

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



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

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTOS
ANTICORROSIVOS INHIBIDORES EN CONDICIONES
ACELERADAS APLICANDO LAS NORMAS ASTM D610,
ASTM B117**

PRESENTADO POR:

HERNÁNDEZ SERRANO, MARINA GUADALUPE
PÉREZ JIMÉNEZ, LUIS FERNANDO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

INGRA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRIOS

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

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

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTOS
ANTICORROSIVOS INHIBIDORES EN CONDICIONES ACELERADAS
APLICANDO LAS NORMAS ASTM D610, ASTM B117”**

Presentado por:

MARINA GUADALUPE HERNÁNDEZ SERRANO

LUIS FERNANDO PÉREZ JIMÉNEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

San Salvador, febrero 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

DEDICATORIA

A mi familia, mis padres que siempre me apoyaron en cada una de las decisiones que me llevo a estudiar ingeniería, a mis hermanas que sin su compañía y aliento la vida no sería la misma, a mis abuelas que con sus oraciones y cuidados han estado conmigo en todo momento, a mis amigos y amigas que conocí en la universidad y se convirtieron en familia que ahora celebran conmigo la culminación de este largo trayecto.

Marina Guadalupe Hernández Serrano.

DEDICATORIA

A toda mi familia, mis padres que a pesar de la distancia se mostraban atentos al cumplimiento de todas mis necesidades brindando soporte y aliento en todo el proceso, a mi hermano por siempre escucharme y ayudarme en todo momento.

A todos los amigos que he conocido y con quienes he compartido gratos momentos, tanto compañeros en la facultad de ingeniería como fuera de ella; especial mención a todos mis compañeros de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos que son mi segunda familia.

Papá, lamentablemente ya no estás presente en forma física; la culminación de este sueño no hubiese sido posible sin tu apoyo en todos estos años.

Luis Fernando Pérez Jiménez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, que es quien permite que todo haya sido posible.

A la familia, todo esto no habría sido posible sin su apoyo en este largo camino. A mis padres que fueron un apoyo incondicional en mi carrera universitaria. A mis hermanos y hermanas que siempre han sido mi compañía y voz de apoyo, a mis abuelas por sus enseñanzas.

A la Universidad de El Salvador, a la facultad de Ingeniería y Arquitectura que forja profesionales ciudadanos con criterio de investigación, a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos por todo el aprendizaje recibido en cada materia especializada de la carrera, mención especial para el docente y asesor en este trabajo de investigación Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez por toda la paciencia y apoyo en este proceso. Ing. Sara Orellana e Ing. Delmy Rico por la oportuna asesoría y apoyo en la edición de este documento.

A todos mis compañeros futuros ingenieros químicos e ingenieros de alimentos, que siempre me brindaron su ayuda con quienes he compartido estos últimos años.

RESUMEN

La calidad de los sistemas de recubrimientos es determinante para garantizar la funcionalidad y durabilidad de los componentes industriales. El objetivo de esta investigación se centra en la evaluación del comportamiento frente a la corrosión y la adherencia de sistemas de pinturas anticorrosivas con inhibidor.

Se estudiaron los mecanismos a nivel teórico que propician la corrosión en los metales, así como los mecanismos de protección, poniendo énfasis en la protección aplicando recubrimientos y en especial aquellos con acción inhibidora.

Se evaluó en medio acelerado, utilizando una cámara de niebla salina, de acuerdo con las metodologías establecidas en las normas ASTM B117y ASTM D610. El efecto anticorrosivo se determinó por medio de las normas ASTM D154 para evaluación de muestras pintadas o revestidas sometidas a ambientes corrosivos y ASTM D174-25 para evaluación del grado de ampollamiento en pinturas. Se evaluaron 3 distintos anticorrosivos de tipo inhibidor con presencia en el mercado salvadoreño.

Los resultados evidencian que para elegir el tipo de recubrimiento es necesario evaluar las condiciones a las que será sometida el metal que se quiere proteger, ya que los recubrimientos de tipo anticorrosivo con inhibidores no es el mejor ante una atmosfera salina, además de las limitaciones con las que se cuentan para la evaluación de un sistema de protección únicamente mediante la aplicación de ensayos de laboratorio de forma controlada.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL	2
1.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACION	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo General:	3
1.2.2. Objetivos Específicos:	3
1.3. LIMITANTES	4
1.4. RESULTADOS ESPERADOS	5
1.5. JUSTIFICACION	6
CAPITULO II. MARCO TEORICO	7
2.1. CONCEPTO DE CORROSIÓN	7
2.2. TIPOS DE CORROSIÓN	7
2.2.1. Corrosión por deterioro uniforme	8
2.2.2. Corrosión galvánica entre dos metales	8
2.2.3. Corrosión por picadura	8
2.2.4. Corrosión por grietas	8
2.2.5. Corrosión intergranular	9
2.2.6. Corrosión bajo tensión	9
2.2.7. Corrosión erosiva	9
2.2.8. Daño por cavitación	10
2.2.9. Corrosión por desgaste	10

2.2.10. Corrosión selectiva o desaleante	10
2.3. MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSION	11
2.3.1. Selección de materiales	11
2.3.2. Diseño	13
2.3.3. Alteraciones del ambiente	14
2.3.4. Protección Catódica	15
2.3.4.1. Protección catódica mediante ánodos de sacrificio	16
2.3.4.2. Protección catódica por corriente impresa	17
2.3.5. Uso de recubrimientos	18
2.3.5.1. Recubrimientos tipo barrera.	18
2.3.5.2. Recubrimientos inhibidores.	19
2.3.5.3. Mecanismo de inhibición de la corrosión	23
2.4. PRUEBAS DE CORROSION Y MONITOREO. EQUIPOS	27
2.4.1. Ensayo de niebla en cámara salina	30
2.4.2. Cámara de intemperismo Q-FOG	30
2.5. EVALUACIONES DE DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVOS	33
2.5.1. Norma ASTM D610	33
2.5.2. Norma ASTM B117	34
2.5.2.1. Importancia y uso	34
2.5.2.2. Equipo	34
2.5.2.3. Muestras	35
2.5.2.4. Condiciones en la cámara de niebla salina	35
2.6. MERCADO SALVADOREÑO DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS	36

2.7. CONSECUENCIAS DE NO UTILIZAR METODOS DE CONTROL DE LA CORROSION	36
CAPITULO III. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS	38
3.1. ENFOQUE METODOLOGICO	38
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	38
3.2.1. Materiales y Equipos:	38
3.2.2. Procedimiento experimental	39
3.2.2.1. Preparación de las planchas metálicas:	39
3.2.2.2. Preparación de los anticorrosivos.	39
3.2.2.3. Aplicación de los anticorrosivos en las planchas metálicas	40
3.2.2.4. Secado, preparación, colocación de las muestras en la cámara de intemperismo acelerado	40
3.2.2.5. Toma de datos	43
3.2.3. Proceso de medicion	42
3.2.3.1. Ampollamiento de película	42
3.2.3.2. Oxidación superficial	43
3.2.3.3. Corrosión en la incisión	43
3.2.3.4. Efecto Anticorrosivo	44
3.3. DATOS OBTENIDOS	45
3.4. ANÁLISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS	49
CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	54

ANEXOS	56
Anexo A. Condicion inicial de las LÁMINAS según anticorrosivo, medidas de espesores y variables estadísticas involucradas	56
Anexo B. Comparadores visuales y tabla comparativa para la evaluación criterio ampollamiento de película	59
Anexo C. Ejemplos visuales y tabla comparativa para la evaluación criterio oxidación superficial.	64
Anexo D. Tabla comparativa para la evaluación criterio corrosión en la incisión	68
Anexo E. Compilado de las muestras por triplicado para cada anticorrosivo: 100, 200 y 300 horas en la cámara salina	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas QFOG- CCT600.	32
Tabla 2.2. Parametros en un ensayo de cámara salina según ASTM B117	35
Tabla 3.1. Ponderación del rendimiento de muestra Anticorrosivo 1	46
Tabla 3.2. Ponderación del rendimiento de muestra Anticorrosivo 2	47
Tabla 3.3 Ponderación del rendimiento de muestra Anticorrosivo 3	48
Tabla 3.4. Comparativa calificación de desempleo de los Anticorrosivos 1, 2 y 3	49
Tabla 3.5. Comparativa antes y después de 300 horas en intemperismo acelerado para cada muestra	50
Tabla A.1. Fotografías de las láminas utilizadas con Anticorrosivo 1. Variables estadísticas representativas por muestra.	56
Tabla A.2. Fotografías de las láminas utilizadas con Anticorrosivo 2. Variables estadísticas representativas por muestra.	57
Tabla A.3. Fotografías de las láminas utilizadas con Anticorrosivo 3. Variables estadísticas representativas por muestra.	58
Tabla B.1. Escala y descripción de los valores de ampollamiento de película	63
Tabla C.1. Escala y descripción de los valores de oxidación superficial	67
Tabla D.1. Daño de la corrosión sobre la incisión.	68
Tabla E.1. Fotografías muestras por triplicado para Anticorrosivo 1 luego de 100, 200 y 300 horas en cámara Q-FOG	69
Tabla E.2. Fotografías muestras por triplicado para Anticorrosivo 2 luego de 100, 200 y 300 horas en cámara Q-FOG	70
Tabla E.3. Fotografías muestras por triplicado para Anticorrosivo 3 luego de 100, 200 y 300 horas en cámara Q-FOG	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio	17
Figura 2.2. Curva de polarización anódica y catódica con protección anódica y sin protección anódica	21
Figura 2.3. Mecanismo de acción de un revestimiento de Zinc	22
Figura 2.4. Mecanismo de acción en pigmento inhibidor (pasivación).	25
Figura 2.5. Equipo de inmersión continua con flujo de alta y baja velocidad	29
Figura 2.6. Esprea de niebla en máquina de intemperismo Q-FOG	31
Figura 2.7. Diagrama de funcionamiento interno de Máquina de intemperismo Q-FOG	31
Figura 2.8. Variación de temperatura y humedad relativa en el tiempo	32
Figura 3.1. a) Parámetros de control para el funcionamiento de Cámara Q-FOG, b) Muestras metálicas en Cámara Q-FOG	41
Figura 3.2. Procedimiento anterior a la toma de mediciones para determinación de incisión en la corrosión	44
Figura B.1. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 2.	59
Figura B.2. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 4.	60
Figura B.3. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 6.	61
Figura B.4. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 8.	62
Figura C.1. Ejemplos comparativos de porcentajes de áreas de oxidación (0.03% - 0.3%)	64
Figura C.2. Ejemplos comparativos de porcentajes de áreas de oxidación (1% - 10%)	65
Figura C.3. Ejemplos comparativos de porcentajes de áreas de oxidación (16% - 50%)	66

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS.

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

REDOX: Reacción Reducción - Oxidación.

ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.

SCC: Corrosión bajo tensión.

pH: Potencial de Hidrógeno.

C_{agg}: Concentración de anión agresivo.

C_{inh}: Concentración de anión inhibidor.

Q-LAB: Marca comercial.

Q-FOG: Cámara salina (Nombre comercial).

W_A: Promedio ancho de la falla en la incisión.

W: Ancho de la incisión inicial de aproximadamente 0.35 mm.

INTRODUCCION

Proteger los metales de los ataques corrosivos ha sido un reto para ingenieros de todas las áreas en la industria, este fenómeno representa grandes pérdidas de dinero en equipos y paros en medio de la producción por mantenimiento correctivo, para evitar este problema existen muchos métodos de protección como: selección de materiales más resistentes como el tungsteno, un buen diseño del equipo, condiciones de ambiente controladas, protección catódica y uso de recubrimientos.

Al utilizar recubrimientos se espera que tenga durabilidad y funcionalidad en los componentes recubiertos, para conocer si el mercado ofrece estas características y entender cómo funcionan estos sistemas de pinturas específicos para la protección de la corrosión, es necesario evaluar su comportamiento en condiciones especiales, para ello, existen normas que describen metodologías para las diferentes etapas desde la aplicación del recubrimiento en la superficie con La norma ASTM D154 hasta las condiciones de temperatura, presión, tiempo con la norma ASTM D610 y finalmente obtener resultados mediante la evaluación de los especímenes después de sometido a las pruebas con norma ASTM D610.

Una decisión a nivel técnico debe ser tomada en virtud de datos objetivos que nos brindan las normas antes mencionadas, así como el conocimiento de las limitantes de los ensayos que se han empleado para la evaluación de un recubrimiento, el factor de criterio técnico es el cual, a final determina que acciones pueden tomarse ante esta problemática a nivel mundial.

CAPITULO I. MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

El presente trabajo de aplicación se guía a partir de los objetivos que se desean alcanzar y que se han trazado como equipo de trabajo, para la obtención de resultados esperados que se muestran y que son función de las limitaciones temporales y espaciales.

1.1. DESCRIPCION DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

Se desarrollarán técnicas de evaluación del desempeño en condiciones aceleradas para diferentes muestras de recubrimientos anticorrosivos por medio de la norma ASTM D610 asociadas a la factibilidad de los mismos como métodos de protección.

Realizando un estudio a nivel teórico de los factores que influyen en los procesos de corrosión para materiales metálicos y el mecanismo de acción de los métodos inhibidores enfocándose en el área de los recubrimientos, haciendo uso de condiciones aceleradas y protocolos normados mediante la norma ASTM B117; para su posterior descripción de forma cualitativa de los distintos efectos de la corrosión en las muestras con distintos tipos de recubrimientos anticorrosivos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL:

Evaluar el Desempeño de recubrimientos anticorrosivos aplicando las normas ASTM D610 y ASTM B117.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- a. Analizar los distintos tipos de protección con inhibidores mediante recubrimientos anticorrosivos y su mecanismo de acción.

- b. Usar las normas ASTM D610 y ASTM B117 y normas auxiliares, como protocolos estandarizados, en la evaluación de muestras de recubrimientos anticorrosivos en condiciones aceleradas.

- c. Caracterizar el avance de la corrosión en cada una de las muestras de recubrimientos anticorrosivos en el desarrollo de las pruebas durante 300 horas en condiciones aceleradas.

- d. Determinar la viabilidad técnica de cada muestra de recubrimiento anticorrosivo en la protección de metales.

1.3. LIMITANTES

- i. El mecanismo de control de la corrosión a analizar será el uso de recubrimientos, con características anticorrosivas de forma general, poniendo énfasis en aquellos recubrimientos anticorrosivos de tipo inhibidor que se encuentren disponibles en el mercado salvadoreño.
- ii. Evaluación con las Normas Estandarizadas ASTM D610 y ASTM B117 junto con las normas auxiliares y complementarias ASTM D154 y ASTM D174 como procedimientos objetivos para la evaluación de tres distintas muestras de anticorrosivos de tipo inhibidor.
- iii. Determinación de factibilidad técnica de cada uno de los tres recubrimientos seleccionados a estudio, a partir de los resultados obtenidos tanto de manera cualitativa como cuantitativa luego del ensayo.
- iv. El tiempo estimado de duración de la prueba dependerá del comportamiento de los recubrimientos con un máximo de 300 horas.

1.4. RESULTADOS ESPERADOS

- i. Mediante la aplicación de las normas ASTM D610 y ASTM B117 y las normas auxiliares ASTM D154 y ASTM D174, evaluar los aspectos importantes en el desempeño de muestras de recubrimientos anticorrosivos en condiciones aceleradas.
- ii. A partir de una investigación bibliográfica, conocer los mecanismos en los que una protección con inhibidores mediante recubrimientos anticorrosivos ayuda a la preservación de las características deseables en un metal en el tiempo.
- iii. Cuantificar el avance de la corrosión en el sustrato de las muestras de recubrimiento anticorrosivos, identificando la cantidad de ampollamiento y la superficie que presenta corrosión.
- iv. Con los datos colectados, evaluar la efectividad de los distintos recubrimientos

1.5. JUSTIFICACION

La corrosión es un problema que tiene consecuencias en el día a día de las personas, de forma análoga representa un factor importante en aspectos económicos y sociales en el sector industrial.

Las reacciones que son las causantes del desgaste de los metales como producto de la oxidación de los mismos son de índole espontánea, es decir, no se necesitan condiciones especiales para que la corrosión suceda en un sistema; por lo tanto, se deben hacer uso de medidas de control evitando daños que puedan ser catastróficos.

