

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



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN:

INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA CORROSIÓN INDUSTRIAL

**EVALUACIÓN DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODO DE SACRIFICIO EN
ESTRUCTURAS METÁLICAS DEL MUELLE DEL PUERTO LA LIBERTAD**

PRESENTADO POR:

FERNANDO JAVIER GALLARDO VÁSQUEZ
WILFREDO JOSÉ HENRÍQUEZ RAUDALES

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAUL ALEXANDER FABÍAN 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

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN:

INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA CORROSIÓN INDUSTRIAL
**EVALUACIÓN DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODO DE SACRIFICIO EN
ESTRUCTURAS METÁLICAS DEL MUELLE DEL PUERTO LA LIBERTAD**

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

FERNANDO JAVIER GALLARDO VÁSQUEZ

WILFREDO JOSÉ HENRÍQUEZ RAUDALES

DOCENTE ASESOR:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2023

Trabajo de Grado aprobado por

DOCENTE ASESOR:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

DEDICATORIA

Quisiera agradecer, en primer lugar, a Dios por permitirme alcanzar este punto de mi vida luego de tanto tiempo, en donde, por fin puedo decir que culmina mi proceso universitario y con creces, a mi familia, especialmente a mis padres, que siempre han significado un soporte crucial en mi vida, a mis hermanos, por siempre mostrar interés y admiración hacia mí.

A todos mis amigos y mi ser querido, por el apoyo incondicional que siempre me han mostrado, por su tiempo y dedicación, con quienes he compartido un sinfín de buenos momentos y que incluso en la adversidad siempre hemos salido adelante juntos. Agradecer a la Universidad de El Salvador, especialmente, a los catedráticos de la escuela de Ing. Química e Ing. De Alimentos por orientarme de la mejor forma y ahora poder enfrentarme a la vida laboral.

Para finalizar, pero no por eso menos importante, quiero agradecer infinitamente a mi Tía Nelly, que lamentablemente ya no está presente en forma física conmigo, pero que definitivamente, lograr esta meta y llegar a ser la persona que soy ahora, es gracias a todos los momentos que pude compartir con ella.

Fernando Javier Gallardo Vásquez

DEDICATORIA

A toda mi familia que ha sido un constante apoyo en este arduo viaje, enseñándome a tener disciplina, escucharme en aquellos momentos de dificultad y sobre todo a impulsarme a ser mejor cada día y alcanzar esta meta.

A mis amigos, tanto dentro como fuera de la facultad de ingeniería, en especial con aquellos que compartimos noches de reuniones, estudio, y también de juegos y risas.

Wilfredo José Henríquez Raudales

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le agradecemos a Dios, por guiarnos durante todo este proceso de formación académica.

A nuestras familias, por su inquebrantable apoyo, comprensión y amor incondicional a lo largo de nuestras vidas. Por ser una fuente inagotable de inspiración, nunca abandonarnos y al mismo tiempo, por creer en nuestras capacidades, aún en los momentos más difíciles, por ser el pilar de nuestros hogares y de esta forma, poder concentrarnos en nuestros estudios.

A nuestros amigos y seres queridos, con quienes compartimos muchas risas, noches de desvelo, momentos llenos de estrés, en los cuales gracias a los ánimos que hasta el día de hoy nos siguen brindando, nos ayudan a mantenernos enfocados y motivados más que nunca. Gracias por hacer que nuestra experiencia universitaria, fuera la más divertida.

A la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, por aportar el entorno propicio para la formación de excelentes profesionales dedicados a la investigación, especialmente, le agradecemos a los docentes de la Escuela de Ingeniería Química y Alimentos, que brindaron sus conocimientos en nuestra formación académica para poder estar hoy aquí.

A nuestro supervisor, Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez, por su orientación y apoyo a lo largo del curso de especialización, por brindarnos valiosas sugerencias y consejos para dar forma a esta investigación y así poder entregar un buen trabajo final

Agradecemos enormemente el apoyo que nos brindó el personal administrativo de CORSATUR en el desarrollo del proyecto de investigación, en especial, le agradecemos a la Arq. Martha Calderón, la Arq. Martha de Maldivieso y al Lic. Erick Aguilar, por proveer los permisos y solicitudes necesarios para realizar el montaje de la propuesta de protección catódica en el muelle del Puerto La Libertad.

Finalmente, agradecemos el esfuerzo realizado por Javier Córdoba, gracias a que por su ayuda fue realidad la puesta en marcha de buena parte de todo este proyecto y por haber sido el contacto con las diferentes entidades que permitieron la construcción de la pieza a experimentar.

RESUMEN

La Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio es un método anticorrosivo el cual no suele ser muy aplicado en El Salvador, pero que, realmente representa una aplicación de ingeniería muy importante para prevenir la corrosión en estructuras metálicas de instalaciones y equipos, especialmente, aquellos ubicados en ambientes marítimos y costeros, garantizar la integridad estructural de estos, la seguridad de los usuarios y también, permite reducir los costos el mantenimiento. El objetivo de esta investigación es poder evaluar visualmente la eficiencia de la protección catódica por ánodos de sacrificio de estructuras metálicas expuestas a entornos marinos corrosivos como lo son los pasamanos del muelle artesanal del Puerto La Libertad, los cuales deben propiciar la seguridad de los visitantes del lugar.

Se llevó a cabo una evaluación preliminar del nivel de corrosión de la estructura elegida a través de un análisis comparativo utilizando fotografías de referencia estándar provistas por la norma SSPC-VIS 2 y de esta forma, seleccionar el método anticorrosivo adecuado que se necesitaría para poder hacer una protección efectiva de los pasamanos, en dónde, finalmente, se decidió utilizar un ánodo de zinc puro para corroborar el desempeño de la propuesta de protección catódica. Se utilizaron la Norma BS EN ISO 13174:2012 y NF EN 12496:2013 como referencias fundamentales para la ejecución de los cálculos de las especificaciones del diseño teórico del ánodo, estableciendo los parámetros esenciales para el proceso de fabricación y montaje de la pieza.

Una vez, aprobado el diseño por el personal administrativo de CORSATUR y fabricada la pieza, se procedió con el proceso de preparación de la superficie del Ánodo, haciendo uso de las fotografías de referencia contempladas en la normativa SSPC-VIS 3, con la cual, se determinaron las herramientas adecuadas a utilizar para remover toda interferencia superficial en los pasamanos que afectara los resultados esperados de la protección que proporcionaría el ánodo de sacrificio y luego, proceder con la instalación de dicha pieza.

Posteriormente, se llevó a cabo un seguimiento semanal, en el cual, se documentó detalladamente el estado del ánodo de sacrificio y del pasamanos, destacando cualquier indicio de corrosión durante el período de observación y al concluir dicho seguimiento, se procedió a retirar el ánodo de sacrificio del pasamanos con el propósito de corroborar la pérdida de masa en el ánodo realizando una comparación entre el peso inicial y final de la pieza para poder evaluar la eficacia del sistema de protección catódica propuesto, obteniendo resultados positivos, lo que indica que el ánodo fabricado posee la capacidad para preservar la integridad del pasamanos y que en el caso de ser aplicado a lo largo de toda la extensión del muelle del Puerto La Liberta, podría alargar la vida útil de las estructuras metálicas que componen los pasamanos y por consiguiente, priorizar la seguridad de los visitantes del lugar.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL	2
1.1. Descripción del Proyecto.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Limitantes.....	3
1.4. Resultados Esperados.....	4
1.5. Justificación.....	5
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Corrosión.....	7
2.1.1. Reacción Óxido – Reducción.....	8
2.1.2. Celdas Electroquímicas	8
2.1.3. Tipos de corrosión.....	9
2.1.4. Tipos de Ambientes Corrosivos.....	11
2.2. Métodos anticorrosivos.....	14
2.3. Protección Catódica por Ánodo de Sacrificio.....	18
2.3.1. Selección del material.....	19
2.3.2. Alteración del Ambiente	21
2.3.3. Diseño del Ánodo.....	22
2.3.4. Métodos de fijación.....	23
2.4. Aplicación de la Protección Catódica por Ánodo de Sacrificio.....	23
2.4.1. Antecedentes históricos del uso de métodos anticorrosivos.....	23
2.4.2. Sistemas de Protección Catódica en Latinoamérica.....	25
2.4.3. Uso de ánodos de sacrificio en El Salvador.....	25
2.5. Caso de estudio: Estructuras metálicas del Muelle del Puerto La Libertad.....	26
2.5.1. Generalidades de lugar	26
2.5.2. Análisis de la situación actual.....	26
2.6. Normativas de referencia.....	28
2.6.1. Norma SSPC-VIS 2.....	28
2.6.2. Norma SSPC-VIS 3.....	28
2.6.3. Norma ISO 13174:2012 “Protección catódica de instalaciones de puerto”	29
2.6.4. Norma EN12496:2013 “Ánodos galvánicos para protección catódica en agua de mar y lodo salino”	30
2.6.5. Normativa NRF-047-PEMEX-2007 “Diseño, Instalación y Mantenimiento de los Sistemas de Protección Catódica”	30
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS	31
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO.....	31

3.1.1.	Búsqueda de información sobre la Corrosión y el Puerto de La Libertad.....	31
3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	35
3.2.1.	Selección del método adecuado de protección contra la corrosión.....	35
3.3.	DISEÑO TEÓRICO DEL ÁNODO DE SACRIFICIO.....	37
3.3.1.	Área de trabajo	39
3.3.2.	Densidad de Corriente.....	41
3.3.3.	Peso y volumen neto mínimo del ánodo.....	41
3.3.4.	Diseño teórico final del Ánodo.....	43
3.4.	DISEÑO EFECTIVO DEL ÁNODO DE SACRIFICIO.....	46
3.4.1.	Instalación del Ánodo de Sacrificio.....	48
	CAPITULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFIA.....	58
	ANEXOS.....	60
	Anexo 1. Hoja técnica del zinc utilizado en la fabricación del ánodo de sacrificio.....	60
	Anexo 2. Indicadores de la Norma SSPC – VIS 3.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Agresividad de la atmósfera.....	12
Tabla 2.2.	Tasa de ataques de corrosión en metales seleccionados y en diferentes atmosferas.....	12
Tabla 2.3.	Categorías de Medios Ambientes Corrosivos y ejemplos de Medio Ambiente.....	13
Tabla 2.4.	Serie Galvánica de metales y aleaciones comunes en suelos neutros y agua.....	19
Tabla 2.5.	Fórmulas de resistencia de mayor uso en la protección catódica en estructuras sumergidas.....	22
Tabla 3.1.	Escala y Descripción de los Grados de Corrosión.....	32
Tabla 3.2.	Composición química para ánodos de zinc en % peso, en aleaciones.....	36
Tabla 3.3.	Especificaciones teóricas del diseño del ánodo de sacrificio propuesto.....	38
Tabla 3.4.	Diseños típicos de densidades de corriente para la protección de acero al desnudo.....	41
Tabla 3.5.	Propiedades Electroquímicas de los Ánodos de Zinc a temperatura ambiente (5 °C – 25 °C)	45
Tabla 3.6.	Especificaciones del diseño efectivo del ánodo de sacrificio fabricado.....	47
Tabla 4.1.	Seguimiento visual del ánodo del Zinc y el pasamanos del muelle la Libertad....	52
Tabla 4.2.	Estado final del ánodo de Zinc.....	53
Tabla 4.3.	Estado del pasamanos después de retirar ánodo de sacrificio.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Indicios de corrosión en la estatua del monumento a Thomas Jefferson.....	7
Figura 2.2.	Principales componentes de una celda electroquímica.	9
Figura 2.3.	Tipos de Corrosión.....	11
Figura 2.4.	Aplicación de un producto Inhibidor en tuberías de acero inoxidable.....	15
Figura 2.5.	Ejemplo de aplicación de recubrimiento del tipo barrera.	16
Figura 2.6.	Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio en agua marina.	17
Figura 2.7.	Sistema de Protección Catódica por ánodo de Sacrificio.....	18
Figura 2.8.	Estado de los pasamanos de Puerto La Libertad, tomada el 31 de mayo de 2023.	27
Figura 2.9.	Normativa SSPC-VIS 2: Método de evaluación estándar del grado de oxidación de superficies de acero pintadas, utilizada para la evaluación de la superficie de los pasamanos del muelle del Puerto la Libertad.....	28
Figura 2.10.	Normativa SSPC-VIS 3: Guía y referencia fotográfica para superficies de acero preparadas a mano y limpieza con herramienta mecánica, utilizada para determinar las condiciones iniciales para hacer el pretratamiento del área donde se instalarán el ánodo.....	29
Figura 3.1.	Comparación del pasamanos del muelle artesanal del Puerto la Libertad con Corrosión de grado 1-P en blanco y negro, de la normativa SSPC-VIS 2. Visita realizada el 31 de mayo de 2023.	33
Figura 3.2.	Comparación del pasamanos del muelle artesanal del Puerto la Libertad con Corrosión de grado 1-P en blanco y negro, de la normativa SSPC-VIS 2. Visita realizada el 22 de septiembre de 2023.....	34
Figura 3.3.	Diagrama esquemático que ilustra el beneficio económico del uso conjunto del recubrimiento y protección catódica.....	37
Figura 3.4.	Esquematización de la vista frontal de una sección completa del pasamanos del Muelle del Puerto La Libertad.....	39

Figura 3.5.	Esquematación de la vista frontal y de perfil del pasamanos con el ánodo como abrazadera.	43
Figura 3.6.	Fase de secado de la mitad del ánodo de zinc posterior al moldeado en caliente.	46
Figura 3.7.	Resultado final de la fabricación del ánodo de zinc.	47
Figura 3.8.	Comparación entre las condiciones iniciales vistas en los pasamanos y la Norma SSPC-VIS 3.	50
Figura 3.9.	Comparativa entre la superficie del área del pasamanos ya preparada.....	50
Figura 3.10.	Instalación del ánodo de sacrificio en pasamanos del muelle del Puerto La Libertad.	51

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ley de Ohm.....	22
Ecuación 2: Área a proteger por ánodo de sacrificio.....	40
Ecuación. 3: Área de las secciones del pasamanos del muelle.....	40
Ecuación. 4: Suma total de áreas del pasamanos del muelle.....	40
Ecuación 5: Peso neto mínimo del ánodo de sacrificio.....	42
Ecuación 6: Intensidad de corriente de mantenimiento total.....	42
Ecuación 7: Fórmula de densidad.....	43
Ecuación 8: Fórmula del volumen de un cilindro hueco.....	43
Ecuación 9: Ecuación de McCoy para la resistencia de un ánodo.....	44
Ecuación 10: Fórmula del área de un cilindro hueco del ánodo de sacrificio.....	44
Ecuación 11: Fórmula de la intensidad del ánodo de sacrificio.....	44
Ecuación 12: Fórmula del diferencial de potencial.....	45
Ecuación 13: Fórmula de la vida útil del ánodo de sacrificio.....	45
Ecuación 14: Fórmula de la cantidad total de ánodos de sacrificio a usar.....	46

INTRODUCCIÓN

La corrosión se genera a partir de una serie de reacciones electroquímicas entre un metal y su entorno, en donde, el metal pierde masa por la formación de óxidos a nivel superficial, hasta culminar con la degradación interior de la pieza a nivel granular. Esta problemática se manifiesta con mayor rapidez en ambientes con altas concentraciones de iones y elevados porcentajes de humedad, por ejemplo, en puertos y muelles presentes en zonas costeras.

En la costa del departamento de La Libertad, se ubica el muelle del puerto de la zona, en donde al recorrer la extensión de este, se puede apreciar el embarque de barcos pesqueros y la vista de la costa desde 300 metros mar adentro y a una altura promedio de 8 metros sobre el nivel del agua, sin embargo, parte de la estructuras metálicas que brindan seguridad a los visitantes están deterioradas, especialmente los pasamanos que cuentan con múltiples segmentos oxidados de acuerdo con la norma SSPC-VIS-2, ocasionando que la mayoría de estos sean cortados o removidos completamente hasta el momento en que se lleven a cabo procesos de mantenimiento en toda el área.

El periodo de tiempo en que se realiza dicha labor varía dependiendo de la gravedad de la situación y del presupuesto que maneja la entidad administrativa del lugar, por lo que, tras la preparación de superficies de acuerdo con la norma SSPC-VIS-3, con la evaluación de la protección catódica utilizando ánodos de sacrificio, siguiendo el proceso de diseño e instalación de un ánodo de zinc en forma de anillo descrito en la norma NRF-047-PEMEX-2007 y bajo las condiciones climáticas actuales descritas en la norma ISO 13174:2012, se ofrece una mayor protección de la infraestructura que dure el mayor tiempo posible, con tal de evitar el incremento en los costos por mantenimiento y de limpieza constantes del área, generados principalmente por la corrosión de las estructuras metálicas.

CAPITULO I. MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

1.1. Descripción del Proyecto

Para propiciar la seguridad de los visitantes del Puerto de La Libertad, toda la extensión del muelle cuenta con pasamanos de casi un metro de altura, cuya función es la de restringir el paso hacia los bordes de la estructura principal de este, porque a una distancia de 300 metros desde la costa, el mar presenta una profundidad promedio de 15 metros a los que se le suman los 8 metros que la estructura del muelle se eleva sobre la superficie del agua, cifras que sugieren un alto riesgo a la seguridad e integridad de cualquier personas si llegase a caer desde dicha altura, además, del impredecible comportamiento de la marea a esa distancia de la costa.

Con el objetivo de ampliar las instalaciones del complejo turístico “El Malecón” se movilizó el comercio artesanal a una instalación exclusiva ubicada en la costa, cuando antes se encontraban distribuido a lo largo de la plataforma principal del muelle, además, se inició la construcción de un nuevo muelle enfocado principalmente en el turismo de la zona, dejando el muelle artesanal para el uso de los pescadores y el atracó de sus barcos, lo que generó que el mantenimiento de las estructuras metálicas que fomentaban la seguridad de los visitantes del muelle artesanal disminuyera considerablemente y se puede evidenciar por el estado de oxidación presente en los pasamanos y el resto de servicios públicos del área.

Sin embargo, el atractivo turístico del lugar no desaparece, por lo que, es de suma importancia velar por la seguridad de cada uno de los visitantes que recorren la plataforma del muelle. Actualmente, varios segmentos de los pasamanos presentan oxidación a un nivel avanzado, a tal punto, que han sido removidos por completo o reforzados superficialmente con recubrimiento mediante el uso de pinturas, pero ignorando el estado superficial de la pieza metálica.

Esto se debe a que las zonas costeras son uno de los ambientes más corrosivos que existen, debido al elevado porcentaje de humedad y la presencia de grandes concentraciones de sales que entran en contacto con la superficie de las estructuras metálicas. En concordancia con dicha premisa, el tipo de clima presente en El Salvador, acelera el deterioro de las estructuras metálicas en general, debido a que favorece el aumento de la temperatura en verano y la prolongación de las lluvias durante el invierno, las cuales a su vez, en las costas del departamento de La Libertad incrementan la actividad brusca de la marea, mojando toda el área del muelle pese a lo elevado de este, lo que exige una elevada inversión en el cuidado y la limpieza constante del área para evitar mayores costos por la restauración o sustitución total de los servicios de seguridad y alumbrado.

Con el objetivo de aumentar la resistencia contra la corrosión de dichas estructuras metálicas del muelle y disminuir el costo por mantenimiento a largo plazo, se sugiere la aplicación de protección

catódica por ánodo de sacrificio de zinc, debido a que dicho método implica un proceso de fácil instalación, bajo costo de mantenimiento y que garantiza una mayor vida útil de las piezas metálicas, en donde un metal con mayor resistencia (ánodo) se adhiere a la superficie de la estructura metálica que se desea proteger, en este caso, a un segmento de los pasamanos del muelle y de esta forma evitar que estos no se corroan fácilmente, reduciendo así la posibilidad de accidentes en la zona generados por la falta de sistemas de seguridad adecuados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar una propuesta de diseño para la protección contra la corrosión de las estructuras metálicas del muelle del Puerto La Libertad aplicando el método de Protección Catódica utilizando un ánodo de sacrificio de Zinc.

1.2.2. Objetivos específicos

- I. Monitorear los efectos de la corrosión en las estructuras metálicas del muelle del Puerto La Libertad ocasionados por las condiciones ambientales de la costa del departamento de La Libertad, de acuerdo con los parámetros establecidos por la Norma SSPC-VIS-2.
- II. Evaluar la factibilidad del uso de Zinc como propuesta de ánodo de sacrificio en el diseño de protección contra la corrosión de las estructuras metálicas del muelle del Puerto La Libertad mediante un análisis comparativo con otros metales.
- III. Ejecutar el diseño e instalación de un ánodo de sacrificio de Zinc en una sección del pasamanos del muelle del Puerto La Libertad, tomando como base el método propuesto por la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE).
- IV. Analizar el desempeño de la propuesta de Protección Catódica aplicada a una sección del pasamanos del muelle del Puerto La Libertad, mediante la comparación de las condiciones iniciales y finales del ánodo de sacrificio de zinc utilizado.

1.3. Limitantes

- I. Los pasamanos del muelle del Puerto La Libertad poseen un alto nivel de oxidación, a tal punto que varias secciones de estos, a lo largo de toda la extensión del lugar, han sido cortados o retirados completamente, por lo que, el área de trabajo en donde se llevó a cabo la instalación del ánodo es una de las secciones del pasamanos con menor grado de oxidación de acuerdo con la evaluación visual utilizando los indicadores de la Norma SSPC-VIS-2.

