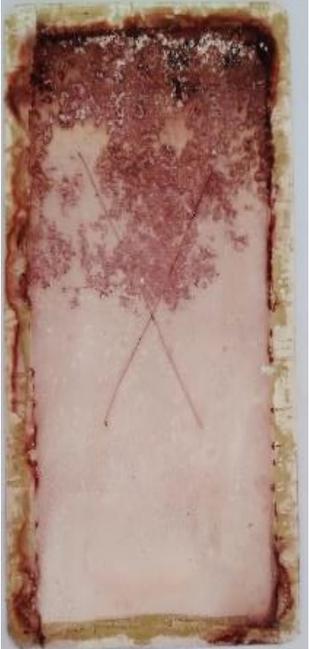
Continua...

Tabla 3-10: Estado de las láminas tras 840 horas de inmersión (continuación).

Producto B		
		
B1	B2	B3
		
<p>No se observa ataque de corrosión, pero si un cambio en el color de las láminas.</p>		

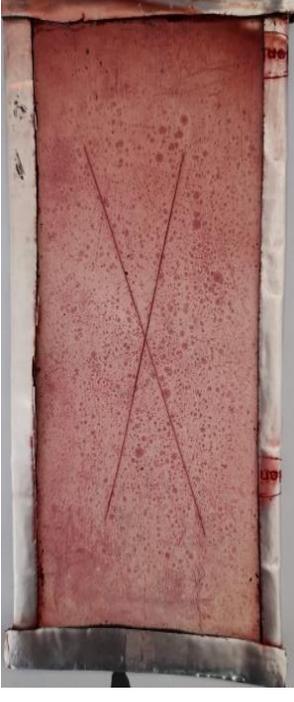
Continua...

Tabla 3-10: Estado de las láminas tras 840 horas de inmersión (continuación).

Producto C			
			
			
<p>El ampollamiento se hizo más evidente debido al color rojo, pero el cambio en solución hizo que un poco de este color se desvaneciera.</p>			

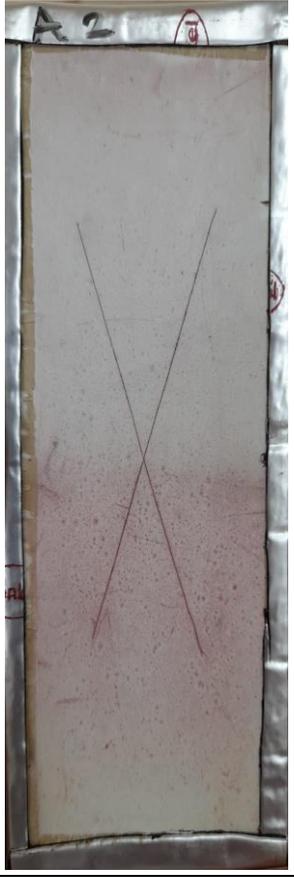
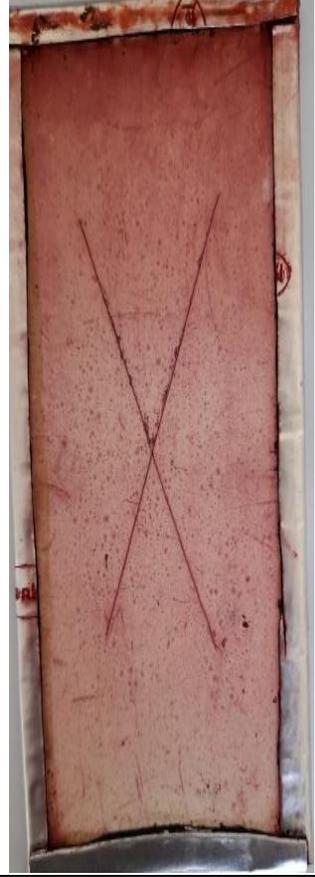
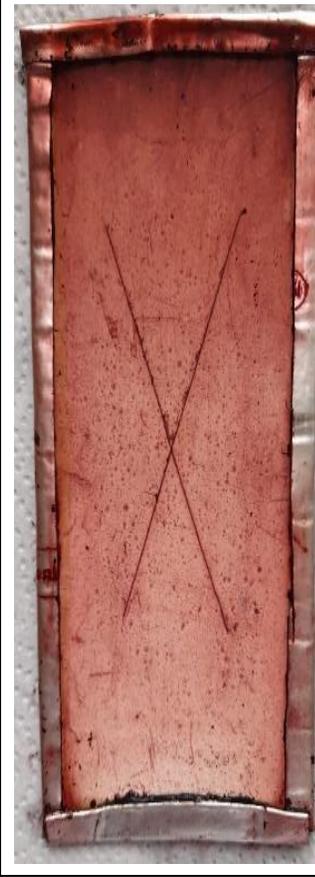
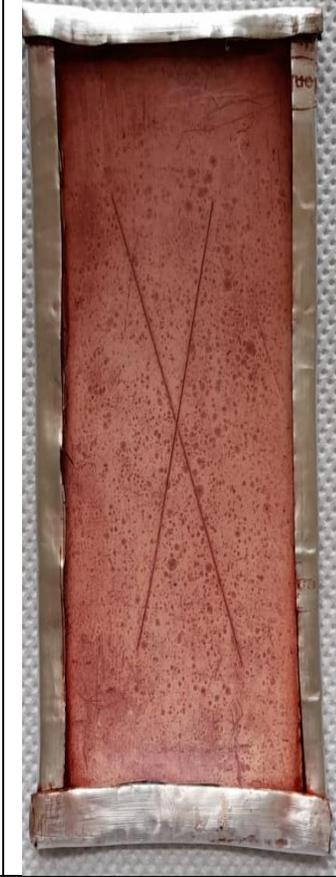
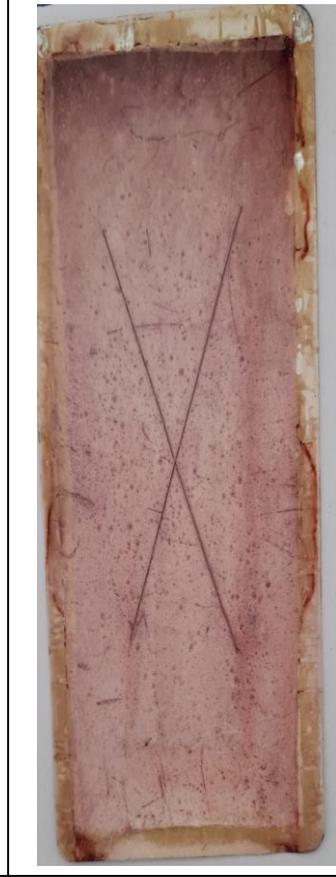
En la tablas 3-11, 3-12 y 3-13 se resumen los cambios presentados en las láminas de acuerdo al producto utilizado.

