

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 DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA
UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO EN
EQUIPOS E INSTALACIONES DE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA,
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LAS NORMAS ASTM D610-08,
ISO 12944:2017, ASTM D3359-17 Y SSPC-PA2-2008**

PRESENTADO POR:
KAREN BEATRIZ GALLEGOS VELASCO
EDWIN ARMANDO GUILLÉN CASTANEDA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA INTERINA:

ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

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

Trabajo de Graduación para obtener el Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título:

**EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA
UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO EN
EQUIPOS E INSTALACIONES DE LA INDUSTRIA GEOTÉRMICA,
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LAS NORMAS ASTM D610-08,
ISO 12944:2017, ASTM D3359-17 Y SSPC-PA2-2008**

Presentado por:

**KAREN BEATRIZ GALLEGOS VELASCO
EDWIN ARMANDO GUILLÉN CASTANEDA**

Docente asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

San Salvador, Diciembre 2023

Trabajo de Grado aprobado por:

Docente asesor:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, fuente de fortaleza y guía constante a lo largo de este camino académico. Su amor incondicional ha sido mi luz en los momentos más desafiantes. Su gracia ha sido la base de cada logro y superación.

A mi amada madre Lucy Velasco, quien ha sido mi pilar fundamental. Su apoyo inquebrantable, sabiduría y amor han sido la fuerza motriz detrás de cada logro. Agradezco infinitamente tus sacrificios y tu constante aliento.

A mi padre Marco Gallegos, por su apoyo y ser un ejemplo de tenacidad y dedicación. Tus palabras de aliento resonaron en cada desafío y motivaron mi perseverancia.

A mi querido hermano Roberto Gallegos, compañero de risas y confidente, gracias por tu comprensión y apoyo constante. Juntos hemos enfrentado este viaje con valentía y complicidad.

A mis amigos que conocí a lo largo de la carrera, quienes han sido compañeros leales y fuente de alegría en cada etapa. Sus risas y apoyo mutuo han enriquecido mi experiencia universitaria.

A mis profesores, quienes han compartido su conocimiento y han sido faros de inspiración. Sus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi formación académica y personal.

Este logro no habría sido posible sin el respaldo de cada persona mencionada y de muchas otras que, de diversas formas, han contribuido a mi desarrollo. Gracias a todos por formar parte de este capítulo significativo en mi vida.

Karen Gallegos

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por la sabiduría y fortaleza que me brindó a lo largo de estos años, por permitirme la vida, rodearme de las personas correctas y superar situaciones adversas.

Gracias a mis padres, mi mayor fuente de motivación, por su amor incondicional, sus sacrificios al apoyarme en la culminación de mi carrera universitaria, y por inculcarme valores y principios que tanto aprendizaje me han aportado.

A mis hermanos y abuelos, que siempre me apoyaron y brindaron aliento y comprensión en momentos que lo necesitaba.

A todos los amigos que conocí a lo largo de estos años, quienes forman parte de mi corazón y de mi vida, de quienes aprendí mucho, me brindaron mucha alegría, y quienes siempre tuvieron la disposición en apoyarnos mutuamente.

A todos aquellos docentes que han dejado huella en mi aprendizaje e inspiración, gracias por compartir sus conocimientos y transmitir sus ganas de enseñar.

Gracias a todos, por aportar en mi crecimiento personal y profesional.

Edwin Guillén

RESUMEN

Esta investigación se centra en la evaluación de sistemas de protección anticorrosiva en la industria geotérmica, específicamente en el área del sistema de alivio de presión. El desarrollo experimental se enfoca en las infraestructuras críticas para el proceso, clasificadas según su importancia y exposición al ambiente corrosivo. Se seleccionaron las estructuras de soporte de tuberías para la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.

La elección de los sistemas de recubrimiento se realizó en base a la norma ISO 12944:2017, considerando el ambiente corrosivo C4 de la Central Geotérmica en estudio, donde fue realizada la investigación. Se compararon sistemas de media y alta durabilidad, optando por un recubrimiento de resina alquídica modificado y un recubrimiento de resina epóxica, ambos con un acabado de poliuretano. La aplicación de las normas ASTM D610-08 y SSPC-PA2-2008 se utilizaron para la inspección y el monitoreo de los sistemas anticorrosivos aplicados. En el mismo sentido, se realizó la prueba de adhesión de los recubrimientos al sustrato metálico siguiendo la metodología propuesta por la norma ASTM D3359-17.

La investigación busca determinar una comparación en la eficacia de estos sistemas en condiciones geotérmicas reales. Se priorizó la protección anticorrosiva en estructuras críticas para garantizar la seguridad y continuidad del proceso de generación de energía eléctrica. Este estudio contribuirá a la selección óptima de recubrimientos que funcionen mejor dentro de la industria geotérmica, mejorando la eficacia operativa de los equipos e instalaciones.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: MARCO DE REFERENCIA.....	2
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo General.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Justificación	2
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.4. Generalidades de la corrosión.....	4
1.5. Composición de fluidos geotérmicos.....	5
1.6. Sistemas de recubrimiento anticorrosivos	6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1. Corrosión en la industria geotérmica	9
2.2. Tipos de corrosión en instalaciones de producción geotérmica	10
2.2.1. Ataque Uniforme	11
2.2.2. Corrosión por picadura	12
2.2.3. Agrietamiento por corrosión bajo tensión	13
2.2.4. Agrietamiento inducido por hidrógeno.....	13
2.2.5. Corrosión galvánica.....	14
2.2.6. Corrosión por erosión	14
2.3. Composición de vapor geotérmico	14
2.4. Condiciones de operación y entornos corrosivos a controlar	15
2.5. Antecedentes en el uso de recubrimientos anticorrosivos en la industria geotérmica.....	16

2.6. Definición de sistemas de recubrimiento de alto desempeño	16
2.7. Tipos de sistemas de recubrimiento.....	18
2.7.1. Recubrimientos epóxicos.....	18
2.7.2. Recubrimientos poliuretano.....	19
2.7.3. Recubrimientos alquídicos	20
2.7.4. Recubrimientos de polisiloxano	20
2.7.5. Recubrimientos de polifenil sulfuro (PPS).....	20
2.7.6. Recubrimientos de fluoropolímero.....	21
2.8. Normativas empleadas en la evaluación de desempeño de sistemas de recubrimiento.....	22
2.8.1. Norma ASTM D610-08	22
2.8.2. Norma ISO 12944:2017.....	24
2.8.3. Norma ASTM D3359-17	24
2.8.4. Norma SSPC-PA2-2008	26
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.1. Reconocimiento de áreas y condiciones de exposición de instalaciones y equipos al ambiente corrosivo	27
3.1.1. Criterios de evaluación de corrosión bajo norma ASTM D610-08.....	27
3.2. Selección de sistemas de recubrimiento anticorrosivo mediante norma ISO 12944:2017	34
3.2.1. Definición de categoría de ambiente corrosivo en condiciones de la industria geotérmica.....	34
3.2.2. Determinación de requisitos de durabilidad de sistema anticorrosivo	35
3.3. Preparación de superficie, aplicación de sistemas de recubrimiento y prueba de adherencia	36
3.4. Etapa de observación y exposición en ambiente geotérmico	38
3.5. Desarrollo experimental.....	38

3.5.1.	Selección de infraestructuras para aplicación de sistema de recubrimiento anticorrosivo.....	39
3.5.2.	Selección de sistemas de recubrimiento anticorrosivo	42
3.5.3.	Procedimiento de preparación de superficie y limpieza para aplicación de sistemas de recubrimientos anticorrosivos	43
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		49
CONCLUSIONES		55
RECOMENDACIONES		56
BIBLIOGRAFÍA		57
ANEXOS.....		61
	Anexo 1. Espesores de película seca.....	61
	Anexo 2. Observaciones de visitas de monitoreo e inspección intermedias.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Criterios de evaluación de corrosión.....	23
Tabla 3.1.	Categorías de ambientes corrosivos en base a condiciones atmosféricas para la selección de sistemas de recubrimientos de protección	35
Tabla 3.2.	Rango de clasificación de durabilidad de sistemas de protección de pinturas.....	36
Tabla 3.3.	Reconocimiento de áreas: Clasificación de instalaciones y equipos	39
Tabla 3.4.	Grado de corrosión de las instalaciones y equipos en el reconocimiento de áreas en Central Geotérmica en estudio según norma ASTM D610-08	41
Tabla 3.5.	Sistemas de pinturas propuestos para categoría de ambiente corrosivo C4.....	43
Tabla 3.6.	Sistemas de pinturas seleccionados para aplicación y monitoreo de su desempeño de protección anticorrosiva.....	43
Tabla 3.7.	Procedimiento de limpieza y preparación de superficie de estructuras	44
Tabla 3.8.	Procedimiento de preparación de capa anticorrosiva de resina epóxica para sistema de recubrimiento.....	45
Tabla 3.9.	Procedimiento de preparación de capa anticorrosiva de resina alquídica modificada para sistema de recubrimiento.....	46
Tabla 3.10.	Procedimiento de preparación de capa de acabado de esmalte poliuretano para sistemas de recubrimiento 1 y 2.....	46
Tabla 3.11.	Procedimiento de aplicación de recubrimiento anticorrosivo y acabado.....	47

Tabla 4.1.	Resultados de prueba de adhesión de sistema de recubrimiento 1	49
Tabla 4.2.	Resultados de prueba de adhesión de sistema de recubrimiento 2	50
Tabla 4.3.	Inspección y monitoreo inicial de desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento	52
Tabla 4.4.	Inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento	53
Tabla A.1.	Medición de espesor de película seca para ambos sistemas de recubrimiento	61
Tabla A.1.	Medición de espesor de película seca para ambos sistemas de recubrimiento. (Continuación).....	62
Tabla A.1.	Medición de espesor de película seca para ambos sistemas de recubrimiento. (Continuación).....	63
Tabla A2.1.	Seguimiento de visitas para inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento	64
Tabla A2.2.	Seguimiento de visitas para inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento	65
Tabla A2.3.	Seguimiento de visitas para inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Componentes principales de una pintura	6
Figura 2.1.	Corrosión uniforme en estructuras de transporte de vapor geotérmico	11
Figura 2.2.	Corrosión por picadura en material 316 L de un disco de ruptura en tubería de vapor geotérmico.....	12
Figura 2.3.	Criterios para determinación de grado de adhesión	25
Figura 3.1.	Grado de corrosión de tipo localizada.....	28
Figura 3.2.	Grado de corrosión de tipo localizada.....	29
Figura 3.3.	Grado de corrosión de tipo general.....	30
Figura 3.4.	Grado de corrosión de tipo general.....	31
Figura 3.5.	Grado de corrosión de tipo por picadura.....	32
Figura 3.6.	Grado de corrosión de tipo por picadura.....	33
Figura 3.7.	Yacimiento de ausoles	34
Figura 3.8.	Kit para realizar prueba de adherencia según Norma ASTM D3359-17	37
Figura 3.9.	Evaluación de grado de corrosión en Elemento No Crítico (a) y Elemento Crítico (b) en Central Geotérmica en estudio	40

INTRODUCCIÓN

La industria geotérmica, impulsada por la necesidad de optimizar costos asociados al mantenimiento y reemplazo de equipos e instalaciones, enfrenta un desafío significativo: la corrosión y el desgaste. Este problema no sólo amenaza la seguridad y confiabilidad de los procesos de producción de energía geotérmica, sino que también genera un impacto económico considerable para las empresas del sector. En respuesta a esta problemática, surge la imperante necesidad de evaluar alternativas que mejoren la protección anticorrosiva de los equipos utilizados en esta industria.

La aplicación de sistemas de protección anticorrosiva mediante recubrimientos de alto desempeño se posiciona como una opción viable para mitigar los efectos de la corrosión y prolongar la vida útil de los equipos. Sin embargo, la diversidad de estos sistemas en el mercado dificulta la selección del más idóneo, planteando la pregunta fundamental de su eficacia.

Esta investigación se propone realizar una evaluación exhaustiva de dos sistemas de recubrimiento de alto desempeño aplicados en equipos seleccionados de la industria geotérmica, siguiendo las indicaciones de las metodologías establecidas en las normas ASTM D610-08, ISO 12944:2017, ASTM D3359-17 y SSPC-PA2-2008. El objetivo es determinar la eficacia de estos sistemas en la protección contra la corrosión y su capacidad para extender la vida útil de los equipos. Además, se busca identificar los factores que influyen en el desempeño de los recubrimientos y las condiciones ambientales que afectan su eficacia.

CAPITULO I: MARCO DE REFERENCIA

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Evaluar los sistemas de recubrimiento anticorrosivo de alto desempeño en equipos e instalaciones de la industria geotérmica, mediante la aplicación de normas ASTM D610–08, ISO 12944:2017, ASTM D3359–17 y SSPC-PA2–2008.

1.1.2. Objetivos Específicos

- i. Determinar el grado de corrosión en la superficie pintada de los equipos seleccionados para las pruebas.
- ii. Observar el tipo de ambiente corrosivo en el que se encuentran expuestos estos equipos según el grado de agresividad inherentes a las condiciones ambientales presentes.
- iii. Monitorear el desempeño de los sistemas de recubrimiento seleccionados en la protección contra la corrosión en equipos e instalaciones de la industria geotérmica.

1.2. Justificación

La industria geotérmica se encuentra en una constante búsqueda de soluciones para reducir los costos asociados al mantenimiento y reemplazo de sus equipos e instalaciones, los cuales sufren de corrosión y desgaste. Esta problemática no solo afecta a la seguridad y confiabilidad de los procesos de producción de energía, sino que también representa un impacto económico significativo para las empresas del sector. En este contexto, se hace necesario evaluar alternativas para mejorar la protección anticorrosiva de estos elementos.

La aplicación de sistemas de protección anticorrosiva utilizando recubrimientos de alto desempeño se presenta como una opción viable para minimizar los efectos de la corrosión y prolongar la vida útil de los equipos utilizados dentro de esta industria. Sin embargo, existe una gran variedad de sistemas de recubrimiento anticorrosivo en el mercado, lo que dificulta la selección del sistema óptimo y la garantía de su eficacia.

Por lo tanto, esta investigación pretende realizar una evaluación exhaustiva de dos sistemas de recubrimiento de alto desempeño, aplicados en equipos seleccionados, con el fin de determinar su eficacia en la protección contra la corrosión y su capacidad para prolongar la vida útil de estos equipos. Además, se busca determinar los factores que influyen en el desempeño de los recubrimientos, así como las condiciones ambientales que afectan su eficacia.

Los resultados de esta evaluación permitirán mejorar la selección y aplicación de los sistemas de protección anticorrosiva en la industria geotérmica, lo que se traducirá en una mayor eficacia y reducción de costos en mantenimiento y reemplazo de equipos e instalaciones.

1.3. Planteamiento del problema

La corrosión constituye una de principales preocupaciones en la operación de instalaciones geotérmicas. Este fenómeno se debe principalmente a la composición química del vapor geotérmico, que incluye elementos como CO_2 , H_2S , NH_3 e iones Cl^- , disueltos en el vapor. Estas sustancias son capaces de corroer materiales metálicos y reducir drásticamente la vida útil de los mismos.

Análogamente las condiciones de operación con las que se cuentan en una planta geotérmica pueden propiciar la corrosión, tales como altas temperaturas, las cuales pueden generar cambios estructurales en metales y en consecuencia daños por corrosión, velocidades de flujo a altas presiones que pueden aumentar la erosión del metal, entre otras.

Por lo tanto, en un ambiente tan agresivo para materiales metálicos, es esencial tomar medidas preventivas ante la corrosión, realizando una selección adecuada del sistema

anticorrosivo para garantizar la operación segura de plantas geotérmicas, evitar incidentes o averías de sistemas críticos, con el fin de reducir costos directos por mantenimiento, daños, o reemplazo de instalaciones y equipos, así como costos indirectos por interrupción del proceso de producción.