Los métodos de control de la corrosión son diversos y hacen uso de mecanismos físicos y químicos modificando las condiciones en las que suceden las reacciones REDOX; un mecanismo muy utilizado en ambientes domésticos así como en entornos industriales, por la facilidad de uso, eficiencia y buen rendimiento, es la aplicación de recubrimientos; como cualquier método de control es un método que debe ser evaluados de manera objetiva mediante el uso de procedimientos Normados para la toma de decisiones y concluir si el método de control utilizado es útil para las características del sistema a proteger.

En el trabajo de aplicación, se muestra una metodología clara y objetiva, a partir de Normas Internacionales, para la evaluación de distintas muestras de anticorrosivos en un ensayo de laboratorio a condiciones aceleradas, condiciones de operación de igual forma, normadas mediante Normas Internacionales, la metodología presentada permite la toma de decisiones respecto a la factibilidad de los anticorrosivos empleados.

La selección de un correcto recubrimiento anticorrosivo permite un mejoramiento en costos y seguridad en los sistemas a proteger; evitando gastos innecesarios y accidentes laborales.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1. CONCEPTO DE CORROSIÓN

El término corrosión es definido de muchas maneras, pero la interpretación usual del concepto es la siguiente: un ataque en el material metálico por reacción con el ambiente en el que se encuentra. (R. Winston, 2008)

Cuando la corrosión como reacción química, su velocidad dependerá de factores como la temperatura y la concentración de los elementos que participan en la reacción, el esfuerzo mecánico y la erosión también son elementos que influyen.

El ataque químico de los metales ocurre por un ataque electroquímico donde los electrones libres establecen pilas electroquímicas. Este tipo de reacciones necesitan un electrolito conductor, habitualmente es el agua, por lo que se le conoce como “corrosión acuosa”. Los metales pueden ser corroídos por ataque químico por soluciones químicas. Cuando la degradación se da por altas temperaturas la reacción química con el medio se conoce como “Corrosión seca”.

2.2. TIPOS DE CORROSIÓN

Los tipos de corrosión según la apariencia del metal, son: (R. Winston, 2008)

- i. Corrosión por deterioro uniforme o general
- ii. Corrosión por esfuerzo
- iii. Corrosión galvánica o entre dos metales
- iv. Corrosión erosiva
- v. Corrosión por picadura
- vi. Corrosión por grieta
- vii. Corrosión intergranular
- viii. Corrosión bajo tensión
- ix. Corrosión por desgaste
- x. Disolución selectiva o desaleante
- xi. Corrosión seca

2.2.1. CORROSIÓN POR DETERIORO UNIFORME

Se caracteriza por una reacción química que actúa uniformemente sobre toda la superficie del metal expuesto a la corrosión. El deterioro uniforme representa la mayor destrucción de los metales, especialmente de los aceros. Se puede controlar mediante: (R. Winston, 2008)

1. Coberturas protectoras
2. Inhibidores
3. Protección catódica

2.2.2 CORROSIÓN GALVÁNICA ENTRE DOS METALES

Cuando dos o más tipos diferentes de metal entran en contacto en presencia de un electrolito, se forma una celda galvánica por los diferentes potenciales de reducción. El electrolito suministra un medio que hace posible la migración de iones desde el ánodo hasta el cátodo. Esto lleva a la corrosión del metal anódico (con menor potencial de reducción) a la vez que la corrosión del metal catódico (mayor potencial de reducción) se detiene. (R. Winston, 2008)

2.2.3. CORROSIÓN POR PICADURA

La picadura es una forma de ataque corrosivo localizado que produce pequeños agujeros en un metal. Este tipo de corrosión es muy destructivo, puede requerir meses o años para perforar una sección metálica, pero después de iniciar, los agujeros crecen a gran velocidad. La mayoría de estas se desarrollan y crecen en la dirección de la gravedad y sobre las superficies más bajas de los equipos de ingeniería. Se cree que la propagación de un agujero trae consigo la disolución del metal en el agujero mientras se mantiene un alto grado de acidez en el fondo. (R. Winston, 2008)

2.2.4. CORROSIÓN POR GRIETAS

La corrosión por grietas es una forma de corrosión electroquímicamente localizada que puede presentarse en hendiduras y bajo superficies protegidas donde pueden existir soluciones estancadas. Es frecuente bajo juntas, remaches, pernos y tornillos, entre válvulas y sus asientos, bajo depósitos porosos y

en muchos lugares similares. Se produce en muchos sistemas de aleaciones como el acero inoxidable y aleaciones de titanio, aluminio y cobre.

Este tipo de corrosión ocurre la grieta ha de ser suficientemente ancha para permitir que se introduzca líquido, pero a la vez lo bastante estrecha para mantener estancado el líquido. Las juntas fibrosas, que pueden actuar como mechas para absorber una solución electrolítica y a la vez mantenerla en contacto con la superficie metálica, son localizaciones ideales para la corrosión por grieta. (R. Winston, 2008)

2.2.5. CORROSIÓN INTERGRANULAR

Es un deterioro por corrosión localizada o adyacente a los límites de grano de una aleación. Bajo condiciones ordinarias si un metal se corroe uniformemente, los límites de grano serán solo ligeramente más reactivos que la matriz. Sin embargo, bajo otras condiciones, las regiones de límite de grano pueden ser muy reactivas, resultando una corrosión intergranular que origina pérdida de la resistencia de la aleación e incluso la desintegración en los bordes de grano. (R. Winston, 2008)

2.2.6. CORROSIÓN BAJO TENSIÓN

La rotura por corrosión por esfuerzo o bajo tensión se refiere a la rotura originada por la combinación de efectos de tensiones intensas y corrosión específica que actúa en el entorno del metal. Durante la corrosión bajo tensión el ataque que recibe la superficie del metal es generalmente muy pequeño mientras que las grietas aparecen claramente localizadas y se propagan a lo largo de la sección del metal. (R. Winston, 2008)

2.2.7. CORROSIÓN EROSIVA

Se puede definir como la aceleración en la velocidad de ataque corrosivo al metal debida al movimiento relativo de un fluido corrosivo y una superficie de metal. Cuando el movimiento relativo del fluido corrosivo es rápido, los efectos del desgaste mecánico y abrasión pueden ser severos. La corrosión erosiva está caracterizada por la aparición en la superficie del metal surcos, valles, hoyos, agujeros

redondeados y otras configuraciones dañinas de la superficie del metal, las cuales generalmente se presentan en la dirección de avance del fluido corrosivo. (R. Winston, 2008)

2.2.8. DAÑO POR CAVITACIÓN

Es causada por la formación e implosión de burbujas de aire o cavidades llenas de vapor, en un líquido que se encuentra cerca de la superficie metálica. La cavitación ocurre en la superficie de un metal donde el líquido fluye a gran velocidad y existen cambios de presión, como, por ejemplo, impulsores de bomba y propulsores de barco. Cuando suceden numerosas implosiones puede hacerse un daño considerable a la superficie del metal. Separando las películas superficiales y arrancando partículas de metal de la superficie, la cavitación puede incrementar la velocidad de corrosión y originar desgastes superficiales. (R. Winston, 2008)

2.2.9. CORROSIÓN POR DESGASTE

Este tipo de corrosión tiene lugar en las interfaces entre materiales bajo carga, es decir en servicio, sometidos a vibración y deslizamiento. La corrosión por desgaste aparece como surcos o agujeros rodeados de productos de corrosión.

En el caso de la corrosión por desgaste de metales, se observa que los fragmentos de metal entre las superficies rozadas están oxidados y algunas capas de óxido se encuentran disgregadas por la acción del desgaste. Como resultado se produce una acumulación de partículas de óxido que actúan como un abrasivo entre superficies con un ajuste forzado, tales como las que se encuentran entre ejes y cojinetes o mangas. (R. Winston, 2008)

2.2.10. CORROSIÓN SELECTIVA O DESALEANTE

Es la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida por procesos corrosivos. El ejemplo más común de este tipo de corrosión es el descalcificado que tiene lugar en los latones, consistente en la eliminación selectiva del cinc que está aleado con cobre. Procesos similares también ocurren en otras aleaciones, como la pérdida observable de níquel en aceros. (R. Winston, 2008)

2.3. METODOS DE CONTROL DE LA CORROSION

Existen principalmente 5 métodos para el control de la corrosión:

1. Selección de materiales
2. Diseño
3. Alteraciones del ambiente
4. Protección catódica
5. Uso de recubrimientos

Se elige o eligen los mecanismos idóneos de control a partir del contexto en el que se desarrolla el proceso de corrosión junto con el análisis económico del mismo (Einar, 2003). Se explicarán en qué consisten cada uno de estos métodos de control, haciendo énfasis en el último, el cual dividiremos en dos principales grupos:

- a. Uso de recubrimientos tipo barrera.
- b. Recubrimientos inhibidores.

El uso de recubrimientos inhibidores se estudiará más a detalle ya que es lo que este trabajo de investigación pretende analizar.

2.3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES

Una selección de materiales optima podría ahorrar mucho dinero a las empresas que enfrentan problemas de corrosión, sin embargo, no es uno de los métodos de control a los que se le preste la atención debida; en ocasiones debido a un factor económico en el que se deben elegir materiales de menor costo sin ser los más indicados en los entornos de operación. Además de eso, debe entenderse de las demás funciones que la estructura tendrá y por tanto las características que el material debe cumplir y que podrían ser más importantes que su comportamiento ante el fenómeno de la corrosión.

De forma general, el proceso de selección de materiales debe iniciar con una lista de los requerimientos necesarios para el material en cuestión debido a las condiciones en que estará expuesto, una selección y evaluación de los posibles

materiales y por último la elección de la alternativa económicamente viable. Entonces, la selección de materiales se vuelve un proceso en el que se deben equilibrar factores técnicos y económicos (ASTM International, 2000)

Desde el punto de vista técnico estos pasos que deben seguirse en la mayoría de los procesos de selección de materiales (esto debido a industrias excepcionales en las que el orden de prioridades puede ser otro), deben ser de forma general (ASTM International, 2000):

1. Caracterización de las condiciones de operación: Mediante un estudio del ambiente corrosivo y las condiciones de los equipos de operación.
2. Análisis del Diseño: El diseño de las estructuras o equipos de los que el material será componente debe considerarse, no es lo mismo la selección de un material para la construcción de un tanque, que para un reactor en un proceso químico sofisticado.
3. Selección de los materiales candidatos: Luego del estudio del ambiente corrosivo, las condiciones de operación de los equipos y el diseño del mismo, junto con posibles experiencias en el uso de ciertos materiales, se realiza una primera selección.
4. Ensayos de prueba para los materiales: Se realizan pruebas específicas para los materiales seleccionados según la función que van a desempeñar.
5. Cumplimiento de especificaciones: Los materiales seleccionados deben cumplir con todos los requisitos de aplicación según estándares normados (ASTM, por ejemplo).
6. Requisitos de fabricación: Deben seguirse los procedimientos normados para la fabricación de los equipos, los códigos de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecanismo (ASME) se usan en equipos de la industria química, energía y nuclear; los códigos API en la industria de la refinería y los códigos ANSI para tuberías.
7. Seguimiento y monitoreo.

2.3.2. DISEÑO

La fase de diseño es la primera y más importante etapa en el control de la corrosión ya que mediante una buena realización de la misma se pueden anticipar problemas de corrosión en el proceso y equipos, disminuyendo las pérdidas económicas que subyacen de los mismos, se complementa con la selección de materiales como fases a realizar antes de poner en marcha el proceso.

La mayoría de los tipos de corrosión son afectados en mayor o menor medida por la geometría de los equipos o instalaciones, es decir por los factores de diseño: la corrosión galvánica, corrosión por cavidades, erosión y cavitación, SCC y demás. (Einar, 2003)

La fase de diseño es un trabajo holístico, por lo tanto, debe conformarse un equipo multidisciplinario el cual analice de todos los puntos de vistas posibles cada bosquejo sobre el diseño de un equipo o instalación, equipo conformado tanto por personal técnico como operarios.

En general, las 4 etapas simples a seguir en las fases de diseño son: (ASTM International, 2000)

1. Definir la función deseada por el componente: Incluye un orden en prioridades de cada una de las funciones a realizar.
2. Definir el ambiente de servicio: Deben considerarse tanto las condiciones “normales” de operación como aquellas no habituales (corte en el proceso de producción y demás).
3. Selección de materiales, procedimientos de fabricación y detalles del proceso: Un proceso iterativo en el que se busca la satisfacción de todos los requerimientos en operación.
4. Seguimiento y monitoreo.

Algunas pautas generales que se pueden considerar a la hora de realizar un diseño son: (Einar, 2003)

- a. Mostrar un diseño con suficiente tolerancia a la corrosión (evitar paredes demasiado delgadas).
- b. Diseños en los que los componentes con mayor tendencia a corroerse serán fáciles de reemplazar.
- c. En diseños abiertos, permitir un drenaje fácil y amplio suministro de aire.
- d. Diseños con fácil drenaje, limpieza e inspección.
- e. Evitar los puntos calientes y fríos.
- f. Minimice los daños por corrosión estudiando el entorno.
- g. Evitar daños por corrosión en componentes que soportan altas cargas.
- h. Preferir geometrías simples y evitar la heterogeneidad, así como los cambios bruscos en el sistema.
- i. Diseñe para velocidades de flujo compatibles a la selección de materiales.
- j. Ajuste la presión en juntas para evitar la entrada de líquidos en hendiduras.

2.3.3. ALTERACIONES DEL AMBIENTE

El ambiente en el que los equipos o instalaciones se encuentran, juegan un papel importante en el control de la corrosión.

En general las variables a controlar (en el control de la corrosión) en relación con el ambiente son: (ASTM International, 2000):

- i. pH
- ii. Potencial electroquímico
- iii. Temperatura
- iv. Presencia de especies que perjudican o benefician la corrosión
- v. Caudal
- vi. Concentración del ambiente corrosivo

Por tanto, en el orden que se muestra, las medidas que se pueden tomar para disminuir la velocidad de corrosión en el ambiente, en el orden que se muestran, son: (Einar, 2003)

1. Modificación en la temperatura
2. Modificación en la velocidad de flujo
3. Modificación en el contenido de oxígeno o especies agresivas
4. Adición de inhibidores

En la mayoría de las ocasiones al disminuir los parámetros de los 3 primeros ítems, disminución en la temperatura, velocidad de flujo y concentración de oxígeno y/o especies agresivas; la velocidad de corrosión disminuye.

2.3.4. PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica es un método de control de la corrosión empleado para sistemas con un ambiente corrosivo alto (estructuras sumergidas en agua o enterradas en suelos con baja resistividad, por ejemplo); es un método utilizado desde hace casi 200 años y pudiéndose ser empleado virtualmente para todos los metales, específicamente para el acero, en la industria (ASTM International, 2000).

El principio por el que sucede la protección catódica es bastante simple; se basa en la aplicación de una corriente catódica externa (que puede darse mediante una fuente de voltaje externa o producto de una relación en la serie galvánica favorable) que minimiza los efectos de disolución en el ánodo. Usualmente la protección catódica es utilizada en sistemas donde el principal método de control de la corrosión es el uso de recubrimientos, debido a las grandes demandas energéticas en las que se incurren si fuese el método principal de control y protección. (Roberge, 2000)

Existen 2 formas de emplear protección catódica:

- i. Protección catódica mediante ánodos de sacrificio.
- ii. Protección catódica por corriente impresa

2.3.4.1. PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE ÁNODOS DE SACRIFICIO

La mayoría de las instalaciones Offshore usan como método de control, la protección catódica por ánodos de sacrificio y es la única protección que puede brindarse en algunas estructuras sumergidas. (Einar, 2003)

La protección catódica que usa ánodos de sacrificio hace uso de un proceso de modificación en el potencial de celda en una reacción de corrosión galvánica. Básicamente el principio radica en conectar ánodos externos de sacrificio los cuales actuarán como la parte anódica al conectarse de manera física con la estructura (Véase Figura 2.1.); idealmente como resultado del flujo de corriente galvánica, la estructura se protegerá de forma íntegra. Para lograr este fin, generalmente deben colocarse varios ánodos de sacrificio a lo largo de la estructura. (Roberge, 2000)

Los ánodos de sacrificio más empleados en la protección de aceros estructurales son los que están compuestos por Zinc o Magnesio. Deben comprobarse que, para ser usados de forma eficaz, sean aleaciones de Zinc y Magnesio de alta pureza, los ánodos de Magnesio ofrecen la ventaja de brindar un mayor voltaje de conducción, aunque con una eficiencia menor (50%) que los ánodos de Zinc (eficiencia alrededor del 90%). (Roberge, 2000)

Algunas de las ventajas que ofrece la protección catódica mediante ánodos de sacrificio ante otros mecanismos de control de la corrosión, son: (Roberge, 2000)

- a. Fácil instalación
- b. No requiere de fuentes de energía eléctrica externas.
- c. Fácil mantenimiento del sistema.
- d. El sistema básicamente se autorregula.
- e. Relativo bajo riesgo de sobreprotección.