Tabla 3-11: Resultados para el producto A

Resumen de resultados para el producto A				
A1				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
<p>En esta progresión semanal de la lámina A1 se aprecia como el tono rojo fue tomando una tonalidad más oscura, también se observa como no hay un indicio de corrosión en el material. Los puntos rojos pueden ser resultados de una aplicación deficiente que lamentablemente no fue percibida antes de iniciar las pruebas.</p>				

Continua...

Tabla 3-11: Resultados para el producto A (continuación).

A2				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
En la lámina A2 se dio un proceso similar al presentado por la lámina A1.				

Continua...

Tabla 3-11: Resultados para el producto A (continuación).

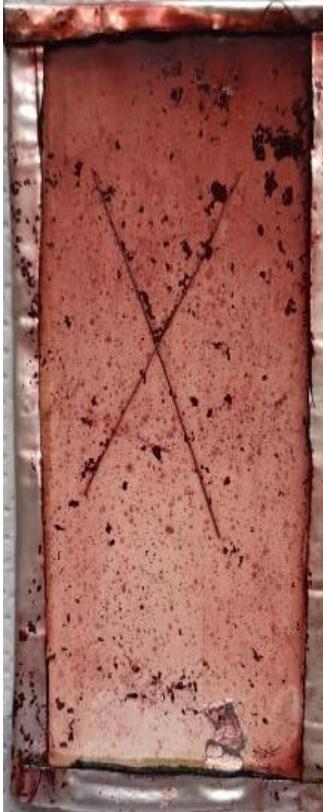
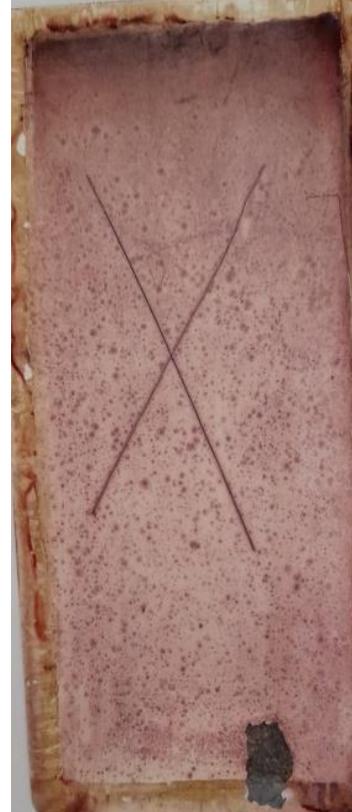
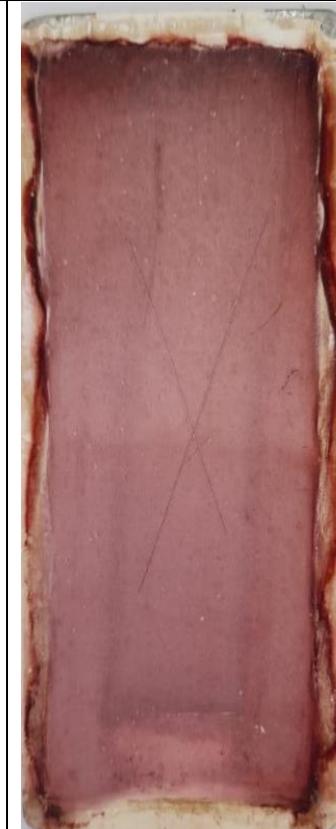
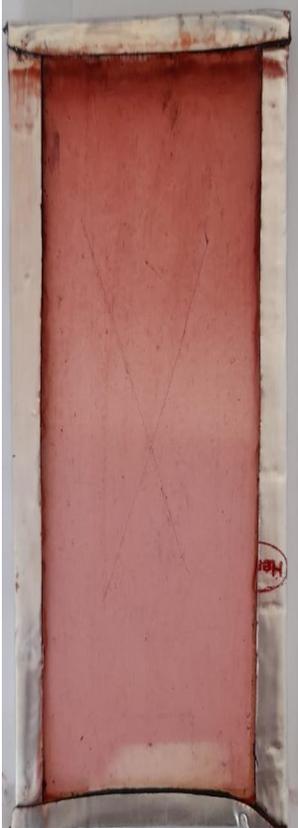
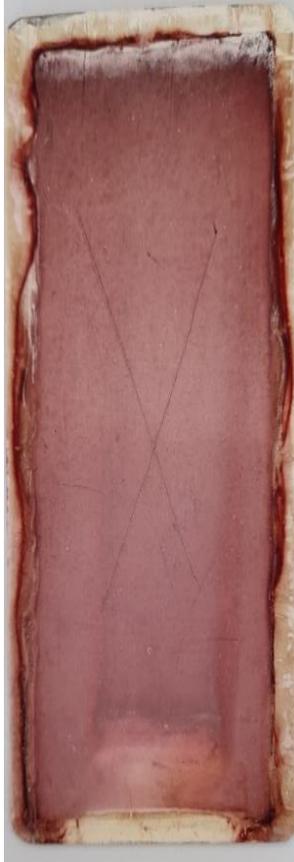
A3				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
<p>Las características de la lámina tres son iguales con sus predecesoras. El fallo del recubrimiento orgánico no se dio debido a un ataque de corrosión, sino más bien a una mala extracción del espécimen del soporte.</p>				