1.4. Generalidades de la corrosión

La corrosión se describe como el proceso natural al deterioro de materiales en consecuencia de reacciones en las que, por ejemplo, un metal se transforma en un ion metálico, perdiendo las propiedades que se esperan de un metal o una aleación, y se encuentran delimitadas por la agresividad del ambiente en el que se encuentran. Esto se traduce en altos costos asociados con los materiales, mano de obra, eficiencia de producción, mantenimiento, entre otros.

Los problemas asociados a la corrosión son desafiantes para la industria geotérmica, siendo influenciados por factores como las características químicas de los fluidos geotérmicos, cambios de presión, variaciones de temperatura, cantidad de oxígeno disuelto, entre otros. Controlar la corrosión de los equipos e infraestructuras de esta industria es de suma importancia, ya que esto evita problemas específicos como la obstrucción de tuberías y pozos, así como la disminución de la eficiencia de bombas, intercambiadores de calor y turbinas debido a la formación de incrustaciones.

Existen varias formas de corrosión que pueden ocurrir en materiales metálicos en ambientes geotérmicos, entre las cuales se encuentran:

- i. Corrosión uniforme:** Es el tipo de corrosión más común, donde toda la superficie de determinado material metálico presenta una pérdida uniforme de masa al encontrarse expuesto a un ambiente corrosivo. No se considera como un riesgo de falla que pueda ocurrir en poco tiempo, sin embargo, con el tiempo el metal se vuelve más delgado, y falla. Generalmente este tipo de corrosión es provocado por CO_2 , H_2S e iones Cl^- , se cuantifica normalmente midiendo la tasa de corrosión (mmy^{-1}).

- ii. **Corrosión por picadura:** Se refiere a la forma localizada en la que una zona del material se corroe a un ritmo más acelerado que todo el material en general. Es una de las causas más comunes de fallas, siendo provocada por la penetración de iones cloruro a través de la película protectora del metal. Esta forma de corrosión ha ocasionado fallas inesperadas en tuberías y tubos dentro de plantas geotérmicas.

- iii. **Fragilización por hidrógeno:** Es el deterioro metálico a causa de penetración de hidrógeno, el cual normalmente no se difunde en el metal, pero se absorbe por acción de iones sulfuro, atrapando el hidrógeno en la estructura metálica, dando lugar a su fragilización, causando la pérdida de ductilidad y resistencia. Este mecanismo es consecuencia del H₂S contenido en el vapor geotérmico, que se encuentra reaccionando con la superficie formando una película de corrosión de FeS, MnS e iones hidrógeno libres (H⁺).

Todas estas formas de corrosión que se presentan en instalaciones y equipos de una planta geotérmica, pueden reportar costos de hasta \$500,00 por semana para una estación de 100 MW (Lichti & Wilson, 1999).

1.5. Composición de fluidos geotérmicos

Los fluidos geotérmicos constituyen la razón principal en el monitoreo y prevención de la corrosión en plantas geotérmicas. Se definen como un fluido caliente multifásico que fluye en formaciones rocosas geológicas en depósitos geotérmicos, y están compuestos por una compleja mezcla de soluciones salinas y varios tipos de gases disueltos. Una misma agua termal puede ser muy agresiva en términos de corrosión, y de un momento a otro mostrar una tendencia de incrustación, provocado por cambios en sus parámetros fisicoquímicos.

De los diversos componentes de fluidos geotérmicos se identifican siete especies claves que propician los distintos tipos de corrosión anteriormente descritos: oxígeno, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, amoníaco, iones de hidrogeno, cloruros y sulfatos. La presencia de constituyentes como dióxido de carbono y cloruros se encuentran comúnmente

en aguas geotermales del todo el mundo y facilitan la corrosión con tan solo unas pocas partes por millón (ppm), mientras que los demás son ubicuos, pero en concentraciones menores.

1.6. Sistemas de recubrimiento anticorrosivos

Con frecuencia, se incorporan pigmentos anticorrosivos a los recubrimientos con el fin de reducir la velocidad de corrosión a niveles técnicamente insignificantes. Este proceso resulta en una mejora notable de las propiedades anticorrosivas, y la formulación de estos recubrimientos incluye principalmente los componentes que se muestran en la Figura 1.

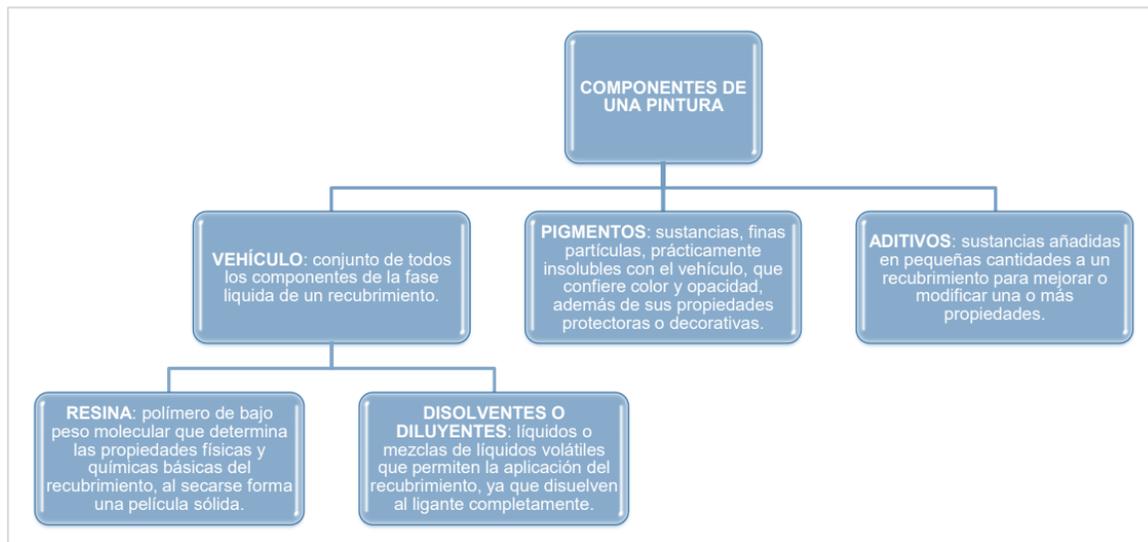


Figura 1.1. Componentes principales de una pintura (Gimeno Pérez, 2016).

Para poder prevenir eficazmente contra la corrosión es necesario impedir la existencia de uno de los elementos que propician las reacciones oxidación – reducción, y se puede abordar desde diversas perspectivas, dependiendo de los requerimientos y capacidad económica. Entre estas se pueden mencionar:

- a. Realizar la adecuada selección o sustitución de materiales por otro más resistente.
- b. Polarizar el material con la inyección de una corriente externa.
- c. Modificar el ambiente volviéndolo menos agresivo.
- d. Emplear recubrimientos protectores.

El reemplazo de materiales se considera una opción poco viable para una planta en operación, dado que implica costos demasiado elevados. De manera similar, el uso de corriente impresa y la modificación del carácter agresivo del ambiente son prácticamente imposibles en una planta geotérmica.

Ante estas limitaciones, se centra el enfoque en los recubrimientos o pinturas anticorrosivas, que se definen como productos pigmentados que, al ser aplicados a una superficie, forman una película con propiedades decorativas, protectoras y/u otras propiedades específicas.

La calidad de un recubrimiento y su eficacia dependerá de una selección adecuada de componentes y el diseño de formulación. Algunas de las propiedades que pueden determinar si un recubrimiento mantendrá una capacidad protectora son:

- i. **Permeabilidad:** Deben tener la capacidad de que los gases o vapores puedan difundirse lentamente a través de la película sin degradarla.
- ii. **Adherencia:** Debe asegurar un aislamiento de la superficie del material al ambiente corrosivo, adhiriéndose tenazmente para de igual manera, resistir los daños físicos, y evitar que la corrosión progrese por debajo del recubrimiento.
- iii. **Resistencia al impacto:** Se requiere cierto grado de flexibilidad para que el recubrimiento resista vibraciones, cambios de temperatura y deformaciones en las estructuras.

En la protección del acero, es común seguir un proceso que comienza con una imprimación, seguida de una capa intermedia y una capa de acabado final. Cada una de estas capas cumple funciones específicas, estando interrelacionadas entre sí.

Se puede denotar tres tipos de protección de sistemas de protección anticorrosivas:

- i. **Protección por sacrificio:** El cual contiene pigmentos metálicos que actúan como ánodo de sacrificio, beneficiando la protección del metal de interés actuando como

cátodo, se destacan aleaciones de zinc, magnesio, o aluminio en la protección de acero.

- ii. Protección por efecto barrera:** Su objeto es crear una barrera que impida el acceso del oxígeno y agua a la superficie del metal; sin embargo, una propiedad de barrera no adecuada puede desencadenar una pérdida de adherencia.

- iii. Protección por inhibición:** Como su nombre indica, provoca la inhibición de reacciones de corrosión mediante la presencia de un pigmento inhibidor activo (inorgánico). Esto se logra, por ejemplo, mediante la formación de compuestos insolubles como resultado de la reacción con productos o subproductos del aglutinante.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Corrosión en la industria geotérmica

La energía geotérmica es una opción atractiva entre las energías renovables, ya que se puede obtener de manera continua, sin depender de condiciones climáticas, ni de escasez de recursos. Sin embargo, las emisiones de ácido sulfhídrico (H₂S), dióxido de carbono (CO₂), y otros gases presentes en el vapor geotérmico, representan diversas problemáticas en materia ambiental, seguridad y salud, y, por ende, existen restricciones de estas.

A raíz de dichas restricciones, se llevó a cabo en Islandia el proyecto “*Sulfix*” de la planta geotérmica “*Hellisheiði*” el cual pretendía la disolución de los gases H₂S y CO₂ en el condensado y reinyectarlos al suelo. Previo a este sistema, se encontraba una estación de separación de gases, la cual experimentó descamación y un severo desgaste por corrosión del acero al carbón de la columna de destilación, disminuyendo su vida útil a tan solo dos meses. (Karlsdottir, S. N., Hjaltason, S., & Ragnarsdóttir, K., 2017).

Con el caso descrito anteriormente, se evidencia que la composición química de los fluidos geotérmicos fomenta la corrosión en equipos e instalaciones de naturaleza metálica, como el acero al carbono. Este fenómeno representa uno de los desafíos más significativos en la generación de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos, ya que conlleva el riesgo de fallos en los materiales de estos elementos.

Componentes fundamentales como las tuberías de revestimientos de pozos, necesarias para el transporte de fluidos geotérmicos desde las profundidades hasta la superficie, unidades de cabezal de pozos, cuya función es controlar y dirigir la entrada y salida de fluidos y gases bajo determinadas condiciones de presión, así como los separadores, condensadores, turbinas y torres de enfriamiento, son esenciales para realizar el proceso de producción de energía geotérmica. Estos elementos desempeñan un papel crucial al transportar el vapor geotérmico desde el yacimiento hasta la turbina, y suelen construirse comúnmente con materiales metálicos, principalmente aceros. Es por esta razón que es necesario aplicar procedimientos

estandarizados para evaluar y controlar riesgos a fin de prevenir posibles daños y problemas económicos en instalaciones y equipos. (Khasani, Kusmono, Utami, P. I., & Budiarto, R, 2021).

La redistribución de fases de las sustancias del vapor geotérmico es una de las etapas más importantes en el acondicionamiento del vapor que se envía a las unidades generadoras de energía en la mayoría de campos geotérmicos. El carácter de los fluidos son líquido dominante, siendo necesaria la separación de la fracción líquida, mediante el uso de equipos de separación que pueden ser centrífugos o separadores ciclónicos, encontrándose la mayor parte de las mezclas y sales en la fase líquida, y los no condensables de esta etapa, se encuentran en el vapor que es transportado a las turbinas, tales como CO₂ y H₂S, sustancias que propician la corrosión de las tuberías y equipos que transportan el vapor geotérmico.

La resistencia, reactividad, y subsiguiente degradación de materiales metálicos es controlada por la concentración de sustancias corrosivas en el vapor geotérmico, pero juegan un papel muy importante el entorno en que se encuentran y en cómo afectan al material con el paso del tiempo bajo condiciones de operación tales como factores de tensión, temperatura, presión, entre otros.

La combinación del estado de fase del fluido de trabajo, la concentración de sustancias no condensables de carácter corrosivo, las condiciones de operación de la planta geotérmica y su entorno, junto con las propiedades de erosión–corrosión del metal, determina en gran medida la posibilidad de daño o fallo de componentes de equipos o instalaciones debido a la corrosión, así como la formación de depósitos en las superficies de equipos y tuberías.

2.2. Tipos de corrosión en instalaciones de producción geotérmica

A pesar de que se retoman algunos tipos de corrosión descritos en el marco de referencia, en este apartado se pretende brindar un enfoque más amplio, con la definición y la descripción de variables y ejemplos en la producción geotérmica.

2.2.1. Ataque Uniforme

Como se detalla en el Capítulo I, el ataque uniforme es un tipo de corrosión que afecta toda la superficie del metal, donde la reacción electroquímica se manifiesta de manera uniforme, generando una reducción en todo el espesor del material. Para que este ataque se lleve a cabo, el ambiente corrosivo debe contar con el mismo acceso a todas las partes de la superficie del metal.

Este tipo de corrosión es generalmente causado por reacciones con iones cloruro, amonio o hidrógeno, donde este último juega un papel importante en la acidez, ambiente en el cual la corrosión se intensifica. La presencia de O_2 , iones Cl^- , CO_2 , H_2S o NH_3 también contribuyen a este proceso, tal como se muestra en la Figura 2.1, donde se reportan daños por corrosión en la boca de un cabezal de un pozo geotérmico junto a tuberías que se encontraban en contacto con fluido geotérmico con exceso de iones Cl^- y H_2SO_4 formado a partir la oxidación con el aire de compuestos de azufre en los gases volcánicos.



Figura 2.1. Corrosión uniforme en estructuras de transporte de vapor geotérmico (Nogara, J., 2017).

Para el control y prevención de este tipo de corrosión se puede considerar la selección de materiales más resistentes, protección catódica o un revestimiento protector.

Desde un punto de vista técnico se prefiere la corrosión uniforme porque es predecible, y se puede realizar el diseño y selección de material tomando en cuenta tolerancias de corrosión; tales como el caso de la tasa de corrosión en equipos de cabezal de pozos de acero dulce medida en el complejo de energía geotérmica “*The Geysers*” en San Francisco, California,

cuyo vapor geotérmico con grandes concentraciones de HCl, reportando valores superiores a 1.01 mm/año, donde para una vida útil de 20 años, se estima que debe contar con índices de corrosión < 0.15 mm/año (Nogara, J., 2017).

Este tipo de corrosión se observa comúnmente en tuberías de revestimientos de pozos geotérmicos y tuberías de transporte de agua acida, y a pesar de que se puede predecir, constituye el 28% del total de daños en pozos y tuberías en campos geotérmicos.

2.2.2. Corrosión por picadura

Es un mecanismo extremadamente localizado, produciendo cavidades o agujeros en superficies metálicas, como se puede apreciar en la Figura 2.2 en un disco de ruptura en una tubería de vapor geotérmico. Estos agujeros tienden a crecer, conduciendo finalmente a la perforación. Contrariamente a la corrosión uniforme, las picaduras no son predecibles, y no es recomendable diseñar alrededor de estas. Son particularmente serias en intercambiadores de calor, por la geometría de estos, paredes delgadas y áreas grandes, donde por mínima que sea la picadura, puede constituir la falla de todo el sistema.



Figura 2.2. Corrosión por picadura en material 316 L de un disco de ruptura en tubería de vapor geotérmico (Nogara, J., 2017).

Las picaduras son el resultado de la ruptura de una película pasiva (por ejemplo, de óxido de cromo), generalmente causado por acción de iones Cl^- junto con valores bajos de pH, ya que la adsorción de estos iones aumenta la conductividad iónica en la película de óxido que penetran, por lo tanto, los iones metálicos de la superficie pueden migrar a través de la película, provocando la corrosión.