- II. Al ser el muelle del Puerto La Libertad un sitio turístico abierto a todo público, el diseño del ánodo se adecuó para ser lo más discreto posible, de tal forma, que las constantes visitas de diversas personas al lugar y las actividades de los trabajadores de la zona, cómo pescadores, no interfirieran en los resultados del proyecto de investigación, sin embargo, esto conllevó un extenso tiempo de espera para la aprobación del diseño final por parte de las entidades administrativas del lugar, el cual se elaboró aplicando el proceso de diseño e instalación de un ánodo de zinc en forma de anillo descrito en la norma NRF-047-PEMEX-2007.
- III. La evaluación de la factibilidad del uso de zinc cómo ánodo de sacrificio se llevó a cabo únicamente a través de una comparación teórica con otros metales, mientras que, el desempeño del método anticorrosivo, es decir, los resultados de la protección catódica se evaluaron solo de forma visual con el recubrimiento anticorrosivos aplicado previamente en los pasamanos.
- IV. La duración de la prueba depende de la vida útil estimada para el ánodo de sacrificio de zinc calculado, el cual, se espera mantenga su efectividad por más de 7 semanas (1,176 horas aproximadamente) y el tiempo máximo designado por el asesor del proyecto son 1000 horas, sin embargo, este periodo de tiempo no es suficiente para observar la degradación de la pieza, pues, durante las seis semanas que se verificó el estado del ánodo, debido a las propiedades del zinc se pasivó su superficie lo que evita la pérdida de masa.

1.4. Resultados Esperados

- I. A través de la evaluación cualitativa de las estructuras metálicas de los principales sistemas de seguridad en el muelle del Puerto La Libertad, los pasamanos, por medio de un análisis comparativo utilizando la norma SSPC-VIS-2 se espera identificar el nivel de oxidación presente en estos y los riesgos hacia la salud e integridad de los visitantes del lugar, relacionados directamente con la corrosión de dichas estructuras.
- II. A partir de una investigación bibliografía enfocada en la protección catódica por ánodos de sacrificio se espera justificar la selección del Zinc como materia prima para la propuesta de diseño y fabricación del ánodo de sacrificio.
- III. Con el montaje de un ánodo de Zinc en uno de los pasamanos del muelle del Puerto La Libertad, de acuerdo con el método propuesto por la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE), se deben evidenciar los efectos de la protección catódica, a partir de la comparación del daño superficial al ánodo en contraste con la corrosión en la superficie del pasamanos.

- IV. Con los resultados obtenidos de la propuesta de protección catódica mediante el uso de ánodos de Zinc como refuerzo a las estructuras del muelle del Puerto La Libertad, se podrá sugerir la implementación del uso del sistema de protección catódica contra la corrosión de más estructuras metálicas que formen parte de los servicios públicos del muelle del Puerto La Libertad.

1.5. Justificación

El Salvador es uno de los principales destinos turísticos por la facilidad que ofrece para movilizarse a lo largo del país y de esta forma, poder realizar distintas actividades recreativas, incluso en un mismo día. Por su cercanía con la capital, San Salvador, se suelen preferir las playas de la costa del departamento de La Libertad, en donde destaca, su agradable clima tropical y la gran diversidad de paisajes turísticos. Una de las principales instalaciones a la orilla de la playa en dicha zona, es el complejo turístico “El Malecón”, en donde a su vez, se localiza el muelle del puerto La Libertad.

Al ser visitado el muelle por un gran número de personas que transitan diariamente por el muelle producto del turismo y la comercialización de pesca marítima que se desarrolla por la venta directa de la pesca que desarrollan pescadores miembros de la cooperativa pesquera local, se esperaría que las condiciones de las estructuras, que conforman los cimientos y los principales sistemas operativos y de seguridad, por ejemplo, el sistema de polea de barcos pesqueros y los pasamanos respectivamente, sean las adecuadas para propiciar la seguridad de los visitantes y al mismo tiempo, permitan la conservación histórica del lugar destacando el atractivo de este.

Sin embargo, la corrosión de los metales representa un gran problema para este sitio turístico, debido a que los materiales que conforman las estructuras del muelle son altamente susceptibles a dicho fenómeno, cómo el acero, pues, la corrosión en este tiende a aumentar al estar expuestos a sales y una gran humedad constantemente, que son condiciones muy características de los ambientes marinos.

Si dicha problemática no es controlada a tiempo aparecen con mayor facilidad dificultades relacionadas con la seguridad e integridad de las instalaciones y de las personas que hacen uso de estas, además de provocar pérdidas financieras por costos de mantenimiento y reparación, por lo que es necesario implementar medidas preventivas para mitigar dichas consecuencias.

Por esta razón, la protección catódica haciendo uso ánodos de sacrificio, representa para la situación del muelle del Puerto La Libertad, un método práctico para la protección de las estructuras metálicas, principalmente para los pasamanos de toda el área, ya que, al colocar un solo ánodo de zinc en contacto con esta estructura permite la protección de una extensa área, sin requerir la aplicación de

otra medidas de control como el uso de corriente eléctrica o el condicionamiento de temperatura y humedad del área, procesos de elevado gasto económico.

Por todo lo mencionado anteriormente, nos vemos en la motivación de llevar a cabo esta investigación con el objetivo de evaluar la efectividad de este método a través del diseño de un modelo de protección catódica en un lugar altamente corrosivo, y a la vez bastante conocido, como lo es el Muelle del Puerto de la Libertad, esperando así poder aumentar la vida útil de los materiales que conforman las estructuras de este y propiciar la seguridad de los visitantes del lugar, de forma que se puedan evitar reparaciones costosas y tiempos de inactividad para el comercio de la zona.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Corrosión

“La corrosión es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros como aleaciones, mezclas de uno o más metales), mediante reacciones químicas y electroquímicas con su ambiente¹ (Revie y Uhlig, 2008).

Por consiguiente, la corrosión será toda reacción electroquímica de un metal con el ambiente al que esté expuesto, resultando en un deterioro gradual y progresivo del metal, el cuál afecta sus propiedades y por eso, se le considera como un proceso natural, que sin la debida protección y cuidados puede generar altos costos por mantenimiento y llegar a dañar varias estructuras, equipos y componentes.

En el área industrial la gravedad de los problemas generados por la corrosión de los equipos o la infraestructura dependerá de los procesos que se lleven a cabo en cada instalación, por ejemplo, el daño de tanques de contención pueden generar fugas provocando la perdida de productos; la alteración de las propiedades de los metales cómo la transferencia de calor pueden afectar la eficiencia de múltiples equipos; y los desperfectos en tuberías pueden reducir la capacidad de estas, e incluso contaminar materias primas o productos que sean transportados en ellas.

La corrosión también genera daños a los materiales metálicos que forman parte de las estructuras varios lugares de interés público, por ejemplo, en la Figura 2.1 se puede apreciar como la corrosión ha dañado la estatua erigida a Thomas Jefferson, monumento ubicado en Washington, Estados Unidos, causado por la contaminación industrial de la zona.



Figura 2.1. Indicios de corrosión en la estatua del monumento a Thomas Jefferson. (Tomado de “Introduction to Corrosion Science”, E. McCafferty, 2010, New York, USA)

¹ Revie, R.W., y Uhlig, H.H. (2008). Corrosion and Corrosion Control - An Introduction to Corrosion Science and Engineering. Wiley & Sons, Inc: USA

2.1.1. Reacción Óxido – Reducción

Existen diferentes tipos de corrosión, que dependen en gran medida de las propiedades de los metales y el ambiente en el que estos se encuentran, cómo se explicará más adelante, sin embargo, todos los tipos de corrosión se relacionan debido a que la principal reacción que genera este fenómeno es la que se da en la superficies de los materiales metálicos y la atmósfera, específicamente con el oxígeno presente.

La oxidación se define como una reacción en la cual un átomo, ión o molécula se vuelve más electropositivo, llevando consigo un mayor porcentaje de masa atómica, ocasionando que con el tiempo, esta se desprenda de la superficie por acción de la gravedad, es decir, que las reacciones que describen el proceso de la corrosión son esencialmente reacciones de oxidación, debido a que el material metálico simplemente se oxida, volviéndose más electropositivo y que con el tiempo va perdiendo parte de su masa.

2.1.2. Celdas Electroquímicas

Los procesos de corrosión fácilmente pueden recrearse a nivel de laboratorio lo que permite identificar los componentes necesarios para que ocurran las reacciones electroquímicas. Una celda electroquímica, es un modelo que sirve para ejemplificar los procesos de óxido-reducción, mediante la aplicación de corriente eléctrica²; siendo sus principales componentes los siguientes:

- I. El ánodo es uno de los dos electrodos metálicos de la celda electroquímica y representa la parte negativa de la reacción, en donde, los electrones son liberados del metal y provocando la oxidación de este. Por ejemplo, el zinc es utilizado frecuentemente en baterías como ánodo, por su facilidad para que este libere electrones y que la oxidación ocurra sobre este mismo, modelo que recibe el nombre de celda de Daniels.
- II. El cátodo es el otro electrodo metálico, y representa la parte positiva de la terminal, donde este consume los electrones enviados por el ánodo y se da la reacción de reducción del proceso, es decir, donde los elementos que se reducen se vuelven más electronegativos. En el caso de la celda de Daniels se utiliza el cobre.
- III. El electrolito es la solución conductora que debe estar presente para que ocurra la corrosión, pues se encarga del transporte de cargas entre ambos electrodos. Cualquier medio acuoso que contenga una moderada concentración de iones es considerado un electrolito, por ejemplo, el agua marina debido a la presencia de sales minerales disueltas en ella.

² "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control." Ahmad Z. 2006

- IV. El metal conductor es el que conecta de manera externa a los electrodos. Dicho metal se encarga de proveer un camino para el flujo de electrones.

En la Figura 2.2. se muestran los principales componentes de una celda electroquímica, de acuerdo con el modelo básico planteado para una celda de Daniels (Celda de Zinc/Cobre).

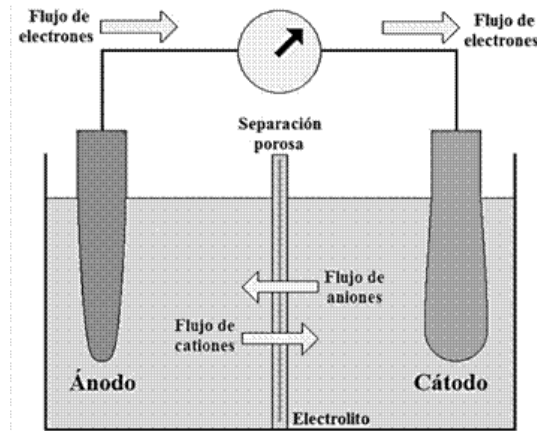


Figura 2.2. Principales componentes de una celda electroquímica. (Tomada de "Introduction to Corrosion Phenomena: Types, Influencing Factors and Control for Material's Protection," Salazar-Jiménez, J., 2015).

2.1.3. Tipos de corrosión

El proceso de oxidación siempre ocurrirá cuando el ánodo, el cátodo y el electrolito estén presentes, sin embargo, las condiciones iniciales del metal y las características del medio al que este expuesto pueden generar distintos tipos de corrosión, los cuales se clasifican en ocho tipos, de acuerdo con "Corrosion Engineering." Fontana y Greene. 1978, siendo estos:

- I. Corrosión Uniforme o Generalizada: Es el adelgazamiento uniforme de un metal, es decir que no presenta la corrosión en un punto en específico, debido a que esta no penetra muy profundamente el interior del material y se genera porque los ánodos y cátodos cambian de ubicación constantemente, produciendo una pérdida generalizada de la masa del metal. La corrosión uniforme puede ser prevenida o reducida mediante el uso de materiales adecuados, recubrimientos, inhibidores o protección catódica.
- II. Corrosión Galvánica: Ocurre cuando se ponen en contacto dos metales con diferentes potenciales electroquímicos, es decir, uno del par posee una mayor tendencia a corroerse en presencia de un mismo electrolito. Algunos factores que pueden afectar la magnitud de esta corrosión es la posición que tengan los metales en la serie galvánica y el área, específicamente la distancia entre ambos materiales y el posicionamiento geométrico de uno con respecto al otro, ya que, la corrosión galvánica se presenta con mayor agresividad en el área de contacto entre los dos metales, disminuyendo a medida que se alejan de la unión.

Una de las principales ventajas con las cuales se puede evitar la corrosión de este tipo es utilizando dos metales próximos entre sí en la serie galvánica, por ejemplo, el cobre y el latón, los cuales se suele unir para formar los cuerpos y las hélices de buques marinos. Otro factor que afecta la severidad de la corrosión galvánica y está relacionado con la selección del par metálico son los efectos del medio ambiente, pues cada material reaccionará diferente en diferentes ambientes.

- III. Corrosión por Picadura: Es una forma de corrosión localizada en la superficie de un metal donde se corroen pequeñas áreas en específico que conduce a la formación de cavidades o agujeros, mientras que la mayor parte de la superficie permanece intacta. Esto pasa porque la zona anódica permanece fija mientras que el electrolito se acumula y no se distribuye de forma uniforme sobre toda el área. Es una de las formas más comunes de corrosión en especial en ambientes que contienen iones cloruro, bromuro, ioduro o perclorato, cómo es el caso de los ambientes marítimos o costeros. La naturaleza destructiva de las picaduras se caracteriza por el hecho de que normalmente un sistema afectado por este tipo de corrosión debe ser reemplazado completamente.
- IV. Corrosión en Grietas: Esta es una forma localizada de corrosión, causada por la deposición de suciedad, polvo, lodo o por la existencia de huecos y cavidades entre superficies adyacentes generando que el fondo de la grieta esté privado de oxígeno, pero los bordes tengan acceso al oxígeno disuelto. Este fenómeno limita el uso, en particular de aceros, en ambiente marino, químico y las industrias petroquímicas.
- V. Corrosión Bajo Tensión: También conocida como fractura inducida, es la falla de un metal resultante por la acción conjunta del estrés (fuerza externa) y el ataque químico, la cual inicia con una fractura frágil que se propaga por el resto del metal. Por ejemplo, el agrietamiento por corrosión bajo tensión de sulfuro puede provocar grietas de acero en ambientes con altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno, como pueden encontrarse en la industria de la perforación de petróleo.
- VI. Corrosión Intergranular: Es una forma de corrosión que ataca preferencialmente los límites de grano de las estructuras metálicas, mientras que en la matriz de los granos la corrosión es insignificante. El ataque se propaga dentro del material provocando que la aleación se desintegre (los granos se separan), y pierda su resistencia.
- VII. Lixiviación o Desaleación Selectiva: Es la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida mediante corrosión, es decir, que, de una aleación de dos o más metales, uno de estos es más activo que los demás de tal forma que este se oxida primero o de forma

selectiva. Los ejemplos incluyen la eliminación de zinc de las aleaciones de cobre y zinc (deszincificación) y la eliminación de hierro del hierro fundido gris (corrosión grafitica).

- VIII. **Erosión-corrosión:** Es causada por la acción mecánica proporcionada por el movimiento de un líquido corrosivo contra la superficie de un metal acelerando la reacción de corrosión, por ejemplo, tuberías industriales que transportan lodos o sedimentos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, esta corrosión puede ocurrir donde quiera que el agua fluya irregularmente, especialmente si hay altas presiones y el vacío está involucrado en los sistemas de flujo. La gran mayoría de los metales puede presentar corrosión por erosión, sobre todo aquellos que dependen de la presencia de una capa pasiva o una película superficial para su protección contra la corrosión; si éstas son removidas de la superficie o sufren algún daño, entonces el metal sufre un ataque rápido. La velocidad de circulación del medio juega un papel muy importante en la corrosión por erosión, pues se puede presentar un efecto de desgaste a altas velocidades, sobre todo si la solución contiene sólidos en suspensión.

En la Figura 2.3. se ilustran los tipos de corrosión detallados anteriormente:

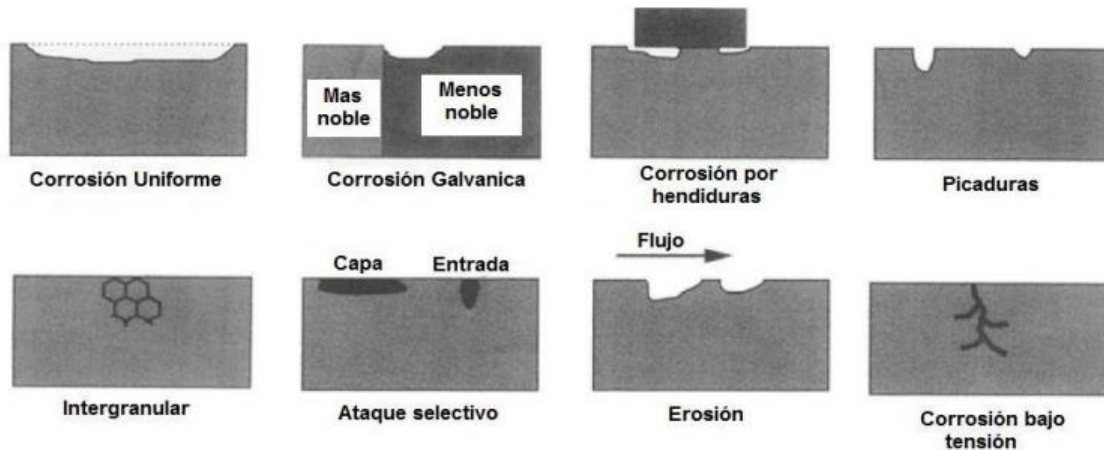


Figura 2.3. Tipos de Corrosión (Tomada de "Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio en un Prototipo de Intercambiador de Calor". 2012. Terrazas M.)

2.1.4. Tipos de Ambientes Corrosivos

Un factor importante para tener en cuenta durante el proceso de la corrosión es el tipo de atmosfera o ambiente en el que se encuentra el metal afectado, debido a que la reacción no puede proceder sin un electrolito y en la naturaleza es la humedad del ambiente la que desempeña ese papel durante la reacción de oxidación, como se mencionó anteriormente. El nivel de humedad presente dependerá en gran medida de factores como la ubicación geográfica y el clima, que, a su vez, ambas determinan las condiciones atmosféricas que describen los distintos tipos de procesos de corrosión.

En base a la ubicación geográfica es posible definir condiciones atmosféricas de carácter rural, urbano, industrial o marino, mientras que el clima de nuestro planeta es posible clasificarlo en zonas climáticas, generalmente clasificándose en tres tipos: Áridas, Templadas y Tropicales-Húmedas. La Tabla 2.1 muestra como la agresividad atmosférica afecta la corrosión en estas zonas climáticas, siendo las que presentan mayor agresividad las atmosferas industriales y marinas en climas tropicales-húmedas. Se asigna una calificación numérica para evaluar la agresividad, siendo 1 considerado como menor la agresividad de la corrosión, y 5 como la mayor.

Tabla 2.1. Agresividad de la atmósfera

Zonas Climáticas	Categoría	AGRESIVIDAD DE CORROSIÓN EN LA ATMOSFERA			
		Rural	Urbana	Industrial	Marina
Árida	<i>Exterior</i>	2	3	4	3
	<i>Interior</i>	1	2	3	2
Templada	<i>Exterior</i>	3	4	5	4
	<i>Interior</i>	2	3	4	3
Tropical Húmeda	<i>Exterior</i>	4	5	5	5
	<i>Interior</i>	3	4	4	4

Extraída de: Ahmad, Z (2006), "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control"

La corrosión atmosférica se manifiesta con mayor facilidad bajo condiciones húmedas, especialmente en donde la humedad atmosférica relativa excede a la humedad relativa de equilibrio de cualquier solución que este saturada y que esté presente en la superficie del metal (generalmente soluciones que contienen NaCl), cómo es el caso de las ubicaciones industriales y marinas.

En la Tabla 2.2 se muestran las velocidades de corrosión de algunos metales en diferentes tipos de atmosferas y se aprecia que la mayoría de estos reciben un daño mayor en atmosferas industriales y marinas. Dichos metales tabulados se suelen utilizar como componentes de equipos en las industrias o estructuras metálicas en exteriores.

Tabla 2.2. Tasa de ataques de corrosión en metales seleccionados y en diferentes atmosferas

Metales	TASA DE ATAQUE EN ATMOSFERA ($\mu\text{m}/\text{año}$)			
	Rural	Urbana	Industrial	Marina
Pb	0.7-1.4	1.3-2	1.8-3.7	1.8
Cd	-	2-15	15-30	-
Cu	1.9	1.5-2.9	3.2-4	3.8
Ni	1.1	2.4	4-5.8	2.8
Zn	1-3.4	1-6	3.8-19	2.4-60

Extraída de: Ahmad, Z (2006), "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control"

2.1.4.1. Ambientes Corrosivos según Norma ISO 12944

La norma internacional ISO 12944 se enfoca en la protección contra la corrosión de estructuras de acero mediante la aplicación de sistemas de recubrimiento anticorrosivos. Ofrece directrices para la selección de recubrimientos adaptados a diversos ambientes, niveles de preparación de superficies y expectativas de durabilidad, lo que ha posibilitado la categorización de los ambientes corrosivos según la pérdida de masa o espesor de muestras estándar, fabricadas con acero de bajo contenido de carbono, tras el primer año de exposición, como se puede apreciar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Categorías de Medios Ambientes Corrosivos y ejemplos de Medio Ambiente

Clasificación de los Ambientes Corrosivos					
Categoría	Corrosión	Pérdida de Masa por unidad de Superficie/Perdida de espesor (tras el primer año de exposición)		Ejemplos de Medio Ambiente	
		Acero de bajo contenido en carbono		Exterior	Interior
		Pérdida de masa g/m ²	Pérdida de espesor, μm		
C1	Muy Baja	≤10	≤1.3		Interior de edificios calefaccionados con atmósfera neutra, oficinas, escuelas, comercios
C2	Baja	>10 y hasta 200	>1.3 y hasta 25	Atmósferas con bajos niveles de polución principalmente rurales	Edificios no calefaccionados donde puede haber condensación (depósitos, gimnasios)
C3	Media	≥200 y hasta 400	≥25 y hasta 50	Atmósferas urbanas e industriales, con moderados niveles de polución debido al dióxido de azufre y áreas costeras con baja salinidad	Áreas productivas con alta humedad y alguna polución del aire (lavaderos, comedores).
C4	Alta	>400 y hasta 650	>50 y hasta 80	Áreas industriales y costeras con moderada salinidad	Plantas químicas, natatorios, muelles costeros

...Continúa...