Tabla 3-12: Resultados para el producto B

Resumen de resultados para el producto B				
B1				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
La tonalidad roja que inició en la parte inferior de la muestra, con el paso del tiempo se extendió a toda la superficie.				

Continua...

Tabla 3-12: Resultados para el producto B (continuación).

B2				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
La progresión de la lámina B2 fue similar a la su predecesora.				

Continua...

Tabla 3-12: Resultados para el producto B (continuación).

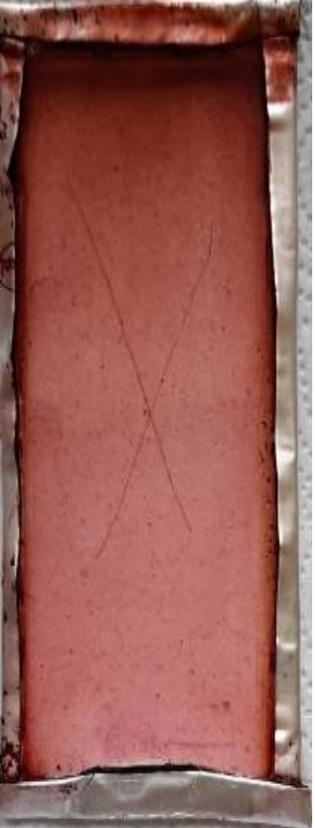
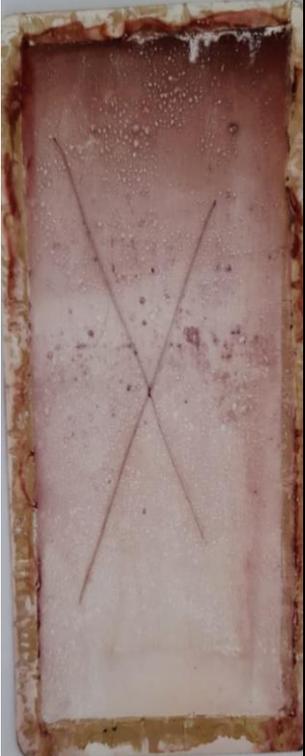
B3				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
<p>En las primeras semanas el color rojizo se presentó en la parte inferior de la lámina, pero gradualmente este fue cubriendo toda la superficie del espécimen.</p>				

Tabla 3-13: Resultados para el producto C

Resumen de resultados para el producto C				
C1				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
<p>Este producto presentó ampollamiento de tamaño 4, tipo medio denso. Su estado parece empeorar conforme el paso de las semanas, pero dicha percepción se debe a el oscurecimiento del color rojo que cubre a las láminas.</p>				

