

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE CORROSIÓN EN NIEBLA SALINA
SOBRE PLACAS DE ACERO DULCE PINTADAS Y
SECADAS AL HORNO**

PRESENTADO POR:

MILTON ALEXANDER SARAVIA OSORIO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

Ing. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**ESTUDIO DE CORROSIÓN EN NIEBLA SALINA
SOBRE PLACAS DE ACERO DULCE PINTADAS Y
SECADAS AL HORNO**

Presentado por :

MILTON ALEXANDER SARAVIA OSORIO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, julio de 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que me apoyaron incondicionalmente a lo largo de mi carrera. Así, dedico especialmente a mis padres, hermano y demás familias que fueron los que me brindaron el apoyo moral y económico desde un principio, lo cual fue un factor motivacional hacia mi persona para seguir siempre adelante, ya que sin ellos la culminación de mi carrera y este trabajo nunca habría sido posible; por lo tanto, en este trabajo se cumple con el último paso a realizar para cumplir una de mis metas que desde hace años me propuse, la cual era de obtener mi título universitario y así poder convertirme en un profesional integral.

Milton.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo moral y económico, mis padres, hermano y demás familias, los cuales en muchas ocasiones de carencia me brindaron su apoyo incondicional.

A la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por proveer de sus equipos y recursos los cuales hicieron posible que la etapa de ensayos de laboratorio se pudiera realizar con facilidad; sin olvidar a todos sus docentes por brindar de su conocimiento durante toda mi carrera.

También agradecer al Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por cumplir con su papel de asesor de este trabajo de graduación; es decir, tanto por su apoyo, paciencia y dedicación durante la dirección de este trabajo de investigación, como también por brindar sus recomendaciones y opiniones durante todo el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradecer al compañero Franco Esaú Orellana por su ayuda en la etapa de pintado de probetas y el montaje e instalación del equipo de corrosión en niebla salina, lo cual fue de gran ayuda en la etapa de ensayos.

Milton.

ESTUDIO DE CORROSIÓN EN NIEBLA SALINA SOBRE PLACAS DE ACERO DULCE PINTADAS Y SECADAS AL HORNO

Estudiante: Br. Milton Alexander Saravia Osorio¹
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado un estudio de corrosión en niebla salina sobre placas de acero dulce recubiertas con pintura de poliuretano, para ello se prepararon tres sistemas de pintado y secado al horno a temperaturas de 35, 65 y 85 °C con tiempos de secado de 15, 30 y 45 min, para cada uno. Los sistemas de pintado fueron el primero una capa de anticorrosivo, dos capas de base y dos capas de pintura; el segundo dos capas de base y dos capas de pintura; y el tercero una capa de base y una capa de pintura. Se aplicó la norma ASTM B 117 para realizar los ensayos de corrosión en niebla salina. Para el análisis de resultados se aplicó la norma ASTM D 610. Los tiempos de los ensayos de corrosión para los tres sistemas de pintado fueron 120 h para el sistema 1 y de 80 h para los sistemas 2 y 3, de manera interrumpida ensayando cada día 8 h. Los mejores resultados se obtuvieron para el primer sistema de pintado y secada al horno a 65 °C y de 30 a 45 min, lo cual se atribuye al sistema de pintura más completo, lo cual garantiza una mejor impermeabilidad.

Palabras claves: Secada al horno, Corrosión y Niebla salina

1 E-mail: alexsaravia_16@yahoo.com

2 E-mail: jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Definición de corrosión.....	2
1.2. Formas de corrosión.....	3
1.2.1. Corrosión uniforme o general.....	4
1.2.2. Picaduras.....	4
1.2.3. Corrosión por grietas.....	6
1.2.4. Corrosión galvánica.....	8
1.2.5. Corrosión por ambiente agrietador (ec).....	10
1.2.6. Corrosión intergranular.....	13
1.2.7. Corrosión atmosférica.....	14
1.3. Protección contra la corrosión.....	16
1.3.1. Fundamentos sobre las pinturas.....	16
1.3.2. Mecanismos de protección anticorrosiva por pinturas.....	17
1.3.3. Requisitos para la protección anticorrosiva por pinturas.....	18
1.3.4. Deterioración de los sistemas de pintura. Fallos prematuros.....	24
1.4. Reseña histórica del ensayo de niebla salina.....	28
1.5. Resumen de la norma de la astm designación B 117 “Salt spray test”.....	32
2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y PREPARACIÓN DE PROBETAs.....	35
2.1. Dimensionamiento de probetas.....	35
2.2. Maquinado de probetas.....	36
2.3. Preparación de la superficie.....	36
2.4. Proceso de pintado.....	37
2.5. Proceso de secado al horno.....	39
2.6. Medición de espesores.....	41
2.7. Realización de ensayos de corrosión en niebla salina.....	42
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
3.1 Resultados de espesores y su análisis.....	51
3.2 Resumen de la norma de la ASTM designación D 610 y procedimiento de análisis.....	52
3.3 Resultados de corrosión en niebla salina.....	59
3.4. Análisis de resultados.....	74

CONCLUSIONES 81

BIBLIOGRAFÍA..... 83

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Grupos y categorías de tipos de corrosión: Grupo 1) Identificables por inspección visual: corrosión uniforme, picaduras, corrosión por grietas, corrosión galvánica; Grupo 2) Identificable con herramientas especiales de inspección: erosión, cavitación, rozamiento, intergranular; y Grupo 3) exfoliación, aleación, corrosión bajo tensión, corrosión bajo fatiga.....	3
Fig. 1.2. Tipos de picaduras: (a) Estrecho y profundo; (b) poca profundidad; (c) Elíptica; (d) Subsuperficie; (e) Subvaloración; (f) Ataque para el grano horizontal y (g) Ataque para el grano vertical.....	5
Fig. 1.3. Microambiente de corrosión por grieta generada por el desbalance anódico en el material. Arriba se presenta la reacción de acidificación del electrólito.....	7
Fig. 1.4. Representación esquemática del microambiente creado por una corrosión filiforme.....	7
Fig. 1.5. Corrosión galvánica en láminas acopladas con remaches.....	8
Fig. 1.6. Corrosión galvánica presente en La Estatua de la Libertad en New York, USA.....	9
Fig. 1.7. Modos de falla entre los distintos umbrales.....	13
Fig. 1.8. Sensibilización del acero inoxidable en la zona afectada calor (ZAC).....	14
Fig. 1.9. Efecto de la concentración de pigmento en volumen (CPV) en las propiedades de la pintura.....	20
Fig. 1.10. Vida media del recubrimiento de pintura en función del espesor. Pinturas al aceite y alcídicas.....	23
Fig. 1.11. Diversos tipos de fallos prematuros en recubrimientos de pintura: (a) Corrosión filiforme; (b) Ampollamiento; (c) Agrietamiento; (d) Pelado; (e) Arrugamiento y (f) Crecimiento de hongos.....	27
Fig. 2.1. Fig. 2.1. Limpieza de las probetas previo a la etapa de pintado.....	37
Fig. 2.2. Fig. 2.2. Proceso de pintado de probetas: (a) Aplicación de anticorrosivo; (b) Aplicación de base; (c) Proceso de lijado y (d) Aplicación de pinturas...	39
Fig. 2.3. Fig. 2.3. Proceso de secado en el horno.....	40
Fig. 2.4. Fig. 2.4. Instrumento medidor de espesor de recubrimientos REED CM-8822.....	41
Fig. 2.5. Fig. 2.5. Calibración y medición de espesores en probetas.....	41
Fig. 2.6. Fig. 2.6. Lote de probetas preparadas para ensayo de corrosión.....	43
Fig. 2.7. Fig. 2.7. Preparación de la salmuera.....	50
Fig. 2.8. Uso del pH metro.....	50
Fig. 3.1. Ejemplos de porcentaje de área corroída según la norma ASTM designación D 610.....	56

Fig. 3.2. Ejemplos de porcentaje de área corroída según la norma ASTM designación D 610.....	57
Fig. 3.3. Ejemplos de porcentaje de área corroída según la norma ASTM designación D 610.....	58
Fig. 3.4. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 1: probetas secadas en horno a 35 °C a 15, 30 y 45 min.....	60
Fig. 3.5. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 1: probetas secadas en horno a 65 °C a 15, 30 y 45 min.....	61
Fig. 3.6. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 1: probetas secadas en horno a 85 °C a 15, 30 y 45 min.....	61
Fig. 3.7. Resultados de corrosión en probetas correspondientes al ensayo 1, luego de 120 h en cámara de niebla salina de manera interrumpida cada 8 h por día a diferentes temperaturas y tiempos de secado en horno.....	62
Fig. 3.8. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas en horno a 35 °C durante 15, 30 y 45 min.....	64
Fig. 3.9. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas en horno a 65 °C durante 15, 30 y 45 min.....	65
Fig. 3.10. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas en horno a 85 °C durante 15, 30 y 45 min.....	66
Fig. 3.11. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 2: probetas secadas en horno a 35 °C a 15, 30 y 45 min.....	67
Fig. 3.12. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 2: probetas secadas en horno a 65 °C a 15, 30 y 45 min.....	68
Fig. 3.13. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 2: probetas secadas en horno a 85 °C a 15, 30 y 45 min.....	68
Fig. 3.14. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas en horno a 35 °C durante 15, 30 y 45 min.....	70
Fig. 3.15. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas en horno a 65 °C durante 15, 30 y 45 min.....	71
Fig. 3.16. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas en horno a 85 °C durante 15, 30 y 45 min.....	72
Fig. 3.17. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 3: probetas secadas en horno a 35 °C a 15, 30 y 45 min.....	73
Fig. 3.18. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 3: probetas secadas en horno a 65 °C a 15, 30 y 45 min.....	73

Fig. 3.19. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 3: probetas secadas en horno a 85 °C a 15, 30 y 45 min..... 74

Fig. 3.20. Porcentajes de corrosión de cada probeta y comparación entre cada ensayo..... 80

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Serie galvánica de algunos metales y aleaciones comerciales en agua de mar.....	10
Tabla 1.2 Características de fracturas ambientales.....	12
Tabla 1.3 Permeabilidad al vapor de agua de las resinas.....	19
Tabla 1.4 Factor de permeabilidad por los pigmentos, fp	20
Tabla 1.5 Durabilidad del sistema de pintura en función del método seguido para la preparación de la superficie de acero.....	21
Tabla 1.6 Clasificación industrial de productos que requieran la prueba de niebla salina.....	32
Tabla 2.1 Proporciones de las mezclas utilizadas.....	38
Tabla 2.2 Tiempos de secado entre cada etapa de proceso de pintado.....	39
Tabla 2.3 Cantidad de probetas por ensayo según condición de temperatura (T) y tiempo (t).....	40
Tabla 2.4 Hoja de proceso para el uso de la cámara de niebla salina.....	44
Tabla 2.5 Valores de pH de la solución salina utilizada.....	50
Tabla 3.1 Resultados de espesores de recubrimientos medidos en cada ensayo.....	52
Tabla 3.2 Escala y descripción de los diferentes tipos de corrosión según la norma de la ASTM designación D 610.....	55
Tabla 3.3 Porcentajes de corrosión en niebla salina durante 120 h de probetas recubiertas con 1 capa de anticorrosivo, 2 capas de base y 2 capas de pintura.....	60
Tabla 3.4 Porcentajes de corrosión en niebla salina durante 80 h de probetas recubiertas con sin anticorrosivo, 2 capas de base y 2 capas de pintura.....	63
Tabla 3.5 Porcentajes de corrosión en niebla salina durante 80 h de probetas recubiertas con sin anticorrosivo, 1 capa de base y 1 capa de pintura.....	69
Tabla 3.6 Resumen de resultados de cada ensayo.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ASTM: Sociedad Americana de Prueba de Materiales

CAAS: Prueba acelerada de corrosión mediante niebla salina en cobre

CPV: Cantidad de pigmento en volumen

CPVC: Cantidad de pigmento en volumen crítica

EC: Corrosión por un ambiente agrietador (Environmental Cracking)

f_p : Factor de permeabilidad

G.B.P. Base anticorrosiva y de anclaje primario

pH Potencial de hidrogeno, cantidad de iones presentes en una solución acuosa

SCC: Stress Corrosión Cracking (Fractura debido a esfuerzo por corrosión)

S_a Área anódica

S_c Área catódica

SSPC: Sociedad de Protección de Recubrimientos para mayor Estandarización de métodos (Society for Protective Coatings to further standardization of methods)

ZAC: Zona afectada por calor

INTRODUCCIÓN

La corrosión se puede definir como la degradación de un material a causa de la acción del ambiente en que está inmerso. Esta degradación se debe al resultado de las interacciones del material y el ambiente bajo las condiciones de exposición determinadas. Así, entre algunos ejemplos que se pueden citar se tienen: la oxidación del hierro y sus aleaciones a la temperatura ambiente, la oxidación del acero a altas temperaturas, la pérdida de grafito en fundiciones de hierro, el picado de los aceros inoxidable lo que conlleva a pérdida de espesores en los metales, entre otros.

En el estudio de la corrosión no sólo es importante investigar la tendencia a la corrosión de los diferentes materiales en diferentes ambientes, sino estudiar las causas que provocan la corrosión y comprender como es este proceso y en qué forma afecta a los materiales sino la velocidad del proceso, para poder determinar la vida media del material en cada ambiente.

La oxidación de los metales puros y sus aleaciones por reacción química directa del oxígeno se debe a la formación de óxidos estables. En algunos metales, cuando el recubrimiento del óxido es tenaz proporciona mayor protección contra el ambiente. En otros, el recubrimiento tiende a agrietarse y no los protege.

En general existen tres mecanismos de defectos superficiales; los cuales son grieta, corrosión y desgaste, que de manera agrupada o independiente buscan modificar las superficies de los metales bajo diferentes procesos o condiciones, las cuales limitan el tiempo de servicio de los metales.

Existen muchas clases de recubrimientos los cuales buscan proteger las superficies de los metales, no obstante, en este trabajo se enfoca únicamente al tipo de recubrimientos por pinturas.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan definiciones generales sobre corrosión en los metales, naturaleza del mecanismo de ésta, formas en que se produce la corrosión y métodos de cómo retardar dicha corrosión según el tipo de corrosión y el ambiente en que estos se encuentren prestando el servicio para el cual ciertas piezas han sido diseñadas.

Luego se estudiarán una de las formas de protección en las superficies, la cual se trata de protección de recubrimientos por medio de pintura, en la que también será necesario comprender los mecanismos de la protección anticorrosiva por pinturas y las etapas de preparación en las superficies, para lo cual será necesario estudiar los fundamentos sobre las pinturas, los requisitos para obtener un correcto diseño y proceso de pintado sobre superficies metálicas, de modo que estas puedan presentar mayor duración, también se presentan los ejemplos más comunes de daños prematuros sobre superficies metálicas.

Por último, se realiza una introducción al ensayo de corrosión por niebla salina en el cual se presenta una reseña histórica de evolución de dicho ensayo y un resumen de la norma de la ASTM designación B 117.

1.1. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN

Se denomina corrosión al ataque destructivo que sufre un material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con su medio ambiente (atmósfera, suelo, agua, entre otros) [1].

El término corrosión suele referirse normalmente al ataque de los metales, aunque otros materiales no metálicos, como las cerámicos y los polímeros, también pueden ser deteriorados por ataques químicos directos, pero en estos casos suele utilizarse el término degradación [1].

La reacción que se produce en el fenómeno de la corrosión depende de la naturaleza química del entorno y de la concentración efectiva de las especies

reactivas. El efecto de la corrosión es una alteración de las propiedades de los materiales afectados, que puede venir acompañada de una pérdida de material. Esta circunstancia hace aconsejable adoptar ciertas medidas de protección para prevenir sus efectos sobre el material, así como realizar ensayos para obtener información acerca de la evolución de su estado ante un ambiente corrosivo [1].

1.2. FORMAS DE CORROSIÓN

Las diferentes formas de corrosión representan fenómenos categorizados de acuerdo con su apariencia. Se han considerado y dividido las formas básicas de corrosión en tres grupos, sobre la base de la facilidad de su identificación. En la Fig. 1.1 se presenta las categorías usadas y el grupo al cual pertenecen [2].

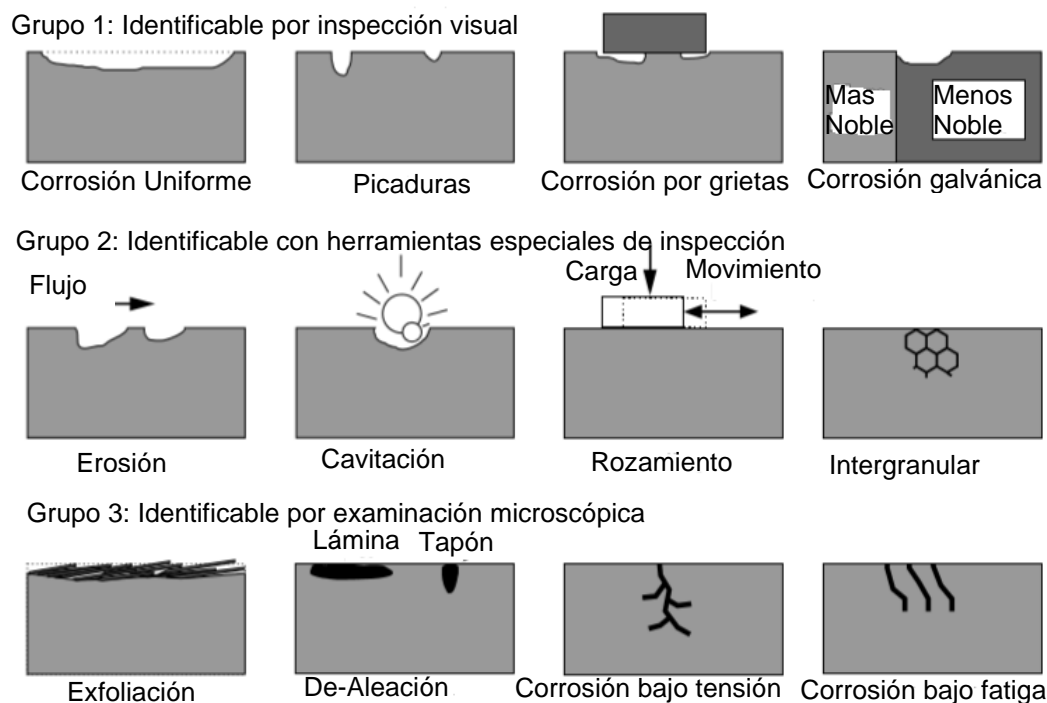


Fig. 1.1. Grupos y categorías de tipos de corrosión: Grupo 1) Identificables por inspección visual: corrosión uniforme, picaduras, corrosión por grietas, corrosión galvánica; Grupo 2) Identificable con herramientas especiales de inspección: erosión, cavitación, rozamiento, intergranular; y Grupo 3) exfoliación, aleación, corrosión bajo tensión, corrosión bajo fatiga.

1.2.1. CORROSIÓN UNIFORME O GENERAL

Está caracterizada por un ataque corrosivo procedente de manera uniforme sobre toda la superficie o una gran fracción del total del área. Generalmente el adelgazamiento sucede hasta producir la falla. Sobre la base del tonelaje perdido, ésta es la forma más importante de corrosión. Sin embargo, la corrosión uniforme es relativamente fácil de medir y predecir, causando fallas desastrosas relativamente raras. En muchos casos sólo es objetable desde el punto de vista de la apariencia. La gran gama de sistemas de revestimientos protectores en estructuras, por lo general son para prevenir esta forma de corrosión [2].

Algunas aleaciones y aceros inoxidables resistentes a la corrosión pueden llegar a ser empañados u oxidados en ambientes corrosivos. Superficies con corrosión pueden indicar desprendimiento en los sistemas de revestimiento protector, sin embargo, deberán ser examinados más de cerca por más ataques posibles de corrosión. Si se permite que continúe la corrosión en la superficie, ésta podría tornarse áspera y se podrían provocar fallos en los componentes [2].

1.2.2. PICADURAS

Es una forma localizada de corrosión en la cual cavidades y agujeros son producidos en el material. El daño por picadura es considerado el más peligroso que la corrosión uniforme porque es más difícil de detectar, predecir y diseñar contra ella los productos para la corrosión a menudo cubre las picaduras. Una picadura pequeña y estrecha con un mínimo de pérdida de metal puede provocar la falla de un sistema ingenieril completo. Por ejemplo, la corrosión por picaduras es el mayor común denominador de todos los tipos de ataques por corrosión localizadas. Se puede asumir diferentes formas como las presentadas en la Fig. 1.2. La corrosión por picaduras puede producir picaduras con la boca abierta (descubierta) o cubierta con una membrana semipermeable de productos de corrosión. Las picaduras

pueden tener una forma hemisférica o de copa. La corrosión por picaduras ocurre cuando áreas discretas del material sufren un ataque rápido mientras la mayoría de la superficie adyacente permanece virtualmente inafectada. Tal localización de los procesos de corrosión anódica y catódica es caracterizada por la relación del área superficial (S_a/S_c) para estos dos procesos. Donde S_a y S_c son las áreas de reacción anódica y catódica. La relación S_a/S_c o el grado de localización pueden ser una importante manera de manejar todos los problemas localizados de corrosión porque una situación de corrosión corresponde igualmente a una corriente absoluta anódica o catódica [2].