Tabla 2.4. Categorías de Medios Ambientes Corrosivos y ejemplos de Medio Ambiente (Continuación)

Clasificación de los Ambientes Corrosivos					
Categoría	Corrosión	Pérdida de Masa por unidad de Superficie/Perdida de espesor (tras el primer año de exposición)		Ejemplos de Medio Ambiente	
		Acero de bajo contenido en carbono		Exterior	Interior
		Pérdida de masa g/m ²	Pérdida de espesor, μm		
C5-I	Muy Alta (Industrial)	>650 y hasta 1500	>80 y hasta 200	Áreas industriales con alta humedad y atmósfera agresiva	Edificios o áreas con condensación casi permanente y con alta polución
C5-M	Muy Alta (Marina)	>650 y hasta 1500	>80 y hasta 200	Áreas costeras y marinas con alta salinidad	Edificios o áreas con condensación casi permanente y con alta polución

Extraída de: BS EN ISO 12944-2:2017

2.2. Métodos anticorrosivos

Debido a las implicaciones económicas, de seguridad y la dificultad en la conservación de materiales metálicos relacionada con los efectos del proceso de corrosión, en la actualidad, se sigue investigando y desarrollando diferentes tipos de métodos para el control de este fenómeno, de tal forma, que sea posible proteger por más tiempo y con mejores resultados incluso los materiales expuestos a los ambientes más corrosivos.

La selección de un material con alta resistencia a la corrosión debería ser siempre el primer tipo de control a considerar, sin embargo, esta práctica en muchas ocasiones no es posible realizarla, ya que, usualmente se limita la selección de un material en base a las condiciones de diseño, tales como el medio circundante y las condiciones geométricas necesarias en el material para la aplicación solicitada, al igual que, la selección de un material ideal para evitar la corrosión de un medio en específico, podría llegar a representar un gasto económico elevado. Esto hace que la selección de dicho material óptimo no sea factible o posible en la mayoría de los casos, por lo que, se deben considerar otros tipos de métodos anticorrosivos para el cuidado de los materiales metálicos.³ Algunos de los métodos de protección contra la corrosión para la protección de los materiales afectados son:

³ "Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales". 2015. Salazar-Jiménez J.

- I. Inhibidores: son sustancias químicas que, al añadirse al medio corrosivo, disminuye la velocidad de la reacción. La inhibición se suele utilizar en el interior de tuberías y recipientes de acero al carbono como una alternativa económica a los aceros y aleaciones inoxidables, y hasta en recubrimientos sobre componentes no metálicos. Una ventaja única es que se pueden incluir en diferentes etapas del proceso (se agregan dentro del flujo del proceso y debe haber un punto en el que se extraiga, siendo de tipo inerte). En la Figura 2.4. se ejemplifica el uso de un inhibidor para el cuidado de uniones de tuberías industriales.



Figura 2.4. Aplicación de un producto Inhibidor en tuberías de acero inoxidable. (Tomada de “Inhibidor de corrosión LPS 30®”. S.F., Direct Industry)

- II. Recubrimientos: La aplicación de recubrimientos como medida de protección contra la corrosión es el método más usado, ya que, además de proteger, también brinda un aspecto decorativo en el producto final, o puede crear propiedades adicionales en la superficie del material. Antes de aplicar cualquier recubrimiento, se debe preparar la superficie metálica para eliminar posibles óxidos y productos de corrosión, grasas y otros contaminantes, así como posibles defectos superficiales.⁴ Algunos de los principales tipos de recubrimientos son:
 - i. *Recubrimiento de Protección Barrera*: Protege un sustrato de su medio ambiente creando una barrera por aplicación del sistema de recubrimiento adecuado. En la Figura 2.5. se ejemplifica el uso de recubrimientos del tipo barrera mediante la aplicación de pinturas anticorrosivos a una estructura metálica.
 - ii. *Recubrimientos de Conversión*: Son llamados así porque la superficie del metal se convierte en un compuesto que tiene la porosidad deseada para actuar como una buena base para una pintura.
 - iii. *Recubrimientos anódicos*: Se refiere a la aplicación de una montura o soldadura de un metal que actúa como par anódicos con respecto a la pieza que se desea

⁴ “Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio en un Prototipo de Intercambiador de Calor”. 2012. Terrazas M.

proteger, por ejemplo, el zinc, aluminio o revestimientos de cadmio. En acero tales recubrimientos son generalmente llamados recubrimientos por ánodos de sacrificio, debido a que protegen el sustrato a expensas de la corrosión de revestimiento metálico aplicado.

- iv. *Recubrimientos Catódicos:* En este tipo de recubrimiento, los metales que son depositados son electropositivos con respecto al sustrato. Los recubrimientos deben estar exentos de poros y ser espesos, sin embargo, si el recubrimiento llegase a presentar un defecto, aún puede ser utilizado como ánodo con respecto al sustrato.



Figura 2.5. Ejemplo de aplicación de recubrimiento del tipo barrera. (Tomada de “El Estado del Material a Proteger”, S.F., TCRPAINT)

- III. Protección catódica: Esta técnica busca modificar relativamente el valor del potencial electroquímico del material a proteger, haciendo que este se comporte como un cátodo. Normalmente es empleado en sistemas enterrados o inmersos en agua de mar y teniendo dos principales formas de aplicación, mediante el uso de ánodos de sacrificio (metales con un menor potencial eléctrico) o la aplicación de corriente eléctrica externa al sistema para formar una celda electroquímica que proteja al metal. En la Figura 2.6 se muestran las partes de un sistema de protección catódica aplicado a una superficie sumergida en agua de mar.
- IV. Protección Anódica: Al aumentar el potencial de un metal en el sentido positivo, aumentará también su velocidad de corrosión, y viceversa. Sin embargo, hay algunas excepciones, como en el caso de los materiales que tienen un comportamiento activo-pasivo, que presentan una disminución de la velocidad de corrosión al aumentar su potencial por encima del potencial de pasivación. La protección anódica aprovecha esta característica para proteger contra la corrosión a ciertos metales, haciendo pasar una corriente por éstos para forzar la formación de una película pasiva en la superficie, y mantenerla en ese estado.

V. Alteración del medio: Ésta es una forma versátil de reducir la corrosión⁵. Se refiere a la modificación de las condiciones del entorno para disminuir los efectos perjudiciales de la corrosión en materiales metálicos. Esta estrategia busca cambiar factores como la composición química, la temperatura, la humedad o la presión para hacer que el entorno sea menos propenso a causar corrosión. Las principales que se utilizan para alterar el medio son:

- i. *Disminución de la Temperatura*: Las altas temperaturas aumentan la velocidad de casi todas las reacciones químicas, por lo que, si se disminuyera la temperatura de operación de un proceso, ocurrirá una marcada disminución de la velocidad de corrosión.
- ii. *Disminución de la velocidad de flujo*: Generalmente, la presencia de altas velocidades de flujo aumenta el ataque corrosivo. Muchos metales deben su resistencia a la corrosión a la formación de capas protectoras masivas, que no son muy adherentes. Con una velocidad de flujo alta, estas capas se desprenden causando el aumento de la velocidad de corrosión.
- iii. *Extracción del Oxígeno o de los Oxidantes*: Esta es una técnica muy antigua de control de corrosión. Sin embargo, aunque su uso es muy difundido, no se recomienda para metales o aleaciones con un comportamiento activo-pasivo. Estos materiales necesitan oxidantes para mantener la capa pasiva que los protege, y tienen baja resistencia en medios reductores o con poca presencia de oxidantes.

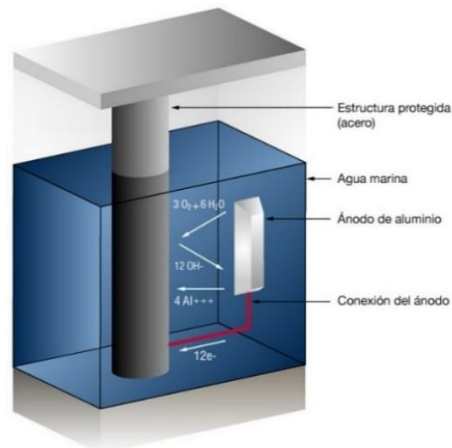


Figura 2.6. Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio en agua marina. (Tomada de “El Estado del Material a Proteger”, S.F., PWATER)

⁵ “Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio en un Prototipo de Intercambiador de Calor”. 2012. Terrazas M.

2.3. Protección Catódica por Ánodo de Sacrificio

La protección con ánodos de sacrificio se basa en el modelo principal de las celdas galvánicas, en donde el metal más noble se conserva por más tiempo, mientras que el metal con el potencial de corrosión más negativo se corroe con mayor facilidad. En la Figura 2.7. se representa de forma esquemática los efectos de la protección catódica a las estructuras metálicas.

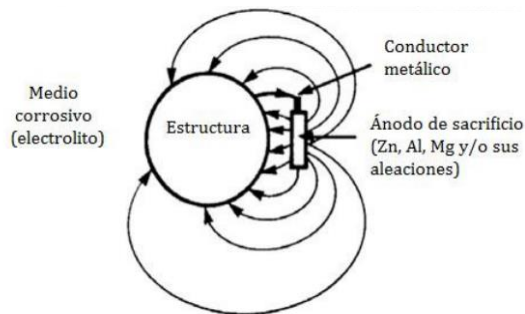


Figura 2.7. Sistema de Protección Catódica por ánodo de Sacrificio. (Tomada de “Protección Catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor”, Ing. M. Terrazas, CIMAV, 19 de julio de 2012, México)

Este modelo describe como el flujo de electrones o corriente galvánica fluye entre dos metales cuando dos materiales de este tipo son unidos en un ambiente conductor o un electrolito, de tal forma que la energía pasa a través de dicho medio desde el ánodo hacia el cátodo, ocasionando que el metal cuyo potencial de corrosión sea más positivo se proteja “consumiendo” al otro metal. Por ejemplo, las aleaciones de aluminio, zinc o magnesio poseen un potencial de corrosión menor (más negativo) que el del acero, material comúnmente utilizado en infraestructuras de tuberías, construcciones costeras o barcos que se encuentran en constante contacto con el agua de mar, de tal forma, que al aplicar un revestimiento con las aleaciones anteriormente mencionadas, se efectúa un sistema de protección catódica en donde el acero se protege de la corrosión mediante el desgaste o la oxidación del revestimiento aplicado.

La efectividad de la protección catódica puede determinarse mediante métodos que muestren que no hay corrosión sobre una estructura. Varios de estos métodos involucran la inspección física de la superficie de la estructura, el análisis de las condiciones del medio y de los parámetros de operación del control de la corrosión y/o la reducción de la velocidad de las pérdidas por corrosión. Para la mayor parte de las tuberías y otras estructuras enterradas, no resulta práctico realizar una inspección frecuente y rutinaria de la superficie para verificar que no haya corrosión. En ausencia de estos datos, pueden usarse criterios basados en la polarización catódica. Estos criterios pueden aplicarse sin esperar a que la corrosión sea evidente.

Su mayor ventaja industrial es que requiere de una menor cantidad de procesos de mantenimiento y ya que limita su uso a estructuras, en donde se exigen pequeñas y más estables cantidades de corriente (ya que este tipo de protección no es aplicable en ambientes con una alta resistencia eléctrica), el costo de adquisición e instalación del ánodo no es elevado. Para mejorar la eficiencia y estabilidad del funcionamiento de los ánodos, se deben colocar en la superficie de materiales que mantengan la humedad y la conductividad eléctrica estable.

Por otro lado, la principal desventaja de este método de protección catódica es la pérdida total del ánodo de sacrificio y su reemplazo obligatorio luego de haber cumplido su vida útil. A partir de esto, para que un material pueda utilizarse como ánodo de sacrificio se recomienda cumplir las siguientes condiciones con tal de evitar gastos innecesarios en el mantenimiento preventivo y posterior a la instalación del sistema de protección catódica:

1. Su potencial de corrosión debe ser más electronegativo que el del metal a proteger.
2. El potencial de corrosión del ánodo de sacrificio no debe exceder por mucho el del metal a proteger, porque disminuirá el tiempo de vida útil del ánodo.
3. La disolución del ánodo debe ser uniforme en toda la superficie del metal a proteger.
4. El metal utilizado como ánodo de sacrificio no debe generar una capa superficial producto de la corrosión de este.

2.3.1. Selección del material

En base a las condiciones anteriormente enlistadas, debería ser posible llevar a cabo la selección del metal ideal para la elaboración de un ánodo solamente, a partir de su potencial eléctrico y tomando en cuenta el potencial de la superficie metálica a proteger. Debido a esta premisa, en la práctica, por lo general se suele recurrir a aleaciones de aluminio, zinc y magnesio, debido a que tienen un potencial más negativo que el del acero como se muestra en la Tabla 2.4, siendo este, el material metálico más utilizado en estructuras para tuberías, instalaciones costeras, barcos, entre otras aplicaciones; sin embargo, es necesario, para asegurar la efectividad de la protección catódica es necesario conocer previamente el comportamiento de cada uno de estos materiales, con respecto al ambiente corrosivo y su compatibilidad con la estructura metálica a recubrir al igual que los procesos o actividades en las que estará sometido.

Tabla 2.5. Serie Galvánica de metales y aleaciones comunes en suelos neutros y agua

Potencial de Corrosión en suelos neutros y agua a 25°C	
Metal	Potencial V (CSC)
Carbón, grafito, coque	+0.3
Platino	0 a -0.1
Hojuelas en el acero	-0.2
Hierro colado con alto silicio	-0.2

...Continúa...

Tabla 2.6. Serie Galvánica de metales y aleaciones comunes en suelos neutros y agua (Continuación)

Potencial de Corrosión en suelos neutros y agua a 25°C	
Metal	Potencial V (CSC)
Cobre, latón, bronce	-0.2
Acero en concreto	-0.2
Plomo	-0.5
Hierro colado (sin grafitizar)	-0.5
Acero templado (oxidado)	-0.2 a -0.5
Acero templado (limpio y brillante)	-0.5 a -0.8
Aluminio comercial puro	-0.8
Aleación de aluminio (5% zinc)	-1.05
Zinc	-1.1
Aleación de magnesio (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	-1.6
Magnesio comercial puro	-1.75

* Potenciales típicos observados en suelos y aguas neutras, respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre.

Extraída de: Terrazas, G. (2012) *“Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio en un Prototipo de Intercambiador de Calor.*

- I. Ánodos de Zinc: Una propiedad importante de los ánodos de zinc es que su capacidad no se ve afectada por la densidad de corriente de operación. Los ánodos de zinc se pueden emplear exitosamente para proteger estructuras en agua o en medios lodosos con resistividades de hasta $1000 \Omega \cdot \text{cm}$. La diferencia de potencial o “driving voltage” de los ánodos de aleaciones de zinc disminuye al aumentar la temperatura, a tal grado que estos ánodos son virtualmente inútiles a temperaturas superiores a los 60°C . Por esto los ánodos de zinc están limitados a pocas aplicaciones y no pueden emplearse para proteger estructuras donde la temperatura es alta.

- II. Ánodos de Aluminio: Este ánodo se hizo popular debido a su superioridad en comparación con los ánodos de Mg y Zn respecto a su: bajo costo, larga vida, alta capacidad energética, y bajo peso. Estos ánodos son ideales para estructuras que tienen un peso limitado, como submarinos y armamento, pero también para todo tipo de estructuras incluyendo plataformas costeras y naves.

- III. Ánodos de Magnesio: Tienen un potencial de corrosión altamente negativo y por lo tanto se disuelven con mucha facilidad en agua de mar. Por lo tanto, las aleaciones de Mg están restringidas a la protección de tuberías enterradas o de estructuras en aguas de estuario, donde la resistividad es suficientemente alta como para limitar la efectividad de los ánodos de Zn o Al.

2.3.2. Alteración del Ambiente

La selección del ambiente en el que se aplica la protección catódica es crucial para asegurar su eficiencia.⁶ Algunas razones por las cuales la selección del ambiente es importante son las siguientes:

- I. Variabilidad de la Conductividad del Electrolito: El éxito de la protección catódica depende de la capacidad del electrolito, es decir, el medio que rodea la estructura a proteger y el ánodo, para conducir la corriente eléctrica generada por este último, por lo que, entornos con baja conductividad eléctrica pueden limitar la capacidad de los ánodos para proporcionar la protección necesaria.
- II. Velocidad de Corrosión del Ánodo: La velocidad a la cual el ánodo de sacrificio se corroerá para proporcionar corriente catódica dependerá del ambiente en el que se encuentre. Ambientes con alta corrosividad pueden agotar más rápidamente el ánodo, lo que requiere inspecciones y reemplazos más frecuentes.
- III. Presencia de Contaminantes o Inhibidores: Algunos ambientes pueden contener contaminantes o inhibidores que afectan la eficacia de los ánodos de sacrificio. La presencia de ciertos compuestos químicos puede interferir con el proceso de protección catódica. Sustancias como cloruros o compuestos orgánicos pueden afectar negativamente la capacidad de los ánodos para proporcionar protección catódica cuando estos se encuentran en ambientes marinos. Al igual que en suelos industriales que pueden contener contaminantes como hidrocarburos que afecten el proceso de protección catódica.
- IV. Temperatura del Electrolito: La temperatura del electrolito puede influir en la velocidad de corrosión y, por lo tanto, en la eficacia de los ánodos de sacrificio. Ambientes extremadamente fríos o calientes pueden afectar la vida útil y el rendimiento de los ánodos.
- V. Ubicación de la Estructura: La ubicación geográfica y la naturaleza de la estructura a proteger también son factores importantes. Las estructuras ubicadas en aguas marinas, suelos altamente corrosivos o áreas industriales pueden requerir consideraciones específicas para la selección de ánodos y el diseño del sistema de protección catódica.
- VI. Presencia de Corriente Eléctrica Externa: En algunos ambientes, puede haber corrientes eléctricas externas que afectan la distribución de la corriente catódica. La selección del ambiente y el diseño del sistema deben tener en cuenta estos factores.

⁶ “Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio en un Prototipo de Intercambiador de Calor”. 2012. Terrazas M.

2.3.3. Diseño del Ánodo

El diseño de ánodos de sacrificio ya sea para proteger estructuras al aire libre o sumergidas, como submarinos y barcos, requiere el conocimiento de la resistencia óhmica de éstos, por lo que, se parte haciendo uso de la Ley de Ohm, con la cual es posible estimar la corriente de salida del sistema y con esto, se evalúan el número de ánodos necesarios en la fase preliminar del diseño.

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ecuación 1}$$

Una vez, estimada la cantidad de ánodos necesarios para la protección de un área de trabajo previamente establecida, se determinan las medidas del diseño a partir de ecuaciones de resistencia en diferentes casos, en función de las propiedades físicas que nos interesan conocer. Las fórmulas de resistencia usadas en protección catódica y de mayor uso se detallan en la Tabla 2.5.⁷

Tabla 2.7. Fórmulas de resistencia de mayor uso en la protección catódica en estructuras sumergidas

Ecuación	Fórmula	Descripción
Modificada de Dwight	$R = \frac{\rho}{2 * \pi * L} * Ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1$	Se utiliza la ecuación modificada de Dwight para ánodos en forma de barra delgadas (de sección transversal rectangular o trapezoidal), libremente suspendidos o separados de la plataforma. También, se puede aplicar para ánodos montados apoyados al mismo nivel de la superficie a proteger.
McCoy	$R = \frac{0.315 * \rho}{\sqrt{A}}$	Sirve para determinar la resistencia del ánodo basado en la superficie expuesta y sin considerar la forma geométrica. Se recomienda para ánodos tipo brazaletes, también se aplica en ánodos montados al mismo nivel de la superficie a proteger.
Waldron y Peterson	$R = \frac{\rho}{0.58 * A^{0.727}}$	Se usa para ánodos rectangulares y planos con respaldo de madera, brazaletes seccionado sobre línea de tubos y estructuras.
Lloyd's	$R = \frac{\rho}{2 * S}$	Fue ideada para el tipo de ánodo de placa delgada expuesta por un solo lado, aunque puede aplicarse a brazaletes y montados al mismo nivel de la superficie a proteger.

* **Nomenclatura:** ρ , resistividad específica del agua de mar (ohm/cm); L, longitud del ánodo (cm); a, radio efectivo medio del Ánodo ($A = \text{Área de la Sección Transversal} / \pi$ (cm)); S, Media Aritmética de la longitud y ancho del ánodo (cm)

Extraída de: *Protección Catódica-Diseño de Ánodos de Sacrificio*, 2004, Francia S.

⁷ "Protección Catódica-Diseño de Ánodos de Sacrificio", Perú, 2004. Francia S.

2.3.4. Métodos de fijación

El método de fijación de los ánodos en estructuras metálicas se selecciona dependiendo de las necesidades o características específicas que posea el ambiente, el más común de estos, es a través del uso de un eje que atraviesa el ánodo de manera transversal, adoptando formas como platina, varilla o barra de acero, y asegurándolo mediante soldaduras, garantizando que haya una conexión robusta entre el ánodo y la estructura, además de facilitar la transferencia de corriente entre ambas partes.