2.2.3. Agrietamiento por corrosión bajo tensión

Es un tipo de corrosión severo que ocurre a causa de tensión en materiales metálicos en un entorno corrosivo como lo son altas concentraciones de iones Cl^- , predominando las variables de la tensión impuesta al metal, estática o residual, así como la temperatura y composiciones del ambiente, en este caso, fluido geotérmico con presencia de oxígeno y cloruros

La tensión no necesariamente debe estar siendo aplicada externamente, puede ser residual por cambios repentinos de temperatura, contracción desigual, soldaduras, o productos sólidos y gaseosos que quedan atrapados internamente, generando tensiones internas, conduciendo a grietas intergranulares o transgranulares.

Como medidas de control se incluyen la eliminación de las especies que confieren al entorno un carácter corrosivo (cloruros, oxígeno), la reducción de tensión de tracción, el tratamiento térmico posterior a las soldaduras para evitar que se acumulen tensiones residuales, recubrimientos de componentes, protección catódica, entre otros.

El efecto combinado de tensiones de tracción y la corrosión en presencia de H_2S y agua se denomina como agrietamiento por corrosión bajo tensión de sulfuro.

2.2.4. Agrietamiento inducido por hidrógeno

Cuando el hidrógeno atómico penetra en la estructura de materiales metálicos, la resistencia a la tracción y ductilidad se reducen significativamente, gracias a la adsorción de átomos de hidrógeno formado por reacciones en el proceso de corrosión, tal como la reducción catódica del agua.

2.2.5. Corrosión galvánica

Corrosión acelerada causada por la formación de una celda de corrosión entre dos metales sumergidos en una solución eléctricamente conductora, resultando un flujo de electrones por diferencias de potencial. El metal menos noble, o sea, más reactivo, tiene un potencial de electrodo más negativo, convirtiéndose en ánodo y se corroe, por lo tanto, la lista de resistencia de la serie galvánica debe tenerse en cuenta inicialmente en la selección de materiales. Los efectos de este tipo de corrosión pueden apreciarse en partes de tuberías de hierro que tienen contacto con válvulas de bronce, acelerando la corrosión de la tubería.

Se debe tener en cuenta que la temperatura o el contenido químico pueden variar estas resistencias, y cambiar de posición los materiales en la serie galvánica.

2.2.6. Corrosión por erosión

Es una forma de corrosión acelerada causada por el movimiento entre los medios corrosivos y las superficies metálicas, ocasionando fallas en ocasiones inesperadas y en tiempos cortos. Los metales que forman películas protectoras en la superficie son muy susceptibles a este tipo de corrosión, ya que, si la película se daña, el metal puede experimentar una corrosión severa a un ritmo considerablemente rápido. Los equipos en un entorno geotérmico se encuentran muy expuestos a la corrosión por erosión por los fluidos en movimiento en sistemas de tuberías, intercambiadores de calor, condensadores, turbinas, entre otros, lo cual es de gran interés para una óptima operación de una planta geotérmica.

2.3. Composición de vapor geotérmico

El fluido geotérmico es una mezcla compleja de soluciones salinas y varios tipos de gases disueltos en concentraciones variables dentro de un mismo sistema, donde su transporte trae a la superficie muchas impurezas químicas corrosivas para los materiales de equipos e instalaciones.

Entre las especies corrosivas presentes en los fluidos geotérmicos, como gases no condensables luego de su separación de fases líquido – vapor, se encuentran: oxígeno, iones

H⁺ (pH), NH₃, iones Cl⁻, iones SO₄⁻, CO₂ y H₂S. Estas son responsables de los diversos tipos de corrosión descritos mencionados anteriormente, como corrosión uniforme, por picaduras, agrietamiento inducido por hidrógeno, agrietamiento por corrosión bajo tensión y agrietamiento por corrosión bajo tensión de sulfuro.

2.4. Condiciones de operación y entornos corrosivos a controlar

La corrosión presente en equipos e instalaciones geotérmicas no solo depende de la composición química del fluido geotérmico, sino también de cambios en propiedades físicas del fluido en consecuencia de la temperatura y caídas de presión, afectando a la corrosividad del fluido. Otros factores, como el caudal y el pH, también son condiciones de operación que se deben controlar para minimizar estos efectos.

Según Nogara, J., (2017), se consideran los siguientes entornos del proceso geotérmico como puntos críticos donde pueden darse fallas por corrosión o incrustaciones:

- a. Tubería de revestimiento antes de la separación de fases, donde hay agua, vapor y algunas partículas sólidas.
- b. Tuberías que transportan el vapor geotérmico con presencia de contaminación de salmuera remanente del proceso de separación que se diluye gradualmente por el vapor condensado.
- c. A la entrada de la turbina donde el vapor está casi seco.
- d. En el escape de la turbina donde el vapor exhausto es muy húmedo.
- e. Torres de enfriamiento por la circulación de agua a altas temperaturas, bajas temperaturas y aire.
- f. Sistema de reinyección de salmuera al pozo geotérmico, por el carácter del fluido altamente oxigenado y salino.

Estos entornos al encontrarse en la superficie, son posibles de controlar gracias a la ingeniería de corrosión, al contrario de los problemas de corrosión dentro del pozo, cuyas soluciones son limitadas.

2.5. Antecedentes en el uso de recubrimientos anticorrosivos en la industria geotérmica

La introducción de pigmentos o recubrimientos anticorrosivos en la industria geotérmica tiene como fin disminuir la velocidad de corrosión hasta valores casi despreciables, o aceptables según los parámetros de diseño de vida útil de los equipos y materiales donde son aplicados, actuando como inhibidores o barreras.

Los recubrimientos utilizaban compuestos de cromo como pigmento anticorrosivo inicialmente, por su adecuada solubilidad y eficacia de inhibición en materiales metálicos expuestos a entornos corrosivos (Gimeno Pérez, M. J., 2016). Sin embargo, la lixiviación de compuestos hexavalentes de cromo (contaminante tóxico proveniente del cromo) ha restringido el uso de estos pigmentos, al considerarse un contaminante frente a la salud y al medio ambiente.

El desarrollo de alternativas para reemplazar estos pigmentos ha propuesto como alternativa el uso de pigmentos basados en fosfato de zinc, con un nivel de toxicidad 50 veces menor que el de los cromatos, y cuyo mecanismo de inhibición se basa en la fosfatación (formación de película de óxido pasivadora sobre la superficie) permitiendo así el bloqueo de zonas activas en la superficie del metal.

Es de esta manera como se ha desarrollado a lo largo del tiempo la posibilidad de brindar a los equipos e instalaciones metálicas una mejor protección contra la corrosión sobre los componentes de la producción geotérmica en ambientes tan corrosivos y erosivos, mediante sistemas de recubrimiento de alto desempeño, cuyas propiedades y distintas tecnologías utilizadas en la actualidad, así como normativas para el control del desempeño de estos sistemas se describen en los incisos a continuación.

2.6. Definición de sistemas de recubrimiento de alto desempeño

Los sistemas de recubrimiento de alto desempeño son soluciones avanzadas que se utilizan ampliamente en diversas industrias para proteger y mejorar las propiedades de las superficies expuestas a condiciones ambientales adversas. Estos recubrimientos ofrecen una protección

superior contra los elementos naturales, la corrosión, la abrasión y la acción química para su aplicación en entornos desafiantes. A continuación, se detallan algunas de las ventajas que ofrecen estos tipos de recubrimiento:

- i. Gran resistencia mecánica:** Los recubrimientos de alto desempeño se caracterizan por su excepcional resistencia mecánica. Esta propiedad les permite proteger superficies expuestas a diversas condiciones climáticas y entornos adversos, soportando impactos, raspaduras, fricción y vibraciones. Su capacidad para resistir tensiones mecánicas asegura que las superficies protegidas mantengan su integridad y funcionalidad a lo largo del tiempo.
- ii. Excelente relación de color y brillo:** Los recubrimientos de alto desempeño no solo brindan protección efectiva, sino que también ofrecen una amplia gama de opciones estéticas. Gracias a su excelente relación de color y brillo, estos recubrimientos pueden personalizarse para adaptarse a las preferencias y necesidades específicas de cada aplicación. Esto los convierte en una elección popular en proyectos donde se busca tanto la protección como la apariencia estética.
- iii. Protección superior contra la corrosión y la oxidación:** Una de las ventajas más destacadas de los recubrimientos de alto desempeño es su capacidad para brindar una protección superior contra la corrosión y la oxidación. Al formar una barrera protectora, evitan el contacto directo de las superficies metálicas con agentes corrosivos como la humedad, los productos químicos agresivos y los gases corrosivos. Esta protección eficaz prolonga la vida útil de las superficies metálicas, reduce los costos de mantenimiento y ayuda a preservar su apariencia original.
- iv. Protección avanzada contra la acción química:** Los recubrimientos de alto desempeño ofrecen una protección superior contra la acción química de diversos fluidos y sustancias presentes en distintas industrias. Son resistentes a ácidos, álcalis, solventes y otros productos químicos agresivos, para proteger superficies expuestas a entornos industriales y comerciales donde la resistencia química es esencial.

- v. **Conductividad térmica:** Algunos recubrimientos de alto desempeño están diseñados con una conductividad térmica tal que pueden resistir altas temperaturas, brindando una protección efectiva en entornos donde se requiere una gestión térmica adecuada. Estos recubrimientos son especialmente útiles en aplicaciones que implican condiciones de calor extremo o cambios de temperatura significativos.
- vi. **Fácil aplicación en diversas superficies:** Los recubrimientos de alto desempeño se destacan por su facilidad de aplicación en una amplia gama de superficies, lo que los convierte en una opción versátil para diversas industrias y aplicaciones. La facilidad de aplicación también contribuye a un proceso más rápido y eficiente, lo cual es beneficioso en términos de tiempo y costos.

2.7. Tipos de sistemas de recubrimiento

En el campo de la protección de superficies, los sistemas de recubrimiento de alto desempeño desarrollan un papel fundamental al proporcionar una barrera protectora eficaz contra diversos factores de deterioro. Estos sistemas están diseñados para resistir condiciones ambientales adversas, ataques químicos, abrasión y corrosión, entre otros desafíos. A continuación, se detallan los tipos más comunes de sistemas de recubrimiento de alto desempeño.

2.7.1. Recubrimientos epóxicos

Los recubrimientos epóxicos son ampliamente utilizados ya que cuentan con una excepcional resistencia química y mecánica; son materiales diseñados para proteger superficies contra el desgaste causado por el uso frecuente o la exposición ambiental. Estos recubrimientos se destacan por ser polímeros de alto rendimiento que brindan una protección integral contra condiciones adversas, como el desgaste, derrames químicos, impactos y corrosión. La composición de los recubrimientos epóxicos se basa en una resina epóxica y un endurecedor de poliamina, los cuales se combinan en una mezcla que se aplica para formar una capa protectora resistente y duradera.

Una de las ventajas más destacadas de los recubrimientos epóxicos es su versatilidad, ya que pueden aplicarse en una amplia variedad de superficies, incluyendo concreto, madera y diversos metales como el acero, cobre, plomo, entre otros. Esto los convierte en una solución eficiente para diversos tipos de aplicaciones. Además de su resistencia, los recubrimientos epóxicos ofrecen propiedades adicionales como alta resistencia, variedad de texturas, brillo y una amplia gama de colores, lo que los hace especialmente populares en el sector industrial y comercial.

Es importante destacar que existen tipos de productos de recubrimientos epóxicos, adaptados para satisfacer necesidades específicas. Por ejemplo, el recubrimiento sanitario epóxico está diseñado para cumplir con altos estándares de higiene y resistencia en entornos como hospitales, laboratorios y plantas de procesamiento de alimentos. Por otro lado, el epóxico transparente anticorrosivo cuenta con propiedades para proteger superficies metálicas expuestas a la corrosión, mientras que los recubrimientos epóxicos para acero están especialmente formulados para ofrecer una protección duradera en estructuras de acero.

2.7.2. Recubrimientos poliuretano

Los recubrimientos de poliuretano son una opción popular en la industria, ya que ofrecen una protección excepcional contra la abrasión, corrosión, oxidación y la acción química. Estas pinturas de dos componentes se secan mediante una reacción química entre una resina de poliuretano y un endurecedor de poliamina, lo que resulta en una capa protectora resistente y duradera.

Los recubrimientos de poliuretano tienen una amplia variedad de aplicaciones y se utilizan comúnmente como capa final protectora en sistemas de recubrimientos industriales. Su resistencia a la abrasión es especialmente notable, lo que mejora significativamente la durabilidad de las superficies recubiertas y las protege contra rasguños y desgaste. Además, los recubrimientos de poliuretano conservan su color y presentan un acabado de alto brillo, lo que los convierte en una opción estética muy atractiva.

Estos recubrimientos también son altamente adecuados para su uso en exteriores, ya que resisten de manera efectiva los efectos del clima, como la radiación ultravioleta, la humedad y los cambios de temperatura. Esta resistencia a la intemperie garantiza que los recubrimientos de poliuretano mantengan su apariencia y rendimiento a lo largo del tiempo.

2.7.3. Recubrimientos alquídicos

Las pinturas alquídicas, compuestas por polímeros derivados de la reacción de polioles y poliácidos, confieren a las superficies propiedades distintivas, entre ellas resistencia al desgaste, adherencia superior y un acabado liso y brillante. Estas resinas son versátiles y apropiadas tanto para aplicaciones en interiores como exteriores, destacándose por su durabilidad frente al paso del tiempo, condiciones climáticas adversas y exposición a productos químicos. Además de brindar un acabado estéticamente atractivo y uniforme, las pinturas alquídicas requieren precauciones, como trabajar en áreas bien ventiladas, el uso de guantes y mascarillas, y el almacenamiento en un lugar fresco y seco. (Prometal, 2023)

2.7.4. Recubrimientos de polisiloxano

Los recubrimientos de polisiloxano se caracterizan por su excelente resistencia a la intemperie y su alta durabilidad, ya que se utilizan para proteger superficies exteriores en entornos industriales. Estos recubrimientos están compuestos por una resina de polisiloxano y un endurecedor de poliamina, que se mezclan para formar una capa protectora resistente y duradera. Los recubrimientos polisiloxano son altamente resistentes a la abrasión, la corrosión, la oxidación y la acción química, y son adecuados para proteger superficies en ambientes de alta exposición a los elementos naturales. Además, los recubrimientos polisiloxano tienen una excelente resistencia a los rayos UV, lo que los hace adecuados para proteger superficies en ambientes de alta exposición a la luz solar.

2.7.5. Recubrimientos de polifenil sulfuro (PPS)

Los recubrimientos de polifenil sulfuro (PPS) se destacan por su resistencia química excepcional y su capacidad para soportar altas temperaturas. Estos sistemas son eficaces en

entornos corrosivos y de alta temperatura, como los encontrados en la industria química y petroquímica, plantas de energía y procesos industriales de alta exigencia. El PPS es un polímero orgánico que consiste en anillos aromáticos unidos por sulfuros.

Los recubrimientos de PPS proporcionan una protección confiable contra la corrosión, los productos químicos agresivos y las altas temperaturas, contribuyendo así a la vida útil y rendimiento de los componentes protegidos. Son adecuados para proteger superficies en industrias como la aeroespacial, automotriz, química, entre otras.

2.7.6. Recubrimientos de fluoropolímero

Los recubrimientos de fluoropolímero son una clase de recubrimientos altamente especializados y versátiles que se utilizan para proporcionar una protección excepcional contra una amplia gama de factores agresivos, como la corrosión, la abrasión, la humedad y los productos químicos. Estos recubrimientos se basan en polímeros fluorados que contienen átomos de flúor en su estructura química, lo que les confiere propiedades únicas y superiores en comparación con otros tipos de recubrimientos.

Los fluoropolímeros están compuestos principalmente por dos componentes esenciales: una resina de fluoropolímero y un agente de curado o endurecedor. La resina de fluoropolímero es el componente principal y está formada por cadenas poliméricas que contienen átomos de flúor. Estos átomos de flúor proporcionan a los fluoropolímeros su excepcional resistencia química, alta estabilidad térmica y propiedades antiadherentes.