Sin embargo, también se pueden mencionar algunas de sus limitantes: (Roberge, 2000)

- a. Limitada producción de corriente.
- b. En estructuras muy grandes o ambientes muy corrosivos, se necesitan varias unidades de ánodos de sacrificio.
- c. En ambientes muy corrosivos, se deben reemplazar con frecuencia.
- d. Aumentan el peso de la estructura.

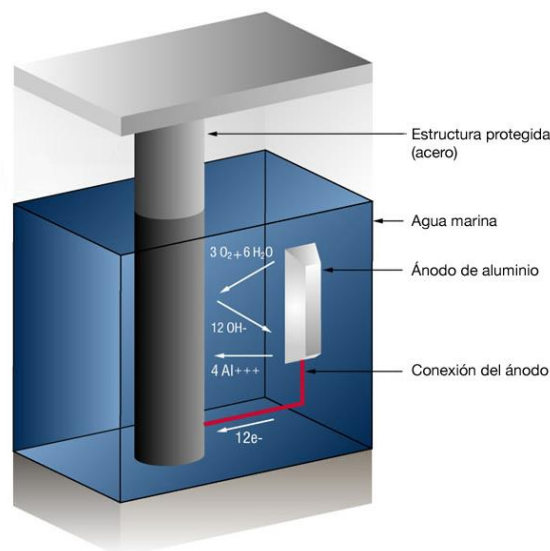


Figura 2.1. Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio. Fuente: (Moscol-Sandoval, 2013)

2.3.4.2. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

Los sistemas por Corriente Impresa hacen uso de una fuente externa a diferencia de los ánodos de sacrificio, las zonas que actúan como anódicas tienden a tener tasas de consumo muchas veces más bajas. Los sistemas por corriente impresa son utilizados como protección catódica en ambientes con electrolitos de alta resistencia, donde se tienen requerimientos altos de corriente. (Roberge, 2000)

Materiales con alta resistencia a la corrosión, hacen las veces de estructuras anódicas como parte de las instalaciones por corriente impresa, entre estos, los más usados son Pt, magnetita, grafito y hierros con alto contenido en silicio. (Einar, 2003)

Las ventajas que este método de protección catódica ofrece, son: (Roberge, 2000)

- i. Se puede hacer uso de altos valores de corriente.
- ii. Protección de áreas grandes de metal.
- iii. Poder “ajustar” el grado de protección.
- iv. Puede ser usado incluso en estructuras con malos revestimientos.

Sin embargo, la protección catódica por corriente impresa nos presenta limitantes como las que se mencionan: (Roberge, 2000)

- a. Coste por suministro de energía externa (fase de diseño y operativa).
- b. Mayor riesgo de daños por sobreprotección.
- c. Mantenimiento económicamente más caro que la protección con ánodos de sacrificio.

2.3.5. USO DE RECUBRIMIENTOS

El uso de recubrimientos como método de control de la corrosión, es el más utilizado, dejando de lado los entornos industriales, los revestimientos son usados incluso en la protección ante la corrosión de estructuras en ambientes urbanos como tareas domésticas, por tanto, suelen ser de fácil uso (según su función).

Los recubrimientos, brindan protección ante la corrosión a los sistemas por alguno(s) de los 3 mecanismos que se mencionan: (Einar, 2003)

- a. Efecto de barrera, donde se busca la nula interacción entre el medio y el sustrato metálico
- b. Protección catódica, cumpliendo las funciones “sacrificiales” que ya se mencionaron en el apartado anterior.
- c. Inhibidores, incluyéndose casos con protección anódica.

2.3.5.1. RECUBRIMIENTOS TIPO BARRERA.

De los métodos de protección para la corrosión, uno de los más fáciles de aplicar y también de menor costo, es el uso de recubrimientos efecto barrera; este tipo de revestimientos pueden ser aplicados en procesos de fijación utilizando el calor

(fundiendo los componentes del revestimiento en el sustrato) o bien de forma más simple mediante una aplicación simple en la superficie metálica mediante brocha o rodillo. (EONCOAT, 2016)

A menudo, al ser un proceso de protección totalmente físico, algunas imperfecciones pueden dar lugar a ataques concentrados creando pequeñas celdas galvánicas, propiedad que se multiplica al estar en contacto con otro metal disímil en la serie galvánica (sistema tubería-bomba, por ejemplo). Existe una diversidad de composiciones químicas para los recubrimientos efecto barrera que permitan puedan ser usados en distintos entornos, como el caso de los cerámicos utilizados para prevenir la corrosión en ambientes de alta temperatura. (ASTM International, 2000)

Actualmente la mayoría de los sistemas de pintura, brindan además de una protección de barrera (física), una capa de componentes inhibidores (química) potenciando el efecto protector. (EONCOAT, 2016)

2.3.5.2. RECUBRIMIENTOS INHIBIDORES.

En contraste con los recubrimientos desarrollados sobre la base de impermeabilidad, los recubrimientos inhibidores funcionan reaccionando con un cierto ambiente para proporcionar una película protectora o barrera en la superficie metálica. El concepto de agregar un inhibidor a un recubrimiento se ha aplicado a los revestimientos de recipientes de acero desde que se construyen. Dichos recubrimientos eran originalmente a base de aceite y cargado de plomo rojo. Los inhibidores son normalmente distribuidos a partir de una solución de dispersión. Algunos están incluidos en una formulación de revestimiento protector. Los inhibidores ralentizan los procesos de corrosión al:

- i. Incrementan el comportamiento de polarización anódica o catódica
- ii. Reduce el movimiento o la difusión de iones a la superficie metálica
- iii. Aumento de la resistencia eléctrica de la superficie metálica

Los inhibidores pueden ser compuestos orgánicos o inorgánicos y generalmente son disueltos en ambientes acuosos. Algunos de los inhibidores inorgánicos más

eficaces son cromatos, nitritos, silicatos, carbonatos, fosfatos y arseniatos. Los inhibidores orgánicos son muchos e incluyen aminas, compuestos nitrogenados heterocíclicos, compuestos de azufre como tioéteres, tioalcoholes, tioamidas, tio-urea e hidracina, algunos compuestos naturales como pegamento o proteínas y mezclas de dos o más compuestos. (Gellings, 1985)

A. TIPOS DE INHIBIDORES

Varios tipos de inhibidores comúnmente usados incluyen los siguientes:

- a. Anódico
- b. Catódico
- c. Óhmico
- d. Precipitación
- e. Fase vapor

La protección que brindan estos tipos de inhibidores puede resultar de varios mecanismos diferentes: presencia de películas adsorbidas, formación de precipitados voluminosos o la promoción de la pasividad del metal a proteger.

- a. *Los inhibidores anódicos (pasivantes)* funcionan cubriendo selectivamente sitios anódicos en la superficie del metal. La adición de un inhibidor promueve un cambio de la curva de polarización anódica de la línea continua a la línea discontinua (Ver Figura 2.2.) con poco o ningún efecto sobre la curva de polarización catódica. El efecto neto es un aumento del potencial de corrosión y una disminución en la velocidad de corrosión. Los inhibidores anódicos son peligrosos, a concentraciones insuficientes pueden conducir a una aceleración del ataque localizado en sitios desprotegidos. Generalmente una concentración crítica para inhibidores anódicos debe mantenerse. Los inhibidores anódicos típicos incluyen productos químicos oxidantes, como cromatos, nitritos y nitratos y no oxidantes como fosfatos, tungstatos y molibdatos. Los químicos no oxidantes requieren la presencia de otras especies oxidantes en el medio ambiente para que sea eficaz. (Gellings, 1985)

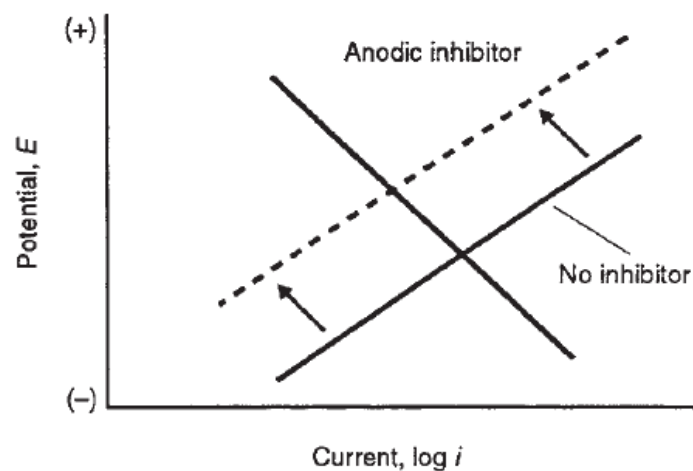


Figura 2.2. Curva de polarización anódica y catódica con protección anódica y sin protección anódica. Fuente: (R. Winston, 2008)

- b. *Inhibidores catódicos* reduce la corrosión al ralentizar la velocidad de reacción de reducción de la celda electroquímica de corrosión. Esto se hace bloqueando los sitios catódicos por precipitación. Por ejemplo, calcio, magnesio y los iones de zinc, como el proceso mostrado en la Figura 2.3., precipitarán hidróxidos en sitios catódicos mientras el ambiente local se vuelve más alcalino debido a la reacción de reducción en estos sitios. A medida que aumenta el pH se produce la precipitación de hidróxido. Los inhibidores catódicos son efectivos cuando ralentizan la velocidad de reacción catódica. Arsénico, bismuto y antimonio, que se denominan catódicos venenosos, reducen la velocidad de reacción de reducción de hidrógeno y por lo tanto disminuyen la tasa de corrosión general. Otros inhibidores catódicos remueven residuos de especímenes del medio ambiente. Remover el oxígeno del ambiente corrosivo disminuirá significativamente la tasa de corrosión, esto puede ser realizado mediante (a) el uso de captadores de oxígeno, como el sulfito de sodio e hidracina, que reacciona con el oxígeno y lo elimina de la solución; (b) desaireación por vacío o (c) hirviendo para reducir las concentraciones de oxígeno disuelto. (Gellings, 1985)

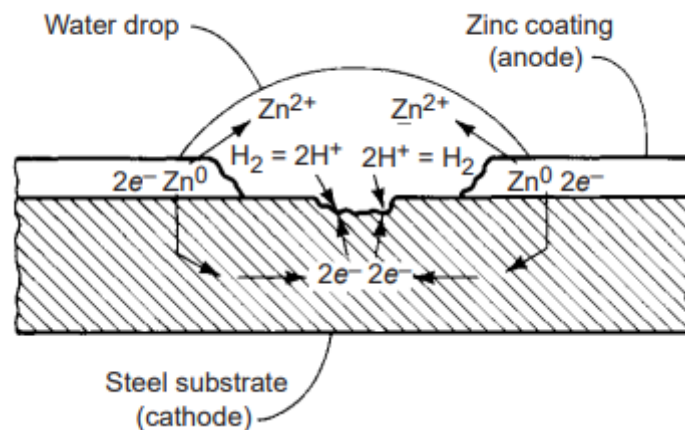


Figura 2.3. Mecanismo de acción de un revestimiento de Zinc. Fuente: (ASTM International, 2000)

- c. *Inhibidores óhmicos*, (inhibidores generales de filmación) reducen la velocidad de corrosión al disminuir la movilidad de las especies iónicas entre ánodos y cátodos en la superficie metálica corroída. Disminuyendo la conductividad iónica de la solución, la velocidad de corrosión se reduce. Estos inhibidores funcionan mediante una fuerte adsorción a la superficie del metal. Los inhibidores óhmicos incluyen aminas, que son catiónicas y sulfatos, que son aniónicos. (Gellings, 1985)
- d. *Inhibidores de precipitación* promueven la formación de una película de precipitación voluminosa sobre toda la superficie. Los silicatos y fosfatos son ejemplos de tales inhibidores. (Gellings, 1985)
- e. *Inhibidores de fase vapor* son compuestos químicos que tienen relativamente altas presiones de vapor y que se adsorben en superficies metálicas. Una vez adsorbidos, pueden neutralizar la humedad, promover la formación de películas pasivas, o proteger mediante la formación de una película general en la superficie. La mayoría de los inhibidores de la fase de vapor brindan protección mediante múltiples medios. Una advertencia es que los inhibidores de la fase de vapor son específicos del metal y, si se utilizan con el metal incorrecto, pueden provocar un ataque acelerado. La protección es más eficaz en espacios cerrados con poca ventilación. Una práctica común es incluir un pequeño paquete poroso que con-

tenga un inhibidor de fase de vapor y un desecante dentro del material de embalaje para electrónicos, el desecante elimina agua del medio ambiente y reduce la probabilidad de condensación mientras que el inhibidor de fase de vapor se adsorbe en superficies metálicas y los protege en caso de condensación. (Gellings, 1985)

2.3.5.3. MECANISMO DE INHIBICIÓN DE LA CORROSIÓN

La mayoría de las aplicaciones de inhibidores son para medios acuosos o parcialmente acuosos, los sistemas se refieren a cuatro tipos principales de entorno: (Ahmad, 2006)

- i. Soluciones acuosas de ácidos que se utilizan en los procesos de limpieza de metales como decapado para eliminación de óxido o cascarilla durante la producción y fabricación de metales o en la limpieza posterior al servicio de superficies metálicas. (Ahmad, 2006)
- ii. Aguas naturales, aguas de abastecimiento y aguas de enfriamiento industrial en el rango de pH casi neutro (5 a 9)
- iii. Producción primaria y secundaria de aceite, posterior refinado y procesos de transporte
- iv. Corrosión atmosférica o gaseosa en ambientes confinados, durante transporte, almacenamiento o cualquier otra operación confinada.

Para efectos del trabajo de aplicación solo se profundizará en el numeral ii.

La corrosión de los metales en soluciones neutras difiere de la de las soluciones ácidas en dos aspectos importantes. En soluciones saturadas de aire, la principal reacción catódica es reducción de oxígeno disuelto, mientras que en solución ácida es desprendimiento de hidrogeno. En este ambiente las superficies están cubiertas con películas de óxidos, hidróxidos o sales, debido a la reducida solubilidad de estas especies. Los inhibidores típicos para soluciones neutras son los aniones de débiles ácidos, algunos de los más importantes en la práctica son cromato, nitrito, benzoato, silicato, fosfato y borato. La pasivación de películas de óxido sobre los metales ofrece una alta resistencia a la difusión de iones metálicos, y la reacción anódica se inhibe de la disolución del metal. Estos aniones

inhibidores a menudo se denominan inhibidores anódicos y son más utilizados generalmente que los inhibidores catódicos para inhibir la corrosión del hierro, zinc, aluminio, cobre y sus aleaciones en soluciones casi neutras, la acción de los aniones inhibidores sobre la corrosión de metales en condiciones de solución casi neutras implica las siguientes funciones importantes: (Ahmad, 2006)

- i. Reducción de la velocidad de disolución de la película de óxido pasivante.
- ii. Reparación de la película mediante la promoción de la reforma del óxido.
- iii. Reparación de la película de óxido taponando los poros con compuestos insolubles.
- iv. Prevención de la adsorción de aniones agresivos.

De estas funciones, la más importante parece ser la estabilización de la película de óxido pasivante al disminuir su velocidad de disolución (función uno). Los aniones inhibidores probablemente forman un complejo de superficie con el ion metálico del óxido (es decir, Fe_3 , Zn_2 , Al_3), de modo que la estabilidad de este complejo es más alta que el de los complejos análogos con agua, iones hidroxilo o aniones agresivos. (Ahmad, 2006)

La estabilización de las películas de óxido por repasivación también es importante (función dos). El taponamiento de los poros mediante la formación de compuestos insolubles (función tres) no parece ser una función esencial, pero es valioso para ampliar la gama de condiciones bajo las cuales la inhibición puede lograrse. La supresión de la adsorción de agresivos aniones (función cuatro) mediante la participación en una dinámica competitiva reversible, el equilibrio de adsorción en la superficie del metal parece estar relacionado al comportamiento de adsorción general de aniones en lugar de a un específico propiedad de los aniones inhibidores. (Ahmad, 2006).