Otros métodos alternativos muy utilizados para la fijación del ánodo en estructuras metálicas con áreas superficiales poco simétricas son mediante el uso de grapas, espárragos o simplemente atornillados, sin embargo, hay que tener en cuenta que añadir elementos ajenos al sistema de protección catódica podrían provocar una disminución en el flujo de corriente necesario, por lo que, se deberá considerar previamente a la instalación del ánodo la cantidad adecuada de corriente para no disminuir la eficiencia del método anticorrosivo.

También se debe tener en cuenta la distribución de los ánodos pudiendo realizarse en serie o agrupados, dependiendo del área que cada ánodo está destinado a proteger, al igual que la presencia de elementos corrosivos ajenos al sistema o variaciones en la geometría de la estructura, por lo que, es necesario tomar en cuenta estos detalles para realizar la preparación de superficie adecuada y el proceso de instalación una vez finalizado el diseño los ánodos de sacrificios.⁸

2.4. Aplicación de la Protección Catódica por Ánodo de Sacrificio.

2.4.1. Antecedentes históricos del uso de métodos anticorrosivos

El gran desarrollo industrial de las últimas décadas alrededor del mundo se encuentra relacionado con la construcción de grandes plantas, complejos y otras instalaciones en donde se utilizan grandes cantidades de materiales metálicos. La aplicación del hierro en este tipo de trabajo es de los casos que más se remontan en la historia del uso de materiales metálicos y debido a que este no se encuentra en estado libre en la naturaleza, primero fue necesario estudiar los métodos de reducción a través del uso del carbón, sobre todo en el extremo oriente del planeta. Con el pasar del tiempo, la práctica se llevó a cabo por los romanos quienes la introdujeron en la cultura española; las fraguas comenzaron en Alemania a mediados del siglo XIV y posteriormente en Inglaterra.⁹

Junto con este desarrollo surge la problemática de la destrucción o corrosión de dichas estructuras de forma lenta y constante ocasionada por reacciones de los materiales con el medio ambiente y

⁸ "Protección Catódica-Diseño de Ánodos de Sacrificio". Perú, 2004. Francia, S.

⁹ "Introducción a la protección catódica". México D.F. septiembre 1987. Instituto Politécnico Nacional.

que, debido a que no existían medidas de prevención en esa época, muchas de las estructuras hoy en día, no existen o simplemente se encuentran restos sin ningún valor en la actualidad.

La protección catódica fue descrita por primera vez por Sir Humphry Davy en una serie de artículos presentados a la Royal Society en Londres en 1824. La primera aplicación fue al HMS Samarang en 1824, este fue un barco empleado por Edward Belcher, en la inspección de las costas de las Indias Orientales. Se utilizaron ánodos de sacrificio hechos de hierro adherido a la vaina de cobre del casco por debajo de la línea de flotación que lograron reducir drásticamente la velocidad de corrosión del cobre, sin embargo, se observó un efecto secundario de la protección catódica, ya que, propició el crecimiento de la vegetación marina sobre el casco del navío debido a la liberación de iones de cobre. Dado que el crecimiento marino excesivo afectó el rendimiento del barco, la Royal Navy decidió que era mejor permitir que el cobre se corroiera y tuviera el beneficio de un crecimiento marino reducido, por lo que la protección catódica no se utilizó más.¹⁰

Davy fue asistido en sus experimentos por su alumno Michael Faraday, quien continuó su investigación después de su muerte. En 1834, Faraday descubrió la conexión cuantitativa entre la pérdida de peso por corrosión y la corriente eléctrica y así sentó las bases para la futura aplicación de la protección catódica. Posteriormente, Thomas Edison experimentó con protección catódica de corriente impresa en barcos en 1890, pero no tuvo éxito debido a la falta de una fuente de corriente adecuada y materiales de ánodo. Pasarían 100 años después del experimento de Davy antes de que la protección catódica se usara ampliamente en los oleoductos en los Estados Unidos; la protección catódica se aplicó a tuberías de gas de acero a partir de 1928 y más ampliamente en la década de 1930.

En la actualidad, el estudio de la protección catódica con ánodos de sacrificio destaca por el uso de tres metales a lo largo de la historia: zinc (Zn), magnesio (Mg), aluminio (Al) y sus aleaciones, debido a que sus propiedades sobresalen sobre el resto de los metales al llevar a la práctica la protección catódica en aplicaciones industriales, de transporte o el montaje de infraestructuras para la construcción. El zinc posee el mayor desarrollo en el área de la protección catódica mientras que, los ánodos de aleaciones de magnesio son utilizados principalmente para la protección de estructuras que requieren de una polarización rápida, o en medios agresivos de resistividad elevada, como los suelos; finalmente, el aluminio, si bien es un material anódico de gran interés por sus características electroquímicas, presenta un elevado costo la obtención de aleaciones de este metal que sean adecuadas para ser utilizadas como ánodos de sacrificio, ya que el desarrollo de tecnologías para su obtención ha sido más lenta que las de los dos otros metales, tomando forma en la industria actual en los últimos años.

¹⁰ "Inteligencia naval". The Times (18427). Londres. 14 de octubre de 1843. col E, p. 3.

2.4.2. Sistemas de Protección Catódica en Latinoamérica

La protección catódica sobresale en la actualidad principalmente como un método para prevenir la corrosión en estructuras metálicas enterradas y sumergidas, ya que permite prolongar la vida ampliamente la vida de las estructuras, obteniendo tanto altos beneficios a la seguridad y confiabilidad de las instalaciones, como significativa reducción de costos totales durante la vida de los activos.

Latinoamérica se destaca por la presencia de clima tropical húmedo a lo largo de todo el año, siendo este uno de los ambientes que más favorece la corrosión de metales en general, aumentando drásticamente cuando más cercano a las costas o mantos acuíferos son empleados sin ningún tipo de cuidado, debido a la presencia de elevadas concentraciones de electrolitos en el ambiente.

Por esta situación, suele emplearse la protección catódica en los distintos países en donde se tiene acceso a vías marítimas de comercio, específicamente para proteger numerosas estructuras, como ductos, tanques, recipientes, embarcaciones, pilotes, muelles, flotadores marinos, equipos submarinos, básicamente todas las estructuras metálicas enterradas o sumergidas.

2.4.3. Uso de ánodos de sacrificio en El Salvador

El Salvador pese a poseer un clima tropical húmedo aún más acentuado que otros de los países de Latinoamérica por su extensa área costera, posee un campo de aplicación de técnicas de protección contra la corrosión prácticamente nuevo, en el cual se destaca el uso de láminas de aluminio con refuerzo de zinc, ánodos de zinc y especialmente el uso de recubrimientos anticorrosivos a partir de formulaciones muy parecidas a pinturas y esmaltes para ser aplicados en estructuras metálicas de muelles y equipos ubicados en las costas más visitadas del país.

El 8 de septiembre de 2022, se iniciaron los proyectos de ampliación y remodelación del puerto de Acajutla, Sonsonate, en donde, por medio de los informes de compra y venta realizados por la Comisión Ejecutiva Portuaria Autónoma (CEPA) se evidencia el uso de ánodos de Zinc para el refuerzo a la infraestructura del nuevo diseño del puerto, siendo este el primer conjunto de proyectos de renovación a infraestructuras de uso público en las zonas costeras del país que hace uso a gran escala de los métodos de protección catódicas adecuados para ralentizar el proceso de corrosión ocasionado por las condiciones ambientales de la zona y así promover la seguridad de los visitantes y trabajadores del lugar.¹¹

¹¹ “Suministro de ánodos para protección catódica, para uso en el puerto de Acajutla”. CEPA, PROIDECA, S.A. de C.V., LG 13-2020. 11/11/202. El Salvador.

2.5. Caso de estudio: Estructuras metálicas del Muelle del Puerto La Libertad

2.5.1. Generalidades de lugar

Ubicado en El Salvador, específicamente en el departamento de La Libertad, se encuentra uno de los principales destinos turísticos del país, el Muelle del Puerto La Libertad, sobre todo durante la época de verano, entre los meses de diciembre a abril, cuando las temperaturas son más elevadas y la mayor cantidad de turistas arriban al territorio salvadoreño, quienes en su mayoría, buscan disfrutar de las playas de la zona o simplemente degustar de la comida que ofrecen los diversos establecimiento dentro del complejo “El Malecón”, el cual en los últimos años, atrae todavía más visitantes por la creación de su propio parque de ruedas mecánicas, “Surf City”.

Por su cercanía con la capital, San Salvador, la zona del puerto de La Libertad suele destacar cómo un destino turístico de mucha presencia por su clima tropical agradable y la gran diversidad de paisajes turísticos que tienen por ofrecer los distintos establecimientos a la orilla de la playa.

El puerto de La Libertad fue uno de los primeros puertos marítimos de El Salvador, fundado el 24 de Febrero de 1824 y en la actualidad, debido a la expansión del complejo turístico y el reordenamiento de los locales, el puerto pasó de ser un lugar destinado exclusivamente al comercio, a ser un punto de referencia cultural para los turistas, ya que miles de personas visitan el lugar a lo largo del año con el fin de recorrer toda su extensión para poder apreciar el embarque de barcos pesqueros y la vista hacia la costa desde 300 metros mar adentro.

La estructura principal del puerto se encuentra conectada directamente con el malecón, por lo que, no presenta dificultad alguna para que los turistas que únicamente visitan el complejo para comer puedan acceder al área del puerto, además, cuenta con un acceso directo a la orilla del mar que facilita el ingreso de aún más turistas desde la playa, la cual se caracteriza por mantener un oleaje constante debido a las fuertes corrientes de viento de la zona.

Para propiciar la seguridad de los visitantes, el puerto cuenta con pasamanos y postes de luz, cuya función es la de restringir el paso hacia los bordes de la plataforma del muelle e iluminar el sendero transitable, ya que, a la lejanía anteriormente mencionada de la costa, el mar presenta una profundidad promedio de 15 metros, de los cuales, la estructura del muelle se eleva sobre la superficie del agua 8 metros, cifras que sugieren un alto riesgo a la seguridad y la salud de personas por la caída desde dicha altura sumado al impredecible comportamiento que la marea presenta a tal distancia de la costa.

2.5.2. Análisis de la situación actual

Cómo ya se mencionó anteriormente, las zonas costeras son de los ambientes corrosivos más agresivos que existen, a tal punto, que no es necesario que una estructura metálica esté en contacto

directo con el agua de mar, sino que la humedad en el aire contiene la cantidad suficiente de iones para inducir reacciones de oxidación en la superficie de los metales. Por esta razón, la estructura de sostén de la plataforma que conforma principalmente el área del puerto cuenta con revestimiento de cemento, aumentando así la resistencia contra el choque de la marea y la vida útil de los cimientos con respecto a la corrosión generada por el agua de mar.

La infraestructura de los servicios públicos del puerto, específicamente los pasamanos y postes de luz, están hechos de barras de acero galvanizado huecas de 2 y 4 pulgadas, con relleno de cemento y recubrimiento de pintura anticorrosiva. A diferencia de la estructura de sostén del lugar, se vuelve más fácil evaluar el estado de cada uno de componentes de los pasamanos y postes de luz y de esta forma, llevar a cabo el mantenimiento de estos. De acuerdo, con los materiales que conforman dichos servicios públicos, se esperaría que la vida útil de estos sea amplia por la propiedad para pasivarse de este tipo de acero.

El último mantenimiento realizado al puerto de La Libertad se llevó a cabo cuando los puestos de venta se desplazaron al entonces nuevo mercado artesanal en el área del malecón, el Mercado del Mar, inaugurado en febrero de 2020. Tras una visita preliminar al puerto, se verificó que los pasamanos y postes de luz se encuentran completamente deteriorados, con múltiples agujeros, incrustaciones y una abundante capa de óxido a lo largo de toda su superficie, como es posible apreciar a continuación:



Figura 2.8. Estado de los pasamanos de Puerto La Libertad, tomada el 31 de mayo de 2023.

De acuerdo con lo explicado en el punto 2.1.3, el tipo de corrosión presente en este caso es por picadura, un tipo de corrosión localizada, ya que, como se puede apreciar en la figura 2.8, el ataque corrosivo se distribuye sobre todo en la cara de la pieza posicionada frente al mar y donde se genera mayor cantidad de agujeros, coincidiendo con el área donde más fácilmente golpea el viento y salpica la el agua de mar por el alto oleaje; la normativa ISO 13174:2012 describe esta zona del puerto como “área de salpicadura” y corresponde a la elevación de la estructura que se encuentra intermitentemente húmeda y seca debido a la acción de las olas.

2.6. Normativas de referencia

2.6.1. Norma SSPC-VIS 2

La Norma SSPC-VIS 2, STANDARD METHOD OF EVALUATING DEGREE OF RUSTING O PAINTED STEEL SURFACES (Método de evaluación estándar del grado de oxidación de superficies de acero pintadas), mediante el uso de fotografías en color e imágenes en blanco y negro, ofrecen al lector una guía de referencia cualitativa sobre el nivel de oxidación presente en superficies metálicas, al mismo tiempo, que presenta una descripción del caso de estudio y lo organiza de forma cuantitativa con una escala de cero a diez, en función del porcentaje de óxido visible presente en la superficie y de acuerdo con el tipo de corrosión.

En la Figura 2.9 se ejemplifica la evaluación del grado de oxidación, el cual, se representa a través de las fotografías con manchas de color rojizo asociadas con la oxidación del acero, mientras que las imágenes en blanco y negro resaltan sólo aquellas áreas de la superficie metálica que están oxidadas, de tal forma que ambas referencias permiten al evaluador asignar un grado de oxidación preciso con el que comparar e identificar la muestra de trabajo.



Figura 2.9. Normativa SSPC-VIS 2: Método de evaluación estándar del grado de oxidación de superficies de acero pintadas, utilizada para la evaluación de la superficie de los pasamanos del muelle del Puerto la Libertad

2.6.2. Norma SSPC-VIS 3

La Norma SSPC-VIS 3, SSPC-VIS 3: GUIDE AND REFERENCE PHOTOGRAPHS FOR STEEL SURFACES PREPARED BY POWER AND HAND TOOL CLEANING (Guía y referencia fotográfica para superficies de acero preparadas a mano y limpieza con herramienta mecánica), contiene una serie de 43 fotografías de referencia a todo color para ser utilizado como un complemento de la norma SSPC-VIS 2, en donde a partir de la identificación del grado de oxidación de una superficie metálica, se pueda proseguir con la adecuada preparación de superficie con herramientas manuales y mecánicas.

Muestra un total de siete superficies de acero sin revestir diferentes (cuatro lisas y tres con la aplicación de un recubrimiento previo) antes y después de la limpieza con herramienta manual (SP 2), limpieza mecánica con cepillos de alambre de alimentación y discos de lijado (SP 3), limpieza mecánica de metal desnudo (SP 11), y de grado comercial limpieza mecánica (SP 15). También contiene fotografías de SP 11 superficies con un perfil restaurada, una guía revisada para el uso de fotografías de referencia, una nueva tabla de normas y condiciones se representa, y las notas explicativas adicionales.

Como se muestra en la Figura 2.10. las fotografías de referencia consisten en imágenes a color que representan diversas condiciones de superficies de acero sin pintar, pintadas, oxidadas y soldadas antes y después de la limpieza con herramientas eléctricas y manuales. Cada fotografía proporciona una posible ilustración del nivel mínimo aceptable de limpieza que deberá tener una superficie metálica previo a su uso en trabajos de soldadura, galvanizado o la aplicación de recubrimientos.

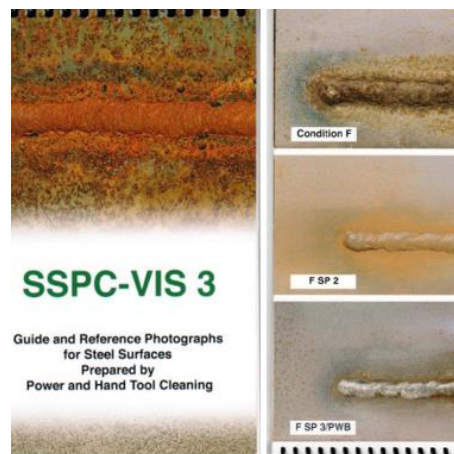


Figura 2.10. Normativa SSPC-VIS 3: Guía y referencia fotográfica para superficies de acero preparadas a mano y limpieza con herramienta mecánica, utilizada para determinar las condiciones iniciales para hacer el pretratamiento del área donde se instalarán el ánodo.

2.6.3. Norma ISO 13174:2012 “Protección catódica de instalaciones de puerto”

Esta normativa internacional define los medios a utilizar para garantizar que la aplicación de protección catódica como método anticorrosivo sea eficiente, aplicada a superficies externas metálicas sumergidas o enterradas en puertos de acero, puertos, costas e instalaciones de defensa contra inundaciones y accesorios en agua de mar y lodo salino.

Esta norma internacional no incluye la protección interna de las superficies de ningún componente como tanques de lastre, partes internas de estructuras flotantes, compartimentos inundados de esclusas y compuertas o las partes internas de pilotes tubulares de acero.

A partir del contenido descrito en dicha norma, se establecen los criterios necesarios para comenzar el diseño de la Protección Catódica de estructuras en ambientes marinos, como muelles, mediante el uso de Corriente Impresa o Ánodos de Sacrificio. Para esto, se detallan las ecuaciones necesarias para el cálculo teórico de la resistencia del ánodo, la intensidad de salida del ánodo, la vida de útil del ánodo y el peso mínimo requerido de la pieza, además de proveer las constantes para la densidad de corriente, la resistividad del electrolito, y el potencial de conducción del ánodo.

2.6.4. Norma EN12496:2013 “Ánodos galvánicos para protección catódica en agua de mar y lodo salino”

Esta norma europea especifica los requisitos mínimos y da recomendaciones para la composición química, las propiedades electroquímicas, las tolerancias físicas y los procedimientos de prueba e inspección para ánodos galvánicos fundidos de aleaciones a base de aluminio, magnesio y zinc para protección catódica en agua de mar y lodo salino.

Es aplicable a la mayoría de ánodos galvánicos utilizados para aplicaciones con agua de mar y lodos salinos, es decir, ánodos fundidos de sección transversal trapezoidal, "D" o circular y ánodos tipo pulsera o abrazaderas. Los requisitos y recomendaciones generales de esta norma europea también podrán aplicarse a otras formas de ánodo, por ejemplo, semiesféricos, de botón, etc., que en ocasiones se utilizan para aplicaciones con agua de mar.

2.6.5. Normativa NRF-047-PEMEX-2007 “Diseño, Instalación y Mantenimiento de los Sistemas de Protección Catódica”

De acuerdo con la Normativa NRF-047-PEMEX-2007 “Diseño, Instalación y Mantenimiento de los Sistemas de Protección Catódica” (Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios) el diseño, instalación y mantenimiento del sistema de protección catódica se definen en el mismo instante que se seleccionan las estructuras que se desean proteger, pues con este paso se determina desde un inicio el método de aplicación que se llevará a cabo, seguido de cálculos preliminares de las especificaciones físicas de los ánodos para proseguir inmediatamente con la fabricación de las piezas a utilizar. Para el caso de protección catódica en muelles, embarcaderos y monoboyas, se aplican los requisitos establecidos en conjunto con los pasos descritos en la Norma ISO 13174, 2012.

El contenido de la Norma NRF-047-PEMEX-2007 establece que previo a la presentación del diseño de protección catódica para muelles y embarcaderos es necesario determinar el área a proteger, reconocer los requerimientos de corriente y la disponibilidad de fuentes de energía, seleccionar el sistema a utilizar y definir la vida útil de la instalación. Los muelles y embarcaderos se deben proteger explícitamente por medio de ánodos de sacrificio siendo este el sistema a utilizar, en el cual, las propiedades del ánodo no deben afectar la funcionalidad de la estructura a proteger.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1.1. Búsqueda de información sobre la Corrosión y el Puerto de La Libertad

La búsqueda de información sobre la temática de la corrosión partió con la consulta de diversas fuentes bibliográficas proporcionadas al inicio del Curso a la Introducción a la Corrosión Industrial (2023), con las cuales, se logra profundizar en los conceptos generales sobre el fenómeno, los tipos de corrosión, ambientes corrosivos y métodos anticorrosivos y a partir de dichos conocimientos, buscamos orientar el tema del proyecto de investigación a una problemática relacionada con dicho fenómeno, a tal punto de poder involucrarnos activamente con las personas afectadas en cuestión, por lo que, se espera que el enfoque metodológico del presente trabajo se relacione con el trabajo de campo, específicamente a la aplicación de un método anticorrosivo como una alternativa accesible y eficiente, capaz de solventar las consecuencias de la corrosión en un sitio turístico, como lo es el muelle del Puerto de La Libertad.

Al definir la población de interés del proyecto de investigación, también se orientó la búsqueda bibliográfica al Puerto de La Libertad, específicamente, acerca de su historia e importancia cultural para el turismo del país y así, poder destacar la gravedad de la problemática de la corrosión de las estructuras metálicas del muelle y que, al llevar a cabo los objetivos propuestos del proyecto de investigación sea posible finalmente, proponer posibles soluciones para preservar y mejorar la vida útil de las instalaciones, así como garantizar la seguridad e integridad de los usuarios del lugar.

Tras finalizar ambas búsquedas y organizar de toda la información, se determinó que el proyecto de investigación continuase con un enfoque metodológico del tipo analítico, partiendo de la evaluación visual de la integridad de las estructuras metálicas del muelle, específicamente, la corrosión de los pasamanos utilizando la norma SSPC-VIS 2 como referencia, además, de establecer contacto con las autoridades responsables del lugar para poder presentar la propuesta inicial del sistema de protección catódica.

