

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 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS PARA
LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN ACERO NORMADO A36
FRENTE A SUSTANCIAS QUÍMICAS A GRANEL COMÚNMENTE UTILIZADAS
EN LA AGROINDUSTRIA SALVADOREÑA**

PRESENTADO POR:
ANDREA GERALDINA CÁCERES MARTÍNEZ
DIANA ALICIA LÓPEZ CLÍMACO
KATHYA MELISSA BONILLA GAVIDIA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

INGA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS

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 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS PARA
LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN ACERO NORMADO A36
FRENTE A SUSTANCIAS QUÍMICAS A GRANEL COMÚNMENTE UTILIZADAS
EN LA AGROINDUSTRIA SALVADOREÑA**

Para optar al título de:

INGENIERA QUÍMICO

Presentado por:

ANDREA GERALDINA CÁCERES MARTÍNEZ

DIANA ALICIA LÓPEZ CLÍMACO

KATHYA MELISSA BONILLA GAVIDIA

Docente asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO 2023

Trabajo de Grado aprobado por

DOCENTE ASESOR

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

DEDICATORIA

Con cariño:

A mi madre, a mis hermanas y a mi hermano, por el apoyo moral y económico, la confianza, la paciencia y por estar siempre presentes, pese a la distancia, de principio a fin durante todo el recorrido de mi carrera profesional.

A mis sobrinos Adriana, Katherine y Edward por ser mi mayor motivación a ser una persona de bien y poder llegar a ser un ejemplo para ellos.

Andrea Geraldina Cáceres Martínez

A mi padre Ricardo, mi madre Idalia y mi hermana Andrea, quienes hacen que los éxitos sean mayores. Gracias.

Diana Alicia López Clímaco

A todas las personas que me acompañaron en las diferentes etapas de este largo camino siendo un apoyo incondicional, gracias por todo.

Kathya Melissa Bonilla Gavidia

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación es el resultado de esfuerzos personales y colaboraciones institucionales, desde la planificación hasta su culminación.

Agradecemos en primer lugar a la Universidad de El Salvador, que a través de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura logró establecer el puente de comunicación entre las empresas privadas involucradas en realización de la fase experimental.

Extendemos muestra gratitud al ingeniero Héctor Manuel Guerra Pérez, quién nos brindó la guía necesaria, no solo como docente y asesor, sino también, como experto en el área del estudio de la corrosión.

A las instituciones privadas que abrieron sus puertas, tanto para la preparación como para la realización de la nuestro experimento y observaciones, brindándonos no solo apoyo material, sino, poniendo a disposición su talento humano, cuya presencia e instrucción aseguró el éxito de este trabajo.

RESUMEN

El presente documento expone el proceso realizado para la estimación de la durabilidad de diferentes sistemas de recubrimientos aplicados con dos técnicas de preparación de superficie diferente frente a distintas sustancias utilizadas como fertilizantes mediante pruebas de corrosión in situ. Reportando resultados con base principalmente a las normas ASTM-D610/SSPC-VIS2 y ASTM-D714, las cuales tratan sobre el grado de corrosión desarrollado sobre superficies pintadas y el grado de formación de ampollas sobre recubrimientos respectivamente.

Para poder realizar dichas pruebas, se tomaron perfiles tipo “L” de acero A36 de 20 centímetros de longitud los cuales se sometieron a preparación de superficie con herramientas y preparación de superficie con chorro abrasivo de arena o “sandblasting”, aplicándoles luego a cada tipo 3 sistemas de recubrimientos catalogados con fines prácticos como de: moderado desempeño, desempeño intermedio y alto desempeño, para finalmente colocarlos por inmersión en 5 sustancias químicas a granel: Urea, Nitrato de amonio, Sulfato de amonio, Fosfato diamónico (DAP) y Muriato de potasio (MOP). Cabe destacar que la inmersión de especímenes se delimitó a un tiempo de 1000 horas, por lo que fue necesario realizar a cada espécimen dos cortes sobre el recubrimiento aplicado para acelerar el proceso de ataque químico sobre éste, siendo la falla el área de interés para realizar las observaciones respecto a las normas antes mencionadas.

En el transcurso del tiempo en inmersión, se realizaron 6 observaciones, iniciando a las 70 horas, luego, a las 230, 400, 730, 900 horas y como observación final a las 1000 horas, donde se obtuvieron como datos destacables que el nitrato de amonio es la sustancia más corrosiva entre las 5 puestas a prueba, mientras que las menos agresivas fueron sulfato de amonio y DAP. Los sistemas de recubrimiento de desempeño moderado, de manera general, poseen resistencias similares al ser aplicados en superficies preparadas con ambas técnicas (herramientas y sandblasting), mientras que los recubrimientos de desempeños intermedios y altos, presentaron mejores resultados en aplicaciones sobre superficies preparadas por sandblasting.

Estos resultados pueden ser útiles para la creación de planes de mantenimiento donde considere la importancia de una buena preparación de superficie previa a la aplicación de recubrimientos y la selección del sistema de éste en función de la sustancia a la que estará expuesto en las instalaciones. El aporte principal de este proyecto radica en el diseño de las pruebas en base a las condiciones de trabajo y la transformación de una variable inicialmente cualitativa a cuantitativa para una mejor ilustración de los resultados obtenidos. Debido al alcance y limitantes del proyecto, las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) no fueron tomadas como variables determinantes para la estimación de resultados, pero se deja abierta la posibilidad que en proyectos futuros similares a este puedan considerarse dichos parámetros para darle un fundamento adicional a la formación y desarrollo de la corrosión.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL.....	2
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO.....	5
1.5 LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	5
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 CORROSIÓN.....	6
2.2 IMPACTO DE LA CORROSIÓN.....	6
2.3 TIPOS DE CORROSIÓN.....	6
2.4 AMBIENTES CORROSIVOS.....	9
2.4.1 TIPOS DE AMBIENTES CORROSIVOS.....	9
2.5 GENERALIDADES DEL ACERO.....	11
2.5.1 ACEROS AL CARBONO ASTM A36.....	11
2.6 CONTROL DEL PROCESO DE CORROSIÓN.....	12
2.7 PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN VÍA RECUBRIMIENTOS.....	13
2.7.1 FUNCIONALIDAD DEL RECUBRIMIENTO.....	13
2.7.2 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS.....	14
2.7.3 RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS MÁS UTILIZADOS.....	15
2.7.4 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS.....	16
2.7.4.1 PREPARACIÓN DE SUPERFICIE.....	16
2.7.4.2 RECUBRIMIENTOS PRIMARIOS.....	18
2.7.4.3 RECUBRIMIENTOS SECUNDARIOS O INTERMEDIOS.....	18
2.7.4.4 ACABADOS.....	18
2.7.5 NORMATIVA ASOCIADA.....	19

2.8	INDUSTRIA DE FERTILIZANTES.....	21
2.8.1	SUSTANCIAS QUÍMICAS	23
2.8.2	CORROSIÓN EN SISTEMAS AGROINDUSTRIALES.....	24
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....		26
3.1	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	26
3.2	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y SUSTANCIAS	28
3.2.1	ESPECIFICACIONES DEL ACERO	28
3.2.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS	29
3.2.3	CARACTERIZACIÓN DE FERTILIZANTES.....	31
3.3	PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES.....	36
3.3.1	PREPARACIÓN DE SUPERFICIE.....	36
3.3.1.1	PREPARACIÓN DE SUPERFICIE: LIMPIEZA CON HERRAMIENTAS MANUALES (PH).....	37
3.3.1.2	PREPARACIÓN DE SUPERFICIE: GRANALLADO COMERCIAL.....	38
3.3.2	APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS	40
3.3.2.1	PREPARACIÓN DE MEZCLA.....	40
3.3.2.2	EQUIPO DE APLICACIÓN	42
3.3.2.3	MEDICIÓN DE ESPESORES	42
3.3.2.4	EMPAQUE Y EMBALAJE	44
3.4	PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE OBSERVACIONES.....	44
3.4.1	CORTE DE FALLA	45
3.4.2	DISPOSICIÓN ESTRUCTURAL	45
3.4.3	INMERSIÓN INICIAL.....	47
3.4.4	EXTRACCIÓN / INMERSIÓN	48
3.4.5	TRATAMIENTO	49
3.4.6	MONITOREO DE LA CORROSIÓN.....	50
CAPITULO IV. RESULTADOS.....		52
4.1	GRADO DE CORROSIÓN SEGÚN NORMA ASTM - D610 / SSPC -VIS 2.....	52
4.1.1	GRÁFICAS DEL NIVEL DE CORROSIÓN VS TIEMPO PARA EL SISTEMA MD	54

4.1.2	GRÁFICAS DE NIVEL DE CORROSIÓN VS TIEMPO PARA EL SISTEMA DI	57
4.1.3	GRÁFICAS DEL NIVEL DE CORROSIÓN VS TIEMPO PARA EL SISTEMA AD	60
4.2	GRADO DE AMPOLLAMIENTO SEGÚN NORMA ASTM – D714.....	63
4.3	DURABILIDAD DE LOS SISTEMAS CON BASE EN EL GRADO DE CORROSIÓN Y LA PRESENCIA DE AMPOLLA	69
4.4	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN CON BASE EN LA PRESENCIA DE CORROSIÓN Y AMPOLLAMIENTO	71
CONCLUSIONES.....		74
RECOMENDACIONES.....		75
BIBLIOGRAFÍA.....		76
ANEXOS		78
ANEXO 1.EJEMPLO DEL FORMATO UTILIZADO PARA REGISTRO DE DATOS DURANTE LAS OBSERVACIONES		78
ANEXO 2.RESULTADOS MÁS RELEVANTES OBTENIDOS POR SUSTANCIA.....		79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Principales formas de ataque por corrosión agrupadas por la facilidad de su identificación (Morales, 2021).....	7
Figura 2.2.	Clasificación de los métodos de protección contra la corrosión (Franco, 2017).	12
Figura 2.3.	Portada de la Norma SSPC-VIS1 (Sociedad de Recubrimientos Protectores, 2004).....	19
Figura 2.4.	Portada de la Norma SSPC-VIS 3 (Sociedad de Recubrimientos Protectores, 2004).....	20
Figura 2.5.	Portada de la norma SSPC – VIS 2. (Sociedad de Recubrimientos Protectores, 2000).....	20
Figura 2.6.	Tres principales eslabones de la cadena de valor de fertilizantes en El Salvador (SC, 2009).....	22
Figura 2.7.	Esquema general de producción de fertilizantes (FAO, 2002).....	24
Figura 3.1.	Esquema de variables a considerar para definición de diseño experimental.	26
Figura 3.2.	Ejemplo de perfil tipo “L” de acero normado A36.	29
Figura 3.3.	Fertilizante urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, No. CAS: 57-13-6	31
Figura 3.4.	Fertilizante Nitrato de Amonio NH_4NO_3 , No. CAS 6484-52-2	32
Figura 3.5.	Sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$, No. CAS: 7783-20-2	33
Figura 3.6.	Fosfato diamónico (DAP) $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_3$, No. CAS: 7783-28-0.....	34
Figura 3.7.	Muriato de potasio (MOP) KCl, No. CAS: 7447-40-7.....	35
Figura 3.8.	Piezas de acero posterior al proceso de corte y preparación.	36
Figura 3.9.	Preparación con herramienta. A) Lija grado P320. B) Solvente Naphtha.	37
Figura 3.10.	Piezas preparadas con herramienta para la aplicación del recubrimiento.	37
Figura 3.11.	Grados de corrosión previo al granallado según la norma SSPC -VIS1.	38
Figura 3.12.	Grados de preparación para el Grado de corrosión B según norma SSPC VIS1.	39

Figura 3.13.	Ejemplos de piezas granalladas. A) Grado de corrosión B SP-5. B) Grado de corrosión B SP-10.....	39
Figura 3.14.	Medición de perfil de superficie para las piezas con preparación por sandblasting.....	40
Figura 3.15.	Ejemplo de preparación de mezcla: Acabado poliuretano con una reducción del 25% de acabado poliuretano.....	41
Figura 3.16.	Equipo de aplicación: Pistola de aspersión por gravedad.....	42
Figura 3.17.	Medición de espesor de película seca con equipo ELCOMETER.	42
Figura 3.18.	Orden de aplicación de los recubrimientos para el sistema AD con PH. S) Substrato acero A36. 1) primario rico en zinc (24 h de secado). 2) Secundario epoxy (8 h de secado). 3) Acabado poliuretano (12 h de secado). 4) Especímenes PHAD (7 días de curado)	43
Figura 3.19.	A) Etiquetado de especímenes. B) Empaque, embalaje y transporte.....	44
Figura 3.20.	Corte de falla.....	45
Figura 3.21.	Esquema estructural de especímenes.	46
Figura 3.22.	Especímenes listos para inmersión.....	46
Figura 3.23.	Sacos contenedores de las sustancias químicas en el interior de la bodega de almacenamiento.	47
Figura 3.24.	Especímenes totalmente sumergidos en las sustancias químicas.	47
Figura 3.25.	Herramientas de inmersión/extracción. A) Cuchilla, palas de plástico y de madera para Urea. B) Palas de plástico para Nitrato de Amonio. C) pala de madera para Sulfato de amonio.....	48
Figura 3.26.	Ejemplo de inmersión de especímenes en el Nitrato de Amonio. A) Realización de surcos. B) y C) Inmersión de especímenes.....	49
Figura 3.27.	A) Inmersión en DAP. B) Extracción en MOP.....	49
Figura 3.28.	Tratamiento de Limpieza especímenes. A) Corte de cinta de amarre normal. B) Lavado con agua. C) Secado con franela. D) Secado al sol. ...	50
Figura 3.29.	Medición de temperaturas. A) interior de la bodega. B) Exterior de la bodega.	50
Figura 3.30.	Procedimiento de monitoreo de la corrosión A) Evaluación con Norma SSPC-VIS2. B) Evaluación con norma ASTM-D714. C) Observaciones generales. D) Registro fotográfico.....	51

Figura 4.1.	Ejemplo de línea de corte en uno de los especímenes S2PHMD a 730 horas de inmersión.....	53
Figura 4.2.	Grados de corrosión 7-G y 6-G Según Norma SSPC VIS2.	53
Figura 4.3.	Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PHMD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.....	54
Figura 4.4.	Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PSMD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.....	55
Figura 4.5.	Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para la Urea y MD.....	56
Figura 4.6.	Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y MD.	56
Figura 4.7.	Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y MD.	56
Figura 4.8.	Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PHDI sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.....	57
Figura 4.9.	Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PSDI sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.....	58
Figura 4.10.	Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para la Urea y DI.....	59
Figura 4.11.	Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y DI.....	59
Figura 4.12.	Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PHAD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.	60
Figura 4.13.	Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PSAD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.	61
Figura 4.14.	Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para la Urea y AD.	62

Figura 4.15.	Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y AD.....	62
Figura 4.16.	Ejemplo de Ampollamiento en el recubrimiento de desempeño intermedio expuesto a urea.....	64
Figura 4.17.	A) Tamaño de ampolla N°4. B) Tamaño de ampolla N°2, densidad intermedia (Medium dense). C) Tamaño de ampolla N°2, densidad media (Medium). ASTM - D714.....	64
Figura 4.18.	Comparativa visual del grado de ampollamiento de las dos preparaciones PH y PS para los tres sistemas AD, DI y MD inmersos en Urea.....	65
Figura 4.19.	Comparativa visual del grado de ampollamiento de las dos preparaciones PH y PS para los tres sistemas AD, DI y MD inmersos en Nitrato de Amonio.....	66
Figura 4.20.	Escala de durabilidad de los sistemas de recubrimientos AD, DI y MD con PH y PS para la sustancia Urea a un tiempo de exposición de 1000 horas.....	70
Figura 4.21.	Escala de durabilidad de los sistemas de recubrimientos AD, DI y MD con PH y PS para la sustancia Nitrato de Amonio a un tiempo de exposición de 1000 horas.....	70
Figura A1.1.	Fragmento del formulario utilizado para registro de observaciones in situ.....	78
Figura A2.1	Comparativa entre línea de corte sin signos de corrosión y con iniciación en forma de sombra.....	79
Figura A2.2.	Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en Urea.....	80
Figura A2.3.	Registros fotográficos de formación de ampollas y grado de corrosión desarrollado en los diferentes sistemas de recubrimientos.....	81
Figura A2.4.	Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en Urea.....	82
Figura A2.5.	Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en Nitrato de amonio.....	83

Figura A2.6.	Registros fotográficos de formación de ampollas y grados de corrosión desarrollados en los diferentes sistemas de recubrimientos.....	85
Figura A2.7.	Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en Nitrato de amonio.....	86
Figura A2.8.	Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en Sulfato de amonio.....	87
Figura A2.9.	Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en Sulfato de amonio.....	88
Figura A2.10.	Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en DAP.....	89
Figura A2.11.	Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en DAP.....	90
Figura A2.12.	Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en MOP.....	91
Figura A2.13.	Grado de corrosión 10-G/9-G para sistema S5PHMD.....	92
Figura A2.14.	Ampollas observadas para S5PHMD a las 1000 horas de inmersión.....	92
Figura A2.15.	Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en MOP.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Tipos de Ambientes Corrosivos (NACE Internacional).....	10
Tabla 2.2.	Requerimientos químicos ASTM A36 (Pacheco, 2017).	12
Tabla 3.1.	Matriz de especímenes para pruebas de corrosión.	27
Tabla 3.2.	Descripción de Sistemas de Recubrimientos de AD, DI y MD.	30
Tabla 3.3.	Caracterización del fertilizante Urea.	31
Tabla 3.4.	Caracterización del fertilizante Nitrato de amonio.....	32
Tabla 3.5.	Caracterización del fertilizante Sulfato de amonio.	33
Tabla 3.6.	Caracterización del fertilizante Fosfato diamónico.....	34
Tabla 3.7.	Caracterización del fertilizante Muriato de potasio.....	35
Tabla 3.8.	Especificaciones de preparación de mezcla de los recubrimientos en estudio.	41
Tabla 4.1.	Resultados de tamaños y densidades de ampolla presentados en los especímenes bajo la acción corrosiva de la sustancia química Urea.	67
Tabla 4.2.	Resultados de tamaños y densidades de ampolla presentados en los especímenes bajo la acción corrosiva de la sustancia química Nitrato de Amonio.....	68
Tabla 4.3.	Valores máximos alcanzados de grado de corrosión e indicación de la presencia de ampolla para las 5 sustancias con las dos técnicas de preparación de superficie PH y PS en los tres sistemas de recubrimientos AD, DI y MD a un tiempo total de 1000 horas.....	69
Tabla 4.4.	Puntajes para cada espécimen con base en la presencia de ampolla y corrosión a un tiempo total de 1000 horas.	72
Tabla 4.5.	Puntajes totales para sustancia química, preparación de superficie y sistema de recubrimiento con base en la presencia de ampolla y corrosión.	72
Tabla A2.1.	Resultados a nivel cualitativo para el grado de corrosión presentado por los especímenes expuestos a Urea.....	81

Tabla A2.2. Resultados a nivel cualitativo para el grado de corrosión presentado por los especímenes expuestos a Nitrato de amonio.	84
Tabla A2.3. Matriz de especímenes expuestos a Sulfato de amonio que presentaron iniciación de corrosión en forma de sombra.....	88
Tabla A2.4. Matriz de especímenes expuestos a MOP que presentaron iniciación de corrosión en forma de sombra.	92

INTRODUCCIÓN

La corrosión es el fenómeno en el cual los metales se deterioran mediante reacciones químicas y electroquímicas. Este deterioro es muy frecuente dentro de las diversas industrias, puesto que, a pesar de ser un proceso natural en el que el metal busca su equilibrio termodinámico, las diferentes condiciones a las que están expuestos pueden acelerar estos procesos, traduciéndose en costos para las empresas. En el caso específico de la industria agroquímica dedicada al manejo de fertilizantes, el control de la corrosión supone un gran reto, pues, por lo general, estas sustancias químicas se catalogan como corrosivas o poseen propiedades que aumentan su nivel corrosivo a determinadas condiciones.

Es por esta razón que este proyecto se enfoca en la evaluación del desempeño de diferentes sistemas de recubrimientos aplicados en acero A36, material comúnmente utilizado en estructuras expuestas al contacto de estas sustancias en dicha industria. Tomando también como base la técnica de preparación de superficie empleada ya que se desea evaluar su influencia en la durabilidad del recubrimiento aplicado. Para la obtención de esta información, la fase experimental se divide en una serie de etapas, que van desde el diseño general del experimento, la especificación de las propiedades y características de los materiales, fertilizantes de interés y sistemas de recubrimientos a emplear, preparación de especímenes bajo las diferentes condiciones de interés (dimensiones, preparaciones de superficie, recubrimientos a aplicar) y los diferentes pasos a seguir para la recolección de los datos de aparición y desarrollo del fenómeno de corrosión. Dichas etapas y pasos se desarrollan e ilustran en el capítulo III.

La realización de este tipo de pruebas es importante para poder considerar aspectos relevantes al momento de la generación de planes de mantenimiento, los cuales se traducen en reducción de costos. Adicionalmente, sirve como referencia para futuros estudios similares, ya que, al menos en nuestro país, este tema no se ha desarrollado a profundidad y el campo de aplicación es muy amplio.

CAPITULO I. MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En El Salvador la agricultura representa un pilar fundamental para la economía, por esta razón, la industria agroquímica juega un papel importante como proveedor de diferentes insumos para asegurar la calidad y cantidad de la producción agrícola. Uno de los principales recursos necesarios en temporada de siembras son los fertilizantes, estos productos son el resultado de mezclas de diversas sustancias químicas orgánicas y/o inorgánicas que aportan diferentes nutrientes a los cultivos. Sus materias primas pueden ser variadas, entre ellas podemos encontrar compuestos que contienen nitratos, sulfatos, fosforo, amoniaco, potasio, urea, entre otros. Debido a la alta demanda de fertilizantes, los productores agroindustriales suelen almacenar estas sustancias en grandes volúmenes a granel en bodegas y no en contenedores, como otros tipos de materias primas.

Tanto las propiedades químicas de estas sustancias, como los efectos del entorno son causantes de la aparición temprana de problemas de corrosión en las estructuras metálicas de dichas bodegas de almacenamiento, ya que estas quedan completamente expuestas al contacto directo entre el material y las sustancias. Por temas de diseño y costos, el material metálico mayormente utilizado para la construcción es el acero normado A36.

Generalmente la corrosión desencadena una serie de problemas como contaminación de productos, pérdida de materiales, daño en equipos, elevados costos de mantenimiento, entre otros, por lo que es necesario utilizar algún método de prevención de corrosión, siendo la aplicación de recubrimientos una opción factible, pero que a la vez representa una dificultad la elección del más adecuado a emplear.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar del desempeño de sistemas de recubrimientos de moderada, intermedia y alta protección aplicados sobre perfiles de acero normado A36 expuestos a sustancias químicas a granel utilizadas comúnmente en la agroindustria.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Identificar el grado de corrosión que experimenta el acero A36 tratado con diferentes sistemas de recubrimientos frente a sustancias químicas a granel utilizadas comúnmente en la agroindustria.
- II. Comparar la durabilidad de sistemas de recubrimientos de moderado, intermedio y alto desempeño en función de la preparación de superficie aplicada, frente a diferentes medios químicos utilizados como materias primas en la agroindustria.
- III. Estimar los tiempos de fallo de los sistemas de recubrimiento de moderado, intermedio y alto desempeño aplicados.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La aplicación de recubrimientos como sistema de prevención y control de la corrosión es una opción viable para aquellas construcciones civiles e industriales de grandes tamaños, pero supone un gran reto la elección del más adecuado a aplicar, ya que esto depende de varios factores, entre ellos, el ambiente al que estará expuesto.

En el caso de las bodegas de materias primas químicas a granel, el ambiente de inmersión no se limita únicamente a las condiciones atmosféricas, sino también, a las propiedades químicas de estas sustancias, las cuales pueden ser causantes de cualquiera de los tipos de corrosión conocidos actualmente. Es por esta razón que se vuelve importante realizar un estudio de pruebas de corrosión in situ, con las que pueda realizarse la caracterización del grado de corrosión que el acero A36 tratado con diferentes recubrimientos anticorrosivos sufre frente a cada uno de los entornos que se generan en las bodegas de materia prima, además de un diagnóstico sobre tiempos de fallo de estos sistemas de recubrimientos categorizándolos en moderado, intermedio y alto desempeño en función de la preparación de superficie empleada, dividiéndose ésta en preparación por medio de herramientas y preparación por chorro de arena o “sandblasting”, para determinar qué tipo es más adecuado por sustancia química con respecto al tiempo de vida útil y el costo para el mantenimiento.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto se llevará a cabo en una empresa del rubro químico agroindustrial ubicada en la zona occidental del país, teniendo como finalidad la realización de pruebas de corrosión en la bodega de materias primas a granel, utilizando especímenes de acero A36 cuyas variables principales se delimitan a 3 sistemas de recubrimientos para 2 técnicas de preparación de superficie, colocándolos en inmersión por duplicados en 5 sustancias químicas, con una duración de 1000 horas.

Esperando obtener una escala del grado de corrosividad de las sustancias químicas utilizadas en la agroindustria para la fabricación de fertilizantes, así como también, la determinación de la durabilidad y estimación del tiempo de fallo de diferentes sistemas de recubrimientos con su respectiva preparación de superficie ante cada sustancia a evaluar, con la finalidad que pueda ser información útil a considerar para el diseño de planes de mantenimiento de las estructuras de acero A36 que normalmente se encuentran en contacto con las sustancias almacenadas.

1.5 LIMITACIONES DEL PROYECTO

Debido a que se trata de una investigación de tipo experimental y se ha definido realizarla de manera in situ en una empresa del rubro químico agroindustrial, se tiene la limitante del tiempo de inmersión de los especímenes, número de observaciones a realizar y el monitoreo constante de los parámetros ambientales que podrían influir en el proceso de ataque de corrosión, puesto que se dificulta la movilidad hasta el lugar en cuanto a costos de transporte y tiempo por la lejanía de este.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 CORROSIÓN

Según Schweitzer (2010), la corrosión, en su definición más simple, es el proceso de un metal que regresa al estado termodinámico del material. Para la mayoría de los materiales, esto significa la formación de los óxidos o sulfuros a partir de los cuales se formaron originalmente cuando fueron extraídos de la tierra antes de ser refinados en materiales de ingeniería útiles. Estos cambios son reacciones electroquímicas que siguen las leyes de la termodinámica. Por lo tanto, comprender las interacciones de los materiales con su entorno ahora adquiere la dimensión adicional de la química y la electricidad. Así pues, la corrosión de la mayoría de los metales (y muchos materiales más) es algo que se espera evitar, pero que finalmente es algo que se debe aprender a tratar (Shaw y Kelly, 2006).