El agente de curado o endurecedor se combina con la resina de fluoropolímero para iniciar una reacción química conocida como curado o polimerización. Esta reacción química permite que la resina se endurezca y forme una capa protectora sólida y duradera sobre la superficie a recubrir. El tipo de agente de curado utilizado puede variar según el tipo específico de fluoropolímero y las características requeridas del recubrimiento final.

Además de la resina de fluoropolímero y el agente de curado, los recubrimientos de fluoropolímero también pueden contener otros aditivos y modificadores para mejorar aún

más sus propiedades y características. Estos aditivos pueden incluir pigmentos para proporcionar color, cargas para mejorar la resistencia al desgaste y a la abrasión, y agentes de flujo para lograr un acabado suave y uniforme.

Cabe destacar que la elección del sistema de recubrimiento de alto desempeño dependerá de diversos factores, como el tipo de superficie a proteger, las condiciones ambientales, los requisitos específicos de resistencia y las necesidades particulares de cada aplicación. Es esencial realizar un análisis exhaustivo de estos factores antes de seleccionar el sistema de recubrimiento adecuado, con el fin de garantizar una protección efectiva y duradera de las superficies tratadas.

2.8. Normativas empleadas en la evaluación de desempeño de sistemas de recubrimiento

En la evaluación de desempeño de sistemas de recubrimiento, se utilizan diversas normativas y estándares internacionales para garantizar la calidad, la durabilidad y la eficiencia de los recubrimientos.

En el presente trabajo de aplicación el enfoque se realizará en la aplicación de las normas ASTM D610–08, ISO 12944:2017, ASTM D3359–17 y SSPC-PA2–2008. Es importante destacar que existen muchas otras normativas y estándares específicos según el tipo de recubrimiento, el sustrato y las aplicaciones particulares. Además, las regulaciones y normativas pueden variar según el país o la región, por lo que es fundamental consultar las normativas locales aplicables al evaluar el desempeño de los sistemas de recubrimiento.

2.8.1. Norma ASTM D610–08

Esta norma establece un método de evaluación para determinar el grado de corrosión en superficies de acero pintadas. El propósito principal de la norma es proporcionar una medida cuantitativa y objetiva de la cantidad y la extensión de la corrosión presente en una superficie mediante la inspección y comparación con sus criterios de evaluación.

El procedimiento descrito en la norma ASTM D610-08 implica la inspección visual y la clasificación de áreas corroídas en función de su extensión y gravedad, donde se encuentran categorías y criterios para clasificar el grado de corrosión, lo que permite una evaluación sistemática y comparativa de la condición de superficies metálicas. De acuerdo a esta norma, el grado de corrosión se puede clasificar de la forma descrita en la Tabla 2.1, que consiste en una escala numerada del 0 al 10 según el tipo y extensión de la corrosión predominante al comparar la superficie a evaluar con las Figuras 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5.

La Norma ASTM D610-08 es ampliamente utilizada en la industria de los recubrimientos y la protección de superficies, especialmente en el ámbito de la evaluación de la corrosión en estructuras de acero. Proporciona un método estandarizado y confiable para evaluar la calidad y el desempeño de los recubrimientos y su capacidad para proteger las superficies de la corrosión.

Tabla 2.1. *Criterios de evaluación de corrosión.*

Grado de óxido	Porcentaje de superficie oxidada	Localizada (S)	General (G)	Picaduras (P)
10	Menor o igual a 0.01%		Ninguna	
9	Mayor que 0.01% y menor a 0.03%	9-S	9-G	9-P
8	Mayor que 0.03% y menor que 0.1%	8-S	8-G	8-P
7	Mayor que 0.1% y menor que 0.3%	7-S	7-G	7-P
6	Mayor que 0.3% y menor que 1%	6-S	6-G	6-P
5	Mayor que 1% y menor que 3%	5-S	5-G	5-P
4	Mayor que 3% y menor que 10%	4-S	4-G	4-P
3	Mayor que 10% y menor que 16%	3-S	3-G	3-P
2	Mayor que 16% y menor que 33%	2-S	2-G	2-P
1	Mayor que 33% y menor que 50%	1-S	1-G	1-P
0	Mayor que 50%		Ninguna	

Fuente: Adaptado de la norma ASTM D610-08 (American Society for Testing and Materials, 2012).

2.8.2. Norma ISO 12944:2017

La Norma ISO 12944:2017, titulada “Pinturas y barnices: Protección de estructuras de acero mediante sistemas de pintura”, es una norma internacional publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO). Esta norma proporciona directrices detalladas para la protección anticorrosiva de estructuras de acero mediante sistemas de pintura.

La Norma ISO 12944:2017 establece los principios y requisitos para el diseño, la ejecución y el mantenimiento de sistemas de pintura que protejan las estructuras de acero expuestas a ambientes corrosivos. Proporciona orientación sobre la selección de sistemas de pintura adecuados, la preparación de la superficie, los métodos de aplicación y el control de calidad.

La norma está diseñada para ser aplicada en una amplia gama de estructuras de acero, incluyendo edificios, puentes, plataformas marinas, estructuras industriales y equipos. Define por categorías los entornos corrosivos según características de agresividad en torno a contaminación o elementos presentes, y ofrece recomendaciones específicas para la selección de sistemas de pintura que se adapten a cada categoría.

La Norma ISO 12944:2017 es ampliamente utilizada por profesionales y expertos en la industria de la protección de superficies y recubrimientos para garantizar la durabilidad y la eficacia de los sistemas de pintura en la prevención de la corrosión en estructuras de acero. Su aplicación contribuye a la protección de las infraestructuras, la prolongación de la vida útil de los activos y la reducción de costos asociados a la corrosión.

2.8.3. Norma ASTM D3359–17

La Norma ASTM D3359–17 describe el procedimiento de la prueba de adherencia de una película de un recubrimiento a un sustrato metálico, el cual consiste en realizar una serie de cortes utilizando un cuchillo o cuchilla en forma de X para recubrimientos cuyo promedio de 5 mediciones de espesor de película seca sea mayor o igual a 5.0 mils (Tipo A), o en forma de cuadrícula en la superficie del recubrimiento cuando el espesor de película seca promedio es menor a 5.0 mils (Tipo B). Luego, se aplica cinta adhesiva firmemente sobre los cortes y se retira rápidamente en un ángulo específico. Los criterios presentados en la Figura 2.3 se

basa en la cantidad de recubrimiento que se desprende de la superficie en relación a la determinación del grado de adherencia del recubrimiento.

Este método de prueba se utiliza para evaluar la calidad y la durabilidad de los recubrimientos en diversos materiales y sustratos, como metales, plásticos, madera, concreto, entre otros. La norma proporciona pautas para la preparación de las muestras, los equipos necesarios y los criterios para clasificar los resultados de acuerdo con los niveles de adherencia observados.

CLASIFICACIÓN		Superficie del corte en "X" donde se ha producido desprendimiento	CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA PRUEBAS DE ADHERENCIA		
CLASIFICACIÓN	PORCENTAJE DE ÁREA REMOVIDA	SUPERFICIE DEL ÁREA DE CORTE TRANSVERSAL EN LA QUE SE HAN PRODUCIDO DESPRENDIMIENTOS PARA SEIS CORTES PARALELOS Y RANGO DE ADHERENCIA EN PORCENTAJE			
5A	No hay desprendimiento	Ninguno	5B	0% Ninguno	
4A	Rastros de desprendimiento a lo largo de las incisiones o en su intersección		4B	Menor que 5%	
3A	Desprendimiento irregular a lo largo de las incisiones hasta 1/16" en cualquier lado		3B	5 – 15%	
2A	Desprendimiento irregular a lo largo de la mayoría de las incisiones hasta 1/8" en cualquier lado		2B	15 – 35%	
1A	Remoción de la mayor parte del área de la X debajo de la cinta		1B	35 – 65%	
0A	Remoción más allá del área de la X		0B	Mayor que 65%	

Figura 2.3. Criterios para determinación de grado de adhesión (Adaptado de Norma ASTM D3359-17).

La Norma ASTM D3359–17 es ampliamente reconocida y utilizada en la industria de los recubrimientos para realizar pruebas de adherencia de manera estandarizada. Permite a los fabricantes, contratistas y laboratorios evaluar la calidad de los recubrimientos y garantizar que cumplan con los requisitos de adherencia establecidos en especificaciones y estándares.

2.8.4. Norma SSPC-PA2–2008

La Norma SSPC-PA2–2008, desarrollada por la Sociedad para la Protección de la Anticorrosión (SSPC), desempeña un papel fundamental en la evaluación de la calidad de los sistemas de recubrimientos aplicados en superficies metálicas. Esta norma establece los procedimientos y criterios necesarios para llevar a cabo una evaluación precisa y confiable de la calidad de los recubrimientos.

En particular, la Norma SSPC-PA2–2008 se centra en aspectos críticos como la medición de espesores de película seca, perfil de rugosidad y evaluación de adherencia de los recubrimientos. Estos parámetros son de vital importancia para garantizar la eficacia y durabilidad de los sistemas de protección contra la corrosión.

La norma proporciona directrices detalladas sobre los métodos de medición y las tolerancias aceptables para cada una de las pruebas mencionadas. Además, establece los procedimientos adecuados para documentar y reportar los resultados obtenidos, lo que asegura una evaluación consistente y confiable de la calidad del recubrimiento.

Al seguir la Norma SSPC-PA2–2008, los profesionales de la industria de recubrimientos pueden llevar a cabo inspecciones y pruebas de manera uniforme, facilitando la comparación de resultados y garantizando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se profundizará en el diseño de la metodología para evaluar la eficacia de recubrimientos de alto desempeño en la protección anticorrosiva en instalaciones en la industria geotérmica. La investigación seguirá una secuencia lógica, desde la evaluación inicial del estado de corrosión hasta la observación detallada del comportamiento de los recubrimientos en condiciones de exposición prolongada. El diseño metodológico propuesto proporcionará datos sobre la efectividad de estos sistemas en condiciones geotérmicas reales.

3.1. Reconocimiento de áreas y condiciones de exposición de instalaciones y equipos al ambiente corrosivo

Es necesario realizar una evaluación exhaustiva de las áreas de trabajo en relación con los equipos e instalaciones que se encuentran expuestos a diversos niveles de corrosión a causa de presencia de compuestos agresivos en el ambiente geotérmico. Además, comprender la importancia de los componentes de las instalaciones o equipos es crucial para identificar la necesidad de aplicar sistemas de recubrimiento de alto desempeño o reemplazarlos al finalizar su vida útil, siempre y cuando no representen una etapa crítica en el proceso de producción de energía eléctrica. Por lo tanto, se establece una distinción entre elementos críticos y elementos no críticos, definiendo como críticos aquellos cuya falla hipotética podría generar riesgos para la actividad productiva, deteniéndola parcial o totalmente.

Este reconocimiento y clasificación de áreas de trabajo se complementa con el respaldo de la norma ASTM D610-08 para determinar el grado de corrosión mediante una inspección y comparación visual entre los equipos e instalaciones bajo estudio y los criterios de evaluación de la norma. El objetivo es definir qué equipos o infraestructuras deben someterse a un estudio de protección anticorrosiva.

3.1.1. Criterios de evaluación de corrosión bajo norma ASTM D610-08

La evaluación del nivel de corrosión en los equipos e instalaciones de la industria geotérmica se llevará a cabo siguiendo las pautas de la norma ASTM D610-08. Esto implicará utilizar

las clasificaciones detalladas en la Tabla 2.1 y realizar una comparación visual entre las instalaciones y equipos a evaluar con las imágenes proporcionadas en la norma, específicamente las Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5. Estas imágenes proporcionan información sobre el deterioro de las estructuras metálicas. Si la superficie oxidada excede el 50% (grado 1G, 1S, 1P), será necesario reemplazar el equipo o instalación.

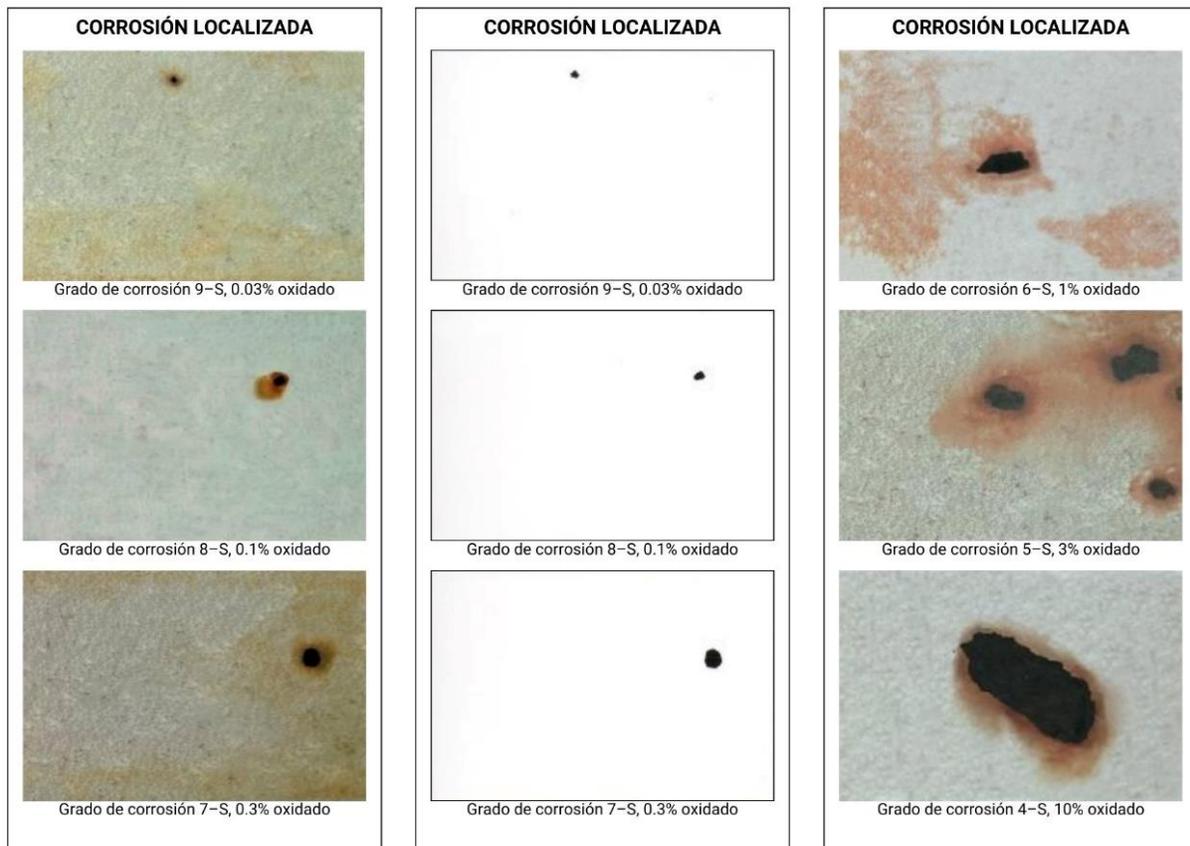


Figura 3.1. Grado de corrosión de tipo localizada. Adaptado de Norma ASTM D610-08 (American Society for Testing and Materials, 2012).