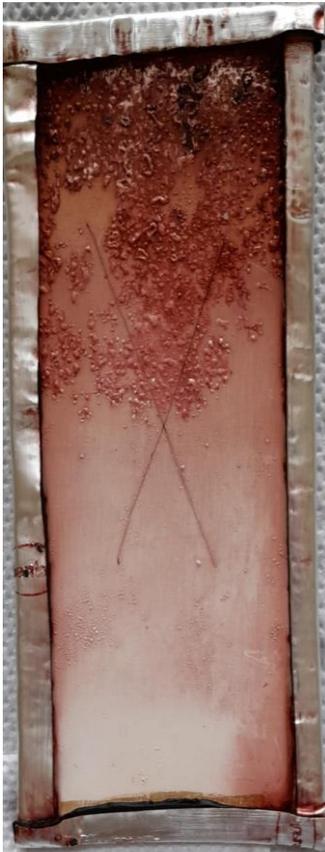
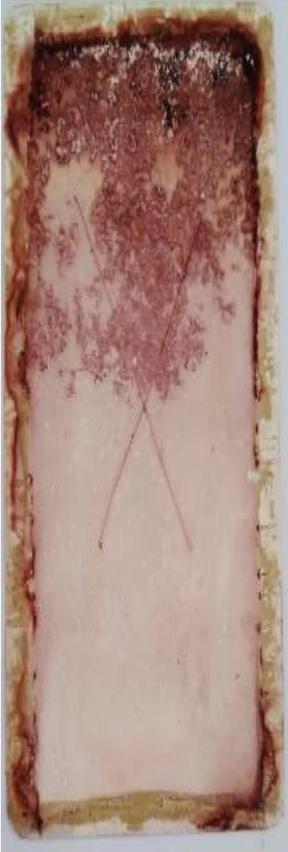
Continua...

Tabla 3-13: Resultados para el producto C (continuación).

C2				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
<p>Esta lámina presentó ampollamiento tipo 2 medio denso. Al igual que el previo espécimen, el color rojo agravó la apariencia de las ampollas.</p>				

Continua...

Tabla 3-13: Resultados para el producto C (continuación).

C3				
Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
				
<p>La lámina presentó ampollamiento tipo 2, denso. También adquirió el tono rojo de los taninos liberados por el primer soporte utilizado.</p>				

En los análisis visuales realizados no se observó ataque corrosivo en los recubrimientos orgánicos usados sobre el acero galvanizado, empero, para descartar por completo la presencia de corrosión en el sustrato mediante la comparación con la norma ASTM D610 y la norma SSPC-VIS 2, se retiró parte de la pintura de las láminas con el fin de observar el estado de la superficie del acero galvanizado.

Con la ayuda de una navaja se trazó un pequeño cuadrado cerca del centro de la lámina donde anteriormente se marcó una “X”. El procedimiento se muestra en la figura 3-30.



Figura 3-30: Área marcada para retirar la pintura aplicada.

Seguidamente, con la navaja se retiró la capa de pintura y se examinó el estado del acero, como se indica en la figura 3-31

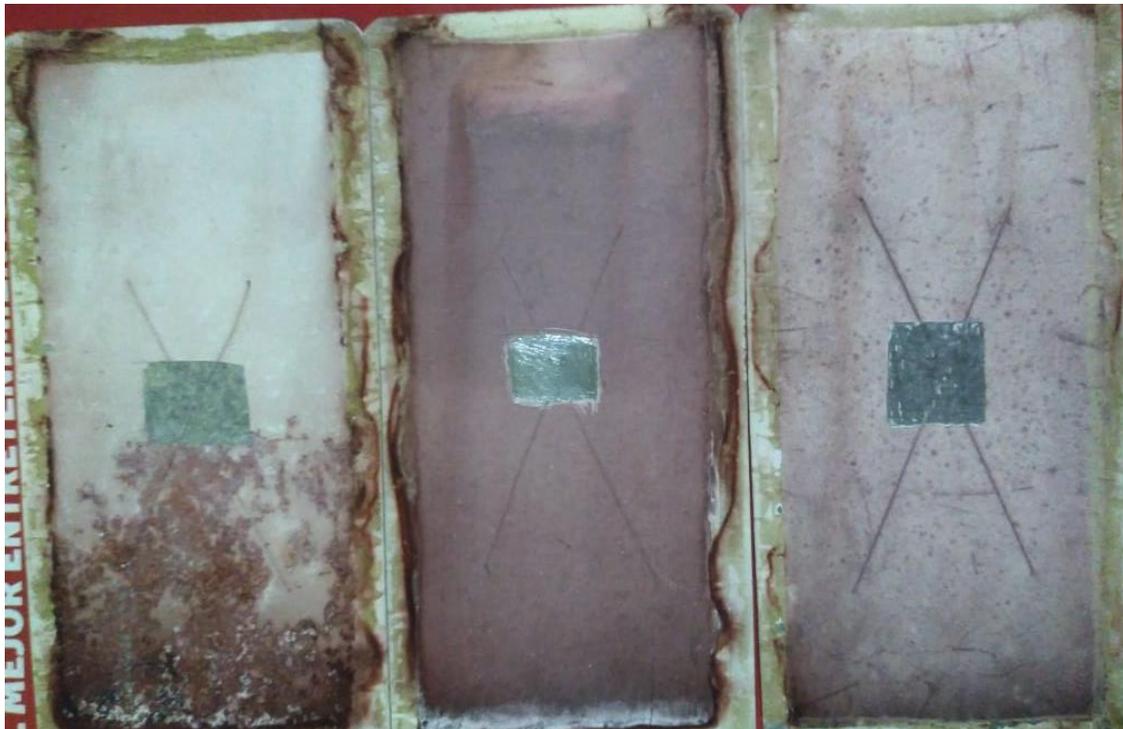


Figura 3-31: Estado del acero tras retirar la capa de pintura.

El procedimiento anteriormente descrito se realizó para las nueve láminas que fueron inmersas en la solución. Como se aprecia en la figura 3-31, después de remover los productos estudiados, el acero no presentó algún indicio de ataque por corrosión.

Por otra parte, es importante mencionar que la facilidad con la que se logró llegar hasta el acero no fue la misma para todos los productos. El producto Corrostyl presentó la mayor dureza, lo que se atribuye a su mayor espesor de película; a este le siguió el producto DTM y en último lugar, por su facilidad de remoción, el producto Acqua 100.

Conclusiones

- I. Las pinturas base agua son una buena opción como recubrimientos, el uso de ellas asegura la disminución de los VOC y además tienen otras ventajas como fácil aplicación, manejo y secado rápido. Su uso como anticorrosivos es un campo relativamente nuevo, por lo que en la actualidad aún no hay punto de comparación en cuanto a los niveles de protección contra la corrosión que ofrecen las pinturas base solventes y estas en escalas industriales. Por esta razón se ha debatido que su formulación se debe a razones medioambientalistas y no funcionales, pero en el futuro podrían, a medida se siga desarrollando su estudio, ser la mejor alternativa como recubrimientos orgánicos anticorrosivos.

- II. Entre los productos evaluados, ninguno presentó ataque de corrosión y aunque todos adquirieron un color rojizo por el desprendimiento de taninos, del soporte de madera Brasil usado en las primera cuatro semanas de la prueba; mediante los exámenes visuales y sensoriales llevados a cabo a lo largo del proceso experimental a los tres productos estudiados; se considera que el mejor producto anticorrosivo base agua es Corrostyl. Este producto no mostró imperfecciones en la película y el espesor de la misma es una capa dura y difícil de remover lo que asegura una buena protección para el acero galvanizado.

- III. Ante el ataque de la corrosión, un recubrimiento de zinc se sacrifica para la protección del metal al que fue aplicado. Sin embargo, esta capacidad de protección es limitada por lo que, al cumplirse ciertas condiciones, como la presencia de químicos abrasivos, el recubrimiento de zinc puede ser debilitado y con esto se originaría el deterioro del metal. Como se sabe, uno de los aspectos más importante de la corrosión es el costo económico que implica su protección y prevención, por lo que un fallo de este tipo conlleva severas consecuencias. Las pinturas por sí solas no presentan tan alta capacidad de protección como el zinc, pero la aplicación de una pintura sobre acero galvanizado, es una excelente alternativa para aumentar su protección anticorrosiva. La combinación de estos dos tipos de recubrimientos es conocida como Dúplex y su

funcionamiento el recubrimiento orgánico funciona como una capa primaria de defensa para el zinc. Por consiguiente, el zinc solo entraría en acción al momento en que la pintura presentase un fallo, esto significa que el acero contaría con dos capas de protección.

- IV. El ampollamiento no es una forma de corrosión, por tanto, los especímenes recubiertos con el producto C solo presentaron una falla en la adherencia al sustrato, lo que produjo el levantamiento de la capa de pintura. Este tipo de falla suele ser ocasionada por la aplicación deficiente del recubrimiento o por un proceso de secado insuficiente. Probablemente la presencia del ampollamiento pudo deberse a una aplicación deficiente de la primera capa de pintura, lo cual pasó desapercibido al aplicarle la segunda capa pues formaron imperfecciones pequeñas que solo fueron visibles hasta observar el cambio en las láminas
- V. Debido a la doble protección contra la corrosión que ofrecen los recubrimientos dúplex, la duración de la prueba pudo haber sido insuficiente para observar un posible ataque de la corrosión en el acero galvanizado.
- VI. Los resultados de esta prueba, como se menciona en la norma ASTM B117, pueden no ser predecibles del comportamiento de ensayos similares ya que pueden variar de acuerdo al tipo de material estudiado y al control que se les dé a las variables del proceso. Conforme a esto, los resultados presentados solo son particulares al estudio llevado a cabo en las condiciones descritas al inicio de este.

Recomendaciones

- I. Revisar detalladamente que el pintado del material se realice en las condiciones sugeridas por los fabricantes, que antes de aplicar el recubrimiento la superficie se encuentre limpia y que, al finalizar la aplicación de la pintura, esta se encuentre completamente uniforme en toda la superficie para evitar fallas como el ampollamiento.
- II. Al seleccionar madera como el material para el soporte de las láminas, es necesario realizar una prueba piloto donde se introduzca un listón de madera dentro de solución salina por una semana, con el fin de observar los posibles cambios de color en la solución que el “sangrado”, proceso natural en la madera, podría generar, con el objetivo de evitar interferencias en la interpretación de los resultados de la investigación.
- III. Monitorear diariamente la temperatura y el pH de la solución ya que son variables que influyen en el proceso de corrosión. En caso de que estos parámetros se encuentren fuera del rango permitido por la norma deben corregirse.}
- IV. Para observar un posible ataque de la corrosión en el material, el tiempo de duración del ensayo puede extenderse más allá de 840 horas, pudiendo ser desde 1000 a 2000 horas.
- V. Durante el desarrollo de la investigación se identificó que, en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, se cuenta con una cámara de niebla salina, por lo que se recomienda realizar la investigación utilizando este equipo.