Los mecanismos de protección con efecto inhibidor presentan la ventaja que su mecanismo de acción está basado en una reacción química, por tanto, de mayor confiabilidad que un mecanismo de protección efecto barrera cuya protección es únicamente física (Véase Figura 2.4.)

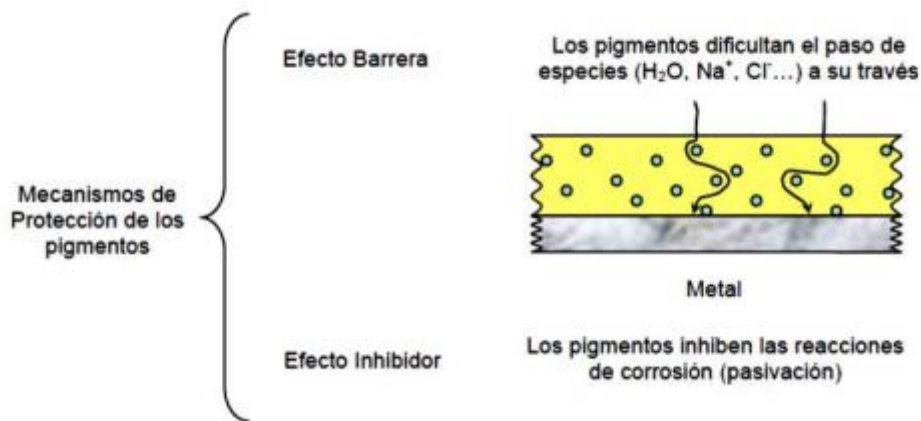


Figura 2.4. Mecanismo de acción en pigmento inhibidor (pasivación). Fuente: (Cajamarca M. & Romero V., 2014)

La inhibición en soluciones neutras puede deberse a la precipitación de compuestos, sobre una superficie metálica, que pueden formar o estabilizar películas protectoras. El inhibidor puede formar una película superficial de una sal insoluble por precipitación o reacción. Los inhibidores que forman películas de este tipo incluyen

- i. Sales de metales como zinc, magnesio, manganeso y níquel, que forman hidróxidos insolubles, especialmente en áreas catódicas, que son más alcalino debido a los iones hidroxilo producidos por la reducción de oxígeno.
- ii. Sales de calcio solubles, que pueden precipitar como carbonato de calcio en aguas que contienen dióxido de carbono, nuevamente en áreas catódicas donde el un pH alto permite una concentración suficientemente alta de iones carbonato
- iii. Polifosfatos en presencia de zinc o calcio, que producen una fina película de sal amorfa

Estas películas de sal, que a menudo son bastante gruesas e incluso pueden ser visibles, restringen la difusión, particularmente de oxígeno disuelto a la superficie del metal. Son conductores electrónicos deficientes, por lo que la reducción de oxígeno no ocurre en la superficie de la película. Estos inhibidores se denominan inhibidores catódicos. (Ahmad, 2006)

A. ACCIÓN DE INHIBIDORES ANIONES EN HIERRO.

Hierro o acero: puede ser inhibida por los aniones de la mayoría de los ácidos débiles en condiciones adecuadas. Sin embargo, otros aniones, particularmente los de ácidos fuertes, tienden a prevenir la acción de aniones inhibidores y estimulan la degradación de la película protectora de óxido. Ejemplos de estos aniones agresivos incluyen los haluros, sulfato y nitrato. El balance entre las propiedades inhibidoras y agresivas de un determinado anión depende de los siguientes factores principales (que son a su vez interdependiente): (Ahmad, 2006)

1. Concentración Se produce la inhibición de la corrosión del hierro en agua destilada solo cuando la concentración de aniones excede un valor crítico. En concentraciones por debajo del valor crítico, los aniones inhibidores pueden actuar agresivamente y estimular la degradación de las películas de óxido. La eficiencia de los aniones inhibidores que tienen concentraciones críticas bajas para la inhibición se ha clasificado en orden de poder de inhibición hacia el acero, a partir de sus concentraciones inhibidoras críticas. El orden de eficacia inhibidora decreciente es ferricianuro, nitrito, cromato, benzoato, ferrocianuro, fosfato, telurato, hidróxido, carbonato, clorato, o-clorbenzoato, bicarbonatos fluoruro, nitrato y formiato.
2. pH. Los aniones inhibidores son eficaces para prevenir la corrosión del hierro solo a valores de pH más alcalinos que un valor crítico, este valor crítico del pH depende del anión.
3. Concentración y suministro de oxígeno disuelto. Inhibición de la corrosión de hierro por aniones requiere un mínimo grado de poder de oxidación en la solución. Esto normalmente es suministrado por el disuelto oxígeno presente en soluciones saturadas de aire.
4. Concentración agresiva de aniones. Cuando hay aniones agresivos en la solución, las concentraciones críticas de aniones inhibidores necesarios para la protección del hierro se ha demostrado que la relación entre la concentración máxima de anión agresivo C_{agg} que permite una protección total mediante una concentración dada del anión inhibidor C_{inh} tiene la forma de la Ecuación 2.1.

$$\log C_{inh} = n \log C_{agg} + K \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Donde K es una constante dependiente de la naturaleza del inhibidor y aniones agresivos, y n es un exponente que es aproximadamente la relación entre la valencia del anión inhibidor y la valencia del anión agresivo

5. Naturaleza de la superficie metálica. La concentración crítica de un anión necesario para inhibir la corrosión del hierro puede aumentar al aumentar rugosidad de la superficie.
6. Temperatura. En general, las concentraciones críticas de aniones (ejemplo benzoato, cromato y nitrito) necesarios para la protección del acero aumentar a medida que aumenta la temperatura.

B. APLICACIÓN DE INHIBIDORES

La aplicación de inhibidores a la superficie del metal a proteger es una parte crítica. Las técnicas de aplicación incluyen inyección continua, tratamiento por lotes y la incorporación de inhibidores en revestimientos protectores. El último método proporciona protección al permitir que el inhibidor se filtre desde la capa protectora o primer al medio ambiente cuando entra en contacto con la superficie metálica. Los productos químicos para el tratamiento de aguas y los paquetes de inhibidores a menudo son combinaciones de químicos utilizados en el sistema general de inhibidores incluidos agentes humectantes y agentes espumantes. La técnica más apropiada se basa en el análisis del sistema a ser protegido

2.4. PRUEBAS DE CORROSION Y MONITOREO. EQUIPOS

De forma general, las pruebas de monitoreo y corrosión se clasifican en 3 grupos: (ASTM International, 2000):

1. Test de laboratorio
2. Test a nivel de planta piloto
3. Test de campo

1. **Test de laboratorio:** Son utilizados como estudios predictivos en el análisis del comportamiento de los materiales en campo. Son utilizados también como pruebas de detección antes del campo, pueden ir desde las más simples (entornos en inmersión) hasta equipos más sofisticados con pruebas electroquímicas, en general son de corta duración y se simulan entornos altamente corrosivos y es utilizado en departamentos de control de calidad, selección de materiales y diseño de sistemas.
2. **Test a nivel de planta piloto:** Brindan un escalamiento más adecuado para la simulación del sistema en servicio que los test de laboratorio, pero son pruebas más caras. En estas pruebas, se realiza una planta a pequeña escala que duplica a la planta en operación; brinda más información sobre posibles fallas de diseño y selección de materiales. Permite, la valoración del sistema a diferentes entornos, diseños y materiales que si se hicieran pruebas a nivel de planta. Las pruebas son variables en cuanto a su duración.
3. **Test de campo:** Son las pruebas con el mayor grado de confiabilidad como estudios predictivos sin la necesidad de un servicio real. Estas pruebas incluyen exposiciones de componentes estructurales en ambientes que corresponden a las condiciones reales (tuberías expuestas al aire libre, por ejemplo), son ensayos muy realistas ya que los especímenes están sujetas a las condiciones a cíclicas de clima y factores bacteriológicos. Este tipo de pruebas son de gran ayuda para la toma de decisiones en selección de materiales y predecir la vida útil de los productos o estructuras.

Los ensayos de laboratorio procuran mantener condiciones ambientales fijas para estandarizar los resultados de este; una variación de estas para adecuarse a las condiciones de servicio exigiría un número demasiado grande de ensayos.

En general los ensayos en laboratorio son: (Dahbura R, 2012)

- a. **Ensayos de niebla:** Una solución altamente corrosiva se rocía a pequeñas gotas a los especímenes de forma continua por un sistema de aire a presión
- b. **Ensayos de inmersión alterna:** Ensayos que simulan procesos de humedecimiento y secado que presentes en servicio.
- c. **Ensayos de inmersión continua:** Se evalúan los especímenes en un entorno de inmersión por un determinado tiempo, la solución en la que se realiza el ensayo es función de las condiciones de servicio (Ver Figura 2.5)

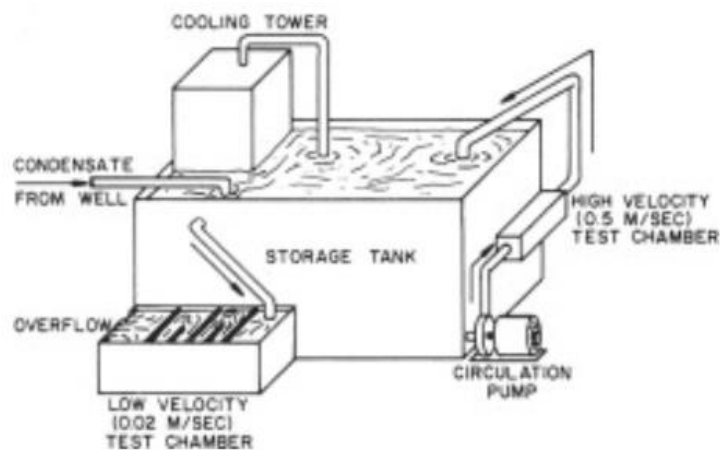


Figura 2.5. Equipo de inmersión continua con flujo de alta y baja velocidad.

Fuente: (Ebert, 2012)

- d. **Métodos electroquímicos:** Se utilizan equipos especializados que brindan información sobre las variables electroquímicas vinculadas al proceso de corrosión y que permiten la evaluación de los especímenes, son ensayos de corta duración, para su aplicación es necesario el conocimiento especializado por parte del personal. Ejemplos de estos ensayos son las medidas de potenciales y/o corriente en el tiempo.

En este trabajo de investigación, se hará uso de un ensayo de niebla en cámara salina (intemperismo acelerado).

2.4.1 ENSAYO DE NIEBLA EN CÁMARA SALINA

Es un ensayo normado con un equipo especializado por la Norma Internacional ASTM B117 bajo la necesidad en la creación de equipos de mayor calidad luego de la Primera Guerra Mundial.

Es un tipo de prueba que ha comprobado no ser eficaz para algunos tipos de aleaciones (revestimientos cromo-niqueladas en aleaciones de zinc, por ejemplo); se ha comprobado que en estos ensayos no existe exposición a luz ultravioleta, que es una causa común en el deterioro de pinturas y bases siendo esta la causa principal en el deterioro de placas de acero en los ambientes de servicio; por lo que no guarda una correlación clara con las condiciones del sistema en operación. Sin embargo, son limitaciones esperadas dadas las características del ensayo antes enunciadas, condiciones controladas a nivel de laboratorio que ofrecen información sobre la resistencia de los materiales a los principales iones que inducen el proceso corrosivo. (Dahbura R, 2012)

2.4.2. CÁMARA DE INTEMPERISMO Q-FOG

El equipo por utilizarse es la cámara salina de la marca Q-LAB, ya que el ensayo a realizarse es de una niebla salina, se utiliza la cámara de intemperismo Q-FOG.

Un equipo de intemperismo para ensayo de niebla en cámara salina básicamente está compuesto por los componentes:

- i. **Panel de control:** En el cual se monitorean y ajustan los parámetros de operación del equipo (pH, temperatura, caudal, etc.).
- ii. **Tanque de solución:** Cumple la función de ser brindar el almacenamiento de la solución corrosiva, en el caso del equipo utilizado, solución salina, por la extensión del ensayo, se hace uno de tanques externos de alta capacidad.
- iii. **Torre para dispersión:** En el que sucede el proceso de pulverizado de la solución para ser expulsada como spray hacia los especímenes en la zona de exposición, similar al mostrado en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Esprea de niebla en máquina de intemperismo Q-FOG. Fuente: (Q-LAB, 2021)

Cámara de exposición: es el área donde se colocan las muestras, normalmente de material polímero (poliéster con un acabado en fibra de vidrio, en la mayoría de los casos) tiene que ser resistente a la corrosión en ambientes salinos, posee un equipo de control de temperatura y de verificación de humedad relativa, a manera diagramática es presentado en la Figura 2.7.

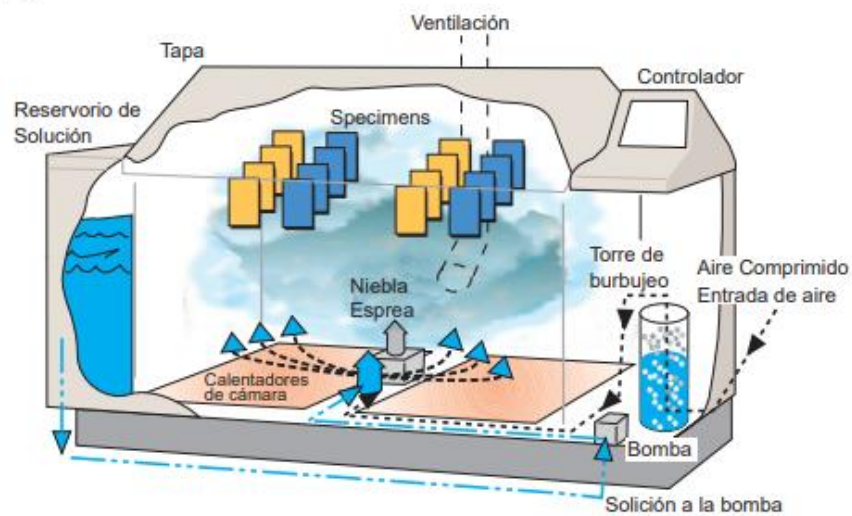


Figura 2.7. Diagrama de funcionamiento interno de Máquina de intemperismo Q-FOG. Fuente: (Q-LAB, 2021)

Las especificaciones técnicas de operación dadas por el fabricante, a considerarse según la naturaleza del ensayo que se realiza, se brindan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas QFOG- CCT600. Fuente: (Q-Lab, 2021)

Volumen (sin tapa)	511 litros
Volumen del reservorio de la solución salina	120 litros
Rangos de temperaturas de trabajo	20-60 °C
Capacidad de paneles especímenes (4x12 pulgadas)	128(8 racks)
Capacidad de carga en especímenes	544 kg
Presión de entrada de agua	3-56 psi
Consumo de agua	2 L/h max

A nivel práctico las temperaturas y rangos de humedad que la cámara de interperismo Q-FOG se mantienen fijos y rondan los valores de 35°C a 35% de Humedad Relativa (Ver figura 2.8)

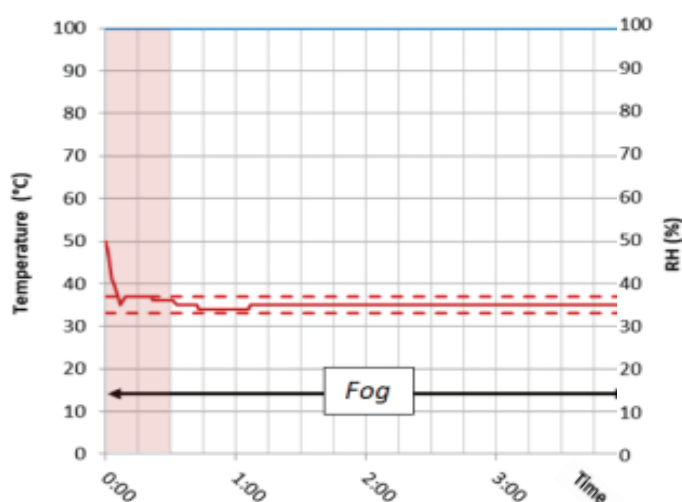


Figura 2.8 Variación de temperatura y humedad relativa en el tiempo. Fuente: (Q-Lab, 2021)

2.5. EVALUACIONES DE DESEMPEÑO DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVOS

La evaluación de desempeño de cada muestra de anticorrosivo se realizará siguiendo los criterios de la norma ASTM D610 y las condiciones de operación de la norma ASTM B117.