3.1.1.1. Visita Preliminar y Evaluación del Estado del Muelle

Se realizaron dos visitas al muelle para poder examinar el estado actual de las estructuras metálicas, especialmente, de los pasamanos a lo largo de toda la extensión de este y determinar si cumplían con las condiciones necesarias para poder aplicar el método de protección catódica por ánodo de sacrificio, tomándose fotografías del estado en el que se encontraban las estructuras del lugar.

De acuerdo con la norma la SSPC-VIS 2, es posible asignar un grado o calificación al nivel de corrosión presentado en las estructuras metálicas observadas, basándose en el porcentaje de corrosión visible de superficies de acero pintadas, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Escala y Descripción de los Grados de Corrosión

Grado de Corrosión	Porcentaje de Corrosión de Superficie	Estándar Fotográfico		
		“Spot” o Mancha	General	Localizada
10	≤ 0.01%	NINGUNO		
9	0.01%-0.03%	9-S	9-G	9-P
8	0.03%-0.1%	8-S	8-G	8-P
7	0.1%-0.3%	7-S	7-G	7-P
6	0.3%-1%	6-S	6-G	6-P
5	1%-3%	5-S	5-G	5-P
4	3%-10%	4-S	4-G	4-P
3	10%-16%	3-S	3-G	3-P
2	16%-33%	2-S	2-G	2-P
1	33%-50%	1-S	1-G	1-P
0	>50%	NINGUNO		

Extraída de: SSPC-VIS 2: Método estándar para evaluar el grado de corrosión en estructuras de acero pintadas.

Los indicadores del estándar fotográfico se deben interpretar de la siguiente forma:

- I. Corrosión “Spot” o de Mancha: ocurre cuando la mayor parte de la oxidación se concentra en unas pocas áreas localizadas de la superficie pintada, y las fotografías a las que se hace referencia que representan este tipo de oxidación están etiquetadas de 9-s a 1-s.
- II. Corrosión General: Ocurre cuando se logran apreciar varios tamaños de manchas de corrosión de manera aleatoriamente a lo largo de la superficie. Las fotografías de referencia que representan esta corrosión van desde 9-G, hasta 1-G.
- III. Corrosión Localizada: Ocurre cuando la corrosión está distribuida a lo largo de la superficie como “motas” individuales muy pequeñas de corrosión. Las fotografías que representan esta corrosión se categorizan desde 9-P hasta 1-P.

Cabe destacar que no hay fotografías que sean usadas para mostrar los grados de corrosión 10 (Menor a 0.01%) o de grado de corrosión 0 (Mayor al 50% de corrosión sobre la superficie) para ningún tipo de corrosión, debido a las interpretaciones teóricas de cada uno de los casos.

Aclarados los conceptos necesarios, es necesario interpretar la información tabulada, de tal forma que pueda ser aplicada a lo observado durante la primera visita, por lo que, el procedimiento adecuado para ocupar la norma SPCC- VIS 2 es el siguiente:

1. Seleccionar el área para evaluar el grado de corrosión: No hay un tamaño establecido para la evaluación visual de una estructura metálica, sin embargo, para estructuras complejas, aquellas conformadas por varias partes, la selección del área de interés puede abarcar un todo o cada miembro por separado.
2. Determinar la Distribución de la Corrosión: Se determina el tipo de corrosión (“Spot”, general o localizada), que más se parezca al área seleccionada. Se comparan las áreas seleccionadas con la imagen correspondiente del SSPC-VIS 2 (ya sea imagen de color o blanco y negro). Se puede determinar el porcentaje de corrosión de la superficie haciendo una comparación visual con las fotografías de referencia, por técnicas de escaneo electrónico o cualquier otro método que se haya acordado con las partes contratantes.
3. Determinar el grado de corrosión: De acuerdo con la Tabla 3.1, se determina el porcentaje de corrosión visible sobre la superficie seleccionada. Si la corrosión acumulada es muy evidente debajo del recubrimiento, como en una ampolla de óxido o como socavado de óxido, entonces esa área de corrosión deberá ser incluida en la determinación del grado de corrosión.

Aplicando esta metodología, se llevó a cabo el análisis del nivel de corrosión en los pasamanos ubicados en el muelle artesanal dentro del puerto La Libertad comparando las fotos tomadas el día de la visita con las imágenes de referencia de la norma SPCC-VIS 2. La selección del área del pasamanos que se ve en la Figura 3.1 se tomó como muestra general debido a la observación de que todos los pasamanos presentaban un nivel corrosivo similar durante la visita realizada en mayo. De acuerdo con los parámetros establecidos por la normativa, se concluyó que el pasamanos en cuestión exhibe una corrosión localizada o picadura, sin embargo, viendo el grado en el que se encontraba el pasamanos, se asumirá que el grado de corrosión es mayor al 50% por lo que no tiene un grado de acuerdo con esta normativa.



Figura 3.1. Comparación del pasamanos del muelle artesanal del Puerto la Libertad con Corrosión de grado 1-P en blanco y negro, de la normativa SSPC-VIS 2. Visita realizada el 31 de mayo de 2023.

Se puede apreciar que el patrón de corrosión en el pasamanos concuerda con la imagen de referencia del grado de corrosión 1-P del tipo localizada y por picadura y también, es posible afirmar que el nivel de corrosión real en la estructura en la fotografía de la izquierda es mucho mayor al 50%,

valor máximo de referencia en la normativa SPCC-VIS 2, lo que coincide con información bibliográfica recopilada, sobre el tipo de corrosión característico del ambiente marítimo y costero.



Figura 3.2. Comparación del pasamanos del muelle artesanal del Puerto la Libertad con Corrosión de grado 1-P en blanco y negro, de la normativa SSPC-VIS 2. Visita realizada el 22 de septiembre de 2023.

Luego de una segunda visita al lugar, una vez ya comunicada la propuesta del sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio, se observó que varios segmentos del pasamanos habían sido cortados o retirados completamente, dejando aquellos que presentaban una menor corrosión visible con respecto al momento en que se realizó la primera visita. Dicha obra de mantenimiento consistió en la limpieza de las superficies de todos los pasamanos que permanecieron instalados en el muelle y la aplicación de un recubrimiento de tipo barrera mediante el uso de pinturas inorgánicas con acabado anticorrosivo.

Sin embargo, pese a los esfuerzos por mantener visualmente atractivo el área del muelle, los efectos de la corrosión se hicieron notar nuevamente y debido a que la pintura se comenzó a descascarar de la superficie de los pasamanos, se llevó a cabo un nuevo análisis haciendo uso de la norma SPCC-VIS 2, en donde una vez más, se identifica un grado de corrosión mayor al 50%, lo que indica que este tipo de recubrimiento anticorrosivo definitivamente no es el adecuado, como se muestra en la Figura 3.2.

3.1.1.2. Selección del Área de Trabajo

Tras la primera visita al muelle, se llevó a cabo una reunión junto a los directivos encargados de la administración del complejo, CORSATUR (Corporación Salvadoreña de Turismo), para exponer nuestro interés por llevar a cabo la instalación de un sistema de protección contra la corrosión de las estructuras metálicas del lugar, informándoles sobre el tiempo estimado que duraría el proyecto y los materiales que se utilizarían.

Las autoridades del muelle se mostraron positivas y respaldaron la información recopilada sobre tipo el ambiente corrosivo presente y detallaron su experiencia en el uso ánodos de sacrificio en otros proyectos similares en el área, así como los beneficios que podría traer esta alternativa en el futuro.

Acompañados por el personal administrativo se recorrieron las instalaciones del muelle y en base a sus recomendaciones, se seleccionó finalmente, llevar a cabo el montaje del método de protección catódica en un segmento de los pasamanos, porque, implicaría una mayor facilidad para la instalación de los ánodos. El área seleccionada se encuentra ubicada en el extremo izquierdo a la mitad del recorrido total del muelle, debido, a que, en dicho punto, el pasamanos se encuentra alejado de las actividades de comercio y pesca, lo que podría brindar una mayor seguridad e integridad del ánodo de sacrificio una vez instalado.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.2.1. Selección del método adecuado de protección contra la corrosión

En el caso del muelle del puerto La Libertad, los factores que más influyen en el proceso de corrosión son las elevadas temperaturas de la zona costera, el alto porcentaje de humedad presente en el aire y los lodos salinos que son arrastrados por las fuertes corrientes de viento y agua de mar hacia la superficie de las estructuras metálicas.

Considerando las condiciones actuales de las estructuras del muelle y la duración del proyecto de investigación, la primera de las alternativas que se evaluó implementar para evitar la corrosión de las estructuras metálicas del muelle es la sustitución de las piezas ya corroídas y buscar nuevas fabricadas de elementos que posean una mejor resistencia a este tipo de ambiente corrosivo, no obstante, factores como los altos costos económicos y un tiempo mayor al esperado, especialmente, en la búsqueda y compra del material, los procesos de desmontaje de las piezas viejas y la instalación de la nueva estructura, junto con el pago a la mano de obra involucrada, la interrupción de operaciones y de servicios portuarios, concluyendo que esta operación no es óptima frente a esta problemática.

Una alternativa más que se evaluó es la aplicación de recubrimientos anticorrosivos del tipo barrera mediante el uso de pinturas inorgánicas para mitigar la corrosión del muelle, sin embargo, durante la primera reunión que se tuvo con la administración del lugar, se aclaró que el ambiente marino característico de El Salvador es sumamente agresivo al relacionarlo con el ataque corrosivo que este puede generar, sobre todo por la salpicadura de las olas, razones por las cuales este tipo de recubrimiento anticorrosivo por sí solo presenta una gran dificultad para resistir dichas condiciones ambientales por un largo periodo de tiempo, tal y como se pudo apreciar durante la segunda visita realizada, en donde las autoridades administrativas del lugar decidieron poner en marcha por su cuenta este método anticorrosivo, cómo se puede apreciar en la Figura 3.2, resultando en una pérdida económica actualmente desde un punto de vista objetivo con respecto al atractivo visual y los gastos en mantenimiento necesarios para una vez más, arreglar estas estructuras metálicas.

Finalmente, se decidió ocupar ánodos de sacrificio compuestos totalmente de Zinc, debido, a que sus propiedades electroquímicas son altamente compatibles con las condiciones ambientales del entorno marino donde se encuentra el muelle, además, de su fácil proceso de instalación y mantenimiento en estructuras pequeñas y de difícil acceso, su bajo costo económico y que no se requiere de la aplicación de corriente eléctrica, ya que, generaría un riesgo a la integridad de los visitantes del lugar

Se espera que el Zinc logre proteger el área de trabajo seleccionada del muelle, pese a que posee un rendimiento electroquímico confiable muy similar a otras propuestas de metales con un menor costo de adquisición y fundición, por ejemplo, el aluminio. Sin embargo, al comparar ambos metales, el Zinc tiene una menor capacidad anódica (780 Ah/kg) frente a los ánodos de Aluminio (>2500 Ah/kg), lo que brinda la ventaja de que las piezas de Zinc no sean susceptible a la pasivación en ambientes bajos en cloruro o en periodos de baja operación de densidad de corriente a diferencia del aluminio¹², por lo que, en base a estos pequeños detalles, se compensa el mayor gasto económico, pues, se garantiza una protección efectiva contra la corrosión al crear una barrera electroquímica que disminuye la velocidad de deterioro de las superficies metálicas expuestas bajo estas condiciones. Las composiciones químicas típicas para ánodos de aleaciones de zinc se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Composición química para ánodos de zinc en % peso, en aleaciones

Elementos	Aleación Z1	Aleación Z2	Aleación Z3	Aleación Z4
Al	0.1-0.5	0.005 máximo	0.10-0.20	0.10-0.25
Cd	0.025-0.07	0.003 máximo	0.04-0.06	0.001 máximo
Fe	0.005 máximo	0.0014 máximo	0.0014 máximo	0.002 máximo
Cu	0.005 máximo	0.002 máximo	0.005 máximo	0.001 máximo
Pb	0.006 máximo	0.003 máximo	0.006 máximo	0.006 máximo
Sn	-	-	0.01 máximo	-
Mg	-	-	0.5 máximo	0.05-0.15
Otros	0.10 máximo	0.005 máximo	0.1 máximo	0.1 máximo
Zn	99.314 mínimo	99.99 mínimo	Restos	Restos

Nota: Z1 (de acuerdo con especificaciones U.S. MIL-A-18001-K, 1993), Z2 (Zinc de alta pureza, ASTM B418), Z3, y Z4 (aleaciones patentadas para uso en temperaturas elevadas)

Extraída de: NF EN 12496:2013

¹² Burnstein G., Shrerier L., Jarman A., 1994, "Corrosion Vol. 2 Corrosion Control". Oxford, Reino Unido

3.2.1.1. Consideraciones finales de la selección de los materiales de trabajo

La relación entre el uso de protección catódica y otros tipos de recubrimientos es una estrategia complementaria para combatir la corrosión en estructuras y objetos metálicos, debido a que el uso de ánodos de sacrificio a diferencia de las demás alternativas expuestas como los recubrimientos con pinturas inorgánicas, no necesitan una cobertura total de la superficie, lo que representa una gran desventaja en el sistema anticorrosivo seleccionado, debido a que demanda un mayor número de piezas para las área de mayor amplitud cómo es el caso de toda la extensión del muelle, por lo que, de obtener resultados positivos en la puesta en marcha de la protección catódica por este método, al evaluar a mayor escala, se tiene que hacer en conjunto de otro tipo de protección que reduzca los costos de inversión y mantenga la eficiencia de sistema anticorrosivo.

La Figura 3.3 muestra esquemáticamente que existe una combinación óptima entre la calidad del revestimiento y la protección catódica que minimiza el costo de proteger una estructura, en donde, se observa que el costo por recubrimiento crece, a medida que dicho método se hace progresivo y se muestra más libre de defectos, mientras que el costo correspondiente de aplicar protección catódica disminuye. Cabe mencionar, que la línea punteada muestra el costo total, en donde, se deja en claro que hay un beneficio total al utilizar ambos métodos idealmente, es decir, aplicar un recubrimiento anticorrosivo junto con un sistema de protección catódica.

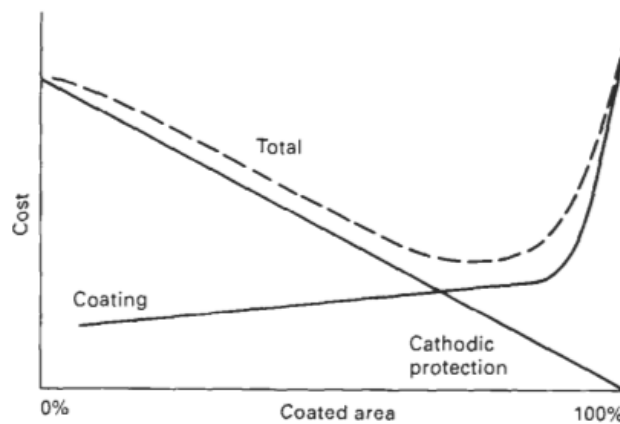


Figura 3.3. Diagrama esquemático que ilustra el beneficio económico del uso conjunto del recubrimiento y protección catódica. (Tomado de Burnstein G., Shrier L., Jarman A., 1994, "Corrosion Vol. 2 Corrosion Control". Oxford, Reino Unido)

3.3. DISEÑO TEÓRICO DEL ÁNODO DE SACRIFICIO

La fabricación del ánodo de sacrificio conllevó tres procesos fundamentales, la fundición del metal, el moldeado en caliente y el secado y retoque de la pieza, cómo se detallarán más adelante, sin embargo, para poder llevar a cabo estos pasos, en primer lugar, fue necesario fabricar el molde, es decir, el recipiente que le daría la forma final al ánodo.

El recipiente debe diseñarse a partir de las dimensiones que requerirá la pieza para cumplir satisfactoriamente con su función como sistema anticorrosivo, por lo que, para poder proseguir con la propuesta del método de protección catódica, se determinó que el ánodo debe poseer las especificaciones teóricas presentadas en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Especificaciones teóricas del diseño del ánodo de sacrificio propuesto

Diseño Teórico final del ánodo de Sacrificio		
Especificación	Valor	Descripción
Área que proteger	$A_{proteger} = 8.48 \text{ m}^2$	El área que el ánodo protegerá se calculó a partir del área de trabajo total seleccionada durante las visitas al lugar y el porcentaje de fallo del recubrimiento utilizado previamente en dicha área.
Densidad de Corriente	$i_{cp} = 150 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}$	Se refiere al flujo de corriente eléctrica a la cual está sometida la pieza y que viene dada por las interacciones electroquímicas del medio ambiente con la superficie del ánodo, dicho valor es necesario para la determinación del peso neto mínimo del ánodo.
Peso neto mínimo	$W_{Total} = 1.98 \text{ kg}$	El Anexo B de la Norma ISO 13724:2012, propone que el cálculo del peso neto mínimo de los ánodos utilizados en instalaciones portuarias se estime en función de la densidad de corriente, el tiempo de vida deseado para la pieza, la capacidad anódica y el factor de utilización del ánodo. Estas últimas dos propiedades son valores de referencia extraídos de la norma ISO 13724:2012 y la norma ISO 13174:2012, respectivamente.
Volumen	$v = 0.00028 \text{ m}^3$	Con el peso neto mínimo y la definición de la densidad, se obtiene el volumen neto mínimo que deberá tener la pieza de acuerdo con las especificaciones previas
Resistencia	$R_a = 0.1364 \Omega$	La resistencia depende de las dimensiones que tendrá el ánodo, por lo que, en este punto se decidió que la pieza tendría la forma de un cilindro hueco, por lo que, haciendo uso de las ecuaciones de volumen y área de un cilindro hueco y finalmente, la ecuación de McCoy se determinó la resistencia del ánodo propuesto que estará expuesto a agua de mar cálida.
Intensidad	$I_a = 1.2830 \text{ A}$	Aplicando la Ley de Ohm, se calcula la intensidad de corriente que tendrá el ánodo, es decir la corriente de salida que posee la pieza frente al voltaje del circuito (el diferencial de voltaje entre la estructura a proteger y el ánodo) y la resistencia determinada previamente.
Vida útil	$T_{\text{ánodo}} = 6.26 \text{ semanas}$	Se define como el tiempo estimado en que el ánodo mantendrá la efectividad de su acción corrosiva y depende del peso de la pieza, el factor de utilización, la intensidad de corriente y la velocidad de consumo del ánodo en el ambiente corrosivo evaluado, siendo esta última propiedad un valor de referencia extraído de la norma BS EN 12496:2013.

...Continúa...

Tabla 3.3. Especificaciones teóricas del diseño del ánodo de sacrificio propuesto (Continuación)

Diseño Teórico final del ánodo de Sacrificio		
Especificación	Valor	Descripción
Número de Ánodos	$N = 0.9914 \approx 1 \text{ ánodo}$	El número de ánodos de sacrificio necesarios para llevar a cabo el sistema de protección catódica se calcula a partir del cociente la intensidad de corriente del sistema y la intensidad de corriente del ánodo

La Tabla 3.3 resume los cálculos efectuados para la determinación de cada una de las propiedades anteriormente tabuladas, no obstante, a continuación, se presenta detalladamente los pasos que se llevaron a cabo durante el diseño teórico del ánodo de sacrificio que finalmente se presentaría a las entidades administrativas del muelle del puerto La Libertad, especificando las variables necesarias y las referencias bibliográficas de donde se extrajeron los valores teóricos.

3.3.1. Área de trabajo

Para poder evaluar la efectividad de la protección catódica por el método de ánodos de sacrificio de Zinc, las propiedades físicas de los ánodos a utilizar deben definirse con respecto al área superficial de la pieza que se desea proteger específicamente, por lo que, se determinó inicialmente que el área de interés en la cual se llevará a cabo el proyecto de investigación será dos secciones completas del pasamanos del muelle del puerto La Libertad, cuyas dimensiones se midieron con ayuda de una cinta métrica y se encuentran detalladas en la Figura 3.4.

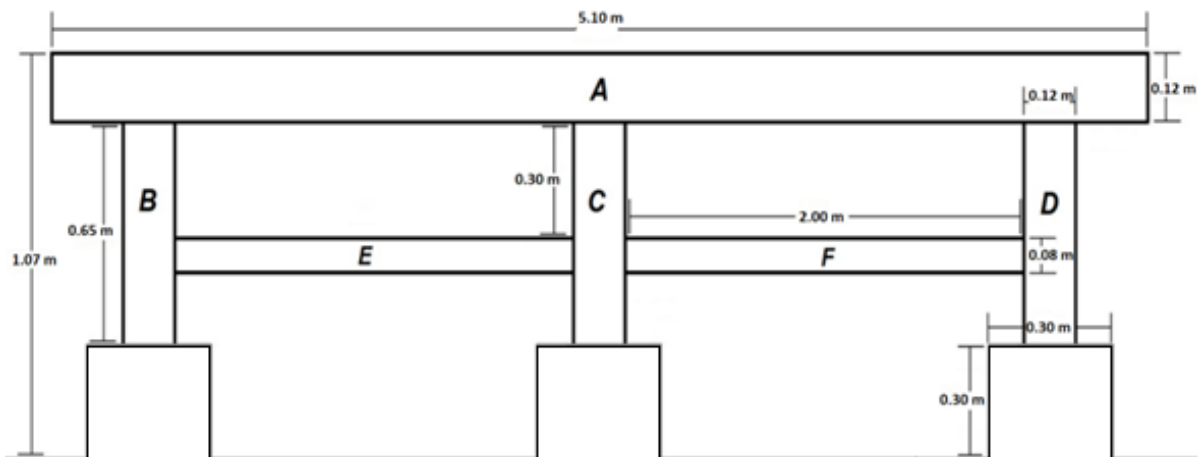


Figura 3.4. Esquemización de la vista frontal de una sección completa del pasamanos del Muelle del Puerto La Libertad.