Bibliografía

- Acesco Acerías de Colombia S.A (2000). Manual técnico del acero galvanizado. Colombia. Recuperado de: <https://n9.cl/ol1ey>
- Agudelo, D. C. (2021, 22 enero). Pinturas arquitectónicas. Inpra Latina - la Zona de Pinturas. México. Recuperado el 26 de octubre de 2021, de: <https://n9.cl/o9znbp>
- Ahmad, Z. (2006). Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control (Illustrated Ed.). Butterworth-Heinemann. Reino Unido. Recuperado de: <https://n9.cl/rbsl2>
- Atsa (2019). Lámina galvanizada de acero. México D.F. Recuperado de: <https://n9.cl/xmigd>
- Calderón, A. M., López, V. E., y Siete, C. E. (2016, noviembre). ESTUDIO COMPARATIVO DE LA APLICACIÓN DE ZEOLITA ACTIVADA Y CARBÓN ACTIVADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA FABRICACIÓN DE PINURAS BASE AGUA (Trabajo de grado). Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad de El Salvador. El Salvador. Recuperado de: <https://n9.cl/vgu74>
- Carbonell, J. C. (2009). Pinturas y recubrimientos (1.^a ed.). Díaz de Santos. México. Recuperado de: <https://n9.cl/l59zx>
- Forms of Corrosion. (s. f.). Higher Logic, LLC. USA. Recuperado el 7 de noviembre de 2021, de: <https://n9.cl/xn7cb>
- Gil, A.S. (2020). PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de: <https://n9.cl/vsfu6>
- Giudice, C. A., & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos: componentes, formulación, manufactura y calidad. (1.^a ed.) [Libro electrónico]. Eductene. Argentina. Recuperado de: <https://n9.cl/jp37n>
- Guerra, H. M. (2021). Pruebas de corrosión y monitoreo [Diapositivas]. El Salvador. Recuperado de: <https://n9.cl/qv2f9>
- Gynsa (2015). Galvanizado, introducción y aplicaciones. Chile. Recuperado de: <https://n9.cl/dy4fb>

- Harsimran, S., Santosh, K., & Rakesh, K. (2021). OVERVIEW OF CORROSION AND ITS CONTROL: A CRITICAL REVIEW. *Proceedings on Engineering Sciences*, 3(1), 14–15. Recuperado de: <https://n9.cl/nzxr5>
- Hill, J. W., & Kolb, D. K. (1999). *Química para el nuevo milenio: Vol. Octava*. Prentice Hall. USA. Recuperado de: <https://n9.cl/gbm81>
- How to Protect Metals from Corroding. (s. f.). Higher Logic, LLC. USA. Recuperado el 9 de noviembre de 2021, de: <https://n9.cl/opz5s>
- Levy, A. V. (1995). Erosion and Erosion-Corrosion of Metals. *CORROSION*, 51(11), 872–883. Libro digital, PDF. USA. Recuperado de: <https://n9.cl/z6ug5>
- McGuckin, S. (2020, publicado el 1 abril). Pinturas a base de agua vs. pinturas a base de solventes. *JC Licht*. USA. Recuperado el 10 de noviembre de 2021, de: <https://n9.cl/vpz7xb>
- Noguera, B. (2021, publicado el 13 de abril). Proceso industrial de fabricación de pinturas. *Ingeniería Química Reviews*. USA. Recuperado el 20 de octubre de 2021, de: <https://n9.cl/uos40>
- Orozco Cruz, R. (2011, 6 mayo). Recubrimientos anticorrosivos [Diapositivas]. México. Recuperado de: <https://n9.cl/lt3aa>
- Palet, A. (2002). *Tratado de pintura. Color, pigmentos y ensayo* (1.^a ed.). Universidad de Barcelona. España. Recuperado de: <https://n9.cl/oga1b>
- Parrilla, P. E. (2011, septiembre). “PINTURAS Y REVESTIMIENTOS” trabajo de grado de la Facultad de Arquitectura de la Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de: <https://n9.cl/0u104>
- Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. (2011). ASTM. USA. Published. Recuperado de: <https://n9.cl/rbodt>
- Protective Coatings for Corrosion Control. (s. f.). Higher Logic, LLC. USA. Recuperado el 9 de noviembre de 2021, de: <https://n9.cl/a2oa4>
- Pruebas de Corrosión y sus normas - Ebook - Metalinspec Laboratorios. (2021, 27 mayo). México. Recuperado de: <https://n9.cl/kw3x9>
- Qué es la pintura al agua y cuáles son sus ventajas. (2019, 21 octubre). *Pinturas Blatem*. España. Recuperado el 9 de noviembre de 2021, de: <https://n9.cl/upggy>
- Ramírez, E. V. (2016). “ESTUDIO PARA LA OBTENCION DE PINTURAS LATEX EN EL LABORATORIO EN LA REGION JUNIN” trabajo de grado para la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú. Recuperado de: <https://n9.cl/hrfj9>