2.5.1. NORMA ASTM D610

Es la Norma utilizada en la evaluación del grado de afectación de un metal ante los efectos corrosivos, en el caso en estudio, el rendimiento de los recubrimientos inhibidores.

La ASTM D610 diagnostica el grado de afectación de un sistema y brinda información si un componente debe ser reparado o reemplazado, mediante la evaluación de manera visual en un rango de 0 a 10 basado en el porcentaje de oxidación visible.

La distribución del óxido se clasifica:

- a) Manchas de oxido
- b) Oxido generalizado
- c) Oxido localizado
- d) Oxido hibrido

Los pasos a seguir para la evaluación del grado de corrosión de la superficie son:

1. Seleccionar el área a estudiar.
2. Determinar el tipo de distribución usando las características y examen visual, comparándolos con los presentados en la Norma.
3. Estimar el porcentaje de afectación por la corrosión mediante un examen visual, comparándolos con los presentados en la Norma.
4. Junto con el porcentaje de área corroída para identificar el grado de corrosión, asignar una calificación de 0 a 10 respecto al grado de corrosión; S para Spot (manchas), G para General, P para Pinpoint (localizado) o H para Hibrido.

Los datos nos brindan información de:

- I. Grado de corrosión (0 a 10)
- II. Distribución de la corrosión (S, G, P y H)

La calificación se compone del grado de corrosión y la distribución de esta (8-P, por ejemplo)

Las interferencias y limitaciones que la aplicación de esta Norma es:

1. Los daños por la corrosión pueden variar de un área a otra y por tanto no ser representativa.
2. Algunos tipos de suciedad depositados pueden causar decoloración en la superficie que puede confundirse con daños por corrosión.
3. Solo puede ser utilizado para corrosión visible en la superficie.
4. Algunos tonos en los recubrimientos pueden hacer difícil la comparación visual de las partes afectadas por corrosión de las que no lo están.

2.5.2. NORMA ASTM B117

La norma ASTM B117-18 describe los aspectos para utilizar el equipo, las condiciones necesarias para crear un entorno de prueba con niebla de rocío salino.

2.5.2.1 IMPORTANCIA Y USO

Con este procedimiento se logra un ambiente corrosivo controlado, de manera que se pueda obtener información de la resistencia a la corrosión en metales con recubrimientos anticorrosivos.

2.5.2.2 EQUIPO

El equipo para la exposición de ambiente salino en cámara debe consistir en un depósito con una solución de sal, un suministro de aire comprimido acondicionado, boquillas de pulverización, soportes para las muestras, dispositivo para el calentamiento de la cámara y los medios de control necesarios.

2.5.2.3 MUESTRAS

Las muestras para ingresar en el equipo tienen una preparación previa, el recubrimiento aplicado según las especificaciones de hojas técnicas de cada uno.

Dentro de la cámara deben ser colocadas con una inclinación de quince a treinta grados con respecto a la vertical, paralelas entre sí y al flujo de la niebla salina a través de la cámara, cada muestra debe estar con una separación tal que no impida el paso, se debe considerar que el único contacto sea con la niebla salina no por algún tipo de goteo con otras muestras.

2.5.2.4 CONDICIONES EN LA CÁMARA DE NIEBLA SALINA

La solución salina debe estar compuesta por 5% cloruro de sodio y 90% agua, la composición del cloruro de sodio como máximo 0.3% de impurezas, 0.1% de halogenuros, 0.3 partes por millón de cobre. El pH en el intervalo de 6.5 a 7.2.

En la Tabla 2.2, se indican los rangos de factores a utilizar en la configuración del ensayo de niebla salina.

Tabla 2.2. Parámetros en un ensayo de cámara salina según ASTM B117.

Fuente: (ASTM B117, 2018)

Temperatura		Densidad (g/m ³)		
°C	°F	4% de concentración de sal	5% de concentración de sal	6% de concentración de sal
20	-68	1.025758	1.03236	1.038867
21	-69.8	1.02548	1.032067	1.03856
22	-71.6	1.025193	1.031766	1.038245
23	-73.4	1.024899	1.031458	1.037924
24	-75.2	1.024596	1.031142	1.037596
25	-77	1.024286	1.030819	1.037261
26	-78.8	1.023969	1.030489	1.036919
27	-80.6	1.023643	1.030152	1.03657
28	-82.4	1.023311	1.029808	1.036215
29	-84.2	1.022971	1.029457	1.035853
30	-86	1.022624	1.029099	1.035485
31	-87.8	1.02227	1.028735	1.03511
32	-89.6	1.02191	1.028364	1.034729
33	-91.4	1.021542	1.027986	1.034343
34	-93.2	1.021168	1.027602	1.03395
35	-95	1.020787	1.027212	1.033551
36	-96.8	1.020399	1.026816	1.033146
37	-98.6	1.020006	1.026413	1.032735
38	-100.4	1.019605	1.026005	1.032319
39	-102.2	1.019199	1.02559	1.031897
40	-104	1.018786	1.02517	1.031469

2.6. MERCADO SALVADOREÑO DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS

El uso de pinturas se ha convertido en parte del estilo de vida de las personas, pues cumplen funciones estéticas y de protección contra el deterioro de muchos, sino la mayoría, de los artículos con los que se tiene contacto en la cotidianidad. La pintura es una mezcla física de compuestos o materias primas que generan un producto final con diferentes características. Estas tratan de una amplia variedad de productos que al aplicarse sobre un objeto forma en su superficie una película o capa protectora, la cual, al secarse adquiere características específicas, generalmente color y protección contra uno o varios agentes externos que puedan deteriorar el objeto.

El mercado de recubrimientos en El Salvador es muy competitivo, actualmente existen alrededor de diez marcas de pinturas entre las fabricadas en el país como las que se importan principalmente de países como Costa Rica, México, etc.

Los anticorrosivos industriales inhibidores se pueden encontrar en el mercado en presentaciones desde un cuarto hasta un galón de un total de siete marcas en color gris, rojo oxido, negro y blanco.

2.7. CONSECUENCIAS DE NO UTILIZAR METODOS DE CONTROL DE LA CORROSION

El fenómeno de la corrosión tiene afectaciones directas en todos los ámbitos de la vida en sociedad, desde consecuencias económicas hasta en áreas de gran importancia a nivel social como son las consecuencias a nivel de salud.

Como se ha estudiado, son muy fáciles de satisfacer las condiciones para que un metal inicie un proceso corrosivo si se encuentra al aire libre, y de que, si ese fenómeno no es controlado, puede conllevar casi de forma inevitable al fallo de la estructura.

Generalmente fallos que pueden preverse y por tanto peligros que pueden controlarse.

A nivel general, algunos de los peligros que se presentan por efectos de la corrosión, son:

- i. Alto riesgo de lesiones en empleados o público en general
- ii. Devaluación en algunas edificaciones.
- iii. Daños al entorno o peligros hacia las personas, debido a fugas de gases.
- iv. Fallos en puentes, edificios, estacionamientos, ponen en riesgo la vida de personas, en general.
- v. Tiempos muertos en áreas de producción.

A nivel mundial son cientos de miles de millones de dólares que afectan a la economía de los países, debido a estos costos por no utilizar mecanismos de control de la corrosión. La corrosión puede afectar de forma indirecta (a los clientes a través de proveedores, servicios y bienes) como directamente, en el deterioro de espacios de uso privado propio (el avance tecnológico ha permitido que algunos electrodomésticos posean elementos que los protejan de efectos corrosivos). (A&A Coatings, 2018)

Los efectos de la corrosión tienen consecuencias en todos los niveles, no existe un ser con vida en el planeta que no se vea afectada por la misma, incluso los suelos mediante filtración absorben óxidos de metales que luego llegan a mantos acuíferos. Causa problemas de salud, costos financieros, seguridad y hasta pérdidas de vidas. Por eso, muchos son los profesionales que toman parte de distintas soluciones especializadas para los distintos tipos de corrosión según el caso de afectación. (Institute of Corrosion, 2021)

CAPITULO III. METODOLOGIA Y ANÁLISIS

3.1. ENFOQUE METODOLOGICO

Para la evaluación de rendimiento de cada uno de los anticorrosivos, se hará uso de un criterio objetivo, es decir el seguimiento de una norma, en este caso la norma ASTM D610; analizándose principalmente 3 factores o variables:

- I. Ampollamiento de película
- II. Oxidación superficial
- III. Corrosión en la incisión.

Las tres variables ponderadas de forma independiente, colocándole una calificación del 0 al 10 (explicación extendida en el apartado 3.2. Diseño Experimental) y ponderándose según la Ecuación 3.2. en la variable Efecto Anticorrosivo.

El objetivo del trabajo es mostrar una metodología que brinda resultados cuantitativos y permita la toma de decisiones cuando el método de ensayo elegido sea un ensayo predictivo o de laboratorio

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

De acuerdo con lo especificado en el apartado anterior, el diseño experimental constara como primer punto en la evaluación de los recursos a ser utilizados, paso posterior el tratamiento previo a realizarse a los sustratos metálicos, aplicación de cada muestra de anticorrosivo inhibidor y su posterior evaluación.

3.2.1. MATERIALES Y EQUIPOS:

Los recursos necesarios en el diseño experimental sugerido son:

- a. Regla
- b. Cuchilla
- c. Espátulas
- d. Equipo de intemperismo Q-FOG
- e. 12 láminas de acero de 4x12 pulgadas y espesor de 0.8 mm (R-412)
- f. Pistola de gravedad

- g. Positector 6000
- h. Lijadora
- i. Lijas de disco 400
- j. Cinta aislante
- k. Anticorrosivos a estudiar
- l. Solvente Mineral comercial
- m. Solvente limpiador.
- n. Anticorrosivo comercial de protección en zona posterior.

3.2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El proceso experimental para la evaluación de las muestras de anticorrosivos inhibidores en sustratos metálicos consta de una fase de preparación de las planchas metálicas, preparación de las muestras anticorrosivas, aplicación de estas, proceso para asegurar la trazabilidad de las muestras y posteriores fases de secado e inicio del ensayo a condiciones de intemperismo acelerado.

3.2.2.1. PREPARACIÓN DE LAS PLANCHAS METÁLICAS:

En la preparación de las planchas metálicas se realiza una inspección de las láminas de acero en búsqueda de imperfecciones, suciedad o daños superficiales; en caso de observarse se procede a realizar una limpieza con la lijadora colocando el disco de lija 400 ejerciendo presión en las zonas específicas donde se observe el problema; en las muestras que no muestren daños o similares, lijar con el mismo equipo sin ejercer presión por un aproximado de 1 minuto.

3.2.2.2. PREPARACIÓN DE LOS ANTICORROSIVOS.

Para la preparación de los anticorrosivos se abre y mezcla, haciendo uso de una espátula, cada uno de los 3 anticorrosivos a utilizar, que se conocerán como: Anticorrosivo 1, Anticorrosivo 2 y Anticorrosivo 3; luego de mezclado, se agregan 25 mL de cada anticorrosivo y 50 mL de Solvente Mineral comercial, con ayuda de una espátula se mezcla hasta obtener una solución homogénea.

3.2.2.3. APLICACIÓN DE LOS ANTICORROSIVOS EN LAS PLANCHAS METÁLICAS

En el proceso de aplicación de los anticorrosivos en los sustratos metálicos se calibra la pistola de gravedad en las condiciones de presión y humedad a operar, y realizar una limpieza con Solvente Limpiador agregándolo el vaso de alimentación y expulsándola, apretando el gatillo.

Se toman las 12 láminas y se colocan en un riel adecuado. Se agrega anticorrosivo comercial en el vaso de alimentación de la pistola de gravedad y se procede a aplicar una capa del mismo en una de las caras de la lámina. Se vacía el contenido de la pistola de descarga y se procede a realizar su limpieza como se describió anteriormente. Se espera entre 10-20 minutos a secado de las láminas

En el lado posterior que acaba de ser pintado, se numeran cada una de las 12 planchas metálicas mediante el código: MIL-[número de lámina]

Se agrega al vaso de alimentación de la pistola de gravedad el Anticorrosivo 1 previamente diluido; se toman las láminas MIL-01, MIL-02, MIL-03 y MIL-04 y colocan en un riel adecuado. Se procede a la aplicación de una capa del anticorrosivo en las 4 láminas. Se vacía el contenido de la pistola y limpia con Solvente Limpiador. Las láminas se colocan en orden con la parte posterior (previamente pintada) sobre la superficie.

Se repite el proceso con láminas MIL-05, MIL-06, MIL-07 y MIL-08 con el Anticorrosivo 2 y las láminas MIL-09, MIL-10, MIL-11 y MIL-12 con el Anticorrosivo 3.

3.2.2.4. SECADO, PREPARACIÓN, COLOCACIÓN DE LAS MUESTRAS EN LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO

Una vez pintadas las muestras, se colocan en un lugar fresco, seco y sin incidencia directa de la luz solar y se dejan curar por 7 días.

Pasado el tiempo, se evalúa el espesor de película para cada lamina con el equipo Positector 6000 realizando 5 medidas en distintas zonas de la misma, se colocan los valores de promedio, desviación estándar, dato espesor mayor y dato

espesor menor, en la parte posterior de las mismas (donde se colocó el código); proceso que se repite para cada una de las doce laminas.

Luego se coloca cinta aislante en los contornos de cada placa abarcando cerca de 1 cm de cada lado.

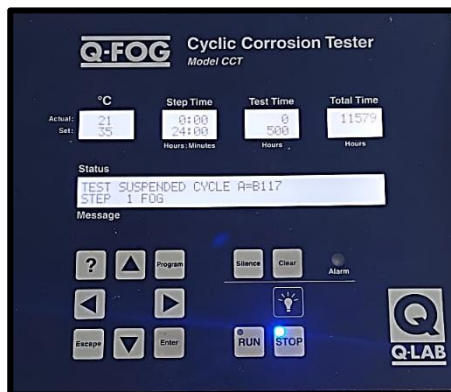
Se toma una foto por lámina y se colecciona. (Para compilado, ver Anexo A)

Se abre la maquina Q-FOG previamente encendida y configurada en condiciones predeterminadas (35°C) para un ensayo de 300 horas.

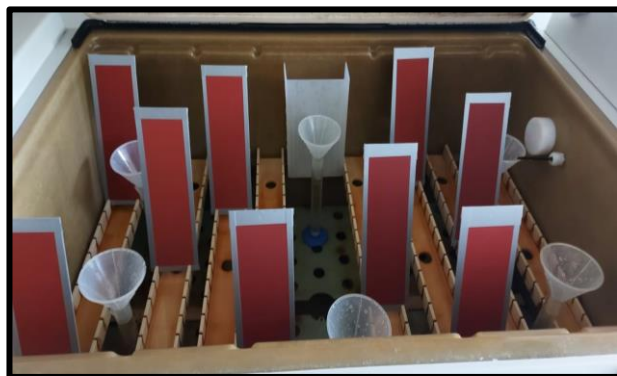
Se colocan 9 de las 12 láminas (no se colocan las muestras MIL-01, MIL-05 y MIL-09) separándolas en grupos de 3 según el anticorrosivo que se les ha aplicado (Anticorrosivo 1, Anticorrosivo 2 o Anticorrosivo 3).

Se cierra la máquina y se presiona el botón RUN para iniciar el ensayo.

Las condiciones de operación son elegidas acorde a la norma ASTM B117, mostradas en la Figura 3.1.a. La colección de las muestras dispuesta en la Cámara Q-Fog puede observarse en la Figura 3.1.b.



a)



b)

Figura 3.1. a) Parámetros de control para el funcionamiento de Cámara Q-FOG, b) Muestras metálicas en Cámara Q-FOG

3.2.2.5. TOMA DE DATOS

Pasadas 100 horas, en la cámara Q-FOG se presiona el botón STOP se abre la cámara, se sacan brevemente las muestras y se realiza una toma de fotografía de las mismas; luego se vuelven a colocar según el orden designado, se cierra la cámara y se presiona el botón RUN.