Para poder calcular el área de trabajo total, durante las visitas que se llevaron a cabo, se midieron las longitudes de las piezas que conforman la sección completa del pasamanos, por lo que, de acuerdo con la ecuación 2, tomada del trabajo de graduación “*Protección catódica con ánodos de sacrificio en un prototipo de intercambiador de calor*”, el área a proteger será calculada de la siguiente forma:

$$A_p = \frac{\text{Área total expuesta} * \text{Porcentaje de fallo del Recubrimiento (\%)}}{100} \quad \text{Ecuación. 2}$$

El área expuesta de un pasamanos será entonces igual a toda el área visible de este, la cual, está conformada por 6 cilindros, por lo que, el área total será igual a la sumatoria de las áreas de cada sección del pasamanos utilizando la siguiente ecuación:

$$A_{cilindro} = 2\pi r(r + h) \quad \text{Ecuación. 3}$$

$$A_A = 2\pi(0.06m)(0.06m + 5.10 m) = 1.94 m^2$$

$$A_B = 2\pi(0.06m)(0.06m + 0.65 m) = 0.26 m^2$$

$$A_C = 2\pi(0.06m)(0.06m + 0.65 m) = 0.26 m^2$$

$$A_D = 2\pi(0.06m)(0.06m + 0.60. m) = 0.26 m^2$$

$$A_E = 2\pi(0.04m)(0.04m + 3.0 m) = 0.76 m^2$$

$$A_F = 2\pi(0.04m)(0.04m + 3.0 m) = 0.76 m^2$$

$$A_{pasamanos} = A_A + A_B + A_C + A_D + A_E + A_F \quad \text{Ecuación. 4}$$

$$A_{pasamanos} = (1.94 + 0.26 + 0.26 + 0.26 + 0.76 + 0.76) m^2 = 4.24 m^2$$

Debido a que son 2 pasamanos los que se tendrán que proteger porque estos se encuentran unidos, el área total será la suma de estas dos áreas:

$$A_{Total} = 8.48 m^2$$

Un cálculo preliminar adicional está relacionado con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la norma SSPC-VIS 2, porque, al analizar el estado actual de los pasamanos es posible asumir un porcentaje del 100% de fallo en el recubrimiento. Este término refleja la proporción de deterioro en la capa protectora, la cual varía a lo largo de la vida de la estructura, el cual se evidencia en las Figuras 3.1 y 3.2, en donde se observa un nivel avanzado de corrosión por picaduras en los pasamanos en dichas estructuras metálicas. En consecuencia, el área definitiva a proteger se determina sustituyendo los valores en la ecuación 2, de la siguiente forma:

$$A_p = \frac{8.48 m^2 * 100}{100}$$

$$A_p = 8.48 m^2$$

3.3.2. Densidad de Corriente

La densidad de corriente se refiere al flujo de electricidad que pasa a través de un área determinada y dado que el muelle es un espacio dedicado principalmente a actividades turísticas, en donde, es imperativo que cumpla con las condiciones de seguridad mínimas para garantizar la protección de los visitantes, se espera que dicho flujo sea mínimo.

Sin embargo, considerando el ambiente altamente corrosivo del muelle, caracterizado por la presencia de humedad y salitre, se espera que la densidad de corriente en los pasamanos sea relativamente alta, cuyo valor deberá estar vinculado exclusivamente a las interacciones electroquímicas de las sustancias que componen la estructura el cual es será inofensivo e imperceptible para los visitantes del lugar. Para la determinación de este valor, y dado que no hay uno de referencia proporcionado por las autoridades del muelle, se utilizará los valores descritos en la Tabla 3.4, provenientes del Anexo A1 de la norma ISO 13174:2012, donde estipula que se utilizan estos al no haber cualquier otra experiencia documentada.

Tabla 3.4. Diseños típicos de densidades de corriente para la protección de acero al desnudo

Situación	Densidad de corriente (mA/m ²)					
	Valor inicial		Valor de Mantenimiento		Valor de Repolarización	
	En agua poco aireada	En agua muy aireada	En agua poco aireada	En agua muy aireada	En agua poco aireada	En agua muy aireada
Condiciones con marea con un caudal inferior a 0,5 m/s	80 – 100	120 – 150	50 – 65	65 – 80	60 – 80	80 – 100
Condiciones con marea con un caudal mayor a 0,5 m/s	120 – 150	170 – 200	60 – 80	80 – 100	80 – 100	100 – 130
Condiciones con CAPA (Corrosión en Agua Poco Acelerada) establecido o Corrosión Microbiana (MIC)	170 – 200		60 – 100		80 – 130	

Extraída de: BS EN ISO 13174:2012 (E)

El valor de densidad de corriente inicial a utilizar para el cálculo del diseño del ánodo será asumiendo una situación en donde las condiciones con marea con un caudal inferior a 0.5 m/s, en agua muy aireada. Entonces:

$$i_{cp} = 150 \frac{mA}{m^2}$$

3.3.3. Peso y volumen neto mínimo del ánodo

Para poder definir las dimensiones del ánodo y el número de piezas necesarias, debe calcularse previamente el peso neto total mínimo que deberá tener cada ánodo, para esto, se utilizó la siguiente ecuación, la cual se extrajo de la Norma ISO 13724:2012, Anexo B:

$$W_{Total} = \frac{I_{cp} * T_{diseño} * 8760}{Q * u} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- W_{Total} es el peso total mínimo de material de ánodo requerido, en kilogramos (Kg).
- I_{cp} es la Intensidad es la corriente de mantenimiento total que circula a través de la estructura a evaluar. Esta se obtiene de la definición de densidad de corriente, de tal forma que la intensidad de corriente será el producto de la densidad de corriente y el área de interés.

$$I_{cp} = i_{cp} * A_p \quad \text{Ecuación 6}$$

$$I_{cp} = \left(0.150 \frac{A}{m^2} * 8.48 m^2 \right) = 1.272 A$$

- $T_{diseño}$ es el tiempo de vida estimado en años, en los cuales se espera que el ánodo cumpla con su función de proteger contra la corrosión un área determinada. Debido que el proyecto de investigación de la aplicación de Protección Catódica en el pasamanos del Muelle del Puerto La Libertad durará 6 semanas, se espera que el ánodo de sacrificio cumpla su función en el mismo tiempo (0.115068 años).
- 8760 representa el factor de conversión de 1 año a horas.
- Q es la capacidad práctica del ánodo (capacidad anódica) en base al material considerado en su diseño, en amperios-hora por kilogramo (A·h/kg). Dicho valor se obtuvo del anexo B de Norma ISO 12496:2013, en donde se especifica que la capacidad de corriente en agua de mar del Zinc a temperatura ambiente es de 760 A·h/kg.
- Por último, u es el factor de utilización determinado por la porción de material anódico consumido cuando el material restante del ánodo no puede entregar la corriente requerida, este se relaciona con la forma del ánodo y el diseño del núcleo de acero dentro de este, de tal forma, que el valor puede variar de 0.70 a 0.95 de acuerdo con la Norma ISO 13174:2012. De acuerdo con Francia, S. (2004), el factor de utilización puede ser de 0.85, ya que cuando un ánodo se ha consumido en ese porcentaje debe sustituirse porque el material restante es insuficiente para mantener un porcentaje razonable de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar, por lo que se utilizará este valor para los siguientes cálculos.

De forma que el peso total mínimo será:

$$W_{Total} = \frac{1.272 * 0.115068 * 8760}{760 * 0.85} = 1.9847 kg \approx 2.0 kg$$

Con este valor y de acuerdo con la definición de densidad es posible conocer el volumen neto mínimo con que contará el ánodo, para esto, se utilizó la densidad de una pieza que sea 99.99% hecha de Zinc, que cuenta con un valor de 7138 kg/m³. La masa que se usará para el ánodo será el valor

aproximado de 2000 gramos o 2 kg, por lo que, al despejar la ecuación 7, podemos encontrar el valor del volumen que tendrá este ánodo:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{2 \text{ Kg}}{7138 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.00028 \text{ m}^3$$

De esta forma, es posible calcular las dimensiones necesarias para el diseño final del ánodo, las cuales, deben ir en concordancia con las especificaciones estéticas y de seguridad definidas por la entidad administrativa del Muelle, CORSATUR.

3.3.4. Diseño teórico final del Ánodo

Como se puede apreciar en la Figura 3.5, el ánodo de sacrificio propuesto es un cilindro hueco con un radio externo de 6.4 cm, el cual se posiciona alrededor del tubo superior de la sección del pasamanos, con una soldadura transversal que parta de los extremos del ánodo de forma que cubra completamente 15 cm de la superficie de la pieza.

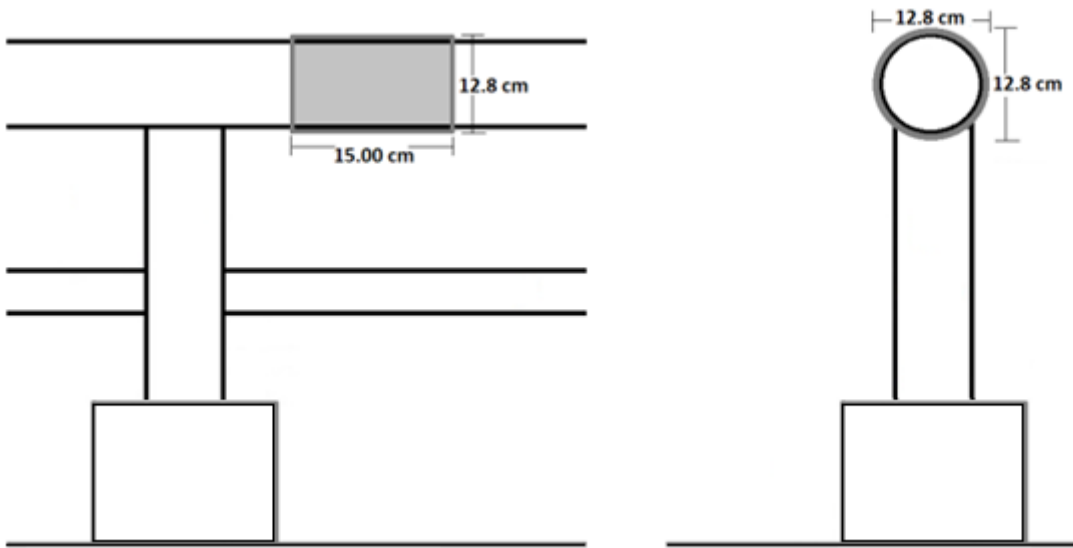


Figura 3.5. Esquemática de la vista frontal y de perfil del pasamanos con el ánodo como abrazadera.

Las medidas propuestas para este diseño se calcularon en base al volumen calculado previamente y utilizando la ecuación del volumen para un cilindro hueco, en donde el valor de r será el valor real del radio del tubo superior del pasamanos (0.06 m), de la siguiente manera:

$$V = \pi * h * (R^2 - r^2) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi * h} + r^2}$$

$$R = \sqrt{\frac{0.00028 \text{ m}^3}{\pi * 0.15 \text{ m}} + (0.06 \text{ m})^2} = 0.0643 \text{ m } \text{ ó } 6.4 \text{ cm}$$

3.3.4.1. Resistencia del Ánodo

Debido a que la relación $L \geq 4 r$ no se cumple, y se da el caso que la abrazadera estará soldada a la superficie del pasamanos, de acuerdo con el Anexo B 1.3 de la norma ISO 13174:2012, para calcular la resistividad del ánodo es posible aplicar la ecuación de McCoy, que está definida por la resistividad al entorno y el área de la pieza, de la siguiente forma:

$$R_a = 0.315 \frac{\rho}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde, de acuerdo con el Anexo B 1.3 de la norma ISO 13174:2012, se espera que el valor de resistividad del entorno típico para ánodos de sacrificio expuestos a agua de mar cálida se encuentre entre 0.15 y 0.25 $\Omega \cdot \text{m}$. Para este caso del ejercicio se asumirá el valor de 0.15 $\Omega \cdot \text{m}$, mientras que el área del cilindro hueco está definida por la siguiente ecuación:

$$A_{\text{Cilindro hueco}} = 2 * \pi * (R^2 - r^2) + 2 * \pi * h * (R + r) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$A = 2 * \pi * (0.064^2 - 0.06^2) + 2 * \pi * 0.15 * (0.064 + 0.06) = 0.11998 \text{ m}^2$$

Por lo que, al sustituir en la ecuación 9, la resistividad final del ánodo será:

$$R_a = 0.315 \frac{0.15}{\sqrt{0.11998}} = 0.1364 \Omega$$

3.3.4.2. Intensidad del Ánodo

Según la norma ISO 13174:2012 para un sistema de protección catódica utilizando ánodos galvánicos, el tamaño y la forma del ánodo será determinado utilizando la Ley de Ohm. En este caso, se calculará mediante la ecuación 11:

$$I_a = \frac{\Delta U}{R_{\text{sistema}}} = \frac{U_2 - U_1}{R_a} \quad \text{Ecuación 11}$$

En donde I_a es la corriente de salida del ánodo, ΔU es el voltaje en el circuito y R_{sistema} es la resistencia del sistema, siendo esta aproximadamente igual a la resistencia del electrolito, lo que se denomina como "Resistencia anódica", ya que la resistencia del cátodo (estructura) comparada a la del electrolito es generalmente muy pequeña. La resistencia del ánodo es función de la resistividad del entorno anódico y de la geometría (forma y tamaño) del ánodo. Dicho valor fue calculado a través de la ecuación 9.

El valor de ΔU se calcula como la diferencia de potencial entre el potencial polarizado del acero y el potencial de operación de la aleación del ánodo particular en agua de mar. El primero de estos, el potencial del acero polarizado, de acuerdo con la norma ISO 13174:2012, presenta valores en el

rango de -0.80 V en ambientes de corrosión no microbiana/Corrosión Acelerada por Bajo Nivel de Agua y -0.90 V en ambientes de corrosión microbiana/ Corrosión Acelerada por Bajo Nivel de Agua, todo con respecto a $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{agua de mar}$. Finalmente, se decidió tomar el promedio de ambos valores para este caso.

El potencial de operación de la aleación de ánodo particular en agua de mar, siendo el rango de valores para la aleación de Zinc de -1.05 V a -1.00 V de acuerdo con la Norma ISO 13174:2012. Para este caso, también se decidió sacar el promedio de ambos valores, siendo este de -1.025 V .

$$\Delta U = U_{p,acero} - U_{p,\text{ánodo}} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\Delta U = -0.85 - (-1.025)\text{ V} = 0.175\text{ V}$$

La intensidad de corriente del ánodo en forma de abrazadera sería entonces de:

$$I_a = \frac{0.175\text{ V}}{(0.1364)\Omega} = 1.2830\text{ A}$$

3.3.4.3. Vida útil del Ánodo

La vida útil para el ánodo en forma de abrazadera se calculó aplicando la ecuación 13, en donde, el peso de la pieza (2.0 Kg), el factor de utilización de 0.85 como se mencionó anteriormente y la Velocidad de consumo del Ánodo, E , obtenida de la Tabla 3.5 de la norma BS EN 12496:2013, asumiéndose una aleación Z2 o un ánodo de Zinc de 99.99% de pureza ($11.5\text{ Kg}/\text{A}\cdot\text{año}$), mientras que la intensidad del ánodo corresponde al valor calculado previamente con la ecuación 12 (1.2830 A).

Tabla 3.5. Propiedades Electroquímicas de los Ánodos de Zinc a temperatura ambiente ($5\text{ }^\circ\text{C} - 25\text{ }^\circ\text{C}$)

Tipo de Aleación	Ambiente	Potencial Circuito Cerrado de $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{Agua de Mar}$ de Electrodo de Referencia (V)	Capacidad de Corriente $\text{A}\cdot\text{h}/\text{Kg}$	Velocidad de Consumo del Ánodo $\text{Kg}/\text{A}\cdot\text{año}$
Aleación Z 1	Agua de Mar	-1.03	780	11.2
	Sedimento Marino	-0.99	750	11.8
Aleación Z 2	Agua de Mar	-1.00	760	11.5
Aleación Z 3	Agua de Mar	-1.03	780	11.2
Aleación Z 4	Agua de Mar	-1.03	780	11.2
	Sedimento Marino	-0.98	710	12.3

Extraída de: "BS EN 12496:2013 Galvanic anodes for cathodic protection in seawater and saline mud"

$$T_{\text{ánodo}} = \frac{W_{\text{ánodo}} \cdot u}{E \cdot I_a} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$T_{\text{ánodo}} = \frac{2.0 \cdot 0.85}{11.5 \cdot 1.283} = 0.12\text{ años o }6.26\text{ semanas}$$

3.3.4.4. Número de Ánodos

Por último, para determinar la cantidad de ánodos de sacrificio necesarios para proteger un área de 8.5 m² que corresponde a dos segmentos del pasamanos del muelle se aplica la siguiente ecuación, extraída del CP 3–Manual Técnico del Curso Superior en Protección Catódica, utilizando los valores de la intensidad de corriente del tubo y del ánodo calculados previamente, de la siguiente forma:

$$N = \frac{I_{cp}}{I_a} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$N = \frac{1.272}{1.283} = 0.9914 \approx 1 \text{ ánodo}$$

Resultando, en que de manera teórica se necesita solo un ánodo de zinc, el cual tendrá forma cilíndrica hueca, con un radio externo de 0.064 m, un radio interno de 0.06 m, una altura de 0.15 m y con un peso aproximado de 2.0 kg para proteger dos segmentos del pasamanos.

3.4. DISEÑO EFECTIVO DEL ÁNODO DE SACRIFICIO

Tras presentar y obtener la aprobación del diseño teórico final del ánodo de sacrificio por parte del personal administrativo del muelle del Puerto La Libertad (CORSATUR), se comenzó la búsqueda del zinc para la fabricación de la pieza, siendo la manera más accesible de conseguirlo directamente en forma de zinc metálico para posteriormente ser fundido y obtener la forma del diseño final gracias a un molde prefabricado con las medidas determinadas previamente. Para esto, se contactó a diferentes distribuidoras, ferreterías y ventas de metales en el país y cotizar los distintos precios de venta, seleccionando finalmente, Inversiones Capitol, en donde pudimos adquirir una pieza de zinc puro con un peso de 2.26 kg (5 lbs) y un precio unitario de \$24.4 por libra. En el Anexo 1 se encuentra la hoja técnica del zinc adquirido.

Tras la recolección de todos los materiales, se contactó una fundidora, la cual se encargaría de elaborar el molde del ánodo bajo las especificaciones detalladas en los cálculos del diseño teórico final (Figura 3.6.) y posteriormente, también se llevarían en la misma empresa a cabo los procesos de fundición, moldeado en caliente y secado de la pieza.



Figura 3.6. Fase de secado de la mitad del ánodo de zinc posterior al moldeado en caliente.


Por la forma particular del ánodo de sacrificio y poder colocarlo en el pasamanos fue diseñado como una abrazadera de dos partes, por lo que, como se puede observar en la Figura 3.7, ambas piezas se fundieron por separado y finalmente, con una lija de agua se removieron las impurezas del proceso de fabricación y se comprueba que posea las medidas adecuadas en base al diseño teórico final propuesto.



Figura 3.7. Resultado final de la fabricación del ánodo de zinc.


Tras completar el proceso de fabricación del ánodo de zinc, se llevó al muelle del Puerto La Libertad, para verificar que el resultado final se ajustara correctamente a la superficie del pasamanos, obteniendo resultados satisfactorios al simular la instalación de la abrazadera de forma manual. Con estos resultados se obtuvo la aprobación del personal administrativo para instalar el ánodo, sin embargo, previo a esto, se calcularon las especificaciones de las piezas para contrastar los resultados finales obtenidos con las especificaciones teóricas calculadas, los cuales se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Especificaciones del diseño efectivo del ánodo de sacrificio fabricado

Diseño efectivo del ánodo de Sacrificio fabricado		
Especificación	Valor	Descripción
Peso	$W_{Total} = 2.64 \text{ kg}$	 <p>Con ayuda de una balanza semianalítica, se obtiene directamente el valor del peso de la pieza, obteniendo una discrepancia de 0.66 kg (660 g) con respecto al valor teórico.</p>

...Continúa...