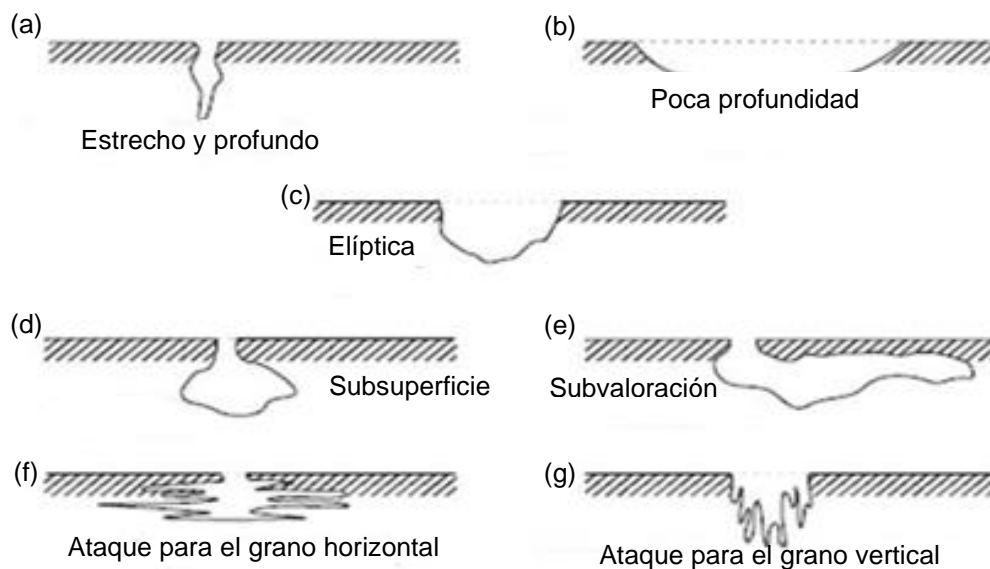


Fig. 1.2. Tipos de picaduras: (a) Estrecho y profundo; (b) poca profundidad; (c) Elíptica; (d) Subsuperficie; (e) Subvaloración; (f) Ataque para el grano horizontal y (g) Ataque para el grano vertical.

Microambientes corrosivos juegan un papel en la iniciación y propagación de las picaduras por corrosión y son complicados de predecir. Aparte de la localizada pérdida de espesor, las picaduras pueden ser perjudiciales cuando son combinadas con esfuerzos en el material. Fatiga y corrosión bajo esfuerzo pueden iniciar o ser la base para la corrosión por picaduras [2].

1.2.3. CORROSIÓN POR GRIETAS

Es una forma localizada de corrosión asociada con una solución estancada de tipo microambiental. Tales microambientes estancados tienden a ocurrir en grietas (blindando áreas) tales como las que se forman en juntas, arandelas, materiales de aislamiento, cabezas de tornillo, depósitos superficiales, revestimientos desprendidos, hilos, articulaciones y abrazaderas. Porque la difusión del oxígeno hacia las grietas está restringida, una celda de aireación diferencial es establecida entre la grieta (microambiente) y la superficie externa (microambiente). La reacción de la reducción catódica del oxígeno no puede ser sostenida en el área de la grieta, dándole un carácter anódico en la celda de concentración. Ese balance anódico puede dar origen a la creación de una condición de ambiente altamente corrosivo en la grieta, que conduce más a la disolución del metal. La formación de un ambiente ácido junto a una alta concentración de iones de cloruro, tal como se presenta en la Fig. 1.3 [2].

La corrosión filiforme está cercanamente relacionada con los ataques en las grietas. Esto ocurre bajo películas protectores como lacas, las cuales son caracterizadas por un rastro de productos de corrosión interconectados. La corrosión activa ocurre en la cabeza del filamento, donde un microambiente corrosivo está establecido, donde el rastro de la cola es en gran medida inactivo, tal como se presenta en la Fig. 1.4, incluso cuando la corrosión filiforme es frecuentemente en gran medida un problema cosmético, la impecable apariencia de un producto puede ser muy importante, un ejemplo de ello es la industria de la comida empacada. El daño por corrosión debido a grietas en las juntas del fuselaje de una aeronave se puede convertido en un problema mayor [2].

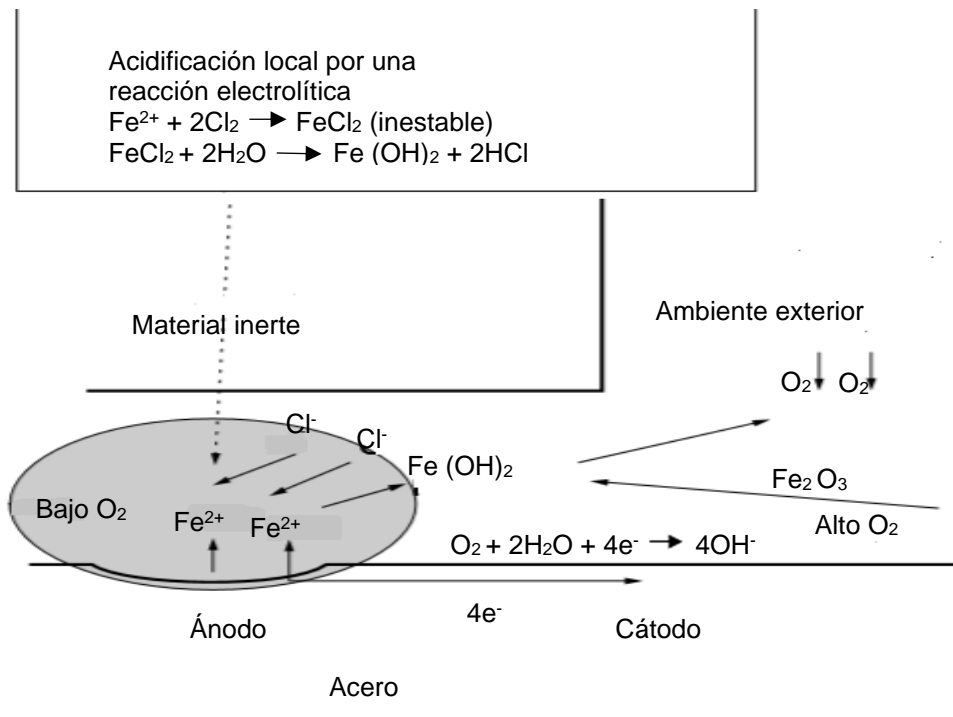


Fig. 1.3. Microambiente de corrosión por grieta generada por el desbalance anódico en el material. Arriba se presenta la reacción de acidificación del electrolito.

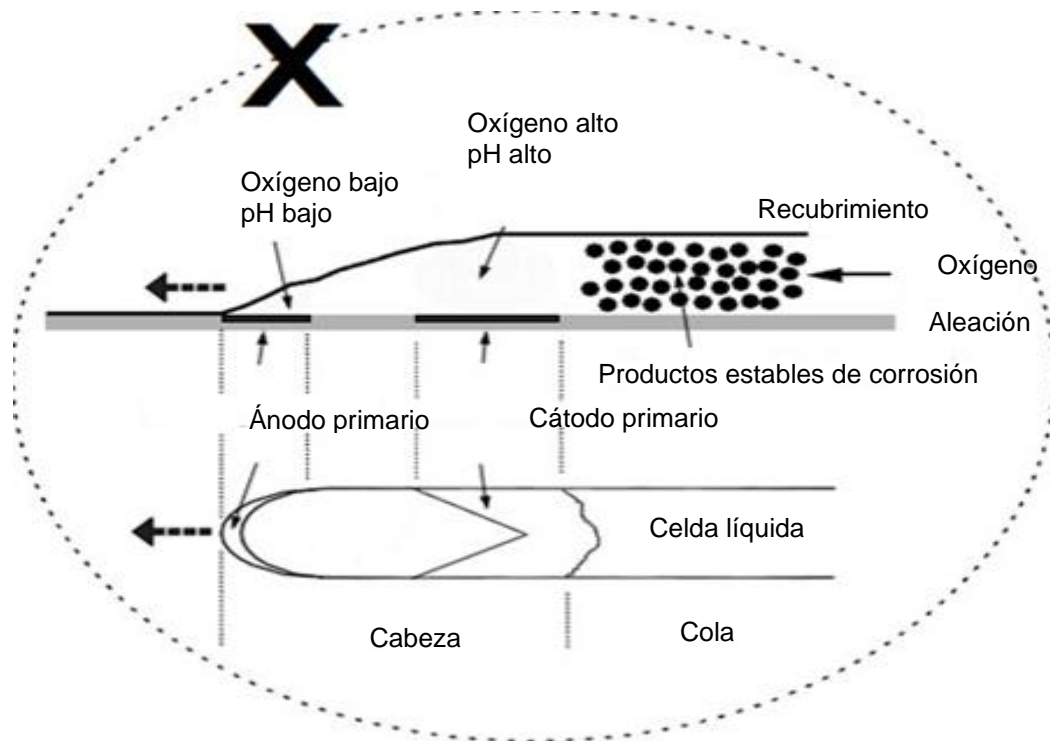


Fig. 1.4. Representación esquemática del microambiente creado por una corrosión filiforme.

1.2.4. CORROSIÓN GALVÁNICA

Ocurre cuando distintos materiales metálicos se ponen en contacto en presencia de un electrólito. Tal daño puede ocurrir entre metales puros, aleaciones y otros materiales conductores como el carbono o el grafito. Una celda de corrosión electroquímica se establece por las diferencias de potencial de corrosión de los diferentes materiales. El material con potencial de corrosión más noble se transforma en el cátodo de la corrosión, el de potencial de corrosión menos noble es consumido por una disolución anódica. La relación de área de los dos materiales distintos es extremadamente importante, si la relación del área de la superficie del ánodo hacia el cátodo (S_a/S_c) es pequeña, la corriente galvánica puede ser concentrada sobre una pequeña área anódica. El grado de corrosión visible como el espesor perdido por tiempo puede llegar a ser muy alta para el ánodo. Un ejemplo de ello son los remaches de aluminio usado en láminas de acero, los remaches se pueden corroer extremadamente rápido tal como se presenta en la Fig. 1.5 [2].

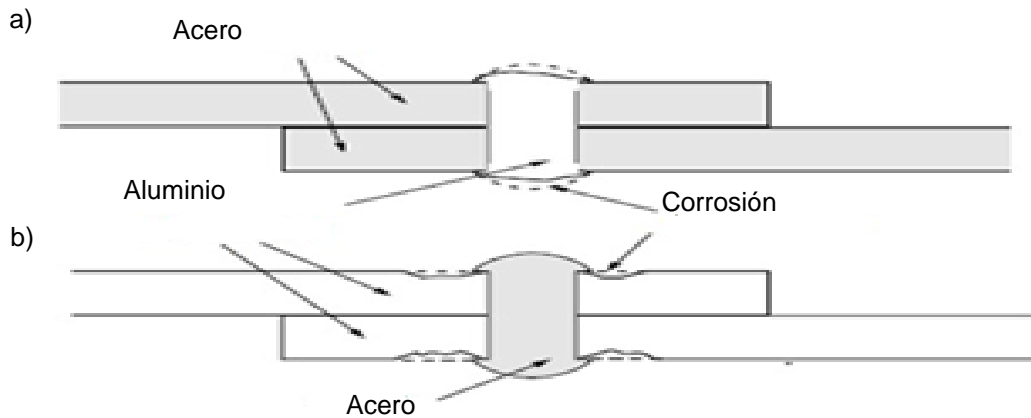


Fig. 1.5. Corrosión galvánica en láminas acopladas con remaches.

Un sitio muy conocido que ha sido objeto de corrosión galvánica severa en la historia es La Estatua de la Libertad de New York, USA, tal como se presenta en la Fig. 1.6 [2].

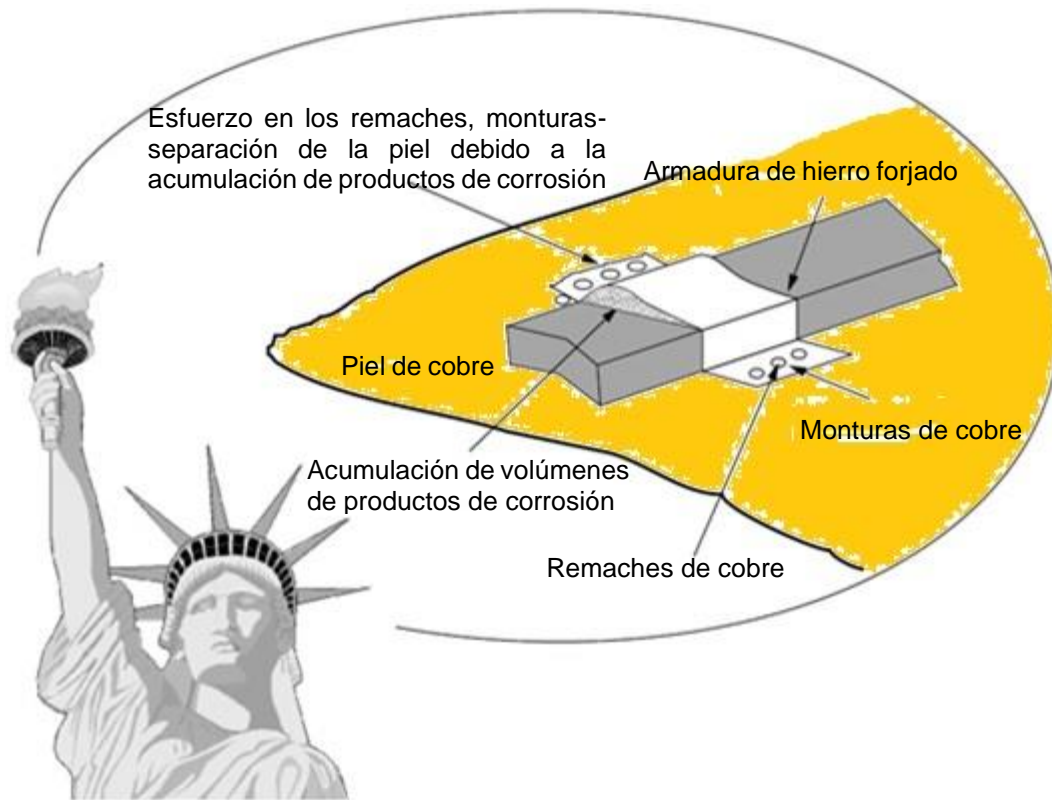



Fig. 1.6. Corrosión galvánica presente en La Estatua de la Libertad en New York, USA.

En la serie galvánica (Tabla 1.1) se presenta los intervalos de nobleza relativa de algunos materiales en agua de mar. La serie no entrega ninguna información del grado del ataque de corrosión. Además, la posición relativa de los materiales puede cambiar en otros ambientes. Es importante destacar que los efectos pueden manifestarse no sólo a nivel macroscópico sino también en la microestructura del material. Fases y precipitados se someterán en una disolución anódica bajo efectos micro galvánicos, la corrosión galvánica aun ocupa un lugar importante en numerosas fallas [2].

Tabla 1.1. Serie galvánica de algunos metales y aleaciones comerciales en agua de mar.

Extremo	Elementos
Catódicos o nobles 	Platino Oro grafito Titanio Plata Clorato 3 Hastelloy C 18 – 8 acero inoxidable al molibdeno (pasivo) 18 – 8 acero inoxidable (pasivo) Acero al cromo > 11 % Cr (pasivo) Inconel (pasivo) Níquel (pasivo) Soldaduras de plata Monel Bronces Cobre Latones Clorato 2 Hastelloy B Inconel (activo) Níquel (activo) Estaño Plomo Soldaduras de plomo estaño 18–8 acero inoxidable de molibdeno (activo) 18 – 8 acero inoxidable (activo) Níquel-resistente Acero al cromo > 11 % Cr (activo) Hierro fundido Acero o hierro Aluminio 2024 Cadmio Aluminio puro comercial Cinc Anódicos o activos Magnesio y sus aleaciones

1.2.5. CORROSIÓN POR AMBIENTE AGRIETADOR (EC)

Es una forma muy localizada de corrosión, ya que ésta sólo se presenta en el inicio de la grieta, la propagación depende del tipo de ambiente. El inicio de

la grieta consume un 90% de la vida del componente. La complejidad intrínseca de las situaciones conduce a diferentes formas de EC, los parámetros que conducen a esta clase de problemas a menudo son descritos en términos cualitativo en la Tabla 1.2, en la cual se presentan factores que contribuyen a una de tres formas de EC, estas son: Agrietamiento debido a corrosión por esfuerzo (SCC), corrosión por fatiga y fragilización por hidrógeno. La SCC es el agrietamiento inducido por una influencia combinada por esfuerzo y un medio corrosivo. El impacto del SCC en un material parece caer entre el agrietamiento seco y el umbral de fatiga de un material (Fig. 1.7). El esfuerzo requerido puede ser aplicado en forma directa o en forma residuales. Deformación en frío o conformado, soldadura, tratamientos térmicos, mecanizado y rectificado pueden introducir esfuerzos residuales. A menudo la magnitud e importancia de algunos esfuerzos residuales son subestimadas. Los esfuerzos residuales creados como resultado de las operaciones de soldadura tienden a acercarse al límite elástico [2].

La acumulación de productos de corrosión en espacios confinados también puede generar esfuerzos significativos y no deberán ser pasadas por alto. La SCC usualmente ocurre en ciertas aleaciones específicas, ambientes y esfuerzos combinados, y fueron observadas en aleaciones de aluminio, usualmente muy dependientes de la orientación de los granos, mayormente en las superficies remanentes que no han sido atacadas, pero con grietas finas penetrando en el material. En la microestructura estas grietas pueden tener una morfología intergranular o transgranular. La fragilización por hidrógeno algunas veces es clasificada separadamente del SCC. Esta se refiere a la fragilización y al consiguiente incremento en el riesgo de agrietamiento debido a la absorción de hidrógeno en la estructura del material. La reducción catódica del agua para formar hidrógeno es una fuente potencial de fragilización [2].

En la práctica materiales usados por su fuerza son los más susceptibles a sufrir problemas de SCC donde algunos elementos del ambiente los vuelven más vulnerables. Tal vulnerabilidad existe para aceros inoxidable cuando iones de cloruro están presentes en el ambiente, incluso a muy bajas concentración.

Desafortunadamente, el término acero inoxidable muchas veces es interpretado literalmente. Ingenieros estructurales necesitan ser prevenidos que los aceros inoxidables no son ciertamente inmunes a los daños por corrosión y pueden ser particularmente susceptibles a daños por corrosión localizados y SCC [2].

Tabla 1.2. Características de fracturas ambientales.

Factor	Corrosión bajo esfuerzo	Corrosión por fatiga	Agrietamiento inducido por hidrógeno
Esfuerzo	Tracción estática	Cíclica + tracción	Tracción
Corrosión Acuosa	Específica a la aleación	Cualquiera	Cualquiera
Incremento de la temperatura	Acelera	Acelera	Menores al ambiente: incrementa
Metal puro	Resistente	Susceptibles	Susceptibles
Morfología de la grieta	Transgranular Intergranular Ramificada	Transgranular Desramificada Despuntada	Desramificada intergranular Transgranular Punta afilada
Productos de corrosión en grietas	Ausentes	Presentes	Ausentes
Aspecto superficial de las grietas	Tipo hendidura	Marcas de playa y/o estrías	Tipo hendidura
Polarización catódica	Suprimida	Suprimida	Acelerada
Cercanía del esfuerzo máximo	Sensible, pero de menor importancia	Acelera	Acelera

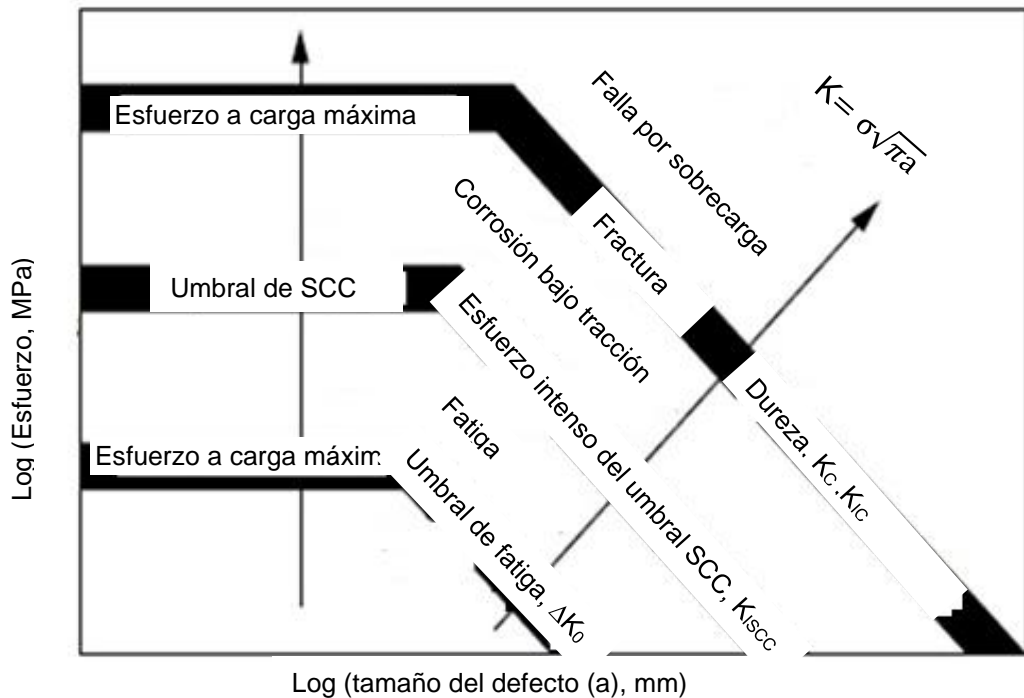


Fig. 1.7. Modos de falla entre los distintos umbrales.