Se repite el proceso pasadas 200 horas y 300 horas, en este último, terminado el ensayo no es necesario colocar las muestras a la cámara, como tampoco ponerla en marcha nuevamente.

3.2.3. PROCESO DE MEDICION

Después de someter las planchas a la cámara de intemperismo, debe quitarse con papel toalla todo exceso de agua que contenga la película de pintura y con el cuidado de no hacer presión sobre las ampollas.

Se evalúan 3 criterios: Ampollamiento de película, Oxidación Superficial y Corrosión en la Incisión, todos se califican en un rango de 0 a 10. Luego con eso se calcula el puntaje de Efecto Anticorrosivo

3.2.3.1. AMPOLLAMIENTO DE PELÍCULA

Evaluar por comparación visual el ampollamiento formado en el panel según los estándares en el Anexo B y los siguientes criterios:

Tamaño: Los estándares de referencia en el Anexo B. (Figura B.1. a Figura B.4) han sido clasificados en 4 etapas para clasificarlos dentro de una escala de 0 a 10, El estándar No. 10 indica que no hay ningún ampollamiento; el estándar No. 8 representa el tamaño más pequeño de ampollamiento fácilmente visto por el ojo humano, y los estándares No. 6, 4 y 2 representan progresivamente tamaños más grandes.

Frecuencia: Los estándares de referencia ha sido clasificados en 4 categorías, designadas de la siguiente manera: Denso (D), Mediamente Denso (MD), Media (M) y Poco (Few, F).

Si la plancha posee más de un tipo de ampollamiento, considerar el que sea representativo para todo el panel evaluado.

En la Tabla B.1. se muestra como se califica la propiedad de Ampollamiento con los criterios mencionados previamente.

3.2.3.2. OXIDACIÓN SUPERFICIAL

Evaluar por comparación visual la oxidación en la superficie del panel según los estándares en el Anexo C (Figura C.1 a Figura C.3) y los criterios en la Tabla C.1.

Tener cuidado al distinguir entre una mancha de oxidación superficial y aquellas manchas de oxidación provocadas por burbujas de ampollamiento que se han reventado y han dejado expuesto al sustrato

3.2.3.3. CORROSIÓN EN LA INCISIÓN

Seleccionar 1 área a lo largo de la incisión de la plancha que se vea afectada por la corrosión quitar la pintura del área con una espátula hasta poder visualizar el sustrato metálico, como se muestra en la Figura 3.2.

Nota: Complete la remoción del recubrimiento dañado durante los primeros 15 minutos después que ha salido de la cabina de exposición. Si no es posible, guárdelos herméticamente en una bolsa plástica para evitar cualquier secado.

Determine la falla promedio haciendo uso de la siguiente ecuación 3.1.:

$$C = \frac{W_c - W}{2} \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

Donde:

C = Corrosión promedio en la incisión

W_c = Promedio del ancho de la falla en la incisión (desgaste)

W = Ancho de la incisión inicial de aproximadamente 0.35 mm.



Figura 3.2. Procedimiento anterior a la toma de mediciones para determinación de incisión en la corrosión.

Evaluar la zona donde se realizó el corte y reportar el fallo en la incisión según la calificación en la Tabla D.1.

3.2.3.4. EFECTO ANTICORROSIVO

Una vez evaluada las propiedades de Ampollamiento de película, Oxidación Superficial y Corrosión en la incisión y contar con sus calificaciones (base 10), se ingresan dichos valores en la ecuación 3.2.:

$$\text{Efecto Anticorrosivo} = 0.25 * \left(\text{Ampollamiento de Pelicula} \right) + 0.50 * \left(\text{Oxidacion Superficial} \right) + 0.25 * \left(\text{Corrosion en insicion} \right)$$

Ecuación 3.2.

NOTA: El efecto anticorrosivo es el promedio ponderado de las tres propiedades analizadas anteriormente, en donde la oxidación superficial aporta 50% del puntaje, y las propiedades de ampollamiento de película y corrosión en incisión aportan 25% cada una.

3.3. DATOS OBTENIDOS

Luego de la puesta en marcha de la metodología, se tiene una colección de datos en imágenes según el tiempo de exposición que se presentan en Anexo A para las 3 muestras en cada uno de los 3 anticorrosivos.

Se procede junto a la metodología descrita, a realizar la evaluación visual por triplicado, se colocaron 3 muestras de cada uno de los anticorrosivos, de los cuales se toma un espécimen representativo. La duración total del ensayo fue de 300 horas

Se realizó un análisis totalmente descriptivo para los tiempos intermedios de 100 y 200 horas (ver Anexo E); la evaluación que determina el rendimiento del anticorrosivo es el ensayo de 300 horas, en el cual se calificara el efecto anticorrosivo a partir de los parámetros de ampollamiento de película, oxidación superficial y corrosión en la incisión.

Se realiza una escogitacion de una de las muestras para cada uno de los 3 anticorrosivos, que será la representativa y se calificara. El proceso de selección de dicha muestra será mediante una inspección visual, la lámina que presente la peor condición, será la que se evaluara y reportara en los resultados

Los datos se tabulan, teniéndose 3 tablas distintas con los 3 criterios de evaluación y el efecto anticorrosivo como ponderación de los mismos.

Los resultados que se reportan son los que siguen:

Tabla 3.1. Ponderación del rendimiento de muestra Anticorrosivo 1.

Imagen	Observaciones	
	<p>Se observan incrustaciones muy profundas en el metal, se observan áreas de color negro, pérdida total en el brillo del recubrimiento, pérdida de metal en gran medida en toda la superficie</p>	
Criterio a evaluar	Comentario	Calificación
Ampollamiento de película	El ampollamiento de película es general y fuera de control, se observa en toda la superficie.	0
Oxidación Superficial	Las manchas de oxidación están fuera de control, de color negro en toda la superficie.	0
Corrosión en Incisión	Se realiza la medida sin residuos de recubrimiento (ver anexo) y se observa que el avance de la corrosión en la incisión. Avance mayor a 16 pulgadas.	
EFEECTO ANTICORROSIVO		0

Tabla 3.2. Ponderación del rendimiento de muestra Anticorrosivo 2.


Imagen	Observaciones	
	<p>Se observa formación de incrustaciones de forma específica sobre todo en las esquinas de la lámina, poca pérdida de material en toda el área, poco cambio en el brillo y tonalidad del recubrimiento.</p>	
Criterio a evaluar	Comentario	Calificación
Ampollamiento de película	Se realiza comparativa según Norma, y cualitativamente se observan características similares a muestra 2-D	2
Oxidación Superficial	La superficie corroída está en un rango de 16% a 33% a partir de una correspondencia visual según norma a muestra 2-G.	2
Corrosión en Incisión	Se realiza la medida sin residuos de recubrimiento (ver anexo) y se observa que el avance de la corrosión en la incisión. Avance mayor a 16 pulgadas	0
EFFECTO ANTICORROSIVO		1.5

Tabla 3.3 Ponderación del rendimiento de muestra Anticorrosivo 3.

Imagen	Observaciones	
	<p>Se observan incrustaciones muy profundas en el metal, se observan áreas de color negro, pérdida total en el brillo del recubrimiento, pérdida de metal en gran medida en toda la superficie. Menor ataque que anticorrosivo 1.</p>	
Criterio a evaluar	Comentario	Calificación
Ampollamiento de película	El ampollamiento de película es general y fuera de control, se observa en toda la superficie.	0
Oxidación Superficial	Las manchas de oxidación están fuera de control, de color negro en toda la superficie	0
Corrosión en Incisión	Se realiza la medida sin residuos de recubrimiento (ver anexo) y se observa que el avance de la corrosión en la incisión. Avance mayor a 16 pulgadas	0
EFFECTO ANTICORROSIVO		0

3.4. ANÁLISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Una vez realizada la practica experimental para un tiempo de 300 horas comprendidas bajo las condiciones explicadas, se obtuvieron los resultados.

Tabla 3.4. Comparativa calificación de desempleo de los Anticorrosivos 1, 2 y 3







	Anticorrosivo 1	Anticorrosivo 2	Anticorrosivo 3
Ampollamiento de película	0	2	0
Oxidación superficial	0	2	0
Corrosión en la Incisión	0	0	0
Efecto anticorrosivo	0	1.5	0

Ninguno de los anticorrosivos destaco de forma muy ventajosa respecto del resto en cuanto a las calificaciones brindadas mediante la aplicación de la Norma ASTM D610-08 junto con las normas auxiliares. Sin embargo, el Anticorrosivo 2 muestra un desempeño mejor que sus análogos.

En cuanto a factibilidad técnica a la hora de utilizar cada recubrimiento como protección ante la corrosión mediante inhición de la misma, las muestras 1 y 3 no brindan ninguna certeza en cuanto a la integridad que preservarían del sustrato metálico en ambientes corrosivos agresivos ya que tienen la calificación más baja posible de 0.

Y de acuerdo a la selección de los anticorrosivos empleados en este estudio, aquella marca comercial que tiene el mayor valor de mercado según su posicionamiento a nivel mundial, capacidad tecnológica y percepción ante la población que cuenta con los productos de mayor calidad, fue aquella que presento la mejor calificación respecto al efecto anticorrosivo con un total de 1.5, es una calificación no del todo satisfactoria y por tanto debe evaluarse las condiciones de servicio en caso de usarse como recubrimiento de tipo inhibidor, ambiente corrosivo (sobre todo salino a alta temperatura, ya que es lo que se pretendió simular) así como los esfuerzos mecánicos .

Tabla 3.5. Comparativa antes y después de 300 horas en intemperismo acelerado para cada muestra.

	Muestra testigo	Muestra luego de 300 horas en Q-FOG
Anticorrosivo 1		
Anticorrosivo 2		
Anticorrosivo 3		

A nivel visual puede notarse diferencias importantes, el metal por mucho más dañado es el que fue protegido con el anticorrosivo 1 con apenas espacios donde se pueda observar su color original, espacios con corrosión muy profunda, decoloración general; el anticorrosivo 3 presenta una afectación de las mismas características, pero con mucha menor intensidad, es decir, los espacios afectados por la corrosión no son igual de profundos. Por otro lado, la muestra 2, en virtud del ataque agresivo por el ambiente controlado en la cámara salina, mantiene el color y estructura en gran medida en casi toda la superficie, a excepción de los bordes; una diferencia notable respecto a las dos muestras anteriores. Sin embargo, este análisis es en virtud de la estética, mientras que la evaluación bajo las normas descritas en la metodología, califica en relación a su desempeño en servicio.

La aplicación de estadares Normados, permitieron la comparación en cuanto al desempeño de los anticorrosivos en estudio de la forma más objetiva, sin caer en la subjetividad de parte de los investigadores.

CONCLUSIONES

Luego de la investigación bibliográfica y la puesta en marcha de la metodología experimental, todo basado en los objetivos iniciales trazados, los resultados esperados y las limitaciones planteadas en el marco contextual referencial, se concluye:

1. Los mecanismos por los que los recubrimientos anticorrosivos de tipo inhibidor protegen a los sustratos metálicos son: por la presencia de películas (inhibidores anódicos), por la formación de precipitados voluminosos (inhibidores catódicos), reduciendo la movilidad iónica entre electrodos (inhibidores óhmicos), propiciando la formación de precipitados voluminosos en toda la superficie (inhibidores de precipitación), por adsorción de compuestos químicos en fase vapor que neutralizan la humedad, promoviendo formación de películas pasivas o protegiendo formando un film generalizado (inhibidores de fase vapor).
2. Luego de caracterizado el sistema adecuado de recubrimiento anticorrosivo inhibidor, se debe aplicar respetando las características especiales de cada recubrimiento según está indicado en la hoja técnica.
3. Las normas ASTM D610, ASTM B117 y normas auxiliares parámetros para el funcionamiento correcto de los equipos de intemperismo y una metodología técnica que sirve en la evaluación de recubrimientos anticorrosivos tipo inhibidor en placas de acero normadas.
4. Mediante la aplicación de la metodología se evaluó el rendimiento de 3 distintos anticorrosivos de tipo inhibidor, comparando su desempeño en intemperismo acelerado en un ensayo de 300 horas, caracterizándose a nivel visual los estados iniciales, intermedios y finales de cada una de las muestras. Donde el anticorrosivo 1 fue el que presentó el avance en corrosión con mayor rapidez, pudiéndose terminar el ensayo incluso a las 200 horas; el anticorrosivo 2 fue el que menos cambios presentó respecto al inicio del ensayo.

5. Los recubrimientos en estudio, no son factibles a nivel técnico luego de 300 horas en intemperismo acelerado, ya que sus calificaciones en efecto anticorrosivo se encontraban entre 0 y 1.5 en una base de 0 al 10 donde 10 es excelencia; valores que no pueden extrapolarse directamente al rendimiento en servicio debido a las características de las pruebas en laboratorio; pero que nos brinda un marco de referencia sobre el comportamiento de los anticorrosivos ante condiciones extremas.
6. Desde un punto de vista estético, el anticorrosivo 2 presentó el menor desgaste acabado el ensayo; resultado que corrobora su posición en el mercado nacional en relación a la percepción de calidad de sus productos por los clientes.
7. A partir de los resultados obtenidos los recubrimientos anticorrosivos de tipo inhibidor no son los idóneos cuando las condiciones del ambiente son de tipo salino.

BIBLIOGRAFÍA

A&A Coatings. (21 de Enero de 2018). *What Are the Dangers of Corrosion?*. New Jersey. Estados Unidos. Obtenido de: <https://goo.su/aoRB>

Ahmad, Z. (2006). *Principles of corrosion and engineering and corrosion control*. Oxford, Reino Unido: ICheme.

ASTM D610-08 (2019). *Practica estándar para evaluar el grado de oxidación en superficies de acero pintadas*, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. Estados Unidos

ASTM B117-18 (2018). *Practica estándar de operación para aparatos de niebla salina*. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. Estados Unidos

ASTM D154-85 (2009). *Guía estándar para probar barnices*. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. Estados Unidos.

ASTM D174-25 (1925). *Especificación para arpillera saturada con sustancias bituminosas para uso en impermeabilización*, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. Estados Unidos.

ASTM International. (2000). *Corrosion: Understanding the basics*. Estados Unidos: ASTM

Cajamarca M., M. A., & Romero V., M. F. (Mayo de 2014). *Estudio del comportamiento de los recubrimientos anticorrosivos utilizados en las estructuras metálicas de edificios de la región costa del Ecuador*. (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánica). Universidad Politecnica Salesiana Sede Cuenca. Ecuador. Obtenido de: <https://dspace.ups.edu.ec/>

Dahbura R, L. E. (Agosto de 2012). *Diseño y construcción de una cámara de niebla para ensayos de corrosión*. (Trabajo de grado en Ingeniería Mecánica). Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. El Salvador.

Ebert, W. L. (2012). *Material Performance and Corrosion/Waste Materials*. Amsterdam. Holanda: Elsevier

Einar, B. (2003). *Corrosion and protection*. Trondheim. Noruega: Springer

EONCOAT. (6 de Diciembre de 2016). *5 Different types of corrosion prevention methods*. Carolina del Norte. Estados Unidos Obtenido de: <https://goo.su/bMI0>

Gellings, P. (1985). *Introduction to corrosion prevention and control*. Delft. Holanda: Delft University Press.

Institute of Corrosion. (18 de Mayo de 2021). *The Effects of Corrosion*. Northampton. Reino Unido. Obtenido de: <https://goo.su/bZtx>

Moscol-Sandoval, T. (Julio de 2013). *Mejoras para la protección anticorrosiva en la zona splash de los pilotes en el muelle del Terminal Bayóvar* (Tesis de pregrado en Ingeniería MecánicoEléctrica). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

Q-LAB. (2021). *Folleto Q-FOG*. Obtenido de <https://goo.su/bPZB>

Q-Lab. (2021). *Specifications Bulletin* . Obtenido de <https://goo.su/b5AS>

R. Winston, R. (2008). *Corrosion and control corrosion: An Introduction to Corrosion Science and Engineering* . New Jersey. Estados Unidos: Wiley

Roberge, P. R. (2000). *Handbook of Corrosion Engineering*. Estados Unidos: Mc. Graw-Hill.