Tabla 3.6. Especificaciones del diseño efectivo del ánodo de sacrificio fabricado (Continuación)

Diseño efectivo del ánodo de Sacrificio fabricado		
Especificación	Valor	Descripción
Volumen	$L = 17.5 \text{ cm}$ $r = 6 \text{ cm}$ $R = 6.5 \text{ cm}$ $v = 0.00034 \text{ m}^3$	 <p>Con ayuda de una cinta métrica se midió el largo y los radios interior y externos, obteniendo directamente el volumen de la pieza al sustituir los valores en la ecuación del volumen del cilindro hueco.</p>
Densidad	$\rho = 7566.68 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Con el valor del peso y el volumen, haciendo uso de la definición de densidad se obtuvo el valor de la densidad final de la pieza, la cual presenta una diferencia de 428.68 kg/m ³ con el valor teórico, siendo esta más densa, lo que concuerda con la diferencia de peso.
Resistencia	$A_{\text{cilindro hueco}} = 0.1217 \text{ m}^2$ $R_a = 0.1354 \Omega$	Para la determinación de la resistencia del ánodo, se empleó la ecuación 9, haciendo uso del valor previamente establecido para la resistividad del entorno típico de ánodos de sacrificio expuestos a agua de mar cálida, asumido para la pieza teórica, con un valor de 0.15 Ω·m. Además, se necesita del cálculo del área del ánodo utilizando la ecuación 10.
Intensidad	$I_a = 1.2922 \text{ A}$	La determinación de la intensidad se llevará a cabo mediante la aplicación de la ecuación 11, en donde se utiliza el valor de la resistencia previamente calculada y el ΔU, el cual se mantiene constante con 0.175 V que se calculó con la ecuación 12.
Vida útil	$T_{\text{ánodo}} = 7.9 \text{ semanas}$	Se aplicó la ecuación 13, considerando el peso real de la pieza. El factor de utilización y la velocidad de consumo del ánodo se mantienen constantes, siendo 0.85 y 11.5 Kg/A·año, respectivamente y el valor de intensidad
Número de Ánodos	$N = 0.9843 \approx \mathbf{1 \text{ ánodo}}$	El número de ánodos de sacrificio necesarios para llevar a cabo el sistema de protección catódica se calcula a partir del cociente del valor intensidad de corriente del sistema y del nuevo valor de intensidad de corriente del ánodo

3.4.1. Instalación del Ánodo de Sacrificio

3.4.1.1. Pretratamiento del área de trabajo

Previo a la instalación del ánodo se comunicó con el personal administrativo del muelle del Puerto La Libertad para poder llevar a cabo la limpieza del área del pasamanos en donde se llevaría a cabo el montaje del sistema de protección catódica, lo que conllevó el uso de agua potable y agentes de

limpieza para remover los lodos salinos presentes, sin embargo, esto no redujo el nivel de óxido en la superficie, debido a que la corrosión del pasamanos se encuentre a un nivel más profundo, lo que implicaba que para remover la mayor parte de las picaduras y capas de óxido se necesitaría de una herramienta manual específica para esta situación.

Se consultó la norma SSPC-VIS 3, la cual hace uso de fotografías de referencia, en donde presenta la apariencia inicial de estructuras con distintos niveles de corrosión y otras donde muestra los resultados de la limpieza con herramientas manuales o eléctricas específica para cada caso. Sin embargo, es de destacar, que las variaciones en las condiciones del acero a limpiar, así como el tipo de herramienta y la operación a ocupar, hará que la apariencia de la superficie limpia también variara, por lo que el estándar escrito será la manera principal para determinar la conformidad con la limpieza con herramientas manuales y eléctricas.

En el Anexo 2, se presentan los términos implementados en el análisis de la condición inicial del área de trabajo y el tipo de preparación recomendada, de acuerdo con la SSPC-VIS 3, para el correcto entendimiento del proceso de uso de la dicha norma, descrito a continuación:

Para determinar las condiciones iniciales del acero:

1. Si el acero no ha sido previamente pintado, se seleccionan las fotografías de referencia que se parezcan a las condiciones A, B, C o D. Si ha sido pintada, se selecciona entonces las fotografías con las condiciones E, F o G.
2. Se determinan las condiciones y herramientas a evaluar de la siguiente manera: Si se determina usar SSPC-SP2, se utilizan las fotografías con designación SP2. Si se utilizara SSPC-SP3, determinar que herramienta fue ocupada, si SP3/PWB o SP3/SD. Si se utiliza SSPC-SP15, entonces ocupar las fotografías con designación SP15 (un perfil existente puede ser restaurado si cumple el requisito mínimo de 1 mil o 25 micrómetros o si el perfil requerido puede ser producido usando un conjunto de granallado de aleta rotativa o una pistola de aguja de 2 mm). Si se necesita SSPC-SP11 determinar si el intento es para producir un perfil o restaurar un perfil existente.
3. Se seleccionan las fotografías de referencia con el SSPC-VIS 3 utilizando la herramienta que más se acerque o corresponda a la fotografía de la superficie terminada.

Siguiendo estos pasos, se compara la superficie del pasamanos elegido con una de las imágenes de referencia que aparece en la norma SSPC-VIS 3. El área seleccionada cuenta con recubrimiento del tipo barrera mediante el uso de pintura con acabado anticorrosivo, por lo que, de acuerdo con el paso 1, se debe compara con las fotografías de las condiciones iniciales E, F o G. Se selecciono la condición F, por ser la más parecida a las condiciones iniciales, como se muestra en la Figura 3.8.

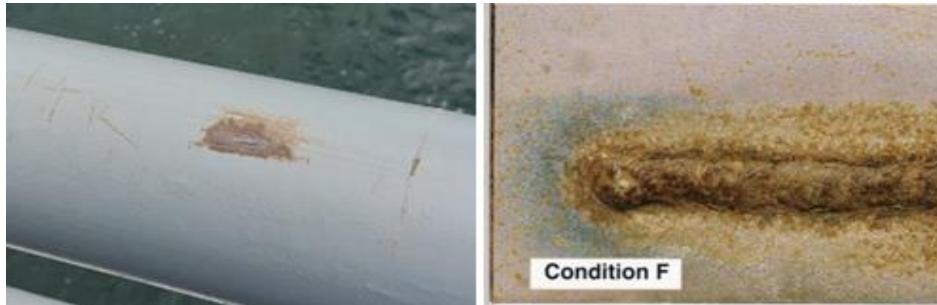


Figura 3.8. Comparación entre las condiciones iniciales vistas en los pasamanos y la Norma SSPC-VIS 3.

Después de establecer las condiciones iniciales de la superficie, se comenzó la preparación del área elegida, donde se ubicaría el ánodo, del pasamanos. Inicialmente, se optó por aplicar un solvente para facilitar la remoción del recubrimiento existente, seguido del uso agua potable para eliminar los residuos de la pintura.

Finalizada la remoción de la pintura del pasamanos, se utilizó una herramienta eléctrica según lo recomendado en el paso 2 del uso de la norma, seleccionando un cepillo de alambre eléctrico (SSPC SP3 / SP3/PWB), con el cual, se logra exponer completamente la superficie metálica al desnudo. Finalmente, se procede a realizar una comparación de los resultados finales de la preparación de la superficie con lo mostrado en la Norma SPCC-VIS 3 cómo se aprecia en la Figura 3.9.

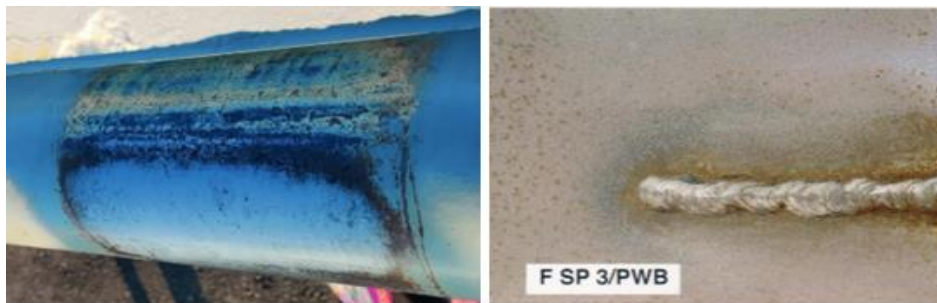


Figura 3.9. Comparativa entre la superficie del área del pasamanos ya preparada, con la fotografía de referencia de la norma SSPC-VIS 3.

3.4.1.2. Instalación de ánodo

Al finalizar la preparación de la superficie del área de trabajo, se procede con la instalación del ánodo al pasamanos. Para esto, se solicitó la ayuda de un equipo de soldadura y un operario ajeno a las instalaciones del Puerto de La Libertad, bajo la supervisión de los directivos del lugar, se procedió con el montaje de la pieza de acuerdo con las especificaciones del diseño final seleccionado, colocando las dos mitades del ánodo alrededor del tubo superior del pasamanos. El ánodo se soldó desde los extremos a ambos lados de los cortes de ambas piezas hasta unir completamente ambos bordes. Finalmente, para brindar un refuerzo mayor a la instalación, se colocaron dos abrazaderas de zinc industrial sobre el ánodo, con las cuales, incluso se podrá comparar el avance de la corrosión

al ser una aleación de zinc bajo las mismas condiciones que el ánodo hecho de zinc puro, tal y como se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Instalación del ánodo de sacrificio en el pasamanos del muelle del Puerto La Libertad.

3.4.1.3. Designación de medidas de seguridad del área de trabajo

Para propiciar la integridad de la pieza y prolongar el tiempo efectivo mínimo que debe durar el trabajo de investigación, el cual debe ser de al menos 1000 horas de observación, es necesario designar una serie de medidas de control y seguridad para el área de trabajo, de tal forma, que evite alteraciones o pérdidas totales del sistema de protección catódica en el área del pasamanos seleccionada.

Debido a las condiciones climatológicas relacionadas con la tormenta tropical Pilar, registrada a inicios del mes de noviembre, la cual, impactó fuertemente en el país sobre todo en las zonas costeras, con la presencia de constantes lluvias y aumentando la velocidad del viento, por parte del personal administrativo del muelle del Puerto La Libertad, se prohibió el acceso al área del muelle, ya que, sufrió leves desperfectos estructurales pero que de igual forma, conllevaban un peligro a la seguridad de los visitantes. A raíz de esta problemática, se llevaron a cabo procesos de mantenimiento del lugar, que no comprometieron la integridad del ánodo de sacrificio, sino que facilitó el cuidado de la pieza.




De igual forma, se designó un monitoreo visual realizado por el equipo de vigilancia del muelle durante su recorrido diario por la extensión del muelle, mientras que, el equipo a cargo del trabajo de investigación realizaríamos visitas semanales los fines de semana al área para llevar a cabo una verificación más detallada del proceso de corrosión en el ánodo y el pasamanos, con el fin de detallar los efectos del sistema de protección catódica durante la vida útil del ánodo.

CAPITULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de la instalación del ánodo, se procedió con el seguimiento visual del estado de la pieza y del pasamanos, el cual se llevó a cabo de forma semanal, en donde, se documentó con fotografías cada visita realizada. Debido a la proximidad de la entrega del documento final del proyecto de investigación, lamentablemente el seguimiento del método de protección catódica propuesto reportado hasta la fecha, comprende un total de 504 horas, sin embargo, el ánodo se mantiene instalado a la espera de poder verificar el cumplimiento de los resultados esperados, de acuerdo con los objetivos propuestos para esta investigación, que debe coincidir con la vida útil calculada para la pieza fabricada (7.3 semanas), es decir, 722.4 horas más.

Pese a esto, a continuación, se presentan las observaciones tomadas durante tres semanas luego de la instalación del ánodo:

Tabla 4.1. Seguimiento visual del ánodo del Zinc y el pasamanos del muelle la Libertad

Evaluación visual del estado de Ánodo de Sacrificio	
Imagen	Observaciones
	<p style="text-align: center;">Tiempo transcurrido: <u>0 horas</u></p> <p>Este es el estado original de la pieza al inicio del proceso de seguimiento. Se observa que la pieza tiene un color gris claro brillante. Las áreas del pasamanos anexas al ánodo no presentan indicios de corrosión, debido a que recientemente se aplicó el recubrimiento tipo barrera con pintura.</p>
	<p style="text-align: center;">Tiempo transcurrido: <u>168 horas (1 semana)</u></p> <p>Se observa como la pieza ha comenzado a oscurecerse, pues ya no presenta brillo. Justo en la superficie del pasamanos cerca de los bordes del ánodo se comienza a observar la formación de óxido, debido a que se removieron 10 cm más de la pintura a ambos lados para poder contrastar con la superficie ubicada debajo del ánodo al momento de retirarlo.</p>
	<p style="text-align: center;">Tiempo transcurrido: <u>336 horas (2 semanas)</u></p> <p>Se observa cómo la pieza experimenta un incremento en el oscurecimiento de su superficie. Además, se evidencian signos más fuertes de corrosión en las áreas visibles que fueron previamente preparadas del pasamanos e incluso extendiéndose a lo largo de la pintura por todo el pasamanos.</p>




...Continúa...

Tabla 4.1. Seguimiento visual del ánodo del Zinc y el pasamanos del muelle la Libertad (Continuación)

Evaluación visual del estado de Ánodo de Sacrificio	
Imagen	Observaciones
	<p>Tiempo transcurrido: <u>504 horas (3 semanas)</u></p> <p>Se puede observar como la pieza presenta un mayor nivel de oscurecimiento, cómo que pareciera reseca destacando puntos con una coloración gris mate en ciertas áreas de esta misma. Las zonas cercanas de la superficie del pasamanos ya no presentan avance en la corrosión de estas, con respecto a la semana pasada.</p>




Al concluir dicho periodo de seguimiento, se retiraron las abrazaderas de zinc industrial y cortaron los puntos de soldadura con el propósito de realizar un análisis más detenido del estado del ánodo de zinc. Esta acción permitió una evaluación minuciosa del ánodo, sino que también brindó la oportunidad de examinar en detalle el estado actual del pasamanos expuesto.

Tabla 4.2. Estado final del ánodo de Zinc

Imagen	Observaciones
	<p>El peso final de la pieza, una vez desmontada, se registró en 2.635 kg, lo que indica una pérdida de solo 0.005 kg durante el período de 504 horas desde el inicio del experimento (2.640 kg).</p>
	<p>Se aprecian indicios leves de corrosión en la región interna del ánodo de sacrificio de zinc, la cual, mantenía contacto directo con la superficie del pasamanos del muelle.</p>
	<p>Se observa que el estado de la pieza en la región externa del ánodo, que mantuvo contacto directo con la humedad del ambiente marino del puerto presenta señales de óxido en su superficie y una coloración gris oscuro a lo largo de toda su superficie a comparación con el estado inicial de la pieza</p>

Se puede observar detalladamente en la tabla 4.2 que la pieza del ánodo de zinc ha iniciado un proceso de corrosión, aunque por el momento este es leve, manifestándose en los pequeños puntos de oscurecimiento sobre la superficie de este. Es importante destacar que la variación en el peso desde el comienzo del experimento fue de 0.005 kg, indicando una pérdida mínima durante el período de seguimiento. Esta diferencia en el peso sugiere que, a pesar de la leve corrosión detectada, el ánodo presenta un desempeño positivo, lo que indica que el método de protección catódica propuesto es el adecuado para reducir la corrosión del pasamanos del muelle, lo que se ve evidenciado en la tabla 4.3, pues, entre más nos alejamos del ánodo a lo largo del área del pasamanos se destaca una incidencia mayor del desgaste del recubrimiento aplicado, al igual que, es posible contrastar directamente la de la parte ubicada debajo del ánodo con los 10 cm adicionales en donde también se removió la pintura.

Tabla 4.3. Estado del pasamanos después de retirar ánodo de sacrificio

Imagen	Observación
	<p>Al retirar ambas piezas del ánodo se observa que en toda la superficie del pasamanos que se ubicaba debajo de la pieza, hay indicios de óxido, pero, con un menor porcentaje con respecto a los 10 cm extras en donde se removió el recubrimiento y la parte del pasamanos donde la pintura si estaba intacta desde un principio.</p>
	<p>El primer gran indicio de corrosión y deterioro de la pintura que presentaba el pasamanos desde que se colocó la pieza, se encontraba a 20 cm del ánodo (0.20 m).</p>
	<p>Más alejado de la primera irregularidad encontrada, la cual podría considerarse "pequeña" a una distancia de 1.05 m, se encontró muestras de corrosión de forma más constante y de mayor tamaño que la más cercana al ánodo.</p>

CONCLUSIONES

Los resultados detallados en la Tabla 4.3 indican que, a pesar de la protección significativa proporcionada por el ánodo de zinc en la superficie del área teórica no pudo evitar completamente la corrosión en la superficie del pasamanos, lo que sugiere que la eficacia de la protección catódica no fue óptima y que puede estar relacionado con la instalación del ánodo o con el diseño teórico de este, sin embargo, cómo grupo concluimos que el no poder alcanzar los resultados esperados, se debe a que la mayoría de los datos implementados en el cálculo del diseño teórico fueron tomados de referencias bibliográficas, que por lo general, tratan de promediar los valores que dependen de las condiciones ambientales a los lugares en donde se llevan a cabo las mediciones, por ejemplo la densidad de corriente en ambientes marinos y el potencial del ánodo sumergido en agua de mar, cuando lo ideal sería poder determinar directamente estas propiedades con el equipo adecuado.

No obstante, es importante que si bien, la protección no fue la óptima, se debe destacar que los efectos del ánodo se extendieron más allá de su ubicación específica durante las semanas que se evaluó el desempeño de este, pues, las áreas adyacentes al lugar donde se colocó el ánodo de zinc también manifestaron una mayor protección ante la corrosión generada por el ambiente, debido a que si bien, las zonas del pasamanos del muelle contaron incluso con un recubrimientos adicional, del tipo barrera mediante el uso de pinturas con acabado anticorrosivo, de igual forma presentaron corrosión, la cual disminuía considerablemente al acercarse al ánodo, mientras que intensidad de la corrosión aumentaba progresivamente, deteriorando la pintura y generando manchas características de picaduras, a medida que se alejaban del punto donde se colocó el ánodo de zinc.

Esto sugiere una distribución desigual de la protección proporcionada por el ánodo, que podría atribuirse a factores como la separación irregular de la corriente catódica a lo largo del área del pasamanos, debido a imperfecciones que no fueron removidas correctamente antes de aplicar la pintura anticorrosiva, o también por las antes mencionadas propiedades del entorno, las cuales no pueden ser calculadas directamente.

En el caso del estado superficial del ánodo que se observó alcanzada la tercera semana de observación, fue la presencia de una capa con coloración gris oscura que aparentaba un estado de resequeidad en la pieza. Tal y cómo se mencionó en el marco teórico de referencia, el zinc posee la capacidad de pasivarse bajo ciertas condiciones, es decir, formar una capa de óxido que impide el consumo del material, lo que se vio reflejado en la medición del peso final de la pieza, pues, a diferencia del pasamanos que comenzó a deteriorar la pintura, a tal punto que con el menor contacto se descascaraba, el peso del ánodo sin lijar era significativamente menor al peso inicial. Al no poseer una superficie completamente lisa el óxido de zinc se comenzó a formar en las cavidades y grietas, en donde, posiblemente se acumula la humedad.

Al desmontar el ánodo, también se comprobó que en la superficie interna de cada una de las piezas, habían indicios de corrosión de forma más uniforme, con respecto a la cara externa que se pasivó luego de un tiempo, esto debido, a que al no llevar a cabo la instalación del ánodo de forma que se pudiese remover por completo la humedad que permanecía en la superficie del pasamanos, dicho ambiente permitió la corrosión del tipo galvánica entre ambas piezas, debido a que por la diferencia de potencial el acero del pasamanos se oxidó en menor proporción que el zinc del ánodo, lo cual se corrobora en la primera imagen de la tabla 4.3. Sin embargo, cabe mencionar que para no dañar la pieza del pasamanos no se pudo retirar completamente el óxido inicial de este, por lo que, es posible asumir que se redujo por completo el avance de la corrosión en el pasamanos, ya que, luego de tres semanas fue mínima el aumento de manchas de óxido en las superficies.

Para finalizar, pese a que no se pudo llevar a cabo la observación del ánodo por el tiempo de vida útil calculado, el cual, incluso era mayor al tiempo estimado para la duración del proyecto de investigación, en base a la poca pérdida de masa que sufrió el ánodo durante tres semanas, se podría inferir que incluso alcanzadas las 1000 horas de observación no hubiera sido posible apreciar el consumo del ánodo a expensas de la protección del pasamanos, porque hasta poder superar la capacidad de pasivación del zinc este no se comenzaría a deteriorar, de tal forma, que pese a ser un proceso largo, el cual a su vez, no presentó resultados óptimos, si cumple con su función de proteger de una forma más adecuado las estructuras de los pasamanos del muelle, que otros tipos de recubrimientos, lo que significa que de poderse implementar a una mayor escala o con un diseño técnico más preciso, que conlleve otro tipo de forma para las piezas, incluso más artísticas, que se adecuen con la experiencia cultural de la zona, podría asegurarse la integridad completa de las estructuras metálicas que conforman el muelle del puerto La Liberad y de esta forma, brindar una seguridad mayor a los visitantes del lugar.

RECOMENDACIONES

- I. La situación actual de los pasamanos del muelle del Puerto La Libertad es muy precaria, debido a que el nivel de oxidación presente ya no es superficial, sino que compromete la pieza a nivel granular, lo que se refleja en la pérdida de partes, las aberturas y picaduras presentes en muchos de los tubos que los componen. Sin embargo, para poder implementar cualquier tipo de protección contra la corrosión que esté dentro del presupuesto para el mantenimiento del lugar, debería conllevar en primer lugar la preparación adecuada de la superficie y no la aplicación directa del agente anticorrosivo, por lo que, el conocimiento de las normas SSPC-VIS 2 y SSPC-VIS 3 se hace fundamental para facilitar la selección de las herramientas adecuadas para la remoción de impurezas en las superficies metálicas y reducir el costo excesivo en remodelar el lugar, pues, de esta forma, el método de protección contra la corrosión seleccionado duraría más de lo usual.

- II. De implementar la protección catódica por el método de ánodos de sacrificio de zinc, debe diseñarse el modelo adecuado que abarque la protección de toda el área del muelle desde el principio, calculando el número de ánodos necesarios, pues, el costo por la adquisición de dicho metal se reduce al comprar cantidades mayores, lo que reduciría los costos totales del diseño y facilitaría el proceso de fabricación de las piezas.

- III. Una vez, tomados los cuidados preventivos para la preparación de superficie y diseñado un sistema de protección catódica que abarque toda el área del muelle del Puerto La Libertad, debe reforzarse el método de protección mediante el uso de ánodos de sacrificio con otros tipos de recubrimiento, por ejemplo, mediante el uso de pinturas con acabados anticorrosivos, en los espacios entre los ánodos a lo largo de los pasamanos, porque de esta forma, se alargará la vida útil de las piezas a proteger y de ambos sistemas.