- Schweitzer, P. A. (2010). *Fundamentals of Corrosion*. Taylor & Francis. USA. Recuperado de: <https://n9.cl/0o327>
- Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints. (2009). ASTM, 1–5. USA. Recuperado de: <https://n9.cl/u55fk>
- Tipos de pintura: cuáles son y para qué sirven. (2019, 28 junio). Ideas Mercado Libre. Argentina. Recuperado el 7 de noviembre de 2021, de: <https://n9.cl/f9whi>
- Vásquez, M. (2018) *La corrosión El peor de los villanos cuando dominan los metales*. Recuperado el 28 de septiembre de 2021. (1a ed.) - Mar del Plata: EUDEM. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Mar de la Plata. Argentina. Recuperado de: <https://n9.cl/gkraf>
- Vera, R. M. V., & Cañas, F. J. (2005). *Información Tecnológica-Vol. 16 N°4-2005, págs.: 53–58 MATERIALES Y METALURGIA Comportamiento Frente a la Corrosión en Ambiente Marino de Acero Galvanizado y Acero Galvanizado Pintado (Duplex)*. *Información tecnológica*, 16(4), 53–58. Chile. Recuperado de: <https://n9.cl/trgcv>
- What is Corrosion. (s. f.). Higher Logic, LLC. USA. Recuperado el 7 de noviembre de 2021, de: <https://n9.cl/qz2mk>
- W.M. (s. f.). *Recubrimientos Dúplex*. Autocromes. España. Recuperado el 15 de octubre de 2021, de: <https://n9.cl/eczxs>

ANEXOS

Anexo A: Medición de espesores

Informe de Inspeccion - Espesor de Pelicula Seca

Pruebas de Corrosion ICCI #1/Esmaltes Base Agua

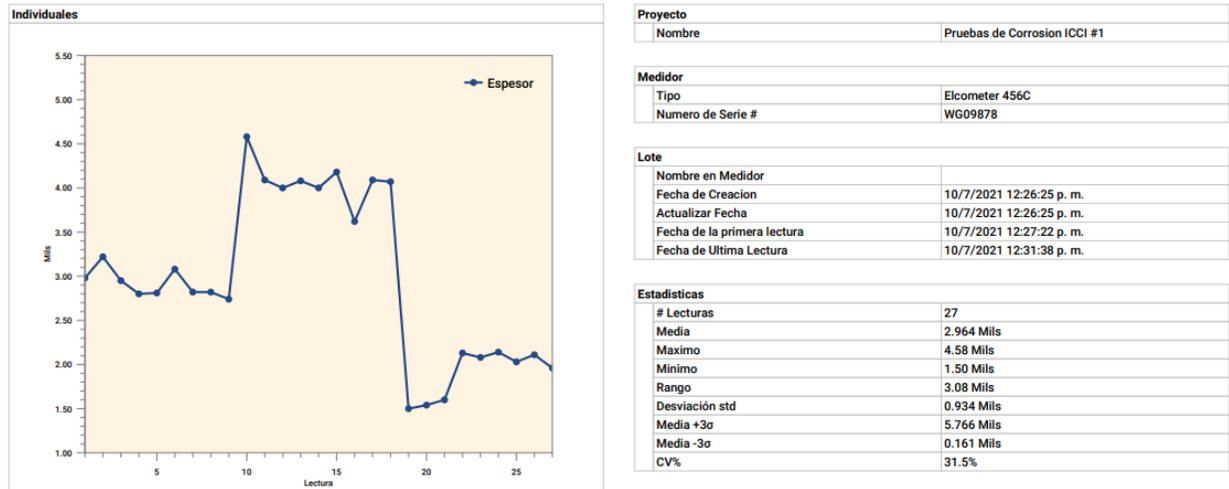


Figura A.1: Resumen de los resultados de medición de espesores de película seca.

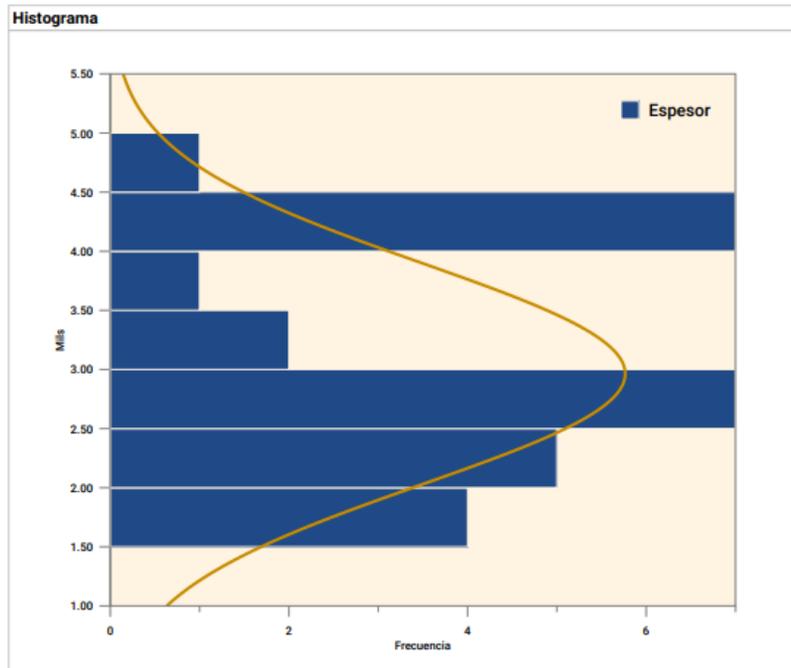


Figura A.2: Histograma de espesores de película seca de los productos analizados.