1.2.6. CORROSIÓN INTERGRANULAR

La microestructura de los metales y aleaciones está hecha de granos separados por límites de granos. La corrosión intergranular está localizada atacando los límites de granos o inmediatamente adyacentes a los mismos mientras el resto de los granos o núcleos están inafectados. Esta forma de corrosión es usualmente asociada con efectos de segregación química (las impurezas tienen la tendencia de enriquecer la frontera de grano) o específicamente precipitados en los límites de grano. Dichas precipitaciones pueden producir zonas de reducida resistencia a la corrosión en los granos vecinos más próximos [2].

Un ejemplo clásico es la sensibilización de los aceros inoxidable. En los límites de granos se forman precipitados ricos en cromo conduciendo a una disminución local de cromo inmediatamente adyacente a los precipitados,

dejando estas áreas vulnerables a ataques corrosivos de ciertos electrolitos. Este problema a menudo se manifiesta en las zonas afectadas por el calor de las soldaduras, donde el ciclo térmico de la soldadura produce una estructura sensible, en la Fig. 1.8 se observa este ejemplo [2].

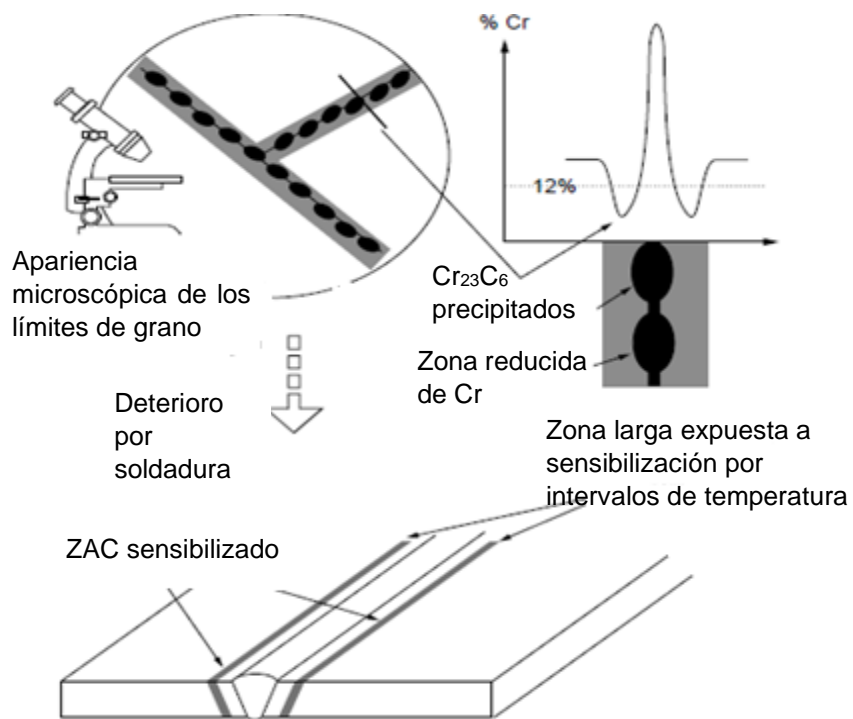


Fig. 1.8. Sensibilización del acero inoxidable en la zona afectada calor (ZAC).

1.2.7. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La corrosión atmosférica puede definirse como la corrosión de los materiales expuestos al aire y sus contaminantes, en lugar de sumergirlos en un líquido. La corrosión atmosférica puede clasificarse aún más en categorías secas, mojadas y húmedas. Este estudio trata solamente de los casos húmedos y mojados, que se asocian respectivamente a la corrosión en presencia de las películas microscópicas del electrolito (o de la humedad) y de las capas visibles del electrolito en la superficie. Las películas mojadas se crean en cierto nivel

crítico de humedad (en gran parte por la adsorción de las moléculas de agua), mientras que las películas mojadas se asocian al rocío, al aerosol del océano, al agua de lluvia, y a otras formas de salpicadura [2].

La severidad de la corrosión atmosférica tiende a variar significativamente entre diferentes ubicaciones e históricamente ha sido habitual clasificar los ambientes como [2]:

- ✓ Rural: Este tipo de atmósfera es generalmente la menos corrosiva y normalmente no contiene contaminantes químicos, pero contiene partículas orgánicas e inorgánicas. Los principales corroyentes son la humedad, el oxígeno y el dióxido de carbono. Los tipos áridos y tropicales son especiales en casos extremos en la categoría rural.
- ✓ Urbana: Este tipo de atmósfera es similar al tipo rural en que existe poca actividad industrial. Los contaminantes adicionales son de la variedad SO_x y NO_x , de las emisiones de combustible de los vehículos y en del sector doméstico.
- ✓ Industrial: Estas atmósferas se asocian a las instalaciones industriales pesadas del proceso y pueden contener concentraciones de dióxido de sulfuro, cloruros, fosfatos y nitratos.
- ✓ Marina: Las partículas finas de cloruro azotadas por el viento que se depositan en las superficies caracterizan este tipo de atmósfera. Las atmósferas marinas son generalmente altamente corrosivas, y la corrosividad tiende a ser perceptiblemente dependiente en la dirección del viento, la velocidad del viento y la distancia de la costa. Cabe señalar que un ambiente equivalentemente corrosivo se crea mediante el uso de sales descongelantes en las carreteras de muchas regiones frías del planeta.

1.3. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

Existen en la actualidad muchas formas de protección contra la corrosión dentro de los cuales se encuentran: granallado, recubrimientos por inmersión en caliente, recubrimientos por electrodeposición, anodizado y recubrimientos con pintura, entre otros. Así, en esta sección se detallará solamente el tipo de recubrimiento por pintura.

1.3.1. FUNDAMENTOS SOBRE LAS PINTURAS

Aunque la formulación es cada día más compleja, la pintura, en su concepción más general, es una mezcla líquida que al ser aplicada sobre una superficie tiene la propiedad de formar una capa continua, producto filmógeno, y de transformarse en película sólida [3].

Se puede considerar que la pintura líquida consta de tres componentes fundamentales [3]:

- ✓ Aglutinante o resina, vehículo no volátil (fase líquida),
- ✓ Disolvente, vehículo volátil (fase líquida), y
- ✓ Pigmento o mezcla de pigmentos (fase sólida).

El componente formador de película o aglutinante, frecuentemente de naturaleza orgánica, decide en gran medida las propiedades básicas, físicas y químicas de la pintura [3].

El proceso de curado, o formación de la película sólida puede obedecer a mecanismos distintos, e incluso a una combinación de ellos. A continuación, se presentan estos principales [3]:

- ✓ Oxidación. La película se forma como resultado de la reacción del aglutinante de la pintura con el oxígeno del aire, polimerización auto-oxidante. Pertenecen a esta categoría las pinturas basadas en aceites secantes o resinas acídicas modificadas con aceite.

- ✓ Evaporación. El formador de película, resina, queda sobre la superficie una vez el disolvente de la película líquida depositada se ha escapado a la atmósfera. Son ejemplos de este mecanismo las lacas nitro celulósicas, vinílicas, acrílicas, derivados del caucho, entre otros.
- ✓ Condensación. El polímero se forma debido a la reacción de dos o más componentes de la pintura, no siendo ninguno de ellos, por sí mismo, formador de película. Las pinturas epoxídicas pertenecen a esta categoría.
- ✓ Coalescencia. La película sólida es el resultado de la coalescencia de partículas dispersas cuando el material dispersante abandona la película líquida. El agente dispersante es usualmente el agua, aunque también puede serlo un disolvente débil. En este contexto, los recubrimientos más comunes son los denominados látex, siendo las emulsiones acrílicas y las vinil-acrílicas los tipos genéricos de mayor utilización.

1.3.2. MECANISMOS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA POR PINTURAS

Los recubrimientos de pintura tratan de impedir, o al menos frenar, el proceso corrosivo del sustrato metálico por alguno, o algunos, de los mecanismos siguientes [3]:

- ✓ Efecto de barrera. La película de pintura limita el acceso a la superficie del metal de las especies químicas presentes en el electrólito, agua, oxígeno, iones, entre otros. Se está actuando sobre el ánodo de la pila de corrosión. En la práctica las películas de pintura no son totalmente permeables al agua y al oxígeno de modo que las reacciones catódica y anódica del proceso de corrosión pueden suceder.
- ✓ Efecto inhibidor. Las películas de pintura pueden contener en su formulación pigmentos inhibidores de la corrosión, de modo que cuando el electrólito difunde a través del recubrimiento hacia el metal y se crean las condiciones propicias para que se verifique el proceso de corrosión aquellas especies

inhibidoras incrementan la polarización de los ánodos y/o cátodos, reduciendo por lo tanto la magnitud del fenómeno corrosivo.

- ✓ Efecto de protección catódica. Ciertas pinturas están formuladas sobre la base de pigmentos metálicos, usualmente cinc, que actúan como ánodo en beneficio del soporte metálico que actúa de cátodo.

1.3.3. REQUISITOS PARA LA PROTECCIÓN ANTICORROSIVA POR PINTURAS

No basta que un recubrimiento de pintura haya sido formulado de tal modo que contenga pigmentos inhibidores de la corrosión, o que pueda actuar incluso suministrando protección catódica al sustrato de acero, para que ese recubrimiento tenga a lo largo de su existencia, altas propiedades protectoras [3].

Se estima que para que un sistema de pintura desarrolle íntegramente las propiedades anticorrosivas para las que fue diseñado se requieren al menos los requisitos siguientes, los cuales son [3]:

- ✓ Formulación:

La formulación del recubrimiento orgánico debe contemplar no solamente el factor resistencia química frente al ambiente en que va a quedar expuesto, sino también el factor resistencia a la corrosión del sustrato metálico sobre el que se va aplicar [3 - 4].

- Permeabilidad

En la mayoría de los casos los revestimientos orgánicos fallan como consecuencia de la penetración de agua, oxígeno, iones, entre otros, a través de la película. Es importante, pues, que la permeabilidad de las películas sólidas de las capas de pintura a estos agentes químicos sea lo más baja posible (Tabla 1.3) [3].

Tabla 1.3. Permeabilidad al vapor de agua de las resinas.

Resina	Constante de permeabilidad ($\times 10^8$)
Fenólica soluble en alcohol	0.1
Cloruro de polivinilo	0.5
Poliestireno	3.5
Acetato de polivinilo	30.0
Acetato de celulosa	114.0

- Pigmentación

La existencia de pigmentos en el recubrimiento orgánico tiene una considerable incidencia sobre sus propiedades protectoras. La adición de pigmentos a la resina que forma la película sólida, además de poder tener efectos inhibidores, o de protección catódica frente a la corrosión del soporte metálico, alarga enormemente el camino a recorrer por un medio agresivo cualquiera para alcanzar la superficie del metal, afectando por lo tanto a la permeabilidad. En el diagrama compilado por Van Loo, Fig. 1.9, se presenta la reducción de la permeabilidad o factor de factor (f_p), en correlación con la cantidad de pigmento en volumen, CPV [3].

Con relación a la pigmentación convendría primeramente definir el término cantidad de pigmento en volumen (CPV); que es simplemente el volumen de pigmento expresado como porcentaje de volumen total del recubrimiento seco [4].

Para cada tipo de resina existe una cantidad de pigmento crítica, CPVC, para la cual la absorción de agua por la película es mínima y, por lo tanto, máximas las propiedades protectoras del revestimiento. En la Tabla 1.4 se presenta el factor de permeabilidad con relación a la que tienen la resina sin pigmento, por lo que se puede evaluar esta propiedad [3 - 4].

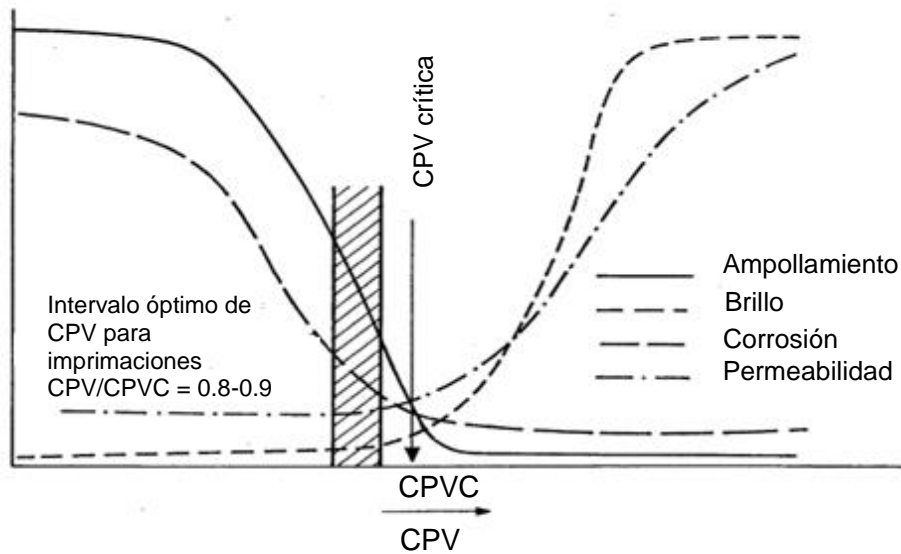


Fig. 1.9. Efecto de la concentración de pigmento en volumen (CPV) en las propiedades de la pintura.

Tabla 1.4. Factor de permeabilidad (f_p) por los pigmentos.

Pigmento	Factor de permeabilidad (f_p)
Tetroxicromato de cinc	0.340
Tetróxido de plomo	0.419
Óxido de cinc	0.428
Sulfato básico de plomo	0.466
Óxido de hierro	0.556
Cromato de cinc (básico)	0.609
Vehículo sin pegamentar	1.000

✓ Diseño del sistema de pintado:

El tipo de pintura, factor de indiscutible importancia, requiere para manifestarse plenamente el cumplimiento de determinados requisitos vinculados a los restantes factores. Así una pintura de gran resistencia química, pero mal aplicada, puede comportarse peor que otra de inferior calidad, y puede, sin embargo, superarla con creces con tal de que se respete exactamente sus especificaciones de aplicación [3].

Así pues, todo diseño de un sistema de pintado debe contemplar aspectos tales como [3]:

- Preparación del substrato metálico, que tiene una incidencia primordial en la adherencia del recubrimiento de pintura;
 - Compatibilidad entre las diferentes pinturas que componen el sistema; y
 - Espesor total de la aplicación.
- ✓ Preparación de superficie:

Con un objetivo final bien definido, el cual es de potenciar la adherencia del recubrimiento a la base metálica, la preparación de superficie tiene los siguientes propósitos [3]:

- Limpieza.
- Eliminación de óxidos.
- Adherencia pintura – sustrato.

En la Tabla 1.5 se resume la durabilidad del sistema de pintura de acuerdo al método de preparación de superficies.

Tabla 1.5. Durabilidad del sistema de pintura en función del método seguido para la preparación de la superficie de acero.

Sistema	Método de preparación de la superficie	Durabilidad, años
2 capas (pintura de óxido de hierro rojo)	Ninguno (cascarilla de laminación intacta)	3
	Envejecimiento a la intemperie y acepillado	1.2
	Decapado	4.6
	Chorroado	6.3
4 capas (2 de óxido de hierro rojo y 2 de plomo rojo)	Ninguno (cascarilla de laminación intacta)	8.2
	Envejecimiento a la intemperie y acepillado	2.3
	Decapado	9.5
	Chorroado	10.4
Pinturas con 170 µm de espesor	Ninguno (cascarilla de laminación intacta)	3
	Pintura transformadora de óxido	0.5
	Descascarillado a mano	4
	Chorroado	9

- ✓ Compatibilidad entre pinturas:

La incompatibilidad entre las diversas capas de pinturas es un defecto fundamental en el diseño de un sistema de pintado. Las posibles incompatibilidades entre recubrimientos de pintura son de distinto tipo, así

como los efectos adversos a que ellas conducen: ampollamientos, arrugas, levantamientos, sangrado, entre otros [3].

Con el fin de evitar posibles problemas de compatibilidad, la experiencia ha demostrado la validez de los puntos siguientes [4]:

- Utilizar combinaciones donde no se conozcan limitaciones de compatibilidad;
- Utilizar pinturas de acabado pertenecientes a la misma familia;
- Procurar que todas las pinturas del esquema provengan del mismo proveedor o fabricante de pinturas; y
- Seguir exactamente las condiciones de aplicación que dicta el fabricante de pinturas que es sin duda el que mejor conoce las particularidades de sus productos.

✓ Espesor del sistema de pintura:

El espesor de un recubrimiento orgánico es el parámetro más íntimamente relacionado con el efecto barrera que poseen las pinturas con relación al ambiente en que están expuestas.

En estudios realizados por diferentes investigadores en que se ensayaron gran número de esquemas de pintura (con diferentes preparaciones de superficie) en diversas atmósferas, se encontraron correlaciones lineales bastante buenas entre duración de la protección y espesor de película, como se presenta en la Fig. 1.10. Resulta por lo tanto evidente la necesidad de superar un cierto espesor crítico para que la protección sea realmente duradera [3 - 4].

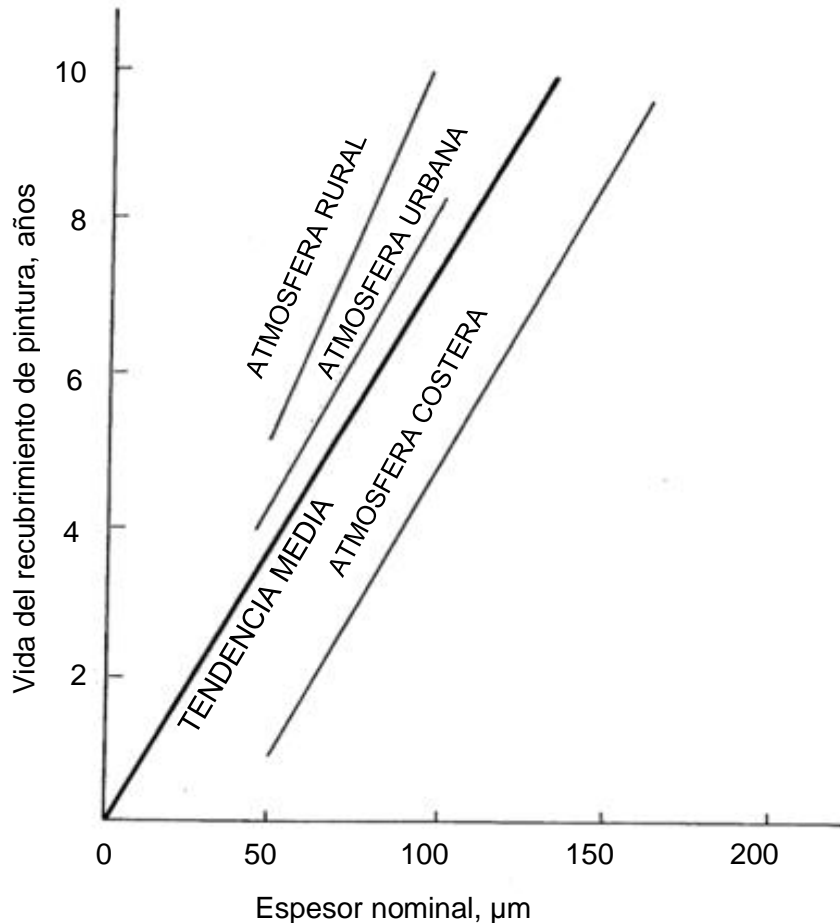


Fig. 1.10. Vida media del recubrimiento de pintura en función del espesor. Pinturas al aceite y alcídicas.

✓ Aplicación del sistema de pintura:

Para una buena planificación de los trabajos de pintado se deberán tener en consideración aspectos tales como: modo de aplicación, condiciones meteorológicas ambientales, composición de la mezcla si se tratase de un recubrimiento de dos componentes, tiempos de secado y curado, espesor óptimo por capa, intervalos de aplicación entre capas, retoques necesarios en determinadas zonas, entre otros [3 - 4].

Un factor de la máxima importancia en aras de la capacidad protectora del esquema de pintura es la continuidad e integridad del recubrimiento aplicado. Es

conocido que en la práctica es extremadamente difícil obtener revestimientos 100% libres de microporos. La aplicación de capas sucesivas de pintura para edificar el sistema completo disminuye notablemente la probabilidad de existencia de los citados microporos [3 - 4].

1.3.4. DETERIORACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PINTURA. FALLOS PREMATUROS

El fallo de un revestimiento de pintura puede definirse como su deterioro prematuro a consecuencia o no de la corrosión del sustrato, y con reducción notable de sus propiedades protectoras [4].

Es obvio que una cuidadosa realización de los trabajos de pintado disminuye la probabilidad de aparición de fallos prematuros. En efecto, la naturaleza de la pintura no es el único factor que determina la vida de servicio del recubrimiento, sino que esta queda fijada por una serie de ellos [4]:

- a) Diseño estructural,
- b) Selección del sistema de pintura,
- c) Preparación de superficie,
- d) Aplicación del recubrimiento, y
- e) Periódicas inspecciones y mantenimientos del revestimiento.

Los cuatro últimos factores han sido ya comentados en mayor o menor extensión a lo largo del capítulo, no así del que hace referencia al diseño estructural y que por su importancia se pasa ahora a analizar [4].

Con frecuencia, los recubrimientos de pintura aplicados a estructuras expuestas a la atmósfera experimentan fallos prematuros, como consecuencia de una falta de análisis de la instalación desde el punto de vista de la protección anticorrosiva. El responsable del diseñador frecuentemente olvida que la estructura una vez montada tendrá que ser protegida con un sistema de pintura y que éste exigirá un mantenimiento periódico a lo largo de la vida de la instalación. Se acostumbra a decir que la lucha contra la corrosión metálica se

inicia en el tablero de dibujo del proyectista de la instalación. A la deterioración de la pintura sigue la corrosión del metal subyacente, por lo que la estabilidad mecánica de una estructura mal diseñada en lo referente a su conservación puede verse seriamente comprometida a causa de la corrosión [4].

Situaciones a considerar para evitar correr el riesgo de deterioros prematuros en sistemas de pintura [4]:

- a) Áreas de difícil acceso para su pintado;
- b) Uniones bimetálicas o pares galvánicos;
- c) Zonas de retención de agua, humedad, polvo, entre otros;
- d) Bordes agudos, salpicaduras de soldadura, en definitiva, zonas especialmente difíciles de proteger por la tendencia de la pintura a fluir, lo que las deja con un espesor de protección insuficiente; y
- e) Soldaduras por puntos, uniones remachadas, uniones atornilladas, entre otros.

La herrumbre, en las superficies pintadas, suele aparecer donde la lluvia, humedad condensada y partículas de polvo son retenidas. Para evitar estos puntos de corrosión, la superficie se debe diseñar de modo que sea tan lisa como sea posible, sin esquinas y bordes agudos, cavidades, resquicios, protuberancias, entre otros [4].

Las uniones entre miembros estructurales se aconsejan realizarlas por soldadura continua. Caso de no poderse evitar la existencia de resquicios, éstos deben ser cubiertos por soldadura o por recubrimientos especiales. El diseño debe permitir la libre circulación de aire por toda la estructura; se aconseja la colocación de orificios de drenaje, superficies horizontales con ligero desnivel para facilitar el movimiento del agua, entre otros [4].

A continuación, se enlistan los principales tipos de fallos prematuros [4]:

- ✓ Corrosión en discontinuidades del recubrimiento, corrosión filiforme (Fig. 1.11a), formación de ampollas de óxido, entre otros.
- ✓ Pérdida de adherencia de la pintura al sustrato metálico o entre capas de pintura.
- ✓ Ampollamiento (Fig. 1.11b).

- ✓ Agrietamiento (Fig. 1.11c), pudiendo ser este ligero, moderado o profundo en el que las grietas alcanzan la superficie metálica.
- ✓ Pelado (Fig. 1.11d), fallo que por lo general viene precedido por algún tipo de agrietamiento.
- ✓ Levantamiento, como consecuencia de los disolventes empleados en la aplicación de una nueva pintura.
- ✓ Arrugamiento, enyesamiento, erosión (Fig. 1.11e), crecimiento de hongos (Fig. 1.11f) sobre la superficie de la pintura, entre otros.

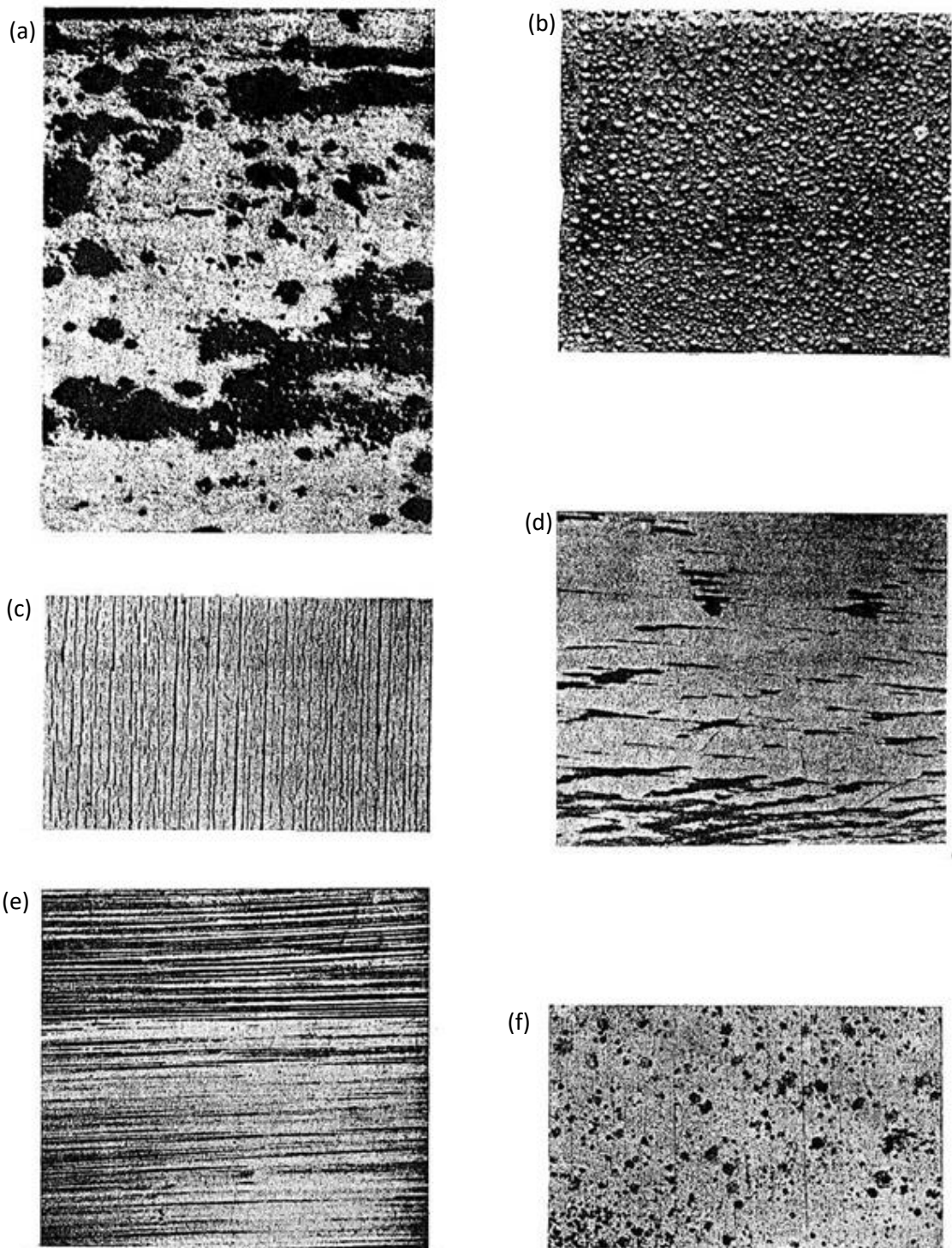


Fig. 1.11. Diversos tipos de fallos prematuros en recubrimientos de pintura: (a) Corrosión filiforme; (b) Ampollamiento; (c) Agrietamiento; (d) Pelado; (e) Arrugamiento y (f) Crecimiento de hongos.

1.4. RESEÑA HISTÓRICA DEL ENSAYO DE NIEBLA SALINA

La corrosión de los metales es un fenómeno que causa grandes pérdidas monetarias anualmente en el mundo. Por eso es común que, para determinar los materiales más rentables a usar en un ambiente corrosivo, los fabricantes rutinariamente prueban materias primas, ensambles parciales, artículos terminados y analicen al azar muestras de producción. La prueba de niebla salina fue inventada en 1914 por el entonces director de la “National Bureau of Standards” el Ingeniero J. A. Capo, quien buscando una prueba que reprodujera los efectos de las condiciones del mundo real, pero de forma acelerada y con variables controladas, se percató que el agua de mar pulverizada corroía más rápido de lo normal, el resultado después de variaciones y modificaciones al ensayo original de niebla salina fue la creación de la norma de la ASTM designación B 117. Durante la década del cuarenta las cámaras para realizar estos ensayos fueron muy empleadas, y se presentaron numerosos problemas. Muchos usuarios decían que la operación de estas cámaras estaba sujeta a la interpretación del usuario y que varios factores críticos no fueron definidos en la norma. Después de la finalización de la primera guerra mundial y el surgimiento de la sociedad de consumo se empezó a demandar una mejor calidad de los productos, extendiéndose el empleo de este tipo de ensayos. Luego de esto la prueba sufrió numerosas correcciones, modificaciones y estandarizaciones hasta que eventualmente en 1955 fue refinada hasta donde era posible [5 - 6].

En muchos artículos, de la década del 50 y la principal discusión se centraba en que los ensayos de niebla salina no eran reproducibles y que los resultados eran inconsistentes. La sociedad americana para ensayos y materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM) y numerosos grupos industriales se dedicaron a trabajar en la solución del problema, pero nuevamente otro inconveniente hizo retroceder la investigación detectándose contradicciones en pruebas realizadas a parachoques y partes recubiertas de cromo, hallando diferencias de 22 a 296 h en presentar corrosión para partes recubiertas de iguales características, esta investigación la realizó un grupo de

científicos australianos. Debido a estos resultados se determinó que la prueba de niebla salina era ineficaz en partes cromadas, haciendo que la idea de la corrosión acelerada fuera nuevamente revisada [5 - 6].

Por ese tiempo una nueva prueba, la Prueba de niebla salina acelerada de cobre (Copper Accelerated Salt Spray Test, CAAS) fue desarrollada y adoptada por la ASTM para ensayos de parte recubiertas con aleaciones de zinc, finalmente se dio como resultado que la prueba de niebla salina no es un ensayo reproducible para este tipo de recubrimientos, debido a que la solución salina empleada no afecta de la misma forma a varias capas del mismo modo. Los recubrimientos de sacrificio como el del zinc son capaces de ser correlacionadas en horas en la prueba de niebla salina, mientras las películas orgánicas permanecen impenetrables durante cientos de horas y fallan desastrosamente poco después de que la barrera superficial es vulnerada. Otros estudios han llegado a la conclusión que la norma de la ASTM designación B 117 no proporciona una prueba buena para los recubrimientos con aleaciones de aluminio o falla en la predicción de los efectos de la composición en recubrimientos de aleaciones de zinc-aluminio sobre el acero rolado en frío. Otra necesidad creciente de ensayos de corrosión fue por parte de la industria automotriz para probar las superficies pintadas de los automóviles [5 - 6].

En la ejecución de las pruebas uno de los problemas reportados fue que cuando un material pintado es evaluado usando la prueba de niebla salina, no existe ninguna exposición a la luz ultravioleta, que es una causa común del deterioro de las pinturas y bases. Esta es una omisión seria, ya que los mecanismos de falla que finalmente hacen que la hoja de acero pintada se deteriore no son típicamente incluidos como condiciones en la prueba de niebla salina. Se podría listar muchos motivos por los cuales no se guarda una relación entre los resultados obtenidos por la prueba de la niebla salina con las condiciones de exposición en condiciones reales. Varios de los inconvenientes más significativos con la prueba son [5 - 6]:

- La superficie de los especímenes de prueba es constantemente mojada, sin pasar por ciclos secos y esto no pasa en el campo.

- La temperatura de la cámara de prueba está a una temperatura elevada y constante (35 °C), que aumenta el agua, el oxígeno y el transporte de iones en comparación con lo ocurrido en el campo.
- El contenido de cloruro es muy alto (5%), impidiendo al zinc formar una película pasiva que es lo que ocurre en el campo.
- Las condiciones de la cámara son condiciones insólitas y severas que raramente ocurren durante la intemperie.

Muchos usuarios debido a mayores exigencias o requerimientos para sus productos o materias primas se han cambiado de la norma de la ASTM designación B 117 a otras normas de ensayos que cumplen con sus características, pero con modificaciones para hacerlas más adecuadas a necesidades específicas. Las pruebas de corrosión cíclicas parecen reflejar el mundo real mucho mejor que la prueba de niebla salina, las investigaciones parecen indicar que la corrosión no puede ser acelerada a una relación mayor de 10:1 sin perder resultados significativos. Esto significa que una prueba de corrosión de 5 años no podría ser hecha en menos de 6 meses [5 - 6].

El desarrollo reciente en el intento de reproducir las verdaderas pruebas mundiales de 6 meses en condiciones de laboratorio ha producido resultados razonables y la investigación sigue el mejoramiento de esta idea. Varios tipos y las condiciones de pruebas de corrosión cíclicas están siendo probados hoy. Las muestras pasan a través de ciclos de caliente/frío, sal/agua y luego son evaluados sus cambios de aspecto y peso para llegar a correlaciones entre tiempo y condiciones de exposición con niveles de corrosión [5 - 6].

A pesar de los innumerables estudios efectuados con otras pruebas y mejoras realizadas al ensayo de niebla salina descrito por la norma de la ASTM designación B 117, los resultados obtenidos siguen arrojando datos muy claros de gran ayuda al sector industrial y científico determinado de cierta forma el comportamiento de los metales en atmósferas corrosivas o en su ambiente de servicio lográndose de una manera rápida y aproximada cuantificar su resistencia a la falla frente al fenómeno de la corrosión. En el desarrollo científico de la

prueba de niebla salina se ha logrado identificar claramente las aplicaciones para las cuales se puede emplear con resultados satisfactorios y confiables, así como áreas en las cuales este ensayo no es aplicable. La calidad y la reproducibilidad de las pruebas de niebla salina dependen directamente de un respeto riguroso de los parámetros de ensayo, descritos en particular por la norma de la ASTM designación B 117. El ensayo de niebla salina según el estándar ASTM B 117 se puede emplear [5 - 6]:

- Si un producto o espécimen de prueba requiere pasar una cierta especificación.
- Si se desea aumentar su credibilidad teniendo los resultados de la prueba.
- Si se requiere comprender como se comporta el producto en un ambiente corrosivo.
- Si se requiere probar distintos tipos o espesores de recubrimiento para seleccionar el más adecuado para una aplicación.
- Si se requiere medir la resistencia a la corrosión relativa de materiales estrechamente relacionados.
- Para calificación de proceso y aceptación de calidad.
- Porque es aplicable a metales/aleaciones y sus recubrimientos.
- Si se requiere proveer un ambiente corrosivo controlado que representa el tipo de condiciones atmosféricas salinas aceleradas.
- La reproducibilidad de resultados puede ser afectada por el tipo de espécimen, por detalles en la condición de superficie circundante del espécimen, criterios de evaluación, variables de operaciones y el tipo de la cámara de prueba.
- La correlación de los resultados de la prueba con el desempeño en servicio, sólo puede ser considerada si es apoyado por resultados de exposiciones atmosféricas en condiciones de servicio a largo plazo.
- Los resultados de resistencia a la corrosión de niebla salina tienden a diferir de la resistencia a otros medios, y para ellos se diseñan pruebas alternativas.

En la Tabla 1.6 se presenta la clasificación de los materiales o productos que requieren del ensayo de niebla salina:

Tabla 1.6. Clasificación industrial de productos que requieran la prueba de niebla salina.

Materiales y/o superficies	Productos o elementos que requieren la prueba de niebla salina
Materiales arquitectónicos	Pinturas interiores, exteriores y barnices Acabados orgánicos e inorgánicos Materiales de construcción.
Acabados de materiales automotores	Pinturas y barnices
Acabados de materiales de transporte	Acabados brillantes
Superficies resistentes a la corrosión	Capas protectoras y revestimientos Acabados plateados y pintados
Materiales aeroespaciales/ militares	Pinturas y capas Materiales de construcción Herramientas y componentes
Recubrimientos de materiales marítimos	Pinturas y recubrimientos Acabados galvanizados
Sistema eléctrico, electrónicos y competencia	Motores interruptores y relés Transformadores y suministros de energía

1.5. RESUMEN DE LA NORMA DE LA ASTM DESIGNACIÓN B 117 “SALT SPRAY TEST”

En la norma de la ASTM designación B 117 se describen las partes, procedimientos y condiciones requeridas para crear y mantener un ambiente de niebla salina. Por consiguiente, no prescribe el tipo de espécimen de prueba o períodos de exposición a ser usados para un producto específico, ni la interpretación que se le daría a los resultados. A continuación, se presentan los parámetros principales que exige la norma para la construcción del equipo [7]:

- El aparato requerido para la exposición de la niebla salina consiste en una cámara sellada que contenga la niebla, un contenedor para almacenar la solución salina, un suministro de aire comprimido apropiadamente acondicionado (libre de aceite y partículas), uno o varios inyectores que

atomizan la solución salina, apoyos para los especímenes de prueba, elementos calefactores para la cámara y medios necesarios para el control de la temperatura.

- No se permite que el condensado formado en la superficie de la tapa de la cámara caiga sobre los especímenes de prueba.
- Las gotas de la solución será tal que no sea afectado por la niebla corrosiva.
- Toda el agua usada para la práctica deberá cumplir con el tipo IV de agua según la norma de la ASTM designación D 1193. Este no se aplica al agua corriente de chorro.
- A menos que se especifique lo contrario, los especímenes fueron apoyados o suspendidos entre 15 y 30° de la vertical y preferentemente paralela a la dirección principal del flujo de la niebla en la cámara, basada sobre la superficie dominante que será probada.
- Los especímenes no se pondrán en contacto el uno con el otro o ni con otro material metálico ni con cualquier otro material capaz de actuar como un filtro.
- Cada espécimen será colocado para permitir la circulación libre de la niebla sobre todos los especímenes.
- La solución salina de un espécimen no debe gotear sobre los otros especímenes.
- El abastecimiento de aire comprimido al inyector o inyectores para atomizar la solución salina deberá estar libre de aceite y suciedad y deberá ser mantenida entre 69 y 172 kPa (10 y 25 psi).
- La temperatura en la zona de exposición de la cámara de niebla salina será mantenida a 35 °C con una tolerancia de +1.1 o -1.7 °C (95 °F, +2 o -3 °F). El valor de la temperatura se debe poder ver sin que la cámara sea abierta, para evitar falsas lecturas.
- Se deben colocar al menos dos colectores de niebla limpia dentro de la zona de exposición de tal forma que no caigan gotas de los especímenes o de otra fuente. Los colectores deben ser colocados en la proximidad de los especímenes de prueba, uno cercano a cualquier inyector y otro más

apartado de los inyectores, la niebla deberá ser tal que para cada 80 cm² de área de recolección horizontal será colectado en cada uno de 1 a 2 ml de la solución por hora basada en un promedio de funcionamiento de la cámara de al menos 16 h. La concentración de cloruro de sodio de la solución colectada será 5 + 1% de peso. El pH de la solución colectada será de 6.5 a 7.2.

- El inyector o los inyectores deben ser dirigidos de tal manera que la niebla sea dispersa de forma que ninguna partícula pulverizada impregne directamente a los especímenes de prueba.
- Se debe cuidar que en la línea de solución que alimenta las boquillas, tengan filtros adecuados para evitar que se obstruyan.
- La cámara debe estar construida de forma que durante las pruebas permanezca sellada, para que no se afecten otros equipos y/o muebles con la niebla.
- El flujo de aire hacia las boquillas debe permanecer constante durante toda la prueba programada, a excepción de interrupciones cortas esporádicas para inspeccionar, reajustar o quitar especímenes de prueba, comprobar y rellenar la solución en el embalse.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

En este capítulo se explica el procedimiento de preparación de probetas a ensayar y la cantidad de probetas por ensayo de corrosión; se explicará el procedimiento de preparación de la superficie a ensayar desde la respectiva limpieza hasta el proceso de pintado y secado en horno de las mismas, se definen diferentes tiempos y temperaturas de secado; también se explica la realización de los ensayos de niebla salina que comprende el uso correcto de la máquina de niebla salina y el procedimiento de ensayo bajo la norma de la ASTM designación B 117. También, se incluye en este capítulo el proceso para realizar las mediciones de los espesores de pintura y se realiza una breve descripción del equipo medidor de espesores de recubrimientos que se utilizó, además de la calibración y electrodo utilizado en el proceso de medición.

2.1. DIMENSIONAMIENTO DE PROBETAS

No existe una norma estándar que regularice las dimensiones y el tamaño de las probetas ya que el tamaño y la forma varían de acuerdo a la finalidad de la prueba, la naturaleza del material el equipo que se utilice, aunque se recomienda que exista una relación grande de superficie a masa y una relación pequeña de área del borde con respecto al área total. Así mismo de acuerdo a la norma de la ASTM designación B 117 el número y tipo de probetas/especímenes a utilizar queda a criterio de la persona que realiza los ensayos [7].

Por lo tanto, se utilizaron probetas de hierro con las dimensiones:

- 10 cm de largo,
- 5.08 cm (2 pulg) de ancho y
- 0.48 cm (3/16 pulg) de espesor.

2.2. MAQUINADO DE PROBETAS

Para obtener las probetas con las dimensiones requeridas fue necesario seguir un procedimiento de cortado de una pletina:

- Se cortaron las probetas a partir de una pletina de 5.08 cm (2 pulg) de ancho con 4.8 mm (3/16 pulg) de espesor y 6 metros.
- Se utilizó una guillotina ubicada en la Taller Metal Mecánica de esta Escuela para cortar todas las probetas, de tal forma que todas tengan las mismas dimensiones.

2.3. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Cuando se realizan pruebas de corrosión para predecir el comportamiento de un metal o un recubrimiento en un determinado ambiente, la superficie de las probetas debe ser semejante a las usadas en los procesos o servicios, asimismo es muy importante que las probetas no presenten raspaduras ya que esos sitios son objetivo de ataques preferenciales cuando se hacen los ensayos de laboratorio. Por lo que es muy importante que antes de realizar un ensayo de niebla salina, se asegure que la superficie de las probetas sea la ideal realizando tratamientos de limpieza como: un tratamiento químico, limpieza electrolítica o con lija áspera en el caso de los metales de modo que se homogenice la superficie de las muestras [8].

En este trabajo por ser un recubrimiento no metálico (pinturas) se deberá realizar un tratamiento de limpieza no agresivo, antes de realizar el proceso de pintado, como la eliminación de óxido e impurezas con la ayuda de una lija de SiC de agua número 320 y posteriormente limpiar con paños húmedos con una mezcla de agua y alcohol o solvente mineral, con el fin de eliminar las impurezas y grasas obtenidas durante el proceso de maquinado de las probetas [8]. En la Fig. 2.1 se presenta la limpieza de probetas previo a la etapa de pintado.



Fig. 2.1. Limpieza de las probetas previo a la etapa de pintado.

2.4. PROCESO DE PINTADO

Para el proceso de pintado de las probetas se utilizó en conjunto un sistema de pintura de poliuretano monocapa, la pintura monocapa es aquella que sólo se necesita aplicar la pintura sin necesidad de que se tenga que añadir ningún otro producto posteriormente, consiguiendo así aplicar el color, el acabado y la dureza necesarios, en un sólo paso [9].

El sistema que se empleó en este trabajo consta de tres mezclas las cuales se deben preparar con las proporciones respectivas tal como lo cita el fabricante de pinturas; por lo tanto, se deben respetar los tiempos y cantidades de preparación de las mezclas. Las mezclas a preparar son: anticorrosivo GBP, base para pintura o pintura directamente. En la Tabla 2.1 se define las

proporciones de base, reductor y catalizador para cada una de las tres mezclas, las cuales han sido tomadas por recomendaciones de los fabricantes de dichos sistemas de pintura [9].

Tabla 2.1. Proporciones de las mezclas utilizadas.

Mezclas de componentes	Base: Reductor: Catalizador
Anticorrosivo GBP (base anclaje)	1:1
Base para pintura	16:8:1
Pintura	4:1:1 o 4:2:1, se utilizó la proporción 4:2:1

En el presente trabajo se realizarán 3 ensayos de corrosión en niebla salina con diferencias en su proceso de pintado, las cuales se define a continuación:

✓ Ensayo 1:

- Aplicar 1 capa de anticorrosivo GBP (base anclaje)
- Aplicar 2 capas base de pintura
- Lijar: 320, 400 y 600
- Aplicar 2 capas de pintura

✓ Ensayo 2:

- Aplicar 2 capas base de pintura
- Lijar: 320, 400 y 600
- Aplicar 2 capas de pintura

✓ Ensayo 3:

- Aplicar 1 capa base de pintura
- Lijar: 320, 400 y 600
- Aplicar 1 capa de pintura

Para la aplicación de estos componentes se utilizó una pistola de pintado de gravedad a una presión de 172 y 186 kPa (25 y 27 psi), en un ambiente con humedad relativa promedio de 65 % y temperatura promedio de 30 °C. En la Fig. 2.2 se observan los diferentes pasos del proceso de pintado de probetas, los cuales son: a) Aplicación de anticorrosivo, b) Aplicación de base, c) Proceso de lijado y d) Aplicación de pinturas [9].

También, es importante respetar los tiempos de secado de cada mezcla en el proceso de pintado de las probetas, en la Tabla 2.2 se definen los tiempos de secado del anticorrosivo, base y pintura; antes de pasar al proceso de secado al horno el cual se define más adelante y es una variable de estudio en esta investigación [9].

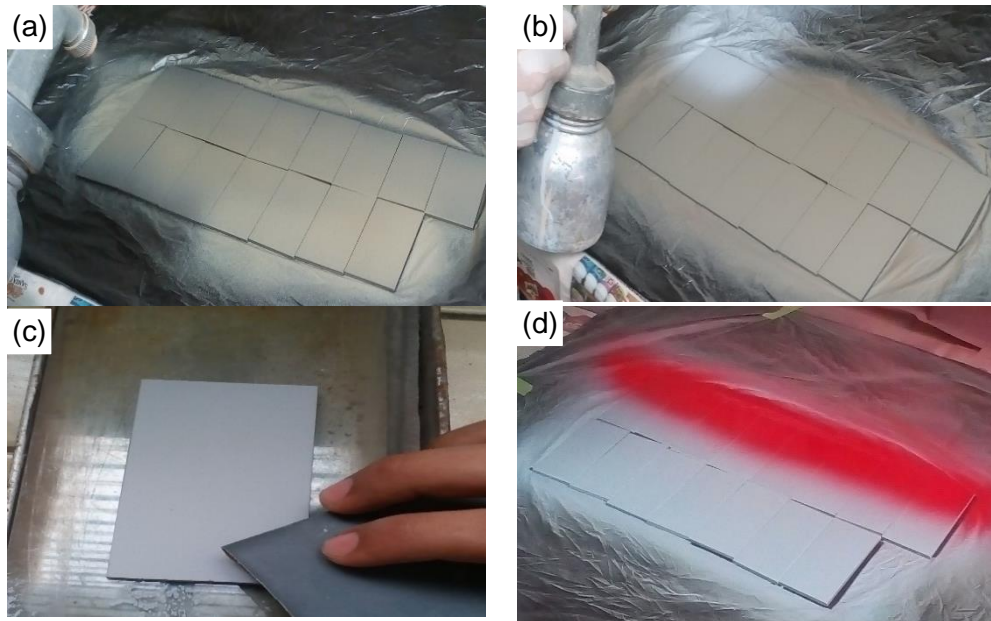


Fig. 2.2. Proceso de pintado de probetas: (a) Aplicación de anticorrosivo; (b) Aplicación de base; (c) Proceso de lijado y (d) Aplicación de pinturas.

Tabla 2.2. Tiempos de secado entre cada etapa de proceso de pintado.

Mezcla	Tiempo por etapa
Aplicar anticorrosivo GBP	Esperar 10 min
Aplicar base de pintura	Esperar 45 min
Lijar: 320, 400 y 600	Lijar consecutivamente
Aplicar pintura	En caso que se aplique 2 manos de pintura, esperar un tiempo de 7 min entre mano. Esperar 20 - 25 min para secado natural

2.5. PROCESO DE SECADO AL HORNO

Para este proceso se aplicó distintos tiempos y temperaturas de secado

utilizando un horno ubicado en el laboratorio de Tratamientos Térmicos, para curar la pintura en las probetas. En la Fig. 2.3 se observa el proceso de secado de las probetas en el horno las cuales se retiraban una vez cumplían con el tiempo de secado establecido en este mismo capítulo.



Fig. 2.3. Proceso de secado en el horno.

Las temperaturas de secado fueron de (35, 65 y 85 °C), con tiempos de 15, 30 y 45 min). Por lo tanto, se tendrán 9 placas en cada ensayo, llegando a un total de 27 probetas a ensayar en todo el trabajo de investigación.

En la Tabla 2.3 se presenta la cantidad de probetas por ensayos y las condiciones de temperatura y tiempo de secado, los parámetros descritos se aplicarán en los tres ensayos a realizar.

Tabla 2.3. Cantidad de probetas por ensayo según condición de temperatura (T) y tiempo (t).

T, °C	t, min	N° Probetas
35	15	1
	30	1
	45	1
65	15	1
	30	1
	45	1
85	15	1
	30	1
	45	1
Total		9 probetas

2.6. MEDICIÓN DE ESPESORES

En un sistema de pintado, saber el espesor de dichos recubrimientos independientemente del tipo de sistema de pinturas con el que se esté trabajando es muy importante, ya que permite conocer si se está aplicando el espesor necesario recomendado ya sea por el fabricante de pinturas y/o personas que se dedican a este rubro y tienen la experiencia necesaria en el manejo de pinturas, por lo tanto, se reporta en este trabajo los valores promedios de espesor de pintura obtenidos.

Para realizar las mediciones de espesor en las probetas se utilizó un medidor de espesor y recubrimientos REED CM-8822 presentado en la Fig. 2.4, así como todo instrumento de medición necesita ser calibrado durante el momento de la toma de datos; el equipo dispone con dos electrodos diferentes F y N, según el sustrato ferroso o no ferroso, en este caso por ser un sustrato ferroso de hierro dulce, se tiene que utilizar el electrodo (F) para sustrato ferroso y la placa de calibración serial N° CM100, la cual mide espesores en el intervalo de (0 - 2000 μm). En la Fig. 2.5 se presenta las placas de calibración del electrodo durante el momento en el cual se realizó una medición de espesor sobre una probeta.



Fig. 2.4. Instrumento medidor de espesor de recubrimientos REED CM-8822.



Fig. 2.5. Calibración y medición de espesores en probetas.

2.7. REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CORROSIÓN EN NIEBLA SALINA

Se realizaron los ensayos de corrosión en niebla salina en una cámara previamente construida, perteneciente al departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Se realizaron tres ensayos de corrosión tal como se describió anteriormente; los tres ensayos de corrosión tuvieron las mismas condiciones de operación y se realizaron según la norma ASTM designación B 117, sin embargo, los ensayos fueron interrumpidos y al presentar la suficiente falla en la pintura estos se dieron por finalizados, los tiempos de ensayos fueron desde 80 hasta 120 h según sean los resultados obtenidos en cada uno de los tres ensayos, ya que cada uno de ellos presentan diferencias en su proceso de pintado. En la Fig. 2.6 se presenta el lote de probetas listo para ser sometido al ensayo de corrosión, se debe tener presente que cada probeta tiene distintas condiciones de temperatura y tiempo de secado, tal como se presentó en la Tabla 2.3.

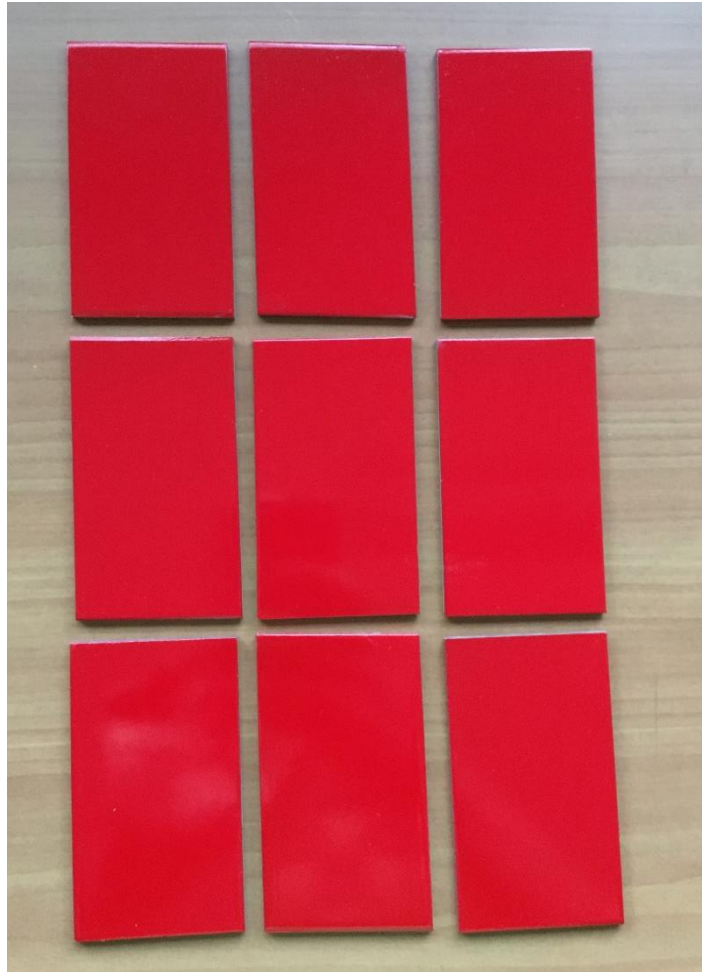







Fig. 2.6. Lote de probetas preparadas para ensayo de corrosión.

A continuación, se detalla paso a paso el uso de la cámara de niebla salina, el procedimiento de ensayos de corrosión según la norma de la ASTM designación B 117 y el procedimiento de limpieza de la cámara que se debe seguir después de realizar cada ensayo, con el fin de mantener el equipo en óptimas condiciones, los cuales son [5].

✓ **Uso de la cámara de niebla salina**


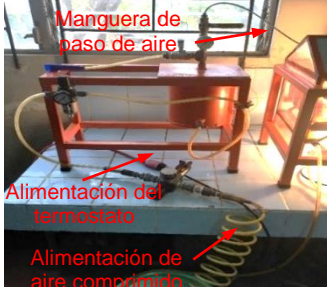



Los pasos para el uso de la cámara de niebla salina se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Hoja de proceso para el uso de la cámara de niebla salina.

Pasos	Descripción	Esquema
1	Conectar el enchufe del sistema de control de temperatura al tomacorriente (fase A) y realizar una pequeña prueba del funcionamiento del sistema, calibrando el termostato a 35 °C, luego presionar el interruptor (switch) y luego manipular manualmente el termostato bajando el valor de temperatura calibrado hasta que el foco se apague.	
2	Conectar la alimentación de aire ya sea utilizando el sistema de compresor de la escuela o utilizando uno portátil.	
3	Si se utiliza un compresor portátil, conectar el enchufe del compresor a un tomacorriente, asegurándose que el tomacorriente sea alimentado con una fase distinta (fase B) al tomacorriente usado para energizar el sistema de control de temperatura, y así evitar que este último se queme.	
4	Preparar la solución salina al 95 – 1 % en masa de agua desmineralizada y 5 + 1 % en masa de NaCl con un 99.95 % de pureza.	
5	Verter la solución salina preparada en el tanque principal de solución salina.	





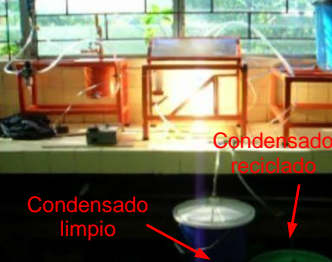
Continúa.

Continuación.- Tabla 2.4. Hoja de proceso para el uso de la cámara de niebla salina.

Pasos	Descripción	Esquema
6	Agregar agua desmineralizada al humidificador a través de la válvula de alivio de presión de aire comprimido (azul) que se encuentra encima del humidificador, hasta que el nivel alcance la mitad de su altura.	
7	Verificar que estén bien hechas todas las conexiones neumáticas y eléctricas.	
8	Verificar que el nivel de solución salina alcanzado en el reservorio sea al menos de la mitad.	
9	Verificar que la válvula de alivio de presión de aire comprimido (azul) se encuentre cerrada.	
10	Verificar que la válvula de paso de aire comprimido (amarilla) se encuentre cerrada.	


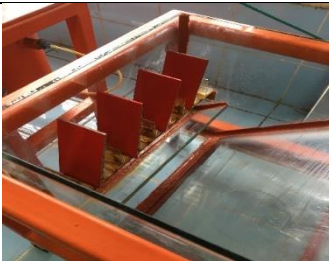
Continúa.

Continuación.- Tabla 2.4. Hoja de proceso para el uso de la cámara de niebla salina.

Pasos	Descripción	Esquema
11	Verificar que los manómetros se encuentren en buen estado.	
12	Una vez verificadas todas las conexiones y parámetros para el funcionamiento del equipo, se realiza una pequeña prueba de operación en conjunto, encendiendo el compresor y regulando el flujo de aire en el FR hasta alcanzar una presión de 138 kPa (20 psi) en el manómetro de salida situado antes de la válvula de paso de aire (amarilla).	
13	Una vez alcanzado ese valor abrir gradualmente la válvula de paso de aire comprimido (amarilla) y corroborar que se esté produciendo niebla salina dentro de la cámara, una vez verificado la formación de niebla dentro de la cámara se regula nuevamente la presión en el FR hasta alcanzar una presión de 103 kPa (15 psi) en el manómetro de salida, transcurrido 1 min se cierra nuevamente la válvula de paso de aire comprimido.	
14	Destapar la cámara, limpiar nuevamente las probetas a ensayar y colocarlas sobre el portaprobetas que se encuentra dentro de la cámara, luego tapar nuevamente la cámara.	
15	Realizar el ensayo de corrosión por niebla salina, asegurándose de verter nuevamente en el tanque principal de solución salina el condensado limpio reciclado.	

Continúa.

Continuación.- Tabla 2.4. Hoja de proceso para el uso de la cámara de niebla salina.

Pasos	Descripción	Esquema
16	Finalizar el ensayo, desenergizar todo el equipo cerrando todas las válvulas y desactivando el interruptor (switch) del sistema de control de temperatura y liberar el aire confinado en el humidificador a través de la válvula de alivio de presión de aire comprimido (azul).	
17	Destapar la cámara, sacar las probetas y tapar nuevamente la cámara.	
18	Limpiar y guardar el equipo de ensayo de corrosión por niebla salina.	

✓ **Limpieza de la cámara de niebla salina después de realizado cada ensayo**

- 1) Retirar todas las probetas y el portaprobetas.
- 2) Retirar el sistema calefactor de la cámara (bulbo del termostato, foco incandescente, caja de control).
- 3) Vaciar todos los tanques con solución salina (tanque de solución salina, tanque de reciclado de condensado limpio, tanque de condensado sucio).
- 4) Vaciar el humidificador a través del acople rápido de la manguera de entrada de aire.
- 5) Desconectar todas las mangueras y enjuagarlas.
- 6) Lavar con agua todos los tanques que contuvieron solución salina.
- 7) Extraer la solución salina restante del reservorio, enjuagar y volver a extraer.
- 8) Lavar el interior de la cámara salina y su tapadera con agua.
- 9) Guardar y empaquetar los componentes del equipo de niebla salina.

✓ **Procedimiento de ensayos de corrosión según norma de la ASTM designación B 117**

El procedimiento de cada ensayo realizado y las condiciones de operación

de la cámara de niebla salina se realizó aplicando la norma de la ASTM designación B 117. A continuación, se presentan las especificaciones de la norma que se tomaron en consideración para la realización de los ensayos [7].

- 1) El sistema utilizado para la generación de la niebla salina consistió en una cámara sellada que contiene la niebla, un contenedor para almacenar la solución salina, un compresor portátil (libre de aceite y partículas) para el suministro de aire comprimido, un inyector que atomiza la solución salina, apoyos para los especímenes de prueba, y una termocupla para el control de la temperatura.
- 2) El condensado formado en la superficie de la tapa de la cámara no goteó sobre los especímenes de prueba, lo cual se cumple en este trabajo gracias al diseño de la cubierta, lo cual permite que las gotas de condensado se deslicen en la superficie interna de la cubierta y de esta manera evitar que toquen las probetas.
- 3) Toda el agua usada para la práctica cumplió con el tipo IV de agua según la norma de la ASTM designación D 1193. Este no se aplica al agua corriente de chorro o agua con cloro. En este caso se utilizó agua desmineralizada la cual está libre de minerales pesados e impurezas.
- 4) Las probetas se apoyaron aproximadamente a 15° respecto a la vertical y paralela a la dirección principal del flujo de la niebla en la cámara, tal como se especifica en la norma utilizada.
- 5) Los especímenes no se colocaron en contacto el uno con el otro, ni con otro material metálico ni con cualquier otro material; es decir, los especímenes se colocaron con la separación necesaria para permitir la circulación libre de la niebla sobre todos los especímenes.
- 6) El abastecimiento de aire comprimido al inyector para atomizar la solución salina está libre de aceite y suciedad y mantenido a 138 kPa (20 psi), para lograr este valor de presión constante se purgaron los filtros cuando fue necesario y así tener las mediciones correctas por parte de los manómetros.
- 7) La temperatura en la zona de exposición de la cámara de niebla salina se mantuvo a 35 °C con una tolerancia de +1.1 o -1.7 °C (95 °F, +2 o -3 °F). El

valor de la temperatura se puede ver sin que la cámara se abra, mediante la termocupla instalada que enciende y apaga el foco con el fin de mantener una temperatura constante.

- 8) La concentración de cloruro de sodio de la solución recuperada fue de 5 + 1% de peso. El pH de la solución colectada fue de 6.5 a 7.2.
- 9) El flujo de aire hacia las boquillas permaneció constante durante toda la prueba, a excepción de interrupciones esporádicas y cortas para inspeccionar, reajustar o quitar especímenes de prueba, comprobar y rellenar la solución en el contenedor.

✓ **Preparación de la solución salina**

Algo muy importante que se debe aclarar en esta sección es el hecho de que se reutilizó parte de la solución salina condensada que no ha tenido contacto con las superficies en estudio, ni con el resto de las partes de la probeta, por lo que se puede verter nuevamente en el tanque principal de solución salina, hasta agotarla y así preparar más solución salina [7].

El pH de la solución salina debería ser tal que, cuando se atomiza a 35 °C (95 °F), la solución recuperada estará en el intervalo de pH de 6.5 a 7.2. Antes de que la solución sea atomizada estará libre de sólidos suspendidos. La medición del pH se realizará utilizando un electrodo adecuado, una sustancia de calibración conocida comúnmente como buffer, en este caso se calibró con un buffer de 7. Las mediciones de pH se realizaron antes y al final del ensayo [7].

Una variable a tener en consideración, la cual es muy importante para realizar los ensayos con el mismo pH de la solución salina es que la temperatura afecta al pH de la salmuera preparada a partir de agua saturada con dióxido de carbono a temperatura ambiente, por lo tanto, el ajuste del pH puede realizarse mediante el método siguiente:[7]

- Al momento de preparar la solución salina, se debe realizar a la misma temperatura con la que se mantendrá en la cámara de niebla salina, la cual es de 35 °C (95 °F), la temperatura se mantendrá constante durante toda su preparación con la ayuda del Hot Plate, el cual sirve de agitador y calentador al mismo tiempo, de esta forma la solución no presentará cambio en su pH

porque no habrá ningún cambio de temperatura, ya que si se prepara la salmuera a temperatura mucho más baja el pH de la solución incrementará demasiado y saldrá del intervalo el cual debe estar entre 6.5 y 7.2. sin embargo, en la práctica se observa que al realizar mediciones de pH a temperatura entre 25 y 30 °C, se observó que el valor de pH se encuentra siempre entre el valor recomendado. En la Figs. 2.7 y 2.8 se observa la preparación de la salmuera y el uso del pH metro, respectivamente.



Fig. 2.7. Preparación de la salmuera.



Fig. 2.8. Uso del pH metro.

Durante el procedimiento se realizaron mediciones de pH en la solución salina, se obtuvieron muestras de salmuera nueva y recolectada en donde se observa que las muestras recolectadas tienen un valor ligeramente mayor a las muestras de solución nuevas, sin embargo, se puede observar que siempre cumplen con los valores de acidez especificadas en la norma de la ASTM designación B 117, en la Tabla 2.5 se presenta los resultados de las mediciones de pH.

Tabla 2.5. Valores de pH de la solución salina utilizada.

Solución salina	pH
Nuevo	6.57
	6.87
	6.55
Recolectado	7.13
	7.09
	7.08

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se reportan los valores de los espesores promedio de los sistemas de pintura, los cuales fueron obtenidos mediante el equipo de medición de espesores de recubrimiento orgánicos; los resultados de cada uno de los tres ensayos de corrosión en niebla salina realizados durante el presente trabajo, para el cual se presentan varias series de fotografías según el tiempo de ensayo y para efectos de análisis y representación de datos se presentan las respectivas gráficas en la cual se observan el avance en el porcentaje de corrosión según el tiempo de exposición en la cámara de niebla salina.

El porcentaje de corrosión de cada probeta se analizó de acuerdo a la norma de la ASTM designación D 610, el cual es un método de prueba estándar para la evaluación del grado de corrosión en superficies de acero pintadas, también se realiza una descripción de dicha norma.

En resumen, se hace un análisis fraccionario de los ensayos de corrosión que fueron realizados en este trabajo, el cual comprende los factores temperatura, tiempo y diferencias en el sistema de pintado de las superficies, todo con el fin de determinar la mejor alternativa en un sistema de pintado junto con las mejores condiciones en su proceso, además de ver las diferencias en cada superficie de la probeta.

3.1 RESULTADOS DE ESPESORES Y SU ANÁLISIS

En la Tabla 3.1 se presenta los valores obtenidos de los espesores finales de los 3 lotes de capas no metálicas sobre el metal base ferroso. Se tomó una probeta al azar de cada lote, considerando que durante el proceso de pintado todas fueron pintadas de forma homogénea; por lo tanto, el espesor se puede asumir que prácticamente es el mismo. Además, en la Tabla 3.1 se presenta el promedio de las 5 mediciones y la desviación estándar de cada muestra para cada lote de capa de sistema de pintura o recubrimiento.

Tabla 3.1. Resultados de espesores de recubrimientos medidos en cada ensayo

Medición	Especificaciones	Espesores obtenidos, μm	\bar{E} , μm	DE, μm
Lote 1	1 capa de anticorrosivo, 2 capas de base y 2 capas de pintura	183	177.4	25.85
		203		
		141		
		162		
		198		
Lote 2	2 capas de base y 2 capas de pintura	144	145.2	17.14
		173		
		146		
		128		
		135		
Lote 3	1 capa de base y 1 capa de pintura	80.5	71.42	10.18
		84.0		
		63.4		
		67.5		
		61.7		

3.2 RESUMEN DE LA NORMA DE LA ASTM DESIGNACIÓN D 610 Y PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

En esta sección de este capítulo se presenta el resumen de la norma de la ASTM designación D 610, la cual se denomina Método de prueba estándar para la evaluación del grado de corrosión en superficies de acero pintadas, la cual se empleó para evaluar los defectos de diversos recubrimientos en varios sustratos metálicos [10]:

✓ **Alcance:**

Esta práctica cubre la evaluación del grado de corrosión sobre superficies de acero pintadas. Los ejemplos visuales que representan el porcentaje de corrosión dados en las especificaciones descritas forman parte de la norma. Estos ejemplos visuales los desarrolló la ASTM en cooperación con la Sociedad de Protección de Recubrimientos para mayor

Estandarización de métodos (The Society for Protective Coatings to further standardization of methods, SSPC). Las fotografías pueden ser utilizadas para estimar el porcentaje de defecto de otros recubrimientos sobre diversos sustratos.

✓ **Importancia y uso**

- La cantidad de corrosión por debajo o a través de una película de pintura es un factor importante en la determinación si un sistema de recubrimiento debería ser reemplazado o reparado. Esta práctica brinda un medio estandarizado para determinar la cantidad y distribución de corrosión de una superficie visible.
- El grado de corrosión es evaluado usando una escala de cero a diez basado en el porcentaje de corrosión visible de una superficie.
- La distribución de la corrosión es clasificada como: corrosión puntual (spot), corrosión general, corrosión distribuida (pinpoint) y corrosión híbrida.

✓ **Interferencias**

Los ejemplos visuales que forman parte de esta práctica y la escala de grado de corrosión asociada cubren sólo la corrosión evidenciada por la superficie visible.

Por lo tanto, el uso de los ejemplos visuales requiere las siguientes precauciones:

- Algunos acabados están manchados por el óxido generado. Estas manchas no se deben confundir con la corrosión real involucrada.
- La suciedad acumulada u otro material puede dificultar la determinación precisa del grado de oxidación
- Ciertos tipos de suciedad depositada que contienen compuestos de hierro o hierro pueden causar decoloración superficial que no debe confundirse con corrosión
- Los defectos pueden variar en un área determinada. Por lo tanto, se debe tener cuidado al seleccionar un único grado de corrosión o distribución

de corrosión que sea representativo de un área o estructura grande, o al subdividir una estructura para su evaluación.

- El color del recubrimiento debe tenerse en consideración durante el momento de evaluar las superficies, ya que las fallas fueron más evidentes en un acabado que muestra contraste de color con la corrosión.

✓ **Procedimiento para el análisis**

- Seleccionar el área a ser evaluada
- Determinar el tipo de distribución de corrosión usando definiciones en la Tabla 3.2 y en las Figs. 3.1 - 3.3.
- Estimar el porcentaje de superficie corroída utilizando los ejemplos visuales de las Figs. 3.1 - 3.3.
- Es útil limpiar la superficie con paños húmedos para eliminar todas las impurezas generadas durante el proceso de ensayo que puedan ser desprendidas fácilmente y evitar así confusión en los resultados.
- Utilice el porcentaje de superficie corroída, para identificar el grado de corrosión dirigirse a la Tabla 3.2. Asigne la clasificación de corrosión utilizando un grado de corrosión de 0 - 10 seguido del tipo de distribución de corrosión identificado por S para puntual (spot), G para general, P para distribuida (pinpoint) o H para híbrida.
- Los ejemplos visuales no son necesarios para el uso de la escala de grado de corrosión, ya que la escala se basa en el porcentaje del área corroída y cualquier método de evaluación que se puede utilizar para determinar el grado de corrosión. Sin embargo, en este proceso de evaluación se enfoca a comparar las imágenes de referencia de la norma ASTM designación D 610 con cada defecto observado de cada probeta ensayada.

Tabla 3.2. Escala y descripción de los diferentes tipos de corrosión según la norma de la ASTM designación D 610.

Grado de corrosión	Superficie corroída, %	Ejemplos visuales		
		Puntual, S	General, G	Distribuida, P
10	Menor o igual que 0.01		---	
9	Mayor que 0.01 hasta 0.03	9-S	9-G	9-P
8	Mayor que 0.03 hasta 0.1	8-S	8-G	8-P
7	Mayor que 0.1 hasta 0.3	7-S	7-G	7-P
6	Mayor que 0.3 hasta 1	6-S	6-G	6-P
5	Mayor que 1 hasta 3	5-S	5-G	S-P
4	Mayor que 3 hasta 10	4-S	4-G	4-P
3	Mayor que 10 hasta 16	3-S	3-G	3-P
2	Mayor que 16 hasta 33	2-S	2-G	2-P
1	Mayor que 33 hasta 50	1-S	1-G	1-P
0	Mayor que 50		---	

Los tipos de corrosión según la norma de la ASTM designación D 610:

- Corrosión puntual (S): la corrosión localizada se produce cuando la mayor parte de la corrosión se concentra en algunas áreas localizadas de la superficie pintada. Los ejemplos visuales que representan este tipo de oxidación se etiquetan de 9-S a 1-S (ver, Figs. 3.1 - 3.3).
- Corrosión general (G): la corrosión general se produce cuando las manchas de varios tamaños se distribuyen aleatoriamente a través de la superficie. Los ejemplos visuales que representan este tipo de oxidación se etiquetan de 9-G a 1-G (ver, Figs. 3.1 - 3.3).
- Corrosión Distribuida (P): se produce cuando los defectos se distribuyen por toda la superficie como pequeñas manchas de corrosión individuales. Los ejemplos visuales que representan este tipo de oxidación se etiquetan de 9-P a 1-P. (ver, Figs. 3.1 - 3.3).
- Oxidación híbrida (H): una superficie de oxidación real puede ser un híbrido de los tipos de distribución de óxido representados en los ejemplos visuales. En este caso, informe del porcentaje total de óxido para clasificar la superficie 9-H a 1-H.

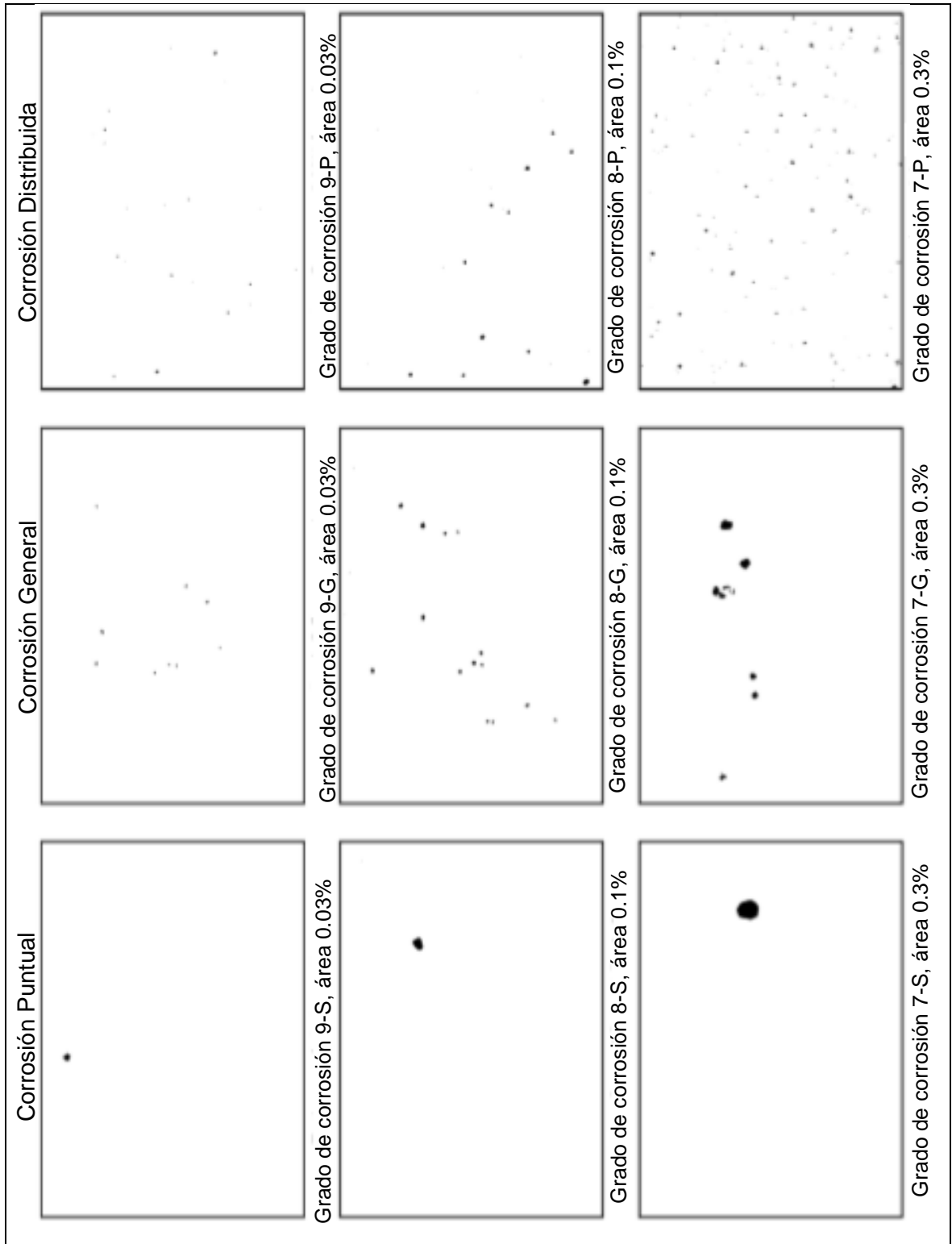


Fig. 3.1. Ejemplos de porcentaje de área corroída según la norma ASTM designación D 610.

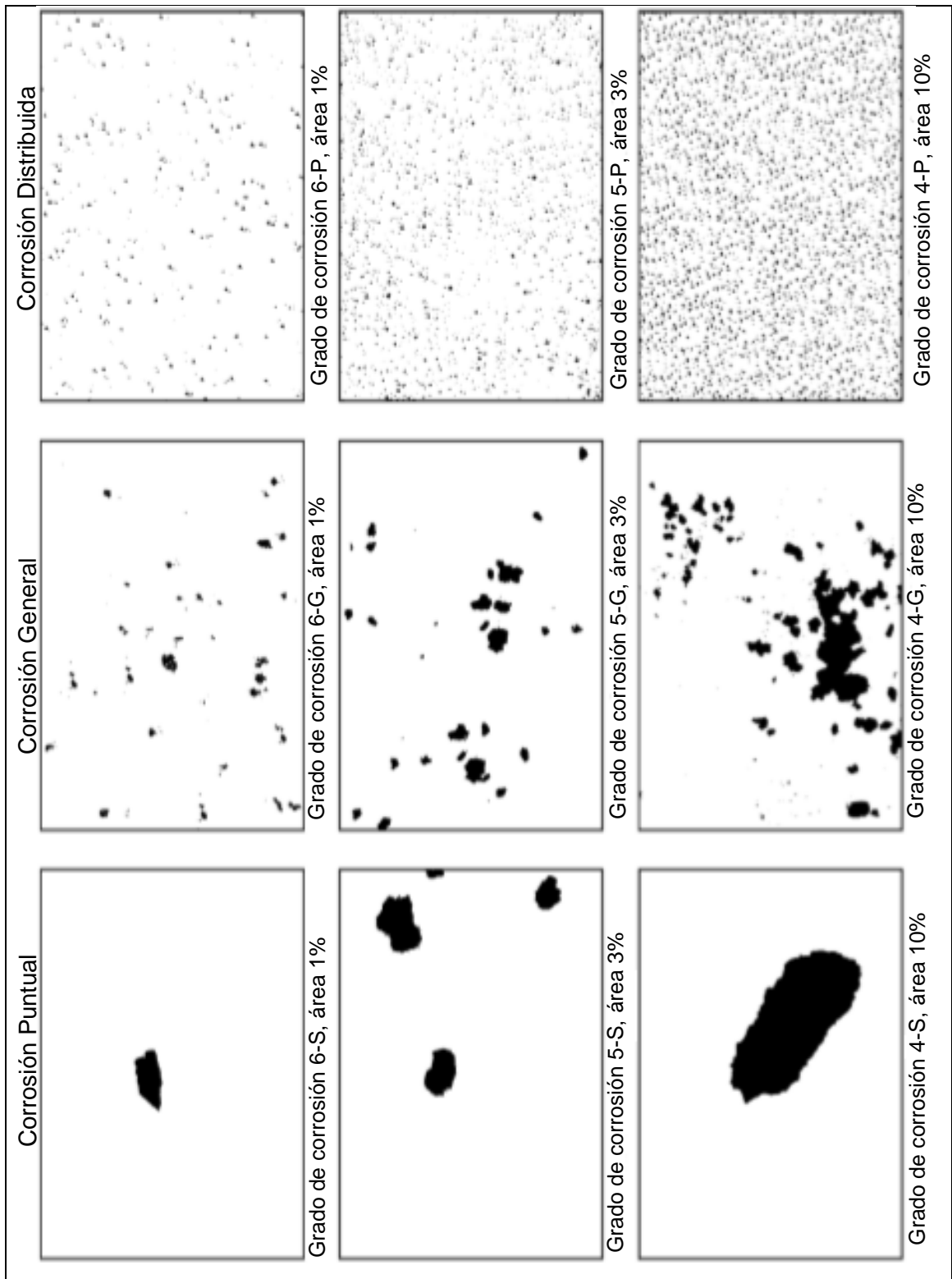


Fig. 3.2. Ejemplos de porcentaje de área corroída según la norma ASTM designación D 610.

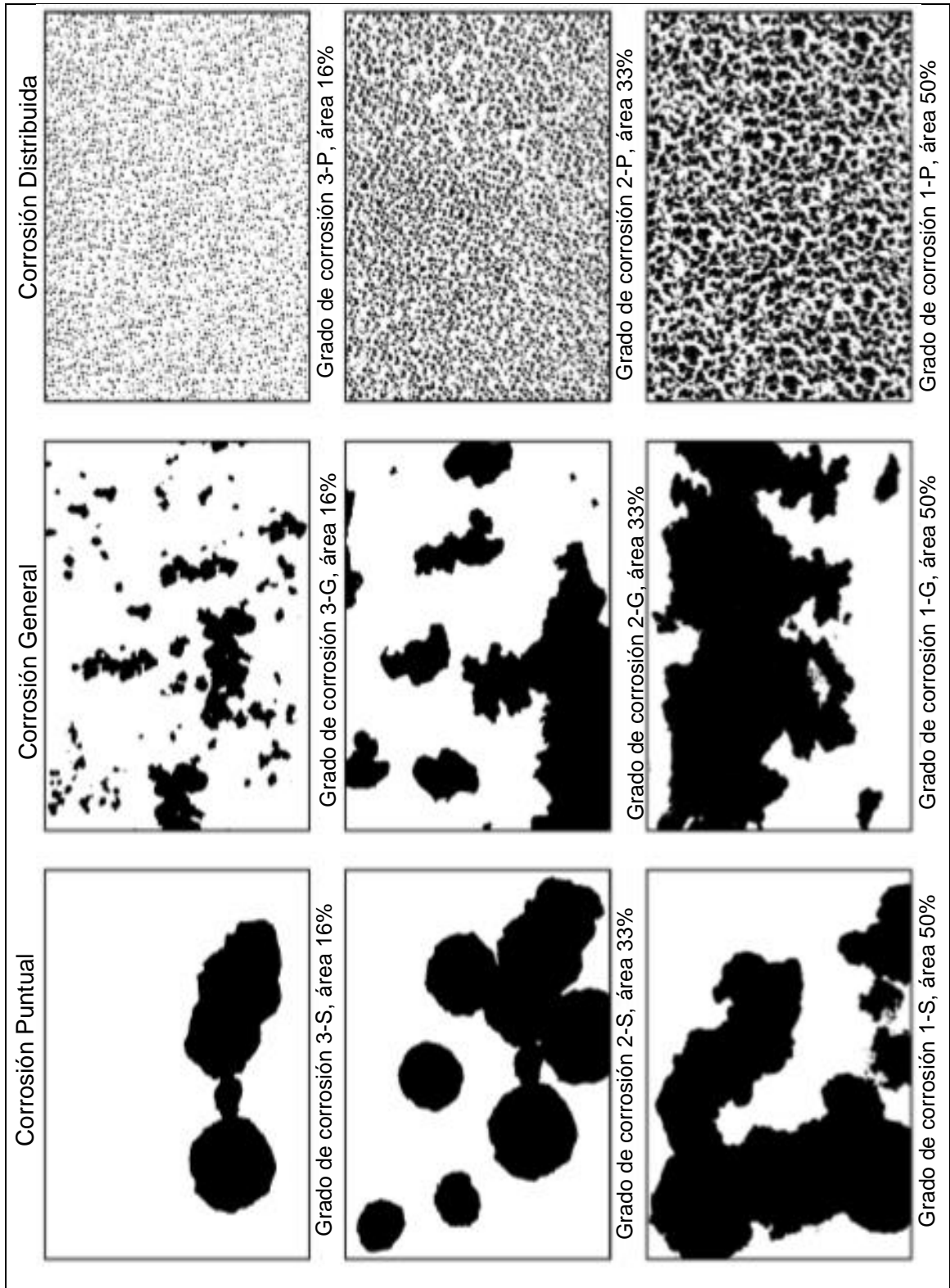


Fig. 3.3. Ejemplos de porcentaje de área corroída según la norma ASTM designación D 610.

3.3. RESULTADOS DE CORROSIÓN EN NIEBLA SALINA

Los resultados obtenidos de todas las probetas se analizaron aplicando la norma de la ASTM designación D 610, en la que se comparan los distintos defectos que han tenido todas las superficies como consecuencia del ensayo acelerado de corrosión. A continuación se presentan los resultados de cada ensayo y se detalla cada una de las probetas, se presenta el grado de corrosión de las superficies, así:

➤ Resultados del ensayo 1:

En la Tabla 3.3 se presentan los resultados de porcentaje de corrosión en la superficie pintada de las probetas, este ensayo de corrosión en niebla salina se realizó durante 120 h de manera interrumpida cada 8 h por día, en probetas pintadas con 1 capa de anticorrosivo, 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas a diferentes temperaturas (35, 65 y 85 °C) durante diferentes tiempos de secados (15, 30 y 45 min).

En las Figs. 3.4 - 3.6 se presentan las curvas de porcentaje de evolución de la corrosión en probetas recubierta con 1 capa de anticorrosivo, 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas al horno a 35, 65 y 85 °C, respectivamente.

Finalmente, en la Fig. 3.7 se presentan las fotografías de las probetas ensayadas en la cámara de niebla salina durante 120 h de forma interrumpida cada 8 h por día, las cuales corresponden al ensayo 1.

Tabla 3.3. Porcentajes de corrosión en niebla salina durante 120 h de probetas recubiertas con 1 capa de anticorrosivo, 2 capas de base y 2 capas de pintura.

Temperatura de secado, °C	Tiempo de secado, min	Tiempo de ensayo de corrosión en niebla salina		
		40 h	80 h	120 h
35	15	0.03	0.2	0.5
	30	0.03	0.1	0.5
	45	0.03	0.1	0.3
65	15	0.03	0.1	0.3
	30	0.03	0.03	0.1
	45	0.03	0.1	0.1
85	15	0.3	3	16
	30	1	3	16
	45	3	10	33

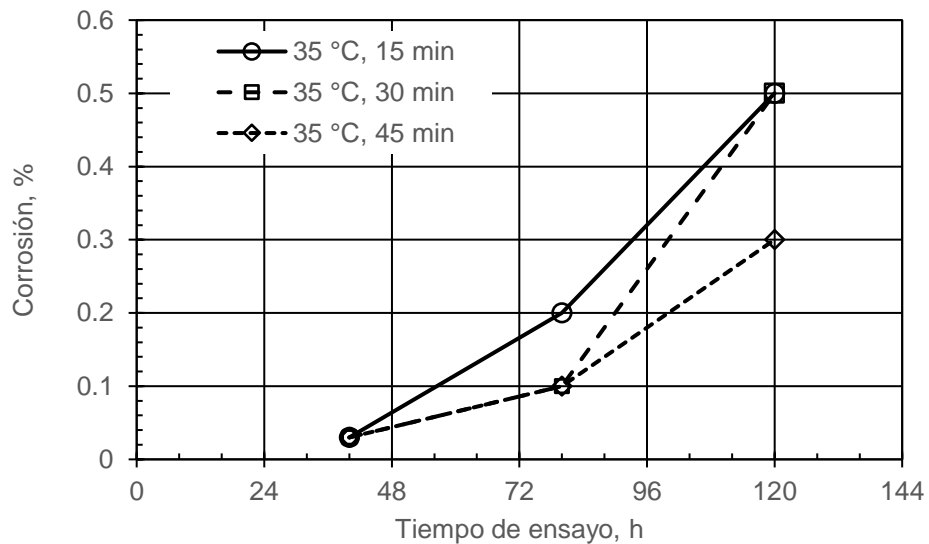


Fig. 3.4. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 1: probetas secadas en horno a 35 °C a 15, 30 y 45 min.

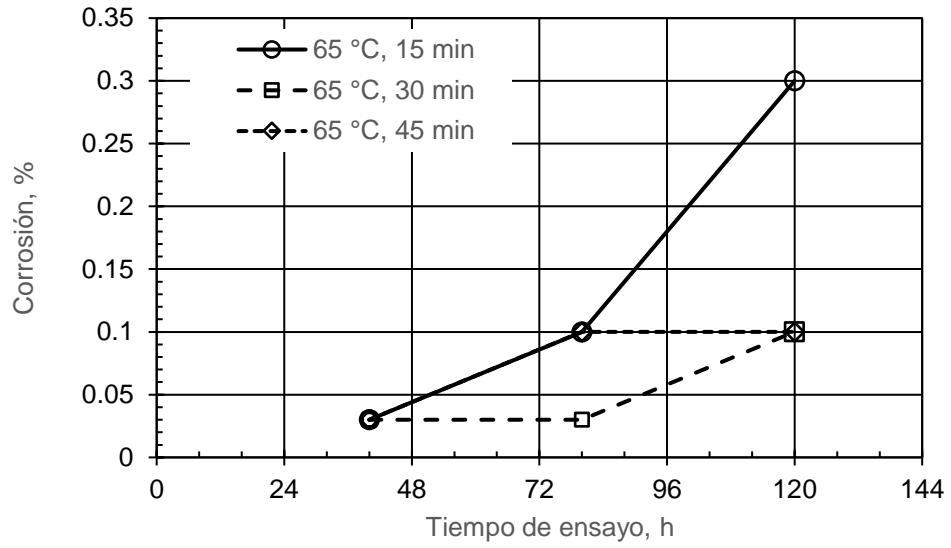


Fig. 3.5. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 1: probetas secadas en horno a 65 °C a 15, 30 y 45 min.

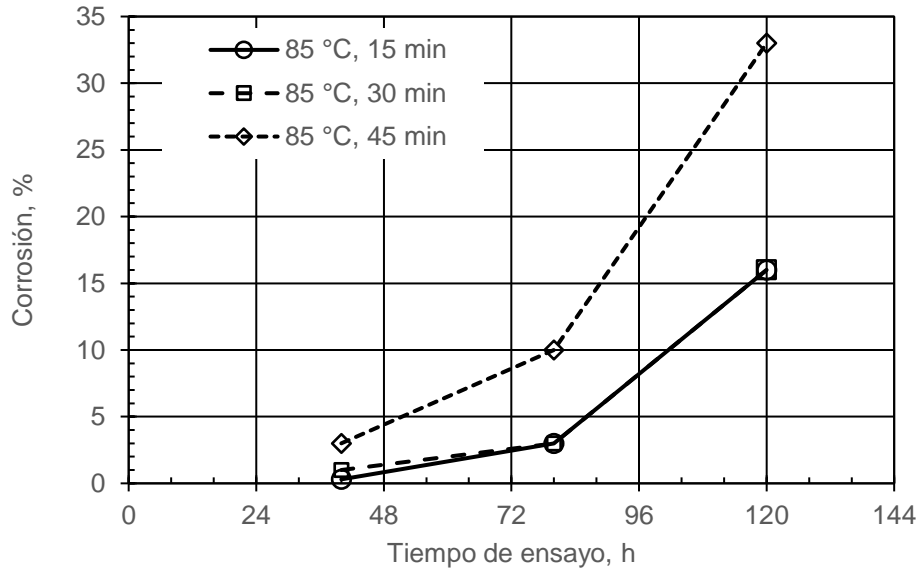


Fig. 3.6. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 1: probetas secadas en horno a 85 °C a 15, 30 y 45 min.









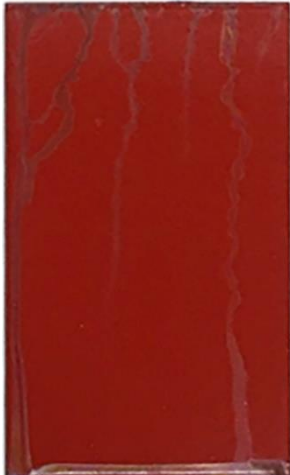
Secado	15 min	30 min	45 min
35 ° C			
65 ° C			
85 ° C			

Fig. 3.7. Resultados de corrosión en probetas correspondientes al ensayo 1, luego de 120 h en cámara de niebla salina de manera interrumpida cada 8 h por día a diferentes temperaturas y tiempos de secado en horno.

➤ Resultados del ensayo 2:

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados de porcentaje de corrosión en la superficie pintada de las probetas, este ensayo de corrosión en niebla salina se realizó durante 80 h de manera interrumpida cada 8 h por día, en probetas pintadas sin anticorrosivo con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas a diferentes temperaturas (35, 65 y 85 °C) durante diferentes tiempos de secado (15, 30 y 45 min).

En las Figs. 3.8 - 3.10 se presentan las imágenes con los resultados de corrosión en las probetas, correspondientes a probetas ensayadas durante 80 h en cámara de niebla salina de forma interrumpida es decir 8 h por día, secadas en horno a 35, 65 y 85 °C con diferentes tiempos de 15, 30 y 45 min, respectivamente.

Tabla 3.4. Porcentajes de corrosión en niebla salina durante 80 h de probetas recubiertas con 2 capas de base y 2 capas de pintura.

Temperatura de secado, °C	Tiempo de secado, min	Tiempo de ensayo de corrosión en niebla salina			
		24 h	48 h	72 h	80 h
35	15	3	5	7	8
	30	10	20	30	35
	45	10	15	25	30
65	15	2	4	6	7
	30	1	3	5	6
	45	3	5	8	10
85	15	25	35	45	50
	30	40	50	60	65
	45	3	5	10	15













Secado \ CNS	15 min	30 min	45 min
24 h			
48 h			
72 h			
80 h			

Fig. 3.8. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas en horno a 35 °C durante 15, 30 y 45 min.













CNS \ Secado	15 min	30 min	45 min
24 h			
48 h			
72 h			
80 h			

Fig. 3.9. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas en horno a 65 °C durante 15, 30 y 45 min.













Secado \ CNS	15 min	30 min	45 min
24 h			
48 h			
72 h			
80 h			

Fig. 3.10. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas en horno a 85 °C durante 15, 30 y 45 min.

En las Figs. 3.11 - 3.13 se presentan las curvas de porcentaje de evolución de la corrosión en niebla salina durante 80 h de manera interrumpida cada 8 h por día en probetas recubiertas con 2 capas de base y 2 capas de pintura secadas a 35, 65 y 85 °C, respectivamente.

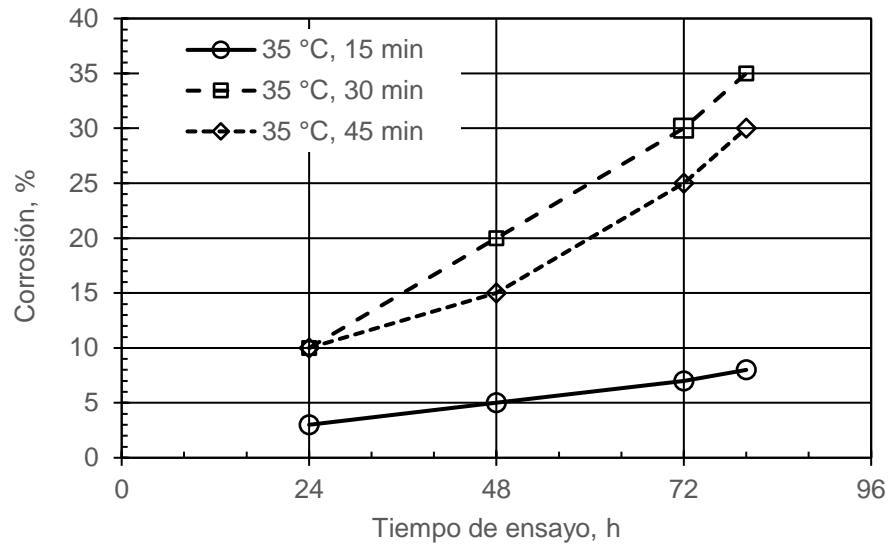


Fig. 3.11. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 2: probetas secadas en horno a 35 °C a 15, 30 y 45 min.

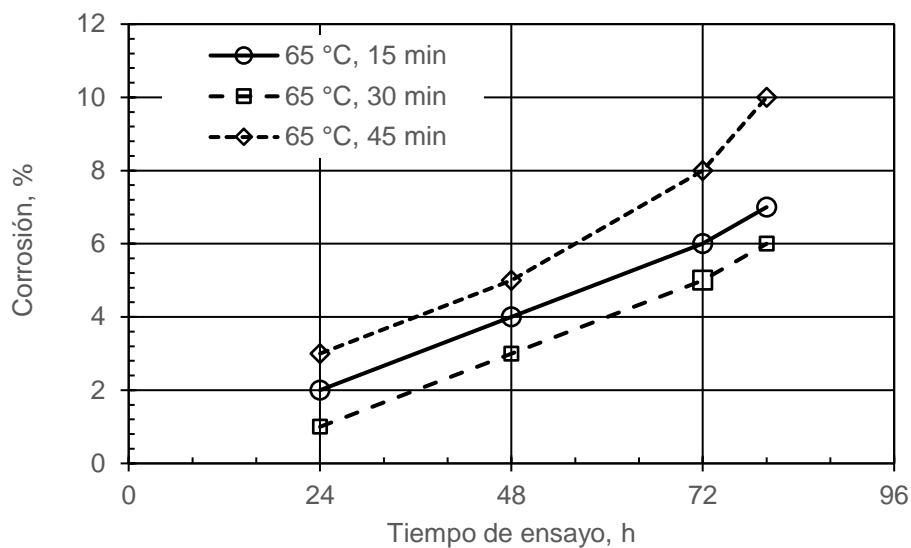


Fig. 3.12. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 2: probetas secadas en horno a 65 °C a 15, 30 y 45 min.

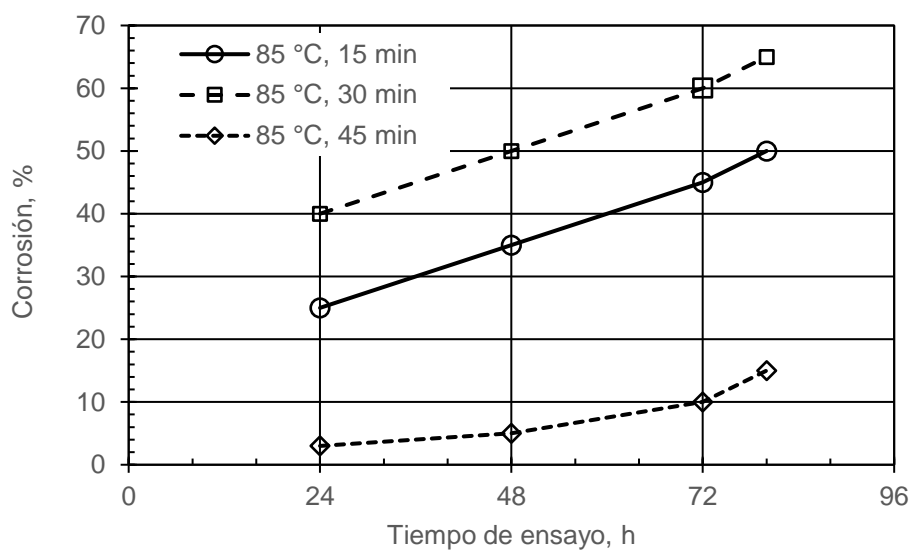


Fig. 3.13. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 2: probetas secadas en horno a 85 °C a 15, 30 y 45 min.

➤ Resultados del ensayo 3:

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados de porcentaje de corrosión en niebla salina en la superficie pintada de las probetas, realizado durante 80 h de manera interrumpida cada 8 h por día, en probetas pintadas sin anticorrosivo con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas al horno a 35, 65 y 85 °C durante 15, 30 y 45 min.

En las Figs. 3.14 - 3.16 se presentan las imágenes de los resultados de corrosión en las probetas, correspondientes a probetas ensayadas durante 80 h en cámara de niebla salina de forma interrumpida, es decir 8 h por día, secadas en horno a 35, 65 y 85 °C con diferentes tiempos de 15, 30 y 45 min, respectivamente.

En las Figs. 3.17 - 3.19 se presentan las curvas de porcentaje de evolución de la corrosión en probetas recubierta con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas a 35, 65 y 85 °C, respectivamente.

Tabla 3.5. Porcentajes de corrosión en niebla salina durante 80 h de probetas recubiertas con 1 capa de base y 1 capa de pintura.

Temperatura de secado, °C	Tiempo de secado, min	Tiempo de ensayo de corrosión en niebla salina			
		24 h	48 h	72 h	80 h
35	15	3	25	30	33
	30	3	20	25	30
	45	10	20	50	55
65	15	1	10	15	20
	30	10	20	25	30
	45	1	5	10	12
85	15	10	20	30	35
	30	1	3	10	12
	45	50	60	65	70













CNS \ Secado	15 min	30 min	45 min
24 h			
48 h			
72 h			
80 h			

Fig. 3.14. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas en horno a 35 °C durante 15, 30 y 45 min.













Secado	15 min	30 min	45 min
CNS 24 h			
48 h			
72 h			
80 h			

Fig. 3.15. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas en horno a 65 °C durante 15, 30 y 45 min.













Secado \ CNS	15 min	30 min	45 min
24 h			
48 h			
72 h			
80 h			

Fig. 3.16. Resultados de corrosión en niebla salina durante 80 h de ensayo de manera interrumpida cada 8 h por día de las probetas con 1 capa de base y 1 capa de pintura secadas en horno a 85 °C durante 15, 30 y 45 min.

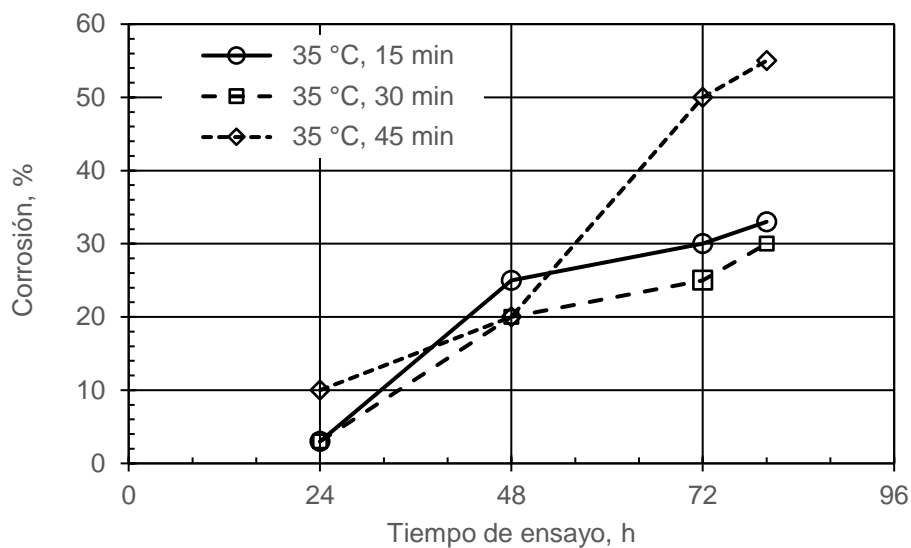


Fig. 3.17. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 3: probetas secadas en horno a 35 °C a 15, 30 y 45 min.