2.2 IMPACTO DE LA CORROSIÓN

El fenómeno de la corrosión de los metales induce el deterioro de numerosas estructuras industriales en los dominios de transportes, química, construcción, agua, industria general que se estiman al 3,5% del producto interior bruto de todos los países (León, 2010). Dentro de estos sectores, el fenómeno de la corrosión puede ser localizado en tanques perforados, contenedores y tuberías, generando desde pérdidas económicas hasta humanas (Mórales, 2021).

2.3 TIPOS DE CORROSIÓN

Existen muchos tipos de procesos de corrosión diferentes que se caracterizan dependiendo tanto de la naturaleza del material y de las condiciones del medio ambiente dónde se desarrollen. En este trabajo se tomará la clasificación proporcionada por la Asociación Americana de Ingenieros de la Corrosión (NACE, por sus siglas en inglés).

En 1982, la organización NACE publicó el libro “Formas de Corrosión: Reconocimiento y Prevención”, donde agrupó en tres categorías las formas de la corrosión tal como se muestra en la Figura 2.1.

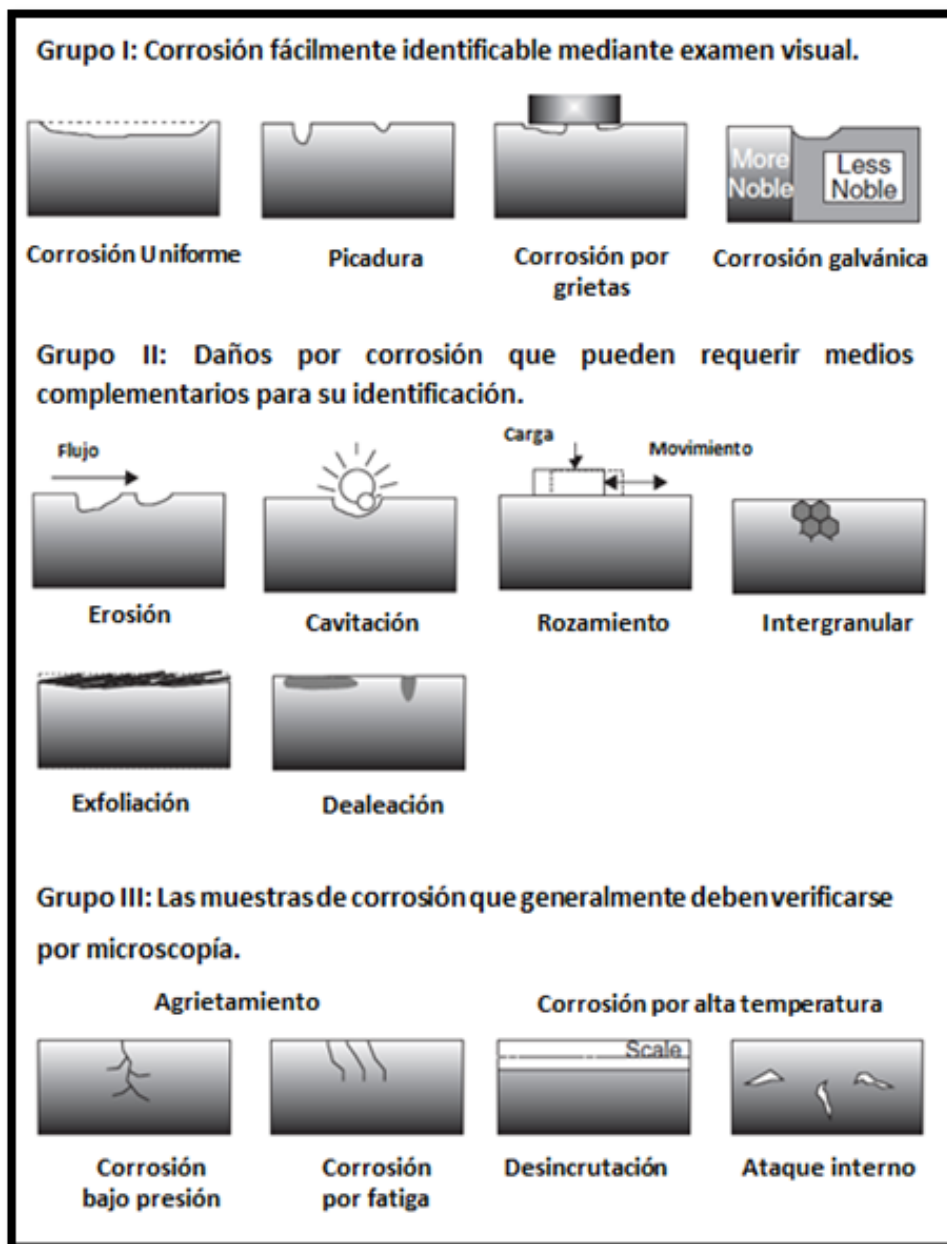


Figura 2.1. Principales formas de ataque por corrosión agrupadas por la facilidad de su identificación (Morales, 2021).

Según Morales (2021), las tres categorías son corrosión fácilmente identificable mediante examen visual, daños por corrosión que pueden requerir medios complementarios para su identificación y las muestras de corrosión que generalmente deben verificarse por microscopía, cada una presenta diferentes tipos de corrosión como se describe a continuación:

Grupo I: Corrosión fácilmente identificable mediante examen visual.

1. La corrosión general o uniforme se caracteriza por una pérdida de manera uniforme y regular del metal en su superficie corroída.
2. Corrosión en la cual toda o la mayor parte de la pérdida de metal ocurre en áreas discretas. Ejemplos son la corrosión por picaduras y por grietas, que éstas últimas son una forma particular de picaduras.
3. Corrosión galvánica ocasionada por contacto eléctrico entre diferentes conductores en un electrolito.

Grupo II: Daños por corrosión que pueden requerir medios complementarios para su identificación.

1. Los efectos de la velocidad incluyen: erosión, una forma de ataque causada por flujo de alta velocidad; cavitación, causada por el colapso de altos flujos con burbujas formadas en áreas de baja presión; y rozamiento, causado por un movimiento relativo de dos superficies en estrecho contacto (erosión, cavitación, rozamiento).
2. Corrosión intergranular en los límites de grano en la estructura metálica (intergranular, exfoliación).
3. Corrosión de desprendimiento debido a la disolución selectiva de un componente de una aleación.

Grupo III: Las muestras de corrosión que generalmente deben verificarse por microscopía.

1. Los fenómenos de agrietamiento incluyen fatiga por corrosión, un fenómeno mecánico potenciado por ambientes corrosivos, y corrosión bajo tensión.
2. Corrosión por alta temperatura (desincrustación y ataque interno).
3. Efectos microbianos causados por ciertos tipos de bacterias o microbios cuando su metabolismo produce especies corrosivas.

2.4 AMBIENTES CORROSIVOS

Los procesos de corrosión son dependientes principalmente de la temperatura, el tiempo de inmersión, la composición química del material metálico, el ambiente y su concentración, entre otros factores (Morales, 2021).

Los ambientes corrosivos son aquellos en los que la reacción de corrosión se hace presente debido a las condiciones y presencia de especies químicas que dan inicio al proceso de corrosión como por ejemplo atmósferas urbanas contaminadas o industriales, líquidos con bajo pH (HCl, NO_3H , H_2SO_4), soluciones básicas (Br^- , NO_3^- , NH_4^+), etc. (Franco, 2017).

Según Vallejo (2006), el medio ambiente corrosivo, desempeña un papel fundamental y condiciona el comportamiento del metal, entre las características químicas esenciales del medio ambiente, señala:

- a. La composición del medio con la concentración de cada componente, no olvidando las impurezas que pueden tener un papel más importante que los componentes principales
- b. En el caso de un líquido el PH
- c. En el caso de una solución, la dosificación en oxígeno o gases disueltos, que a su vez pueden depender de la presión exterior
- d. La presencia de inhibidores o aceleradores de la corrosión

También señala que los efectos de estos factores químicos pueden depender de las condiciones físicas del medio mismo tales como:

- a. De su estado físico
- b. De la temperatura, no solo del medio, sino también del metal, que muchas veces son diferentes.
- c. Del movimiento relativo del medio.

2.4.1 TIPOS DE AMBIENTES CORROSIVOS

La organización NACE clasifica los ambientes corrosivos como químico/marino, químico con alta humedad, marino con alta humedad, químico con baja humedad y rural con baja humedad como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tipos de Ambientes Corrosivos (NACE Internacional).

Tipo de Ambiente	Descripción
Químico/Marino	<ul style="list-style-type: none"> • Un ambiente muy severo que causa una oxidación rápida. • Las sales aerotransportadas y los agentes químicos contaminantes estimulan la corrosión. • La humedad y el agua de mar, proporcionan un electrolito más eficaz.
Químico con alta humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente corrosivo debido a los gases, químicos y a la alta humedad, todo lo que pueda estimular la corrosión
Marino con alta humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Un electrolito activo a través de la presencia de humedad y partículas de sal. • La zona de salpique es atacada por corrosión particularmente alta.
Químico con baja humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Un ambiente menos corrosivo que el de alta humedad dónde todos los gases como los químicos presentes, pueden estimular la corrosión.
Rural con baja humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser el ambiente menos corrosivo de todos, debido a que el aire limpio no proporciona contaminantes en el aire y no hay humedad presente para servir como electrolito

2.5 GENERALIDADES DEL ACERO

Uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, más adaptable y más ampliamente usado es el acero. A un precio relativamente bajo, el acero combina la resistencia y la posibilidad de ser trabajado, además, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico o mediante aleaciones (Díaz, Mejía y Ortez, 2007).

El acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0.05% hasta menos de un 2%). Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el cromo o níquel, se agregan con propósitos determinados (Díaz, Mejía y Ortez, 2007).

El acero estructural en sus distintas formas se identifica mediante siglas asignadas por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). En este proyecto se trabajará específicamente con el acero al carbono ASTM A36.

2.5.1 ACEROS AL CARBONO ASTM A36

Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1.65% de manganeso, el 0.60% de silicio y el 0.60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, etc. (Díaz, Mejía y Ortez, 2007)

El acero al carbono ASTM A36 es una especificación que cubre las formas de acero estructural de perfiles, planchas y varillas de calidad estructural para su uso en construcción remachada, atornillada o soldada (Pacheco, 2017).

En la Tabla 2.2 se presenta los requerimientos químicos del acero ASTM A36, nótese que cuando se especifica acero de cobre, este acero debe contener un porcentaje mínimo de cobre del 0.20%.

Tabla 2.2. Requerimientos químicos ASTM A36 (Pacheco, 2017).

Elementos	Perfiles	Platinas	Varillas
Carbono (%)	0.26	0.25 - 0.29	0.26 - 0.29
Manganeso (%)	-	0.80 - 1.20	0.60 - 0.90
Fósforo (%)	0.04	0.04	0.04
Azufre (%)	0.05	0.05	0.05
Silicio (%)	0.40	0.15 - 0.40	0.40
Cobre (%)	0.20	0.20	0.20

2.6 CONTROL DEL PROCESO DE CORROSIÓN

Para que inicie un proceso de corrosión, siempre debe de existir un ánodo, un cátodo, el medio conductor y el electrolito. Si se interrumpe una u otra de estas partes el proceso de corrosión se verá disminuido y, por ende, la velocidad de corrosión (Franco, 2017).

La figura 2.2 muestra una clasificación de los métodos de protección que actualmente se utilizan, para controlar la oxidación de los materiales, cuando estos se encuentran en medios agresivos que provoquen la degradación de los mismo. En este trabajo se tratará únicamente el método de protección contra la corrosión vía recubrimientos.

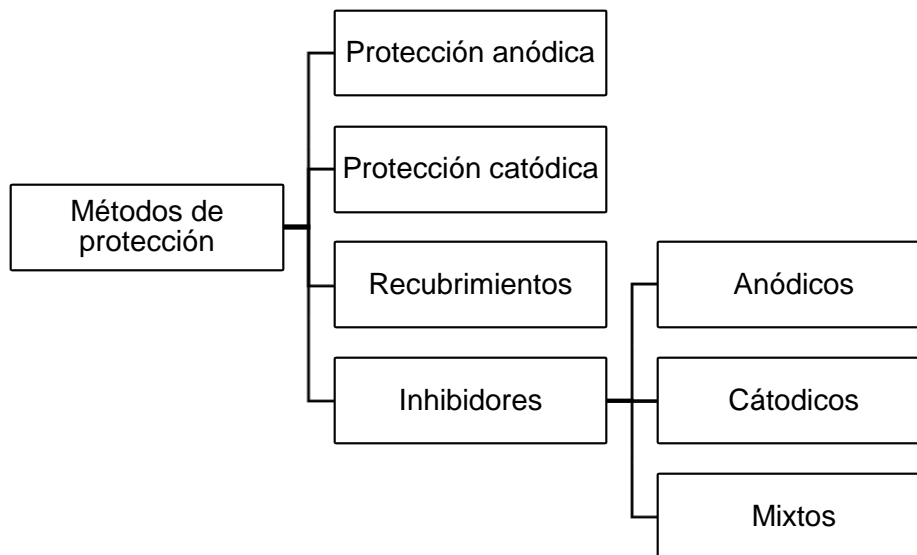


Figura 2.2. Clasificación de los métodos de protección contra la corrosión (Franco, 2017).

2.7 PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN VÍA RECUBRIMIENTOS

Un recubrimiento es una mezcla de pigmentos en una solución de aditivos y resinas que al aplicar una capa forma una película actuando como una barrera flexible para el sustrato, también es adherente y proporciona protección anticorrosiva (Guilcaso, 2020).

2.7.1 FUNCIONALIDAD DEL RECUBRIMIENTO

Según Roberge (2010), algunas consideraciones importantes para el diseño de recubrimientos resistentes a la corrosión incluyen la protección del recubrimiento, el diseño de los componentes, la función de los componentes y la formulación del recubrimiento.

Por lo que algunas de las principales variables utilizadas para diseñar recubrimientos protectores contra la corrosión son impermeabilidad, inhibición y pigmentos con protección catódica las cuales se describen a continuación:

- A. Impermeabilidad:** Un revestimiento impermeable ideal no debería verse afectado en absoluto por el entorno específico para el que está diseñado, ya sea humedad, agua o cualquier otro agente corrosivo como gases, iones o electrones. Tal recubrimiento debe tener una constante dieléctrica alta y también tener una adhesión perfecta a la superficie subyacente para evitar cualquier atrapamiento de agentes corrosivos.

- B. Inhibición:** A diferencia de los recubrimientos desarrollados sobre la base de la impermeabilidad, los recubrimientos inhibidores funcionan al reaccionar con un entorno determinado para proporcionar una película o barrera protectora sobre la superficie metálica.

- C. Protección catódica:** Al igual que con la inhibición, la protección catódica en los recubrimientos se proporciona principalmente mediante aditivos en los primarios. La función principal de estos aditivos es cambiar el potencial del medio ambiente a un potencial catódico menos corrosivo. Los primarios a base de zinc inorgánico son buenos ejemplos de este concepto.

2.7.2 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS

Según Roberge (2010), si bien los recubrimientos protectores suelen referirse a sistemas integrados multifuncionales que pueden combinar más de un tipo de recubrimientos, es importante el conocer las tres clases generales de recubrimientos: orgánicos, inorgánicos y metálicos; los cuáles se describen a continuación:

A. Recubrimientos orgánicos: Los recubrimientos orgánicos protegen más el peso del metal que cualquier otro método de protección contra la corrosión.

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

B. Recubrimientos inorgánicos: Los recubrimientos inorgánicos incluyen esmaltes, recubrimientos de vidrio y recubrimientos de conversión. Los recubrimientos de esmalte de porcelana son inertes al agua, resistentes a la mayoría de las condiciones climáticas y son habituales en los electrodomésticos y las instalaciones de fontanería mientras que los recubrimientos de vidrio se utilizan en las industrias de procesos en las que preocupa la corrosión o la contaminación del producto en cuanto a los recubrimientos de conversión se producen corroyendo intencionadamente la superficie del metal de forma controlada, esto se hace para producir un producto de corrosión adherente que proteja el metal de una mayor corrosión, por ejemplo, la anodización del aluminio, una de las técnicas de recubrimiento de conversión más utilizadas, produce una película protectora de óxido de aluminio sobre el metal de aluminio.

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

2.7.3 RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS MÁS UTILIZADOS

Según Rosas (2012), entre los recubrimientos anticorrosivos de mayor empleo y fuerte comercialización a nivel global, se encuentran: los basados en resinas epóxicas, los elaborados a partir de resinas alquídicas, los recubrimientos ricos en zinc y los de poliuretano alifático; los cuáles se describen a continuación:

- A. Resinas epóxicas:** Las resinas epóxicas son un producto común de la condensación de epiclorhidrina y bisfenol acetona. Por sí solas las resinas epóxicas no son factibles como recubrimientos protectores ya que una vez pigmentadas y aplicadas, la película, después de secarse, resulta ser dura, quebradiza y de muy pobre resistencia química. Sin embargo, cuando están adecuadamente copolimerizadas con otras resinas (por lo general de la familia de aminas o poliamidas) o esterificadas con ácidos grasos, las resinas epóxicas forman una película protectora duradera.

- B. Resinas alquídicas:** Las resinas alquídicas son poliésteres de bajo peso molecular formadas cuando alcoholes polihídricos reaccionan con ácidos polibásicos y monobásicos. Los productos inmediatos de esta reacción son un material duro, quebradizo e insoluble, y no tienen una utilidad obvia. Sin embargo, cuando los ácidos grasos monobásicos son incluidos en la mezcla de la reacción, los productos se convierten en una película soluble formando lo que se denomina alquidos modificados con aceites o simplemente alquidos. Estos recubrimientos son de los más comercializados para el ámbito doméstico, sus diversas pigmentaciones les ha valido la denominación popular de fondo rojo, fondo blanco, fondo gris, etc.

- C. Recubrimientos ricos en zinc:** A diferencia de la mayoría de los recubrimientos anticorrosivos, los cuales deben las propiedades finales de sus películas protectoras en mayor parte a la composición orgánica de sus resinas constituyentes, que aíslan física y eléctricamente al metal del medio circundante y donde el rol del pigmento en la protección contra la corrosión es secundario, en los recubrimientos ricos en zinc el papel del pigmento predomina y la alta cantidad de polvo de zinc metálico en la película seca determina la propiedad fundamental de estos recubrimientos: la protección galvánica, en dónde el pigmento de zinc se sacrifica preferentemente en

la reacción de corrosión electroquímica para proteger el sustrato de acero subyacente, el cual es catódico para el zinc en la serie electromotriz. Los recubrimientos ricos en zinc son comúnmente sub-categorizados tanto orgánicos como inorgánicos. Los recubrimientos orgánicos ricos en zinc tienen liantes orgánicos, con epoxies poliamidas y caucho clorado siendo las más comunes.

D. Poliuretanos: Los poliuretanos son polímeros que se obtienen a partir de un proceso de poliadición de un poli-isocianato con un polioliol (poli-alcohol), bajo la presencia de catalizadores u otros aditivos. Un poli-isocianato es una molécula que posee dos o más grupos funcionales isocianatos, mientras que un polioliol es una molécula con dos o más grupos funcionales hidroxílicos. Estos recubrimientos no difieren demasiado de otros recubrimientos anticorrosivos comunes ya que consisten de liantes, pigmentos, co-resinas, aditivos y solventes y su aplicación puede llevarse a cabo empleando técnicas convencionales, tales como: brochado, rodillado o atomizado.

2.7.4 SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS

Un sistema de recubrimientos se conforma de la preparación de la superficie, el pretratamiento, y si es el caso, un primario y subsecuentes recubrimientos. En términos más específicos, un sistema de recubrimiento es una buena práctica para obtener ciertos requerimientos de protección de acuerdo a determinadas condiciones de servicio (Rosas, 2012).

En situaciones de corrosión grave, se utiliza el enfoque de sistemas de recubrimiento primer capa, capa intermedia y capa superior que proporciona todos los ingredientes para una solución duradera (Roberge, 2010).

2.7.4.1 PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

La preparación de la superficie es una parte fundamental de los proyectos de recubrimiento y debe proporcionar una superficie que sea compatible con el material de recubrimiento que se va a aplicar. Las principales preocupaciones en este aspecto de los recubrimientos protectores son la limpieza de la superficie requerida y la rugosidad o el perfil de la superficie que esencialmente brindan anclaje al recubrimiento (Roberge, 2010).

Se cree que, del costo de un trabajo de recubrimiento, entre la mitad y dos tercios se destinan a la preparación de la superficie y la mano de obra (Roberge, 2010).

En algunos casos, es imposible proporcionar la superficie mejor preparada porque no hay suficiente dinero o tiempo para hacer el trabajo y/o no está permitido debido a la posible contaminación del producto, peligro de incendio o alguna otra razón. Sin embargo, debe reconocerse que cuando hay una menor preparación de la superficie, la longevidad de un sistema de recubrimiento probablemente se verá comprometida. Las propiedades de la superficie del sustrato al que se aplica un revestimiento influirán en su rendimiento (Roberge, 2010).

Algunos de los métodos de preparación de superficie son:

A. Limpieza abrasiva

Un material abrasivo (comúnmente granalla y/o perdigones, pero también abrasivos especializados como alambre cortado, varios óxidos duros o carburos) choca contra la superficie, eliminando la contaminación de la superficie y creando un patrón de muescas (Roberge, 2010).

La NACE International y la Sociedad de Recubrimientos Protectores (SSPC, por sus siglas en inglés) han adoptado conjuntamente un programa de cinco grados de limpieza del acero mediante operaciones de limpieza abrasiva. Estos se describen brevemente a continuación:

- I. NACE 1/SSPC 5: limpieza con chorro de metal blanco: produce un color metálico blanco grisáceo, uniforme, sin restos de materiales extraños obvios.
- II. NACE 2/SSPC 10: limpieza con chorro casi blanco: se elimina la materia extraña, pero se permiten diferentes tonos de gris metálico en la superficie.
- III. NACE 3/SSPC 6: limpieza con chorro comercial: se eliminan el óxido y las materias extrañas, excepto las motas apretadas de óxido o pintura uniformemente distribuidas sobre una porción menor de la superficie; algunos residuos en pozos.
- IV. NACE 8/SSPC 14: Granallado industrial: similar a NACE 3/SSPC 6, excepto que también se permite que permanezcan pequeñas islas de cascarilla de laminación distribuidas uniformemente en la superficie limpia.
- V. NACE 4/SSPC 7: limpieza con chorro de cepillado: se permiten escamas de laminación ligeras y óxido fuertemente adherido si se distribuyen sobre la superficie.

B. Limpieza con herramienta

La limpieza manual o con herramientas mecánicas de una superficie oxidada es a veces el medio menos completo y más lento de preparación de la superficie. Sin embargo, el costo, la ubicación de la pieza o la disponibilidad de herramientas a menudo dictan el uso de dicha técnica. Normalmente, con este método solo se eliminan las capas superiores sueltas de óxido de una pieza de acero. La humedad y otros contaminantes permanecen en la escala residual. Es importante tener en cuenta la compatibilidad de la herramienta (Roberge, 2010).

2.7.4.2 RECUBRIMIENTOS PRIMARIOS

Los primarios implican un revestimiento que se aplica como primera capa a un substrato porque tiene una afinidad adhesiva singular por él y proporciona una mejor adhesión para una capa posterior que la que podría lograr la capa posterior si se aplicara directamente. Los primarios también funcionan como portador de un inhibidor o de una carga de metal anódico como el zinc (Roberge, 2010).

2.7.4.3 RECUBRIMIENTOS SECUNDARIOS O INTERMEDIOS

Una segunda capa puede ser la capa superior o final, o una capa intermedia agregada cuando se requieren múltiples películas delgadas. La capa intermedia debe servir de unión entre el primario y las capas posteriores, pudiendo ser de diferente composición que cualquiera de ellas. Cuando los tres tienen formulaciones diferentes, es la capa intermedia la que se usa a menudo para proporcionar el mayor espesor de película para el recubrimiento (Roberge, 2010).

2.7.4.4 ACABADOS

Es posible que se requiera una capa final para prolongar la vida útil de las capas anteriores. Cuando se diseña como una capa superior, la película normalmente es más densa e hidrófoba que el resto del sistema para reducir la tasa de penetración de humedad en las capas subyacentes (Roberge, 2010).

2.7.5 NORMATIVA ASOCIADA

Como se menciona en la sección 2.7.4.1 la preparación de superficie representa un elemento importante para describir un sistema de recubrimiento, ya que es un factor que influye directamente en su rendimiento, por esta razón se vuelve necesaria la aplicación de técnicas cuyos resultados se puedan evaluar mediante métodos validados internacionalmente. Por otro lado, es importante la evaluación del rendimiento de los recubrimientos ya aplicados sobre las superficies, el cual generalmente se evalúa por medio del grado de penetración de óxido y/o el grado de ampollamiento sobre la superficie recubierta.

Existe una serie de normativas publicadas por la SSPC y la ASTM que permiten evaluar la correcta preparación de superficie y la evaluación del rendimiento de los recubrimientos sobre superficies de acero, algunas de estas se mencionan a continuación:

A. SSPC – VIS 1: Guía de Fotografías de Referencia para Superficies de Acero Preparadas por Soplado Abrasivo Seco

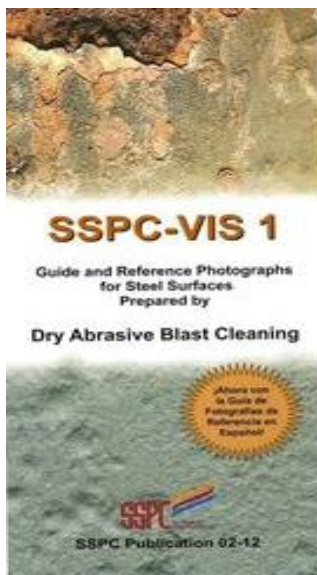


Figura 2.3. Portada de la Norma SSPC-VIS1 (Sociedad de Recubrimientos Protectores, 2004)

La norma SSPC-VIS 1 (Véase la Figura 2.3) consta de fotografías que sirven como comparadores de referencia para diferentes condiciones de superficies a ser tratadas con abrasivos secos, tanto al inicio como al final de la aplicación de la técnica mencionada. Las condiciones iniciales pueden ser superficies tanto recubiertas como sin pintar, las cuales se describen como una serie de condiciones específicas que deben evaluarse para cada caso. De igual forma, las condiciones finales se presentan catalogadas en función del tipo de limpieza empleado.