BIBLIOGRAFIA





- Association Francaise of Normalisation, AFN. (18 de Junio de 2013). *Galvanic anodes for cathodic protection in seawater and saline mud* (EN 12496:2013). Recuperado el 8 de Junio de 2023, de Standards: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/cc57ffa9-e4f8-4a54-8d25-00f3bfdef543/en-12496-2013>
- ecca. (2011). *The Basic of Corrosion*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de prepaintedmetal: <https://prepaintedmetal.eu/repository/downloads/1.%20The%20Basics%20of%20Corrosion.pdf>
- Francia, S. R. (Perú, 2004). *Protección Catódica: Diseño de Ánodos de Sacrificio*. Recuperado el 16 de Agosto de 2023, de Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol7_n13/pdf/a06.pdf
- Gómez de León, F. C. (España, 2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Universidad de Murcia. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de Google Books: https://books.google.com.ec/books?id=B6tV_j4ofmQC&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false
- Guzmán, I. M. (México, 2012). *Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio en un Prototipo de Intercambiador de Calor*. Recuperado el 12 de Julio de 2023, de Repositorio institucional del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV S.C. : <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/670/1/Tesis%20Miriam%20Terrazas%20Guzm%C3%A1n.pdf>
- Hernández Serrano, M. Pérez Jiménez, L. (El Salvador, 2022). *Evaluación del desempeño de recubrimientos anticorrosivos inhibidores en condiciones aceleradas aplicando las normas ASTM D610 y ASTM B117*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico, Universidad de El Salvador, Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, San Salvador. Recuperado el 17 de Julio de 2023
- International Organization for Standardization. (2012). *Cathodic protection of harbour installations* (ISO 13174:2012). Recuperado el 20 de Agosto de 2023, de Iso. org: <https://www.iso.org/standard/53660.html#:~:text=ISO%2013174%3A2012%20defines%20the,to%20provide%20protection%20from%20corrosion.>

- Jiménez, J. A. (Costa Rica, Septiembre de 2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales*. Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado el 7 de Julio de 2023, de scielo: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- National Association of College and Employers, NACE International. (2007). *CP 3- Manual Técnico superior en protección catódica manual del curso*. Recuperado el 8 de Agosto de 2023, de Academia: https://www.academia.edu/37152759/CP_3_T%C3%89CNICO_SUPERIOR_EN_PROTECCI%C3%93N_CAT%C3%93DICA_MANUAL_DEL_CURSO
- Pérez, A. M. (España, Septiembre de 2016). *Protección Catódica: Ánodos de Sacrificio*. Recuperado el 2 de Agosto de 2023, de Repositorio Institucional de la Universidad de La Laguna: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/3212/Proteccion+Catodica+Anodos+de+sacrificio.pdf;jsessionid=EEC2B3CD92C86AA28E7CB9697454F36E?sequence=1>
- PROIDeca S.A de C.V. (2020). *Suministro de ánodos para protección catódica, para uso en el puerto de Acajutla*. Recuperado el 19 de Junio de 2023, de Transparencia, Gobierno de El Salvador: <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/cepa/contracts/126395.pdf>
- R. Winston Revie, H. H. (Estados Unidos, 2008). *Corrosion and Corrosion Control*. (WILEY-INTERSCIENCE, Ed.) Recuperado el 17 de Julio de 2023, de edisciplinas: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5955761/mod_resource/content/1/CORROSION_AND_CORROSION_CONTROL_An_Intro%20%20Revie%20and%20Uhlrig.pdf
- Shreir, L. (Australia, Enero de 1976). *Corrosion*. Newnes. Recuperado el 25 de Julio de 2023, de ELSEVIER: <https://shop.elsevier.com/books/corrosion/shreir/978-0-408-00109-0>
- The Society for Protective Coatings, SSPC. (2007). *Guide and reference Photographs for Steel Surfaces Prepared by Power and Hand Tool Cleaning (SSPC-VIS 3)*. Recuperado el 29 de Julio de 2023, de AMPP: <https://store.ampp.org/sspc-vis-3>
- The Society for Protective Coatings, SSPC. (2008). *Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces (SSPC-VIS 2)*. Recuperado el 29 de Julio de 2023, de AMPP: <https://store.ampp.org/sspc-vis-2#:~:text=SSPC%2DVIS%20%20provides%20a,form%20part%20of%20the%20standard.>
- Vaamonde, A. J. (2000). *Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos*. (J. J. González, Ed.) Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de Google Books: <https://books.google.com.ec/books?id=8VEmE0MX9mkC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

ANEXOS

Anexo 1. Hoja técnica del zinc utilizado en la fabricación del ánodo de sacrificio

Zinc, N° CAS 7440-66-6; Universidad Nacional Heredia, Costa Rica (2ª edición: 20 de abril de 2016). Facilitado por Inversiones Capitol S.A de C.V., El Salvador. Recuperado el 01 de julio de 2023 de <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2021/02/397-zinc-granalla.pdf>

	<h3>Hoja de seguridad Zinc MSDS</h3>							
Sección 1. Identificación del producto								
<ul style="list-style-type: none">- Nombre de la sustancia: Zinc.- Número CAS: 7440-66-6.- RTECS: No disponible.- Fórmula química: Zn.- Estructura química: Zn- Masa molar: 65,39 g/mol.- Sinónimos: Hojas de metal de zinc.- Usos recomendados: Industria agropecuaria: Fertilizante; Aplicaciones industriales: Manufactura de especialidades de fertilizantes.- Número de atención de emergencias: TRANSMEDIC 2280-0999 / 2245-3757 (TM 203 503 Campus Omar Dengo, TM 203 504 Campus Benjamín Núñez) 911 Servicio de emergencia, 2261-2198 Bomberos de Heredia.								
Sección 2. Identificación del peligro o peligros								
Descripción de peligros:								
								
Reacciona con el agua liberando gases inflamables.								
Información pertinente a los peligros para el hombre y el ambiente: Esta sustancia no representa mayor peligro. Sin embargo, sus sales pueden ser peligrosas ya que el zinc es un metal pesado.								
Sistemas de clasificación:								
-NFPA(escala 0-4):								
								
-HMIS(escala 0-4):								
<table border="1"><tr><td>SALUD</td><td>2</td></tr><tr><td>INFLAMABILIDAD</td><td>0</td></tr><tr><td>REACTIVIDAD</td><td>0</td></tr></table>			SALUD	2	INFLAMABILIDAD	0	REACTIVIDAD	0
SALUD	2							
INFLAMABILIDAD	0							
REACTIVIDAD	0							
Consejos de prudencia:								
<ul style="list-style-type: none">- Utilice el equipo de protección indicado para resguardar sus vías respiratorias y la piel.- Alejar de llamas y fuentes de ignición.								

...Continúa...

Anexo 1. Hoja técnica del zinc utilizado en la fabricación del ánodo de sacrificio (Continuación)
 Zinc, N° CAS 7440-66-6; Universidad Nacional Heredia, Costa Rica (2ª edición: 20 de abril de 2016). Facilitado por Inversiones Capitol S.A de C.V., El Salvador. Fecha de recuperación: 01 de julio de 2023 de <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2021/02/397-zinc-granalla.pdf>

Sección 3. Composición/información sobre los constituyentes

Composición

Número CAS	Componentes peligrosos	% m/m
7647-01-0	Zinc	99.8 %

Sección 4. Primeros auxilios

- **Información general:** Sustancia no peligrosa para la salud. Tratar los síntomas sistemáticamente.
- **Contacto ocular:** Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separe los párpados para asegurar la remoción del químico. Si la irritación persiste repetir el lavado.
- **Contacto dérmico:** Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado.
- **Inhalación:** Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Evitar la reanimación boca a boca. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo.
- **Ingestión:** Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito. Mantener la víctima abrigada y en reposo.

Efectos por exposición

- **Contacto ocular:** Puede generar irritación, ardor, lagrimeo.
- **Contacto dérmico:** Irritación en la piel.
- **Inhalación:** La inhalación puede provocar irritación del tracto respiratorio, caracterizada por tos, ardor.
- **Ingestión:** Náuseas, vómitos, fiebre, trastornos musculares, alteraciones de la circulación, malestares abdominales.

Atención médica

- **Tratamiento:** No disponible.
- **Efectos retardados:** Irritación gastrointestinal o paro respiratorio.
- **Antídotos conocidos:** No disponible.

Sección 5. Medidas de lucha contra incendios

- **Agentes extintores:** Polvo seco especial para metales. Cubrir con tierra o arena secas
- **Productos peligrosos por combustión:** Produce gases tóxicos al reaccionar con agua
- **Equipo de protección para combatir fuego:** Aparato de respiración autónomo con mascarilla facial completa y traje protector completo.

Sección 6. Medidas que deben tomarse en caso de vertido accidental

- **Precauciones personales, equipo protector y procedimiento de emergencia:** Evacuar o aislar el área de peligro (entre 50 y 100 metros en todas las direcciones), demarcar las zonas. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. Eliminar toda fuente de ignición.
- **Precauciones relativas al medio ambiente:** No permitir que caiga en fuentes de agua y

Anexo 1. Hoja técnica del zinc utilizado en la fabricación del ánodo de sacrificio (Continuación)

Zinc, N° CAS 7440-66-6; Universidad Nacional Heredia, Costa Rica (2ª edición: 20 de abril de 2016). Facilitado por Inversiones Capitol S.A de C.V., El Salvador. Fecha de recuperación: 01 de julio de 2023 de <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2021/02/397-zinc-granalla.pdf>

alcantarillas.

- **Métodos y materiales para la contención y limpieza de vertidos:** Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente, eliminar el residuo con agua abundante, Barrer con cuidado para evitar la formación de polvo. (Protección personal adicional: respirador de filtro P1 contra partículas inertes)

Sección 7. Manipulación y almacenamiento

- **Manipulación de recipientes:** Sin indicaciones particulares. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, beber, ni comer en el sitio de trabajo. Lavarse las manos después de usar el producto. Quitarse la ropa y el equipo protector contaminados antes de entrar en los comedores
- **Condiciones de almacenamiento:** Recipientes bien cerrados. Ambiente seco. Alejado de fuentes de ignición y calor.

Sección 8. Controles de exposición/ protección personal

Parámetros de control (valores límite que requieren monitoreo)

TWA	10 mg/m ³
STEL	No disponible

- **Condiciones de ventilación:** Ventilación local y general.
- **Equipo de protección respiratoria:** Equipo de respiración autónomo (SCBA).
- **Equipo de protección ocular:** Gafas de seguridad para químicos a prueba de polvo.
- **Equipo de protección dérmica:** Guantes de material plástico. Utilizar ropa de trabajo adecuada que evite el contacto del producto

Sección 9. Propiedades físicas y químicas

Estado físico	Sólido granulado
Color	Sin color
Olor	inodoro
Umbral olfativo	No disponible
pH	No disponible
Punto de fusión	420 °C
Punto de ebullición	908 °C
Punto de inflamación	No disponible
Tasa de evaporación	No disponible
Límites de explosión	No disponible
Presión de vapor a 20°C	No disponible
Densidad relativa de vapor (aire=1)	No aplica
Densidad relativa (agua=1)	7,14
Solubilidad en agua	Poco soluble en agua.
Solubilidad en otros disolventes	Soluble en ácidos y soluciones de sal amoníaco.

Anexo 1. Hoja técnica del zinc utilizado en la fabricación del ánodo de sacrificio (Continuación)
Zinc, N° CAS 7440-66-6; Universidad Nacional Heredia, Costa Rica (2ª edición: 20 de abril de 2016). Facilitado por Inversiones Capitol S.A de C.V., El Salvador. Fecha de recuperación: 01 de julio de 2023 de <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2021/02/397-zinc-granalla.pdf>

Coefficiente de reparto n-octanol/agua (Log pow)	No aplica	
Temperatura de autoinflamación	No disponible	
Temperatura de descomposición	No disponible	
Peligro de explosión	No aplica	
Viscosidad	No aplica	

Sección 10. Estabilidad y reactividad

- **Reactividad:** Altamente reactivo con ácidos y bases.
- **Estabilidad:** Estable bajo condiciones normales.
- **Incompatibilidad:** Acidos. Agua. Aire. Azidas. Azufre. Benceno y derivados. Carbono disulfuro. Cloratos. Compuestos amoniacales. Halógenos. Halogenuros de halógeno. Hidracina y derivados. Hidrocarburos halogenados. Hidróxidos alcalinos. Hidroxilamina. Metales. Oxidos alcalinos
- **Productos de polimerización:** No ocurre.
- **Productos peligrosos de la descomposición:** Óxidos de zinc.

Sección 11. Información toxicológica

- **Toxicidad agua:** No presenta riesgos adversos. Generalmente no tóxico.
- **Corrosión/irritación cutáneas:** Sí.
- **Lesiones oculares graves/irritación ocular:** Sí.
- **Sensibilización respiratoria o cutánea:** Sí.
- **Mutagenicidad en células germinales:** No.
- **Carcinogenicidad:** No.
- **Toxicidad para la reproducción:** No.
- **Toxicidad sistémica específica de órganos diana-Exposición única:** No disponible.
- **Toxicidad sistémica específica de órganos diana-Exposición repetida:** No disponible.
- **Peligro por aspiración:** Sí.
- **Posibles vías de exposición:** Dermal y respiratoria.
- **Efectos inmediatos:** Irritación.
- **Efectos retardados:** irritación gastro intestinal o paro respiratorio.
- **Efectos crónicos por exposición única:** Irritación gastro intestinal o paro respiratorio.
- **Efectos crónicos por exposición repetida:** No disponible.

- **LD/LC50:**

Oral (LD-50)	1710 mg/kg (rata)
Dermal (LD-50)	No disponible
Inhalativa (LC-50)	No disponible

Anexo 1. Hoja técnica del zinc utilizado en la fabricación del ánodo de sacrificio (Continuación)
Zinc, N° CAS 7440-66-6; Universidad Nacional Heredia, Costa Rica (2ª edición: 20 de abril de 2016). Facilitado por Inversiones Capitol S.A de C.V., El Salvador. Fecha de recuperación: 01 de julio de 2023 de <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2021/02/397-zinc-granalla.pdf>

Sección 12. Información ecotoxicológica

- **Toxicidad Acuática:**
Test EC₅₀ (mg/l):
Peces = > 0,1 mg/l; Clasificación: Extremadamente tóxico.
Medio receptor:
Riesgo para el medio acuático = Medio
Riesgo para el medio terrestre = Medio
Observaciones:
El producto reacciona con el agua. Tras reacción, efecto tóxico sobre organismos acuáticos
- **Persistencia y degradabilidad:** Este compuesto es fácilmente transformado, usándose para la producción de otras sustancias requeridas para el funcionamiento corporal.
- **Potencial de bioacumulación:** Bioacumulable
- **Movilidad en el suelo:** Poca movilidad en agua.
- **Otros efectos adversos:** No presenta evidencias de carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad según experimentos con animales.

Sección 13. Información relativa a la eliminación de los productos

Lo que no se pueda conservar para recuperación o reciclaje debe ser manejado en una instalación de eliminación de residuos adecuadas y aprobadas. El procesamiento, utilización o contaminación de este producto puede cambiar las opciones de gestión de residuos. Eliminar de acuerdo a la normativa vigente.

Sección 14. Información relativa al transporte

- **N° ONU:** 1436
- **Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas:** Reacciona con el agua liberando gases inflamables. Clasificación 4.
- **Riesgos ambientales:** El producto podría generar irritación y quemaduras a los organismos con los que entre en contacto.
Precauciones especiales: No transporte con sustancias explosivas, Ácidos. Agua. Aire. Azidas. Azufre. Benceno y derivados. Carbono disulfuro. Cloratos, ni alimentos.

Sección 15. Información sobre la reglamentación

Los desechos de los productos químicos están regulados por el Reglamento sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales (Decreto N°27000-MINAE), el Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales (Decreto N° 27001-MINAE), y el transporte de los mismos está regulado por el Reglamento de transporte terrestre de productos peligrosos (Decreto 27008-MINAE).

Anexo 1. Hoja técnica del zinc utilizado en la fabricación del ánodo de sacrificio (Continuación)
Zinc, N° CAS 7440-66-6; Universidad Nacional Heredia, Costa Rica (2ª edición: 20 de abril de 2016). Facilitado por Inversiones Capitol S.A de C.V., El Salvador. Fecha de recuperación: 01 de julio de 2023 de <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2021/02/397-zinc-granalla.pdf>

Sección 16. Otras informaciones

Frases R:

R 10: Inflamable.

R 15: Reacciona con el agua liberando gases extremadamente inflamables.

R 50/53 Muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

Frases S:

S 43: En caso de incendio, utilizar arena.

S 46: No usar nunca agua.

S 60: En caso de ingestión, acuda inmediatamente al médico y muéstrela la etiqueta o el envase.

S 61: Elimínense el producto y su recipiente como residuos peligrosos. Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.

La información relacionada con este producto puede no ser válida si éste es usado en combinación con otros materiales.

La información de esta Hoja de Seguridad está basada en los conocimientos actuales, en cuanto que las condiciones de trabajo de los usuarios están fuera de nuestro conocimiento y control. El producto no debe utilizarse para fines distintos a aquellos que se especifican, sin tener primero una instrucción por escrito, de su manejo. Es siempre responsabilidad del usuario tomar las medidas oportunas con el fin de cumplir con las exigencias establecidas en las legislaciones.

La información presentada en esta ficha de seguridad fue copilada por Massiel Rodríguez Salazar y revisada por José Ángel Rodríguez Corrales como parte del Proyecto de Gestión de Reactivos y Desechos Químicos en los Laboratorios de docencia de la Escuela de Química.

Fecha de preparación de la hoja de seguridad: 24 de julio de 2011.

Versión: 1.1

Modificaciones respecto a versión anterior: 19 de julio de 2013.

Versión: 1.2

Modificaciones respecto a versión anterior: 20 de abril del 2016.

Anexo 2. Indicadores de la Norma SSPC – VIS 3

The Society for Protective Coatings, SSPC (2007). *Guide and Reference Photographs for Steel Surfaces Prepared by Power and Hand Tool Cleaning* (SSPC-VIS 3). Recuperado el 29 de Julio de 2023, de AMPP: <https://store.ampp.org/sspc-vis-3>

La Norma SSPC-VIS 3: GUIDE AND REFERENCE PHOTOGRAPHS FOR STEEL SURFACES PREPARED BY POWER AND HAND TOOL CLEANING (Guía y referencia fotográfica para superficies de acero preparadas a mano y limpieza con herramienta mecánica) fue publicada por la Sociedad de Recubrimientos Protectores (SSPC, por sus siglas del inglés de The Society for Protective Coatings) cómo un patrón visual para la identificación del grado de oxidación de una superficie metálica y la posterior preparación de superficie con herramientas manuales y mecánicas.

La terminología necesaria para entender correctamente los pasos a seguir para la selección de una herramienta de trabajo adecuada para la preparación de superficies comprende las referencias estándar de acuerdo con el tipo de herramienta, la condición de la superficie de trabajo y el tipo de limpieza necesaria mostradas en la norma SSPC-VIS 3. Para la selección de la herramienta de trabajo se presentan las siguientes opciones:

SP 2	Limpieza con herramienta a mano
SP 3	Limpieza con herramienta eléctrica
SP 11	Limpieza con herramienta eléctrica a metal desnudo
SP 15	Limpieza con herramienta de grado comercial

La norma SSPC-VIS 3 clasifica en siete condiciones iniciales el estado de las posibles superficies de trabajo antes de realizar cualquier tipo de limpieza, siendo estas:

- Condición A: Superficie de Acero completamente cubierta con Cascarilla de Laminación Adherente con poco sin ninguna presencia de óxido presente.
- Condición B: Superficie de Acero cubierta tanto de Cascarilla de Laminación y de Óxido.
- Condición C: Superficie de Acero completamente cubierta de óxido, con poca o ninguna picadura visible.
- Condición D: Superficie de Acero completamente cubierta de óxido, con picadura visible.
- Condición E: Superficie de Acero previamente pintada, con pintura de color claro aplicada sobre una superficie limpiada con chorro de arena.
- Condición F: Superficie de Acero previamente pintada, aplicada con pintura rica en zinc sobre una superficie limpiada con chorro de arena.
- Condición G: Aplicación de un sistema de pinturas sobre acero para rodamientos a escala de laminación, sistema completamente desgastado, completamente ampollado o manchado.

...Continúa...

Anexo 2. Indicadores de la Norma SSPC – VIS 3 (Continuación)

The Society for Protective Coatings, SSPC (2007). *Guide and Reference Photographs for Steel Surfaces Prepared by Power and Hand Tool Cleaning* (SSPC-VIS 3). Recuperado el 29 de Julio de 2023, de AMPP: <https://store.amp.org/sspc-vis-3>

Una vez, determinada la condición inicial de la superficie de trabajo se debe establecer una comparación del nivel de corrosión presente con ayuda de las imágenes de referencia, las cuales presentan un código que también, sirve para identificar las ilustraciones estándar de superficies ya preparadas mediante el uso de herramientas a mano o eléctricas, de acuerdo con la siguiente lista:

SSPC-SP2	Limpieza con herramienta a mano mediante cepillo de alambre (SP 2)
SSPC-SP3	Limpieza con herramienta eléctrica mediante cepillo de alambre (SP3/PWB)
SSPC-SP3	Limpieza con herramienta eléctrica mediante disco de lijado (SP 3/SD)
SSPC-SP11	Limpieza con herramienta eléctrica a metal desnudo mediante disco de no tejido para restaurar el perfil previamente exigente
SSPC-SP15	Limpieza con herramienta eléctrica de grado comercial a metal desnudo mediante disco de no tejido seguidos de aleta rotativa o pistola de agujas para impartir un perfil