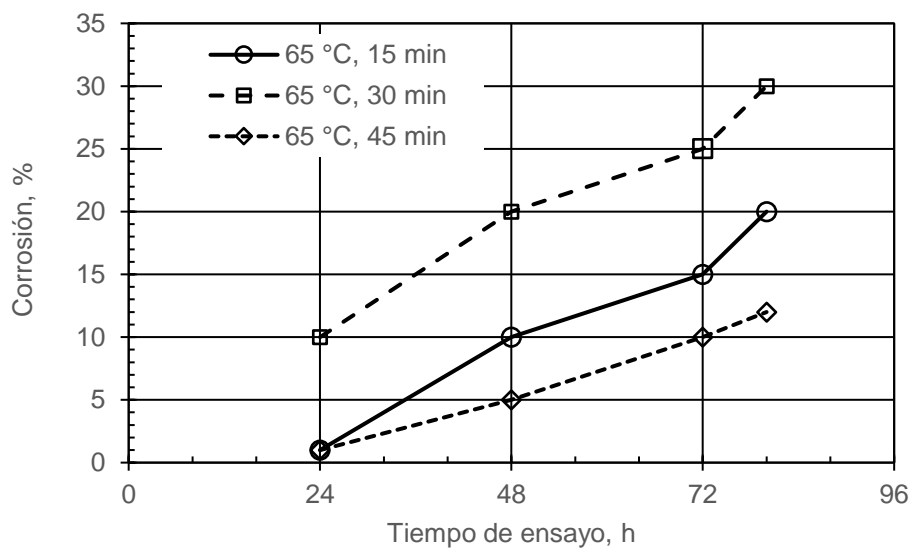


Fig. 3.18. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 3: probetas secadas en horno a 65 °C a 15, 30 y 45 min.

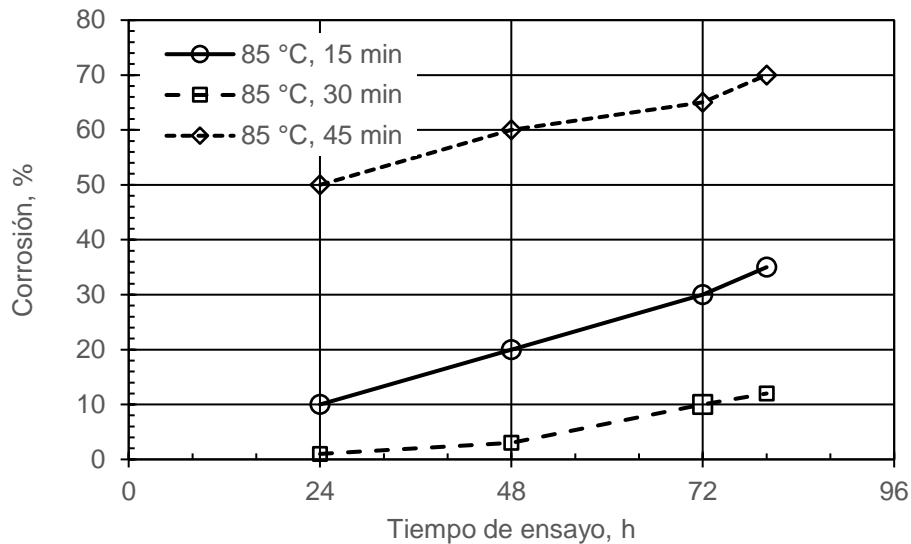


Fig. 3.19. Curva de porcentaje de evolución de corrosión, Ensayo 3: probetas secadas en horno a 85 °C a 15, 30 y 45 min.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta el análisis de resultados de cada uno de los ensayos, en los cuales se analizan cada una de las condiciones de temperatura y tiempo de secado, así:

➤ Análisis de resultados del ensayo 1:

En este ensayo se visualizan los valores y grados de corrosión bastante bajos, a pesar de haber sometido las probetas a ensayo de corrosión por 120 h lo cual se diferencia del ensayo 2 y 3 que sólo fueron sometidos a 80 h de ensayo, y esto se debe a que se cumplió exactamente con los procedimientos de pintado indicados por el fabricante de pinturas, sin embargo, se presentan diferencias dentro de cada una de las probetas que pertenecen a este ensayo, donde se pueden identificar que también las condiciones de secado de la pintura, en este caso la temperatura y el tiempo de secado en horno el cual es un secado rápido también es un factor que se tiene que tener en consideración a la hora de poner en servicio cualquier superficie y/o material en cualquier área de aplicación. En la Fig. 3.7 se puede

observar que las probetas que sufrieron el mayor efecto de corrosión son aquellas que se secaron a 85 °C, a diferencia de las probetas que se secaron a 65 °C las cuales presentan casi un grado de corrosión nulo, aún más bajo de las probetas secadas a 35 °C.

También analizando el tiempo de secado, se presentan diferencias en el grado de corrosión en las probetas, aun en las probetas secadas a una misma temperatura, por presentar un ejemplo las probetas secadas a 85 °C se diferencian según el tiempo en el cual estas se secaron, siendo la probeta que se secó durante 45 min la que presenta mayor grado de corrosión la cual presenta un grado de corrosión 2 del tipo general (2G) y las probetas secadas durante 15 y 30 min presentaron un grado de corrosión 3 del tipo general (3G); de acuerdo a la norma de la ASTM designación D 610. En las Figs. 3.4 - 3.6 se pueden observar las curvas del porcentaje de evolución de corrosión para el resto de probetas correspondiente al ensayo 1. En este ensayo se empezó a observar defectos en la pintura hasta las 40 h de ensayo en niebla salina, lo cual continuó incrementándose de manera diferente según la condición de secado de cada probeta.

Por lo tanto, para este ensayo las condiciones de secado recomendadas son 65 °C con un tiempo entre 30 y 45 min las cuales presentan según inspección visual un grado de corrosión 8 del tipo general (8G), esto se puede observar en la Fig. 3.5 donde se puede observar que el porcentaje de corrosión de las probetas citadas es el mismo y es el menor comparado con el resto de probetas, también en la Fig. 3.7 se observa que las probetas presentan un grado de corrosión insignificante, aun después de 120 h de ensayo en niebla salina.

➤ Análisis de resultados del ensayo 2:

En este ensayo se visualizan los valores y grados de corrosión más altos respecto al ensayo 1, lo cual se debe a que se ha eliminado el proceso de aplicación de la capa de anticorrosivo en el procedimiento de pintado indicado por el fabricante de pinturas, la omisión del anticorrosivo en la superficie metálica ha provocado que el ataque generado por la atmósfera

corrosiva sea consideradamente alto en todas las probetas correspondientes al ensayo 2, sin embargo se siguen presentando diferencias dentro de cada una de las probetas que pertenecen al ensayo 2, donde se pueden identificar que la condición de secado de la pintura, en este caso las probetas que se secaron a una temperatura de 65 °C sigue siendo la más óptima y además coincide con la temperatura de secado recomendada por el fabricante de pinturas; las probetas secadas a 65 °C presentan valores de corrosión de 7, 6 y 10% lo que corresponde a un grado de corrosión de 4 del tipo general (4G), para las tres probetas secadas con 15, 30 y 45 min, respetivamente.

En términos generales según lo observado se puede concluir que las probetas que sufrieron el mayor porcentaje de corrosión son aquellas que se secaron a 85 °C, seguido de las probetas que se secaron a 35 °C terminando con las probetas con grado de corrosión aún más bajo las cuales se secaron a 65 °C.

También analizando el tiempo de secado, se presentan diferencias en el grado de corrosión en las probetas, aun en las probetas secadas a una misma temperatura, se presenta como ejemplo las probetas secadas a 85 °C se diferencian según el tiempo en el cual estas se secaron, siendo la probeta que se secó durante 30 min la que presenta mayor grado de corrosión la cual presenta un grado de corrosión 0, del tipo general (porcentaje de corrosión de 65%, ver resumen de la norma de la ASTM designación D 610). En las Figs. 3.11, 3.12 y 3.13 se pueden observar las curvas del porcentaje de evolución de corrosión para el resto de probetas correspondiente al ensayo 2. En este ensayo se empezó a observar defectos en la pintura hasta las 24 h de ensayo en niebla salina, lo cual empezó a incrementar de manera diferente según la condición de secado de cada probeta.

Por lo tanto, para este ensayo las probetas con menor porcentaje de corrosión fueron las secadas bajo condiciones de secado de 65 °C con un tiempo entre 15, 30 y 45 min, todas presentan según inspección visual un grado de corrosión 4, del tipo general (4G). También la probeta secada a 35 °C y 15 min presenta un grado de corrosión 4 del tipo general (4G). Esto se

puede verificar en la Tabla 3.4 donde se observa el porcentaje de corrosión de las probetas correspondiente al ensayo 2, todos estos datos obtenidos corresponden a probetas después de 80 h de ensayo en niebla salina.

➤ Análisis de resultados del ensayo 3:

En este ensayo se visualizan los valores y grados de corrosión más altos respecto a los ensayos 1 y 2, y esto se debe a que se ha eliminado el proceso de aplicación de la capa de anticorrosivo en el procedimiento de pintado indicados por el fabricante de pintura, y además se aplicó solamente una capa de pintura y lo recomendado por los técnicos expertos en el trabajo con pinturas es aplicar en la superficie metálica 2 capas de pintura lo que ha provocado que el ataque generado por la atmósfera corrosiva sea consideradamente alto en todas las probetas correspondientes al ensayo 3. Además, se siguen presentando diferencias dentro de cada una de las probetas correspondientes a este ensayo, donde se pueden identificar que la condición de secado de la pintura, en este caso las probetas que se secaron a una temperatura de 65 °C, la cual sigue siendo la más recomendada, a pesar de presentar una superficie totalmente corroída, pero este defecto en la pintura se debe a la omisión de los pasos de la etapa de pintado ya descritos; las probetas secadas a 65 °C presentan valores de corrosión de 20, 30 y 12% lo que corresponde a un grado de corrosión de 2 y 3 del tipo general, para las tres probetas secadas con 15, 30 y 45 min, respetivamente.

En términos generales según lo observado se puede concluir que las probetas que sufrieron el mayor porcentaje de corrosión son aquellas que se secaron a 85 °C, en este caso muy similar a las probetas que se secaron a 35 °C terminando con las probetas con grado de corrosión más bajo las cuales se secaron a 65 °C. Así, se observa que esta tendencia se cumple para los ensayos 2 y 3.

También, analizando el tiempo de secado, se presentan diferencias en el grado de corrosión en las probetas, aun en las probetas secadas a una misma temperatura, se presenta como ejemplo las probetas secadas a 85 °C se diferencian según el tiempo en el cual estas se secaron, siendo la probeta

que se secó durante 45 min la que presenta mayor grado de corrosión la cual presenta un grado de corrosión 0, del tipo general (porcentaje de corrosión de 70%, ver resumen de la norma de la ASTM designación D 610). En las Figs. 3.17 - 3.19 se pueden observar las curvas del porcentaje de evolución de corrosión para el resto de probetas correspondiente al ensayo 3. En este ensayo se empezó a observar defectos en la pintura hasta las 24 h de ensayo en niebla salina, lo cual continuó incrementándose de manera diferente según la condición de secado de cada probeta.

Por lo tanto, para este ensayo las probetas con menor porcentaje de corrosión fueron aquellas bajo condiciones de secado de 65 °C con un tiempo entre 45 min, presenta según inspección visual un grado de corrosión 3 del tipo general (3G). También la probeta secada a 85 °C y 30 min presenta un grado de corrosión 3 del tipo general (3G). Esto se puede verificar en la Tabla 3.5 donde se observa el porcentaje de corrosión de las probetas correspondiente al ensayo 3, todos estos datos obtenidos corresponden a probetas después de 80 h de ensayo en niebla salina.

A continuación, se presenta en la Tabla 3.6 un resumen de los tres ensayos realizados durante este trabajo de graduación, en la cual se presenta los datos de cada una de las probetas que de acuerdo a la norma de la ASTM designación D 610 debe ser reportados, los cuales son grado y tipo de corrosión. Además, se presenta en la Fig. 3.20 los resultados del porcentaje de corrosión de los tres ensayos para efectos de comparación. En la Tabla 3.6 se presenta el resumen de resultados de cada probeta, en la que se reporta el porcentaje de corrosión, grado de corrosión y el tipo según los ejemplos visuales presentados en la norma de la ASTM designación D 610 correspondiente a cada ensayo.

Tabla 3.6. Resumen de resultados de cada ensayo.

Resultado	Condición		Porcentaje de corrosión, %	Grado/Tipo de corrosión
	Temperatura, °C	Tiempo, min		
Ensayo 1	35	15	0.5	6G
		30	0.5	6G
		45	0.3	7G
	65	15	0.3	7G
		30	0.1	8G
		45	0.1	8G
	85	15	16	3G
		30	16	3G
		45	33	2G
Ensayo 2	35	15	8	4G
		30	35	1G
		45	30	2G
	65	15	7	4G
		30	6	4G
		45	10	4G
	85	15	50	1G
		30	65	0G
		45	15	3G
Ensayo 3	35	15	33	2G
		30	30	2G
		45	55	0G
	65	15	20	2G
		30	30	2G
		45	12	3G
	85	15	35	1G
		30	12	3G
		45	70	0G

En la Fig. 3.20 se hace una comparación del porcentaje de corrosión de todas las probetas ensayadas con el fin de observar las tendencias de afectación de cada ensayo realizado de acuerdo a las condiciones y proceso de cada lote de probetas en la cual fueron pintadas y secadas.

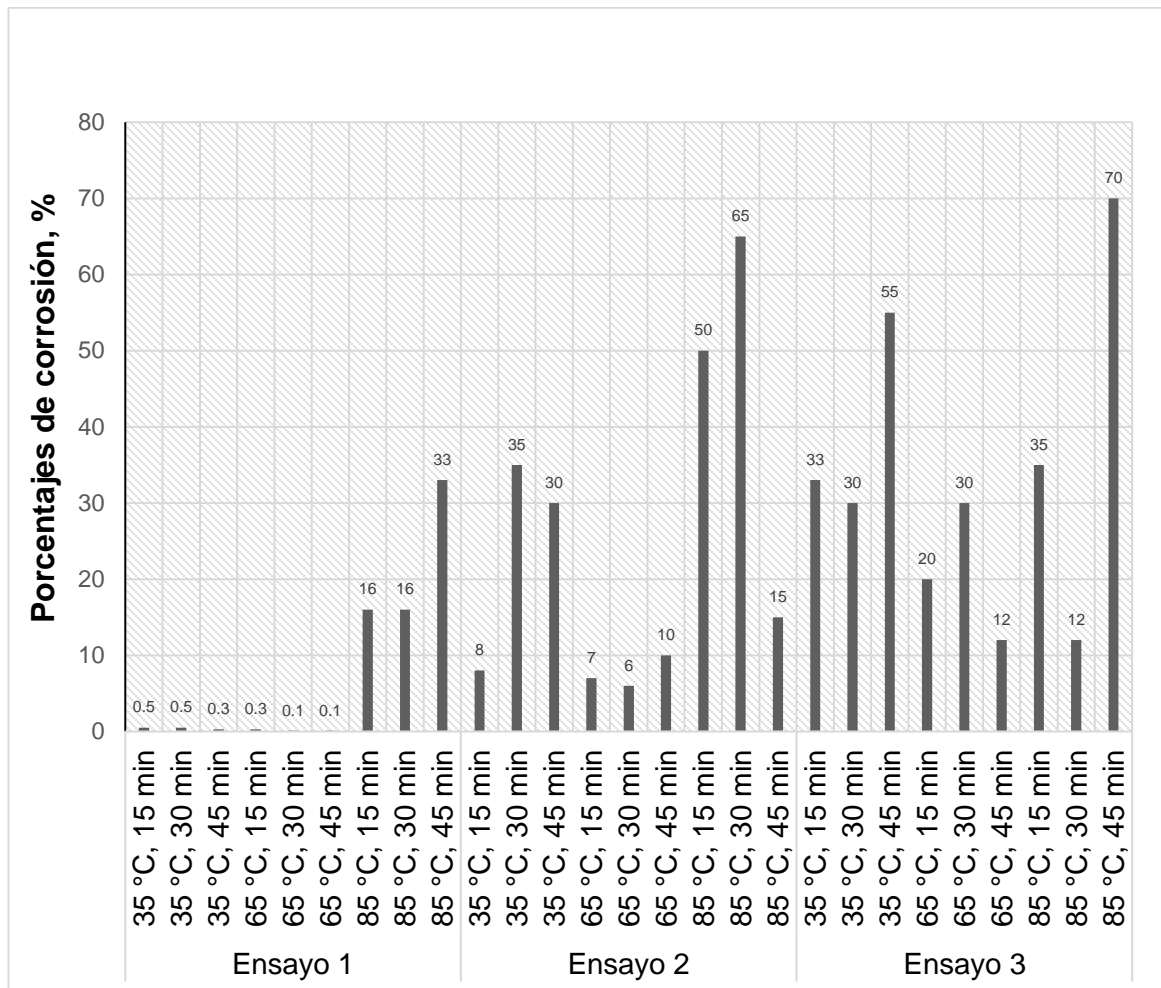


Fig. 3.20. Porcentajes de corrosión de cada probeta y comparación entre cada ensayo.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos durante este trabajo se puede concluir que:

- ✓ Se obtuvo una mayor resistencia a la corrosión en niebla salina para el primer sistema de pintado compuesto por una capa de anticorrosivo, dos capas de base y dos capas de pintura en comparación con el segundo sistema de pintado compuesto por dos capas de base y dos capas de pintura, y para el tercer sistema de pintado compuesto por una capa de base y una capa de pintura, esto probablemente debido a su mayor impermeabilidad.
- ✓ Se observó para los tres sistemas de pintado que la mayor resistencia a la corrosión en niebla salina corresponde a la temperatura de secado al horno de 65 °C, con lo cual se puede decir que esta es la temperatura óptima de secado de la pintura utilizada; además, esta temperatura de secado coincide con la recomendada en la ficha técnica de la pintura aplicada.
- ✓ Para los tres sistemas de pintado y secados al horno a 65 °C, las mayores resistencias a la corrosión en niebla salina se obtuvieron para los tiempos de secado entre 30 y 45 min, con lo cual se estima que este es el intervalo de tiempo en el cual se logra el secado óptimo de la pintura utilizada; además, este intervalo de tiempo de secado coincide con el recomendado en la ficha técnica de la pintura utilizada.
- ✓ El empleo adecuado del proceso utilizado en el sistema de pintado, que comprende en la selección de la pintura, preparación de la superficie metálica a recubrir y la preparación y aplicación de los componentes de cada sistema de pintura es de vital importancia ya que asegura la durabilidad de dichos sistemas de pintura.

- ✓ La capa anticorrosiva protege significativamente la superficie metálica de la acción corrosiva del medio; y la base de la pintura se utilizan para promover la adherencia entre la capa anticorrosiva y la pintura. Así mismo, omitir la aplicación del anticorrosivo o la base para pinturas provoca un daño prematuro en el sistema de pintura y las superficies que se desean proteger ya sean estructuras metálicas, vehículos, muebles, máquinas/herramientas, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gómez De León Hijes, F. C. y Alcaraz Lorente, D. J. (2004). Manual básico de corrosión para ingenieros. España: Universidad de Murcia.
- [2] Roberge, P. R. (2000). Hanbook of corrosion engineering. United States of America: MacGraw-Hill.
- [3] Amigó Borrás, V. y Ferrer Giménez, C. (2005). Tecnología de materiales. México: Alfaomega.
- [4] González Fernández, J. A. (1984) Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión. España: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas.
- [5] Dahbura Ramos, L. E. (2012). Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión. Universidad Nacional, El Salvador.
- [6] Arias Córdoba, C. A. y Calvo Henao, E. y Ochoa Jaramillo, J. I. (2007). Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión: Scientia et Technica Año XIII.
- [7] ASTM Internacional, designación B 117-11 (2011). Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.
- [8] Abarca García, J. (2003) Manual para Mantenimiento Industrial: Pinturas y revestimientos. Costa Rica: EDITORAMA,
- [9] Sherwin Williams Co. (2019). Hoja Técnica: Poliuretano Monocapa Excelbase. Cleveland Ohio, EU. Sherwin Williams. Recuperado de <https://www.sherwinca.com/tienda/automotriz/color-excelbase-monocapa/>.
- [10] ASTM Internacional, designación D 610-2008 (2012). Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces.
- [11] Jiménez, H. J. y Milano, Y. (2017). Corrosión acelerada en medio salino y adherencia de sistemas de pinturas depositadas sobre acero. Mundo Fesc, 13, 48-55.