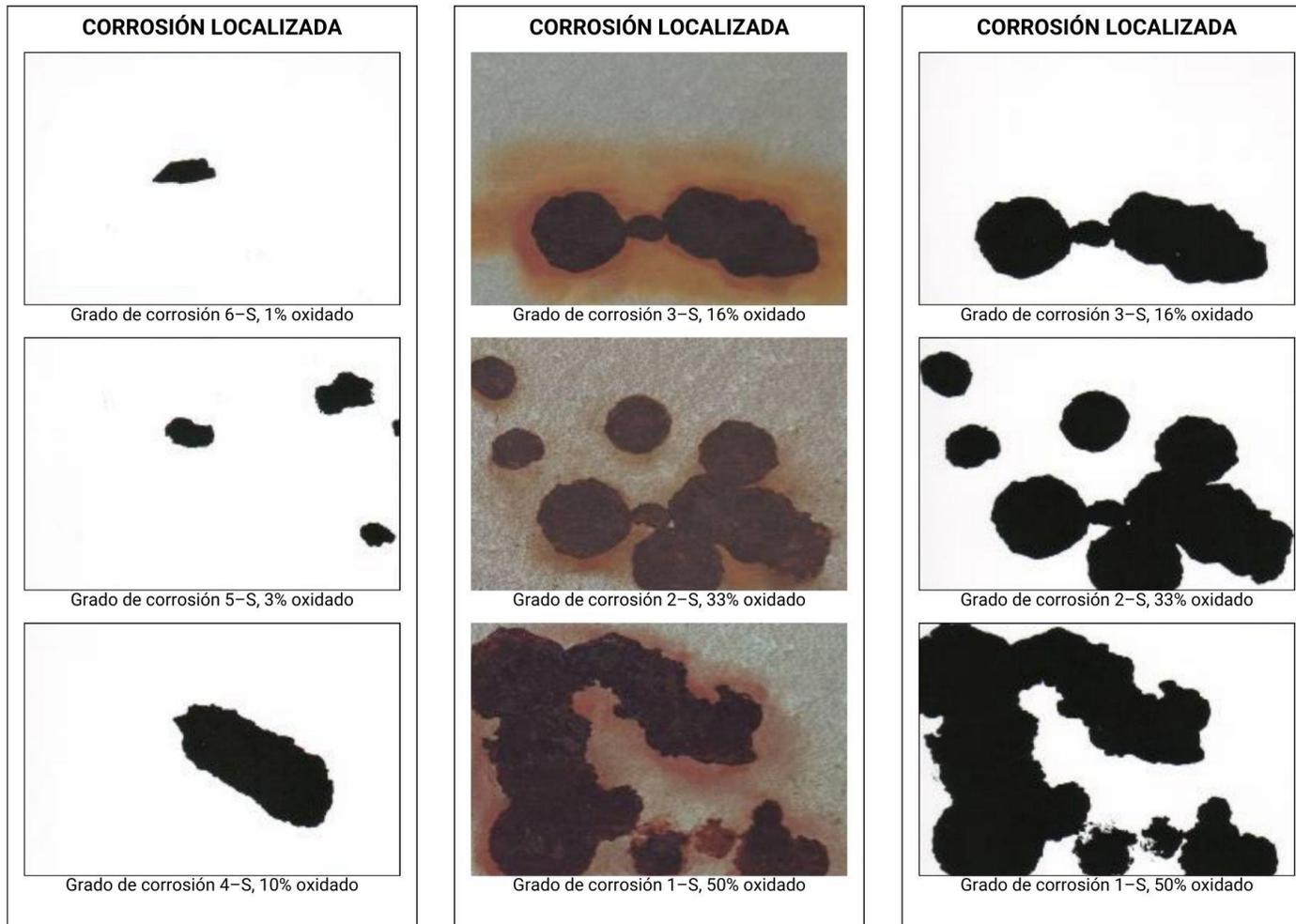


Figura 3.2. Grado de corrosión de tipo localizada. Adaptado de Norma ASTM D610-08 (American Society for Testing and Materials, 2012).

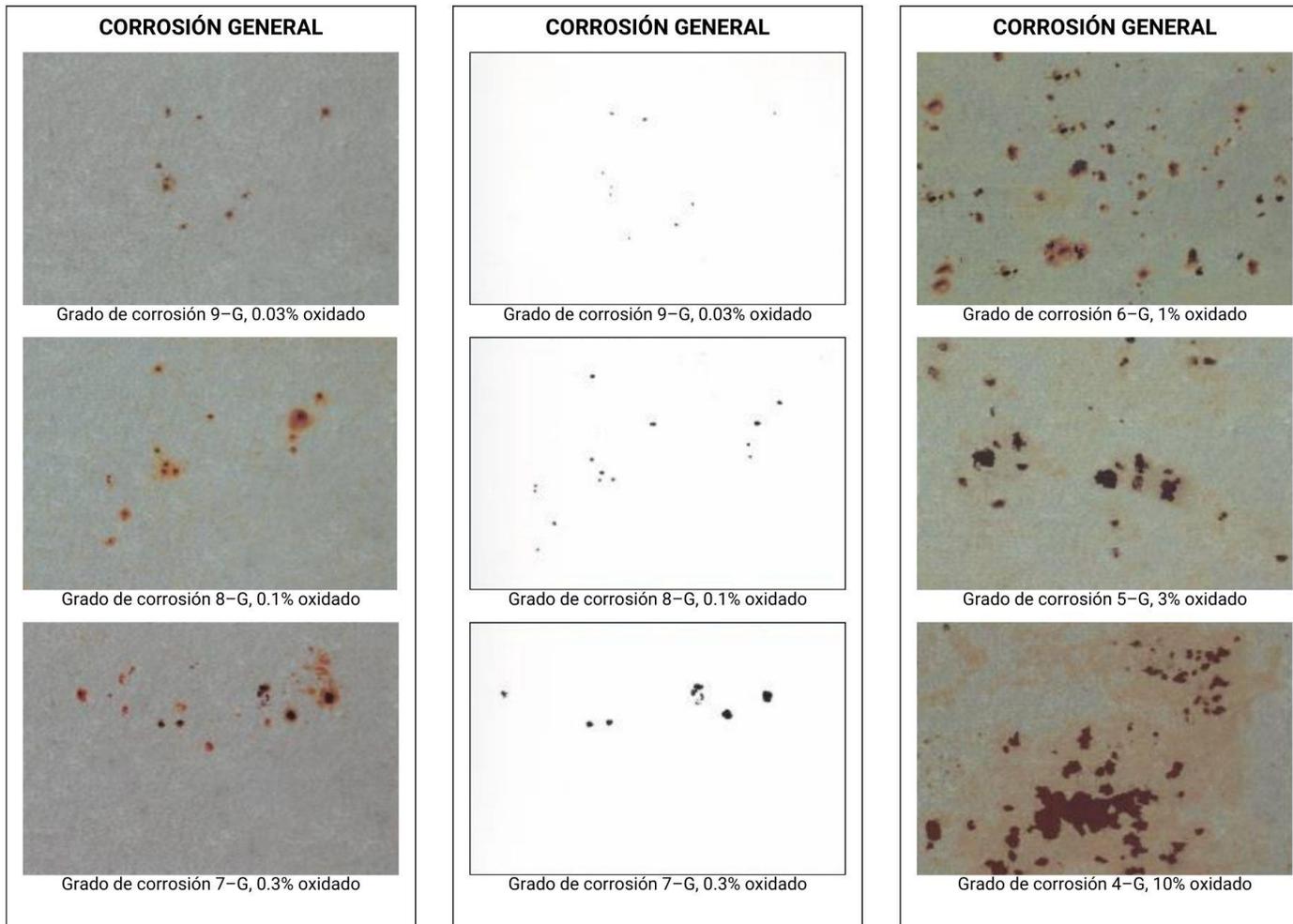


Figura 3.3. Grado de corrosión de tipo general. Adaptado de Norma ASTM D610-08 (American Society for Testing and Materials, 2012).

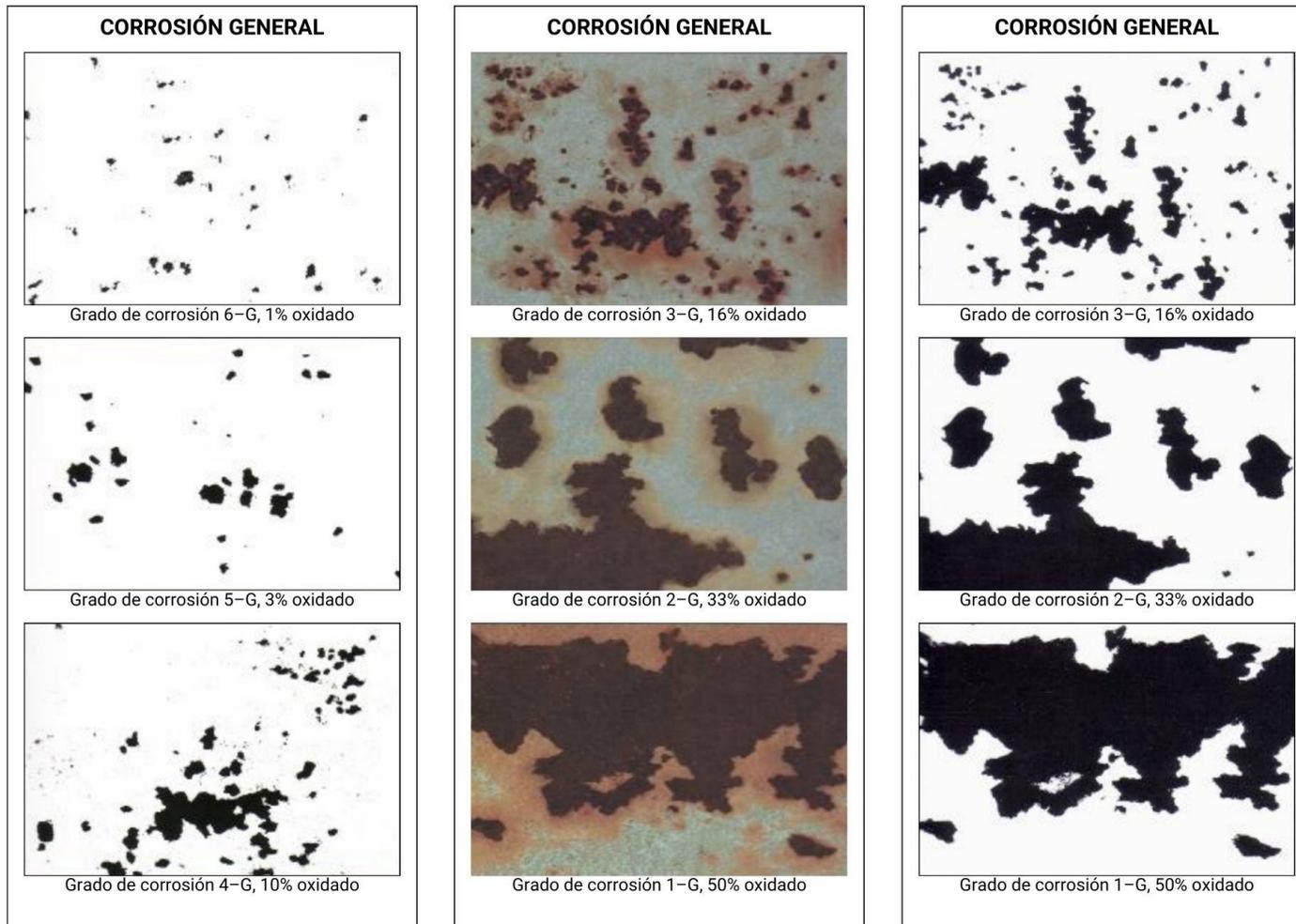


Figura 3.4. Grado de corrosión de tipo general. Adaptado de Norma ASTM D610-08 (American Society for Testing and Materials, 2012).

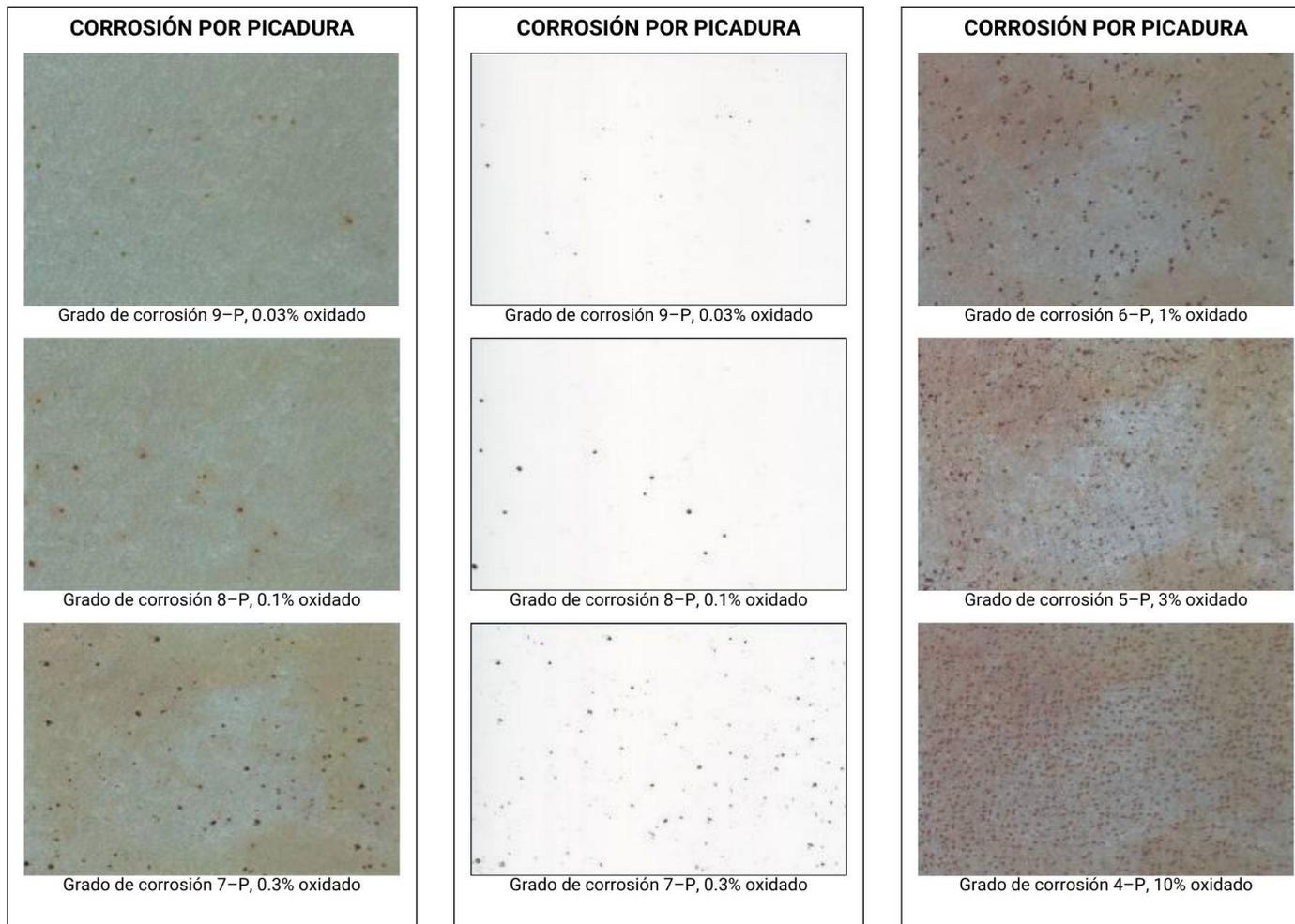


Figura 3.5. Grado de corrosión de tipo por picadura. Adaptado de Norma ASTM D610-08 (American Society for Testing and Materials, 2012).