ANEXOS

ANEXO A. CONDICION INICIAL DE LAS LÁMINAS SEGÚN EL ANTICORROSIVO, MEDIDAS DE ESPESORES Y VARIABLES ESTADISTICAS INVOLUCRADAS.

Tabla A.1. Fotografías de las láminas utilizadas con Anticorrosivo 1. Variables estadísticas representativas por muestra.


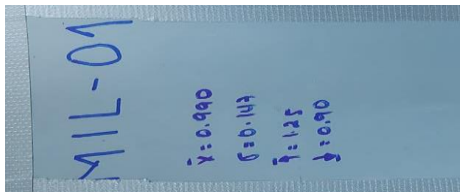



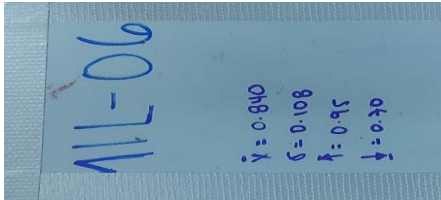


Fotografía de la lamina	Valores estadísticos de espesor de película en la superficie
	 <p>MIL-01 $\bar{y} = 0.990$ $\sigma = 0.117$ $\bar{f} = 1.25$ $\bar{g} = 0.90$</p>
	 <p>MIL-05 $\bar{y} = 0.983$ $\sigma = 0.309$ $\bar{f} = 1.60$ $\bar{g} = 0.55$</p>
	 <p>MIL-06 $\bar{y} = 0.840$ $\sigma = 0.108$ $\bar{f} = 0.95$ $\bar{g} = 0.70$</p>
	 <p>MIL-08 $\bar{y} = 0.930$ $\sigma = 0.079$ $\bar{f} = 1.05$ $\bar{g} = 0.85$</p>

Tabla A.2. Fotografías de las láminas utilizadas con Anticorrosivo 2. Variables estadísticas representativas por muestra.


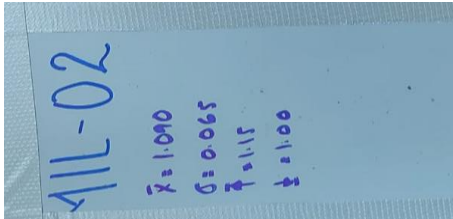
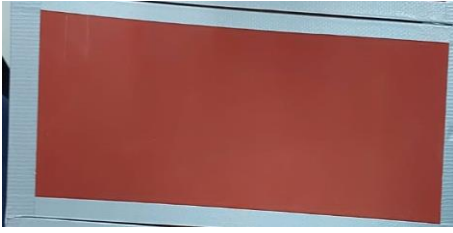
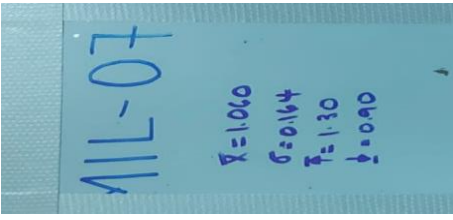

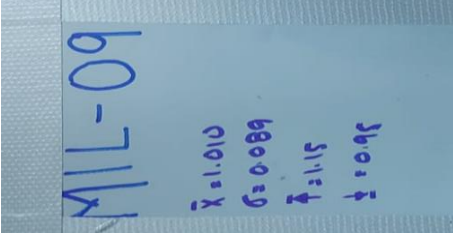

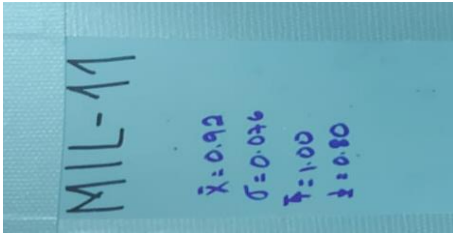

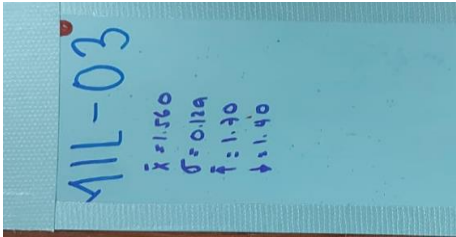

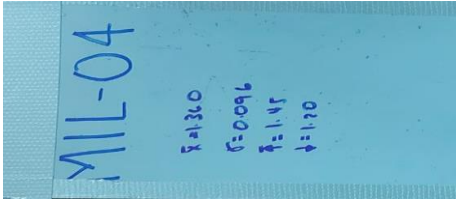



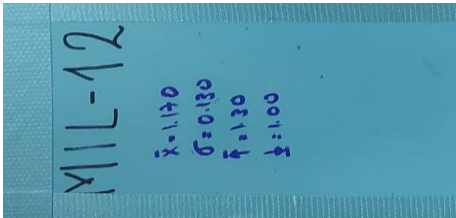
Fotografía de la lamina	Valores estadísticos de espesor de película en la superficie
	 <p>MIL-02</p> <p>$\bar{x} = 1.090$ $\sigma = 0.065$ $\bar{F} = 1.15$ $\bar{z} = 1.00$</p>
	 <p>MIL-07</p> <p>$\bar{x} = 1.060$ $\sigma = 0.164$ $\bar{F} = 1.30$ $\bar{z} = 0.90$</p>
	 <p>MIL-09</p> <p>$\bar{x} = 1.010$ $\sigma = 0.089$ $\bar{F} = 1.15$ $\bar{z} = 0.95$</p>
	 <p>MIL-11</p> <p>$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0.076$ $\bar{F} = 1.00$ $\bar{z} = 0.80$</p>

Tabla A.3. Fotografías de las láminas utilizadas con Anticorrosivo 3. Variables estadísticas representativas por muestra.

Fotografía de la lamina	Valores estadísticos de espesor de película en la superficie
	 <p>MIL-03</p> <p>$\bar{x} = 1.560$ $\sigma = 0.129$ $\bar{f} = 1.70$ $\downarrow = 1.40$</p>
	 <p>MIL-04</p> <p>$\bar{x} = 1.360$ $\sigma = 0.096$ $\bar{f} = 1.45$ $\downarrow = 1.20$</p>
	 <p>MIL-10</p> <p>$\bar{x} = 1.430$ $\sigma = 0.097$ $\bar{f} = 1.55$ $\downarrow = 1.30$</p>
	 <p>MIL-12</p> <p>$\bar{x} = 1.170$ $\sigma = 0.130$ $\bar{f} = 1.30$ $\downarrow = 1.00$</p>

ANEXO B. COMPARADORES VISUALES Y TABLA COMPARATIVA PARA LA EVALUACION CRITERIO AMPOLLAMIENTO DE PELICULA

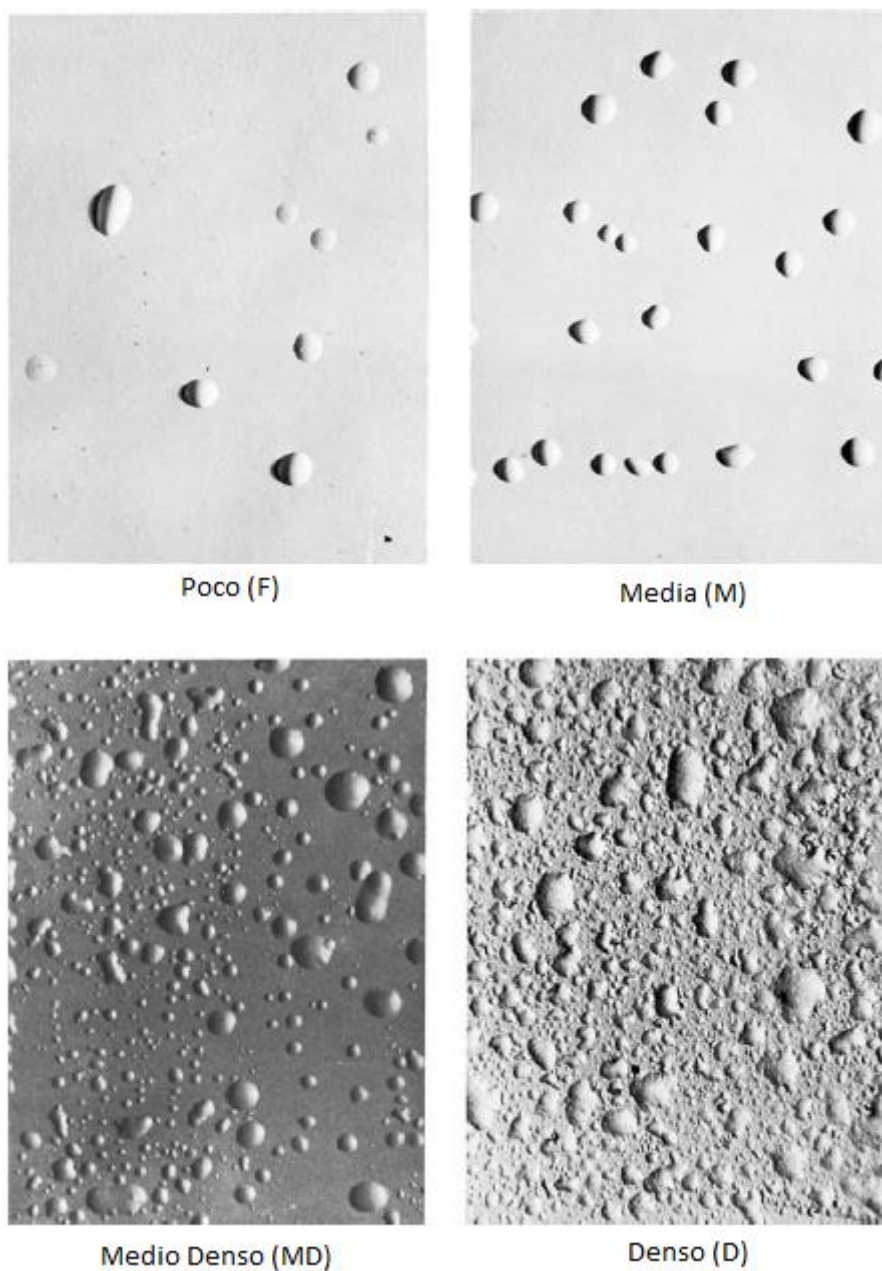
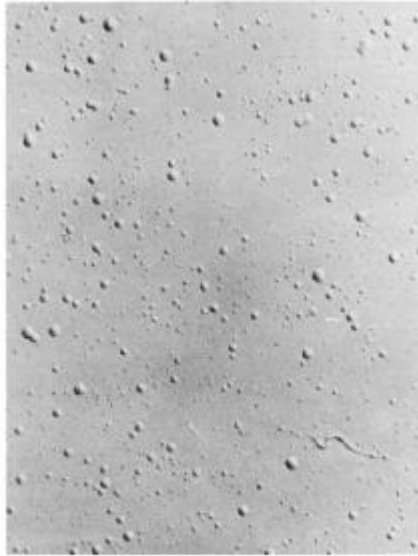


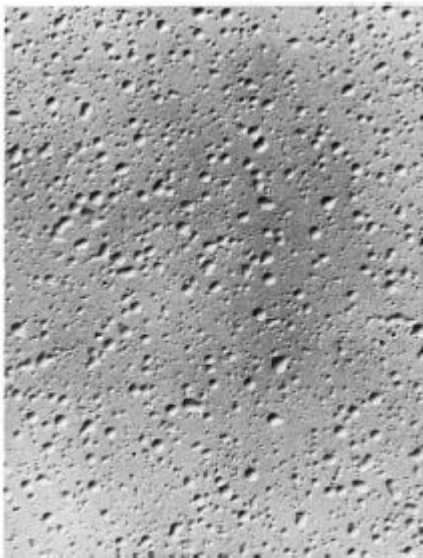
Figura B.1. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 2.



Poco (F)



Media (M)

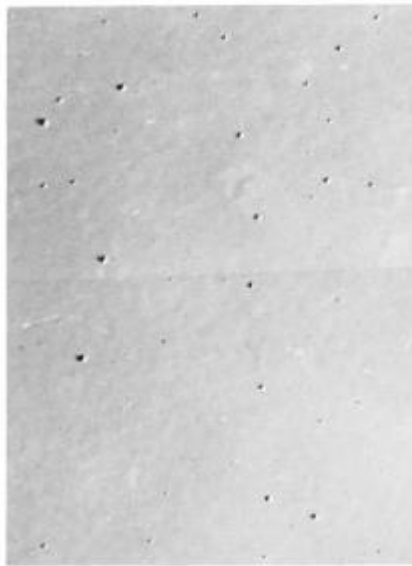


Medio Denso (MD)

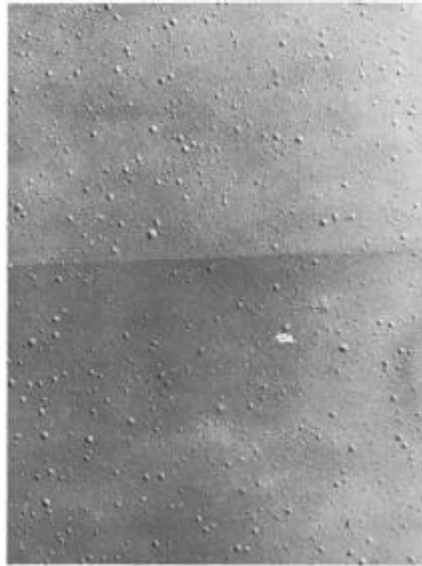


Denso (D)

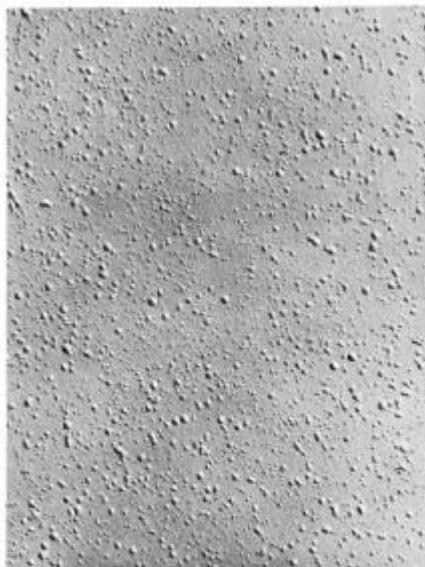
Figura B.2. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 4.



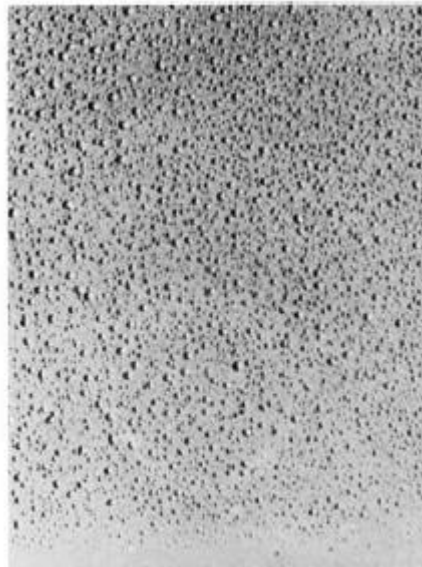
Poco (F)



Media (M)

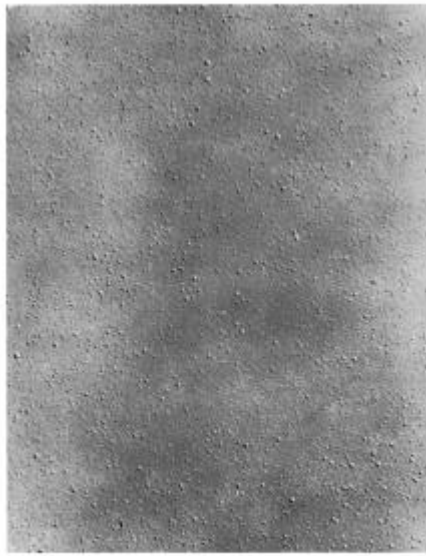


Medio Denso (MD)



Denso (D)

Figura B.3. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 6.



Medio Denso (MD)



Denso (D)



Poco (F)



Media (M)

Figura B.4. Comparador visual para tamaño de ampollas N° 8.