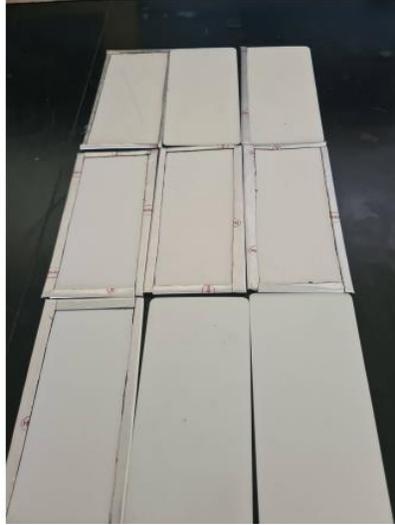


Figura A.3: Láminas preparadas para la medición de su espesor de película seca.



Figura A.4: Medición del espesor de película seca del producto A.



Figura A.5: Medición de espesor de película del producto B.



Figura A.6: Medición del espesor de película del producto C.

Fecha y Hora	#	Espesor (Mils)	Tipo
10/7/2021 12:27:22 p. m.	1	2.98	F1
10/7/2021 12:27:25 p. m.	2	3.22	F1
10/7/2021 12:27:27 p. m.	3	2.95	F1
10/7/2021 12:27:51 p. m.	4	2.80	F1
10/7/2021 12:27:53 p. m.	5	2.81	F1
10/7/2021 12:27:54 p. m.	6	3.08	F1
10/7/2021 12:27:59 p. m.	7	2.82	F1
10/7/2021 12:28:01 p. m.	8	2.82	F1
10/7/2021 12:28:02 p. m.	9	2.74	F1
10/7/2021 12:28:08 p. m.	10	4.58	F1
10/7/2021 12:28:10 p. m.	11	4.09	F1
10/7/2021 12:28:13 p. m.	12	4.00	F1
10/7/2021 12:28:17 p. m.	13	4.08	F1
10/7/2021 12:28:48 p. m.	14	4.00	F1
10/7/2021 12:28:50 p. m.	15	4.18	F1
10/7/2021 12:28:55 p. m.	16	3.62	F1
10/7/2021 12:28:56 p. m.	17	4.09	F1
10/7/2021 12:28:58 p. m.	18	4.07	F1
10/7/2021 12:29:04 p. m.	19	1.50	F1
10/7/2021 12:29:08 p. m.	20	1.54	F1
10/7/2021 12:29:11 p. m.	21	1.60	F1
10/7/2021 12:29:41 p. m.	22	2.13	F1
10/7/2021 12:30:02 p. m.	23	2.08	F1
10/7/2021 12:30:03 p. m.	24	2.14	F1
10/7/2021 12:30:11 p. m.	25	2.03	F1
10/7/2021 12:30:14 p. m.	26	2.11	F1
10/7/2021 12:31:38 p. m.	27	1.96	F1

Figura A.7: Tabulación de los espesores de película seca de las láminas estudiadas.

Anexo B: Ficha técnica del Cloruro de Sodio

Tabla B.1: *Ficha Técnica Cloruro de Sodio.*

DATOS DEL DISTRIBUIDOR	
DISTRIBUIDOR:	R QUIMICA S.A. DE C.V.
DIRECCION:	Prolongación Alameda Juan Pablo II. Pasaje 2, Complejo San Jorge. Bodega No.4, San Salvador.
TELEFONO:	2522-5700
DATOS DEL PRODUCTO	
NOMBRE QUÍMICO:	Cloruro de Sodio
NOMBRE COMERCIAL:	Sal
ORIGEN:	El Salvador
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
Producto conformado por cristales gruesos de color blanco cristalino, homogéneo, inodoro, sabor salino característico, soluble en agua e higroscópico.	
USOS	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Productos químicos. ✓ Vidriado de cerámica. ✓ Metalurgia. ✓ Curado de pieles. ✓ Aguas minerales. ✓ Higiene metal. ✓ Extintor de incendios. ✓ Deshielo de autopistas. ✓ Herbicidas, entre otros. 	
PROPIEDADES	
PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
Aspecto	Sólido granular

Continua...

Tabla B.1: *Ficha Técnica Cloruro de Sodio (continuación)*

Color	Blanco
Olor	Inodoro
% Humedad	Máx. 4.0%
PUREZA	Min 94%
Yodo (I)	36 ppm
pH (5 % sln. acuosa)	7-8
Granulometría:	
Mesh 12	0-15%
Fondo	85-100%
ESTABILIDAD Y ALMACENAMIENTO	
INDICACIONES DE ALMACENAMIENTO:	<p>Debe almacenarse en un ambiente fresco, seco y bajo techo. Los sacos deben mantenerse cerrados. Sobre estibas en bodegas cubiertas y secas, evitando el contacto con cualquier tipo de contaminantes e insalubridad de tal forma que se vea afectada la calidad del producto.</p>
EMBALAJE/PRESENTACIONES	
Saco. Contenido neto de 100 lb.	
PRECAUCIONES	
Evitar el contacto con los ojos.	