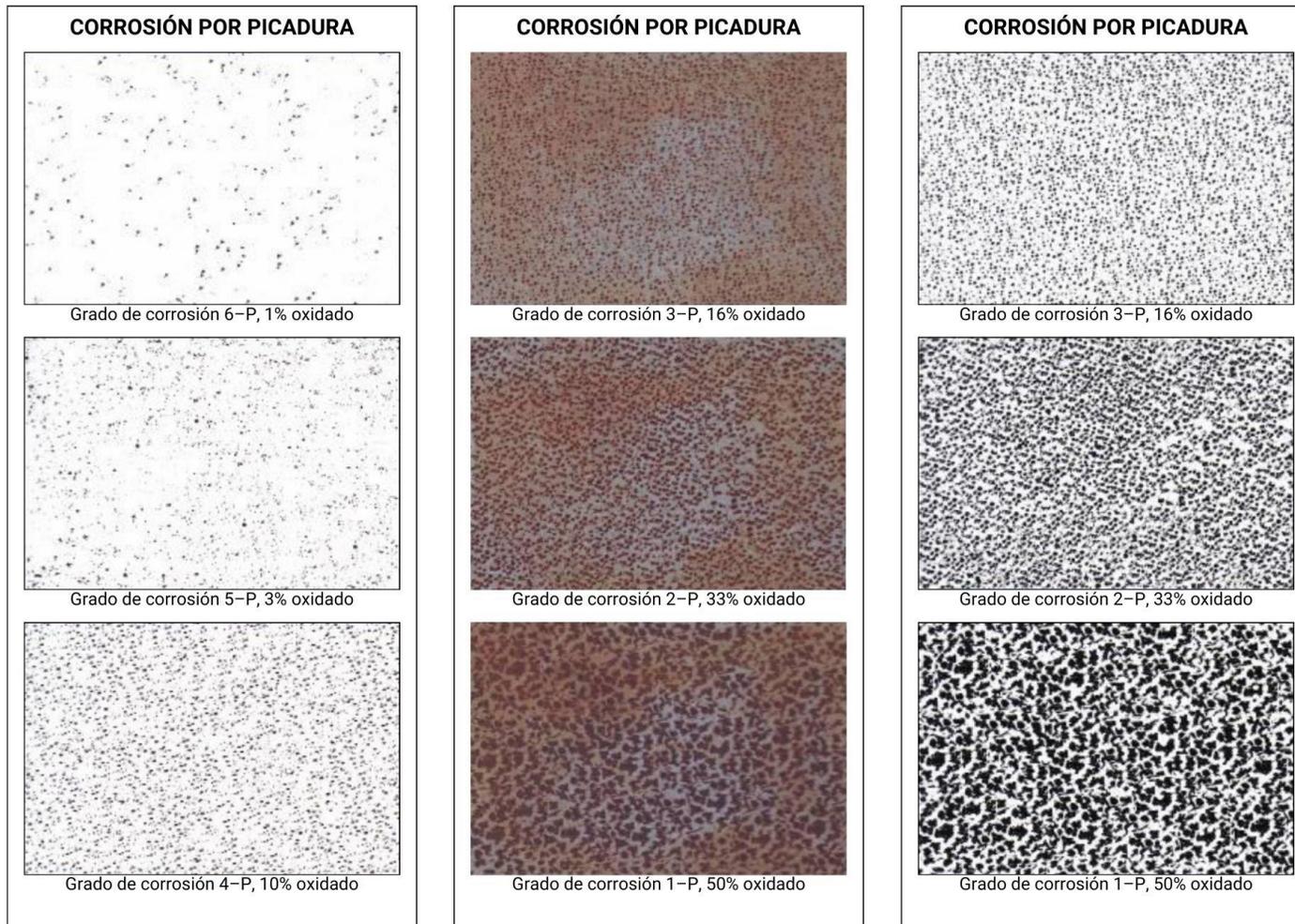


Figura 3.6. Grado de corrosión de tipo por picadura. Adaptado de Norma ASTM D610-08 (American Society for Testing and Materials, 2012).

3.2. Selección de sistemas de recubrimiento anticorrosivo mediante norma ISO 12944:2017

La durabilidad esperada del sistema de protección anticorrosiva, el nivel de agresividad intrínseca en el entorno geotérmico y requisitos tales como el secado rápido, la durabilidad estética y la viabilidad económica son algunas de las variables consideradas al elegir entre sistemas anticorrosivos de 2 o 3 capas. Este proceso de selección y monitoreo se llevará a cabo con la intención de aplicar el sistema seleccionado y evaluar su rendimiento. La evaluación de estas variables se realiza mediante la clasificación y selección de parámetros, según se detalla en la norma ISO 12944:2017. Esta norma establece criterios específicos en relación con las condiciones a las que se someten las estructuras y equipos utilizados en la actividad geotérmica, proporcionando un respaldo sólido para la elección del sistema de protección anticorrosiva. Las etapas de implementación de este sistema se describen en detalle a continuación.

3.2.1. Definición de categoría de ambiente corrosivo en condiciones de la industria geotérmica

Para establecer el efecto del medio ambiente en la corrosión se tomarán en cuenta factores tales como la humedad y temperatura a la que se encuentran las estructuras metálicas a evaluar, así como la exposición a sustancias químicas agresivas, tales como las presentes en un ambiente geotérmico (H_2S , CO_2 , iones Cl^- , etc.). Esto influirá en la selección del sistema de recubrimiento, así como la preparación de la superficie.



Figura 3.7. Yacimiento de ausoles (Diario El Salvador, 2022).

Tabla 3.1. Categorías de ambientes corrosivos en base a condiciones atmosféricas para la selección de sistemas de recubrimientos de protección.

Categoría de corrosión	Ejemplos de ambiente	
	Exterior	Interior
C1 muy baja	Condiciones exteriores, no aplica	Edificios con calefacción y un ambiente limpio como oficinas, tiendas, colegios u hoteles.
C2 baja	Atmósfera contaminada en una pequeña proporción, principalmente en las regiones rurales.	Edificios sin calefacción, donde se puede producir condensación, por ejemplo, almacenes o instalaciones deportivas.
C3 media	Ambientes industriales y urbanos con un nivel bajo (IV) de contaminación de dióxido de azufre. Zonas costeras de baja salinidad	Espacios de producción en instalaciones con alta humedad y contaminación del aire, por ejemplo, plantas de alimentos, lavanderías, fábricas de cerveza o industrias lácteas.
C4 alta	Zonas industriales y zonas costeras de media salinidad.	Plantas químicas, piscinas o astilleros de reparación de barcos.
C5 muy alta	Áreas industriales de alta humedad y ambiente agresivo y áreas costeras con elevada salinidad.	Edificios y zonas de condensación prácticamente constante y alta contaminación.

Fuente: Adaptado de norma ISO 12944:2017.

3.2.2. Determinación de requisitos de durabilidad de sistema anticorrosivo

El tiempo de durabilidad del sistema de protección anticorrosivo estará determinado por diversos factores, incluyendo las condiciones ambientales, la disponibilidad de recursos, la viabilidad económica, las condiciones de aplicación y el programa de mantenimiento. Esta evaluación busca establecer la expectativa de vida del sistema de protección antes de que sea necesario llevar a cabo operaciones de mantenimiento. A modo de referencia, la norma ISO 12944:2017 ha establecido cuatro intervalos de tiempo que clasifican la durabilidad,

detallados en la Tabla 3.2. Estos intervalos, junto con la categorización del ambiente corrosivo, serán considerados en la selección del sistema de protección de pinturas.

Tabla 3.2. Rango de clasificación de durabilidad de sistemas de protección de pinturas.

Durabilidad	Año hasta el primer mantenimiento
Baja – L	≤ 7 años
Media – M	De 7 a 15 años
Alta – H	De 15 a 25 años
Muy alta – VH	Más de 25 años

Fuente: Adaptado de norma ISO 12944:2017.

3.3. Preparación de superficie, aplicación de sistemas de recubrimiento y prueba de adherencia

Mediante el uso de herramientas manuales y mecánicas, se llevará a cabo la preparación de superficie en las áreas de trabajo seleccionadas. Este proceso preparatorio es esencial para garantizar una aplicación adecuada de los sistemas de recubrimiento mediante equipos de aspersión de pintura. Se seguirá un intervalo de tiempo específico para permitir el secado adecuado de la capa primaria antes de aplicar el acabado final del sistema.

La efectividad de un recubrimiento en su función protectora depende en gran medida de su capacidad para permanecer adherido a la superficie metálica. Por lo tanto, se evaluará directamente la calidad de la preparación de la superficie, ya que está intrínsecamente vinculada a la adherencia. Esta evaluación se encuentra basada en el procedimiento y los criterios descritos en el punto 2.8.3 propuestos por la norma ASTM D3359-17. En un área limpia y seca del recubrimiento, se realizarán dos cortes con un movimiento constante, penetrando el recubrimiento hasta la superficie metálica en forma de “X” con un ángulo entre ellos de 30° o 45°. Luego, se colocará el centro de una cinta sensible a la presión en la

intersección de los cortes, retirándola rápidamente. Los artículos y herramientas utilizadas para esta prueba se muestran en la Figura 3.7.

Se obtendrá respuesta sobre la protección que puede brindar el recubrimiento inspeccionando el resultado de la metodología aplicada de esta norma, examinando la cantidad de recubrimiento que se desprendió del área donde se retiró la cinta.



Figura 3.8. Kit para realizar prueba de adherencia según Norma ASTM D3359-17.

3.4. Etapa de observación y exposición en ambiente geotérmico

En esta etapa, posterior a la preparación de superficie y aplicación de los sistemas de recubrimiento a evaluar, las estructuras serán expuestas en el ambiente geotérmico donde operan con normalidad por un período específico, realizando pruebas de monitoreo cada cierto periodo de tiempo, partiendo la evaluación con los sistemas de recubrimiento intactos, y posteriormente, acelerando las condiciones de desgaste de estos y la corrosión del metal desprotegido mediante una incisión de 10 cm en cada recubrimiento. Esta exposición permitirá evaluar la resistencia de los recubrimientos a la corrosión.

Durante el período de exposición, se realizarán visitas periódicas a la ubicación de exposición para monitorear el comportamiento de los sistemas de recubrimiento, mediante la aplicación de las normas SSPC-PA2 y ASTM D610-08, para llevar un seguimiento del comportamiento de los sistemas de recubrimiento aplicados, realizando medidas en el espesor de las capas de los sistemas e inspecciones visuales para detectar cualquier signo de corrosión, desgaste, desprendimiento del recubrimiento o cambios en la apariencia general.

Al finalizar el período de exposición, se realizará una evaluación final detallada de las estructuras. Se compararán los resultados obtenidos de los dos sistemas de recubrimiento de alto desempeño aplicados. Esta comparación permitirá determinar cuál de los dos sistemas demostró una mayor eficacia en la protección contra la corrosión y el desgaste en condiciones operativas reales.

3.5. Desarrollo experimental

El enfoque del desarrollo del experimento se encuentra en el área del sistema de alivio de presión de la Central Geotérmica en estudio, diseñado para liberar de manera segura el exceso de vapor de agua o fluidos geotérmicos, cuando la presión alcanza un umbral predefinido. En este sistema se pueden encontrar diversos equipos para esta operación, como válvulas de seguridad, soportes de tuberías, discos de ruptura, tuberías de transporte de vapor, plataformas auxiliares, entre otros equipos e instalaciones.

3.5.1. Selección de infraestructuras para aplicación de sistema de recubrimiento anticorrosivo

En la definición de la estructura o equipo que se someterá a estudio, se realizó una clasificación en el reconocimiento de áreas de trabajo, para determinar un elemento que sea crítico para el proceso, y que su intervención resulte viable en torno a la disponibilidad de recursos para la evaluación de protección anticorrosiva, basada principalmente en los criterios de la importancia de los equipos o instalaciones en el proceso productivo de la Central Geotérmica en estudio (Elemento Crítico o No Crítico) y de su nivel de exposición al ambiente corrosivo (véase la Tabla 3.3). Junto a esta clasificación se realizó una evaluación del grado de corrosión presente en estos elementos, posterior a su inspección y comparación visual con los criterios propuestos en la norma ASTM D610-08. El procedimiento realizado puede observarse en la Figura 3.8. La información recopilada se encuentra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3. Reconocimiento de áreas: Clasificación de instalaciones y equipos.

	Equipo o instalación	Exposición Alta	Exposición Media
Elementos críticos	Válvula de tubería de transporte de vapor de agua	X	
	Tuberías de alivio de presión	X	
	Cilindro de aire comprimido para operación de válvulas		X
	Soportes metálicos de tuberías de vapor de alivio de presión	X	
	Tanque de almacenamiento de soda cáustica	X	
Elementos no críticos	Pasamanos de plataforma	X	
	Plataformas metálicas	X	
	Caja de aislamiento térmico de válvulas		X
	Estructura auxiliar de mantenimiento (escaleras) de torre de enfriamiento		X



(a)



(b)

Figura 3.9. Evaluación de grado de corrosión en Elemento No Crítico (a) y Elemento Crítico (b) en Central Geotérmica en estudio.

Tabla 3.4. *Grado de corrosión de las instalaciones y equipos en el reconocimiento de áreas en Central Geotérmica en estudio según norma ASTM D610-08.*

Equipo o instalación	Grado de Corrosión según norma ASTM D610-08
Válvula de tubería de transporte de vapor de agua	Corrosión general, Grado 2-G y 1-G
Tuberías de alivio de presión	Corrosión localizada, Grado 8-S y 7-S
Cilindro de aire comprimido para operación de válvulas	Corrosión localizada, Grado 4-S y 3-S
Soportes metálicos de tuberías de vapor de alivio de presión	Corrosión general, Grado 1-G
Tanque de almacenamiento de soda cáustica	Corrosión localizada, Grado 2-S y 1-S
Pasamanos de plataforma	Corrosión general, 3-G y 2-G
Plataformas metálicas	Corrosión general, 2-G y 1-G
Caja de aislamiento térmico de válvulas	Corrosión localizada, Grado 4-S y 3-S
Estructura auxiliar de mantenimiento (escaleras) de torre de enfriamiento	Corrosión localizada, Grado 9-S y 8-S

Las estructuras o equipos que no se consideran elementos críticos en la Central Geotérmica en estudio son más propensos a ser reemplazados cuando alcanzan un grado de corrosión que indica el final de su vida útil. Esto se debe a que su fallo no afectaría la generación de energía eléctrica y, por lo tanto, no se ha contemplado la aplicación de un sistema de protección anticorrosivo para estas estructuras. En contraste, aquellas estructuras cuya falla en consecuencia de la corrosión representaría un problema, interrumpiendo el proceso de producción de energía y planteando un riesgo inherente para la seguridad industrial de dicha Central Geotérmica en estudio, requieren la aplicación de un sistema de control de la

corrosión. En estas circunstancias, se identifica la necesidad de intervenir en estas infraestructuras para evitar o minimizar el avance de la corrosión a lo largo del tiempo.

Siguiendo la línea de lo anteriormente expuesto y teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos y la viabilidad técnica para la aplicación de recubrimientos de alto desempeño, se ha optado por intervenir específicamente en las infraestructuras de soporte de tuberías del sistema de alivio de presión. Esta elección se basa en el interés especial de la Central Geotérmica en estudio, debido al alto grado de corrosión presente en estas estructuras. Estos fundamentos constituyen la base para la selección de las estructuras metálicas como objeto de evaluación para la protección anticorrosiva, mediante pruebas y monitoreo del rendimiento de los sistemas de recubrimiento.

3.5.2. Selección de sistemas de recubrimiento anticorrosivo

Una vez identificadas las estructuras que requieren intervención para la protección anticorrosiva mediante sistemas de recubrimientos, la aplicación de la norma ISO 12944:2017 se posiciona como un recurso fundamental en la elección de los sistemas de recubrimiento. Esta elección se guía por los criterios del ambiente corrosivo en el que operarán las estructuras y la durabilidad que se requiera.

El entorno de la Central Geotérmica en estudio, caracterizado por una elevada humedad y una concentración significativa de contaminantes en forma de sales y gases no condensables, generados por las descargas continuas del sistema de alivio de presión de mezclas de vapor de agua y fluidos geotérmicos, es clasificado como ambiente corrosivo C4 (véase Tabla 3.1). Para la evaluación de dos estructuras metálicas específicas, pertenecientes al sistema de soporte de tuberías del sistema de alivio de presión, se plantea la comparación entre un sistema de baja durabilidad y otro de alta durabilidad (véase Tabla 3.2).

La selección de los sistemas de recubrimientos para el ambiente de nivel corrosivo C4 se realizaron en base a los ejemplos de sistemas de pinturas propuestos en la Tabla C.4 de norma ISO 12944-5:2017, y se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. *Sistemas de pinturas propuestos para categoría de ambiente corrosivo C4.*

Sistema No.	Primario anticorrosivo		Capa de acabado	Sistema de pintura		Durabilidad
	Tipo	Espesor mínimo de película seca (µm)		Nº total de capas	Espesor mínimo de película seca (µm)	
C4.01	Alquídico	60 – 160	Acrílico	2	160	Baja
C4.06	Epóxico	80 – 160	Poliuretano	2	240	Alta

Fuente: Adaptado de Tabla C.4, norma ISO 12944-5:2017.