Tabla B.1. Escala y descripción de los valores de ampollamiento de película

Grado de oxido (Calificación)	Tamaño	Frecuencia			
		Poco (F)	Media (M)	Medianamente Denso (MD)	Denso (D)
10	Sin ampollamiento	-	-	-	-
9	Tamaño intermedio entre 10 y 8	9-F	9-M	9-MD	9-D
8	Similar al estándar en figura 4	8-F	8-M	8-MD	8-D
7	Tamaño intermedio entre 8 y 6	7-F	7-M	7-MD	7-D
6	Similar al estándar en figura 3	6-F	6-M	6-MD	6-D
5	Tamaño intermedio entre 6 y 4	5-F	5-M	5-MD	5-D
4	Similar al estándar en figura 2	4-F	4-M	4-MD	4-D
3	Tamaño intermedio entre 4 y 2	3-F	3-M	3-MD	3-D
2	Similar al estándar en figura 1	2-F	2-M	2-MD	2-D
1	Tamaño superior a 2	1-F	1-M	1-MD	1-D
0	Tamaño de ampolla excesivo	-	-	-	-

ANEXO C. EJEMPLOS VISUALES Y TABLA COMPARATIVA PARA LA EVALUACIÓN CRITERIO OXIDACION SUPERFICIAL.

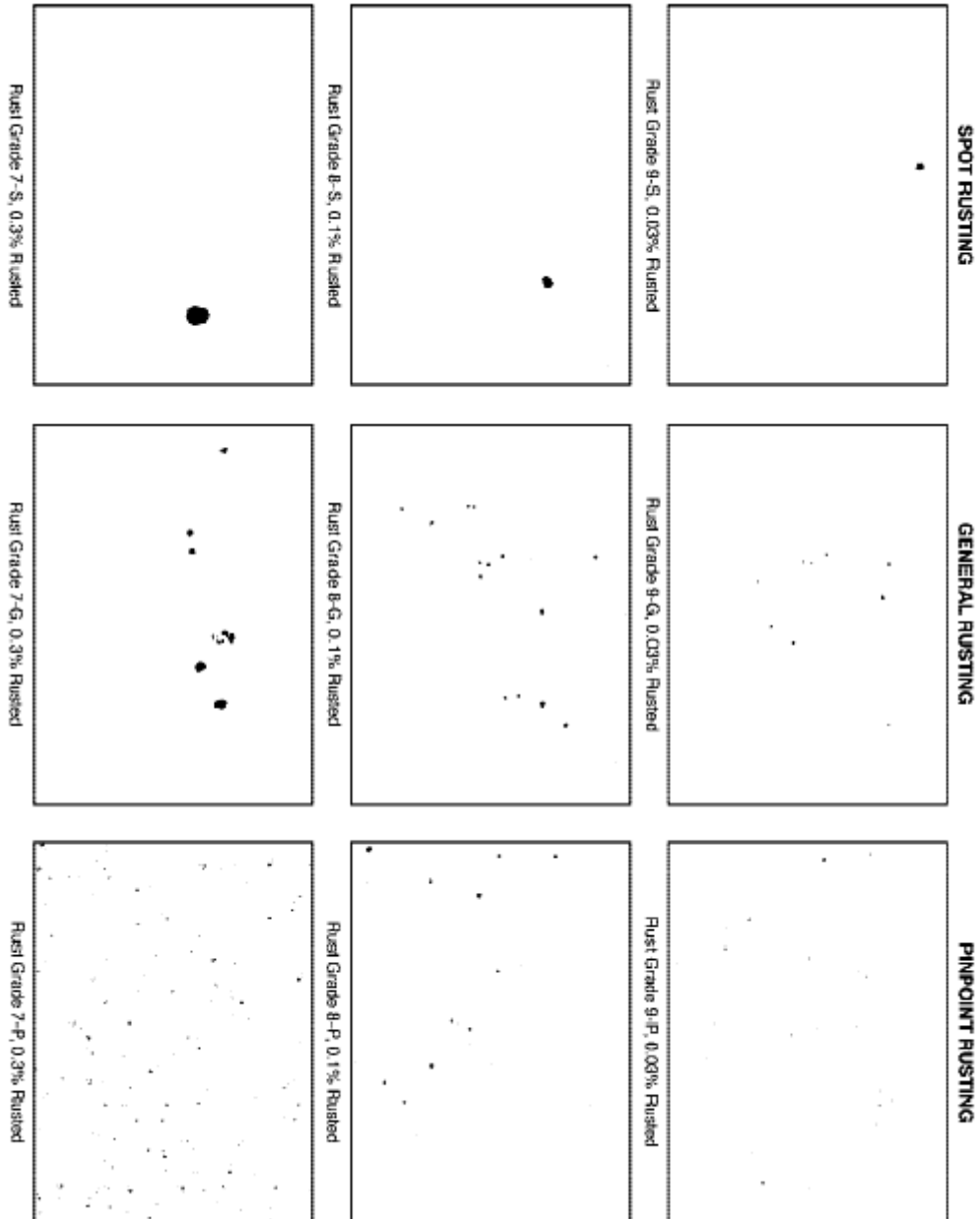


Figura C.1. Ejemplos comparativos de porcentajes de áreas de oxidación (0.03% - 0.3%)

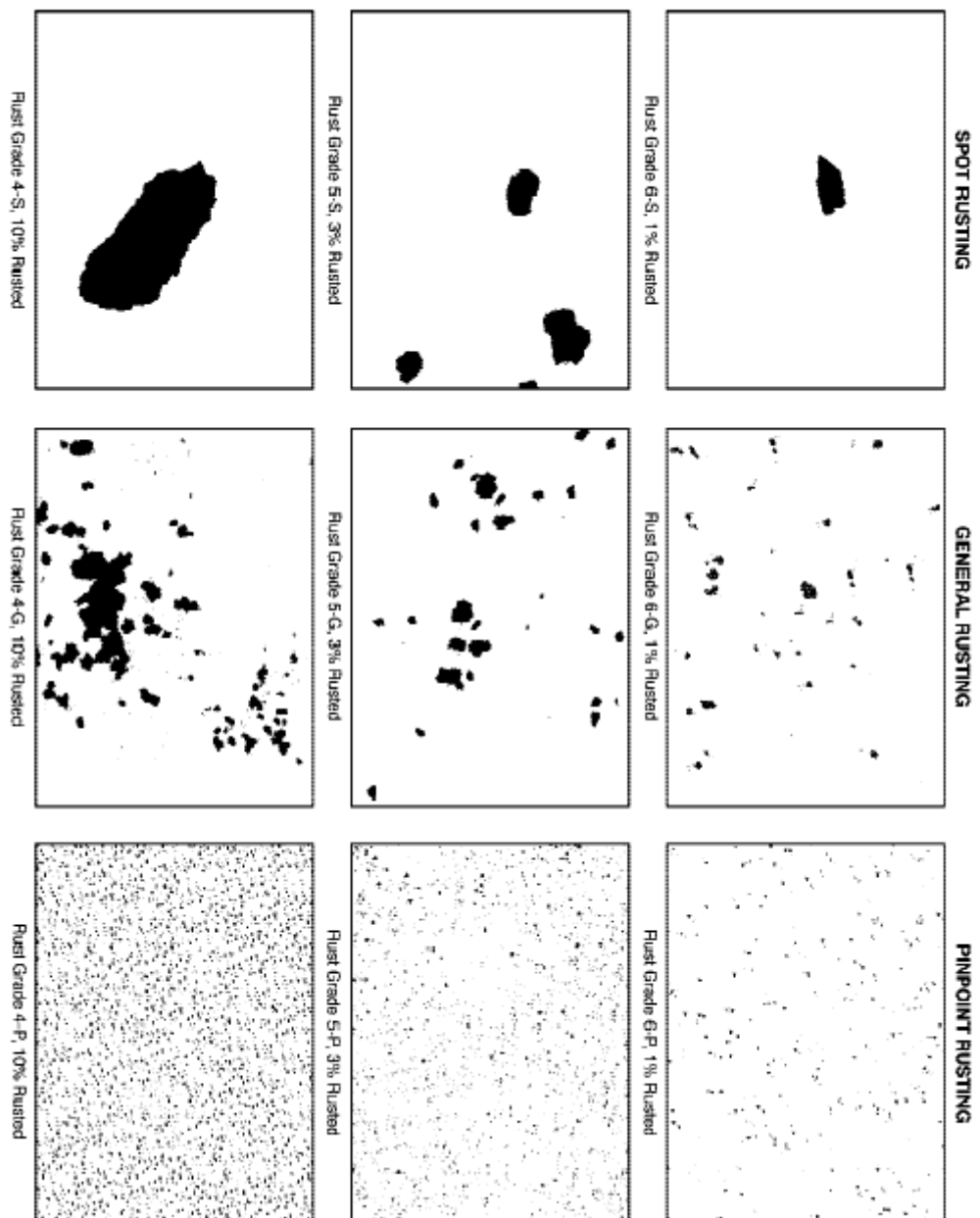


Figura C.2. Ejemplos comparativos de porcentajes de áreas de oxidación (1% - 10%)

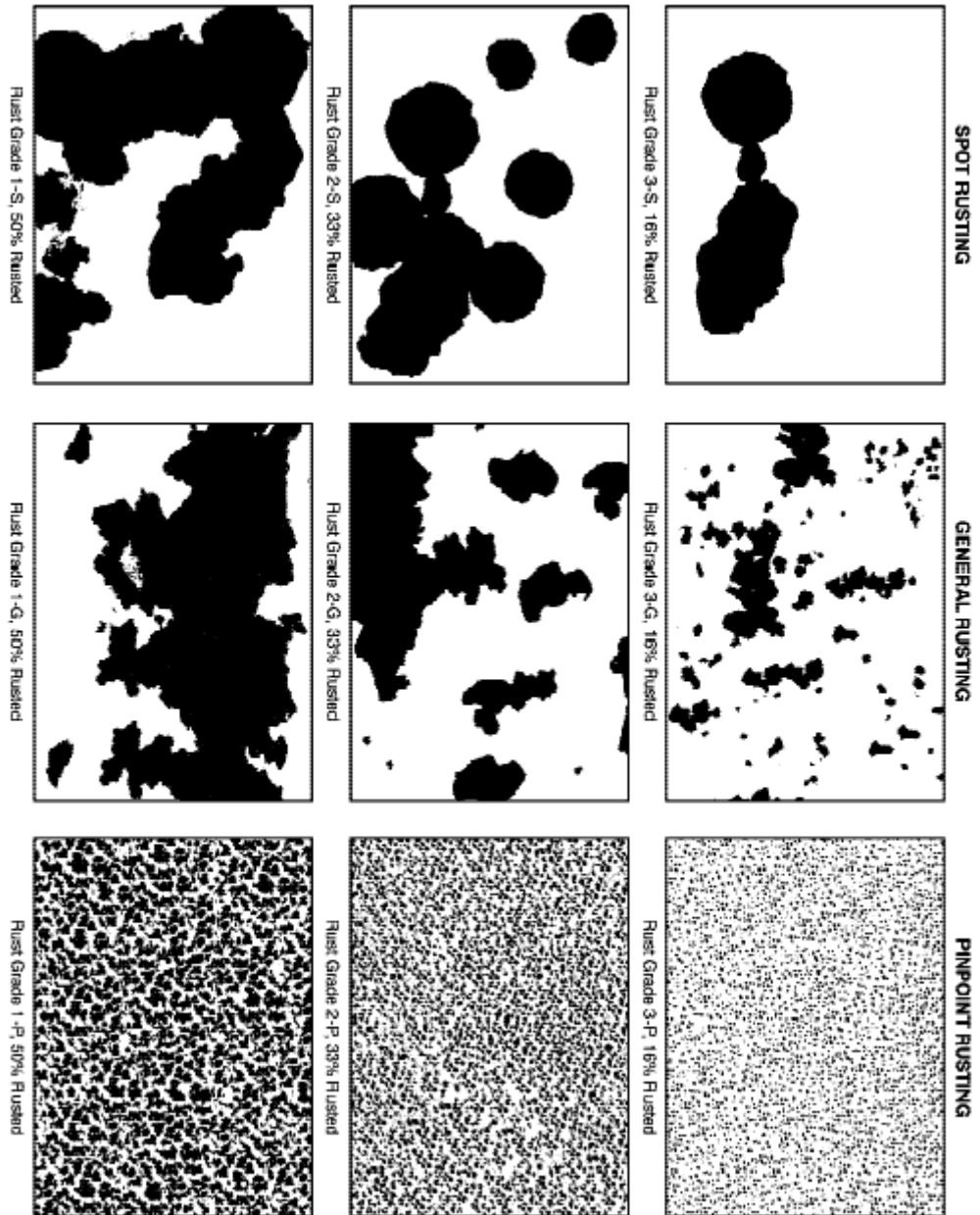


Figura C.3. Ejemplos comparativos de porcentajes de áreas de oxidación (16% - 50%)

Tabla C.1. Escala y descripción de los valores de oxidación superficial

Grado de Óxido (Calificación)	Porcentaje Corroído (oxidado) de la superficie	Estándares Visuales		
		Spot (S)	General (G)	Pin Point (P)
10	Menor o igual que 0.01 %	-	-	-
9	Mayor que 0.01% y hasta 0.03%	9-S	9-G	9-P
8	Mayor que 0.03% y hasta 0.1 %	8-S	8-G	8-P
7	Mayor que 0.1% y hasta 0.3%	7-S	7-G	7-P
6	Mayor que 0.3% y hasta 1.0%	6-S	6-G	6-P
5	Mayor que 1% y hasta 3%	5-S	5-G	5-P
4	Mayor que 3% y hasta 10%	4-S	4-G	4-P
3	Mayor que 10% y hasta 16%	3-S	3-G	3-P
2	Mayor que 16% y hasta 33%	2-S	2-G	2-P
1	Mayor que 33% y hasta 50%	1-S	1-G	1-P
0	Mayor que 50%	-	-	-

ANEXO D. TABLA COMPARATIVA PARA LA EVALUACION CRITERIO CORROSION EN LA INCISION

Tabla D.1 Daño de la corrosión sobre la incisión.

Calificación	C (milímetros)	C (pulgadas)
10	Cero	0
9	Arriba de 0 hasta 0.5	de 0 a 1/64
8	Arriba de 0.5 hasta 1.0	de 1/64 a 1/32
7	Arriba de 1.0 hasta 2.0	de 1/32 a 1/16
6	Arriba de 2.0 hasta 3.0	de 1/16 a 1/8
5	Arriba de 3.0 hasta 5.0	de 1/8 a 3/16
4	Arriba de 5.0 hasta 7.0	de 3/16 a 1/4
3	Arriba de 7.0 hasta 10.0	de 1/4 a 3/8
2	Arriba de 10.0 hasta 13.0	de 3/8 a 1/2
1	Arriba de 13.0 hasta 16.0	de 1/2 a 5/8
0	Arriba de 16.0 o más.	5/8 o mas

ANEXO E. COMPILADO DE LAS MUESTRAS POR TRIPLICADO PARA CADA ANTICORROSIVO: 100, 200 Y 300 HORAS EN LA CAMARA SALINA.

Tabla E.1. Fotografías muestras por triplicado para Anticorrosivo 1 luego de 100, 200 y 300 horas en cámara Q-FOG


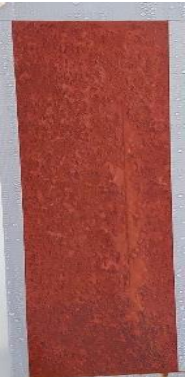



100 horas			
200 horas			
300 horas			

Tabla E.2. Fotografías muestras por triplicado para Anticorrosivo 2
luego de 100, 200 y 300 horas en cámara Q-FOG

100 horas



200 horas

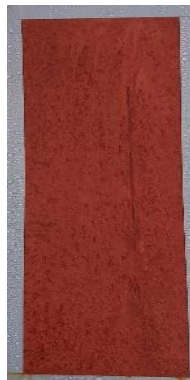
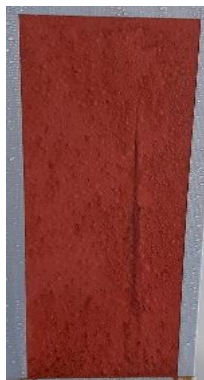


300 horas



Tabla E.3. Fotografías muestras por triplicado para Anticorrosivo 3
luego de 100, 200 y 300 horas en cámara Q-FOG

100 horas



200 horas



300 horas