Para su uso, se selecciona la condición inicial más representativa por medio de la comparación visual, luego el tipo de limpieza aplicado y se compara nuevamente con las fotografías respectivas para determinar el grado de limpieza alcanzado.

B. SSPC – VIS 3: Guía de Fotografías de Referencia para Superficies de Acero Preparadas por Herramientas Manuales y Mecánicas.

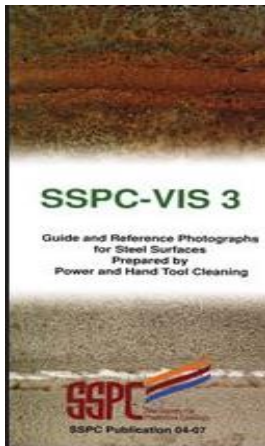


Figura 2.4. Portada de la Norma SSPC-VIS 3 (Sociedad de Recubrimientos Protectores, 2004)

La norma SSPC-VIS 3 (Véase la Figura 2.3) consta de fotografías que sirven como comparadores de referencia para diferentes condiciones de superficies a ser tratadas con herramientas manuales y mecánicas tanto al inicio como al final del proceso. Las condiciones iniciales pueden ser: sin pintar, previamente pintadas y juntas con soldaduras. Las condiciones finales se definen por el tipo de herramienta utilizada, las cuales pueden ser de 6 tipos, entre ellas: cepillo metálico, raspadores de aguja, lijas, etc. Para su uso se debe determinar mediante la sección de fotografías de condiciones iniciales la que más se asemeja a las condiciones del área a analizar, siguiendo cada uno de los métodos descritos por cada tipo; luego, se determinan las condiciones finales en función de la herramienta utilizada, de igual forma, por medio de comparación a la fotografía más representativa de las características de la superficie analizada.

C. SSPC – VIS 2: Método Estándar para la Evaluación del Grado de Corrosión en Superficies de Acero Pintadas.

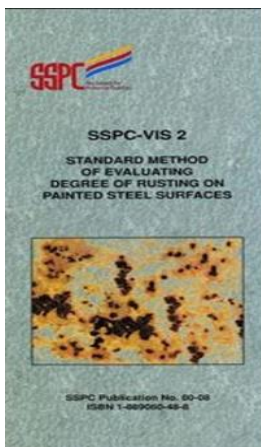


Figura 2.5. Portada de la norma SSPC – VIS 2. (Sociedad de Recubrimientos Protectores, 2000).

La norma SSPC-VIS 2 (Véase la Figura 2.5) consta de una serie de fotografías que se utilizan como referencia para poder comparar el grado de corrosión visible en un área definida de análisis. Su modo de uso es de manera comparativa como una estimación de la similitud de las características de la fotografía con respecto al área a evaluar. Tiene como variables el tipo de corrosión experimentado, dividiéndolo en 3 categorías: corrosión generalizada, corrosión por picaduras y corrosión localizada y el nivel de corrosión, el cual presenta un equivalente en porcentaje del área corroída por área de análisis.

Los niveles de corrosión varían en una escala numérica de 10 a 0, donde 10 equivale a <0.01% de área corroída, mientras que 0 describe una equivalencia de >50% de área corroída.

D. ASTM D – 714: Método Estándar para la Evaluación de la Formación de Ampollas en Pinturas.

La norma ASTM D-714 brinda fotografías que se utilizan como referencia para evaluar la formación de ampollas en sistemas de recubrimientos que han sido expuestos a condiciones que permitan el desarrollo de este fenómeno. Su modo de uso es de manera comparativa como una estimación de la similitud de las características de la fotografía con respecto al área a evaluar.

Este método brinda dos variables: tamaño de ampolla y frecuencia de formación. El tamaño viene definido por una escala numérica de 10 a 0, la cual es inversamente proporcional, es decir, un No. 10 representa ausencia de ampolla, seguido por los No. 8, 6, 4 y 2, que representan tamaños más grandes de manera progresiva; mientras que la frecuencia de formación es la ocurrencia de estas ampollas en el área de análisis, la cual se determina en escala de densidad como: Poca densidad (“Few”), Densidad media (“Medium”), Densidad intermedia (“Medium dense”) y Denso (“Dense”).

2.8 INDUSTRIA DE FERTILIZANTES

Según la SC (2009), El Salvador es importador neto de fertilizantes y el mercado doméstico se encuentra primariamente determinado por las condiciones de oferta y demanda que rigen los mercados internacionales. El mercado, como en la mayor parte de los países en vías de desarrollo de América Latina, muestra una tendencia de expansión en el largo plazo, motivada en la tecnificación creciente del sector agrícola.

La cadena de valor comprende tres principales eslabones (Véase la Figura 2.6). El primero se encuentra fuera del territorio de El Salvador y abarca la producción de los fertilizantes a partir de la extracción de los minerales de los yacimientos. Esta actividad es desarrollada primordialmente por grandes firmas transnacionales que operan a escala global, tales como Yara (Noruega), Mosaic (EE.UU.), Potash (Canadá), Agrium (Canadá). El segundo eslabón corresponde a la actividad desarrollada por las empresas establecidas en territorio de El Salvador, que importan, fraccionan, empacan y distribuyen los fertilizantes importados a granel listos para su uso final (sulfato de amonio y urea) y/o elaboran mezclas o fórmulas a partir de materias primas químicas o fertilizantes básicos importados.

Las mezclas pueden elaborarse mediante procesos químicos (fórmulas químicas) o procesos físicos (fórmulas físicas), conforme a las necesidades del suelo y los cultivos (SC, 2009).

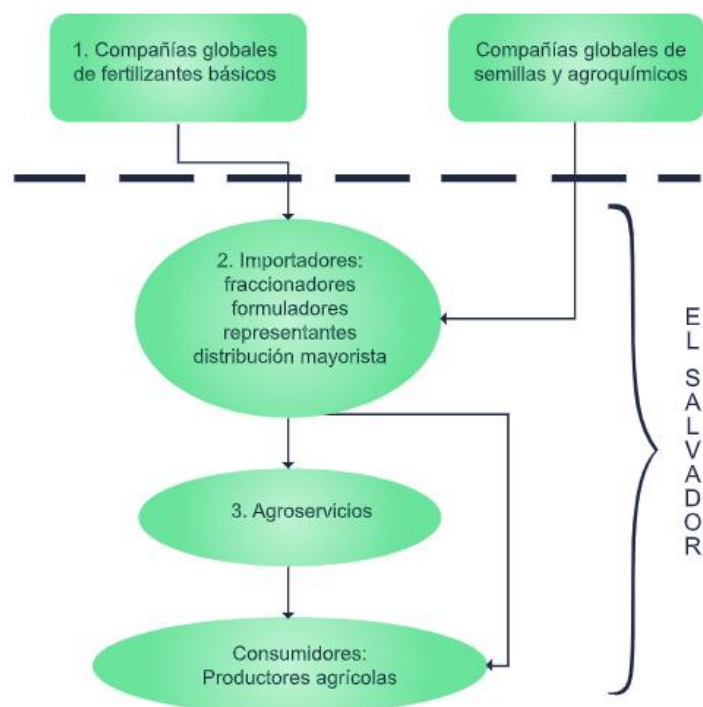


Figura 2.6. Tres principales eslabones de la cadena de valor de fertilizantes en El Salvador (SC, 2009).

En El Salvador, en este segmento existen dos grupos de agentes económicos bien diferenciados. Por un lado, se encuentran FERTICA, S.A. de C.V. y UNIFERSA-DISAGRO, S.A. de C.V., ambos grupos empresariales de capitales centroamericanos, con presencia en toda la región, que elaboran y comercializan agroquímicos y fertilizantes (simples y compuestos, principalmente sólidos) (SC, 2009).

Por otro lado, se encuentran agentes representantes de firmas multinacionales globales que comercializan primariamente pesticidas, pero también fertilizantes foliares, particularmente líquidos, cuyo uso en El Salvador es muy reducido y mayoritariamente complementario de los fertilizantes principales que comercializan FERTICA y DISAGRO. En este grupo se encuentran firmas como Duwest (distribuidor de DuPont, Pioneer y Monsanto), Bayer, Tecun, y Agrinter (SC, 2009).

El tercer eslabón es la cadena de distribución y comercialización, que se encuentra integrada por el canal de venta y distribución minorista, conformado mayoritariamente por los agroservicios, que además de fertilizantes proveen los restantes principales insumos agropecuarios (semillas y agroquímicos) y facilitan servicios de asistencia técnica (SC, 2009).

El consumo doméstico de fertilizantes ha sido estimado en alrededor de 222 mil toneladas y US\$ 73,5 millones, para el periodo comprendido entre enero y octubre de 2008, que cubre la mayor parte de las compras anuales. El 68% del consumo corresponde a fertilizantes nitrogenados (particularmente sulfato de amonio), el 19% a fórmulas con fósforo y nitrógeno y el 11% a fertilizantes potásicos (SC, 2009).

Los principales productos de importación y consumo son sulfato de amonio y urea (ambos fertilizantes nitrogenados) que las empresas locales se limitan a fraccionar, envasar y distribuir (66% del gasto en importaciones de fertilizantes en 2008).

Le siguen los fertilizantes fosforados (principalmente fosfato diamónico) que se comercializa como tal o se integra a fórmulas fertilizantes (10% del gasto) (SC, 2009).

Los fertilizantes son mercancías altamente transportables y los precios de los fertilizantes básicos (commodities) tienden a ser similares a escala global, ajustados por los costos de transporte. Por su participación en el comercio mundial, los productos clave que marcan la trayectoria de los precios son la urea, el fosfato diamónico (DAP) y monoamónico (MAP) y el muriato o cloruro de potasio (MOP) que, respectivamente, representan el 52%, el 48% y el 70%, del consumo mundial de fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos (SC, 2009).

2.8.1 SUSTANCIAS QUÍMICAS

Según la FAO (2002), cualquier material natural o industrializado, que contenga al menos cinco por ciento de uno o más de los tres nutrientes primarios (N, P₂O₅, K₂O), puede ser llamado fertilizante.

La Figura 2.7 se presenta un diagrama general de producción de fertilizantes donde se muestra que:

- El amoníaco es sintetizado de los hidrocarburos (la mayor parte del gas natural pero también de la nafta o del carbón), del nitrógeno atmosférico y del vapor.
- El dióxido de carbono resultante de su conversión puede ser combinado con el amoníaco para formar la urea.
- El ácido nítrico es hecho por oxidación del amoníaco con el aire.
- El ácido sulfúrico es producido por la quema del azufre en el aire.
- La reacción con la roca fosfórica produce ácido fosfórico.
- Las sales de potasio de los depósitos naturales son la fuente de K.

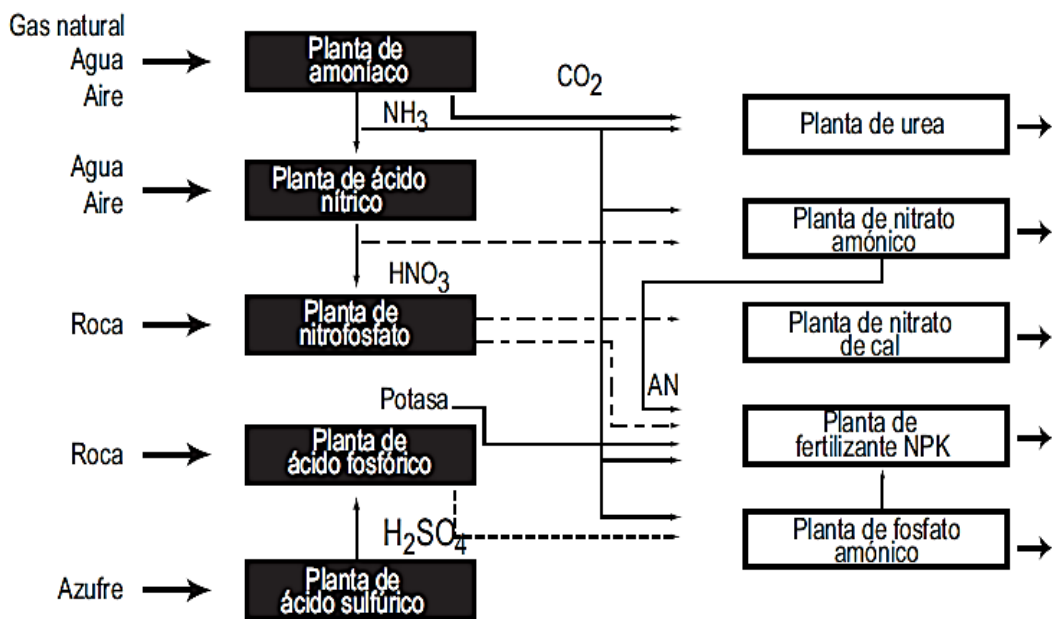


Figura 2.7. Esquema general de producción de fertilizantes (FAO, 2002).

2.8.2 CORROSIÓN EN SISTEMAS AGROINDUSTRIALES

En general, la corrosión en la industria de los fertilizantes afecta cuatro áreas: producción, almacenamiento, transporte y aplicación en el campo. Este problema conlleva a una posible contaminación de producto, pérdida de materiales, daño en equipos, tiempo de operación ineficientes, aumentos en gastos de mantenimiento y problemas ambientales o sociales (Schorr, Valdez, Eliezer y Salinas, s.f.).

Las diversas características encontradas en industrias de Fertilizantes, como el contacto con compuestos ácidos y contaminantes sólidos, además de la presencia de alta humedad, temperaturas elevadas, sales, sulfuros y otros agentes corrosivos, generan demanda de materiales y revestimientos de alta performance (WEG, 2020).

Los fertilizantes más comunes tienen una capacidad corrosiva para muchos de los materiales usados corrientemente en la construcción. El uso de la mejor tecnología es vital para lograr una larga vida útil de las inversiones en activos fijos que precisan amortizarse en muchos años, con los menores costos de mantenimiento posibles (Fertilizar, 2011).

Los fertilizantes, y algunos en particular intensamente, atacan prácticamente todos los materiales convencionales existentes en el mercado. La corrosión en los depósitos de fertilizantes es un proceso disruptivo que afecta las operaciones y la rentabilidad del negocio. Los principales problemas que se presentan en las estructuras de almacenaje, acopio, y distribución son la corrosión en los metales expuestos inclusive en las chapas de acero galvanizado, tanto en cubiertas como en los cerramientos de las estructuras (Fertilizar, 2011).

El proceso de corrosión en estos elementos comienza en las perforaciones resultantes de clavar o abulonar las chapas a las correas de los galpones o celdas; paralelamente empieza la corrosión en la estructura interna del silo o galpón, debida a la reacción química de los polvos producido por el acarreo de los fertilizantes con la humedad del ambiente, es así como se provoca corrosión en la estructura principal, afectando vigas, celosías, correas, columnas, placas de anclaje, etc. (Fertilizar, 2011).

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El desarrollo del diseño para las pruebas de corrosión a realizar se puede explicar mediante el esquema mostrado en la Figura 3.1, como primer paso, se tiene la selección del material de prueba, para este caso, se determina utilizar piezas de acero A36 en forma de perfil tipo “L” ya que, por lo general, las estructuras de construcciones poseen geometrías variadas que dificultan una aplicación de recubrimientos de manera uniforme, entonces, se considera que la prueba se vuelve más representativa al utilizar perfiles y no placas. Como segundo paso, se tiene la definición de la preparación de superficie previa a la aplicación de recubrimientos, para el caso, se tendrán de 2 tipos: preparación por medio de herramientas manuales y preparación por medio de chorro abrasivo de arena, de aquí en adelante, se le denominará con su nombre en inglés “sandblasting”. Como tercer paso, se definen los sistemas de recubrimientos a utilizar, teniendo 3 categorías en función de las capas a aplicar y química de composición: moderado desempeño, desempeño intermedio y alto desempeño, de aquí en adelante, denominados como MD, ID y AD respectivamente. Finalmente, se tiene la determinación de las sustancias químicas utilizadas como fertilizantes a las que se someterá por inmersión cada perfil de acero, las cuales son: urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio, DAP o fosfato diamónico y MOP o muriato de potasio, nombradas de aquí en adelante como S1, S2, S3, S4 y S5 respectivamente.

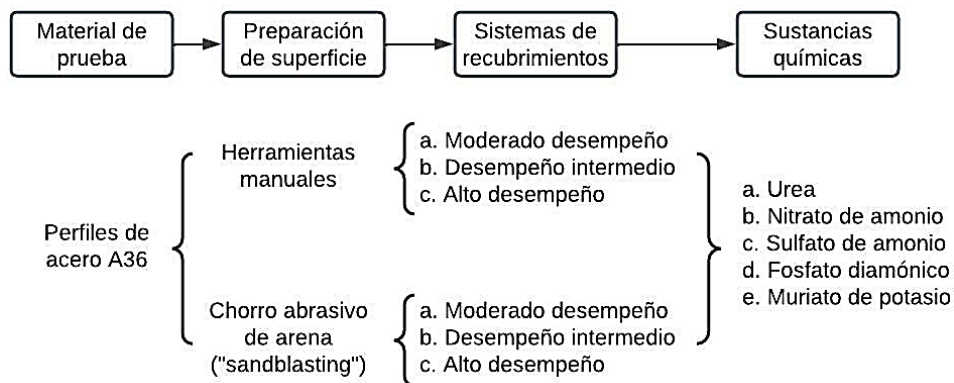


Figura 3.1. Esquema de variables a considerar para definición de diseño experimental.

Con lo expuesto anteriormente, al realizar las combinaciones de variables, se obtiene un total de 30 piezas a ser sometidas a las pruebas de corrosión, por efectos de obtención de datos más representativos, todos se realizarán por duplicado, dando así un total de 60 piezas pintadas, las cuales de aquí en adelante se denominarán especímenes. Adicional a los especímenes de prueba, se tendrán 6 denominados como blanco, los cuales representan las condiciones iniciales de cada sistema. En la Tabla 3.1 se muestra la matriz de combinación de variables y la identificación que se le dará a cada espécimen.

Tabla 3.1. Matriz de especímenes para pruebas de corrosión.

	Preparación con Herramientas (PH)			Preparación con Sandblasting (PS)		
	Sistema MD	Sistema DI	Sistema AD	Sistema MD	Sistema DI	Sistema AD
	Blancos					
Sustancia	BPHMD	BPHDI	BPHAD	BPSMD	BPSDI	BPSAD
S1/Urea	S1PHMD_01	S1PHDI_01	S1PHAD_01	S1PSMD_01	S1PSDI_01	S1PSAD_01
	S1PHMD_02	S1PHDI_02	S1PHAD_02	S1PSMD_02	S1PSDI_02	S1PSAD_02
S2/Nitrato	S2PHMD_01	S2PHDI_01	S2PHAD_01	S2PSMD_01	S2PSDI_01	S2PSAD_01
	S2PHMD_02	S2PHDI_02	S2PHAD_02	S2PSMD_02	S2PSDI_02	S2PSAD_02
S3/Sulfato	S3PHMD_01	S3PHDI_01	S3PHAD_01	S3PSMD_01	S3PSDI_01	S3PSAD_01
	S3PHMD_02	S3PHDI_02	S3PHAD_02	S3PSMD_02	S3PSDI_02	S3PSAD_02
S4/DAP	S4PHMD_01	S4PHDI_01	S4PHAD_01	S4PSMD_01	S4PSDI_01	S4PSAD_01
	S4PHMD_02	S4PHDI_02	S4PHAD_02	S4PSMD_02	S4PSDI_02	S4PSAD_02
S5/MOP	S5PHMD_01	S5PHDI_01	S5PHAD_01	S5PSMD_01	S5PSDI_01	S5PSAD_01
	S5PHMD_02	S5PHDI_02	S5PHAD_02	S5PSMD_02	S5PSDI_02	S5PSAD_02

En cuanto a las condiciones ambientales del experimento, las sustancias químicas estarán contenidas en sacos abiertos ubicados en las mismas bodegas donde se almacenan normalmente, sometidos a los mismos parámetros de temperatura y humedad relativa de las condiciones normales de almacenamiento, en ellos se colocarán en inmersión los especímenes correspondientes, dichos sacos no se sellarán en ningún momento de duración del experimento. Para colocar los especímenes de forma ordenada y evitar el extravío de alguno de ellos, se ha determinado acomodarlos en tubos de PVC en tandas de 6 especímenes por tubo, mediante cinchas plásticas que se situaran en unas pequeñas perforaciones que se hará a cada espécimen en uno de sus lados, dichas cinchas se estarán reemplazando en cada observación.

Para el seguimiento de los ensayos, a cada espécimen se le realizarán dos cortes sobre el recubrimiento aplicado con el objetivo de acelerar en la medida de lo posible el fenómeno de la corrosión dado el tiempo de exposición que se dispone. En cada visita a la planta para evaluar el fenómeno, cada espécimen se analizará sobre los cortes realizados por medio de comparación con la norma ASTM - D610/SSPC - VIS2 para estimar el porcentaje de corrosión aproximado que han experimentado, estos resultados se ponderarán y se tratarán de manera cuantitativa, adicionalmente se analizarán por medio de comparación con la norma ASTM - D714 para estimar el nivel de ampollamiento que pueden presentar los recubrimientos, estos resultados se tratarán de manera cualitativa únicamente. El registro de parámetros ambientales se hará únicamente en cada visita a la planta, llevando datos de temperatura y humedad relativa al momento de extracción e inmersión de los especímenes. Se tiene programado que la duración de estas pruebas sea de 1000 horas en inmersión.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y SUSTANCIAS

En este apartado se presentan las diferentes características y/o especificaciones tanto de los materiales como de las sustancias químicas a utilizar.

3.2.1 ESPECIFICACIONES DEL ACERO

Como se menciona en la sección 3.1 se utilizarán perfiles de acero tipo "L" (Véase la Figura 3.2), según el fabricante, este material ha sido manufacturado bajo la norma ASTM, por lo que se espera que cumpla los requerimientos expuestos en la Tabla 2.2 de la sección 2.5.1 de este documento.

El material posee un espesor de 3/16 de pulgada (4.5mm) y ancho de ala de 1 ½ pulgada (38.1mm). Comercialmente, la longitud por pieza es de 6m de largo.



Figura 3.2. Ejemplo de perfil tipo "L" de acero normado A36.

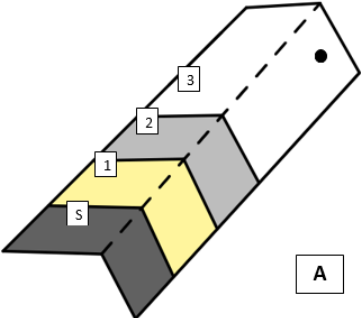
3.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS

Los sistemas de recubrimientos evaluados en este trabajo, como se mencionó en la sección 3.1, se han clasificado como: Sistema de Recubrimiento de Alto Desempeño (AD), Sistema de Recubrimiento de Desempeño Intermedio (DI) y Sistema de Recubrimiento de Moderado Desempeño (MD), cada sistema de recubrimiento está compuesto de 2 a 3 capas de recubrimientos, entre ellos primarios, secundarios y acabados.

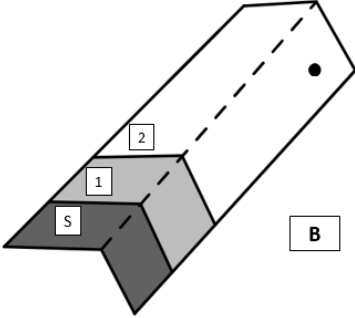
En la caracterización de los diferentes sistemas de recubrimientos se incluye la descripción del tipo de recubrimiento, la química involucrada, el espesor de película seca recomendado y el orden de aplicación (Véase la Tabla 3.2). Por ejemplo; para el sistema AD como se muestra en el esquema A, el color gris oscuro representa al substrato (S), es decir, acero normado A36 al cual se le ha realizado la respectiva preparación de superficie PH o PS; el color amarillo representa el primer recubrimiento que se aplica al substrato en este caso el recubrimiento anticorrosivo primario rico en zinc con un rango de espesor de película seca permitido de 2.0 a 4.0 mils (milésimas de pulgada); el color gris claro representa el segundo recubrimiento a aplicar que corresponde al recubrimiento secundario poliamida epoxy con un rango de espesor de película seca permitido de 5.0 a 10.0 mils; el color blanco representa el tercer y último recubrimiento que se aplica en este caso es el acabado poliuretano con un rango de espesor de película seca permitido de 2.0 a 3.0 mils. Los sistemas DI y MD solo están compuestos de dos recubrimientos, un primario y un acabado; en caso del sistema DI (Esquema B) el recubrimiento epoxy tendrá la función del recubrimiento primario mientras que para el sistema MD (Esquema C) el recubrimiento primario es el recubrimiento de resina alquídica. En cuanto al recubrimiento de poliuretano, en este caso, se utilizará como acabado para los tres sistemas.

Tabla 3.2. Descripción de Sistemas de Recubrimientos de AD, DI y MD.

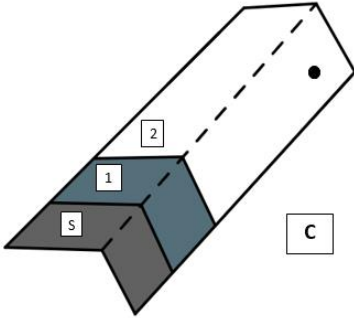
SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS		
ALTO DESEMPEÑO AD		
Substrato	Acero A36 (PH/PS)	
Recubrimiento	Química	Espesor (mils)
Primario	Anticorrosivo epóxico poliamida orgánico 90% peso en zinc	Min 2.0 Max 4.0
Secundario	Epóxico poliamida	Min 5.0 Max 10.0
Acabado	Esmalte poliuretano	Min 2.0 Max 3.0
INTERMEDIO DESEMPEÑO DI		
Substrato	Acero A36 (PH/PS)	
Recubrimiento	Química	Espesor (mils)
Primario	Epóxico poliamida	Min 5.0 Max 10.0
Acabado	Esmalte poliuretano	Min 2.0 Max 3.0
MODERADO DESEMPEÑO MD		
Substrato	Acero A36 (PH/PS)	
Recubrimiento	Química	Espesor (mils)
Primario	Resina Alquídica	Min 3.0 Max 4.0
Acabado	Esmalte poliuretano	Min 2.0 Max 3.0



A



B



C

3.2.3 CARACTERIZACIÓN DE FERTILIZANTES

En la caracterización de los fertilizantes a utilizar se incluyen propiedades y/o características de interés que se deben tomar en cuenta antes de la iniciación de la fase experimental, como por ejemplo su adecuado manejo, su interacción con la humedad, la reactividad entre ellos, entre otras. Por lo que es de vital importancia seguir las especificaciones que vienen indicadas en las fichas técnicas y de seguridad de los fertilizantes antes de su uso. A continuación, se presenta una serie de Tablas de la 3.3 a la 3.7 que muestran un resumen de la descripción, características y manejo más relevantes de cada sustancia; las cuales han sido extraídas de las fichas técnicas y de seguridad proporcionadas por la empresa distribuidora dónde se llevará a cabo el experimento y cuyos químicos proporcionados por la misma se muestran en las Figuras de la 3.3 a la 3.7 en sus condiciones iniciales antes de su uso.

Tabla 3.3. Caracterización del fertilizante Urea.


Sustancia Química	
	
<p><i>Figura 3.3. Fertilizante urea $CO(NH_2)_2$, No. CAS: 57-13-6</i></p>	
Descripción	Características
<p>La urea (Carbamida, carbonilamida, ácido carbamídico) es una sustancia sólida con forma esférica o perlada de color blanco (Figura 3.3) posee un ligero olor a amoníaco o inodoro en ocasiones. Es ampliamente utilizada en la agricultura debido a su alto contenido de Nitrógeno.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Producto higroscópico • Humedad crítica relativa (30°C): 73% • Solubilidad en agua (20°C): 1000 g/L • En presencia de humedad se genera apelmazamiento. • La hidrólisis genera ácidos de amoníaco que son corrosivos.
Manejo	
<p>Para su manejo se recomienda utilizar ropa de trabajo, lentes protectores, mascarilla para polvos, guantes de nitrilo y zapatos impermeables con punta de acero</p>	

Tabla 3.4. Caracterización del fertilizante Nitrato de amonio.

Sustancia Química	
 <p style="text-align: center;"><i>Figura 3.4. Fertilizante Nitrato de Amonio NH₄NO₃, No. CAS 6484-52-2</i></p>	
Descripción	Características
<p>El Nitrato de amonio (Nitrato amónico, nitrato amoniacal, sal amónica de ácido nítrico) es una sustancia sólida con forma esférica, perlada, cristalina o granular de color blanco a amarillo (Figura 3.4), generalmente inodoro (en presencia de humedad puede volatilizarse amoníaco, por lo que presenta ese olor característico). Se utiliza como fertilizante por su composición y aporte como nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) y nitrógeno nítrico (NO₃⁻).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Producto higroscópico • Humedad crítica relativa (30°C): 59% • Solubilidad en agua (20°C): 1920 g/L • En presencia de humedad se genera apelmazamiento y descomposición. • Incompatible con metales ya que favorece a la oxidación de estos.
Manejo	
<p>Para su manejo se recomienda utilizar ropa de trabajo, lentes protectores, mascarilla para polvos, guantes de nitrilo y zapatos impermeables con punta de acero.</p>	

Tabla 3.5. Caracterización del fertilizante Sulfato de amonio.

Sustancia Química	
	
<p>Figura 3.5. Sulfato de amonio (NH₄)₂SO₃, No. CAS: 7783-20-2</p>	
Descripción	Características
<p>El sulfato de amonio (Sulfato diamónico, sal diamónica de ácido sulfúrico) es una sustancia sólida en forma de cristales o granos de color blanco (Figura 3.5) hasta café, puede ser inodoro o presentar un leve olor a amoníaco. Su uso como fertilizante se debe a que es fuente de Nitrógeno y Azufre.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Producto poco higroscópico • Humedad crítica relativa (30°C): 75% • Solubilidad en agua (20°C): 754 g/L • Si se almacena en ambientes muy húmedos o prolongadamente (por más de 6 meses) como mezclas con otras sustancias como cloruro de potasio y sulfato de potasio, puede humedecerse generando descomposición y apelmazamiento. • Sustancia corrosiva
Manejo	
<p>Para su manejo se recomienda utilizar ropa de trabajo, lentes protectores, mascarilla para polvos, guantes de nitrilo y zapatos impermeables con punta de acero.</p>	

Tabla 3.6. Caracterización del fertilizante Fosfato diamónico.

Sustancia Química	
	
<p>Figura 3.6. Fosfato diamónico (DAP) (NH_4)₂HPO₃, No. CAS: 7783-28-0</p>	
Descripción	Características
<p>El Fosfato diamónico (DAP, fosfato monoácido de amonio, fosfato básico de amonio, fosfato de amonio doble, fosfato dibásico de amonio) es una sustancia sólida de presentación y color variable: cristalino y blanco para grado técnico y granular de color verde, negro, gris o café (Figura 3.6); posee un ligero olor a amoníaco. Como fertilizante es una fuente de Nitrógeno y Fósforo como óxido de fósforo (V) (P₂O₅).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Producto higroscópico • Humedad crítica relativa (30°C): 70% • Solubilidad en agua (20°C): 80-95% • En mezcla con superfosfatos se presenta apelmazamiento. • En presencia de humedad y exposición al aire se descompone, pudiendo perder gradualmente hasta un 8% de nitrógeno amoniacal. • En condiciones extremas de humedad y temperatura, puede ser corrosivo con aluminio, zinc, cobre y algunas formas de acero.
Manejo	
<p>Para su manejo se recomienda utilizar ropa de trabajo, lentes protectores, mascarilla para polvos, guantes de nitrilo y zapatos impermeables con punta de acero.</p>	

Tabla 3.7. Caracterización del fertilizante Muriato de potasio.

Sustancia Química	
	
<p>Figura 3.7. Muriato de potasio (MOP) KCl, No. CAS: 7447-40-7</p>	
Descripción	Características
<p>El Muriato de potasio (MOP, Cloruro de potasio) es una sustancia sólida de forma y color variable: cristales blancos para un grado técnico o granos rojos a café (Figura 3.7), inodoro. Para la agricultura es una de las mayores fuentes de potasio por su alta concentración en fórmula, aportando también cloruros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Producto medianamente higroscópico • Humedad crítica relativa (30°C): 70% • Solubilidad en agua (20°C): 347 g/L • En mezcla con superfosfatos se presenta apelmazamiento. • Cuando se humedece se descompone y aumenta la tasa de corrosión para algunos metales, entre estos, hierro, zinc, aluminio y acero
Manejo	
<p>Para su manejo se recomienda utilizar ropa de trabajo, lentes protectores, mascarilla para polvos, guantes de nitrilo y zapatos impermeables con punta de acero.</p>	

3.3 PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES

Como se menciona en la sección 3.2.1, comercialmente este material tiene una longitud de 6m, por lo que fue necesario contratar los servicios de un taller de metalmecánica para obtener piezas uniformes de 20 cm de longitud y la realización de perforaciones en uno de sus lados para la posterior colocación en los tubos de PVC como se describe en la sección 3.1 y se ilustrará en las siguientes secciones. Como preparación previa, las piezas fueron pulidas con cepillo de copa.

3.3.1 PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

La superficie de las piezas fue preparada previamente a la aplicación de los sistemas de recubrimientos usando como referencia las normas del SSPC y NACE para evaluar el tipo de preparación. La preparación de superficies influye en la adherencia del recubrimiento y en consecuencia en el resultado final de la aplicación de recubrimientos, por lo cual fueron seleccionados dos métodos de preparación de superficie: herramientas manuales y chorro de granalla.

Las piezas fueron cortadas, perforadas y sometidas a una ligera limpieza con pulidora, como se cita en la sección 3.3. (Véase la Figura 3.8). Sin embargo, la limpieza final es aquella realizada justamente antes de la aplicación de la primera capa de recubrimiento.



Figura 3.8. Piezas de acero posterior al proceso de corte y preparación.

3.3.1.1 PREPARACIÓN DE SUPERFICIE: LIMPIEZA CON HERRAMIENTAS MANUALES (PH)

Para la preparación con herramientas manuales se hizo uso de lija grado P320 y posteriormente se realizó la limpieza con solvente Naphtha R1K3 (Veáse la Figura 3.9) para la eliminación de las partículas restantes de herrumbre removidas, posibles sustancias oleicas y cualquier otra sustancia que sea considerada como contaminante. La norma correspondiente a la limpieza con lija es la SSPC-SP 2: Limpieza con herramientas manuales.



Figura 3.9. Preparación con herramienta. A) Lija grado P320. B) Solvente Naphtha.

Posterior al proceso de limpieza las piezas están listas para la aplicación del recubrimiento tal como se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Piezas preparadas con herramienta para la aplicación del recubrimiento.

3.3.1.2 PREPARACIÓN DE SUPERFICIE: GRANALLADO COMERCIAL.

Las piezas sometidas a granallado comercial o preparación por sandblasting requieren una evaluación preliminar. En primer lugar, se debe determinar el grado de corrosión de la pieza original, es decir, su estado inicial. El grado de corrosión en esta etapa depende del tipo de material y de su exposición al ambiente. Posteriormente son sometidas al proceso llamado granallado o sandblasting, en donde un chorro de material abrasivo es proyectado sobre la superficie metálica, desprendiendo así la corrosión e imperfecciones en la superficie del sustrato, cambiando así el perfil de anclaje del material.

Para ello se utiliza la norma SSPC-VIS1, que contiene los grados de corrosión inicial de las piezas, y en base a este se evalúa el grado de limpieza posterior al proceso de granallado.

A. Grado de corrosión previo al granallado

Los 4 grados de corrosión son identificados de la A a la D, según la Figura 3.11.

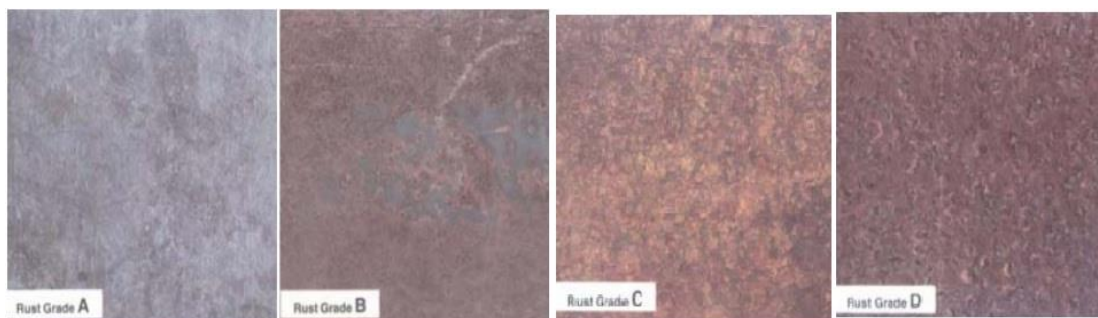


Figura 3.11. Grados de corrosión previo al granallado según la norma SSPC -VIS1.

Debido a que las piezas ya no presentaban brillo metálico y en general no presentaban una alta presencia de herrumbre, se les asigna un grado de corrosión “Rust Grade B” (Grado de corrosión B).

B. Material para el proceso de granallado

Debido al tamaño de las piezas, se usó una cabina de arenado pequeña y como agente abrasivo arena sílica 6/20.

C. Grado de preparación alcanzado

Posterior al proceso de granallado, las piezas fueron nuevamente comparadas con la norma SSPC-VIS1, tal como se muestra en la Figura 3.12.

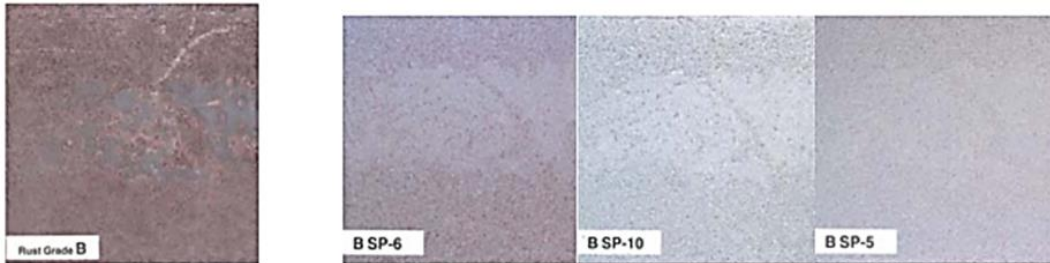


Figura 3.12. Grados de preparación para el Grado de corrosión B según norma SSPC VIS1.

La Figura 3.13 muestra la clasificación del grado de corrosión presentado el cual se mantuvo en el rango de B SP-5 y B SP-10 para las 33 piezas analizadas.



Figura 3.13. Ejemplos de piezas granalladas. A) Grado de corrosión B SP-5. B) Grado de corrosión B SP-10.

D. Perfil de la superficie

El equipo de medición de perfil de superficies ELCOMETER arrojó el dato de 1.8 mills (Véase la Figura 3.14) para las piezas preparadas por granallado lo cual indica que el recubrimiento podrá adherirse de manera adecuada al sustrato metálico.



Figura 3.14. Medición de perfil de superficie para las piezas con preparación por sandblasting.

3.3.2 APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS

Para la correcta aplicación de los recubrimientos sobre los especímenes de Acero A36 se deben seguir las indicaciones de preparación de mezcla, herramientas, proceso de aplicación y demás instrucciones que vienen detalladas en las hojas técnicas proporcionadas por el fabricante del recubrimiento. En este trabajo el proceso de pintado está dividido en cinco pasos generales los cuales son: Preparación de la mezcla, Equipo de aplicación, Medición de espesores y Empaque y embalaje.

3.3.2.1 PREPARACIÓN DE MEZCLA

Para el proceso de preparación de la mezcla de los componentes que conforman cada recubrimiento se siguen las especificaciones prescritas por el fabricante como se muestran en la tabla 3.3. En general el procedimiento realizado fue el siguiente: para el caso de los recubrimientos constituidos por 2 o más componentes, la mezcla de sus constituyentes se realizó en un vaso medidor de pintura seguido de la agitación manual con una regla dosificadora (Véase la figura 3.15).

Para asegurar que el producto responda a lo esperado los tiempos de inducción y vida útil de la mezcla fueron cuidadosamente medidos. Posteriormente usando el solvente adecuado para cada tipo de recubrimiento se llevó a una reducción máxima del 25%. Seguidamente con el objetivo de eliminar grumos o sedimentos; la mezcla se transfiere al recipiente de la pistola de aspersion a través de un filtro colador de pintura malla 30-60 para el caso del zinc y filtro de 190 micrones de uso general para los demás recubrimientos.

Tabla 3.8. Especificaciones de preparación de mezcla de los recubrimientos en estudio.

	RECUBRIMIENTOS			
	Primario anticorrosivo epóxico poliamida orgánico 90% peso en zinc de 3 componentes	Primario Epóxico poliamida de 2 componentes	Primario Resina alquídica	Acabado Esmalte poliuretano de 2 componentes.
Proporción de Mezcla	2A (bifenol) :1B (catalizador poliamida) :1.5C (Polvo de zinc) en volumen	1A (Blanco) :1B (Catalizador) en volumen	No requiere	4A (Blanco poliuretano):1B (Catalizador) en volumen
Tiempo de inducción	30 min	30 min	No requiere	No requiere
Vida útil de la mezcla	4 horas	4 horas	No requiere	3-4 horas
Tiempo de secado para repintar	24 horas	8 horas	16 horas	12 horas



Figura 3.15. Ejemplo de preparación de mezcla: Acabado poliuretano con una reducción del 25% de acabado poliuretano.

3.3.2.2 EQUIPO DE APLICACIÓN

Para la aplicación de la mezcla se utilizó un equipo de aspersión con pistola de pintado de gravedad boquilla 1.5 - 1.8 mm, en un ambiente con una temperatura y humedad relativa promedio de 27°C y 60% respectivamente. Para retoques de acabado se utilizó una brocha de cerdas naturales. La figura muestra 3.16 el equipo utilizado y un ejemplo de aplicación del recubrimiento de acabado poliuretano.



Figura 3.16. Equipo de aplicación: Pistola de aspersión por gravedad.

3.3.2.3 MEDICIÓN DE ESPESORES

Luego de la aplicación de la mezcla se dejó secar el tiempo estipulado para repintar según se especificó en la tabla 3.3, una vez pasado ese tiempo se midió el espesor de película seca con equipo ELCOMETER. La Figura 3.17 muestra un ejemplo de medición de espesor de película seca del para el recubrimiento primario rico en zinc en el sistema AD con PH, el cual presenta un valor de 2.34 mils lo que significa que está dentro del rango de espesor permitido.



Figura 3.17. Medición de espesor de película seca con equipo ELCOMETER.

El procedimiento desde la preparación de la mezcla hasta la medición de espesores se realiza para cada uno de los recubrimientos que conforman el sistema de recubrimiento AD, DI y MD en el orden de aplicación anteriormente mencionado en la sección 3.2.2, siempre y cuando se haya cumplido el tiempo de secado para repintar que se especificó en la tabla 3.3. El tiempo de curado total después de la aplicación de la última capa de acabado fue de 7 días. La figura 3.18 muestra un ejemplo de la secuencia de la aplicación de los recubrimientos para el sistema AD, donde: S. Piezas de acero normado A36 con PH para el sistema AD. 1. aplicación del recubrimiento primario anticorrosivo 90% en zinc con un tiempo de secado de 24 horas. 2. Aplicación del recubrimiento secundario epoxy con un tiempo de secado de 8 horas. 3. Aplicación del acabado poliuretano con un tiempo de secado de 12 horas. 4. Set total de especímenes AD con PH listos para dejar secar durante 7 días. El mismo procedimiento se realiza para el resto de los sistemas DI y MD con PH y los sistemas con PS.

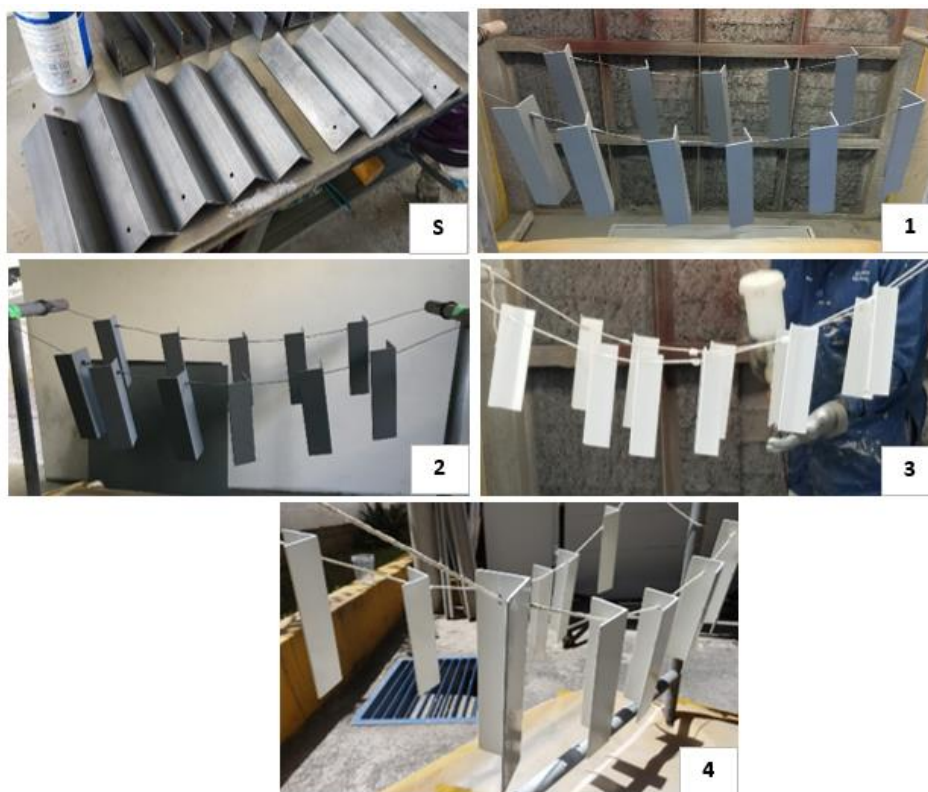


Figura 3.18. Orden de aplicación de los recubrimientos para el sistema AD con PH. S) Substrato acero A36. 1) primario rico en zinc (24 h de secado). 2) Secundario epoxy (8 h de secado). 3) Acabado poliuretano (12 h de secado). 4) Especímenes PHAD (7 días de curado)

3.3.2.4 EMPAQUE Y EMBALAJE

Al finalizar el tiempo de curado de los especímenes se procedió al etiquetado, empaque y transporte como se observa en la Figura 3.19 dónde: El etiquetado de especímenes (A) se realiza con plumón permanente indicando sustancia química, preparación de superficie, sistema y el número de muestra identificando el análisis por duplicado. El empaque y embalaje (B) se realiza con papel Kraft y plástico de burbujas con el objetivo de resguardar los especímenes en caso de caída que pueda dañar o descascarillar el recubrimiento, finalmente se colocan en cajas plásticas resistentes para su transporte a planta dónde se lleva a cabo las pruebas de corrosión in situ.

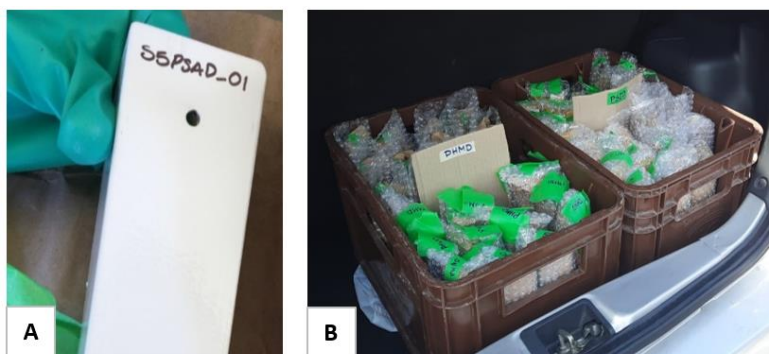


Figura 3.19. A) Etiquetado de especímenes. B) Empaque, embalaje y transporte.

3.4 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE OBSERVACIONES

En este apartado se describe el procedimiento realizado en planta, desde el corte de falla en los especímenes hasta la toma de datos para posterior análisis cualitativo-cuantitativo. La metodología de campo está dividida en 5 pasos generales para la manipulación de los especímenes los cuáles son: Corte de falla (Este paso se realiza únicamente al inicio de las pruebas de corrosión), Disposición estructural, Extracción/Inmersión, Tratamiento y Monitoreo de la corrosión.

3.4.1 CORTE DE FALLA

Para observar el fenómeno de la corrosión mediante pruebas in situ, a todos los especímenes se les realizaron dos cortes de falla en la cara interior y exterior del ala izquierda de los especímenes; estos cortes serán el área de análisis para la evaluación del grado de corrosión y ampollamiento. El corte de aproximadamente 5 cm de longitud se realiza con la ayuda de una plantilla para borrar metálica y un cúter tal como se muestra en la figura 3.20.



Figura 3.20. Corte de falla.

3.4.2 DISPOSICIÓN ESTRUCTURAL

Para la disposición de los especímenes se diseña un esquema estructural compuesto de un material que no se degrade debido a la exposición de las sustancias químicas y/o el contacto con los especímenes, así mismo debe asegurar su correcta sujeción, su identificación y transporte dentro de la planta. Para ello se utilizó como soporte un tubo PVC con medidas de 1 metro de longitud realizándole 6 orificios con cautín en los cuales se insertan cintas de amarre plásticas resistentes 3M, a estas últimas se sujetan los especímenes con cintas de amarre plásticas normales. En el diseño estructural es muy importante la rotulación de manera clara de la sustancia química, el tipo de preparación de superficie, sistema de recubrimiento y el número de muestras por duplicado. En el esquema de la Figura 3.21 se muestra el ejemplo de disposición de los especímenes S1PHDI donde se puede observar: 1) Rotulación de sustancia química (S1) 2) Rotulación del tipo de Preparación de Superficie (PH) y Sistema de Recubrimiento (DI) 3) Tubo PVC 4) Cinta de Amarre 3M 5) Cinta de amarre normal 6) Rotulación de muestras por duplicado 7) especímenes recubiertos con los MD, DI y AD conformando un total de 6 especímenes por tubo.

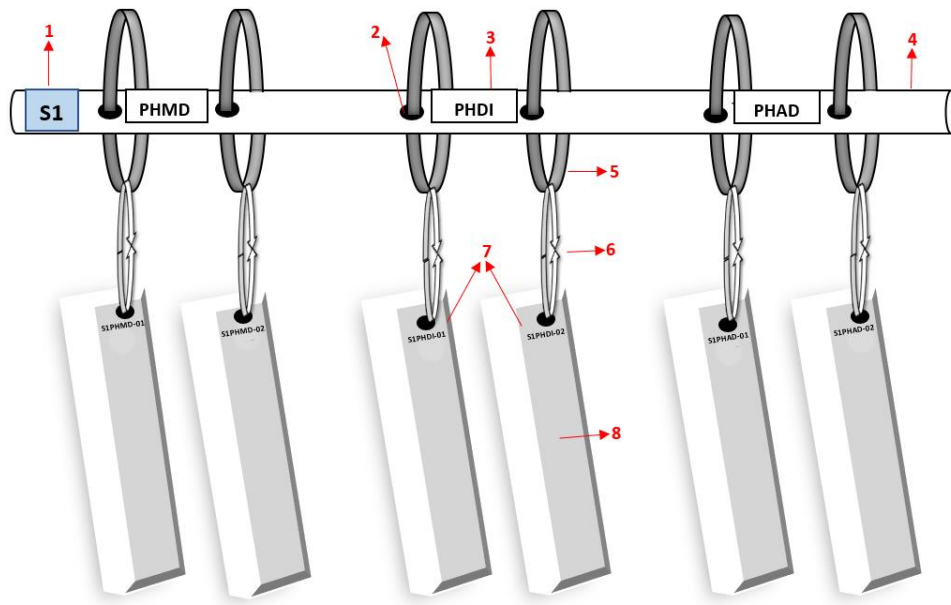


Figura 3.21. Esquema estructural de especímenes.

En la figura 3.22 se muestra el total de 60 especímenes listos para la inmersión en las respectivas sustancias químicas. Para análisis posteriores se almacenan 6 especímenes que fungirán como blancos correspondientes a cada sistema de recubrimiento y cada tipo de preparación de superficie.



Figura 3.22. Especímenes listos para inmersión.

3.4.3 INMERSIÓN INICIAL

Los especímenes se transportan hasta la bodega dónde son colocados en sacos contenedores de aproximadamente 80 cm de altura y 400 Kg de las sustancias químicas bajo análisis. En la Figura 3.23 se muestran los sacos contenedores de las sustancias químicas en el interior de la bodega dónde se muestra de izquierda a derecha: Muriato de Potasio (MOP), Nitrato de Amonio (N/A), Fosfato Diamónico (DAP), Sulfato de Amonio (S/A) y Urea.



Figura 3.23. Sacos contenedores de las sustancias químicas en el interior de la bodega de almacenamiento.

En cada sustancia química se sumergieron de forma vertical a una profundidad de 25 cm un total de 12 especímenes correspondientes a 2 sets de 6 especímenes con PH y PS respectivamente, cada espécimen debe guardar la respectiva distancia del otro para evitar el contacto entre ellos (Véase la figura 3.24).



Figura 3.24. Especímenes totalmente sumergidos en las sustancias químicas.

3.4.4 EXTRACCIÓN / INMERSIÓN

Al momento de manipular las sustancias es importante tener en cuenta la información brindada por las fichas técnicas y de seguridad antes mencionadas en la sección 3.2.3. Para la extracción/inmersión de especímenes se debe contar con la debida protección a la hora de manipular las sustancias para ello se hace uso de guantes de nitrilo resistentes a químicos, lentes protectores y mascarilla N95 industrial.

Como se menciona en la sección 3.2.3 hay sustancias químicas como la Urea o Nitrato de Amonio que son altamente higroscópicas por lo que a medida que pasa el tiempo se vuelven más difíciles de remover debido al apelmazamiento. Por tal razón, para estas sustancias se hace uso de objetos tales como palas de madera y/o plástico o cuchillas resistentes que faciliten tanto la inmersión como la extracción de especímenes (Véase la figura 3.25), dichos objetos deben ser únicos para cada sustancia ya que hay químicos incompatibles entre sí, por lo tanto, se debe evitar el contacto entre ellos.



Figura 3.25. Herramientas de inmersión/extracción. A) Cuchilla, palas de plástico y de madera para Urea. B) Palas de plástico para Nitrato de Amonio. C) pala de madera para Sulfato de amonio.

La figura 3.26 muestra la secuencia de inmersión de los especímenes en el Nitrato de Amonio, una de las sustancias más difíciles de remover, donde con la ayuda de palas de plástico realizan surcos o hendiduras, retirando parte del químico en otro recipiente de manera que quede ese espacio para introducir los especímenes, luego, se colocan los especímenes, agregando el químico retirado en el paso anterior, para finalmente dar los acabados necesarios y que queden totalmente inmersos.

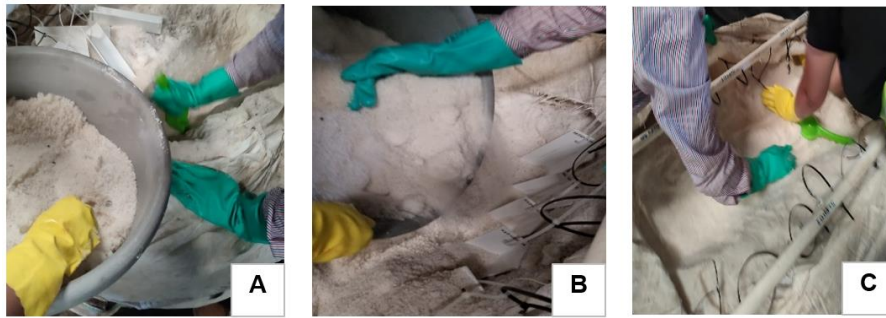


Figura 3.26. Ejemplo de inmersión de especímenes en el Nitrato de Amonio. A) Realización de surcos. B) y C) Inmersión de especímenes.

La extracción/inmersión de los especímenes en las sustancias químicas DAP y MOP se realiza de la siguiente manera: Se extraen halando la cincha de amarre y para la inmersión se ejerce una leve presión sobre el espécimen (véase la figura 3.27).

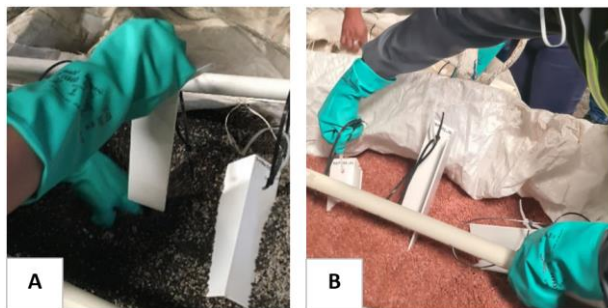


Figura 3.27. A) Inmersión en DAP. B) Extracción en MOP.

3.4.5 TRATAMIENTO

Antes del monitoreo de la corrosión es necesario realizar un tratamiento de limpieza a los especímenes para eliminar los restos de sustancia que quedan adheridas después de la extracción. La limpieza se realiza con agua y se secan con franelas de forma suave tratando de no ejercer demasiada presión sobre los cortes para pruebas aceleradas ya que pueden alterar los resultados obtenidos, finalmente se terminan de secar a la luz del sol de tal manera que no queden húmedas ya que podría afectar el proceso de corrosión (véase Figura la 3.28) y luego se procede a la fase de monitoreo.

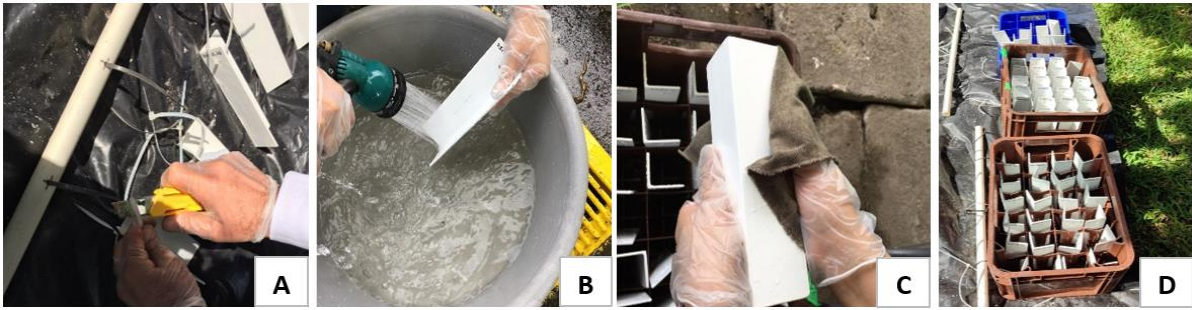


Figura 3.28. Tratamiento de Limpieza especímenes. A) Corte de cinta de amarre normal. B) Lavado con agua. C) Secado con franela. D) Secado al sol.

3.4.6 MONITOREO DE LA CORROSIÓN

En el monitoreo de la corrosión se evalúa el avance de la corrosión en los especímenes y el fallo del recubrimiento cada cierto tiempo de exposición.

A. Tiempo de exposición

El tiempo de exposición fue en total un mes y medio (1000 horas). El monitoreo del avance de la corrosión y formación de ampollas se realizó en intervalos aproximados de 7 días.

B. Medición de temperatura y humedad relativa

En cada sesión de monitoreo del avance de la corrosión y formación de ampolla (cada 7 días aproximadamente) se midieron las condiciones de temperatura y humedad relativa tanto exterior como interior de la bodega, esto con el objetivo de llevar un control en la medida de lo posible, dadas las limitaciones del proyecto, de las condiciones ambientales de trabajo. En la figura 3.29 se muestra un ejemplo de medición de temperaturas con termómetro digital inalámbrico TAYLOR para exteriores e interiores.

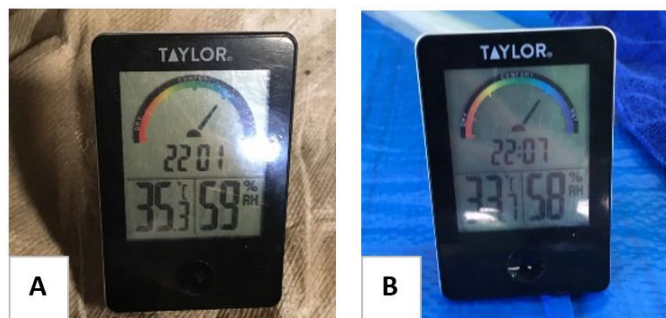


Figura 3.29. Medición de temperaturas. A) interior de la bodega. B) Exterior de la bodega.

C. Evaluación

El procedimiento de evaluación del grado de corrosión y el fallo del recubrimiento se realiza luego del secado al sol de los especímenes. El análisis se realiza en la zona del corte de falla tanto en la cara externa como interna del espécimen. El grado de corrosión se evalúa mediante la norma ASTM-D610/SSPC-VIS2, el grado de ampollamiento se evalúa mediante la norma ASTM-D714, también se realizan diversas observaciones generales como por ejemplo la comparación con su respectivo blanco (Véase la figura 3.30). Al finalizar la etapa de evaluación se procede a colocar los especímenes con cintas de amarre nuevas normales en la misma disposición estructural para la posterior inmersión en las sustancias químicas.



Figura 3.30. Procedimiento de monitoreo de la corrosión A) Evaluación con Norma SSPC-VIS2. B) Evaluación con norma ASTM-D714. C) Observaciones generales. D) Registro fotográfico.

CAPITULO IV. RESULTADOS

A lo largo de la fase experimental se realizaron 6 visitas de campo para la observación de la formación y avance de la corrosión y ampollamiento de los recubrimientos. En el anexo 1 se muestra un fragmento del formulario utilizado para el registro de estos datos de manera ordenada.

Las condiciones de temperatura y humedad relativa en el interior de la bodega dónde se realizó el experimento fueron en promedio 32.8°C y 65.4% respectivamente. Mientras que en el exterior de la bodega fueron en promedio 30.0°C y 69.0%.

4.1 GRADO DE CORROSIÓN SEGÚN NORMA ASTM - D610 / SSPC -VIS 2

La estimación del grado de corrosión según la norma ASTM-D610/SSPC-VIS2 se realizó por comparación visual entre el área de análisis (líneas de corte) y los diferentes tipos/grados de corrosión que la misma presenta. Un punto para tener en cuenta es que la corrosión presentada en los bordes y perforaciones de los especímenes no se consideran como parte de los seguimientos, en ambos casos, se determinan como deficiencias en la aplicación de recubrimiento o golpes que debilitaron el sistema en esas áreas específicamente.

Otra consideración importante es que los duplicados se analizan como uno solo, por lo que, si se tienen repeticiones entre observaciones se presenta como una sola, caso contrario, si entre líneas de corte interior/exterior de un mismo espécimen y duplicados hay diferentes grados de corrosión para un mismo tipo, se tomará el mayor grado presentado, esto debido a que los resultados se manejaran de forma cuantitativa y la calificación se complica al tener combinaciones.

Finalmente, otra consideración es que todas las observaciones correspondían a tipos de corrosión generalizados, por lo que, a lo largo de la exposición de resultados de esta sección y el anexo 2, se omite el paso de determinación del tipo de corrosión por efectos prácticos.

Un ejemplo de estas estimaciones se presenta a continuación, donde la figura 4.1 presenta la línea de corte de uno de los especímenes de preparación de superficie por herramientas, sistema de recubrimiento de moderado desempeño, expuesto a nitrato de amonio (S2PHMD) a las 730 horas de exposición; la norma presenta 3 tipos de corrosión, en este caso se determina que es corrosión generalizada, luego, se estima el grado de corrosión en base a la forma y cantidad de fallas que se presentan; como se observa en la figura 4.2, para esta observación, el grado de corrosión se observa entre los niveles 7-G y 6-G, es decir, entre el 0.3 y 1.0% de corrosión.



Figura 4.1. Ejemplo de línea de corte en uno de los especímenes S2PHMD a 730 horas de inmersión.

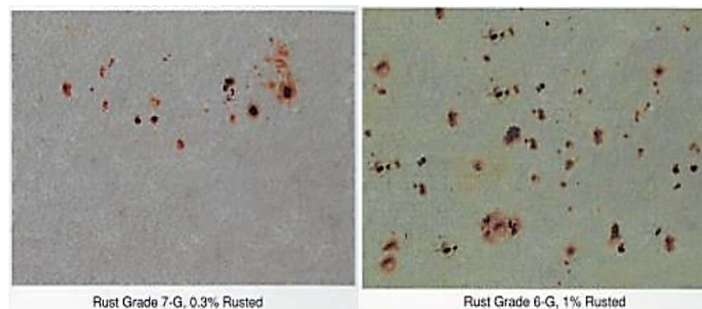


Figura 4.2. Grados de corrosión 7-G y 6-G Según Norma SSPC VIS2.

En el anexo 2 se muestran los datos más relevantes a nivel cualitativo obtenidos a lo largo de la fase experimental dividido por sustancia. Estos resultados cualitativos fueron calificados por convenciones propias con la finalidad de poder manejar estos datos en un nivel cuantitativo para que permita representar gráficamente los fenómenos observados. A continuación, se presenta el resumen cuantitativo mediante gráficos comparativos de Nivel de corrosión vs. Tiempo de la estimación los grados de corrosión obtenidos divididos por sistema de recubrimiento.

4.1.1 GRÁFICAS DEL NIVEL DE CORROSIÓN VS TIEMPO PARA EL SISTEMA MD

En las figuras 4.3 y 4.4 se observa que para PH y PS con MD; el Nitrato de Amonio presenta una acción corrosiva mucho más agresiva que las demás sustancias, observándose en las dos gráficas un aumento constante en el nivel de corrosión, alcanzando grados de corrosión general de hasta 4-G correspondiente a un porcentaje de corrosión del 10% para PH y 5-G correspondiente a un porcentaje de corrosión del 3% para PS.

La segunda sustancia más corrosiva es la Urea presentando niveles de corrosión máxima constante de 9-G con un porcentaje de corrosión de 0.03% para ambas preparaciones de superficie PH y PS. Mientras que para la sustancia MOP los niveles de corrosión se mantienen entre 10-G y 9-G con porcentajes de corrosión que oscilan entre <0.01% y 0.02%, en cuanto al DAP y sulfato de amonio no se observa ningún grado de corrosión en los especímenes durante las 1000 horas de exposición por lo que presenta un grado de corrosión 10-G equivalente a <0.01%.

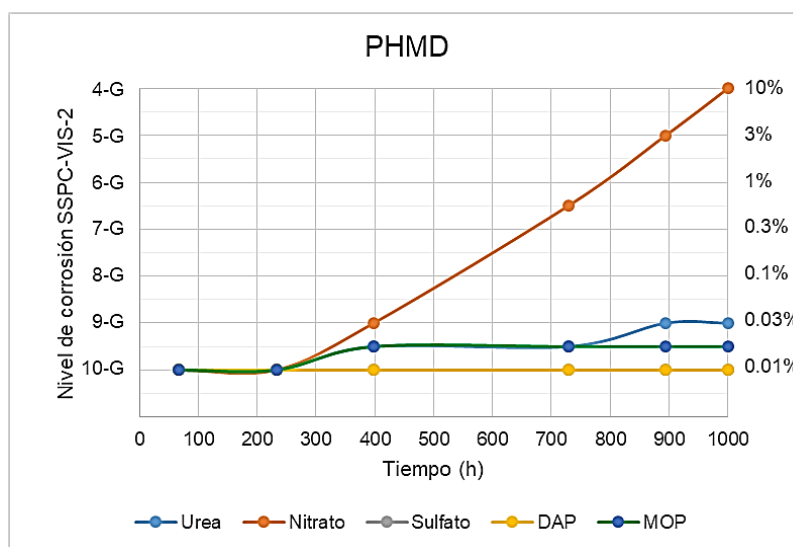


Figura 4.3. Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PHMD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.

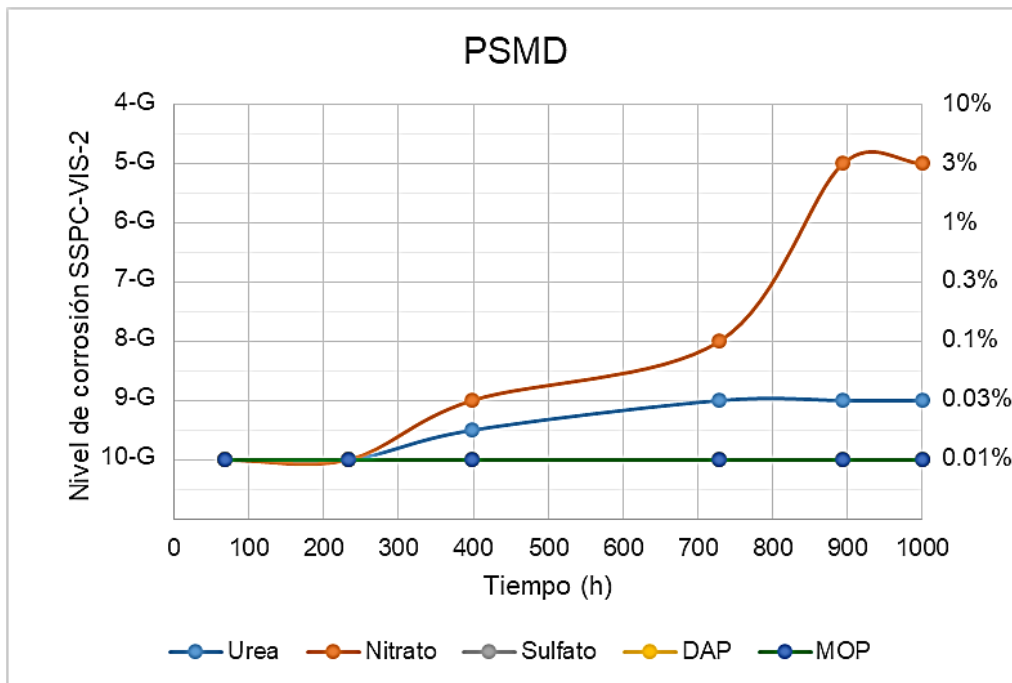


Figura 4.4. Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PSMD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.

En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se muestra la comparativa de los dos tipos de preparación de superficie para las dos sustancias más corrosivas con el sistema MD. En la figura 4.5 se observa que los especímenes en Urea con preparación PS presentaron grados de corrosión de 9-G a las 700 h aproximadamente y se mantuvo constante hasta las 1000 h, sin embargo, los especímenes PH a partir de las 900 h aproximadamente se observa un aumento en el grado de corrosión por encima de 9-G. Para los especímenes inmersos en el Nitrato de Amonio como se muestra en la figura 4.6 se observa un aumento constante en el grado de corrosión por parte de los especímenes PH alcanzando grados de corrosión (4-G) superiores a los especímenes con PS (5-G). En la figura 4.7 se muestra la comparativa de PH y PS para la sustancia química MOP dónde los especímenes PH presentan mayores grados de corrosión (10G a 9-G) que los especímenes PS (10-G).

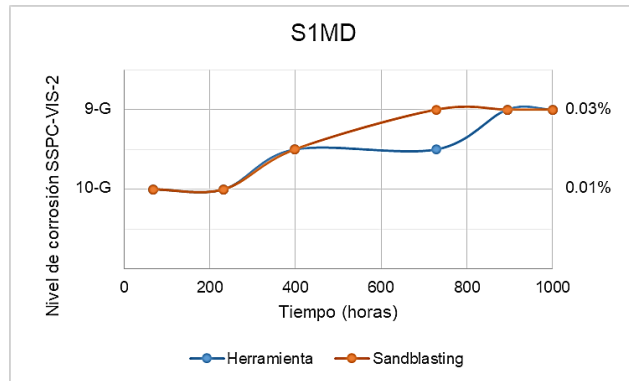


Figura 4.5. Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para la Urea y MD.

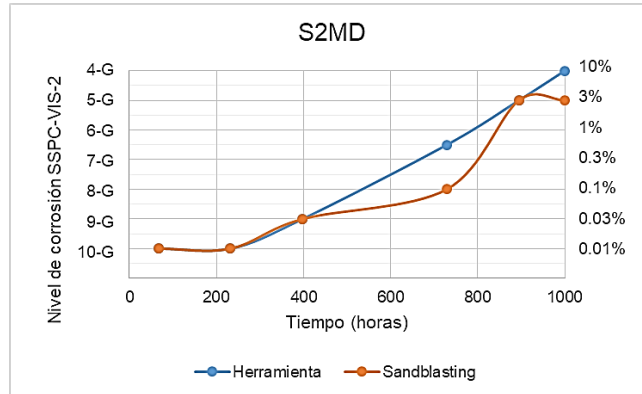


Figura 4.6. Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y MD.

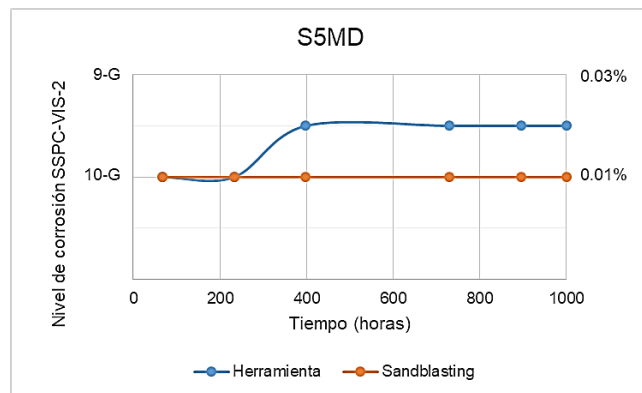


Figura 4.7. Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y MD.

4.1.2 GRÁFICAS DE NIVEL DE CORROSIÓN VS TIEMPO PARA EL SISTEMA DI

Las figuras 4.8 y 4.9 presentan los datos de grado de corrosión en función del tiempo para los especímenes DI con PH y PS respectivamente. En dichas figuras se observa que la sustancia más corrosiva tanto para PH y PS es el Nitrato de amonio, mostrando una curva creciente a partir aproximadamente 230 h hasta alcanzar grados de corrosión máximos en las 1000 h de análisis cercanos a 5-G con porcentaje de 3% para PH y cercanos a 6-G con porcentaje de 1% para PS. Las sustancias de Urea, sulfato de amonio, DAP y MOP presentan niveles constantes de corrosión de 10-G y 9-G en porcentajes estimados en el rango <0.01% a 0.02%.

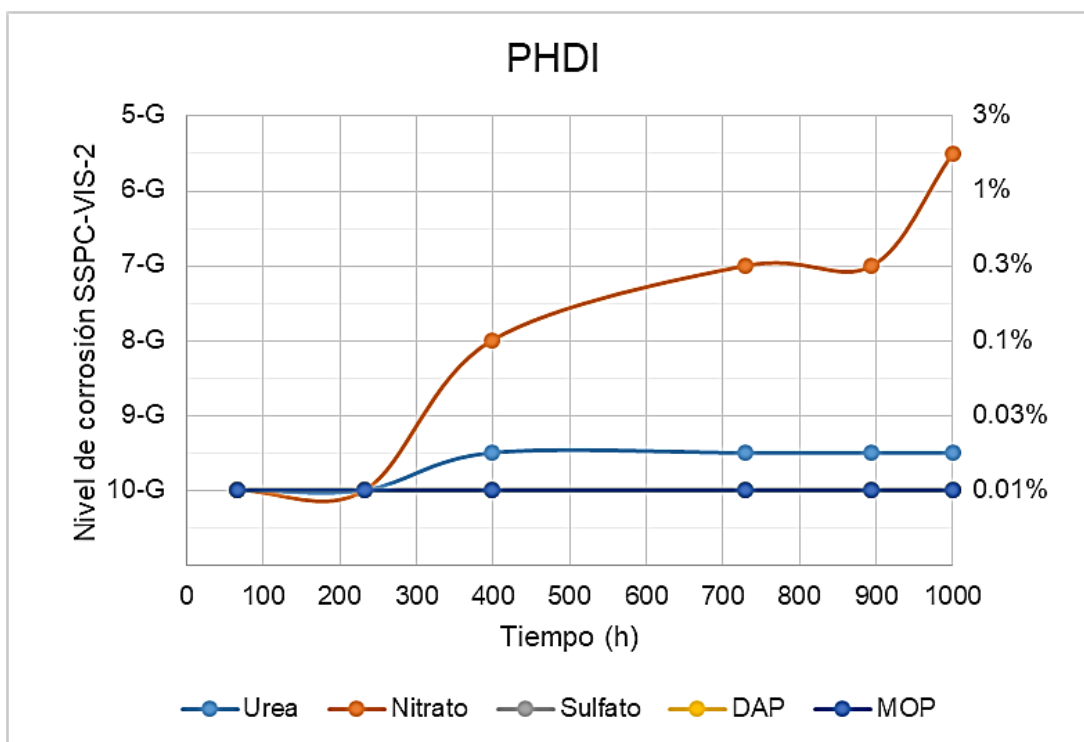


Figura 4.8. Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PHDI sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.

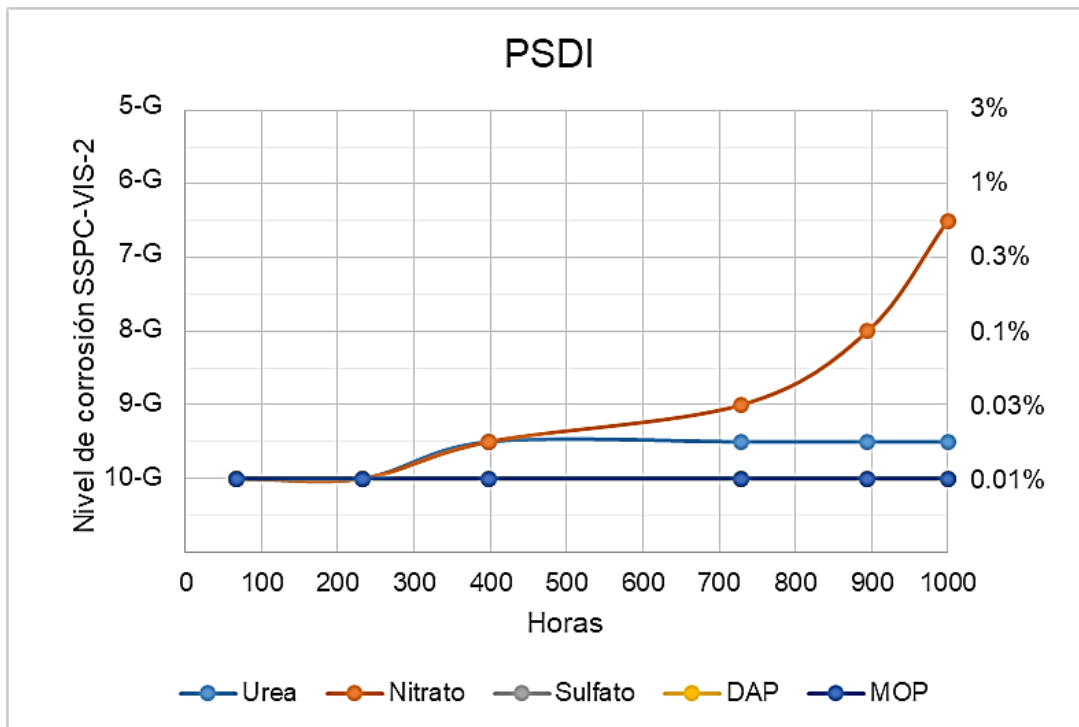


Figura 4.9. Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PSDI sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.

Las figuras 4.10 y 4.11 muestran una comparación de las dos técnicas de preparación PH y PS para las dos sustancias más corrosivas la Urea y el Nitrato de amonio respectivamente. En la figura 4.10 se observa la superposición de las dos curvas naranja y azul que corresponden a las dos preparaciones PH y PS respectivamente, lo cual indica que ambas técnicas preparación presentaron los mismos grados de corrosión en el rango de 10-G a 9-G. En cuanto al Nitrato de amonio, como se muestra en la figura 4.11 la preparación de superficie PH muestra un mayor avance en el grado de corrosión (6-G a 5-G) que la preparación PS (7-G a 6-G).

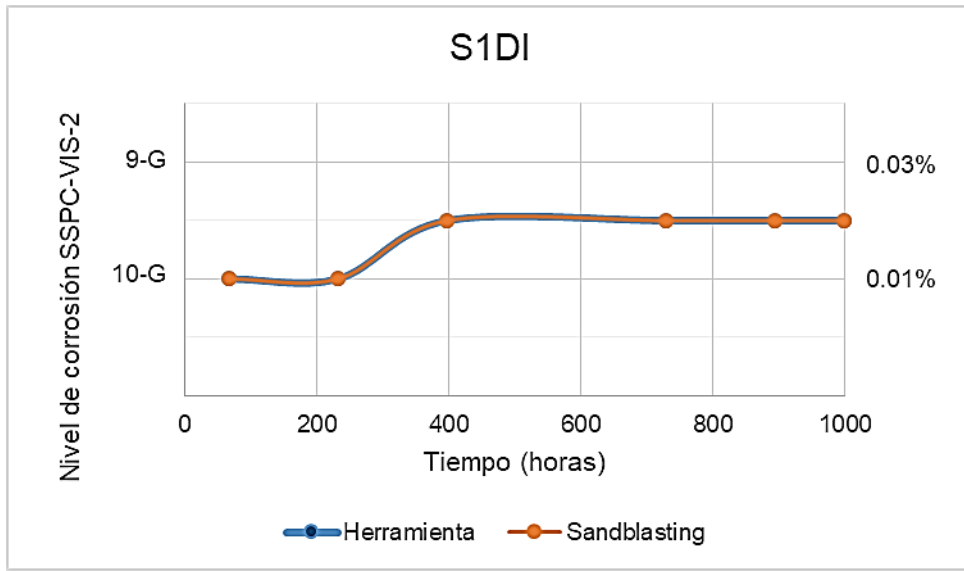


Figura 4.10. Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para la Urea y DI.

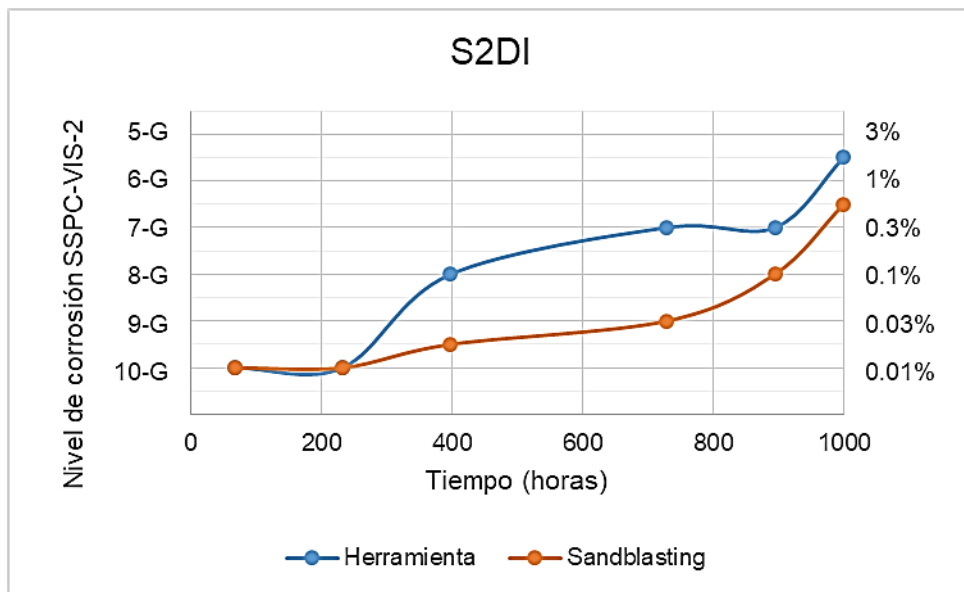


Figura 4.11. Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y DI.

4.1.3 GRÁFICAS DEL NIVEL DE CORROSIÓN VS TIEMPO PARA EL SISTEMA AD

Las figuras 4.12 y 4.13 presentan los datos de grado de corrosión en función del tiempo para los especímenes AD con PH y PS respectivamente. En dichas figuras se observa que la sustancia más corrosiva tanto para PH y PS es el Nitrato de amonio, mostrando una curva creciente a partir aproximadamente 230 h hasta alcanzar grados de corrosión máximos en las 1000 horas de análisis con valores en el rango de 9-G a 8-G con porcentajes aproximados de 0.05% para PH y 9-G con porcentaje de 0.03% para PS. Las sustancias de Urea, sulfato de amonio, DAP y MOP presentan niveles constantes de corrosión de 10-G y 9-G en porcentajes estimados en el rango <0.01 a 0.02%.

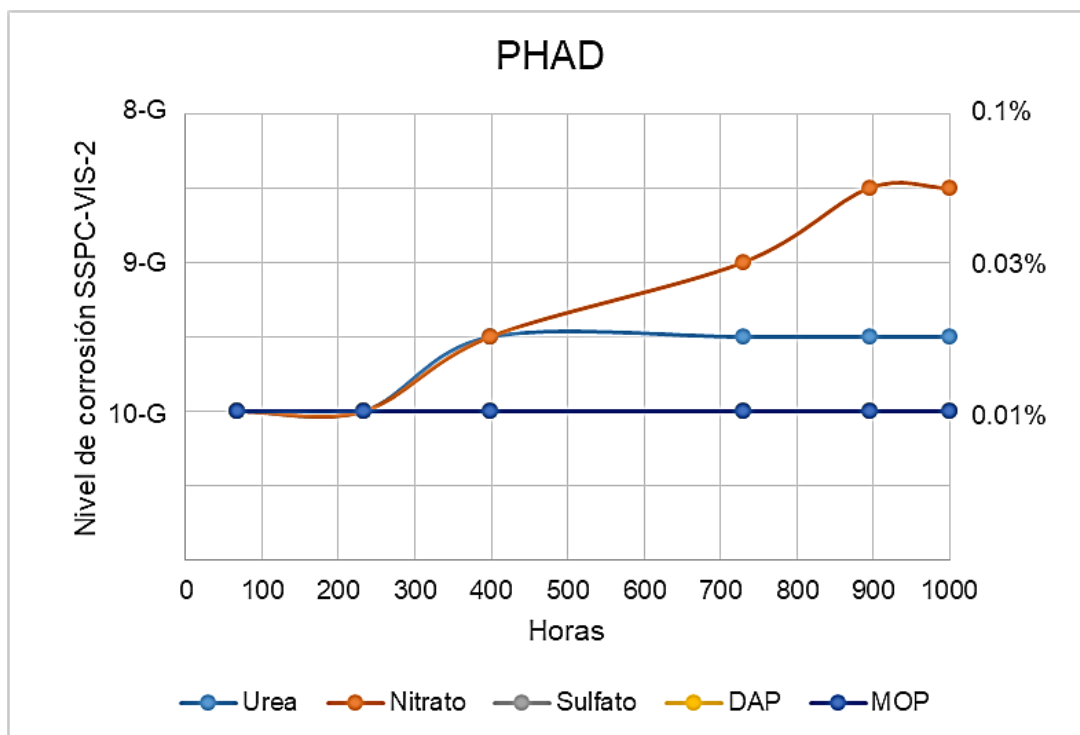


Figura 4.12. Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PHAD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.

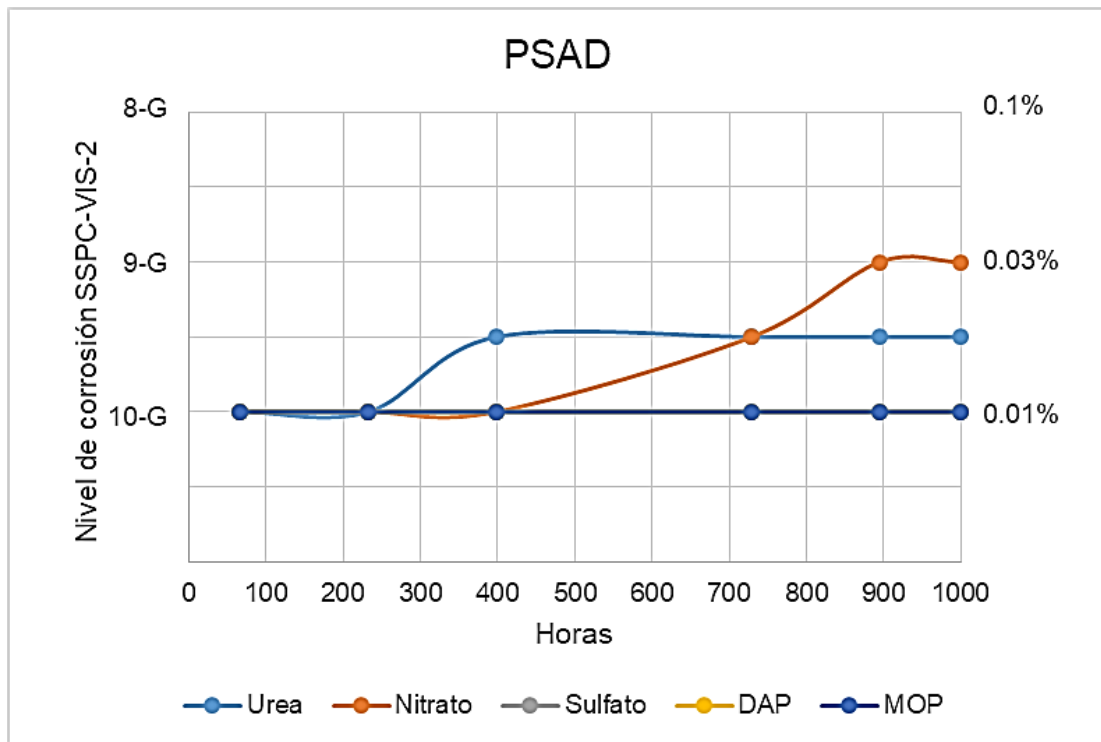


Figura 4.13. Gráfica de grado de corrosión vs tiempo para los especímenes con PSAD sumergidos en las 5 sustancias bajo análisis.

Las figuras 4.14 y 4.15 muestran una comparación de las dos técnicas de preparación PH y PS para las dos sustancias más corrosivas la Urea y el Nitrato de amonio respectivamente. En la figura 4.14 se observa la superposición de las dos curvas naranja y azul que corresponden a las dos preparaciones PH y PS respectivamente, lo cual indica que ambas técnicas preparación presentaron los mismos grados de corrosión en el rango de 10-G a 9-G. En cuanto al Nitrato de amonio, como se muestra en la figura 4.15 la preparación de superficie PH muestra un mayor avance en el grado de corrosión alcanzando el grado 9-G que la preparación PS que se mantiene en valores entre 10-G y 9-G.

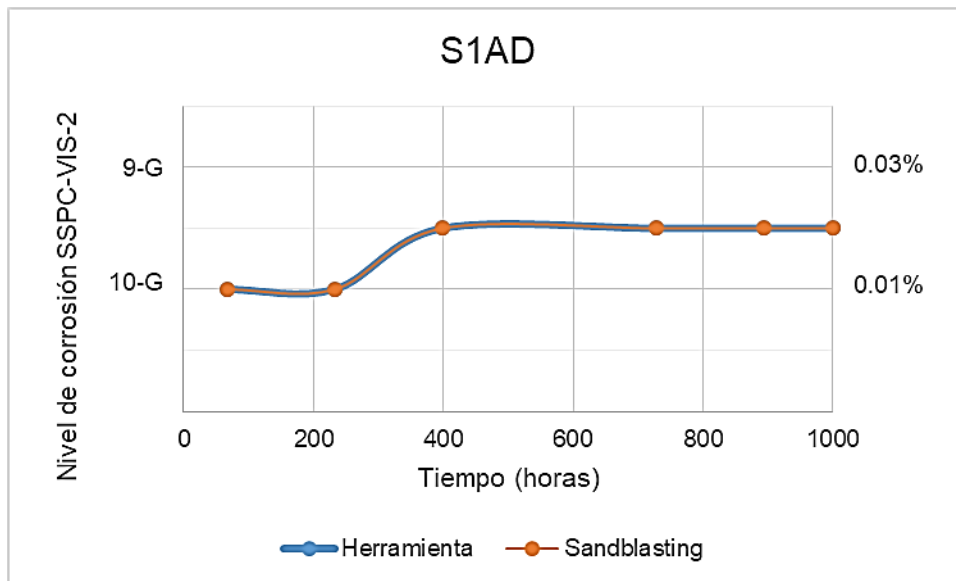


Figura 4.14. Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para la Urea y AD.

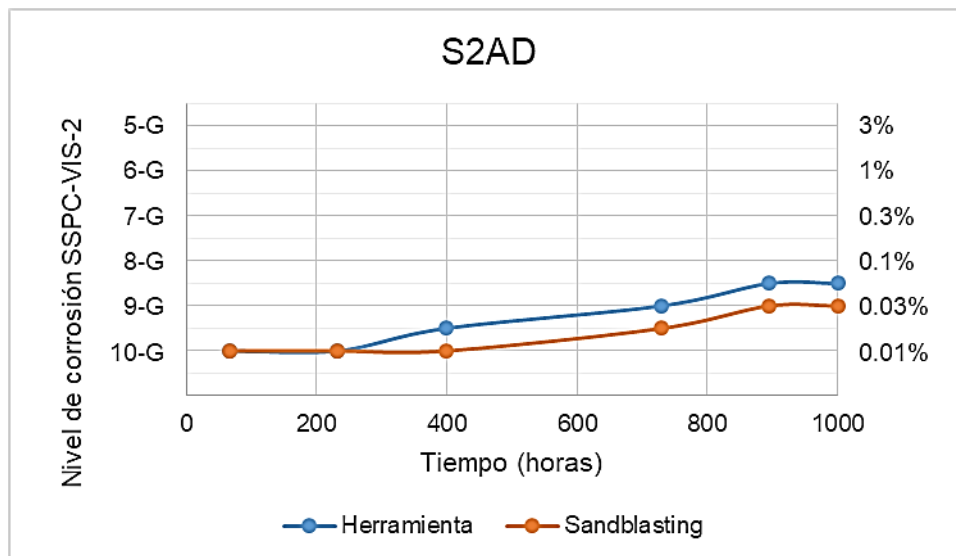


Figura 4.15. Gráfica comparativa de los tipos de preparación de superficie PH y PS con respecto al grado de corrosión en función del tiempo para el Nitrato de Amonio y AD.

4.2 GRADO DE AMPOLLAMIENTO SEGÚN NORMA ASTM – D714

El grado de ampollamiento de los diferentes sistemas de recubrimientos aplicados se estimó por medios comparativos de las líneas de corte realizadas con la norma ASTM-D714, en este caso, los resultados se manejan a nivel cualitativo, para este caso, no se hace distinción entre las líneas de corte interna/externa por espécimen, pero si se reporta por cada duplicado, ya que hay casos donde variaba el tipo y densidad entre par de muestras, las causas de este fenómeno pueden ser diversas, por ejemplo, la humedad, efectos de ataque de ciertos iones, etc. pero que no se especifican por que va más allá del alcance de este proyecto.

La norma ASTM–D714 presenta 2 variables: tamaño de ampolla y densidad. La forma más fácil para comparar es primero identificar el tamaño de ampolla “Blister N°” entre los números 2, 4, 6 y 8, los cuales, son inversamente proporcionales, es decir, entre mayor sea el “número”, el tamaño real de ampolla es más pequeño; en cuanto a las densidades, se encuentran 4 categorías: “Few (F)”, “Medium (M)”, “Medium dense (MeD)” y “Dense (D)”, las cuales se manejarán como: poca densidad, densidad media, densidad intermedia, denso, entendiendo “intermedio” como una escala que se encuentra entre medio y denso pero que es relativamente fácil de apreciar.

A manera de ejemplo, se presenta en la Figura 4.16 una de las líneas de corte para un espécimen con preparación por herramientas, sistema de recubrimiento de intermedio desempeño expuesto a urea (S1PHDI), por efectos de la imagen, se ha señalado con flechas las ampollas más predominantes; para este caso, en la figura 4.17 a) se presenta el tamaño N°4, y b) tamaño N°2, estimando, el valor seleccionado es N°2, luego, entre las densidades intermedia y media (Figura 4.4 b) y c) respectivamente), se estima una densidad intermedia.

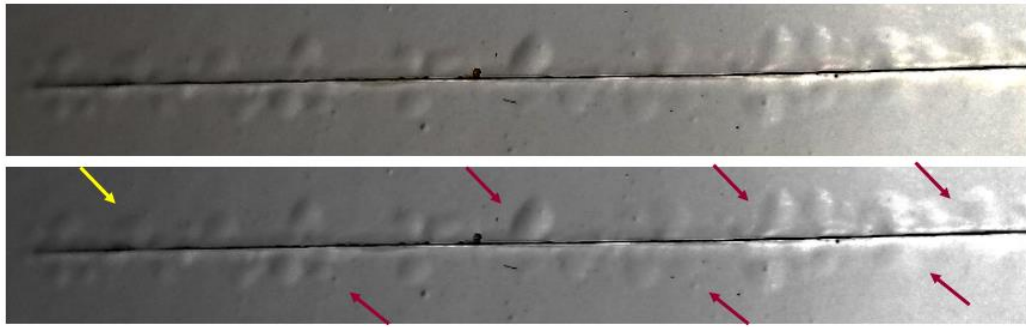


Figura 4.16. Ejemplo de Ampollamiento en el recubrimiento de desempeño intermedio expuesto a urea.

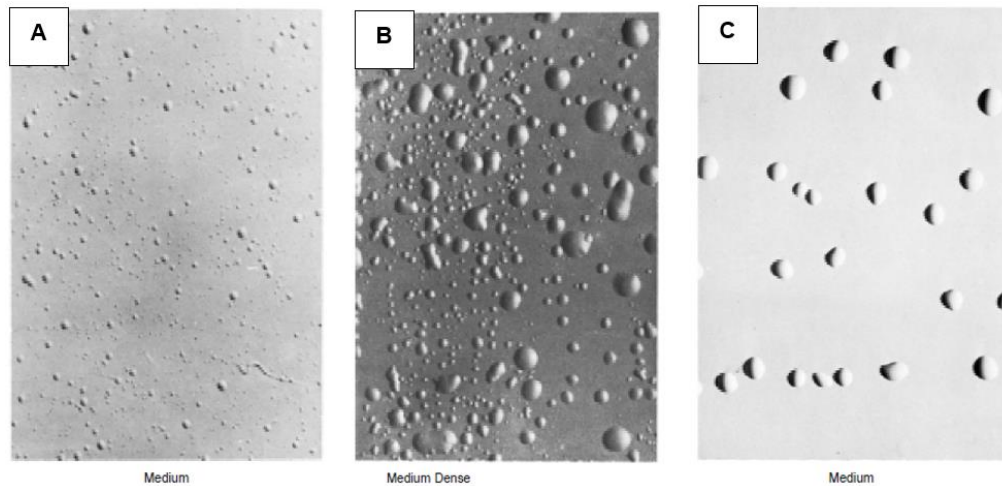


Figura 4.17. A) Tamaño de ampolla N°4. B) Tamaño de ampolla N°2, densidad intermedia (Medium dense). C) Tamaño de ampolla N°2, densidad media (Medium). ASTM - D714.

En el anexo 2 se muestran algunos registros fotográficos representativos obtenidos a lo largo de la fase experimental.

A continuación, se presenta el resumen cualitativo de la estimación los grados de ampollamiento y sus respectivas densidades obtenidos. Las tablas 4.1 y 4.2 muestran con cheque azul los valores correspondientes al tamaño y densidad de ampollamiento de los especímenes 01, el cheque de color negro corresponde a los especímenes 02 y el cheque de color rojo representa cuando a ambos duplicados se les localizó el mismo valor de tamaño y densidad de ampolla.

Para el caso de inmersión en urea, los especímenes de S1PHDI comenzaron a presentar ampollas a partir de las 400 horas, pero el repunte de diversos grados de ampollamiento para la mayoría de los especímenes se da entre el intervalo de tiempo de exposición de 730 a 1000 h. En la tabla 4.1 se observa una clara diferencia entre las densidades de ampolla de los especímenes con PH y PS, la mayoría de especímenes con PS presentan menor tamaño y densidad de ampolla, así como también se observa que los únicos especímenes que no sufrieron alteración en la película del recubrimiento bajo la acción química de la urea durante la duración del estudio fueron los especímenes con PSAD y PHAD, por lo que en 1000 h de estudio se le asigna un tamaño Blister N°10: Ausencia de ampolla. La Figura 4.18 muestra unos ejemplos representativos del grado de ampollamiento para cada preparación en los diferentes sistemas inmersos en Urea.

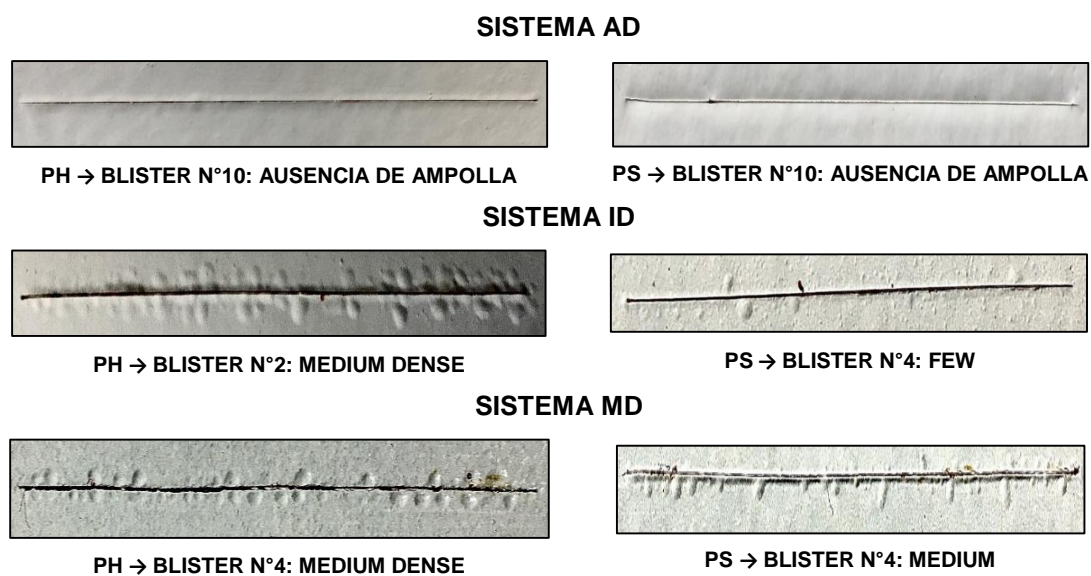


Figura 4.18. Comparativa visual del grado de ampollamiento de las dos preparaciones PH y PS para los tres sistemas AD, DI y MD inmersos en Urea.

Los especímenes que se sometieron a la acción química del Nitrato de Amonio presentaron diversos grados de corrosión a partir del tiempo de exposición 400 h. Nótese en la tabla 4.2 que los especímenes con PH fueron los que presentaron mayor tamaño y densidad de ampollas a partir del tiempo de exposición 400 h.

Mientras los especímenes con PS solo presentaron pocas ampollas de tamaño 6 en el tiempo de exposición de 730 h manteniéndose constante hasta la duración completa del experimento.

La Figura 4.19 muestra unos ejemplos representativos del grado de ampollamiento para cada preparación en los diferentes sistemas inmersos en Nitrato de Amonio.

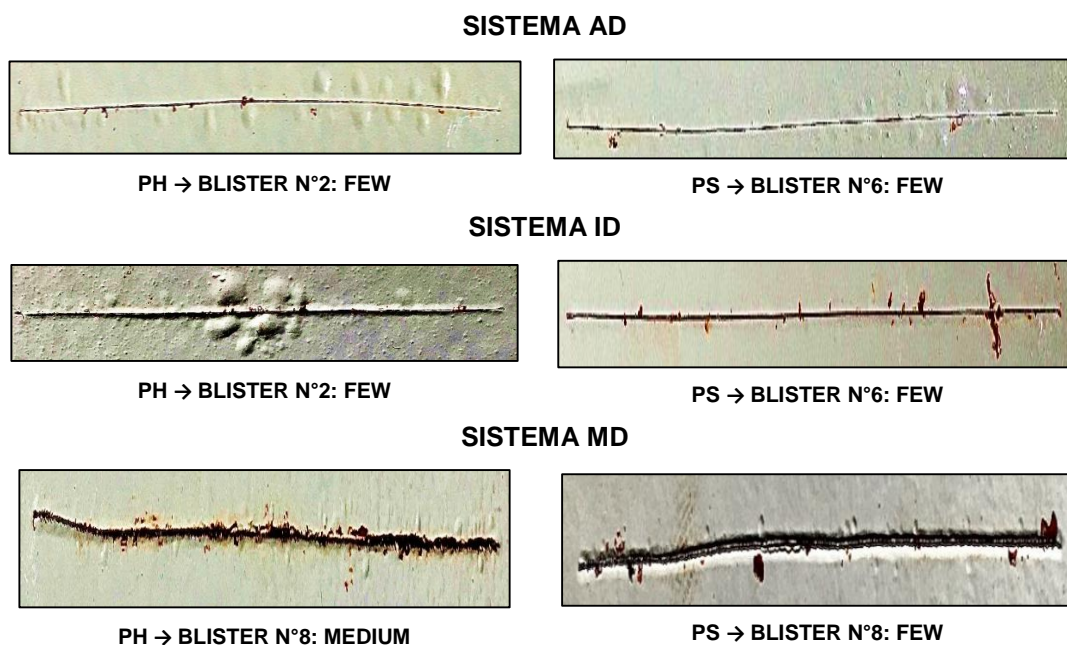


Figura 4.19. Comparativa visual del grado de ampollamiento de las dos preparaciones PH y PS para los tres sistemas AD, DI y MD inmersos en Nitrato de Amonio.

Los especímenes expuestos a las sustancias químicas Sulfato de Amonio y DAP no presentaron ampollamiento en las 1000 horas estudio. En cuanto a los especímenes expuestos a la acción química del MOP sólo se observaron pocas ampollas de tamaño 6 en el intervalo de tiempo 900 -1000 h (Véase la Figura A2.14 del Anexo 2).

Tabla 4.1. Resultados de tamaños y densidades de ampolla presentados en los especímenes bajo la acción corrosiva de la sustancia química Urea.

SUSTANCIA QUIMICA N°1: UREA																	
Horas	especímen	Blister N°2				Blister N°4				Blister N°6				Blister N°8			
		F	M	MeD	D	F	M	MeD	D	F	M	MeD	D	F	M	MeD	D
70	S1PHMD																
	S1PHDI																
	S1PHAD																
	S1PSMD																
	S1PSDI																
	S1PSAD																
230	S1PHMD																
	S1PHDI																
	S1PHAD																
	S1PSMD																
	S1PSDI																
	S1PSAD																
400	S1PHMD																
	S1PHDI		✓														
	S1PHAD																
	S1PSMD																
	S1PSDI																
	S1PSAD																
730	S1PHMD	✓				✓	✓				✓						
	S1PHDI		✓	✓													
	S1PHAD																
	S1PSMD					✓								✓			
	S1PSDI					✓											
	S1PSAD																
900	S1PHMD		✓			✓	✓				✓						
	S1PHDI			✓	✓					✓							
	S1PHAD																
	S1PSMD					✓	✓				✓						
	S1PSDI	✓															
	S1PSAD																
1000	S1PHMD	✓	✓					✓									
	S1PHDI		✓	✓						✓							
	S1PHAD																
	S1PSMD					✓	✓				✓	✓					
	S1PSDI					✓											
	S1PSAD																

Tabla 4.2. Resultados de tamaños y densidades de ampolla presentados en los especímenes bajo la acción corrosiva de la sustancia química Nitrato de Amonio.

SUSTANCIA QUIMICA N°2: NITRATO DE AMONIO																	
Horas	especimen	Blister N°2				Blister N°4				Blister N°6				Blister N°8			
		F	M	MeD	D	F	M	MeD	D	F	M	MeD	D	F	M	MeD	D
70	S2PHMD																
	S2PHDI																
	S2PHAD																
	S2PSMD																
	S2PSDI																
	S2PSAD																
230	S2PHMD																
	S2PHDI																
	S2PHAD																
	S2PSMD																
	S2PSDI																
	S2PSAD																
400	S2PHMD										✓						
	S2PHDI	✓				✓	✓										
	S2PHAD	✓															
	S2PSMD																
	S2PSDI																
	S2PSAD																
730	S2PHMD						✓							✓			
	S2PHDI	✓	✓			✓					✓						
	S2PHAD	✓				✓					✓						
	S2PSMD										✓			✓			
	S2PSDI																
	S2PSAD																
900	S2PHMD										✓				✓		
	S2PHDI	✓	✓				✓				✓			✓			
	S2PHAD	✓	✓				✓										
	S2PSMD													✓			
	S2PSDI										✓						
	S2PSAD										✓						
1000	S2PHMD										✓				✓		
	S2PHDI	✓				✓	✓				✓	✓					
	S2PHAD	✓				✓	✓										
	S2PSMD													✓	✓		
	S2PSDI										✓						
	S2PSAD										✓						

4.3 DURABILIDAD DE LOS SISTEMAS CON BASE EN EL GRADO DE CORROSIÓN Y LA PRESENCIA DE AMPOLLA

En la tabla 4.3 se muestra un resumen de los grados de corrosión máximos alcanzados por los especímenes recubiertos con los tres sistemas y los dos tipos de preparación de superficie, así como también se muestran los especímenes que presentan ampollas marcados con un cheque; a un tiempo de exposición de 1000 horas. Nótese en Nitrato de Amonio es la única sustancia que tiene grados de corrosión variados y elevados, así como también presencia de ampollas para las dos preparaciones PH y PS. La Urea presenta grados de corrosión bajos entre 10-G y 9-G, pero se les localizó ampollas sobre todo en los sistemas MD y DI para ambas preparaciones de superficie PH y PS, mientras que para AD solo se observan ampollas. Mientras que las tres sustancias restantes Sulfato de Amonio, DAP y MOP a 1000 h de análisis presentan grados de corrosión de 10-G y ausencia de ampollas.

Tabla 4.3. Valores máximos alcanzados de grado de corrosión e indicación de la presencia de ampolla para las 5 sustancias con las dos técnicas de preparación de superficie PH y PS en los tres sistemas de recubrimientos AD, DI y MD a un tiempo total de 1000 horas.

			SUSTANCIA QUÍMICA									
			S1		S2		S3		S4		S5	
			PREPARACIÓN DE SUPERFICIE									
			PH	PS	PH	PS	PH	PS	PH	PS	PH	PS
SISTEMA DE RECUBRIMIENTO	AD	Corrosión	10-G/ 9-G	10-G/ 9-G	9-G/ 8-G	9-G	10-G	10-G	10-G	10-G	10-G	10-G
		Ampollas			✓	✓						
	DI	Corrosión	10-G/ 9-G	10-G/ 9-G	6-G/ 5-G	7-G/ 6-G	10-G	10-G	10-G	10-G	10-G	10-G
		Ampollas	✓	✓	✓	✓						
	MD	Corrosión	9-G	9-G	4-G	5-G	10-G	10-G	10-G	10-G	10-G/ 9-G	10-G
		Ampollas	✓	✓	✓	✓					✓	

En la figura 4.20 y 4.21 se muestra una escala de mayor a menor durabilidad para las dos sustancias más agresivas Urea y Nitrato de Amonio respectivamente, definiéndose el de mayor durabilidad como aquel con ausencia de ampollas y menor grado de corrosión. En la Figura 4.20 se muestra la escala de mayor a menor durabilidad de los sistemas inmersos en Urea, nótese que el de mayor durabilidad son los AD seguido de DI y por último MD, para los tres sistemas la preparación de superficie proporciona los mismos resultados.

En la Figura 4.21 se muestra la escala de mayor a menor durabilidad de los sistemas inmersos en Nitrato de Amonio, nótese que el de mayor durabilidad fue el AD proporcionando mejores resultados los PS le sigue el DI y por último el MD, para ambos la preparación PS presentan mayor durabilidad.

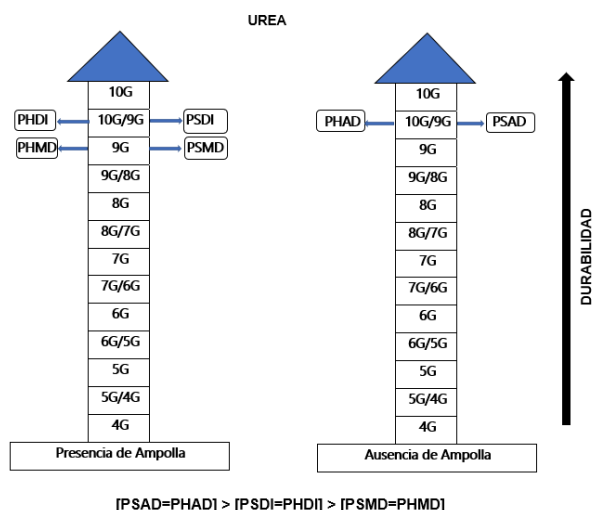


Figura 4.20. Escala de durabilidad de los sistemas de recubrimientos AD, DI y MD con PH y PS para la sustancia Urea a un tiempo de exposición de 1000 horas.

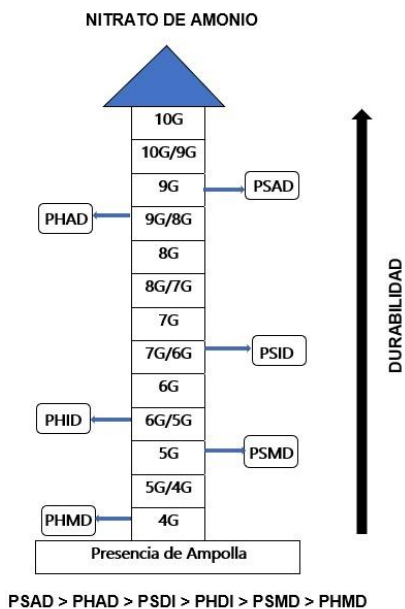


Figura 4.21. Escala de durabilidad de los sistemas de recubrimientos AD, DI y MD con PH y PS para la sustancia Nitrato de Amonio a un tiempo de exposición de 1000 horas.

Cabe destacar que esta escala de durabilidad es un análisis cualitativo según los datos máximos de grado de corrosión obtenidos y la indicación de la presencia de ampolla sin considerar sus tamaños y densidades en específico a un tiempo de exposición de 1000 horas, para tiempos de exposición mayores esta escala puede variar, ya que los factores que dañan el recubrimiento son muchísimos tales como humedad, temperatura, acción de iones específicos, etc. y queda fuera del alcance de este proyecto predecir con exactitud la causa de deterioro de los sistemas empleados, sin embargo, funciona como una primera aproximación de lo que se puede esperar en estudios con tiempos de análisis mayores y un adecuado control de parámetros ambientales.

4.4 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN CON BASE EN LA PRESENCIA DE CORROSIÓN Y AMPOLLAMIENTO

Para establecer una escala general de resistencia a la corrosión para todas las sustancias, preparación de superficie y sistema de recubrimiento se pueden combinar las variables de grado de corrosión y ampollamiento tratadas de forma cualitativa únicamente indicando la presencia de corrosión y ampollamiento en los 60 especímenes analizados en las 1000 horas de estudio. La NO presencia de corrosión corresponderá a aquellos especímenes con grado 10-G (<0.01%) y la NO presencia de ampolla corresponderá a aquellos especímenes Blister N°10: Ausencia total de ampolla.

La Tabla 4.4 muestra el conteo total de los especímenes que presentaron corrosión y/o ampollamiento a las 1000 h de exposición. El cheque indica que Sí y la “x” que NO existe corrosión y/o ampollamiento. A cada sistema se les asigna un puntaje correspondiente a los casos afirmativos. En esta tabla solo se muestran las sustancias Urea, Nitrato de Amonio y MOP, ya que tanto el Sulfato de Sodio como el DAP no presentaron grados de ampollamiento ni corrosión en el tiempo total del experimento.

Tabla 4.4. Puntajes para cada espécimen con base en la presencia de ampolla y corrosión a un tiempo total de 1000 horas.

S1: UREA			S2: NITRATO DE AMONIO			S5: MOP		
ESPECIMEN	%RUST	Ampolla	ESPECIMEN	%RUST	Ampolla	ESPECIMEN	%RUST	Ampolla
S1PHMD_01	✓	✓	S2PHMD_01	✓	✓	S5PHMD_01	x	x
S1PHMD_02	✓	✓	S2PHMD_02	✓	✓	S5PHMD_02	x	x
PUNTAJE	4			4			0	
S1PHID_01	x	✓	S2PHID_01	✓	✓	S5PHID_01	x	x
S1PHID_02	x	✓	S2PHID_02	✓	✓	S5PHID_02	x	x
PUNTAJE	2			4			0	
S1PHAD_01	x	x	S2PHAD_01	✓	✓	S5PHAD_01	x	x
S1PHAD_02	x	x	S2PHAD_02	✓	✓	S5PHAD_02	x	x
PUNTAJE	0			4			0	
S1PSMD_01	✓	✓	S2PSMD_01	✓	✓	S5PSMD_01	x	✓
S1PSMD_02	x	✓	S2PSMD_02	✓	✓	S5PSMD_02	x	x
PUNTAJE	3			4			1	
S1PSDI_01	x	✓	S2PSDI_01	✓	✓	S5PSDI_01	x	x
S1PSDI_02	x	✓	S2PSDI_02	✓	x	S5PSDI_02	x	x
PUNTAJE	2			3			0	
S1PSAD_01	x	x	S2PSAD_01	x	✓	S5PSAD_01	x	x
S1PSAD_02	x	x	S2PHAD_02	✓	✓	S5PHAD_02	x	x
PUNTAJE	0			3			0	

La Tabla 4.5 muestra el puntaje total para las sustancias, preparación y sistemas de recubrimiento de la cual se puede establecer que aquella con mayor puntaje corresponde a la de menor resistencia a la corrosión y aquella con menor puntaje corresponderá a una mayor resistencia a la corrosión.

Tabla 4.5. Puntajes totales para sustancia química, preparación de superficie y sistema de recubrimiento con base en la presencia de ampolla y corrosión.

SUSTANCIA	PREPARACIÓN HERRAMIENTA			PREPARACIÓN SANDBLASTING			PUNTAJE
	AD	DI	MD	AD	DI	MD	
NITRATO DE AMONIO	4	4	4	3	3	4	22
UREA	0	2	4	0	2	3	11
MOP	0	0	0	0	0	1	1
SULFATO DE AMONIO	0	0	0	0	0	0	0
DAP	0	0	0	0	0	0	0
PUNTAJE	18			16			

Dado lo anterior se tiene que:

- a. **Para sustancia química:** En general para todos los sistemas y preparación de superficie la clasificación de la sustancia de la más a la menos corrosiva es 1. Nitrato de Amonio (Puntaje 22), 2. Urea (Puntaje 12), 3. MOP (puntaje 1) y por último Sulfato de Amonio y DAP (puntaje 0 para ambas)
- b. **Para preparación de superficie:** En general para las 5 sustancias y los 3 sistemas la preparación PS (puntaje 16) presenta una mejor resistencia a la corrosión que la preparación PH (puntaje 18)
- c. **Para sistemas de recubrimiento:** En general para las 5 sustancias el más resistente a la corrosión es el AD preferiblemente si se emplea PS (puntaje 3), el segundo lugar en resistencia se tiene al DI preferiblemente con PS (puntaje 5) y por último se tiene al MD el cual presentó los mismos resultados tanto con PH como con PS (puntaje 8 para ambas).

Cabe destacar que este análisis es solo una aproximación analizándose los especímenes como un todo. Si se quiere hacer una escala de resistencia a la corrosión para cada sustancia en específico considerando cada preparación y cada sistema de recubrimiento el análisis se complica puesto que se debe considerar el grado en específico de corrosión e incluso el tamaño de ampolla presentado por cada espécimen, por lo que en este trabajo solo se ha presentado un análisis similar en la sección 6.3 correspondiente a la escala de durabilidad.

CONCLUSIONES

- I. Para un tiempo de análisis equivalente a 1000 horas, se puede establecer una escala de corrosividad de mayor a menor para los fertilizantes en estudio de la siguiente manera: nitrato de amonio > urea > MOP > sulfato de amonio y DAP. Dicha escala es aplicable para las diferentes combinaciones de sistemas de recubrimientos/preparaciones de superficie.
- II. Tomando como base las variables de grado de corrosión presentado y formación de ampollas en los recubrimientos, al realizar un conteo conjunto de la cantidad de especímenes afectados por ambos procesos indistintamente, en función de sistemas de recubrimientos, se tiene que para sistemas AD y DI, son más resistentes si la técnica de preparación de superficie empleada es PS, mientras que para sistemas MD, la técnica de preparación de superficie no fue influyente, por lo que ambas desarrollan fenómenos corrosivos de la misma manera.
- III. Considerando los fenómenos de corrosión que se desarrollaron en los especímenes para los diferentes sistemas, se concluye que luego de 1000 horas los avances presentados no alcanzaron los niveles de generación de daños severos e irreparables en el recubrimiento y/o material, por tanto, no existe tiempo de fallo como tal en ningún sistema, pero sí tiempos de inicio de procesos corrosivos que si se valoran desde la aparición del fenómeno que puede ser comparado bajo norma SSPC-VIS2, se da alrededor de las 400 horas en inmersión para la mayoría de sistemas y preparaciones de superficie que los presentan.

RECOMENDACIONES

- I. En ambientes con temperaturas elevadas como los ambientes químicos industriales la velocidad de corrosión aumenta considerablemente sobre todo si se trabaja con sustancias químicas altamente agresivas e higroscópicas como urea, nitrato de amonio y sulfato de amonio por lo que, para estudios a futuro similares a este, se recomienda considerar los parámetros de T y %HR como condiciones determinantes para la formación y desarrollo de la corrosión.
- II. Previo al proceso de pintado de estructuras metálicas industriales de toda índole que estarán en contacto directo con sustancias químicas de naturaleza corrosiva o cuyas propiedades tienden a aumentar su acción agresiva frente a metales, se recomienda la correcta realización de preparación de superficie utilizando alguna de las técnicas conocidas, así como también la remoción de cualquier sustancia considerada como contaminante que pueda dañar el recubrimiento empleado, asegurando así una mayor durabilidad del mismo.
- III. En el proceso de pintado de las estructuras metálicas expuestas a químicos altamente agresivos, se debe seguir las especificaciones indicadas en las hojas de seguridad de los recubrimientos, ya que cualquier error ya sea en la mezcla de los componentes del recubrimiento o en su aplicación puede provocar que el producto no responda a lo esperado. Por lo que se recomienda llevar un control de tiempos de inducción y vida útil de la mezcla en los productos catalizados, así como también la calibración del equipo de medición de espesores de película.

BIBLIOGRAFÍA

Díaz Márquez, J. B., Mejía Arévalo, E. H., y Ortez Reyes, J. A. (2007). *Diseño de elementos estructurales típicos para un edificio de estructuras de acero utilizando las especificaciones AISC 2005*. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de El Salvador, El Salvador.

Fertilizar. (2011). *Materiales para silos y galopes para fertilizantes*. Revista Fertilizar, 20, 31-32. Obtenido de <https://www.agronet-esp.com/control-de-la-corrosion-en-la-industria-de-fertilizantes/>

Franco Tronco, M. I. (s.f.). *Estudio electroquímico de las interacciones formadas por el extracto activo de las hojas de Morinda citrifolia en la inhibición de la corrosión de acero estructural*. Tesis para optar al título de maestra en Ciencia de Materiales. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

Guilcaso Molina, C. O. (2020). *Análisis de recubrimientos anticorrosivos aplicado al acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) ASTM A 1011 GR 50 y su incidencia en la tasa de corrosión para aplicaciones en la industria metalmecánica*. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Mecánica Mención Diseño. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

IFA. (2002). *Los fertilizantes y su uso. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes FAO*. (4 ed.). Obtenido de <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>

León Silva, U. (2010). *Protección contra la corrosión del acero inoxidable 304 a base de recubrimientos de poli (3-octiltiofeno)*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias de Materiales. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., Chihuahua, México.

Morales Córdova, A. (2021). *Comportamiento corrosivo de diferentes aleaciones en medios ácidos*. Tesina de grado para obtener el título de Ingeniero Químico. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Pacheco Chicaiza, D. C. (2017). *Estudio de la velocidad de corrosión de tres aceros comerciales usados en la construcción, en un dispositivo experimental*. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.

Roberge, P. R. (2008). *Corrosion Engineering: Principles and Practice* (1ª ed.). New York, Estados Unidos de Norteamérica: McGraw-Hill.

Rosas Lugo, J. R. (2012). *Estudio de la velocidad de corrosión en acero estructural ASTM A-36 con recubrimiento orgánico, empleando espectroscopia de impedancia electroquímica*. Trabajo de grado para optar al título de Licenciado en Física. Universidad de Oriente Núcleo de Sucre, Cumaná, Venezuela.

SC. (2009). *Caracterización del sector de fertilizantes y sus condiciones de competencia en El Salvador*. San Salvador, Superintendencia de Competencia. Obtenido de <https://tinyurl.com/27q25lsd>

Schorr, M., Valdez, B., Eliezer, A., y Salinas, R. (s.f.). *Control de la corrosión en la industria de fertilizantes*. Obtenido de <https://www.agronet-esp.com/control-de-la-corrosion-en-la-industria-de-fertilizantes/>

Schweitzer, P. A. (2010). *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods* (1ª ed.). Taylor y Francis.

Shaw, B. A., y Kelly, R. G. (2006). *What is Corrosion?* The Electrochemical Society Interface. Spring. Obtenido de <https://tinyurl.com/2b7lztgx>

Sociedad Americana de Pruebas y Materiales. (2002). *Método Estándar para la Evaluación de la Formación de Ampollas en Pinturas*. (ASTM – D714).

Sociedad de Recubrimientos Protectores. (2004). *Guía de Fotografías de Referencia para Superficies de Acero Preparadas por Soplado Abrasivo Seco* (SSPC – VIS 1).

Sociedad de Recubrimientos Protectores. (2000). *Método Estándar para la Evaluación del Grado de Corrosión en Superficies de Acero Pintadas*. (SSPC – VIS 2).

Sociedad de Recubrimientos Protectores. (2004). *Guía de Fotografías de Referencia para Superficies de Acero Preparadas por Herramientas Manuales y Mecánicas*. (SSPC – VIS 3).

Vallejo Figueroa, J. C. (2006). Conocimiento y prevención de la corrosión. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.

WEG (2020). WEG. Obtenido de Soluciones para la industria de fertilizantes: <https://tinyurl.com/28t5v6bc>

ANEXOS

ANEXO 1. EJEMPLO DEL FORMATO UTILIZADO PARA REGISTRO DE DATOS DURANTE LAS OBSERVACIONES

En la figura A1.1 se muestra un fragmento de los formatos utilizados para registrar los datos de cada uno de los análisis, estos formularios se dividen por tipo de preparación de superficie, en los cuales se cuenta con un espacio para los 60 especímenes, donde para cada uno se tiene la sección para el registro del grado de corrosión bajo la norma ASTM-D610/SSPC-VIS2, grado de ampollamiento bajo la norma ASTM-D714 y observaciones generales a tomar en cuenta.

Preparación de superficie: Herramientas	Fecha: _____
Hora de extracción: _____	Hora de inmersión: _____
Temperatura Interna: _____	Externa: _____
Humedad relativa Interna: _____	Externa: _____

Especimen: **S1PHMD_01**
Grado de corrosión observado según ASTM-D610/SSPC-VIS 2: _____

Grado de ampollamiento observado según ASTM-D714: _____

Observación: _____

Especimen: **S1PHMD_02**
Grado de corrosión observado según ASTM-D610/SSPC-VIS 2: _____

Grado de ampollamiento observado según ASTM-D714: _____

Observación: _____

Figura A1. 1. Fragmento del formulario utilizado para registro de observaciones in situ.

ANEXO 2. RESULTADOS MÁS RELEVANTES OBTENIDOS POR SUSTANCIA

En esta sección se muestran una serie de resultados y fotografías de las condiciones iniciales, los resultados de grado de corrosión y ampollamiento y los resultados finales más representativos a las 1000 horas de exposición para cada sustancia. Aquellos especímenes que no presentaron grados de corrosión, pero si se les detectó un fenómeno de iniciación de corrosión el cual se puede describir como una coloración café/rojiza característica sobre la línea de corte realizada, pero que no está lo suficientemente desarrollada como para poder comparar contra la norma SSPC - VIS2/ASTM - D610, este fenómeno se identificará como un grado de corrosión 10-G, donde se tiene un porcentaje corroído menor al 0.01% en esa área. Por esta razón, se denominará a lo largo de esta sección como “iniciación de corrosión en forma de sombra”, la figura A2.1 muestra una comparativa entre un acercamiento a la línea de corte recién hecha sobre el espécimen (a) y un acercamiento a una línea de corte que presenta iniciación de corrosión en forma de sombra (b). Así mismo, aquellos especímenes donde no se observó ningún cambio, por convención, se trataron como grado de corrosión 10-G.

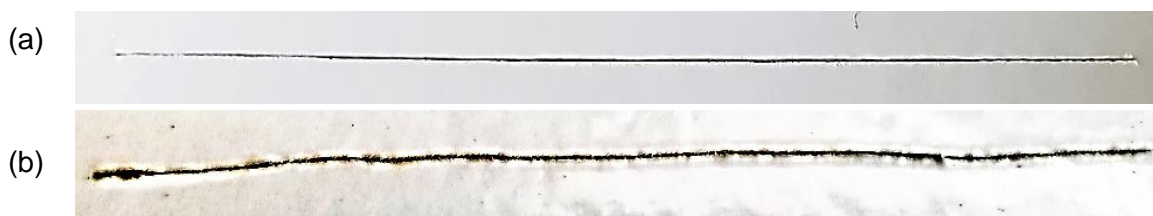


Figura A2. 1. Comparativa entre línea de corte sin signos de corrosión y con iniciación en forma de sombra.

A. Sustancia: Urea

i. Condiciones iniciales: Urea

La figura A2.2 presenta las condiciones iniciales para los especímenes por duplicado para preparación de superficie con herramientas (a) y para preparación de superficie por sandblasting (b).



Figura A2. 2. Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en Urea.

ii. Grado de corrosión y ampollamiento: Urea

Los especímenes inmersos en esta sustancia presentaron grados de corrosión que oscilaron entre 10-G (<0.01%) y 9-G (0.03%) durante las 1000 horas en inmersión, los resultados cualitativos para cada sistema se ilustran en la tabla A2.1; en la figura A2.3 se aprecia un registro fotográfico de algunos de estos resultados: grado de corrosión 9-G para sistema S1PSMD (a), grado de corrosión 9-G para sistema S1PHMD (b), grado de corrosión 10-G/9-G para sistema S1PHDI (c) y (d). En cuanto a la formación de ampollas en los recubrimientos, debido a que los resultados ya fueron expuestos y explicados en la sección 4.2, en esta sección se limita a la presentación de algunos registros fotográficos representativos, los cuales igualmente se observan en la figura A2.3, teniéndose como: tamaño N° 4 y poca densidad para sistema S1PSMD (a), tamaño N° 2 y densidad media para sistema S1PHMD (b), tamaño N° 2 y densidad intermedia para sistema S1PHDI (c), y tamaño N° 4 y denso para sistema S1PHDI (d).

Tabla A2. 1. Resultados a nivel cualitativo para el grado de corrosión presentado por los especímenes expuestos a Urea.

Corrosión	S1PHMD						S1PSMD					
	70	230	400	730	900	1000	70	230	400	730	900	1000
10G	✓	✓					✓	✓				
10G/9G			✓	✓					✓			
9G					✓	✓				✓	✓	✓
Corrosión	S1PHDI						S1PSDI					
	70	230	400	730	900	1000	70	230	400	730	900	1000
10G	✓	✓					✓	✓				
10G/9G			✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓
9G												
Corrosión	S1PHAD						S2PSAD					
	70	230	400	730	900	1000	70	230	400	730	900	1000
10G	✓	✓					✓	✓				
10G/9G			✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓
9G												

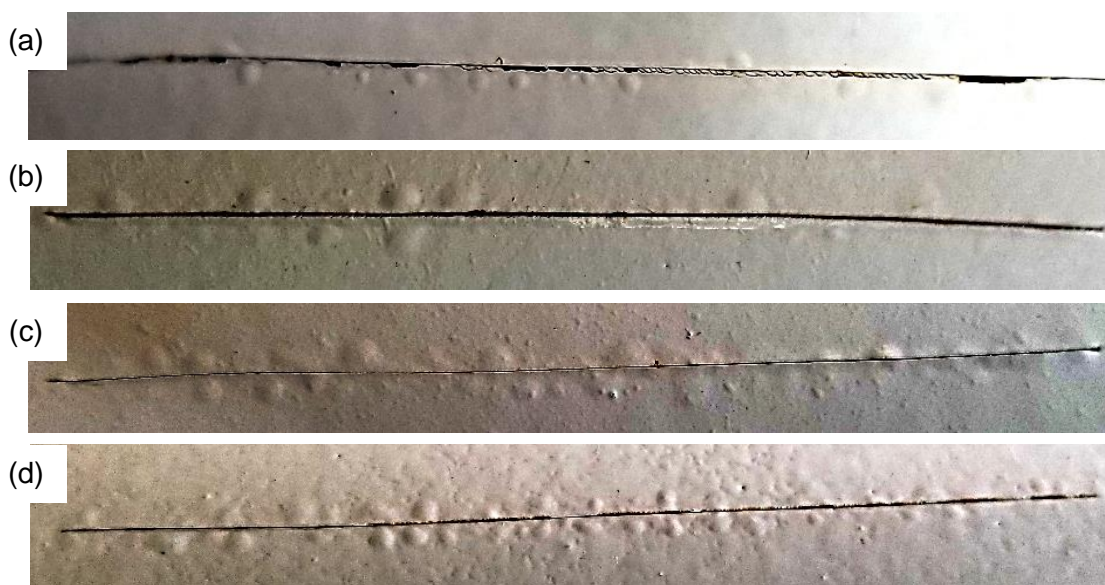
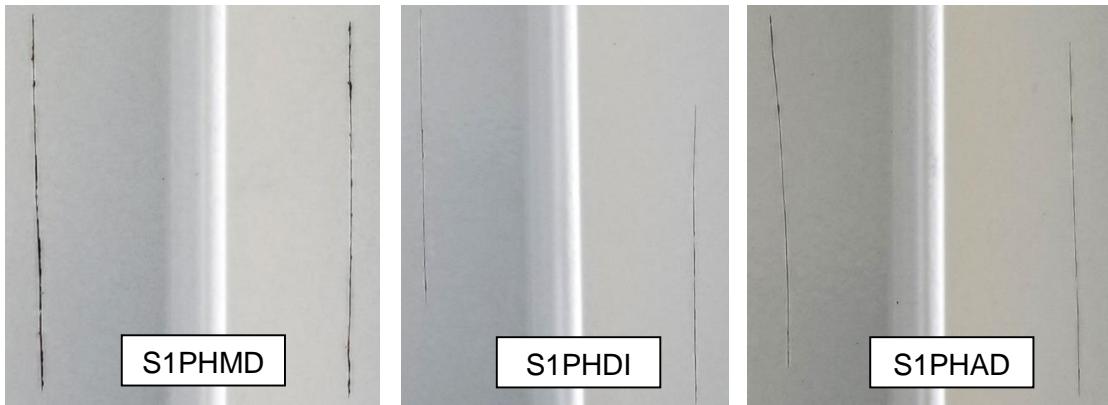


Figura A2. 3. Registros fotográficos de formación de ampollas y grado de corrosión desarrollado en los diferentes sistemas de recubrimientos.

iii. Condiciones Finales: Urea

Para a figura A2.4 ilustra un acercamiento a las líneas de corte para los especímenes para preparación de superficie con herramientas (a) y preparación de superficie por sandblasting (b) a las 1000 horas de exposición

(a)



(b)

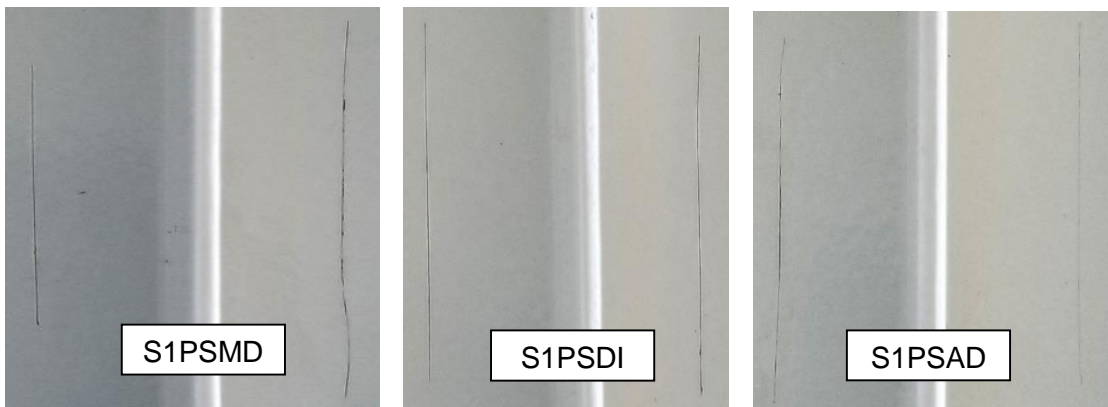


Figura A2. 4. Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en Urea.

B. Sustancia: Nitrato de amonio

i. Condiciones iniciales: Nitrato de amonio

La figura A2.5 presenta las condiciones iniciales para los especímenes por duplicado para preparación de superficie con herramientas (a) y para preparación de superficie por sandblasting (b).



Figura A2. 5. Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en Nitrato de amonio.

ii. Grado de corrosión y ampollamiento: Nitrato de Amonio

Los especímenes inmersos en esta sustancia presentaron grados de corrosión que oscilaron entre 10-G (<0.01%) y 4-G (10%) durante las 1000 horas en inmersión, los resultados cualitativos para cada sistema se ilustran en la tabla A2.2; en la Figura A2.6 se aprecia un registro fotográfico de algunos de estos resultados: grado de corrosión 4-G para sistema S2PHMD (a), grado de corrosión 7-G para sistema S2PHDI (b), grado de corrosión 9-G/8-G para sistema S2PHAD (c), grado de corrosión 5-G para sistema S2PSMD (d), grado de corrosión 7-G/6-G para sistema S2PSDI (e), y grado de corrosión 9-G para sistema S2PSAD (f).

Tabla A2. 2. Resultados a nivel cualitativo para el grado de corrosión presentado por los especímenes expuestos a Nitrato de amonio.

Corrosión	S2PHMD						S2PSMD					
	70	230	400	730	900	1000	70	230	400	730	900	1000
10G	✓	✓					✓	✓				
10G/9G												
9G			✓						✓			
9G/8G												
8G										✓		
8G/7G												
7G												
7G/6G				✓								
6G												
6G/5G												
5G					✓						✓	✓
5G/4G												
4G						✓						
Corrosión	S2PHDI						S2PSDI					
	70	230	400	730	900	1000	70	230	400	730	900	1000
10G	✓	✓					✓	✓				
10G/9G									✓			
9G										✓		
9G/8G												
8G			✓								✓	
8G/7G												
7G				✓	✓							
7G/6G												✓
6G												
6G/5G						✓						
5G												
Corrosión	S2PHAD						S2PSAD					
	70	230	400	730	900	1000	70	230	400	730	900	1000
10G	✓	✓					✓	✓	✓			
10G/9G			✓							✓		
9G				✓							✓	✓
9G/8G					✓	✓						

En cuanto a la formación de ampollas en los recubrimientos, debido a que los resultados ya fueron expuestos y explicados en la sección 4.2, en esta sección se limita a la presentación de algunos registros fotográficos representativos, los cuales se ilustran en la figura A2.6, como: tamaño N° 6 y densidad media para sistema S2PHMD (a), tamaño N° 2 y poca densidad para sistema S2PHDI (b) y tamaño N° 4 y densidad media para sistema S2PHAD (c).



Figura A2. 6. Registros fotográficos de formación de ampollas y grados de corrosión desarrollados en los diferentes sistemas de recubrimientos.

iii. Condiciones finales: Nitrato de Amonio

La figura A2.7 ilustra un acercamiento a las líneas de corte para los especímenes para preparación de superficie con herramientas (a) y preparación de superficie por sandblasting (b) a las 1000 horas de exposición.

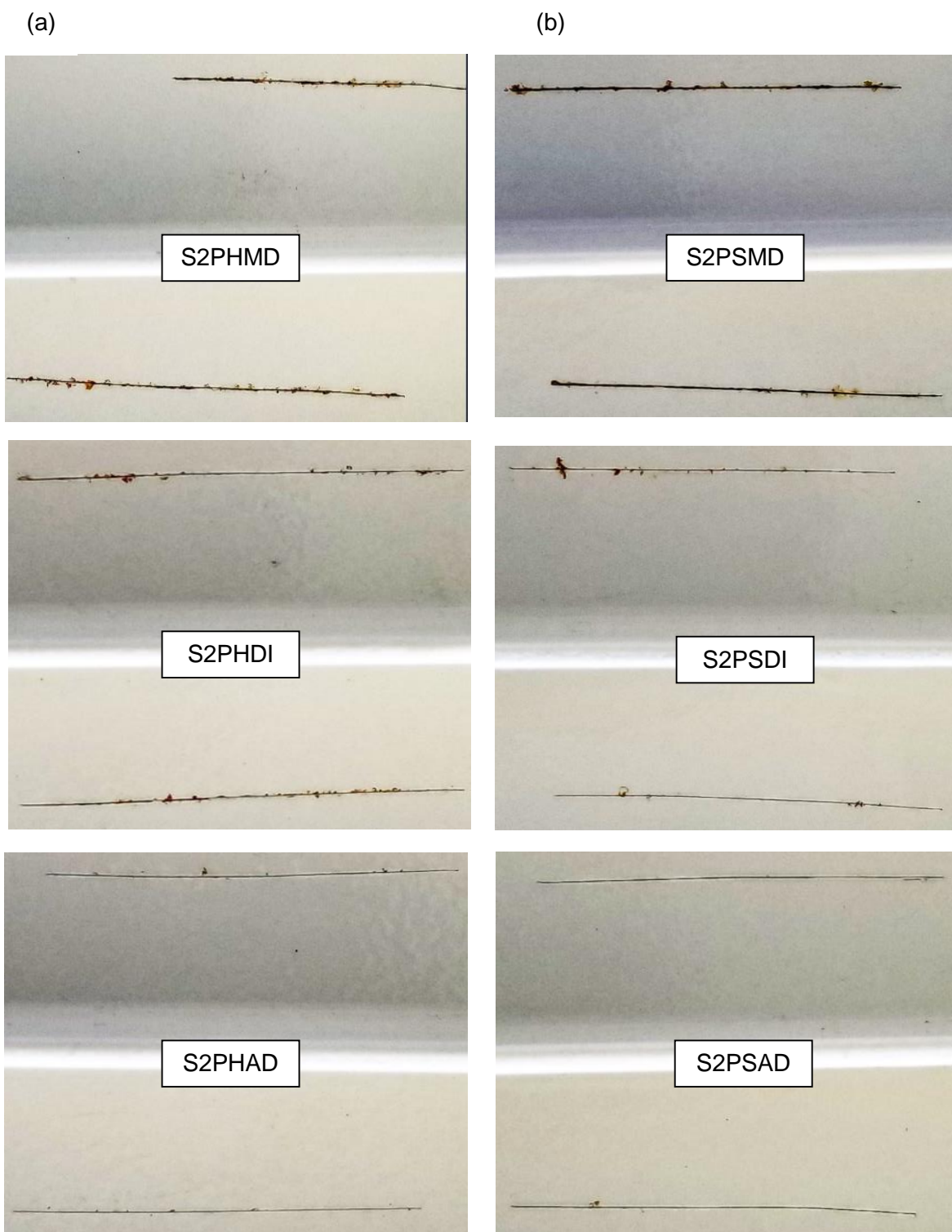


Figura A2. 7. Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en Nitrato de amonio.

C. Sustancia: Sulfato de amonio

i. Condiciones iniciales: Sulfato de amonio

La figura A2.8 presenta las condiciones iniciales para los especímenes por duplicado para preparación de superficie con herramientas (a) y para preparación de superficie por sandblasting (b).



Figura A2. 8. Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en Sulfato de amonio.

ii. Grado de corrosión y ampollamiento: Sulfato de amonio

Los especímenes inmersos en Sulfato de amonio, en su mayoría presentaron iniciación de corrosión en forma de sombra para ambas técnicas de preparación de superficie, dicha corrosión no presentó avances desde que fue apreciable, la tabla A2.3 muestra los sistemas afectados y las horas de inicio. Tampoco presentó ampollamiento.

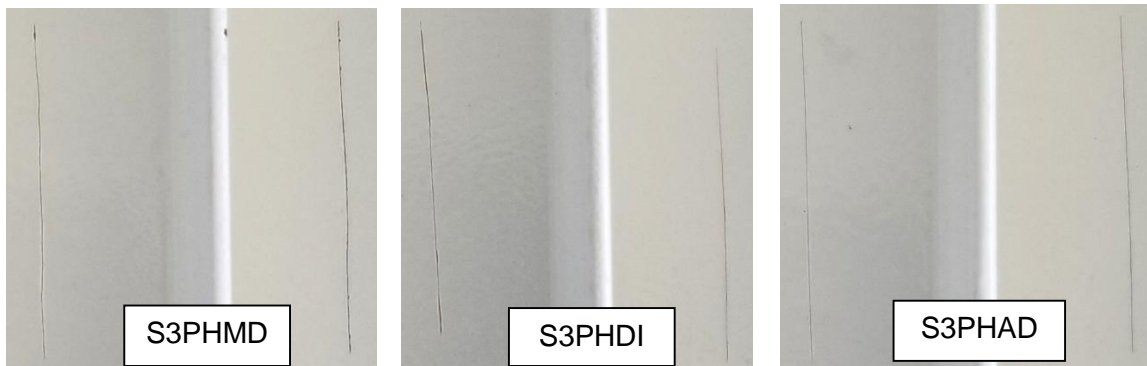
Tabla A2. 3. Matriz de especímenes expuestos a Sulfato de amonio que presentaron iniciación de corrosión en forma de sombra.

Especímen	Horas en inmersión					
	70	230	400	730	900	1000
S3PHMD	✓					
S3PHDI					✓	
S3PHAD						
S3PSMD	✓					
S3PSDI					✓	
S3PSAD						

iii. **Condiciones finales: Sulfato de Amonio**

La figura A2.9 ilustra un acercamiento a las líneas de corte para los especímenes para preparación de superficie con herramientas (a) y preparación de superficie por sandblasting (b) a las 1000 horas de exposición.

(a)



(b)

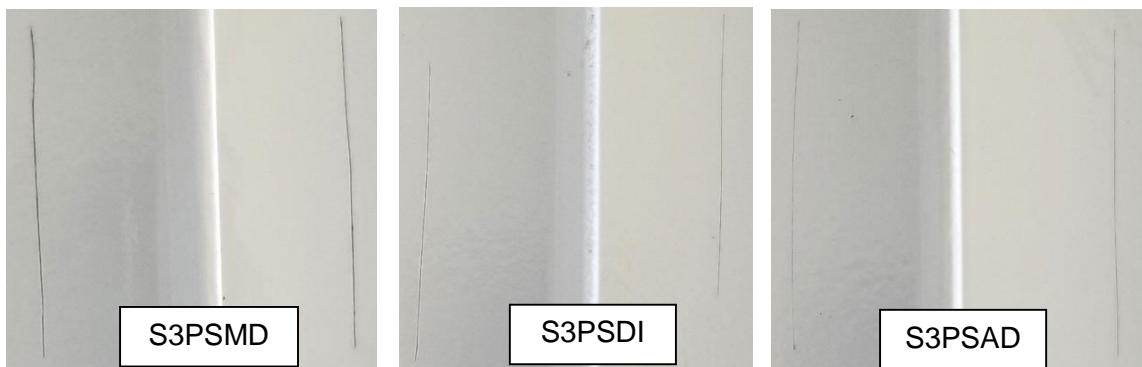


Figura A2. 9. Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en Sulfato de amonio.

D. Sustancia: Fosfato diamónico (DAP)

i. Condiciones iniciales: DAP

En la figura A2.10 se muestran las condiciones iniciales para los especímenes por duplicado para preparación de superficie con herramientas (a) y para preparación de superficie por sandblasting (b).

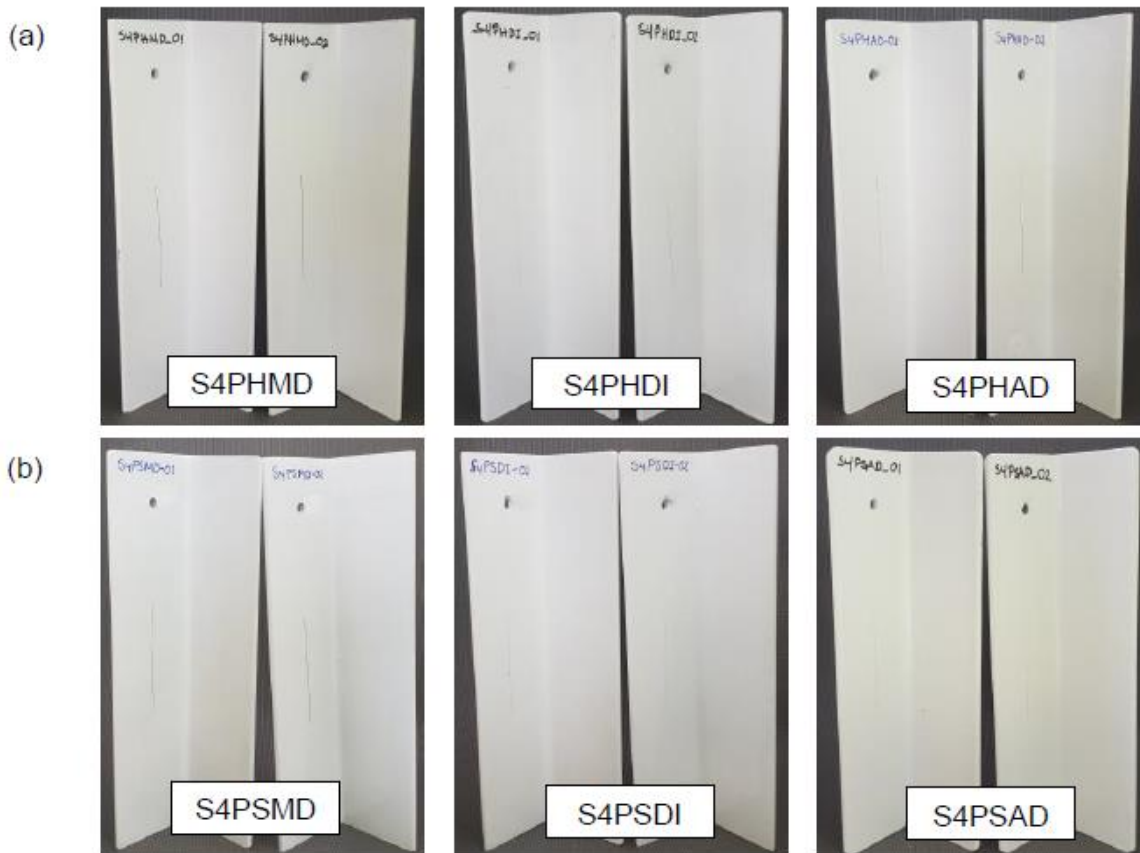


Figura A2. 10. Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en DAP.

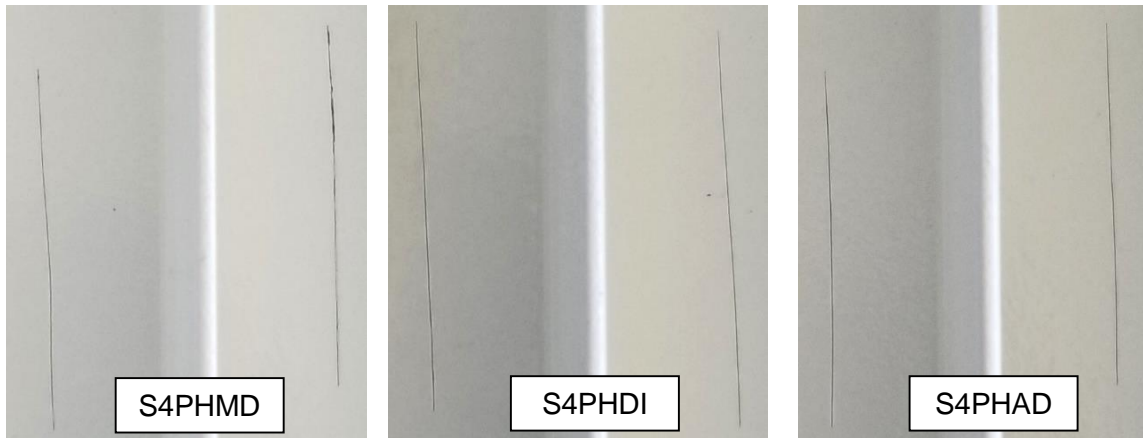
ii. Grado de Corrosión y ampollamiento: DAP

Los especímenes inmersos en DAP para ambas técnicas de preparación de superficie y los diferentes sistemas de recubrimientos, no sufrieron cambios en cuanto a grado de corrosión o formación de ampollas a lo largo de las 1000 horas de exposición.

iii. Condiciones finales: DAP

La figura A2.11 ilustra un acercamiento a las líneas de corte para los especímenes para preparación de superficie con herramientas (a) y preparación de superficie por sandblasting (b) a las 1000 horas de exposición.

(a)



(b)



Figura A2. 11. Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en DAP.

E. Sustancia: Muriato de potasio (MOP)

i. Condiciones iniciales: MOP

La figura A2. 12 presenta las condiciones iniciales para los especímenes por duplicado para preparación de superficie con herramientas (a) y para preparación de superficie por sandblasting (b).



Figura A2. 12. Especímenes en sus condiciones iniciales antes de colocarse por inmersión en MOP.

ii. Grado de Corrosión y ampollamiento: MOP

Los especímenes inmersos en MOP de manera general, presentaron iniciación de corrosión en forma de sombra para ambas técnicas de preparación de superficie, dicha corrosión no presentó avances desde que fue apreciable, la tabla A2.4 muestra los sistemas afectados y las horas de inicio.

Únicamente se tiene reporte del sistema PHMD que presentó un leve aumento en la corrosión que se ubica en un nivel intermedio entre el grado 10-G (<0.01%) y 9-G (0.03%) desde las 400 horas en inmersión, sin avances para las siguientes evaluaciones, la figura A2.13 ilustra este fenómeno. En cuanto a formación de ampollas, únicamente se observaron al cabo de las 1000 horas para el caso del sistema PHMD, como se muestra en la figura A2.14, cuyo grado según ASTM D714 corresponde a un tamaño N°4 con poca densidad.

Tabla A2. 4. Matriz de especímenes expuestos a MOP que presentaron iniciación de corrosión en forma de sombra.

Especímen	Horas en inmersión					
	70	230	400	730	900	1000
S5PHDI					✓	
S5PHAD					✓	
S5PSMD		✓				
S5PSDI					✓	
S5PSAD					✓	



Figura A2. 13. Grado de corrosión 10-G/9-G para sistema S5PHMD.

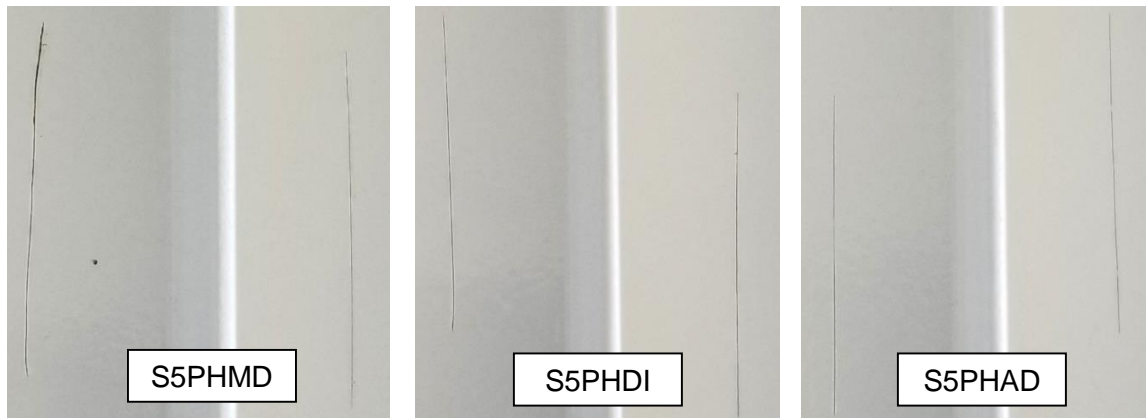


Figura A2. 14. Ampollas observadas para S5PHMD a las 1000 horas de inmersión.

iii. Condiciones finales: MOP

La figura A2.15 ilustra un acercamiento a las líneas de corte para los especímenes para preparación de superficie con herramientas (a) y preparación de superficie por sandblasting (b) a las 1000 horas de exposición.

(a)



(b)

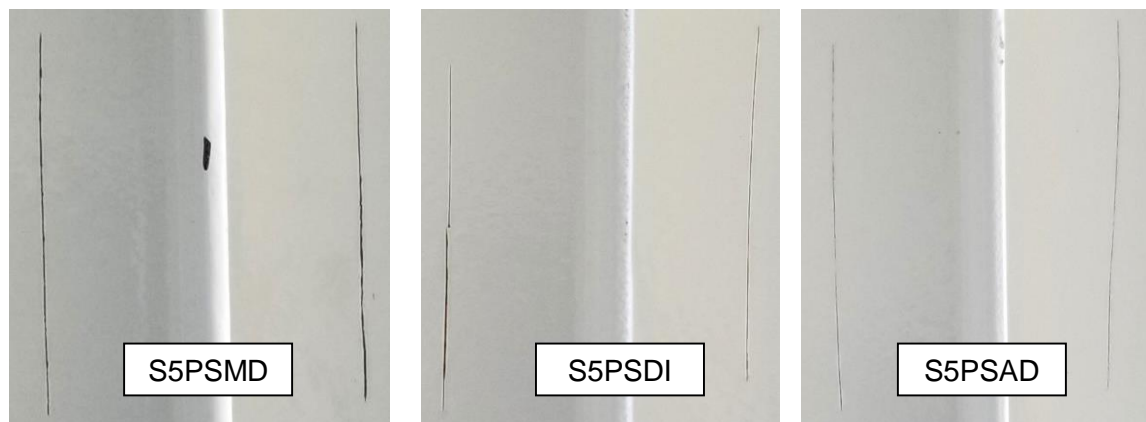


Figura A2. 15. Comparativa de líneas de corte luego de 1000 horas de exposición en MOP.