Para el sistema de pinturas cuya capa primaria es del tipo alquídico se optó por utilizar un tipo de pintura de resina alquídica modificada. Según la recomendación del fabricante, se considera viable reemplazar la capa acrílica de acabado por una de esmalte de poliuretano, para un criterio de durabilidad media. Basándose en esta sugerencia, se ha adaptado la selección del sistema, la cual se detalla en la Tabla 3.6, incluyendo los espesores de película seca recomendados.

Tabla 3.6. *Sistemas de pinturas seleccionados para aplicación y monitoreo de su desempeño de protección anticorrosiva.*

Primario anticorrosivo		Capa de acabado	Sistema de pintura		Durabilidad
Tipo	Espesor mínimo de película seca (µm)		Nº total de capas	Espesor mínimo de película seca (µm)	
Alquídico modificado	76 – 102	Poliuretano	2	127	Media
Epóxico	80 – 160	Poliuretano	2	240	Alta

Fuente: Adaptado de Tabla C.4, norma ISO 12944-5:2017.

3.5.3. Procedimiento de preparación de superficie y limpieza para aplicación de sistemas de recubrimientos anticorrosivos

El procedimiento para la limpieza y preparación de superficie en cada una de las muestras a evaluar, junto a sus descripciones y observaciones se presentan a detalle en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Procedimiento de limpieza y preparación de superficie de estructuras

Paso	Sistema 1	Sistema 2	Descripción
<p>Preparación de superficie</p>			<p>Se retiraron restos de la capa de pintura y óxido que se encontraban sobre la superficie a evaluar, utilizando herramientas mecánicas (disco de copa) según indica la norma SSPC-SP2/SP3.</p>
<p>Limpieza con solvente</p>			<p>Para la aplicación de los sistemas de recubrimientos anticorrosivos es necesario realizar la limpieza y desengrase de la estructura, a causa de la suciedad remanente de la preparación de superficie mediante limpieza con solventes según norma SSPC-SP1.</p>
<p>Resultado</p>			<p>Superficie limpia, libre de suciedad, óxido, y desengrasada, preparada para aplicación adecuada de sistemas de recubrimiento.</p>

Preparación de los sistemas de recubrimiento se describen a detalle en Tabla 3.8, Tabla 3.9 y Tabla 3.10.

Tabla 3.8. Procedimiento de preparación de capa anticorrosiva de resina epóxica para sistema de recubrimiento.

Paso	Sistema 1	Descripción
<p>Preparación de capa primaria anticorrosiva</p>		<p>La capa primaria de anticorrosivo epóxico está conformada por dos componentes, la base de la pintura y el catalizador o convertidor, los cuales se deben de agitar para la incorporación y homogenización de sus componentes.</p>
<p>Mezcla de componentes de capa primaria anticorrosiva</p>		<p>Mezcla de componentes A (pintura epóxica) y B (catalizador de secado y endurecimiento) en proporciones 1:1.</p>
<p>Tiempo de inducción (30 minutos)</p>		<p>Esperar a que transcurra el tiempo de inducción previo a la aplicación de capa primaria anticorrosiva, el cual es el tiempo requerido para que la base y los componentes del catalizador se entrelacen químicamente, etapa esencial para el secado y endurecimiento del sistema.</p>

Tabla 3.9. Procedimiento de preparación de capa anticorrosiva de resina alquídica modificada para sistema de recubrimiento.

Paso	Sistema 2	Descripción
<p>Reducción de capa anticorrosiva</p>		<p>Mezcla de solvente y capa anticorrosiva de resina alquídica modificada.</p>

Tabla 3.10. Procedimiento de preparación de capa de acabado de esmalte poliuretano para sistemas de recubrimiento 1 y 2.

Paso	Acabado de esmalte poliuretano	Descripción
<p>Mezcla de componentes y reducción con solvente</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(A)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>(B)</p>  </div> </div>	<p>(A) Mezcla de esmalte de poliuretano y catalizador de secado en proporción 4:1 respectivamente. No se requiere tiempo de inducción.</p> <p>(B) Posterior reducción de la mezcla con solvente.</p>

La aplicación de sistemas de recubrimiento se describe a detalle en Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Procedimiento de aplicación de recubrimiento anticorrosivo y acabado.

Paso	Sistema 1	Sistema 2	Descripción
<p>Aplicación de primera capa anticorrosiva</p>			<p>Pasado el tiempo de inducción, la capa anticorrosiva de resina epóxica está lista para ser aplicada mediante pistola de aspersión.</p> <p>De igual manera, el anticorrosivo de resina alquídica modificada fue aplicado mediante pistola de aspersión.</p>
<p>Medición de espesores de capa seca de primera capa de anticorrosivo previo a aplicación de acabado</p>			<p>Para asegurar el desempeño de protección y durabilidad de la capa de anticorrosivo, cada sistema debe encontrarse en los siguientes intervalos según hoja técnica del fabricante:</p> <p>S1: 5.0 – 10.0 mils S2: 3.0 – 4.0 mils</p>
<p>Aplicación de capa de acabado</p>			<p>Los espesores de película seca de las capas anticorrosivas para cada sistema se encuentran conformes al intervalo recomendado. Por lo tanto, se realizó la aplicación de la capa de acabado de esmalte poliuretano en ambos sistemas.</p>
<p>Resultado</p>			<p>Sistemas de recubrimiento aplicados satisfactoriamente.</p>

Una vez se ha aplicado la capa primaria anticorrosiva y el acabado, se procede a la etapa de inspección y monitoreo, donde se someten a prueba y se comparan ambos sistemas de recubrimiento en su desempeño de protección contra la corrosión en las condiciones del ambiente geotérmico.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de prueba de adhesión para cada sistema se presentan en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1. Resultados de prueba de adhesión de sistema de recubrimiento 1.

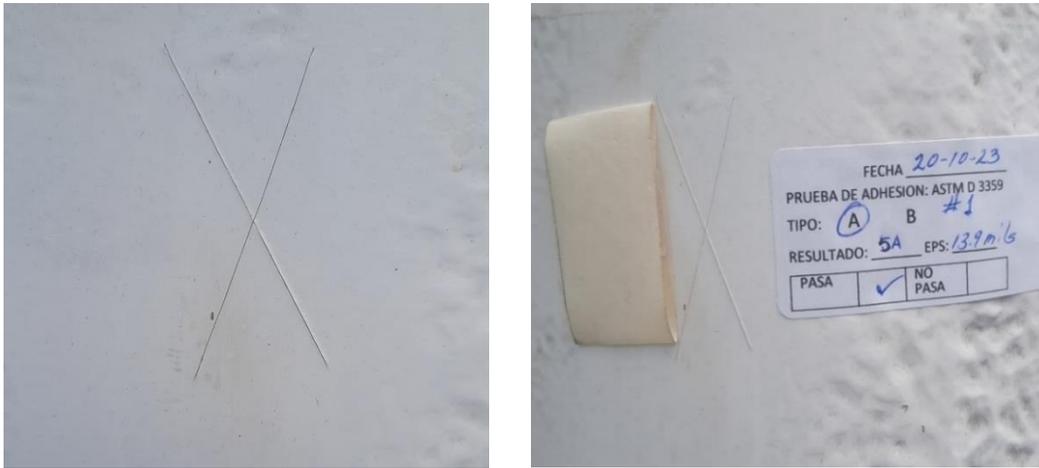
REPORTE DE PRUEBA DE ADHESIÓN																							
EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO																							
NORMA UTILIZADA		ASTM D 3359 – 17		FECHA:	20/10/23																		
SISTEMA	1	ESQUEMA DE PINTURA	Anticorrosivo epóxico con acabado de esmalte poliuretano																				
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>Nº</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>EPS (mils)</td> <td>11.9</td> <td>11.7</td> <td>12.7</td> <td>10.9</td> <td>10.8</td> </tr> <tr> <td>\bar{x}</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">13.94</td> </tr> </table>						Nº	1	2	3	4	5	EPS (mils)	11.9	11.7	12.7	10.9	10.8	\bar{x}	13.94				
Nº	1	2	3	4	5																		
EPS (mils)	11.9	11.7	12.7	10.9	10.8																		
\bar{x}	13.94																						
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>≥ 5.0 mils</td> <td>Procedimiento tipo A</td> </tr> </table>						≥ 5.0 mils	Procedimiento tipo A																
≥ 5.0 mils	Procedimiento tipo A																						
																							
OBSERVACIONES																							
<ul style="list-style-type: none"> - Procedimiento tipo A para Espesor de película seca ≥ 5.0 mils. (Véase Figura 2.3). - Criterio de aceptación de adherencia para corte en cruz: 5A, 4A y 3A según Norma ASTM D3359-17. 																							
RESULTADO	5A. No se obtuvo desprendimiento alguno del recubrimiento del corte en “X”, lo que se traduce en una excelente adherencia del recubrimiento al sustrato metálico.																						
RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN	Edwin Armando Guillén Castaneda																						
SUPERVISOR	Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez																						

Tabla 4.2. Resultados de prueba de adhesión de sistema de recubrimiento 2.

REPORTE DE PRUEBA DE ADHESIÓN																							
EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO																							
NORMA UTILIZADA		ASTM D 3359 – 17		FECHA: 20/10/23																			
SISTEMA	2	ESQUEMA DE PINTURA	Anticorrosivo alquídico con acabado de esmalte poliuretano																				
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>Nº</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>EPS (mils)</td> <td>4.5</td> <td>5.3</td> <td>4.9</td> <td>5.0</td> <td>5.5</td> </tr> <tr> <td>\bar{x}</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">5.04</td> </tr> </table> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">≥ 5.0 mils</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Procedimiento tipo A</div> </div>						Nº	1	2	3	4	5	EPS (mils)	4.5	5.3	4.9	5.0	5.5	\bar{x}	5.04				
Nº	1	2	3	4	5																		
EPS (mils)	4.5	5.3	4.9	5.0	5.5																		
\bar{x}	5.04																						
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>																							
OBSERVACIONES																							
<ul style="list-style-type: none"> - Procedimiento tipo A para Espesor de película seca ≥ 5.0 mils. (Véase Figura 2.3). - Criterio de aceptación de adherencia para corte en cruz: 5A, 4A y 3A según Norma ASTM D3359-17. 																							
RESULTADO	4A. Se obtuvo desprendimiento únicamente en la intersección del corte en X, encontrándose dentro del criterio de aceptación de adhesión según la norma ASTM D3359-17.																						
RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN	Karen Beatriz Gallegos Velasco																						
SUPERVISOR	Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez																						

Los resultados indican una adhesión satisfactoria de los sistemas de recubrimiento, cumpliendo con los criterios establecidos en la norma ASTM D3359-17.

El desempeño de la protección anticorrosiva de los sistemas se evaluó mediante visitas de inspección y monitoreo distribuidas en un tiempo de exposición total de 1656 horas, realizando mediciones de espesor de película seca (EPS) según norma SSPC-PA-2, y reportando el promedio de 20, al igual que comparaciones de grado de corrosión con norma ASTM D610-08 si se encuentra presente. Los resultados de estas visitas de monitoreo se resumen en la Tabla 4.3 para el punto inicial con los sistemas de recubrimiento intactos, y en la Tabla 4.4 para el punto final posterior a acelerar las condiciones de corrosión, mediante la realización de una incisión penetrando cada recubrimiento hasta la superficie metálica.

Esta evaluación permite realizar una comparativa en el desempeño entre ambos sistemas de recubrimiento para verificar su protección anticorrosiva con respecto al tiempo de exposición. Detalles adicionales sobre las mediciones realizadas en cada visita se encuentran disponibles en Anexo 1.

Tabla 4.3. Inspección y monitoreo inicial de desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento.

REPORTE DE VISITAS DE MONITOREO EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO									
NORMAS UTILIZADAS		ASTM D610-08 y SSPC-PA-2							
N° DE CAPAS	2	FECHA	07/09/2023	TIEMPO TRANSCURRIDO	0 horas				
Sistema 1			Sistema 2						
									
<table border="1"> <tr> <td>EPS Promedio</td> <td>11.56 mils</td> </tr> </table>		EPS Promedio	11.56 mils	<table border="1"> <tr> <td>EPS Promedio</td> <td>5.76 mils</td> </tr> </table>		EPS Promedio	5.76 mils		
EPS Promedio	11.56 mils								
EPS Promedio	5.76 mils								
OBSERVACIONES									
<p>Sistemas de recubrimiento en estado óptimo; los espesores de película seca se encuentran dentro del rango recomendado, sin evidencia de corrosión. Además, se observa un color blanco y brillo característico, propio del acabado de esmalte poliuretano.</p>									
RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN			Edwin Guillén, Karen Gallegos						
SUPERVISOR			Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez						

Tabla 4.4. Inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento.

REPORTE DE VISITAS DE MONITOREO					
EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO					
NORMAS UTILIZADAS		ASTM D610-08 y SSPC-PA-2			
Nº DE CAPAS	2	FECHA	16/11/2023	TIEMPO TRANSCURRIDO	1656 horas
Sistema 1			Sistema 2		
					
EPS Promedio		11.10 mils		EPS Promedio	
		5.35 mils			
OBSERVACIONES					
<ul style="list-style-type: none"> - Ampollas presentes con desgaste de capa de acabado del sistema de recubrimiento, próximas al área de incisión y sin presencia de corrosión ni desgaste de capa primaria anticorrosiva. - Corrosión presente en incisión del recubrimiento en grado 3 – G. Sin presencia de corrosión en el resto de superficie pintada. - Espesor de película promedio sin variación significativa con respecto al inicio de la evaluación. 			<ol style="list-style-type: none"> 1. Ampollas y desgaste de capa primaria anticorrosiva y capa de acabado próximas al área de incisión. 2. Corrosión presente en incisión de recubrimiento en grado 2 – G. Sin presencia de corrosión en superficie pintada. 3. Espesor de película promedio sin variaciones significativas con respecto al inicio de la evaluación. 		
RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN			Edwin Guillén, Karen Gallegos		
SUPERVISOR			Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez		

La comparación del desempeño de los sistemas de recubrimiento en condiciones iniciales, y posteriores condiciones aceleradas de corrosión en el ambiente geotérmico a causa de la incisión realizada, brinda información y resultados gráficos (Véase Tabla 4.3) donde se denota una satisfactoria preparación y aplicación de cada sistema de recubrimiento en base a la obtención de mediciones de espesores de película seca dentro de intervalos recomendados y propuestos por la norma ISO 12944 – 08.

La respuesta de ambos sistemas a la exposición del ambiente geotérmico en lo que respecta a protección anticorrosiva en condiciones aceleradas hacen constar el desempeño superior que ofrece el sistema de recubrimiento con capa anticorrosiva de resina epóxica en comparación con la capa anticorrosiva alquídica, debido a que cuenta con una excelente adherencia al sustrato metálico (Véase Tabla 4.1), mayor resistencia química, dureza, y un espesor de película seca más alto (Véase Tabla 4.3) en comparación del sistema de capa anticorrosiva alquídica.

Al exponer los sistemas a condiciones aceleradas mediante una incisión, se evidencia que el sistema de resina alquídica presenta una mayor susceptibilidad a la corrosión en comparación con el sistema de resina epóxica, como se detalla en la Tabla 4.4. La incisión, que permite la infiltración de humedad y diversos contaminantes del ambiente geotérmico, provoca la formación de ampollas en ambos recubrimientos. Se destaca que la capa anticorrosiva epóxica no muestra desgaste bajo estas ampollas, a diferencia de la capa anticorrosiva alquídica, que presenta evidencia de corrosión debajo de ellas. Este fenómeno refuerza la eficacia y resistencia superior del sistema de resina epóxica en condiciones corrosivas acentuadas.

Realizando la comparación entre el punto final y punto inicial de las superficies pintadas, se tiene como resultado que la variación de los espesores de película seca no es muy significativa, se cuenta con una disminución de 0.46 mils para el sistema 1 y de 0.41 para el sistema 2 en el tiempo de exposición de 1656 horas. Esto, debido a que el tiempo de exposición de los sistemas está muy por debajo de la durabilidad esperada.

CONCLUSIONES

1. Una satisfactoria preparación de superficie es parte esencial de un sistema de recubrimiento de pinturas anticorrosivas, puesto que, asegura una correcta aplicación, adhesión, y, por lo tanto, durabilidad de los recubrimientos anticorrosivos.
2. El grado de corrosión evaluado en estructuras y equipos de la Central Geotérmica en estudio destaca la necesidad de intervenir en la prevención de la corrosión mediante la aplicación de un sistema de mayor desempeño al utilizado actualmente.
3. Los recubrimientos anticorrosivos son una alternativa efectiva para la prevención de la corrosión en la industria geotérmica, especialmente para infraestructuras expuestas a las condiciones ambientales del entorno.
4. El monitoreo continuo y la evaluación del desempeño de los recubrimientos estudiados permiten destacar las diferencias de efectividad en lo que respecta a la protección anticorrosiva de cada sistema para el ambiente corrosivo en que se han expuesto. Destaca de manera significativa el sistema de capa anticorrosiva de resina epóxica, puesto que sus características de resistencia química, dureza y durabilidad junto a la protección barrera y alto espesor de película seca que se obtiene al conformar el sistema con el acabado de esmalte poliuretano, aseguran un excelente desempeño para este tipo de ambiente corrosivo, siendo superior en comparación con el sistema de capa anticorrosiva alquídica.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un mayor enfoque en el estudio y la aplicación de preparación de superficie de mayor especialización, tales como limpieza con chorro abrasivo (arena o granalla) según norma SSPC – SP5/SP6/SP7/SP10.
2. Para lograr una evaluación completa del desempeño de los sistemas de recubrimiento, es esencial ampliar el periodo de exposición, así como el tiempo dedicado a estudio, lo cual permitirá analizar la durabilidad en función del desgaste y disminución de espesor de película seca, así como el grado de corrosión que se presente.
3. Es recomendable realizar siempre una evaluación exhaustiva del grado de exposición al ambiente corrosivo al cual se encuentran sometidas las estructuras a proteger. Esta evaluación se presenta como un paso fundamental en el marco de la investigación, proporcionando información esencial que orientará de manera efectiva la selección de recubrimientos anticorrosivos apropiados.
4. Se debe considerar la viabilidad económica con la que se cuenta para realizar una selección de recubrimientos acorde a las necesidades y disponibilidad de recursos de la Central Geotérmica en estudio, puesto que, las diferencias del desempeño de protección entre un anticorrosivo de resina epóxica con respecto a uno de resina alquídica conllevan también una diferencia considerable entre costos.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. (2012). *Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces* (ASTM D610 – 08). Estados Unidos.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test* (ASTM D3359 – 17). Estados Unidos.
- Comex. (s. f.). *Recubrimiento polisiloxano X-53*. México. Recuperado el 15 de agosto, 2023, de <https://www.comex.com.mx/mantenimiento-alto-desempeno/x-53>
- Diario El Salvador. (2022, 28 de septiembre). *El Salvador será sede de la cumbre mundial de países geotérmicos*. [Fotografía]. *Las energías renovables generan el 98 % de la electricidad en Costa Rica*. <https://diarioelsalvador.com/el-salvador-sera-sede-de-la-cumbre-mundial-de-paises-geotermicos/278283/>
- Drake Plastics. (s.f.). *Polyphenylene Sulfide (PPS)*. Texas, Estados Unidos. Recuperado el 15 de agosto, 2023, de <https://drakeplastics.com/ultra-high-performance-plastic-materials-solutions-for-your-most-demanding-applications/polyphenylene-sulfide-pps/>
- Fuentes, P. (s. f.). *Recubrimientos de alto desempeño para mantenimiento industrial*. [Imagen adjunta] [Publicar]. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/recubrimientos-de-alto-desempe%C3%B1o-para-mantenimiento-pedro-fuentes/?originalSubdomain=es>
- Gimeno Pérez, M. J. (2016). *Evaluación de recubrimientos anticorrosivos mediante técnicas electroquímicas. Correlación con niebla salina*. [Tesis de posgrado]. Universitat Jaume I. <http://hdl.handle.net/10803/404353>

Goytia, O, (2022, 06 de enero). ¿Qué son los recubrimientos epóxicos y sobre qué se aplican? *Cementos Torices*. México.
<https://cementostorices.com/blog/construccion/sabes-que-son-los-recubrimientos-epoxicos/>

Gragon Industrial. (s. f.). *Recubrimiento de Alto Desempeño*. México. Recuperado el 13 de agosto, 2023, de <http://gragonindustrial.com/clasificacion/8/recubrimiento-de-alto-desempeno>

GROUP GCC. (2023, 09 de mayo). *Norma ISO 12944:2017 Protección anticorrosiva*. Barcelona, España. <https://groupgcc.es/blogs/news/norma-iso-12944-proteccion-anticorrosiva>

Karlsdóttir, S. N. (2012). Corrosion, scaling and material selection in geothermal power production. In *Geothermal Energy* (Vol.7, pp. 241-259). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00706-X>

Karlsdottir, S. N. Hjaltason, S. & Ragnarsdóttir, K. (2017). Corrosion behavior of materials in hydrogen sulfide abatement system at Hellisheiði geothermal power plant. *Geothermics*, 70, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.06.010>

Khasani, Kusmono, Utami, P. I. & Budiarto, R. (2021). Corrosion in geothermal facilities: Their causes, effects, mitigation, and worldwide cases. In *Nucleation and Atmospheric Aerosols*. American Institute of Physics.
<https://doi.org/10.1063/5.0066755>

Lichti, K. & Wilson, P. (1999). Corrosion in New Zealand Geothermal Systems. *Corrosion Reviews*, 17(3-4), 181-204. <https://doi.org/10.1515/CORRREV.1999.17.3-4.181>

- Mozás, E. (2020, 20 de julio). Protección de estructuras de acero. Evaluación de la categoría de corrosividad y selección de sistemas de Pintura. UNE-EN ISO 12944. *ITAINNOVA Instituto Tecnológico de Aragón*. Aragón, España. <https://www.itainnova.es/blog/materiales/proteccion-de-estructuras-de-acero-evaluacion-de-la-categoria-de-corrosividad-y-seleccion-de-sistemas-de-pintura-une-en-iso-12944/>
- Mundhenk, N. Huttenloch, P., Sanjuan, B., Kohl, T., Steger, H., & Zorn, R. (2013). Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant. *Corrosion Science*, 70, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.01.003>
- Nogara, J. (2017). Corrosion in geothermal environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.098>
- Pires Giovanetti Guardia. (s.f). *Revestimientos de alto desempeño*. República del Perú. Recuperado el 13 de agosto, 2023, de <https://pires.com/service/revestimientos-alto-desempeno/>
- PROMETAL (2023, 22 de septiembre). *Qué es un recubrimiento epóxico y cómo funciona*. México. <https://blog.recubrimientos-prometal.mx/que-es-un-recubrimiento-epoxico-y-como-funciona>
- PROMETAL. (2023, 22 de septiembre). *Tipos de recubrimientos industriales y sus características*. México. <https://blog.recubrimientos-prometal.mx/tipos-recubrimientos-industriales-caracteristicas>
- PROMETAL. (2023, 24 de septiembre). *Recubrimientos de poliuretano, la mejor opción para proteger superficies exteriores*. México. <https://blog.recubrimientos-prometal.mx/recubrimientos-esmaltes-poliuretanos>

- PROMETAL. (2023, 25 de septiembre). *Recubrimientos y esmaltes alquídicos: la guía completa para una protección duradera*. México. <https://blog.recubrimientos-prometal.mx/recubrimientos-esmaltes-alquidalicos>
- QuimiNet. (2019, 15 de octubre). *Ventajas de los recubrimientos de fluoropolímeros*. México. <https://www.quiminet.com/articulos/ventajas-de-los-recubrimientos-de-fluoropolimeros-4427553.htm>
- Reinnor S.A.L. (2017, 26 de octubre). *Los Recubrimientos y su importancia en Anticorrosivos*. España. <https://www.reinnor.com/los-recubrimientos-y-su-importancia-en-anticorrosivos/>
- Stáhl, G., Pátzay, G., Weiser, L., & Kálmán, E. (2000). Study of calcite scaling and corrosion processes in geothermal systems. *Geothermics*, 29(1), 105–119. [https://doi.org/-10.1016/s0375-6505\(99\)00052-8](https://doi.org/-10.1016/s0375-6505(99)00052-8)
- Tomarov, G. V., Kolesnikov, D. V., Semenov, V. N., Podverbny, V. M., & Shipkov, A. A. (2015). Prevention of corrosion and scaling in geothermal power plants equipment. *Prevention*, 19, 25. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/27032.pdf>
- Tomero, C.Z (2019). *Recubrimientos anticorrosivos inteligentes y medioambientales aceptables basados en nanopartículas de sílice [Tesis de posgrado]*. Universidad Complutense de Madrid. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/17158>
- Tristancho, J. L., Holguín, M. P., & Ramírez, L. C. (2015). Corrosión a alta temperatura de los recubrimientos metálicos NiCr y NiCrBSiFe depositados mediante proyección térmica. *Prospectiva*, 13(1), 32. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i1.357>

ANEXOS

Anexo 1. Espesores de película seca

Tabla A.1. Medición de espesor de película seca para ambos sistemas de recubrimiento.

Sistema	Fecha de visita	Espesor de película seca (EPS) (mils)			
1	01/09/23 (capa primaria anticorrosiva)	11.4	9.1	10.8	10.3
		10.1	8.6	6.6	11.2
		8.7	9.3	6.4	8.1
		9.7	8.6	6.4	9.5
		10.3	6.6	8.2	8.3
		EPS promedio:			
2	01/09/23 (capa primaria anticorrosiva)	3,2	3,2	3,2	3,2
		3,2	3,2	3,2	3,2
		3,2	3,2	3,2	3,2
		3,5	3,5	3,5	3,5
		3,5	3,5	3,5	3,5
		EPS promedio:			
1	07/09/23	12.6	15.0	12.9	12.6
		11.3	10.5	10.9	10.7
		11.0	11.6	11.8	10.9
		10.7	11.1	11.2	10.9
		9.9	11.7	12.0	11.9
		EPS promedio			
2	07/09/23	5.2	6.2	6.6	6.8
		5.4	6.2	5.8	5.0
		5.1	6.0	5.1	5.3
		5.7	4.9	4.8	6.1
		6.2	6.8	6.3	5.7
		EPS promedio			

Continúa

*Tabla A.1. Medición de espesor de película seca para ambos sistemas de recubrimiento.
(Continuación)*

Sistema	Fecha de visita	Espesor de película seca (EPS) (mils)			
1	21/09/23	15.3	11.5	11.4	12.9
		9.0	11.6	13.6	11.6
		12.0	11.7	9.5	11.5
		10.3	12.2	11.9	9.4
		10.8	10.3	11.4	13.0
		EPS promedio:			
2	21/09/23	5.6	6.4	6.1	6.6
		5.8	5.7	4.7	5.3
		6.2	5.8	5.7	5.4
		5.2	5.6	6.0	5.0
		5.2	6.6	5.7	6.0
		EPS promedio:			
1	29/09/23	14.6	11.2	10.2	9.8
		10.1	12.0	12.7	11.1
		11.4	10.3	9.4	11.4
		10.5	11.7	12.9	10.8
		10.0	10.1	10.6	10.1
		EPS promedio:			
2	29/09/23	5.9	6.2	6.0	6.6
		5.9	5.5	5.7	5.9
		5.1	5.4	4.5	4.3
		5.9	5.1	5.5	6.0
		4.5	5.8	6.5	5.6
		EPS promedio:			

Continúa

*Tabla A.1. Medición de espesor de película seca para ambos sistemas de recubrimiento.
(Continuación)*

Sistema	Fecha de visita	Espesor de película seca (EPS) (mils)			
1	20/10/23	10.1	11.5	11.9	12.0
		11.4	11.6	9.9	11.2
		10.5	11.1	10.8	10.3
		11.9	11.4	10.8	9.5
		11.0	10.4	11.8	11.5
		EPS promedio:			
2	20/10/23	5.6	4.9	5.3	5.1
		6.5	5.4	5.2	4.7
		5.8	5.8	5.4	4.4
		5.1	4.9	5.9	5.6
		6.3	4.8	5.4	5.5
		EPS promedio:			
1	16/11/23	10.8	11.1	11.8	11.5
		10.5	11.8	12.9	12.3
		10.1	10.8	10.6	12.7
		9.1	10.2	12.5	12.0
		9.1	10.0	12.8	9.9
		EPS promedio:			
2	16/11/23	5.4	5.3	5.8	5.4
		5.8	5.8	5.1	5.7
		5.8	5.9	5.3	5.6
		5.1	4.6	5.1	5.0
		5.5	4.7	4.9	5.2
		EPS promedio:			

Anexo 2. Observaciones de visitas de monitoreo e inspección intermedias

Tabla A2.1. Seguimiento de visitas para inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento.

REPORTE DE VISITAS DE MONITOREO EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO									
NORMAS UTILIZADAS		ASTM D610-08 y SSPC-PA-2							
Nº DE CAPAS	2	FECHA	21/09/2023	TIEMPO TRANSCURRIDO	336 horas				
Sistema 1 			Sistema 2 						
<table border="1"> <tr> <td>EPS Promedio</td> <td>11.54 mils</td> </tr> </table>		EPS Promedio	11.54 mils	<table border="1"> <tr> <td>EPS Promedio</td> <td>5.73 mils</td> </tr> </table>		EPS Promedio	5.73 mils		
EPS Promedio	11.54 mils								
EPS Promedio	5.73 mils								
OBSERVACIONES									
Sistemas de recubrimiento en estado óptimo; los espesores de película seca se encuentran dentro del rango recomendado, sin evidencia de corrosión. Además, se mantiene el color blanco y brillo característico del acabado de esmalte poliuretano.									
RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN			Edwin Guillén, Karen Gallegos						
SUPERVISOR			Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez						

Tabla A2.2. Seguimiento de visitas para inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento.

<h2 style="text-align: center;">REPORTE DE VISITAS DE MONITOREO</h2> <p style="text-align: center;">EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO</p>					
NORMAS UTILIZADAS		ASTM D610-08 y SSPC-PA-2			
Nº DE CAPAS	2	FECHA	29/09/2023	TIEMPO TRANSCURRIDO	504 horas
Sistema 1			Sistema 2		
					
EPS Promedio		11.05 mils		EPS Promedio	
				5.60 mils	
OBSERVACIONES					
<p>Sistemas de recubrimiento en estado óptimo; los espesores de película seca se encuentran dentro del rango recomendado, sin evidencia de corrosión. Se realizó una incisión en cada sistema, con el objetivo de acelerar el proceso de corrosión.</p>					
RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN			Edwin Guillén, Karen Gallegos		
SUPERVISOR			Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez		

Tabla A2.3. Seguimiento de visitas para inspección y monitoreo final del desempeño de protección contra la corrosión de sistemas de recubrimiento.

REPORTE DE VISITAS DE MONITOREO EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA UTILIZANDO RECUBRIMIENTOS DE ALTO DESEMPEÑO					
NORMAS UTILIZADAS		ASTM D610-08 y SSPC-PA-2			
Nº DE CAPAS	2	FECHA	20/10/2023	TIEMPO TRANSCURRIDO	1008 horas
Sistema 1			Sistema 2		
					
					
EPS Promedio		11.03 mils		EPS Promedio	
				5.38 mils	
OBSERVACIONES					
<p>Se aprecia la presencia de ampollas en ambos recubrimientos. Al mismo tiempo, se observa una ligera manifestación de corrosión en los extremos de las incisiones realizadas. Los espesores de película seca se siguen encontrando dentro del rango recomendado.</p>					
RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN			Edwin Guillén, Karen Gallegos		
SUPERVISOR			Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez		