

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS



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

**DETERMINACIÓN DE LA CORROSIVIDAD AMBIENTAL EN LOTIFICACIÓN NUEVOS
HORIZONTES 2, CANTÓN SAN DIEGO, LA LIBERTAD**

PRESENTADO POR:

ALFONZO TREJO, RENÉ ELÍAS

DÍAZ LÓPEZ, MELVIN STEVEN

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL

Ing. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS

DIRECTORA

Ing. SARA ELISABETH ORELLANA BERRIOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS

Trabajo De Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUIMICO

Título:

**DETERMINACIÓN DE LA CORROSIVIDAD AMBIENTAL EN LOTIFICACIÓN NUEVOS
HORIZONTES 2, CANTÓN SAN DIEGO, LA LIBERTAD**

PRESENTADO POR:

ALFONZO TREJO, RENÉ ELÍAS

DÍAZ LÓPEZ, MELVIN STEVEN

Trabajo De Graduación Aprobado por

Docente Asesor

Ing. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

SAN SALVADOR, FEBRERO 2022

Trabajo De Graduación Aprobado por

Docente Asesor

Ing. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

Agradecimientos por: Rene Elías Alfonzo Trejo

En primer lugar, agradecido con Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto de culminación de mi etapa universitaria. También con mis padres y hermana, ya que, sin duda alguna sin su apoyo incondicional y aliento para seguir adelante con mis estudios, no hubiese podido ser posible llegar hasta este punto en mi carrera.

A la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, especialmente a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por permitir el uso de las instalaciones de la Planta Piloto, de sus equipos y recursos los cuales hicieron posible que la etapa de ensayos de laboratorio se pudiera realizar con facilidad; sin olvidar a todos sus docentes que, durante mi carrera, me llenaron de valiosos conocimientos, tanto académicos como para la vida.

También agradecer al Ing. Héctor Manuel Guerra Pérez, por cumplir con su papel de asesor de este trabajo de grado; es decir, tanto por su apoyo, paciencia y dedicación durante la dirección de este trabajo de investigación, como también por brindar sus recomendaciones y opiniones durante todo el desarrollo de esta investigación.

Finalmente agradecer a mi compañero de trabajo Melvin Steven Díaz López, ya que más que un compañero de trabajo, fue un amigo, con el cual llevar a cabo este trabajo se tornó más sencillo y gratificante para ambos. También a mis demás compañeros de la carrera, con los cuales formé valiosas amistades y fueron un apoyo durante la carrera.

Agradecimientos por: Melvin Steven Díaz López

Todos mis agradecimientos en primer lugar van para Dios todo poderoso, el cual es mi fuente de energía y motivación, por no haberme abandonado en ningún momento, el cual me llena de sabiduría y es el que sabe cómo lleva mis pasos

En memoria de mi padre Rolando Ángel Díaz Sánchez, a quien lo tendré por siempre en mis memorias y pensamientos, siendo una persona honrada y modesta, quien me inculcó muchos de los valores que ahora soy y a quien siempre tendré una deuda eterna.

A mi madre quien fue la que en todo momento me apoyo desde que me dio la gran oportunidad de seguir en mis estudios y a la cual me ha dado una cantidad sin fin de valores, y que solo el hecho de su existencia es motivación necesaria para vencer todo tipo de obstáculos, mujer valiente, madre de 6 hijos a los cuales todos ama y también reconociendo que sin ella esto no fuera posible y a quien también tendré una deuda eterna.

A mis profesores en general desde mi jardín de infancia hasta la universidad de cual sinceramente podré decir que he aprendido mucho desde los valores como el número incontables de conceptos y enseñanzas en mí.

Al ingeniero Héctor Manuel Guerra Pérez el cual desde un principio he visto como un hombre con mucho conocimiento de la materia y del cual el tiempo ha sido breve para aprender muchísimas cosas más, pero de aquellas que compartió me las guardo con mucho valor.

A mi amigo y compañero René Elías Alfonzo Trejo, el cual fue más amigo que compañero y que durante este proceso nunca encontré ningún tipo de negativa y con el cual hemos tenido momentos épicos, y con quien el trabajo se vuelve fácil y apasionante por cuanta motivación y aporte le da al trabajo como estudiante.

A mi novia Belén y toda su familia que en estos últimos años de carrera me apoyaron y me han echado la mano y quienes siempre tendré presente por mucho amor y cariño recibido

En general a todos aquellos que creyeron en mí y me apoyaron en todo momento por los cuales pido a Dios que siempre los bendiga y los llene de éxitos.

Resumen

El hombre a través de la historia del uso del metal ha vivido siempre con el fenómeno de la corrosión, desde que este comenzó a dar uso para el hogar, como herramientas de trabajo, armas hasta en la forma de transporte terrestre, marino y aéreo. Los costos que origina el fenómeno de la corrosión muchas veces no son cuantificables o simplemente ignorados por personas y empresas las cuales no pueden vivir a manera de forma independiente al uso del metal, es por eso, que sus costos deben motivar a buscar maneras de prevención y mitigación de daños sobre la corrosión. Sobre este escenario, en el presente trabajo se muestran resultados obtenidos durante un ensayo de corrosión de 1,000 horas, en términos de velocidad de corrosión. Para efectos de la observación, se instalaron 5 soportes con 3 muestras de acero dulce, hierro y aluminio preparadas según la norma ASTM G1- 03 en Lotificación Nuevos Horizontes 2, cantón San Diego, La Libertad. La velocidad de corrosión fue determinada con el uso de la norma ISO 9223, para lo cual para cada material la velocidad de corrosión fue hallada por medidas de pérdidas de masa, mientras que la clasificación del ambiente corrosivo está basada en la norma ISO 9226. Los resultados al cabo de las 1,000 horas mostraron que la atmósfera corrosiva del lugar es clasificada como C5 en base a los valores promedios de la velocidad de corrosión del hierro y aluminio, cuyos valores de velocidad de corrosión promedio son 1,001.7093 g/m²año y 8.4154 g/m²año respectivamente, estos caben dentro del rango de 650 a 1,500 g/m²año para el hierro y de 5 a 10 g/m²año para el aluminio. En cuanto al acero inoxidable se logró identificar la mejora que este tiene con respecto al hierro por si solo ya que obtuvo valores más parecidos al del aluminio en cuanto a velocidad de corrosión sin perder las propiedades metálicas del hierro, siendo éste uno de los metales más recomendados para construcciones en la zona. Al final de esta investigación se desea dar a conocer datos de cuantificación de la corrosión sobre metales de uso común, con lo cual se pueda determinar el nivel del ambiente corrosivo en la zona costera, para luego divulgar esta información y ayudar a posibles investigaciones.

Índice General

	Introducción	1
	Planteamiento del problema	2
	Objetivos	3
	Objetivo General:	3
	Objetivos Específicos:	3
	Alcances	4
	Limitaciones	5
	Justificación	6
	CAPITULO I: MARCO CONCEPTUAL	7
1.1.	Antecedentes de la investigación	7
1.2.	La corrosión	10
1.2.1.	Factores que influyen en el proceso de corrosión	11
1.2.1.1.	Sales disueltas	11
1.2.1.2.	Concentración de oxígeno	12
1.2.1.3.	Influencia del ambiente	12
1.2.2.	Tipos de corrosión	13
1.2.2.1.	Corrosión generalizada	13
1.2.3.	Corrosión en ambiente marinos	14
1.2.3.1.	Agua de mar	15
1.2.3.2.	Relación entre corrosión metálica y distancia a la costa	16
1.2.4.	Impacto de la corrosión sobre la economía	17
1.3.	Mapas de corrosión	20
1.3.1.	Proyecto MICAT	21
1.3.1.1.	Antecedentes	21
1.3.1.2.	Objetivos	22
1.4.	Métodos de prueba y evaluación de la corrosión	23
1.4.1.	Pruebas de laboratorio	24
1.4.2.	Método de pérdida de peso	25
1.4.3.	Resistencia eléctrica	25
1.4.4.	Resistencia a la polarización lineal	26
1.5.	Procedimientos y recomendaciones para realizar pruebas de corrosión en laboratorio por método de pérdida de peso.	27
1.5.1.	Preparación de la superficie	27
1.5.2.	Volumen de la solución	28
1.5.3.	Número de testigos	28
1.5.4.	Duración de la prueba	28
1.5.5.	Limpieza de las muestras después de las pruebas	29
1.6.	Lista de verificación de datos importantes en las pruebas de corrosión	30

	CAPITULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	32
2.1.	Pruebas de corrosión	32
2.2.	Preparación de probetas de ensayo.	33
2.3.	Preparación, limpieza y evaluación de los testigos metálicos.	33
2.3.1.	Preparación testigo de aluminio	34
2.3.2.	Preparación testigo Hierro	38
2.3.3.	Preparación testigo Acero Inoxidable	42
2.4.	Ensayo de corrosión atmosférica	46
2.4.1.	Características meteorológicas y oceanográficas del lugar de experimentación.	46
2.5.	Estaciones de corrosión	48
2.6.	Ubicación geográfica de las estaciones en el mapa	51
2.7.	Proceso de obtención de datos	53
	CAPITULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
3.1.	Ensayo en probetas de Hierro	59
3.1.1.	Procedimiento experimental en probetas de Hierro	59
3.1.2.	Análisis de resultados en ensayo de probetas de Hierro	65
3.2.	Ensayo en probetas de Aluminio	67
3.2.1.	Procedimiento experimental en probetas de Aluminio	67
3.2.2.	Análisis de resultados en ensayo de probetas de Aluminio	72
3.3.	Ensayo en probetas de Acero Inoxidable	74
3.3.1.	Procedimiento experimental en probetas de Acero Inoxidable	74
3.3.2.	Análisis de resultados en ensayo de probetas de Acero Inoxidable	79
	Conclusiones	80
	Recomendaciones	81
	Bibliografía	82
	Anexos	84
Anexo A:	Colocación de estaciones de monitoreo	84
Anexo B:	Propiedades químicas de Hierro y Acero Inoxidable	87
B.1.	Composición química Hierro A36	87
B.2.	Composición química Acero Inoxidable AISI 304	88
Anexo C:	Cálculos de velocidad de corrosión según norma ISO 9226	89
C.1.	Ejemplo para obtención de razones de corrosión para testigos de aluminio:	89
C.2.	Ejemplo obtención razones de corrosión para testigos de hierro:	89
C.3.	Ejemplo obtención razones de corrosión para testigos de acero inoxidable:	90
Anexo D:	Práctica de laboratorio de Determinación de Razones de Corrosión: limpieza química de testigos gravimétricos.	91

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1	Relación entre la salinidad y la velocidad de corrosión del acero (Chico, Otero, Mariaca y Morcillo, 1998)	12
Figura 1.2	Esquema sobre la corrosión generalizada sobre un metal (ASM International, 2006)	14
Figura 1.3	Zonas sobre el ataque de la corrosión según sea el contacto con el material (ASM International, 2006)	16
Figura 1.4	Relación entre la corrosión y la distancia a la costa en diferentes partes del mundo: 1) Lagos (Nigeria), 2) Digha (India), 3) Murmansk (Rusia), 4) Costa Norte (Cuba) y 5) Tarragona (España).(Chico, Otero, Mariaca y Morcillo, 1998)	17
Figura 1.5	Importancia de la evaluación para el control de la corrosión (ASM International, 2006)	24

Capítulo 2

Figura 2.1	Limpieza de testigo de aluminio con tolueno	35
Figura 2.2	Inmersión de testigos de aluminio en solución ácida para la remoción de productos de corrosión	36
Figura 2.3	Inmersión de testigos de aluminio en solución neutra para eliminar remanentes de la solución ácida	37
Figura 2.4	Inmersión de testigos de aluminio en agua destilada	37
Figura 2.5	Limpieza de testigos de aluminio con acetona	38
Figura 2.6	Pesaje de testigos de aluminio	38
Figura 2.7	Paño humedecido con tolueno para desengrasado de testigo de hierro	39
Figura 2.8	Testigo de hierro sumergido en solución alcalina para remoción de productos de corrosión	40
Figura 2.9	Testigo de hierro sumergido en solución neutra	41
Figura 2.10	Inmersión de testigo de hierro en agua destilada	41
Figura 2.11	Limpieza de testigo de hierro con acetona	42
Figura 2.12	Pesaje de testigos de hierro	42
Figura 2.13	Limpieza de testigos de acero inoxidable con tolueno	43
Figura 2.14	Inmersión de testigos de acero inoxidable en solución alcalina	44
Figura 2.15	Inmersión de testigos de acero inoxidable en solución neutra	45
Figura 2.16	Inmersión de testigos de acero inoxidable en agua destilada	45
Figura 2.17	Limpieza de testigo de acero inoxidable con acetona	46
Figura 2.18	Pesaje de testigos de acero inoxidable	46
Figura 2.19	Lotificación Nuevos Horizontes 2, Cantón San Diego, La Libertad. (Google earths, 2021)	47
Figura 2.20	Precipitación de lluvia en Playa San Diego, La Libertad.	48
Figura 2.21	Estación de monitoreo n°1	49
Figura 2.22	Estación de monitoreo n°2	49

Figura 2.23	Estación de monitoreo n°3	50
Figura 2.24	Estación de monitoreo n°4	50
Figura 2.25	Estación de monitoreo n°5	51
Figura 2.26	Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo, distancia máxima a la costa no mayor a 1 Km. Lotificación Nuevos Horizontes 2, Cantón San Diego, La Libertad. (Google earths, 2021)	52
Figura 2.27	Testigos de hierro luego de 360 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	53
Figura 2.28	Testigos de acero inoxidable luego de 360 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	54
Figura 2.29	Testigos de aluminio luego de 360 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	54
Figura 2.30	Testigos de hierro luego de 720 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	55
Figura 2.31	Testigos de acero inoxidable luego de 720 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	55
Figura 2.32	Testigos de aluminio luego de 720 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	56
Figura 2.33	Testigos de hierro luego de 1000 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	56
Figura 2.34	Testigos de acero inoxidable luego de 1000 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto	57
Figura 2.35	Testigos de aluminio luego de 1000 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto.	57

Capítulo 3

Figura 3.1	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 1	61
Figura 3.2	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 2	61
Figura 3.3	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 3	62
Figura 3.4	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 4	62
Figura 3.5	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 5	63
Figura 3.6	Comportamiento de la corrosión en todas las estaciones de monitoreo de Hierro	64
Figura 3.7	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 1	69
Figura 3.8	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 2	69

Figura 3.9	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 3	70
Figura 3.10	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 4	70
Figura 3.11	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 5	71
Figura 3.12	Comportamiento de la corrosión en todas las estaciones de monitoreo de Aluminio	71
Figura 3.13	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 1	76
Figura 3.14	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 2	76
Figura 3.15	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 3	77
Figura 3.16	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 4	77
Figura 3.17	Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 5	78
Figura 3.18	Comportamiento de la corrosión en todas las estaciones de monitoreo de Acero Inoxidable	78

Anexo A

Figura A.1	Probetas de Acero Inoxidable	84
Figura A.2	Probetas de Hierro	84
Figura A.3	Probetas de Aluminio	84
Figura A.4	Sistema de monitoreo de la corrosión	85
Figura A.5	Ubicación y colocación estratégica de los sistemas de monitoreo en cada una de las estaciones	86

Índice de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1	Coste de la corrosión (CC en miles de millones de dólares y cómo % del PIB) por regiones del mundo. (Koch, 2016)	19
-----------	--	----

Capítulo 2

Tabla 2.1	Procedimiento químico de limpieza para remover productos de corrosión (aluminio)	35
Tabla 2.2	Procedimiento químico de limpieza para remover productos de corrosión (hierro)	40
Tabla 2.3	Procedimiento químico de limpieza para remover productos de corrosión (acero inoxidable)	44

Capítulo 3

Tabla 3.1	Mediciones de masas iniciales y finales junto a la estimación de velocidad de corrosión sobre probeta de hierro	60
Tabla 3.2	Clasificación de la atmósfera corrosiva del Hierro en base a la velocidad de la corrosión	66
Tabla 3.3	Mediciones de masas iniciales y finales junto a la estimación de velocidad de corrosión sobre probeta de aluminio	68
Tabla 3.4	Clasificación de la atmósfera corrosiva del Aluminio en base a la velocidad de la corrosión	73
Tabla 3.5	Mediciones de masas iniciales y finales junto a la estimación de velocidad de corrosión sobre probeta de Acero Inoxidable	75

Anexo B

Tabla B.1	Composición química del Hierro A36	87
Tabla B.2	Composición química del Acero Inoxidable AISI 304	88

Introducción

El efecto de la corrosión es un problema que el hombre ha intentado prevenir, ya sea por la afectación directa a un estilo de vida, una forma de ahorrar costos o minimizar pérdidas económicas o también por el mantenimiento y rendimiento óptimo de un equipo, el hecho es que sea prevención o la evitación de este fenómeno como tal, siempre ha sido de interés para el ser humano.

La alteración o desgaste de un metal o una aleación, sea está provocada por un ataque químico directo o por una reacción electroquímica es lo que se conoce como corrosión entre muchas más definiciones que pueden agregar elementos que profundicen, pero lo que sin duda alguna no entra en discusión es el hecho que históricamente el fenómeno ha sido enfrentado por el ser humano, sin embargo, aún hay muchas sociedades que no han buscado la vía para la prevención de la corrosión y mucho menos mitigar sus efectos, sea esto por cuestiones económicas o minimizaciones del problema, a lo cual países industrializados saben de antemano los riesgos a las inversiones de capital, riesgos a la salud y seguridad ocupacional de un trabajador que opere en equipos con presencia alta de corrosión, y por ello han decidido invertir tiempo y dinero en investigación logrando desarrollar planes de protección frente al fenómeno de la corrosión.

Siendo así las pruebas de corrosión la base para la evaluación y posterior control del fenómeno en una gran cantidad de aplicaciones de ingeniería, como por ejemplo en la determinación de razones de corrosión, los cuales son valores que indican la velocidad con la que un material perderá masa debido a dicho fenómeno dependiendo del ambiente en que se encuentre, es decir, son una medida del grado de afectación que dicho ambiente infrige en los metales.

Planteamiento del problema

La identificación de la corrosión ambiental para El Salvador en la zona costera supone una forma de evaluación general del tipo de ambiente al que están expuesto diversas estructuras, equipos o materiales, los costos que provoca la corrosión atmosférica motivan a la búsqueda de maneras de prevenir y mitigar los daños causados, por lo cual en el presente trabajo se trata de clasificar el ambiente corrosivo en Lotificación Nuevos Horizontes 2, Cantón San Diego, La Libertad, dejando así un precedente que sirva de base para una posterior construcción de un mapeo de corrosión completo de dicha zona costera, ya que en base a la agresividad que puede presentar la corrosión se pueden tomar decisiones y dar recomendaciones acerca de qué tipo de materiales son los más adecuados a emplear según la clasificación de la atmósfera corrosiva en base a la norma ISO 9223:2012.

Objetivos

Objetivo General:

- a) Aplicar conocimientos ingenieriles tanto teóricos como prácticos aprendidos durante el curso de especialización Introducción al control de la Corrosión Industrial con el fin de clasificar el tipo de atmósfera corrosiva en Lotificación Nuevos Horizontes 2, Cantón San Diego, La Libertad para ello determinando razones de corrosión de distintos metales en dicha zona.

Objetivos Específicos:

- a) Clasificar la atmósfera corrosiva de la zona según su agresividad en los metales de acuerdo a la normativa ISO 9223: 2012.
- b) Determinar razones de corrosión de distintas aleaciones (hierro, aluminio, acero inoxidable) utilizando para ello la técnica gravimétrica mediante el empleo de testigos de corrosión.
- c) Precisar cuáles son los tipos de aleaciones metálicas más adecuadas a utilizar en el área costera en estudio, con el fin de minimizar toda la problemática que la corrosión en los materiales conlleva.
- d) Sentar precedentes para futuras investigaciones más extensas que abarquen nuevos y mayores territorios que generen un mayor conocimiento acerca del tipo de ambientes corrosivos en el país, para en base a ello poder seleccionar materiales metálicos y recubrimientos de manera óptima.

Alcances

- a) El estudio brindará información acerca de cuáles son los metales más susceptibles al ataque corrosivo en el ambiente marino en estudio, cuales presentan mayor resistencia a dicho fenómeno y las razones de corrosión de éstos.
- b) La clasificación de la atmósfera corrosiva se llevará a cabo en el área de la playa de San Diego, ubicada en el departamento de La Libertad, específicamente abarcando el sector de la Lotificación Nuevos Horizontes II.
- c) El tiempo de estudio para la determinación de razones de corrosión y clasificación del tipo de atmósfera corrosiva será por un tiempo total de 1000 horas.
- d) Los especímenes metálicos puestos a prueba son de 3 aleaciones distintas: hierro A36, acero inoxidable AISI 304 y aluminio.
- e) La metodología llevada a cabo para la preparación de los testigos metálicos empleados y posterior obtención de datos es con base en normativas internacionales.
- f) Se sentará un precedente acerca de la clasificación de atmósferas corrosivas en el área costera, la cual puede ser tomada en cuenta para la posterior construcción de un mapeo de corrosión.

Limitaciones

- a) Distancia disponible para colocar las estaciones de monitoreo, ya que dichas estaciones son colocadas con personas residentes de la zona dispuestas a colaborar con el proyecto para así evitar el vandalismo de éstas y poseer un lugar donde poder colocarlas, por lo cual las estaciones son puestas en un área no mayor a un 1 km de distancia.
- b) Para el periodo de tiempo de recolección de datos se dispone de 1000 horas para la observación de los especímenes metálicos puestos en el ambiente corrosivo a partir de octubre del 2021.
- c) Costos y materiales disponibles, lo cuales limitan este estudio a la utilización de 3 aleaciones metálicas.
- d) Información disponible relacionada con el tema, el fenómeno de la corrosión y específicamente el tema de mapeos de corrosión ha sido poco estudiado en el país, por lo cual bibliografía y trabajos disponibles relacionados son pocos.

Justificación

Concebir la idea de que el fenómeno de corrosión puede estar presente en cualquier tipo industria es vital para tomar consideraciones desde el diseño de la planta o proteger la ya existente, ya que en base a ello se pueden tomar decisiones acerca de que materiales o equipos son los mejores a utilizar, así como también ayuda a adoptar las mejores prácticas de protección del acero y de superficies metálicas mediante recubrimientos. Dicho lo anterior, conocer el tipo de atmósfera corrosiva que se posee es de mucha importancia, ya que así se tiene conocimiento acerca de el grado de agresividad de la atmósfera, así como también de las razones de corrosión de los principales metales utilizados y en base a dicho grado, tomar consideraciones para la protección ante la corrosión.

Justificándose todo esto principalmente en el ahorro significativo económico que ello supone, ya que el conocer perfectamente la agresividad del ambiente conlleva a tomar las mejores decisiones para protegerse de la corrosión, obteniendo así mejores utilidades y reduciendo o evitando todos los costos que la corrosión pueden provocar debido a factores como: deterioro o pérdidas totales en equipos, baja calidad en el proceso, accidentes laborales, entre otros factores.

Otro factor motivante de esta investigación es la escasa información que se tiene acerca de los tipos de ambientes corrosivos en el país, ya que al no ser un tema altamente estudiado deja a expensas de nuevos investigadores la tarea de generar nuevos y mayores conocimientos que contribuyan a la caracterización de este fenómeno en el país, sobre todo en El Salvador actual, el cual busca abrir nuevos horizontes para la industria del turismo en el área costera, apostando así por nuevas edificaciones e industrias en el área.

CAPITULO I: MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se tocarán las partes teóricas fundamentales de la investigación las cuales orientan el abordaje de la investigación, así como la situación histórica acerca del mapeo y determinación de ambientes corrosivos en la región y en El Salvador. También se da a conocer cuáles son los métodos y procedimientos a implementar en el ensayo de los metales.

1.1. Antecedentes de la investigación

El estudio acerca del fenómeno de la corrosión ha sido un trabajo poco abordado en América Latina, la información que se encuentra ha sido realizada por países con una industria grande y muy desarrollada ya sea con fin de determinación de costos de pérdidas por corrosión o por innovación de materiales.

En primer lugar, se tiene que, en febrero de 2015 fue presentado en Instituto Costarricense de Electricidad en Costa Rica, la publicación de un artículo investigativo en mapas estimativos de la corrosión atmosférica de acero de baja aleación en Costa Rica por Javier E. Rodríguez Yáñez, Luis Garita Arce y Ericka Saborío Leiva.

La investigación es un estudio que permite visualizar de forma rápida las distintas situaciones en un país. Desarrollando dichos mapas para acero de baja aleación en Costa Rica en función de datos climáticos y de niveles de contaminantes, considerando las distintas normativas asociadas con ISO 9223:1992 y los modelados desarrollados por el Centro de Investigación en Corrosión (CICorr).

Este estudio permitió demostrar que la atmósfera en Costa Rica presenta altos índices de Brooks, considerándose muy corrosiva. Los parámetros atmosféricos controlantes son la humedad relativa (HR) y el Tiempo de Humectación (TDH) asociados a bajos niveles de contaminación y atmósferas de tipo rural. La velocidad de corrosión se encuentra entre 25 y 80 $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ (Clase 3 y 4 según ISO 9223). Los modelados locales se asocian a los parámetros controlantes y resultan

más adecuados para la estimación que el modelo según ISO 9223. (Garita, Rodríguez Yáñez y Robles, 2014)

En esta misma labor de investigación se consultó el trabajo Índices de Corrosividad Atmosférica en Veracruz. Predicción de la Función Dosis/Respuesta presentado por Reyes J. L., García Navarro N., Galicia Aguilar G. , Lugo G., Gallardo E., Tenorio J. A, Terrazas J. E. y Uruchurtu Chavarín J. en el 2015, México.

En dicho estudio se presenta a la corrosividad atmosférica que tiene un alto impacto en el estado de Veracruz, debido a su gran cantidad de litoral con el Golfo de México y a las características del clima tropical con altas temperaturas y humedad relativa por encima del 80% la mayor parte del año, además de fuertes vientos en la temporada de nortes y huracanes.

Para medir la corrosividad atmosférica se requiere de instalar estaciones de monitoreo y entre mayor sea el número mayor es la certidumbre, pero el costo de operación se incrementa, además, la influencia que ejerce el clima sobre la agresividad contra los materiales, hace que la tendencia se dirija hacia las determinaciones dosis/respuesta a través de modelos que aun y que sean empíricos, permitan estimar la concentración de los parámetros agresivos y de la corrosividad atmosférica, basados en las condiciones climáticas y la orografía del lugar.

Para las mediciones experimentales base, se instalaron estaciones de monitoreo atmosférico en las 6 principales regiones del estado, utilizando la metodología de los índices de corrosividad atmosférica con la utilización de probetas de alambre sobre tornillo y para determinar los parámetros atmosféricos contaminantes, así como el seguimiento de las variables climatológicas en cada una de las regiones del estado. Los resultados mostraron que los índices de corrosividad atmosférica son de niveles altos en las regiones costeras e industriales, sin embargo, para el rural-urbano resultaron de bajos a agresivo. Los modelos de Dosis/Respuesta utilizados, permiten la posibilidad de conocer el nivel de agresividad de la atmósfera para otros lugares donde no se realizaron mediciones experimentales, también se

hace posible la predicción de perspectivas referentes al cambio climático y evaluar su impacto en la entidad Veracruzana. (Ramírez Reyes y otros, 2015)

En México como en Costa Rica se determinaron índices de corrosividad altos en regiones costeras, países tomados en cuenta por la cercanía con El Salvador. Trabajos así se pueden encontrar en ambos países de manera abundante y rica en cuanto a la información que generan, pero la realidad en El Salvador es otra, puesto que de las fuentes consultadas se detectó que esta problemática no ha sido profundizada y estos tipos de trabajos resultan ser pioneros tal como se muestra en el siguiente estudio:

De acuerdo a la Dra. Carmen Elena Menjívar en su tesis doctoral, "Corrosión del acero al carbono y del aluminio en diferentes tipos de atmósferas de El Salvador", presentada en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", Julio 2019, El Salvador, señala que el tema de la corrosión atmosférica se ha abordado de manera más reactiva que preventiva en el país, por lo que existen pocos estudios que proporcionen información acerca del comportamiento del mencionado fenómeno, se ignoran los costos económicos y ambientales provocados por la corrosión y no se tienen suficientes datos que permitan conocer el comportamiento de los materiales ante el ambiente del territorio nacional, por ello su investigación planteó el estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono y aluminio, con el fin de evaluar la agresividad de los tipos particulares de atmósferas presentes, caracterizar los productos de corrosión obtenidos y la construcción del primer mapa de corrosión representativo de El Salvador.

En dicho estudio anteriormente mencionado también se concluyó en cuanto a las atmósferas marinas evaluadas (estudio que se realizó en las playas de San Blas, Acajutla y La Puntilla) que ellas varían significativamente en el grado de agresividad de impacto en los metales, revelando el papel que juega la vegetación de la zona en cuanto al ataque del aerosol marino (salitre) sobre ellos, ya que entre más vegetación hay presente, menor es el impacto de la corrosión en los metales. (Menjívar Benítez, 2019)

1.2. La corrosión

“La corrosión puede definirse como una reacción irreversible de un material con su ambiente, que normalmente (aunque no siempre) trae asociado una degradación del material o de sus propiedades. Esta definición tan general de corrosión incluye las reacciones de una gama de materiales muy amplia. Sin embargo, el foco de la mayor parte de los estudios sobre corrosión son los metales. La corrosión en los metales puede darse de muchas formas diferentes que son importantes de entender, ya que los mejores métodos de prevención de la corrosión dependen de la forma de corrosión.” (Fernández Domene, Sánchez Tovar, Lucas Granados y García Antón, 2018)

Las definiciones de corrosión pueden ser diversas y pueden estar explícitas en varias opiniones de diferentes autores, pero en lo que la mayoría convergen es en el cambio o transformación que sufre el metal.

Evans (2018) ha definido a la corrosión de la siguiente manera:

Todas las transformaciones por las que pasa un metal desde su estado elemental hasta de compuesto; abarcará las reacciones entre metales y entornos gaseosos o líquidos. Del primero pueden resultar productos que sean volátiles, sólidos o líquidos, dependientes de la temperatura.

La mayoría de procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas, donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: (1) unos electrodos (ánodo y cátodo), (2) un electrólito, como medio conductor, que en la mayoría de casos corresponde una solución acuosa, y (3) una conexión eléctrica entre los electrodos (ECCA, 2011)

1.2.1. Factores que influyen en el proceso de corrosión

El proceso de corrosión no es un problema aislado, tampoco es una problemática la cual también posea una sola naturaleza, sino que este proceso está afectado por varios factores los cuales se mencionan a continuación.

1.2.1.1. Sales disueltas

“Las sales ácidas, al diluirse en la solución electrolítica, disminuyen su pH, acelerando el proceso de corrosión por el efecto de acidez. Algunos ejemplos de sales ácidas son, el cloruro de aluminio, el cloruro de hierro y el cloruro de amonio.” (Charng y Lansing, 1982)

“El cloruro sódico y el dióxido de azufre son los principales contaminantes y agentes corrosivos de la atmósfera. El cloruro sódico se incorpora a la atmósfera desde el mar, siendo sus efectos muy acusados cerca de la orilla, donde el aire transporta grandes cantidades de sal, pudiéndose llegar a producir una continua pulverización de agua.” (Rivero, Chico, de la Fuente y Morcillo, 2007)

La humedad es un elemento vital para que se active el efecto del ión cloruro sobre una superficie metálica y este se oxide más rápidamente.

Entre mayor sea el valor de la salinidad en la atmósfera, donde se encuentre un metal, mayor será la degradación que éste padezca debido a la aceleración del proceso corrosión, tal como se muestra un ejemplo para el acero al carbono en la Figura 1.1.

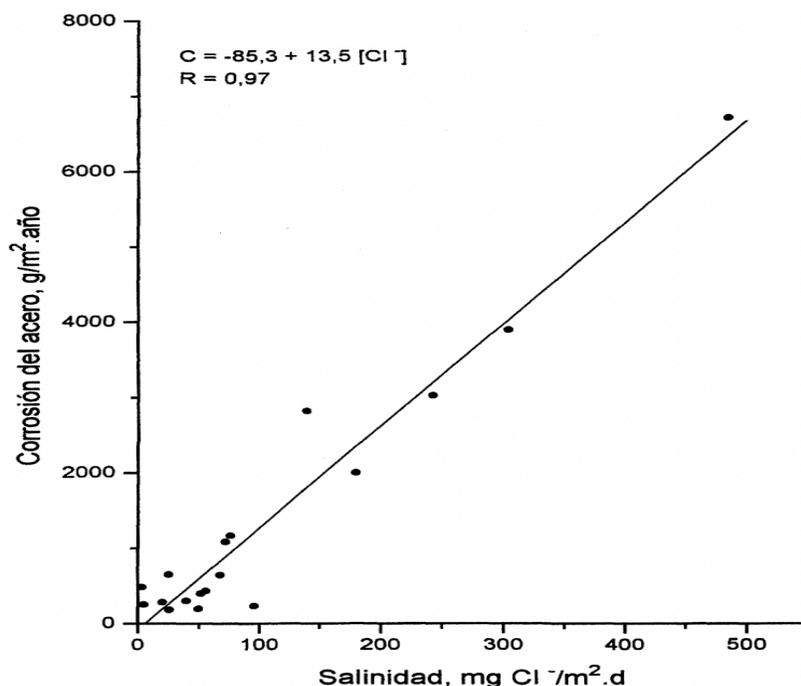


Figura 1. 1 Relación entre la salinidad y la velocidad de corrosión del acero (Chico, Otero, Mariaca y Morcillo, 1998)

1.2.1.2. Concentración de oxígeno

“La concentración de oxígeno en el medio electrolítico puede acelerar o retardar el proceso de corrosión, dependiendo de la naturaleza del material. Para el caso de materiales ferrosos, al aumentar la concentración de O_2 , aumenta la velocidad de corrosión pues el producto corrosivo no protege al material. Mientras que para materiales pasivables, cuan mayor sea la concentración de O_2 , mayor capacidad tendrá el material de formar la capa protectora que lo caracteriza.” (Charng y Lansing, 1982)

1.2.1.3. Influencia del ambiente

“La corrosión atmosférica se caracteriza por ser un fenómeno electroquímico que causa un desgaste generalmente uniforme, al que son muy susceptibles el hierro y sus aleaciones. Éstos al encontrarse expuestos a la acción de la intemperie dan lugar a la ocurrencia del fenómeno de

oxidación sobre su superficie formando principalmente óxido de hierro.” (ASM International, 2006)

“Las muestras expuestas libremente a la atmósfera reciben cantidad de oxígeno, pero a menudo muy poca humedad. En ausencia de electrolitos, la película de óxido formada directamente impide su propio crecimiento.” (Evans, 2018)

La humedad, la presencia de oxígeno y la forma efectiva que se pueda transportar a un producto de corrosión soluble son entre muchas más características de los medios en donde se encuentra un metal y su posible ataque de corrosión.

“Los entornos corrosivos pueden ser fluidos, pueden ser o no ser conductores electrolíticos y contener diversidad de constituyentes secundarios.” (Evans, 2018)

1.2.2. Tipos de corrosión

Los procesos de corrosión pueden ser muchos y se caracterizan según sea la naturaleza del material y de las condiciones del ambiente, donde se encuentren, en un ambiente marino el más común de los tipos de corrosión es aquel donde la pieza de metal está expuesta abiertamente al ambiente donde el ataque es generalizado sobre toda la superficie del metal, a este tipo de corrosión se le llama corrosión generalizada o uniforme.

Este tipo de corrosión puede estar presente desde la superficie de un vehículo, las vigas de una construcción, los utensilios de comida como sartenes entre muchos más, por lo que ningún metal está exento de no padecer de este tipo de corrosión.

1.2.2.1. Corrosión generalizada

“La corrosión generalizada, también nombrada como corrosión uniforme, ocurre sobre toda la superficie del material de forma homogénea, deteriorándolo completamente. Este tipo de corrosión es el que mayor pérdida de material provoca, pero es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que un accidente producido por este es de rara ocurrencia.” (Salazar-Jiménez, 2015)

“Este tipo de corrosión se caracteriza, en cambio, por producir un deterioro estético considerable, que puede ser más o menos importante dependiendo de la aplicación específica de la pieza o parte metálica de que se trate.” (ASM International, 2006)

La corrosión generalizada es uno de los tipos de corrosión que más afecta a metales expuestos a la atmósfera, ya sea ésta de naturaleza industrial o marina.

Entre los materiales que pueden sufrir este tipo de corrosión se encuentran algunos como el hierro, acero, cobre hasta la plata la cual puede tener una tonalidad oscura en su superficie. En la Figura 1.2 se evidencia el cambio que sufre un metal debido a este tipo de corrosión.

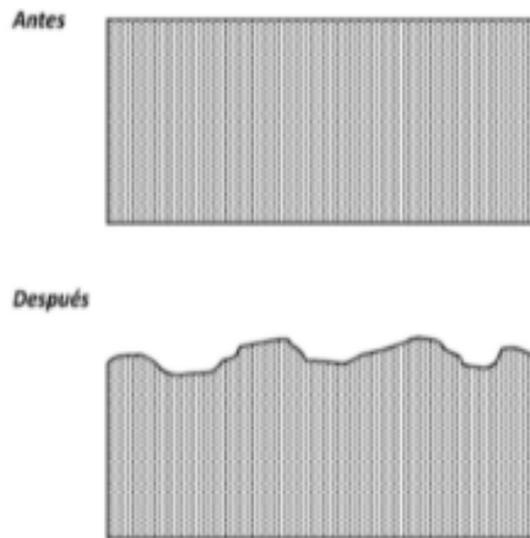


Figura 1. 2 Esquema sobre la corrosión generalizada sobre un metal (ASM International, 2006)

1.2.3. Corrosión en ambiente marinos

Existen muchos contaminantes que pueden ser transportados a través del aire y en las costas marina no hay ninguna excepción el origen de los cloruros atmosféricos provenientes del mar, como los iones cloruro o como sal marina, ambos como producto de la evaporación del agua del

mar, logran impactar muy fuertemente en el deterioro de un metal presente en la cercanía de la costa.

“El depósito de partículas de cloruro de sodio sobre la superficie metálica acelera la corrosión, ya que pueden dar lugar a la formación de productos de corrosión solubles, por lo tanto, existe una relación directa entre el contenido de sal marina en la atmósfera y la velocidad de corrosión medida.” (ASM International, 2006)

La mayor parte de cloruros que se encuentran en la costa marina son transportados por la descarga de energía cinética de las olas, estos cloruros junto a muchos más contaminantes están presentes en aerosol marino.

“El depósito de partículas salinas sobre la superficie metálica acelera su corrosión, sobre todo si, como en el caso de los cloruros, pueden dar lugar a productos de corrosión solubles en lugar de los escasamente solubles que se forman en agua pura.” (Rivero, Chico, de la Fuente y Morcillo, 2007)

1.2.3.1. Agua de mar

“El ambiente marino incluye una diversidad de sub-ambientes como agua en mar abierto, agua de mar costera, agua salobre de estuarios, sedimentos de fondos y atmósfera marina.” (Vinueza Madrigal, 2008)

“La exposición de estructuras y materiales a estos ambientes puede ser continua o intermitente, dependiendo de la aplicación. La estructura expuesta en aguas poco profundas son muy a menudo expuestas a cinco zonas de corrosión (véase la Figura 1.3), comenzando con la atmósfera marina, la estructura entonces pasa a través del rocío, la marea, el subsuelo, los lodos.” (Evans, 2018)

Para un metal dependiendo la ubicación que este tenga en un ambiente marino padecerá de diferente manera el efecto de la corrosión, en la Figura 1.3 se presenta el diagrama de la pérdida

relativa de espesor en un metal presente en una atmósfera marina, con las zonas mencionadas anteriormente.

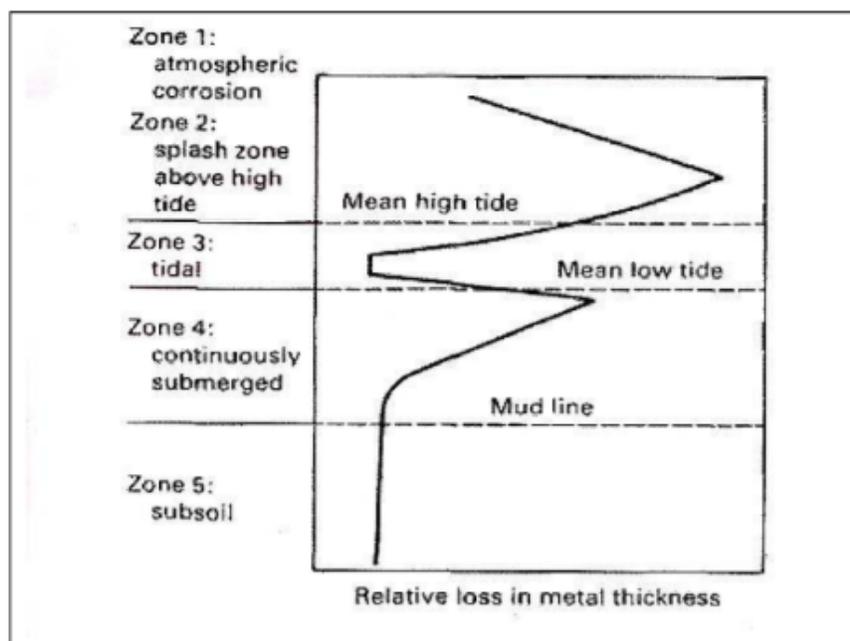


Figura 1. 3 Zonas sobre el ataque de la corrosión según sea el contacto con el material (ASM International, 2006)

1.2.3.2. Relación entre corrosión metálica y distancia a la costa

Los resultados obtenidos por Chico, Otero, Mariaca y Morcillo (1998), determinaron un rápido decrecimiento de la salinidad conforme se adentra en la costa unos cientos metros, para después decrecer, de modo más suave, tendiendo a un valor asintótico correspondiente al valor de la salinidad ambiental de la región, lejos del mar.

El estudio realizado por Chico, Otero, Mariaca y Morcillo (1998), constaba en tres puntos de ensayo, situados a diferentes distancias de la línea de costa, las probetas utilizadas fueron de acero al carbono y acero galvanizado expuestas al ambiente marino durante un año, ambas eran de superficie plana, para lo cual determinaron una relación entre la distancia a la costa marina y la corrosión presentada en la figura.1.4.

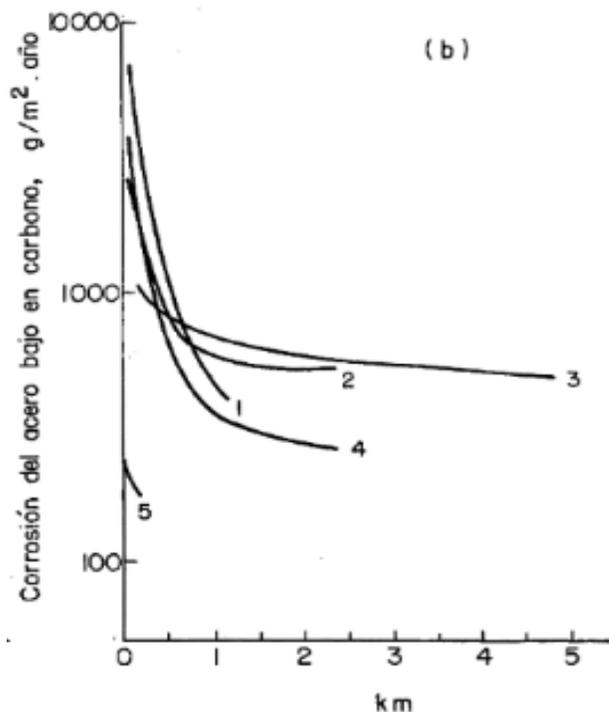


Figura 1. 4 Relación entre la corrosión y la distancia a la costa en diferentes partes del mundo: 1) Lagos (Nigeria), 2) Digha (India), 3) Murmansk (Rusia), 4) Costa Norte (Cuba) y 5) Tarragona (España). (Chico, Otero, Mariaca y Morcillo, 1998)

“El dióxido de azufre se encuentra en las atmósferas que están impurificadas por humos industriales y residenciales y se origina al quemar combustibles que contienen azufre. El cloruro de sodio y el dióxido de azufre estimulan grandemente la corrosión de las superficies metálicas humedecidas, ya que aumentan la actividad de la película acuosa. Así, la corrosión atmosférica en puntos cercanos a la orilla del mar puede exceder considerablemente a lo previsible en el caso de una atmósfera pura. Igual sucede en los complejos industriales, grandes urbes (atmósferas contaminadas por SO_2), entre otros, en cuyos entornos los procesos corrosivos se aceleran notablemente.” (Rivero, Chico, de la Fuente y Morcillo, 2007)

1.2.4. Impacto de la corrosión sobre la economía

A partir de la segunda mitad del siglo XX se realizaron numerosos estudios sobre el impacto económico que tenía la corrosión en varios países, llegando en todos ellos a la conclusión que

los costes asociados a la corrosión eran muy elevados, suponiendo incluso más del 3-5% del Producto Interior Bruto (PIB).” (Fernández Domene, Sánchez Tovar, Lucas Granados y García Antón, 2018)

Los costos de corrosión se pueden considerar desde muchas perspectivas; este puede ser medido a partir sobre el impacto sobre la economía de una nación, así como se observa en la afectación sobre el PIB, como también puede estar relacionado a medidas y técnicas de prevención que se implementan para evitar la corrosión. (Charng y Lansing, 1982)

“Se estima que el coste mundial de la corrosión es de unos 2.5 billones de dólares, lo que equivale (de forma muy aproximada) a un 3.4% del PIB mundial. Y el ahorro que se lograría si se emplearán buenas prácticas para implementar técnicas efectivas de prevención y protección frente a la corrosión estimado entre 375-875 mil millones de dólares, lo que representa entre el 15% y el 35% de los costes totales asociados a la corrosión.” (Koch, 2016)

Los datos compartidos por este estudio podrían ser de valiosa utilidad para personas e instituciones que han reconocido a la corrosión como una amenaza real, pero lastimosamente en la inmensa mayoría de situaciones de peligro y catástrofes no se ha hecho nada al respecto y es cuando los datos como este estudio ayudan a estimar los daños y hacer una verdadera conciencia acerca de este fenómeno. (Koch, 2016)

La Tabla 1.1 muestra el coste de la corrosión en una serie de regiones del mundo y su coste global.

Tabla 1. 1

Coste de la corrosión (CC en miles de millones de dólares y cómo % del PIB) por regiones del mundo. (Koch, 2016)

Regiones económicas	CC total (miles de millones de \$)	CC (% PIB)
EE. UU	451.3	2.7
India	70.3	4.2
Europa	701.5	3.8
Mundo Árabe	140.1	5.0
China	394.9	4.0
Rusia	84.5	4.0
Japón	51.6	1.0
Cuatro “tigres” asiáticos	58.6	2.5
Resto del mundo	552.5	3.4
Global	2505.4	3.4

El estudio anterior solo da una idea de cómo es la relación entre la corrosión y los costos directos, pero hay muchos más costos que aún no se han cuantificado y estos son los costos indirectos, los cuales están relacionados con la pérdida de eficiencia y productividad, como también problemas de seguridad y salud del operario o de cualquier persona que tenga contacto con una estructura metálica o alguna cosa afín. (Koch, 2016)

Estos costos indirectos su cálculo es muy complicado como para que de una forma puntual se tenga estimaciones de la relación con la corrosión, y tienden a ignorarse por propietarios o cualquier persona, ya que la valía de los costos directos es más apreciados o considerados significativos, teniendo así una visión sesgada de este fenómeno. Pero los costos indirectos pueden llegar a igualar en valor a los costos directos. (Koch, 2016)

“En ciertas industrias, como las industrias agroalimentarias o farmacéuticas, la presencia de trazas de iones metálicos en algunos de sus productos puede causar serias pérdidas

económicas, con lo que se debe invertir una cantidad considerable de recursos para evitar la corrosión.” (Fernández Domene, Sánchez Tovar, Lucas Granados y García Antón, 2018)

Desde que el ser humano dejó de utilizar la madera como materia prima para transporte, vivienda, entre otros usos. Éste ha comenzado a depender mucho más del funcionamiento de las estructuras del metal, el cual esta propenso a estragos por corrosión. Ejemplos de esta situación serian, aviones fabricados, recipientes a presión que por alguna grieta pudieran poner en peligro a muchos dentro de una industria o del lugar donde se encuentre. (Genescá Llongueras, 1994)

La sociedad actual tiene la necesidad de formar más profesionales en temas relacionados al control, prevención y gestión de la corrosión, ante la real dependencia a los metales en la vida cotidiana. (Genescá Llongueras, 1994)

1.3. Mapas de corrosión

El deterioro de los metales debido a la atmósfera en que se encuentran es una de las temáticas que todo país debe tener en cuenta si se desea realizar un crecimiento económico sostenible, el cual se obtengan ganancias, ya que al ser los metales de los materiales más ampliamente utilizados en la industria debido sus características físicas, químicas, entre otras, es importante el tomar en cuenta el mantenimiento y cuidado de éstos en todas la industrias que lo utilicen. Por ello es necesario tener un estimado en años de la vida útil del metal y de alguna manera determinar el posible nivel de corrosión en el que será expuesto. (Chico, Otero, Mariaca y Morcillo, 1998)

“Las predicciones de corrosión o agresividad de las atmósferas pueden servir como orientación respecto a las medidas protectoras que deben adoptarse para la conservación de una estructura metálica, y se tendrán en cuenta en la planificación de una obra, para especificar el metal o aleación que hay que utilizar, el tipo de recubrimiento protector y sus características —si es que se emplea alguno— y la frecuencia del mantenimiento. Así, las importancias de estos factores muestran el interés que tienen *los mapas de corrosividad* de países y áreas geográficas, que informen directamente acerca de los riesgos de corrosión.” (Genescá Llongueras, 1994). A dicha

problemática planteada existen normas y guías asociadas al nivel de corrosión atmosférica en forma local o regional.

“Este proceso por su necesidad de evaluaciones previas requiere esfuerzos y financiamientos que no todos los países están en condiciones de realizar. En este sentido proyectos de apoyo a la evaluación de la corrosión atmosférica como lo fueron el Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT), el proyecto de Corrosión de Metales de uso electrónico en Ambientes agresivos (TROPICORR), la red temática de Protección Anticorrosiva de Metales en Atmósferas Iberoamericanas (PATINA) y el proyecto de Duración de Concretos (DURACON), los cuales permitieron evaluaciones puntuales de la corrosión atmosférica y sus efectos en Costa Rica. Adicionalmente el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha desarrollado recientemente estudios de corrosión atmosférica en diversos puntos de su interés.” (Garita, Rodríguez Yáñez y Robles, 2014). Además, muchos países han realizados mapas globales de sus niveles de corrosión atmosférica, a partir de referencia de estudios locales y modelados:

“En Centroamérica los mapas de corrosión atmosférica no son un tema muy desarrollado, existiendo solo un mapa esquemático de la NACE (National Association Corrosion Engineer). Mientras que todos los países en América del Norte tienen mapas y algunos en América del Sur.” (Mariaca, Genesca, Uruchurtu y Salvador, 1999)

1.3.1. Proyecto MICAT

1.3.1.1. Antecedentes

Durante la celebración del II Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección, en noviembre de 1986 en Maracaibo, Venezuela, tuvo lugar una mesa redonda durante la cual se expusieron las ideas básicas para la elaboración de un Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT). El tema suscitó un gran interés y las delegaciones de los distintos países asistentes al Congreso (Argentina, Colombia, Cuba, España, México, Portugal y Venezuela) expresaron su intención de participar activamente en el proyecto. Posteriormente se recibieron las adhesiones al proyecto de instituciones y organismos de Brasil, Costa Rica, Chile, Panamá y Perú.

Durante 1987 se realizaron gestiones en España ante el Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo del V Centenario (CYTED-D) con vistas a dar un carácter oficial al proyecto de investigación y obtener financiación para el mismo.

En la reunión del Consejo Técnico Directivo del CYTED-D en La Habana (enero de 1989) se aprueba oficialmente el proyecto, nombrándose como coordinador del mismo al doctor Leonardo Uller, de Brasil.

La I Reunión de Coordinadores del proyecto MICAT de los distintos países participantes en el estudio tuvo lugar del 2 al 4 de agosto de 1988 en Caracas, Venezuela. En esta reunión se nombró al doctor Manuel Morcillo, de España, jefe del proyecto y se aprobó la metodología respectiva. (Rojas Canales y Varas González, 2010)

1.3.1.2. Objetivos

Mediante el desarrollo del proyecto se pretende conseguir, en diferentes fases, los siguientes objetivos:

- a) Un mayor conocimiento acerca de los mecanismos de corrosión atmosférica en las distintas atmósferas de Iberoamérica.
- b) Establecer, a través de adecuados tratamientos estadísticos de resultados, expresiones matemáticas que permitan el cálculo de la corrosión atmosférica en función de parámetros climáticos y de contaminación.
- c) Elaborar el Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica.

Todo ello permitirá sentar las bases para una selección óptima de los materiales metálicos y recubrimientos (convencionales y avanzados) que deberán emplearse en las distintas situaciones de agresividad atmosférica. (Rojas Canales y Varas González, 2010)

1.4. Métodos de prueba y evaluación de la corrosión

Las pruebas de corrosión son de gran importancia en la industria química para poder determinar el grado de resistencia de los materiales y mejorar sus prestaciones, ya que se consideran la base para la evaluación y posterior control del fenómeno en una gran cantidad de aplicaciones de ingeniería (Ashworth, 1984).

Esto resulta fundamental para evitar accidentes, ahorrando grandes sumas de dinero en daños y reparaciones. En la Figura 1.5 se ilustran los factores que intervienen en la evaluación de la corrosión y su importancia para poder controlarla. Para realizar una correcta evaluación de la corrosión es necesario el determinar la velocidad de corrosión, la cual es una medida del grado de afectación del metal debido a reacciones de corrosión.

Las pruebas de corrosión se pueden dividir, de forma general, en tres grandes grupos. El primero corresponde a las pruebas de laboratorio en las que las muestras son expuestas a líquidos de plantas reales o ambientes de éstas simulados. En el segundo, se encuentran las pruebas en planta o en donde las pruebas se efectúan en ambientes reales exponiendo los metales o aleaciones a las condiciones presentes en los procesos. Por ejemplo, condiciones en la atmósfera, el mar, entre otras. Finalmente, el tercer grupo lo conforman las pruebas de servicios. En este tipo de prueba los materiales a estudiar, que en algunas veces se elaboran tomando la forma de piezas de proceso, se exponen a las condiciones específicas en las serán usados en los procesos reales (Ashworth, 1984). De forma general, las muestras de metal que se emplean para determinar la velocidad de corrosión se denominan testigos o cupones.

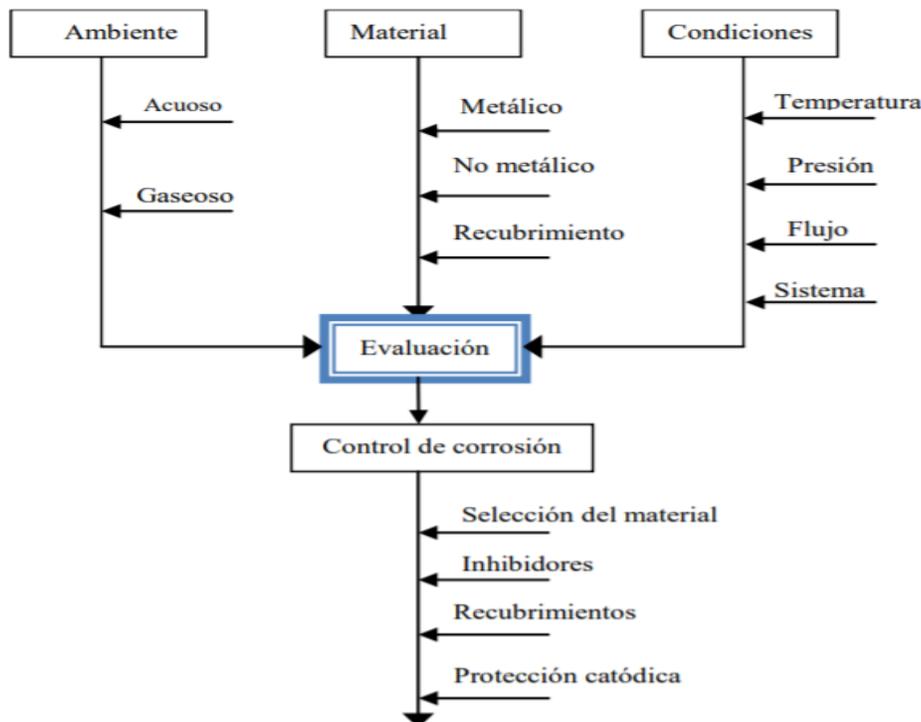


Figura 1.5 Importancia de la evaluación para el control de la corrosión (ASM International, 2006)

1.4.1. Pruebas de laboratorio

Las pruebas de corrosión de laboratorio son métodos importantes para entender el comportamiento de los metales y aleaciones en diferentes ambientes corrosivos. Muchas de las teorías de corrosión que existen en la actualidad se han desarrollado a partir de este tipo de pruebas (Lai, 2007)

A pesar de ello, las pruebas de laboratorio presentan desventajas. En algunas ocasiones este tipo de pruebas no simulan de manera exacta el ambiente y las condiciones de operación del sistema real. Por otra parte, su duración es relativamente corta en comparación con el tiempo de vida al que se diseñan los equipos en los procesos industriales. Este hecho trae consigo la necesidad de extrapolar los resultados para tener una predicción del comportamiento de los materiales en un determinado ambiente de proceso. El mayor problema con la extrapolación de

los resultados en una prueba de corrosión es que no es posible predecir el punto de quiebre del proceso de corrosión en el sistema.

1.4.2. Método de pérdida de peso

El método de pérdida de peso relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales. Las pruebas de inmersión total que emplean el método de pérdida de peso consisten en exponer piezas pequeñas de metal a ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de las pruebas (NACE, 1984).

Este método es uno de los más usados en estudios de oxidación y corrosión para determinar el grado de afectación en los metales. Esto se debe a que los resultados obtenidos por este método son considerados confiables, al asemejarse a resultados obtenidos en pruebas de en planta; si se cuidan las condiciones al realizar las pruebas.

Las pruebas de corrosión mediante el método de pérdida de peso se consideran el método más rápido y satisfactorio para hacer una selección preliminar de los mejores materiales en estudio para una determinada aplicación (Ashworth, 1984)

Por otro lado, la principal desventaja es que sólo una muestra o testigo puede ser analizado en cada corrida, lo cual hace que el generar datos comparativos para varios tipos de sistemas y materiales sea un proceso largo.

1.4.3. Resistencia eléctrica

Las pruebas de corrosión por medio de resistencia eléctrica se basan en los cambios en la resistencia de piezas metálicas o alambres de los materiales por efecto de la disminución de la su sección transversal, por la pérdida de peso de metal. Las pruebas consisten en exponer las

muestras al ambiente para que el equipo grabe de forma periódica las lecturas; traduciendo la velocidad de corrosión como la pérdida de peso del metal entre cada dos lecturas.

Las principales ventajas de este tipo de pruebas es que pueden llevarse a cabo en periodos de tiempo cortos, además de que los estudios pueden realizarse en exposiciones a gases corrosivos, la velocidad de corrosión se puede determinar sin tener que realizar observaciones a la muestra ni retirarla del equipo. Además, el método puede detectar velocidades de corrosión bajas, las cuales requerirían periodos prolongados para su determinación por el método de pérdida de peso.

La desventaja más importante de este método es que no es posible determinar si existe corrosión localizada. Asimismo, si el producto de corrosión presenta una conductividad eléctrica cercana a la del metal, los resultados indicarán una velocidad de corrosión pequeña o nula. Igualmente es importante mencionar que no se pueden realizar este tipo de pruebas si el ambiente es un electrólito.

1.4.4. Resistencia a la polarización lineal

La resistencia a la polarización lineal (RPL) es un método que se emplea para la determinar la velocidad de corrosión. El método consiste en la aplicación de un sobre- potencial, respecto del potencial de equilibrio, lo suficientemente pequeño como para no alterar el sistema, pero suficiente como para poder conocer cuál es el comportamiento del electrodo en ese medio frente a las reacciones de oxidación y de reducción. De esta forma, se puede seguir la evolución del proceso de corrosión con el tiempo.

La principal ventaja de la polarización lineal es que es un método no destructivo. Otra ventaja es que pueden estimarse valores de resistencia a la corrosión y ésta convertirse a velocidades de corrosión, permitiendo determinar la rapidez con la que se corroerá el metal o estimar la vida útil del mismo. Mediante la ecuación de Stern-Geary se pueden relacionar la resistencia a la corrosión y la corriente de corrosión para polarización lineal, pudiéndose transformar ésta última en velocidad de corrosión. Entre las desventajas que presenta este método se encuentran el que

únicamente mide corrosión general, además de que resulta complicado obtener los datos para metales que presentan índices de corrosión bajo.

1.5. Procedimientos y recomendaciones para realizar pruebas de corrosión en laboratorio por método de pérdida de peso.

1.5.1. Preparación de la superficie

Cuando se realizan pruebas de corrosión para predecir el comportamiento de un metal en un determinado ambiente, lo deseable sería que la superficie de los testigos asemejara a la de los materiales empleados en los procesos o servicios. Sin embargo, debido a que existen diferentes condiciones en los metales empleados en ingeniería es grande, incluso dentro de un mismo tipo, no sería práctico evaluar cada una de dichas condiciones. Por ello el mejor procedimiento en la práctica es elegir una determinada condición de superficie para los testigos que pueda ser reproducida a lo largo de las pruebas.

Adicionalmente, es recomendable que la superficie de los testigos no presente raspaduras ya que estos sitios representan sitios de ataque preferencial. Se pueden esperar resultados con mayor uniformidad, si se retira una capa significativa de la superficie del metal, con el fin de eliminar las raspaduras o variaciones en las condiciones de la superficie metálica original. Lo anterior se puede lograr mediante tratamiento químico, eliminación electrolítica o esmerilado con un paño o papel de liga fuerte (Robert H., 2003)

En cuanto a las dimensiones y forma de los testigos no existe una estándar. El tamaño y la forma de estos varían de acuerdo a la finalidad de la prueba, la naturaleza del material y el equipo que se utilice. A pesar de ello, se recomienda que en las dimensiones de los testigos exista una relación grande de superficie a masa y una relación pequeña de área del borde con respecto al área total.

Después de la manufactura de los testigos y el acondicionamiento de los testigos es necesario realizar su limpieza antes de ser empleados en las pruebas. Los testigos se deben desengrasar para remover cualquier suciedad, aceite o grasa que pueda interferir en las pruebas de corrosión. Esto se puede lograr mediante el pulido con polvo limpiador, seguido por el enjuagado completo en un disolvente apropiado, pudiendo ser acetona, metanol, por mencionar algunos. Otro de los cuidados que debe darse a los testigos es el colocarlos en un desecador hasta el comienzo de las pruebas en caso de no emplearlos de forma inmediata (Robert H., 2003).

1.5.2. Volumen de la solución

El volumen empleado de solución a estudiar es un aspecto que se debe considerar al realizar las pruebas de corrosión. Es recomendable que el volumen sea lo suficientemente grande para evitar cambios apreciables de corrosión a causa del agotamiento de los constituyentes corrosivos o la acumulación de productos de corrosión que pudieran afectar el avance de la misma.

La Norma ASTM G1-03 recomienda que la relación de volumen de la disolución con el área de exposición de testigos sea de $40 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ (ASTM, 2003). Otra porción es adecuada de dicha relación es de 20 cm^3 de solución por cm^2 de superficie de la muestra. Dicha recomendación corresponde a la norma A262 ASTM para el ensayo de Huey (Robert H., 2003)

1.5.3. Número de testigos

En algunos casos las recomendaciones prácticas limitan el número de testigos a emplearse en las pruebas de corrosión. Se recomienda emplear por lo menos dos testigos o cupones para evaluar la velocidad de corrosión de determinado sistema. Para efectos estadísticos, es recomendable usar al menos cinco testigos para un mismo sistema (Robert H., 2003)

1.5.4. Duración de la prueba

La duración de una prueba de corrosión está influenciada por la naturaleza del mismo y su finalidad. Los materiales que experimentan efectos de corrosión importantes no requieren de tiempos prolongados para obtener velocidades de corrosión precisas, aunque existen

excepciones. La formación de películas protectoras se observa en muchos de los materiales resistentes a la corrosión. Debido a ello, el realizar ensayos cortos con este tipo de materiales puede arrojar resultados no muy precisos de velocidad de corrosión. De forma general, se recomienda que la duración de las pruebas sea prolongada para obtener datos más reales que los que se pudieran obtener en pruebas cortas.

Uno de los procedimientos que se pueden llevar a cabo para evaluar el efecto del tiempo sobre la corrosión del metal, y la corrosividad del ambiente, en las pruebas de laboratorio es la técnica de ensayo de intervalo temporal predefinido. Existen otros métodos para determinar la duración de las pruebas; sin embargo, estos requieren la remoción de los productos sólidos de corrosión y no miden con exactitud las variaciones normales del fenómeno durante el tiempo.

1.5.5. Limpieza de las muestras después de las pruebas

Al finalizar las pruebas de corrosión es importante realizar una inspección visual de la apariencia de los testigos. En las observaciones, se deben considerar la formación de productos de corrosión, así como la deposición de dichos productos en los testigos. Lo anterior, con el fin de evaluar la corrosión localizada, por picaduras o el ataque en celdas de concentración que se puedan presentar en la superficie de los testigos. Realizada la inspección visual, los testigos deben ser sometidos a un procedimiento de limpieza.

La limpieza de los testigos posterior a las pruebas es uno de los procedimientos de mayor importancia en el desarrollo experimental de las pruebas de corrosión. De forma general, el procedimiento de limpieza debe retirar todos los productos de corrosión de los testigos con una eliminación mínima de la superficie no atacada. Si la limpieza no se realiza adecuadamente, los resultados de velocidad de corrosión pueden resultar erróneos.

No existen reglas fijas para la forma en que se debe realizar la limpieza de los testigos después de las pruebas, los procedimientos varían dependiendo el tipo de metal y el grado de adherencia de los productos de corrosión. Existen tres tipos principales de limpieza de testigos:

- a) Limpieza mecánica: Este tipo de limpieza remueve los productos de corrosión mediante procedimientos mecánicos. Entre dichos procedimientos se encuentra el raspado, cepillado, desbaste, el choque mecánico y el ultrasonido. El método más empleado en este tipo de limpieza es cepillar la superficie de los testigos con abrasivo suave. Los otros métodos se emplean como complemento.

- b) Limpieza química: La limpieza química implica la eliminación de material de la superficie de los testigos por disolución con algún agente químico apropiado. De forma general, se emplean disolventes como acetona, tetracloruro de carbono y alcohol para eliminar restos de aceites, grasas o resinas. En la norma ASTM G1- 03 se reportan diferentes soluciones de limpieza química dependiendo del tipo de aleación o metal.

- c) Limpieza electrolítica: Este tipo de limpieza se realiza después de la remoción de productos de corrosión adheridos débilmente mediante frotación. La limpieza electrolítica consiste en formar con el testigo una celda de corrosión electrolítica, a determinadas condiciones de temperatura e intensidad de corriente, y en presencia de inhibidores orgánicos. Existen diferentes métodos de limpieza electrolítica dependiendo el tipo de metal que se esté estudiando; sin embargo, uno de los métodos más útiles para una gran cantidad de metales y aleaciones se encuentra reportado en la norma ASTM G1- 03.

Independientemente del tipo de tratamiento que se emplee para la limpieza de los testigos después es necesario determinar el efecto de pérdida en la superficie del metal. Para ello, antes de la prueba de corrosión y después de la limpieza posterior a ésta, es necesario determinar la masa de los testigos con el fin de establecer la pérdida de masa.

1.6. Lista de verificación de datos importantes en las pruebas de corrosión

La siguiente lista de verificación es una guía reportada en el Manual del Ingeniero Químico (Robert H., 2003) para describir la información y los datos a recabar adecuados al realizar pruebas de corrosión tomada:

- 1) Medios corrosivos y su concentración
- 2) Volumen de la solución a estudiar
- 3) Temperatura
- 4) Aireación
- 5) Agitación
- 6) Tipo de equipo utilizado para las pruebas
- 7) Duración de las pruebas
- 8) Composición química o nombre comercial de los metales a evaluar
- 9) Forma y condiciones metalúrgicas de los testigos de corrosión
- 10) Tamaño exacto, forma y área de los testigos de corrosión
- 11) Número de testigos de cada material y ubicación
- 12) Método empleado para la limpieza posterior a las pruebas
- 13) Pérdidas de peso
- 14) Evaluación del daño por corrosión
- 15) Velocidad de corrosión de los testigos evaluados.

CAPITULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Durante este capítulo se detalla la metodología llevada a cabo para la obtención de datos y posteriormente información acerca de las razones de corrosión y pérdida de masa sufrida por los especímenes metálicos empleados para este estudio, especificando así el proceso de limpieza dado a las probetas metálicas el cual es amparado bajo la normativa ASTM designación G1- 03, la puesta de éstas en el ambiente corrosivo de estudio, su recolección y tratamiento dado para la medición de su peso luego del tiempo que pasaron en estudio en el ambiente corrosivo.

2.1. Pruebas de corrosión

Las pruebas de corrosión se consideran la base para la evaluación y el posterior control del fenómeno en una gran cantidad de aplicaciones en ingeniería. Para realizar la evaluación de corrosión es necesario determinar la velocidad de corrosión, la cual es una medida de afectación del metal debido a reacciones de corrosión. Dichas pruebas son métodos importantes para entender el comportamiento de los metales y aleaciones en diferentes atmósferas corrosivas.

Siendo así el método de pérdida de peso uno de los más utilizados en estudios de oxidación y corrosión para determinar el grado de afectación en los metales. Este método relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales, ya que consiste en exponer piezas pequeñas del metal conocidos como testigos de corrosión a ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de la prueba.

Los resultados obtenidos por este método son confiables ya que se asemejan a resultados obtenidos en pruebas de planta, siendo así este método uno de los más rápidos y satisfactorios para hacer una selección preliminar de los mejores materiales en estudio para una determinada aplicación.

Para el caso en particular se pusieron a prueba 3 aleaciones distintas: Hierro A36, Acero Inoxidable AISI 304 y Aluminio.

2.2. Preparación de probetas de ensayo.

No existe una norma estándar que regularice las dimensiones y el tamaño de las probetas ya que el tamaño y la forma varían de acuerdo a la finalidad del estudio, la naturaleza del material a ensayar y el método que será utilizado, aunque se recomienda que exista una relación grande de superficie a masa y una relación pequeña de área del borde con respecto al área total. Así mismo de acuerdo a la norma de la ASTM G1- 03 el número y tipo de probetas/especímenes a utilizar queda a criterio de la persona que realiza los ensayos.

En total fueron empleadas 45 probetas, 15 de hierro A36 con dimensiones 4.0 x 5.0 x 1/16 mm, 15 de acero inoxidable 304 con dimensiones 4.0 x 5.0 x 1/16 mm y 15 de aluminio con dimensiones 4.0 x 5.0 x 1/16 mm. De cada una de estas 15 probetas fue tomada una de cada material, ya que estas servirían para realizar una comparación de las probetas expuestas al ambiente corrosivo marino en estudio frente a las que no fueron sometidos, poniendo así en estudio 14 testigos por aleación empleada.

En primer lugar, las probetas utilizadas fueron preparadas en un taller de metalurgia en donde se les dieron las dimensiones anteriormente mencionadas y posteriormente fueron empacadas de modo de evitar la interacción de éstas con el medio ambiente hasta darles el tratamiento de limpieza en el laboratorio para su posterior colocación en el medio en el que iban a ser estudiadas.

2.3. Preparación, limpieza y evaluación de los testigos metálicos.

Una vez llevados al laboratorio los testigos metálicos, éstos fueron sometidos a un tratamiento de limpieza en específico para cada aleación ya que los procedimientos varían dependiendo del tipo de metal y el grado de adherencia de los productos corrosión, con dicho tratamiento se logra eliminar cualquier tipo de contaminación que pudieran contener los testigos metálicos para su posterior pesaje, dicho pesaje fue realizado en una balanza analítica de precisión 0.0001 g.

Dicho tratamiento de limpieza fue en base a la norma ASTM designación G1- 03 “Standar Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens” (Práctica Estándar para la Preparación, Limpieza, y Evaluación de Especímenes de Pruebas de Corrosión) la cual menciona tres principales tratamientos de limpieza que pueden ser utilizados para este fin:

- a) Limpieza mecánica: este tipo de limpieza remueve los productos de corrosión mediante procedimientos mecánicos.
- b) Limpieza química: la limpieza química implica la eliminación de material de la superficie de los testigos por disolución con algún agente químico apropiado.
- c) Limpieza electrolítica: la limpieza electrolítica consiste en formar con el testigo una celda de corrosión electrolítica, a determinadas condiciones de temperatura e intensidad de corriente, y en presencia de inhibidores orgánicos.

Para el presente caso de investigación fue utilizada únicamente la limpieza química debido al tiempo de observación al que fueron sometidas las probetas y a la naturaleza de los productos de corrosión que estos presentaban. El tratamiento químico dado para cada espécimen metálico se detalla a continuación:

2.3.1. Preparación testigo de aluminio

La primera etapa de limpieza por la que pasa cada probeta de aluminio es la de desengrasado para lo cual fue utilizado tolueno, esto según recomendaciones de la norma anteriormente mencionada. Para ello se utilizaron paños bañados con tolueno y se procedió a la limpieza de cada probeta, como se muestra en la Figura 2.1.

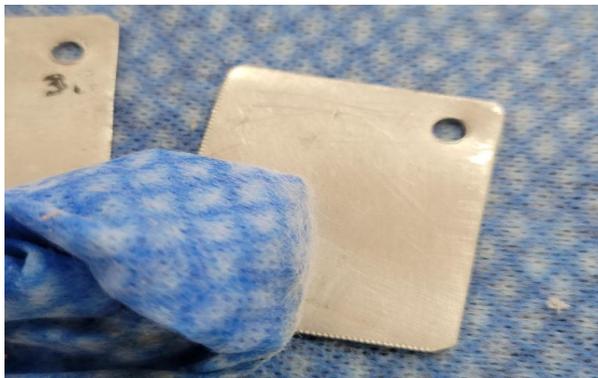


Figura 2. 1 Limpieza de testigo de aluminio con tolueno

La segunda etapa de limpieza corresponde al decapado ácido, preparando una solución ácida según la norma ASTM G1-03, con dicha solución ácida según específica la norma se asegura retirar casi con totalidad todos aquellos productos de corrosión en la probeta y no perdiendo metal base de ésta.

Para la preparación de dicha solución ácida se sigue el procedimiento C.1.1 descrito en la tabla A1.1 de la norma, el cual especifica los reactivos a utilizar, así como las cantidades, su preparación y el tiempo de inmersión de las probetas en la solución. A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra el procedimiento seguido, directamente extraído de la norma.

Tabla 2. 1
Procedimiento químico de limpieza para remover productos de corrosión (aluminio)

Designación	Materiales	Solución	Tiempo	Temperatura	Observaciones
C.1.1	Aluminio y aleaciones de aluminio	50 mL ácido fosfórico (H_3PO_4 , sp gr 1.69) 20 g trióxido de cromo (CrO_3) Agua grado reactivo para hacer 1000 mL	5 a 10 min	De 90° C a ebullición	Si quedan productos de corrosión remanentes, enjuagar con ácido nítrico de acuerdo al procedimiento (C.1.2)

Son utilizadas una décima parte de las cantidades de químicos descritas debido al número de testigos de aluminio a tratar, que son 15. Se prepara la solución y se deja calentar hasta la ebullición de ésta.

Una vez preparada está solución ácida, las probetas de aluminio son sumergidas en ella tal como se muestra en la Figura 2.2 y se dejan reposar por un lapso de 5 a 10 minutos (véase la Tabla 2.1), dependiendo de la apariencia física que presenten los testigos.



Figura 2. 2 Inmersión de testigos de aluminio en solución ácida para la remoción de productos de corrosión

En la tercera etapa las probetas son sumergidas en una solución neutra (véase la Figura 2.3), para eliminar rastros de la solución ácida empleada anteriormente, para ello es empleada una solución neutra de bicarbonato de sodio al 10% p/p y se dejan reposar las probetas en ésta por tres minutos antes de pasar a la siguiente etapa.



Figura 2. 3 Inmersión de testigos de aluminio en solución neutra para eliminar remanentes de la solución ácida

En la cuarta etapa las probetas son sumergidas en agua destilada (véase la Figura 2.4), para limpiarlas de cualquier remanente químico que pudo haber quedado de las etapas anteriores, dejándolas reposar por tres minutos.



Figura 2. 4 Inmersión de testigos de aluminio en agua destilada

En la quinta etapa es utilizada la acetona como un secuestrador de humedad, es decir para eliminar la humedad que pudo haber quedado de la etapa anterior, para ello es utilizado un paño bañado en acetona y se procede a limpiar los testigos con este como se muestra en la Figura 2.5.

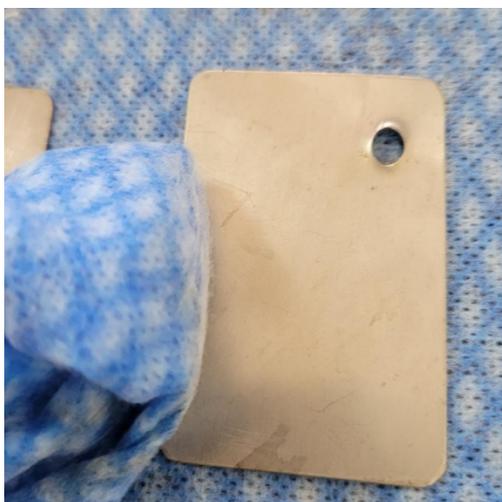


Figura 2. 5 Limpieza de testigos de aluminio con acetona

Luego de todas estas etapas las probetas son limpiadas con toallas de papel y luego se dejan reposar en el desecador por un tiempo de 30 minutos para su posterior pesaje en la balanza analítica, en donde se toman los datos de su peso inicial, tal como puede observarse en la Figura 2.6.

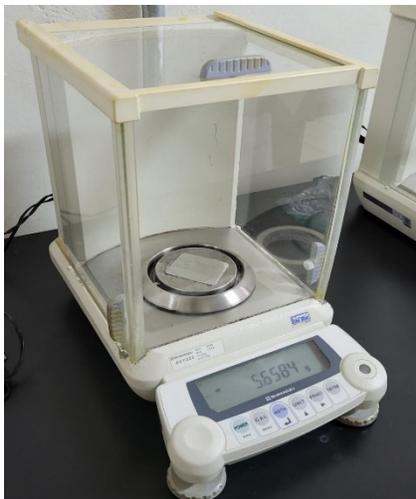


Figura 2. 6 Pesaje de testigos de aluminio

Una vez habiendo tratado y pesado todas las probetas de aluminio (15), una de ellas es aislada para utilizarla luego como comparación frente las otras que serán expuestas al ambiente corrosivo marino.

2.3.2. Preparación testigo Hierro

Como primera etapa de limpieza se tiene el desengrasado para lo cual fue utilizado el solvente tolueno, esto según recomendaciones de la norma ASTM G1-03. Para ello se utilizaron paños bañados con tolueno y se procedió a la limpieza de cada probeta, tal como se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2. 7 Paño humedecido con tolueno para desengrasado de testigo de hierro

La segunda etapa de limpieza corresponde al decapado alcalino, preparando así una solución básica según la norma anterior, con dicha solución básica se asegura remover casi con totalidad todos aquellos productos de corrosión en la probeta y no así metal base de ésta.

Para la preparación de dicha solución alcalina se sigue el procedimiento C.3.3 descrito en la tabla A1.1 de la norma, el cual especifica los reactivos a utilizar, así como las cantidades, su preparación y el tiempo de inmersión de las probetas en la solución. A continuación, en la Tabla 2.2 se muestra el procedimiento seguido, directamente extraído de la norma.

Tabla 2. 2

Procedimiento químico de limpieza para remover productos de corrosión (hierro)

Designación	Material	Solución	Tiempo	Temperatura	Observaciones
C.3.3	Hierro	200g hidróxido de sodio (NaOH) 20 g zinc granulado o chips de zinc Agua grado reactivo para hacer 1000 mL	30 a 40 min	80° a 90°C	Se debe tener precaución en el uso de cualquier polvo de zinc, ya que puede ocurrir una ignición espontánea al exponerse al aire.

Para la preparación de esta solución básica, fueron utilizadas únicamente las décimas partes de las cantidades descritas debido al poco número de probetas de hierro a tratar (15). Se prepara la solución y se deja calentar hasta alcanzar una temperatura de 80 a 90 °C. Las probetas son sumergidas en la solución alcalina como se observa en la Figura 2.8 y se dejan reposar por un lapso de 30 a 40 minutos (véase la Tabla 2.2), dependiendo de la apariencia física que presenten.



Figura 2. 8 Testigo de hierro sumergido en solución alcalina para remoción de productos de corrosión

En la tercera etapa las probetas son sumergidas en una solución neutra tal como se aprecia en la Figura 2.9, para eliminar rastros de la solución anterior, para ello es empleada una solución neutra de bicarbonato de sodio al 10% p/p y se dejan reposar las probetas en ésta por tres minutos antes de pasar a la siguiente etapa.

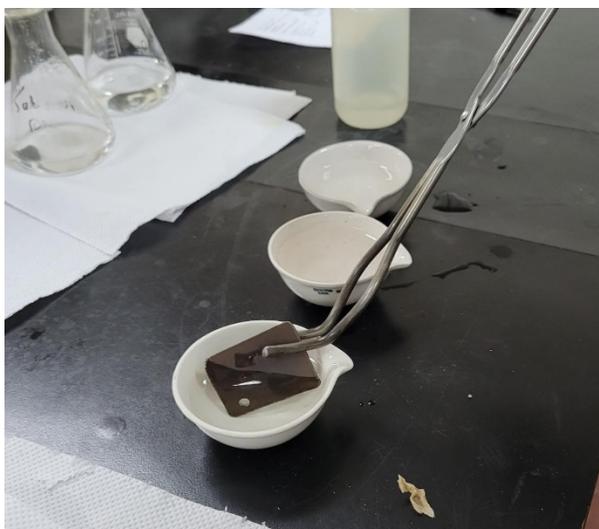


Figura 2. 9 Testigo de hierro sumergido en solución neutra

En la cuarta etapa las probetas son sumergidas en agua destilada para limpiarlas de cualquier remanente químico que pudo haber quedado de las etapas anteriores, dejándolas reposar por tres minutos, tal como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2. 10 Inmersión de testigo de hierro en agua destilada

En la quinta etapa es utilizada la acetona como un secuestrador de humedad, es decir para eliminar la humedad que pudo haber quedado de la etapa anterior, para ello es utilizado un paño bañado en acetona y se procede a limpiar los testigos con éste como se observa en la Figura 2.11.



Figura 2. 11 Limpieza de testigo de hierro con acetona

Luego de todas estas etapas las probetas son limpiadas con toallas de papel y se dejan reposar en el desecador por un tiempo de 30 minutos para su posterior pesaje en la balanza analítica, en donde se toman los datos de su peso inicial, tal como se muestra en la Figura 2.12.

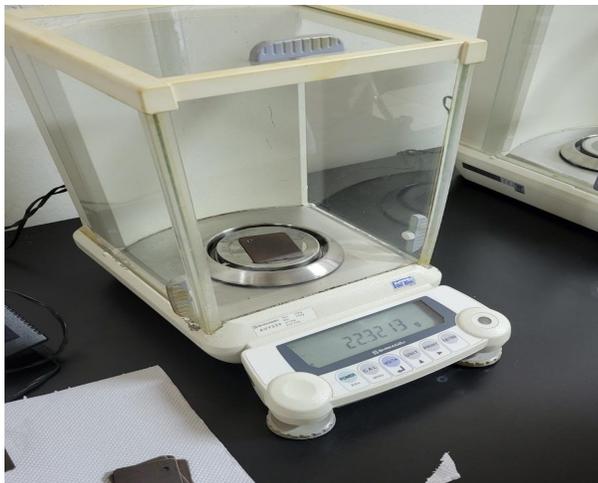


Figura 2. 12 Pesaje de testigos de hierro

Una vez habiendo tratado y pesado todas las probetas de hierro (15), una de ellas es aislada para utilizarla luego como comparación frente las otras que serán expuestas al ambiente corrosivo marino.

2.3.3. Preparación testigo Acero Inoxidable

Como primera etapa de limpieza se tiene el desengrasado para lo cual fue utilizado el solvente tolueno, esto según recomendaciones de la norma ASTM G1-03. Para ello se utilizaron paños bañados con tolueno y se procedió a la limpieza de cada probeta, tal como se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2. 13 Limpieza de testigos de acero inoxidable con tolueno

La segunda etapa de limpieza corresponde al decapado alcalino, preparando así una solución básica según la norma anterior, con dicha solución básica se asegura remover casi con totalidad todos aquellos productos de corrosión en la probeta y no así metal base de ésta.

Para la preparación de dicha solución alcalina se sigue el procedimiento C.7.6 descrito en la tabla A1.1 de la norma, el cual especifica los reactivos a utilizar, así como las cantidades, su preparación y el tiempo de inmersión de las probetas en la solución. A continuación, en la Tabla 2.3 se muestra el procedimiento seguido, directamente extraído de la norma.

Tabla 2. 3

Procedimiento químico de limpieza para remover productos de corrosión (acero inoxidable)

Designación	Material	Solución	Tiempo	Temperatura	Observaciones
C.7.6.	Acero inoxidable	200g hidróxido de sodio (NaOH) 20 g polvo de zinc Agua grado reactivo para hacer 1000 mL	20 min	Ebullición	Se debe tener precaución en el uso de cualquier polvo de zinc, ya que puede ocurrir una ignición espontánea al exponerse al aire.

Para la preparación de esta solución básica, fueron utilizadas únicamente las décimas partes de las cantidades descritas debido al poco número de probetas de acero inoxidable a tratar (15). Se prepara la solución y se deja calentar hasta alcanzar hasta ebullición. Las probetas son sumergidas en la solución alcalina como se muestra en la Figura 2.14 y se dejan reposar por un lapso de 20 minutos (véase la Tabla 2.3).



Figura 2. 14 Inmersión de testigos de acero inoxidable en solución alcalina

En la tercera etapa las probetas son sumergidas en una solución neutra (véase la Figura 2.15), para eliminar rastros de la solución anterior, para ello es empleada una solución neutra de bicarbonato de sodio al 10% p/p y se dejan reposar las probetas en ésta por tres minutos antes de pasar a la siguiente etapa.



Figura 2. 15 Inmersión de testigos de acero inoxidable en solución neutra

En la cuarta etapa las probetas son sumergidas en agua destilada para limpiarlas de cualquier remanente químico que pudo haber quedado de las etapas anteriores, dejándolas reposar por tres minutos, como se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2. 16 Inmersión de testigos de acero inoxidable en agua destilada

En la quinta etapa es utilizada la acetona como un secuestrador de humedad, es decir para eliminar la humedad que pudo haber quedado de la etapa anterior, para ello es utilizado un paño bañado en acetona y se procede a limpiar los testigos con éste como se muestra en la Figura 2.17.



Figura 2. 17 Limpieza de testigo de acero inoxidable con acetona

Luego de todas estas etapas las probetas son limpiadas con toallas de papel y se dejan reposar en el desecador por un tiempo de 30 minutos para su posterior pesaje en la balanza analítica, en donde se toman los datos de su peso inicial, tal como se muestra en la Figura 2.18.

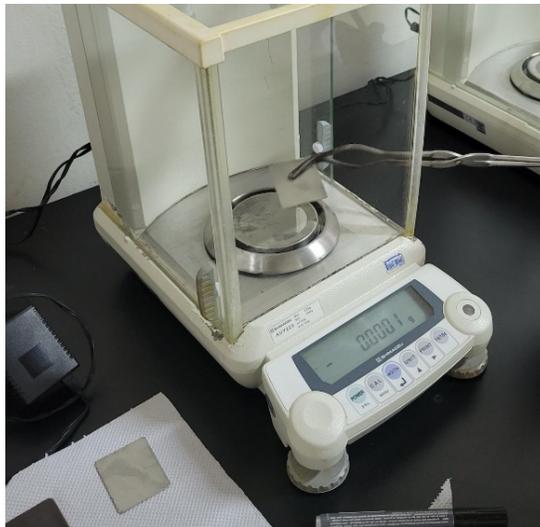


Figura 2. 18 Pesaje de testigos de acero inoxidable

Una vez habiendo tratado y pesado todas las probetas de acero inoxidable (15), una de ellas es aislada para utilizarla luego como comparación frente las otras que serán expuestas al ambiente corrosivo marino.

2.4. Ensayo de corrosión atmosférica

A continuación, se detallan aspectos meteorológicos y oceanográficos del lugar de experimentación, necesarios para una mejor comprensión sobre el ambiente al que fueron expuestas las probetas de cada metal.

2.4.1. Características meteorológicas y oceanográficas del lugar de experimentación.

La Lotificación Nuevos Horizontes II se encuentra ubicada en el cantón San Diego, mismo territorio que abarca a la playa San Diego, la cual es una amplia playa que cuenta con más de 7 kilómetros, se encuentra ubicada en el Puerto de La Libertad, en el departamento de La Libertad,

en El Salvador (véase la Figura 2.19). Puesto que existe una práctica ausencia de otros contaminantes en la atmósfera, como por ejemplo en el contenido de SO_2 , el cual puede considerarse despreciable a efectos prácticos ya que se encuentra en el rango $0.4 - 0.7 \text{ mg SO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (MARN, 2020), la atmósfera cabe clasificarla como marina pura. Por tanto, el parámetro más importante desde el punto de vista de la corrosión en las aleaciones en la localidad en estudio es la salinidad atmosférica, debido a la cercanía que ésta tiene con la playa, en la Figura 2.19 se encuentra encerrada en un rectángulo el área de estudio correspondiente a la Lotificación Nuevos Horizontes II.

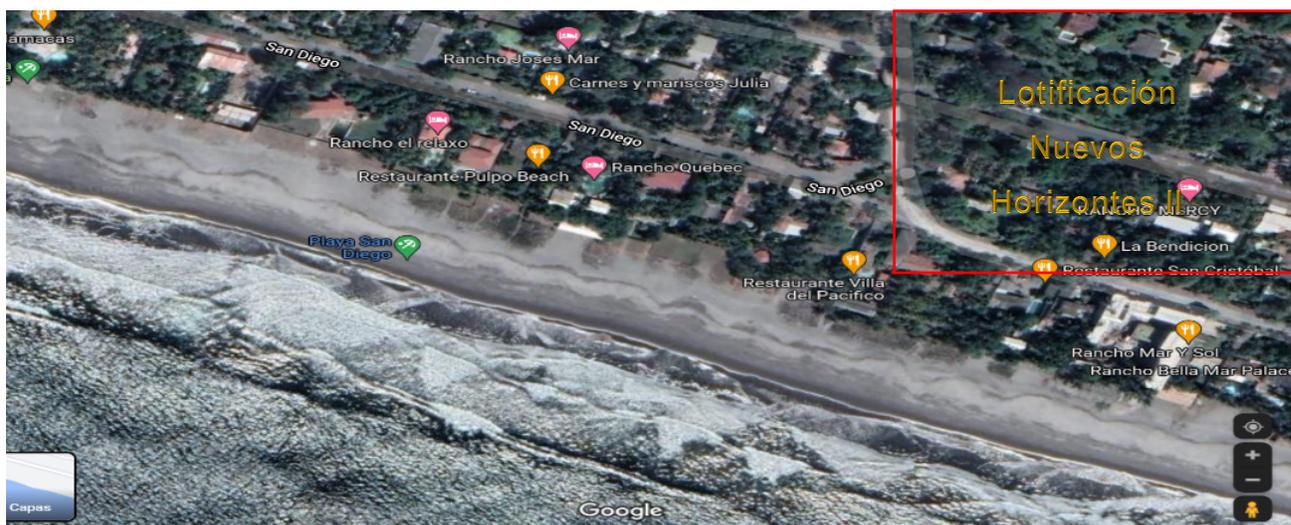


Figura 2. 19 Lotificación Nuevos Horizontes 2, Cantón San Diego, La Libertad. (Google earths, 2021)

Durante los meses de octubre y noviembre el MARN ha caracterizado de manera general el clima de la zona, en base al comportamiento del año anterior con los siguientes datos, despreciando considerablemente otros factores que interfieran con el clima local, la humedad relativa tiene un valor promedio de HR 53.5%, una temperatura promedio de $29.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y se espera para dicho periodo de tiempo alta precipitación (322.6 mm) respecto a los demás meses del año. Estos valores indican altos tiempos de humectación de la superficie metálica lo cual favorece los procesos de corrosión atmosférica. También caracterizan estos meses por la presencia de vientos marinos con velocidad en promedio de 27 km/h con un considerable arrastre de aerosol marino (salinidad atmosférica), lo cual potenció en gran medida el proceso de corrosión metálica. (MARN, 2020)

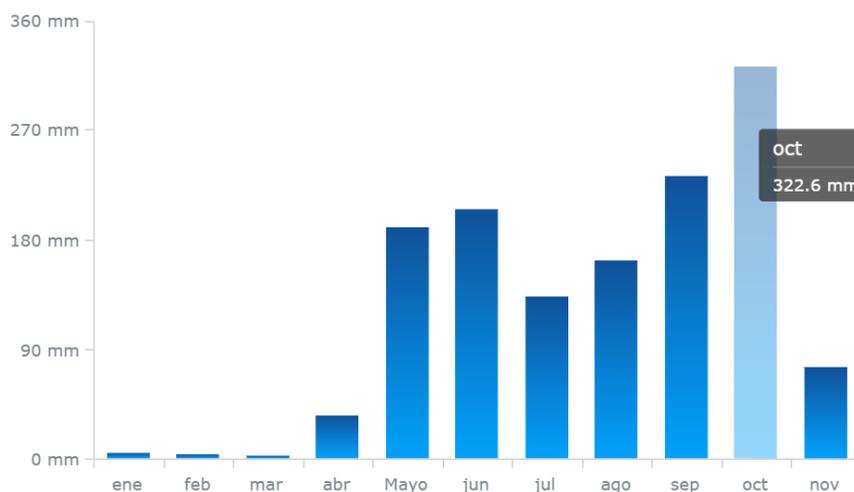


Figura 2. 20 Precipitación de lluvia en Playa San Diego, La Libertad.

2.5. Estaciones de corrosión

Los 42 testigos metálicos expuestos al ambiente corrosivo fueron distribuidos en 5 estaciones de monitoreo de la siguiente manera:

Estación 1: esta estación era la más próxima a la playa, en ella fueron colocada 9 testigos, 3 de cada material, es decir, 3 de hierro A36, 3 de acero inoxidable y 3 de aluminio, la distribución de los testigos puede observarse en la Figura 2.21. Cada 360 horas fue retirada una placa de cada material de esta estación (hasta completar las 1,000 horas de estudio), para monitorear la pérdida de masa en ellas.



Figura 2. 21 Estación de monitoreo n°1

Estación 2: igual que en la estación anterior, fueron colocadas 9 placas, 3 por cada aleación como se muestra en la Figura 2.22 y fueron retiradas de igual forma cada 360 horas.

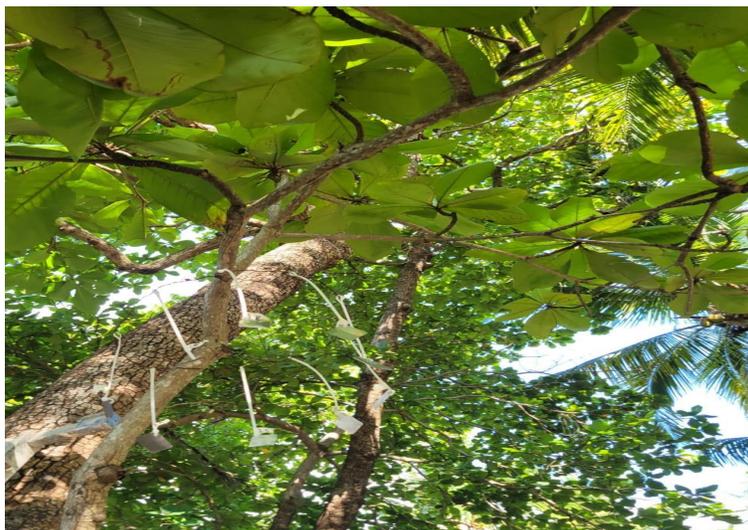


Figura 2. 22 Estación de monitoreo n°2

Estación 3: en esta fueron colocadas 9 placas distribuidas al igual que en las estaciones anteriores (véase la Figura 2.23) y retiradas con los mismos tiempos de observación.



— -- **Figura 2. 23 Estación de monitoreo n°3**

Estación 4: fueron colocadas 9 placas como se muestra en la Figura 2.24, al igual que en todas las estaciones anteriores y retiradas con los mismos tiempos de observación.



— -- **Figura 2. 24 Estación de monitoreo n°4**

Estación 5: en esta estación fueron colocadas 6 placas (ya que las otras 3 fueron testigos para comparación los cuales no fueron expuestos al ambiente corrosivo), 2 de cada material, es decir, 2 de hierro A36, 2 de acero inoxidable y 2 de aluminio, tal como se muestra en la Figura 2.25. En esta estación se decidió colocar 6 placas al ser la más lejana a la playa y fueron retiradas las

primeras placas de cada material luego de 720 horas de observación y las restantes 3 al finalizar el tiempo de estudio (1,000 horas).



Figura 2. 25 Estación de monitoreo n°5

1.1. Ubicación geográfica de las estaciones en el mapa

Los puntos seleccionados para la colocación de las estaciones de monitoreo quedaron a criterio únicamente de los investigadores, ya que al no ser la distancia mayor a un 1 km desde la costa hasta la última estación de monitoreo (estación 5), se considera que todo el ambiente en estudio está afectado por el ambiente marino en la misma medida (según normativas y estudios relacionados con la influencia de la zona costera), por lo cual el efecto de la distancia de la costa sobre las velocidades de corrosión es poco o nada apreciable comparado a que si las estaciones se encontrarán a distancias más lejanas de la costa. Sin embargo, a pesar de ello las estaciones fueron colocadas de manera de variar la distancia de proximidad a la costa, siendo la estación 1 la más cercana a ésta y la estación 5 la más lejana, habiendo una distancia promedio entre cada estación de 200 m. La distribución de las estaciones en el área de estudio se muestra en la Figura 2.26.

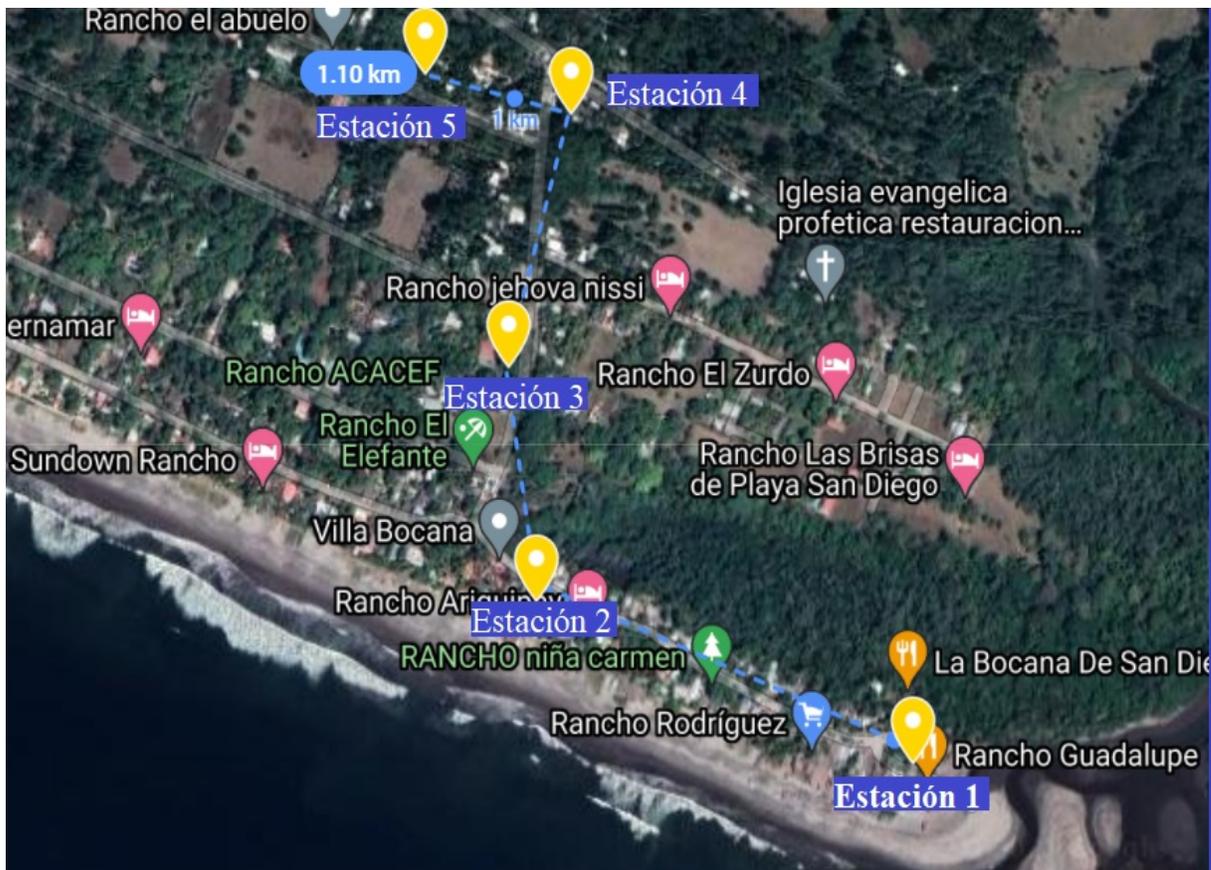


Figura 2. 26 Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo, distancia máxima a la costa no mayor a 1 Km. Lotificación Nuevos Horizontes 2, Cantón San Diego, La Libertad. (Google earths, 2021)

2.7. Proceso de obtención de datos

Para la obtención de datos, cada 15 días (360 horas) fue retirado un testigo de cada aleación en cada estación de monitoreo hasta alcanzar las 1,000 horas. Luego dichos testigos extraídos fueron llevados a la Planta Piloto de la Universidad de El Salvador, en donde se les dio el tratamiento de limpieza química mencionado anteriormente, según correspondía y finalmente fueron pesados, obteniendo así un nuevo valor de peso a utilizar para poder encontrar las razones de corrosión.

Retirando así 12 testigos durante las primeras 360 horas, es decir un testigo de cada aleación en las estaciones de la 1 a la 5. A continuación, desde la Figura 2.27 a la Figura 2.29 se muestra el estado de los testigos luego del tiempo anteriormente mencionado.

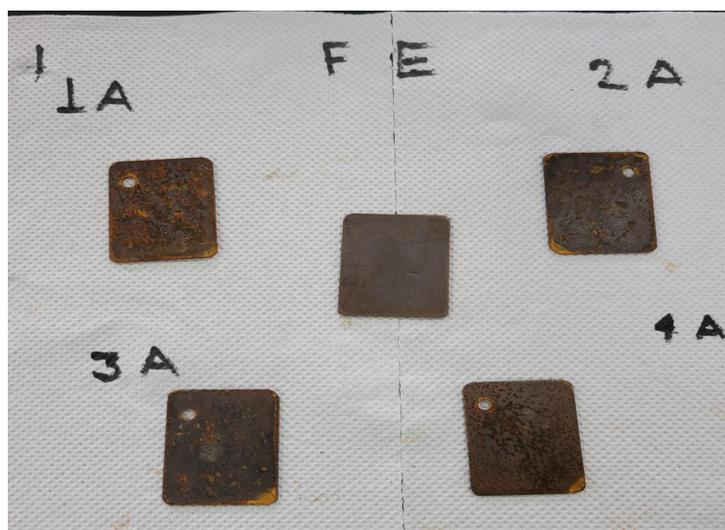


Figura 2. 27 Testigos de hierro luego de 360 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto

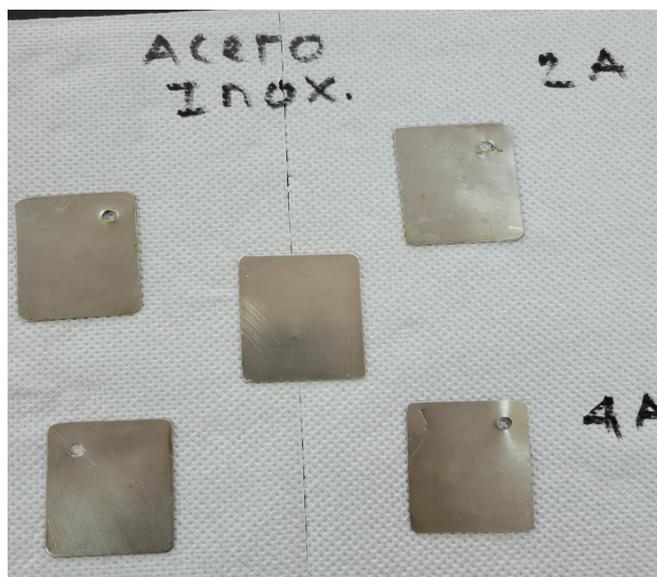


Figura 2. 28 Testigos de acero inoxidable luego de 360 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto

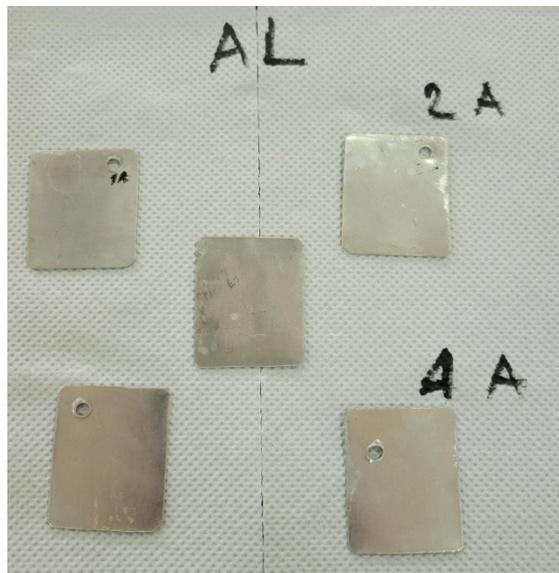


Figura 2. 29 Testigos de aluminio luego de 360 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto

Luego la segunda observación fue a las 720 horas, retirando así 15 testigos (véase desde la Figura 2.30 a la Figura 2.32).



Figura 2. 30 Testigos de hierro luego de 720 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto



Figura 2. 31 Testigos de acero inoxidable luego de 720 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto



Figura 2. 32 Testigos de aluminio luego de 720 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto

Finalmente, al completar las 100 horas fueron retirados los últimos 15 testigos remanentes, tal como se muestra desde la Figura 2.33 a la Figura 2.35.



Figura 2. 33 Testigos de hierro luego de 1,000 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto



Figura 2. 34 Testigos de acero inoxidable luego de 1,000 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto



Figura 2. 35 Testigos de aluminio luego de 1,000 horas de exposición al ambiente corrosivo marino frente al testigo no expuesto.

CAPITULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizó el ensayo durante el periodo de 1000 horas con observaciones y mediciones de las masas de las probetas de hierro para los tiempos: 360 h, 720 h y 1,000 h. Dicho ensayo está basado en la norma ISO 9226 para obtener la razón de corrosión y luego determinar el ambiente corrosivo en base a la Norma ISO 9223.

La representación de las letras A, B y C en las tablas posteriores corresponden a los tiempos de 360, 720 y 1,000 horas respectivamente.

Las probetas de todos los metales ensayados fueron expuestas a más de 1.5 m sobre el nivel del suelo. Ubicadas estratégicamente para evitar el contacto con los contaminantes del entorno y poder evidenciar únicamente los efectos del aerosol marino, dicha colocación y ubicación de las muestras están evidenciadas en el apéndice A.

El valor correspondiente a la estación 5 para cada uno de los metales está fuera de la estimación debido a la ausencia de la probeta.

Para los valores de velocidad de corrosión obtenidos se hizo el ajuste para que el tiempo de exposición fuera el equivalente a un año por medio de conversiones de 360, 720 y 1,000 horas, debido a que la norma habla de valores monitoreados para un periodo de tiempo de un año; sin embargo, ésta no exenta los valores equivalentes a monitoreos de menor duración de tiempo, ya que la corrosión tal como se ha consultado en varias fuentes tiende a tener valores constantes independientemente del tiempo de observación establecido. (ASM International, 2006)

3.1. Ensayo en probetas de Hierro

El hierro es recomendado por la norma ISO 9223 debido a los valores de velocidad de corrosión que presenta, lo cual será de ayuda para la determinación del ambiente corrosivo. Las dimensiones de las probetas son 40x50x1/16 mm.

3.1.1. Procedimiento experimental en probetas de Hierro

Las probetas fueron hechas de acero al carbono estructural que corresponde a ASTM A36, cuya caracterización química se menciona en el apéndice B de este documento.

Los valores de la composición química corresponden a valores comerciales para efecto informativo.

La codificación de las probetas está basada en los tiempos de recolección de las muestras, éstos obedecen a 360, 720 y 1,000 horas representados por las letras A, B y C respectivamente, para efectos de recolectar la información de corrosividad significativa.

Las probetas antes de su medición de masa se limpiaron tal como se definió anteriormente. Éstas fueron pesadas con una incertidumbre de ± 0.0001 g debido a la balanza analítica utilizada. Los pesos se presentan en la Tabla 3.1.

Una vez pesada la masa final de cada una de las probetas de hierro se procedió al cálculo de la velocidad de corrosión con la ecuación proporcionada por la norma ISO 9226 cuyos parámetros y aplicación están definidos en el apéndice C.

A continuación, en la Tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos del ensayo sobre las probetas de Hierro.

Tabla 3. 1

Mediciones de masas iniciales y finales junto a la estimación de velocidad de corrosión sobre probeta de hierro

Hierro					
Estación	Pieza	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Masa Pérdida (g)	Velocidad (g/m ² .a)
1	A	18.6233	18.5640	0.0593	721.4112
	B	22.1575	21.9196	0.2379	1,447.0803
	C	22.2788	21.8954	0.3834	1,679.3693
2	A	18.8248	18.7605	0.0643	782.2384
	B	22.3213	22.0950	0.2263	1,376.5207
	C	22.0424	21.6956	0.3468	1,519.0539
3	A	18.4502	18.4079	0.0423	514.5985
	B	18.5788	18.4286	0.1502	913.6253
	C	22.3942	22.1807	0.2135	935.1730
4	A	21.8442	21.8028	0.0414	503.6496
	B	22.1321	21.9952	0.1369	832.7251
	C	18.4172	18.1977	0.2195	961.4542
5	A	-	-	-	-
	B	22.1841	22.0457	0.1384	841.8491
	C	22.4634	22.2362	0.2272	995.1818

El comportamiento de la pérdida de masa con respecto al tiempo de exposición al ambiente se resume enseguida desde la Figura 3.1 a la Figura 3.5.

La Figura 3.1 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 1.

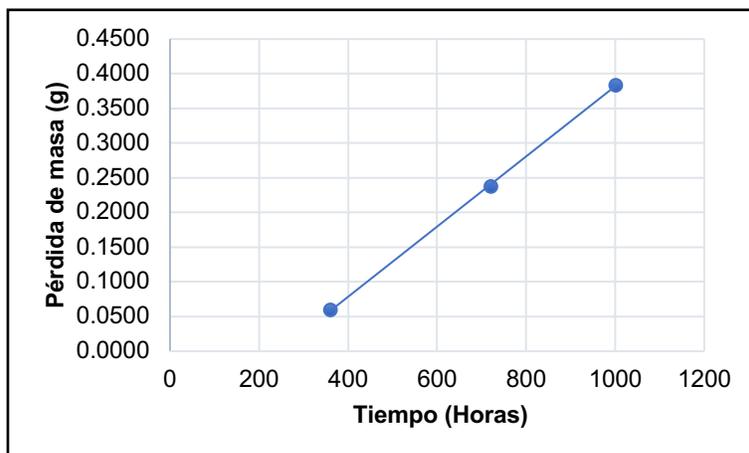


Figura 3. 1 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 1

La Figura 3.2 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 2.

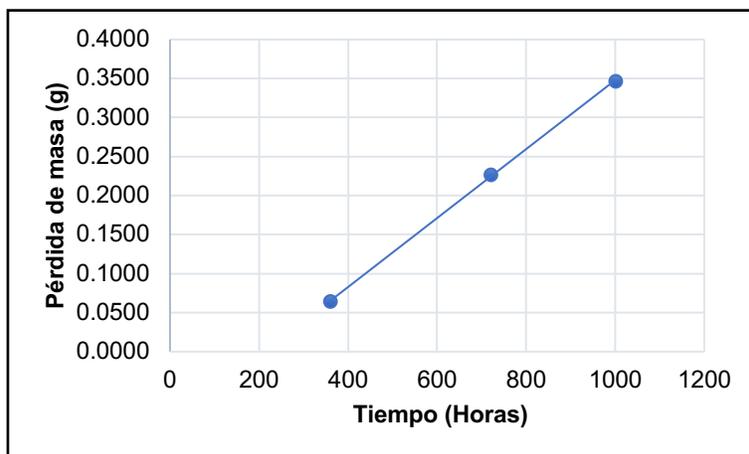


Figura 3. 2 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 2

La Figura 3.3 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 3.

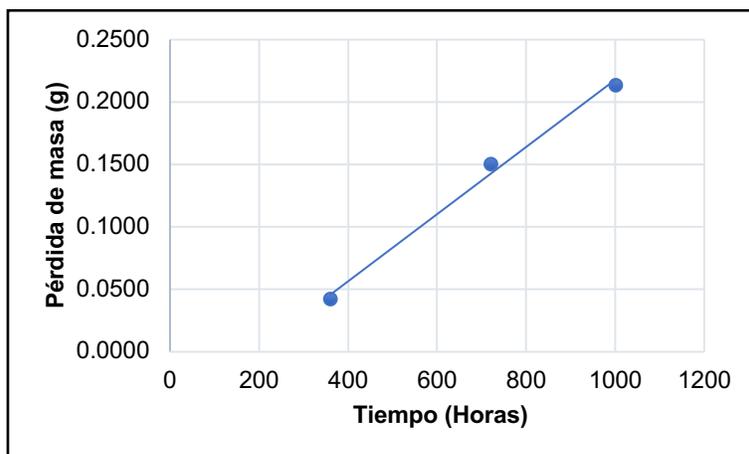


Figura 3. 3 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 3

La Figura 3.4 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 4.

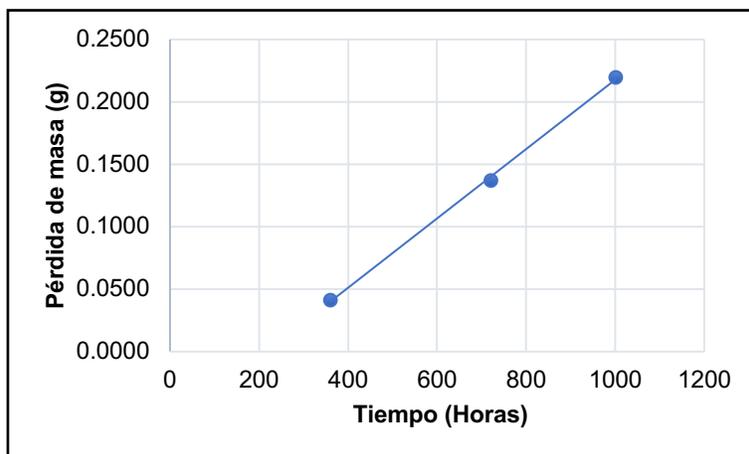


Figura 3. 4 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 4

La Figura 3.5 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 5.

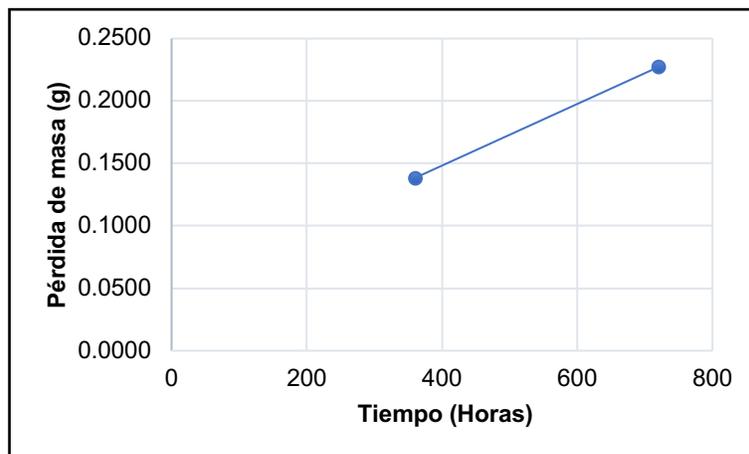


Figura 3. 5 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Hierro con respecto al tiempo de exposición, Estación 5

A continuación, en la Figura 3.6 se presenta una distribución general de la pérdida de masa en todas las estaciones.

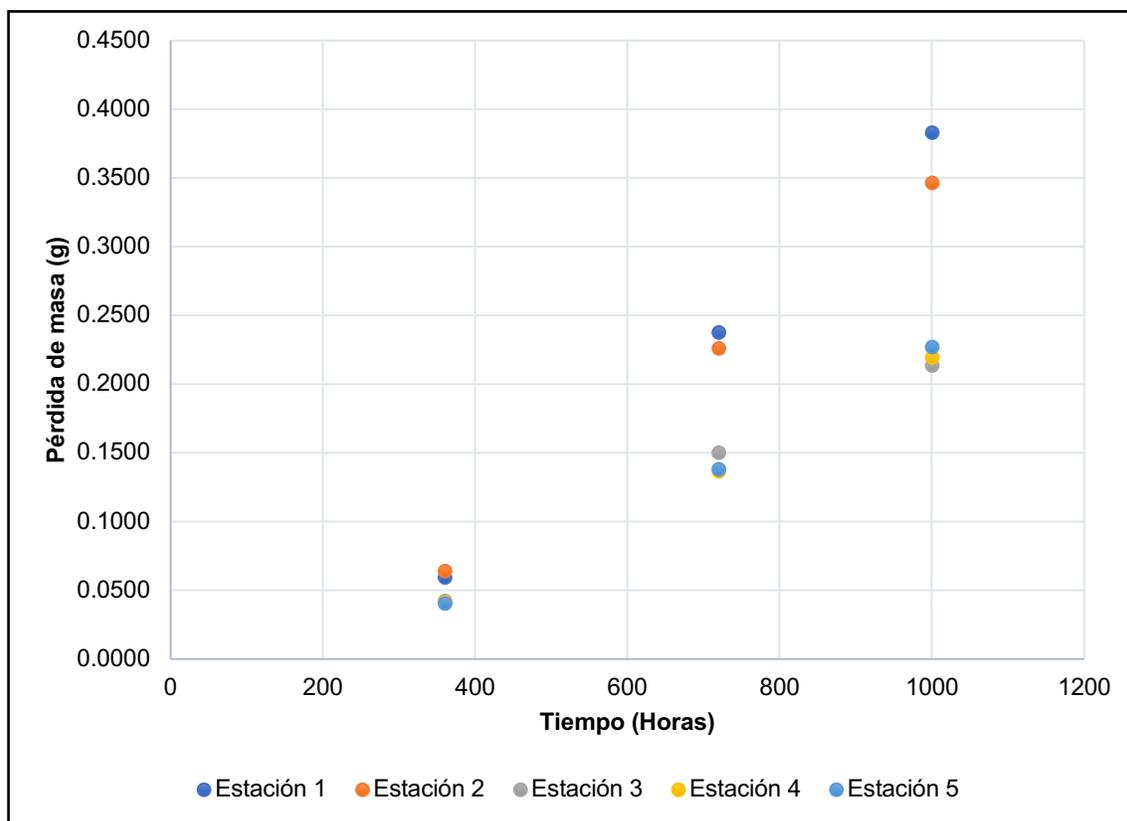


Figura 3. 6 Comportamiento de la corrosión en todas las estaciones de monitoreo de Hierro

3.1.2. Análisis de resultados en ensayo de probetas de Hierro

Para el caso del hierro expuesto al ambiente se observa una tendencia generalizada a la pérdida de masa con respecto al tiempo, en todas las estaciones la tendencia es al alza tal como se muestra en la figura 3.6.

Esta tendencia al alza en la pérdida de masa del hierro podría deberse por ser un metal muy poco resistente a la corrosión, y la pérdida de masa creciente pueda tomarse como general, pero aún no se observan valores drásticos con respecto al tiempo de exposición del metal.

La inclusión de los vientos que arrastra el material salino del mar y las precipitaciones características de los meses de octubre y noviembre tal como detalla el Ministerio de Recursos Naturales de El Salvador podría ser otros de los factores por los cuales el hierro de entre los metales ensayados fue el que más perdió masa en un breve periodo de tiempo.

El hierro como material de construcción quedo evidenciado como ya se tenía la premisa de que por sí solo no es recomendable utilizarlo, ya que en base a los resultados obtenidos el hierro tiende a corroerse con mucha facilidad.

Las probetas de hierro en todas las recolecciones de muestras presentaron productos de corrosión rojizos sobre la superficie, dichas probetas al ser comparadas con el testigo de hierro que no fue expuesto al ambiente corrosivo, mostraban una diferencia notable en la apariencia física de ellas frente a éste.

Las piezas que se encontraban en la estación 1 y 2 por la cercanía que tenían a la costa presentaban un mayor daño por corrosión comparadas con aquellas que se encontraban un poco más alejadas, tal como se evidencia en las imágenes del capítulo anterior (véase la Figura 2.27, 2.30, 2.33) y los valores presentados en la Tabla 3.1.

La norma ISO 9223:2012 clasifica a las atmósferas en nivel de corrosión desde muy bajo C1 hasta muy alto C5, tal como se muestra en la Tabla 3.2

Tabla 3. 2

Clasificación de la atmósfera corrosiva del Hierro en base a la velocidad de la corrosión

Categoría	Velocidad de corrosión (g/m ² año)
C1- Muy bajo	<10
C2- Bajo	>10 a 200
C3- Medio	>200 a 400
C4- Alto	>400 a 650
C5- Muy Alto	>650 a 1,500

El valor de velocidad de corrosión promedio es de 1,001.7093 g/m²año, lo cual comparado con los valores de la norma ISO 9223:2012 (la cual determina el nivel de la atmósfera corrosiva), clasifica al ambiente como categoría C5, ya que se encuentra en el rango de 650 a 1,500 g/m²año, siendo así el ambiente altamente corrosivo, de acorde a la presencia de la salinidad procedente de la costa marina que para efectos de estudio no fue evaluada.

De los valores obtenidos de velocidad de corrosión cabe destacar que 12 de 14 valores están dentro de un ambiente muy corrosivo C5, por lo cual se da por entendido que el ambiente es ser el que se describe en la norma ISO 9223:2012.

Los otros 2 valores que no cumplieron no están muy fuera de los límites de la norma, están ligeramente por arriba de 1500 g/m²año, lo cual se podría considerar desviaciones por error de manejo humano o un error instrumental a la hora de realizar la medición de la masa final, tal como se observa en la Tabla 3.2.

La velocidad de corrosión se ve afectada por la temperatura, humedad ambiental, tiempo de humidificación, precipitación y formación de nieblas, que en el caso de atmósferas contaminadas generan lluvias o nieblas ácidas. Por otra parte, el viento cumple un rol importante en forma indirecta por aportes o desplazamientos de elementos gaseosos y sólidos, especialmente en

áreas cercanas al mar o en zonas industriales o urbanas que afecten la corrosividad. El volumen de precipitación y el número de días de ocurrencia del evento, puede influir por disolución de productos de corrosión solubles o por erosión del material.

3.2. Ensayo en probetas de Aluminio

El aluminio es recomendado por la norma ISO 9223 debido a los valores de velocidad de corrosión que presenta, lo cual será de ayuda para la determinación del ambiente corrosivo. Las dimensiones de las probetas son 40x50x1/16 mm.

3.2.1. Procedimiento experimental en probetas de Aluminio

Las probetas fueron hechas de aluminio, cuya caracterización química se menciona en el apéndice B de este documento.

Los valores de la composición química corresponden a valores comerciales para efecto informativo.

La codificación de las probetas está basada en los tiempos de recolección de las muestras, éstos obedecen a 360, 720 y 1,000 horas representados por las letras A, B y C respectivamente, para efectos de recolectar la información de corrosividad significativa.

Las probetas antes de su medición de masa se limpiaron tal como se definió anteriormente. Éstas fueron pesadas con una incertidumbre de ± 0.0001 g debido a la balanza analítica utilizada. Los pesos se presentan en la Tabla 3.3.

Una vez pesada la masa final de cada una de las probetas de aluminio se procedió al cálculo de la velocidad de corrosión con la ecuación proporcionada por la norma ISO 9226 cuyos parámetros y aplicación están definidos en el apéndice C

A continuación, en la Tabla 3.3 se presentan los resultados obtenidos del ensayo sobre las probetas de aluminio.

Tabla 3. 3

Mediciones de masas iniciales y finales junto a la estimación de velocidad de corrosión sobre probeta de aluminio

Aluminio					
Estación	Pieza	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Masa Pérdida (g)	Velocidad (g/m ² .a)
1	A	5.4923	5.4915	0.0008	9.7324
	B	5.6827	5.6812	0.0015	9.1241
	C	5.6584	5.6568	0.0016	7.0083
2	A	5.7129	5.7122	0.0007	8.5158
	B	5.7387	5.7372	0.0015	9.1241
	C	5.6035	5.6021	0.0014	6.1323
3	A	5.6006	5.6002	0.0004	4.8662
	B	5.6745	5.6731	0.0014	8.5158
	C	5.5971	5.5955	0.0016	7.0083
4	A	5.5790	5.5782	0.0008	9.7324
	B	5.4942	5.4930	0.0012	7.2993
	C	5.4556	5.4540	0.0016	7.0083
5	A	-	-	-	-
	B	5.5403	5.5387	0.0016	9.7324
	C	5.6978	5.6955	0.0023	10.0745

El comportamiento de la pérdida de masa con respecto al tiempo de exposición al ambiente se resume enseguida desde la Figura 3.7 a la Figura 3.11.

La Figura 3.7 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 1.

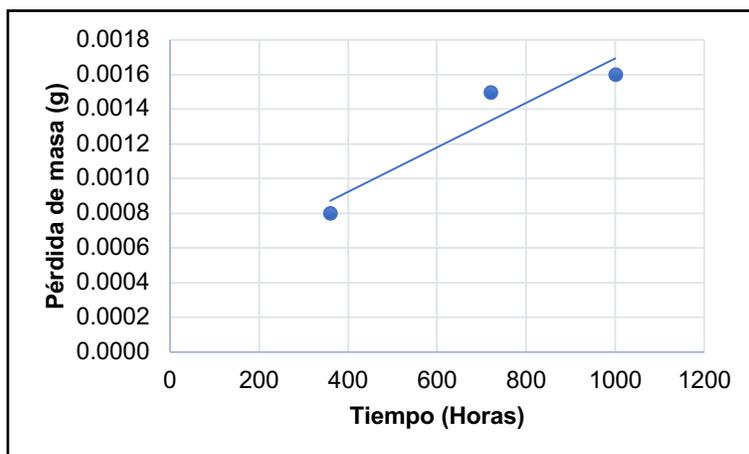


Figura 3. 7 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 1

La Figura 3.8 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 2.

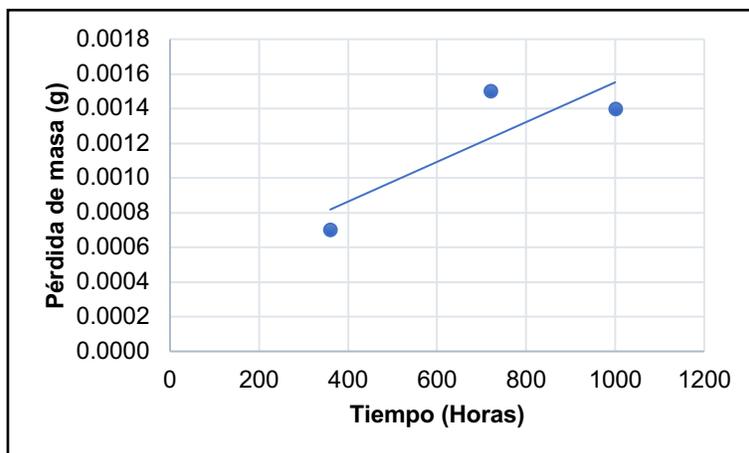


Figura 3. 8 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 2

La Figura 3.9 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 3.

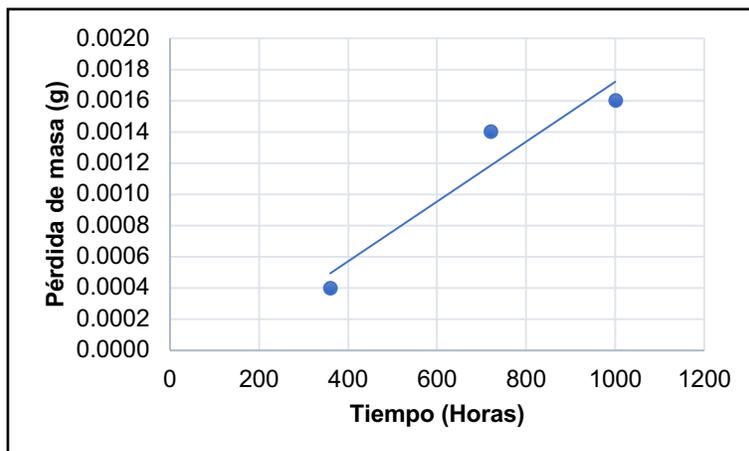


Figura 3. 9 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 3

La Figura 3.10 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 4.

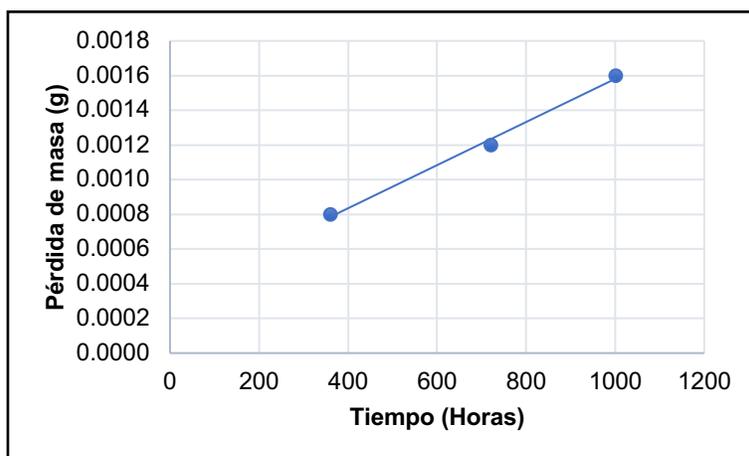


Figura 3. 10 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 4

La Figura 3.11 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 5.

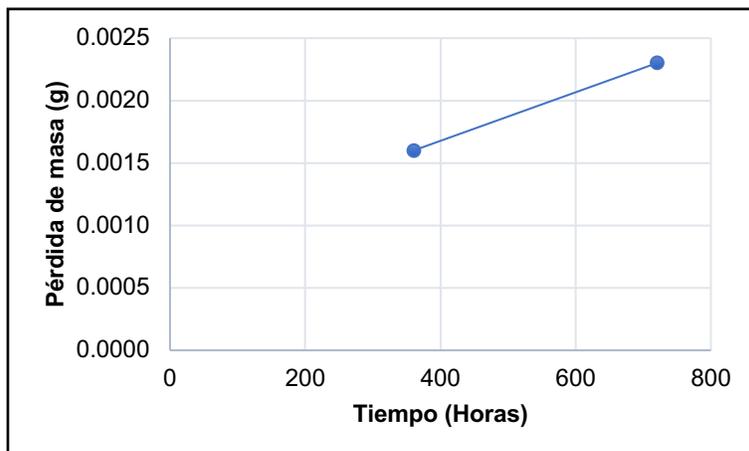


Figura 3. 11 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Aluminio con respecto al tiempo de exposición, Estación 5

A continuación, en la Figura 3.12 se presenta una distribución general de la pérdida de masa en todas las estaciones.

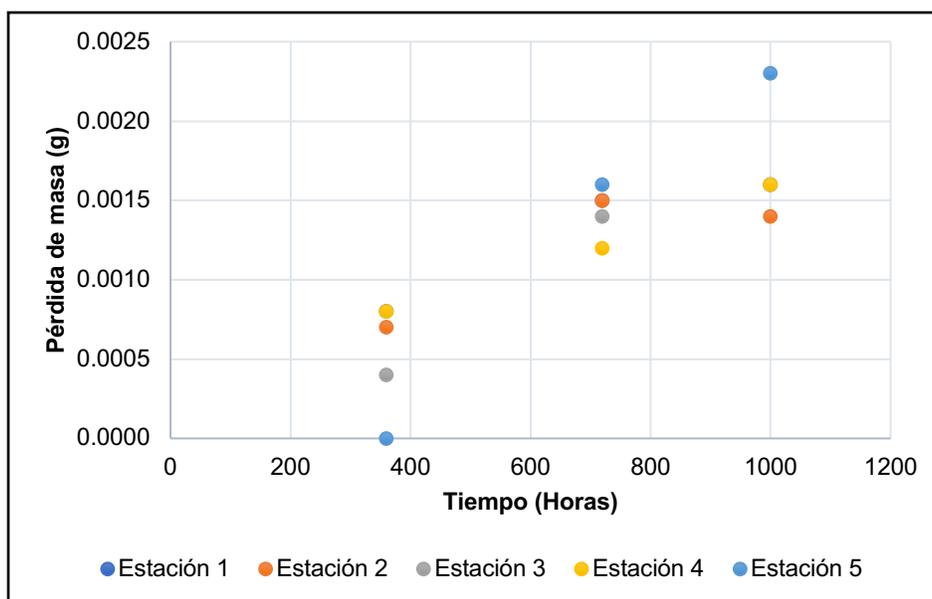


Figura 3. 12 Comportamiento de la corrosión en todas las estaciones de monitoreo de Aluminio

3.2.2. Análisis de resultados en ensayo de probetas de Aluminio

Para el caso del aluminio no se logra apreciar una tendencia en la pérdida de masa y esto podría obedecer a factores de exposición de la probeta y al lugar donde este se encontraba, el contraste general se evidencia en cada estación por individual, pero en la Figura 3.6. se puede apreciar que los valores no están muy alejados entre sí y que si bien es cierto no hay tendencia si pueden observarse valores cercanos en cada estación, en cuanto a cifras significativas en las pérdidas de las masas

El aluminio es uno de los metales que presenta mayor resistencia a la corrosión, pero esto no lo hace el material número uno por excelencia para la construcción debido a su resistencia, la cual es menor comparada con la del hierro.

Las probetas de aluminio no en todas las recolecciones de muestras presentaban productos de corrosión sobre la superficie, dichas probetas al ser comparadas con el testigo de aluminio que no fue expuesto al ambiente, mostraban poca o nula la diferencia en el aspecto físico frente a éste.

Las piezas que se encontraban en la estación 1 y 2 por la cercanía que tenían a la costa mostraron mayor daño por corrosión, pero no mayor comparado al que se presenciaba en el caso del hierro.

La norma ISO 9223:2012 también clasifica a las atmósferas en nivel de corrosión desde muy bajo C1 hasta muy alto C5, siendo el aluminio como probeta de ensayo, tal como se muestra en la Tabla 3.4

Tabla 3. 4

Clasificación de la atmósfera corrosiva del Aluminio en base a la velocidad de la corrosión

Categoría	Velocidad de corrosión (g/m ² año)
C1- Muy bajo	No observable
C2- Bajo	>0.6
C3- Medio	>0.6 a 2
C4- Alto	>2 a 5
C5- Muy Alto	>5 a 10

El valor de velocidad de corrosión promedio es de 8.4154 g/m²año, lo cual comparado con la norma ISO 9223:2012, la cual determina el nivel de la atmósfera corrosiva, cataloga al ambiente como C5, ya que el valor promedio de la velocidad de corrosión se encuentra en el rango de 5 a 10 g/m²año, siendo así una atmósfera altamente corrosiva, de acorde a la presencia de la salinidad procedente de la costa marina que para efectos de estudio no fue evaluada.

De los valores obtenidos de velocidad de corrosión cabe destacar que 11 de 14 valores están dentro de un ambiente corrosivo C5, por lo cual se da por entendido que el ambiente es ser el que se describe en la norma ISO 9223:2012.

Los otros 3 valores que no cumplieron no están muy fuera de los límites de la norma, sino que se encuentran ligeramente por arriba de 10 g/m²año y por debajo de 5 g/m²año, lo cual se podría considerar como desviaciones por error de manejo humano o un error instrumental a la hora de realizar la medición de la masa final, tal como se observa en la Tabla 3.3.

3.3. Ensayo en probetas de Acero Inoxidable

El acero inoxidable no se encuentra en la norma ISO 9223, por lo cual no están los valores de velocidad de corrosividad, pero esto no limita el estudio de dicho material en la zona ya que para este caso puede compararse con los valores del hierro para determinar si hay mejoras en su resistencia a la corrosión y con respecto a los valores de aluminio para saber si tiene el mismo comportamiento el cual es el ideal para la construcción en la zona. Las dimensiones de las probetas son 40x50x1/16 mm.

3.3.1. Procedimiento experimental en probetas de Acero Inoxidable

Las probetas fueron hechas de acero inoxidable, cuya caracterización química se menciona en el apéndice B de este documento.

Los valores de la composición química corresponden a valores comerciales para efecto informativo.

La codificación de las probetas está basada en los tiempos de recolección de las muestras, éstos obedecen a 360, 720 y 1000 horas representados por las letras A, B y C respectivamente, para efectos de recolectar información de corrosividad significativa.

Las probetas antes de su medición de masa se limpiaron tal como se definió anteriormente. Éstas fueron pesadas con una incertidumbre de ± 0.0001 g debido a la balanza analítica utilizada. Los pesos se presentan en la Tabla 3.5.

Una vez pesada la masa final de cada una de las probetas de acero inoxidable se procedió al cálculo de la velocidad de corrosión con la ecuación proporcionada por la norma ISO 9226 cuyos parámetros y aplicación están definidos en el apéndice C.

A continuación, en la Tabla 3.5 se presentan los resultados obtenidos del ensayo sobre las probetas de acero inoxidable.

Tabla 3. 5

Mediciones de masas iniciales y finales junto a la estimación de velocidad de corrosión sobre probeta de Acero Inoxidable

Acero Inoxidable					
Estación	Pieza	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Masa Pérdida (g)	Velocidad (g/m ² .a)
1	A	12.2643	12.2636	0.0007	8.5158
	B	12.4180	12.4168	0.0012	7.2993
	C	12.2613	12.2584	0.0029	12.7026
2	A	12.3080	12.3071	0.0009	10.9489
	B	12.2893	12.2879	0.0014	8.5158
	C	11.8504	11.8478	0.0026	11.3885
3	A	11.9222	11.9218	0.0004	4.8662
	B	11.7583	11.7573	0.0010	6.0827
	C	12.1718	12.1695	0.0023	10.0745
4	A	11.7924	11.7920	0.0004	4.8662
	B	12.3938	12.3929	0.0009	5.4745
	C	11.9120	11.9104	0.0016	7.0083
5	A	-	-	-	-
	B	12.4427	12.4420	0.0007	4.2579
	C	12.4387	12.4375	0.0012	5.2562

El comportamiento de la pérdida de masa con respecto al tiempo de exposición al ambiente se resume enseguida desde la Figura 3.13 a la Figura 3.17.

La Figura 3.13 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 1.

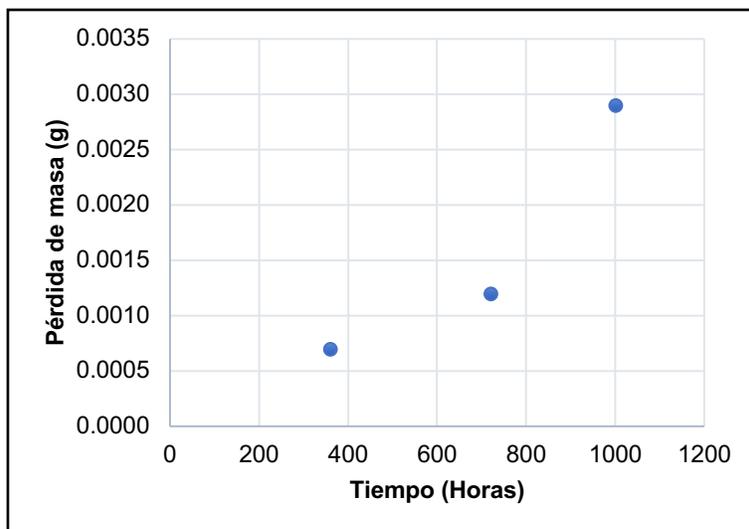


Figura 3. 13 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 1

La Figura 3.14 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 2.

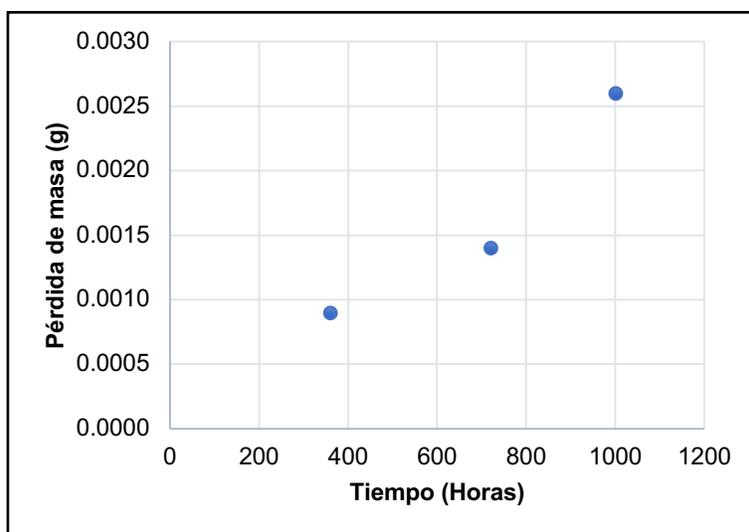


Figura 3. 14 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 2

La Figura 3.15 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 3.

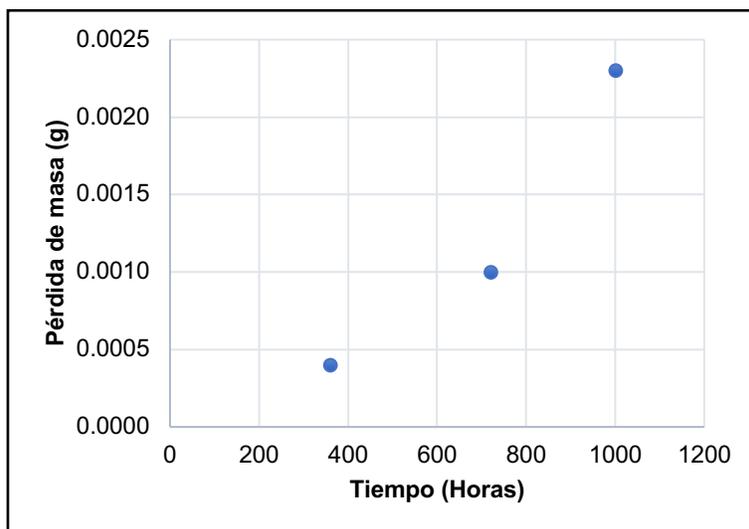


Figura 3. 15 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 3

La Figura 3.16 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en la estación número 4.

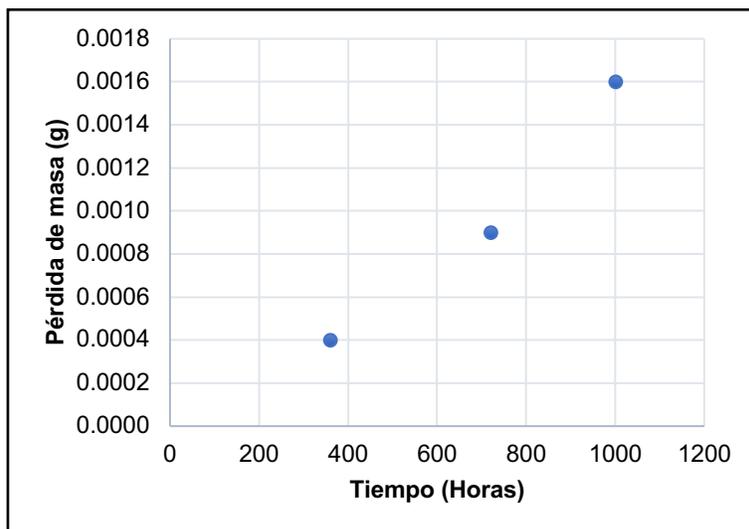


Figura 3. 16 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero Inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 4

La Figura 3.17 muestra los valores de pérdida de masa con respecto al tiempo expuesto al ambiente corrosivo marino en estación número 5.

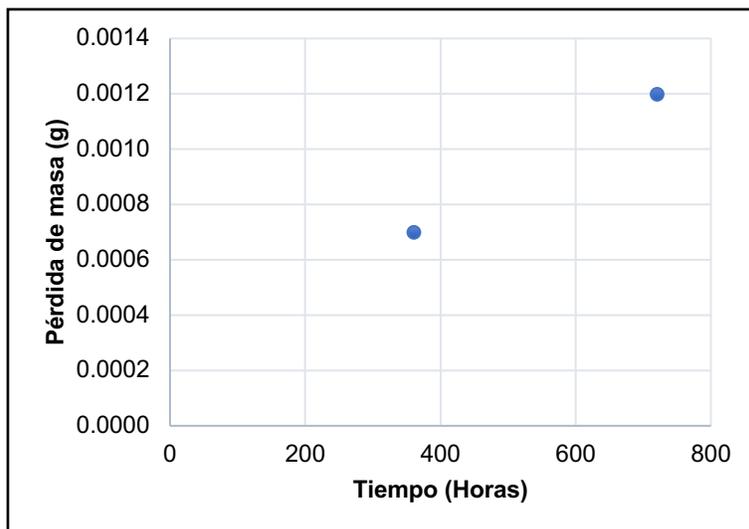


Figura 3. 17 Comportamiento de la pérdida de masa en la probeta de Acero inoxidable con respecto al tiempo de exposición, Estación 5

A continuación, en la Figura 3.18 se presenta una distribución general de la pérdida de masa en todas las estaciones.

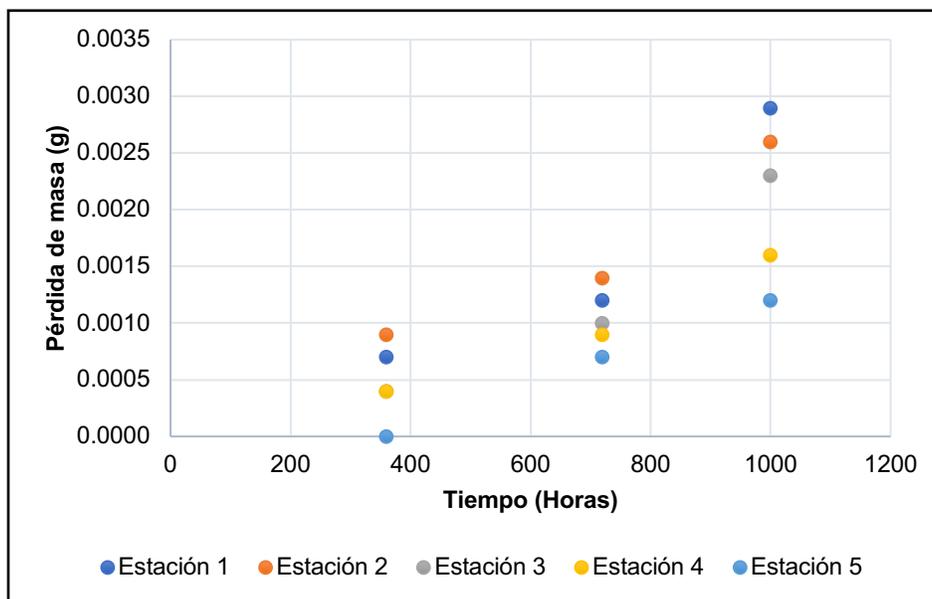


Figura 3. 18 Comportamiento de la corrosión en todas las estaciones de monitoreo de Acero Inoxidable

3.3.2. Análisis de resultados en ensayo de probetas de Acero Inoxidable

El recubrimiento del hierro con otros metales formando una aleación es algo muy favorable para evitar la corrosión sobre el hierro y en este caso se pudo notar con mucha mejoría ese efecto tal como se muestra en la tabla 3.5.

La norma ISO 9223: 2012 no tiene valores asignados para una caracterización de la atmósfera si el metal ensayo fuese el acero inoxidable, pero con base en que los resultados muestran con 2 metales diferentes que se está ante un ambiente corrosivo C5, el estudio sobre el acero inoxidable se reduce a la disminución del efecto de corrosión sobre la protección de éste en aleación con otro metal.

La velocidad de corrosión promedio para las probetas de acero inoxidable fue de 7.66 g/m²año, teniendo un comportamiento análogo al aluminio, pero manteniendo las propiedades similares del hierro.

Conclusiones

1. De las razones de corrosión obtenidas para los especímenes metálicos de hierro el valor promedio fue de 1,001.7093 g/m²año y para el aluminio el valor promedio fue de 8.4154 g/m²año, estos caben dentro del rango de 650 a 1,500 g/m²año para el hierro y de 5 a 10 g/m²año para el caso del aluminio, valores que corresponden a un ambiente clasificado como C5 según la norma ISO 9223: 2012, con lo cual se comprueba que el ambiente corrosivo en la playa San Diego es marino únicamente, ya que no hay presencia de otros contaminantes a excepción de la salinidad presente en el ambiente.
2. Las mejores aleaciones a emplear en el área costera son aquellas que poseen metales que brindan un refuerzo ante la corrosión, como por ejemplo las que forman capas pasivantes que detienen el proceso corrosivo como es el caso del acero inoxidable, ya que éste ofrece una mayor protección anticorrosiva. También el aluminio resulta ser un material idóneo a emplear en este tipo de ambientes, sobre todo en materiales de construcción o en herramientas de uso cotidiano, ya que presenta razones de corrosión bajas comparadas frente a otros metales en las mismas condiciones. Mientras que metales como el hierro, sin ninguna clase de combinación con otros metales, resultan ser fuertemente afectados por la corrosión, siendo poco resistentes a los ambientes marinos y deteriorándose rápidamente comparado a otras aleaciones como las mencionadas anteriormente.
3. La clasificación de los ambientes corrosivos brinda información acerca de las razones de corrosión según el tipo de ambiente que se tiene, por ello conocerlo es clave a la hora de tomar decisiones de sobre cómo proteger las estructuras, herramientas, entre otros objetos que emplean aleaciones, ya que ello permite adoptar las mejores prácticas para el control de la corrosión y ahí radica la importancia de clasificar las distintas atmósferas corrosivas presentes en determinado lugar geográfico. Por esta razón estudios de esta naturaleza motivan a futuros investigadores a seguir brindando conocimientos sobre este fenómeno, estudiando nuevos y mayores territorios a fin de generar un mayor conocimiento acerca de la clasificación de ambientes corrosivos en el país, especialmente porque estudios de este tema han sido poco abordados a nivel nacional, por ello se cuenta con escasa información actualizada del tema.

Recomendaciones

1. Al realizar estudios sobre las razones de corrosión en metales mediante la técnica de testigos gravimétricos, es importante asegurarse de la correcta identificación de cada testigo, para evitar confusiones a la hora de pesarlos y realizar el cálculo de la diferencia de pesos luego del tiempo de observación, ya que de lo contrario se reportará un valor de pérdida de peso incorrecto, al no ser el valor de masa inicial correspondiente con el testigo en estudio, lo cual conllevará a calcular valores incorrectos, que afectarán en la exactitud con que se reporten las razones de corrosión.
2. A la hora de preparar las soluciones químicas de limpieza, velar por la correcta preparación de éstas, siguiendo el procedimiento estandarizado de la norma correspondiente para evitar diferencias entre un mismo tipo de solución, garantizando así que cada solución preparada efectivamente será capaz de eliminar los productos de corrosión y demás contaminantes en cada probeta, pudiendo así al finalizar el tratamiento químico asegurar que el valor reportado de pérdida de masa sea lo más exacto y preciso posible, logrando de esa manera reducir el porcentaje de error asociado a errores sistemáticos.
3. Al seleccionar entre distintos tipos de aleaciones, se deben de considerar factores como el ambiente en el que serán empleadas, para así escoger aquellas que no resultarán afectadas en gran medida por el grado de corrosión que presenta el medio, por ello es necesario contar con la información técnica acerca de la composición de las aleaciones, así como también saber el tipo de atmósfera corrosiva del lugar donde será empleada para tener un estimado de la velocidad con la que se deteriorará determinado material.

Bibliografía

- Ashworth, V. (1984). Environmentally-induced cracking of magnesium. *Corrosion Science*. 24. 325-341.
- ASM International. (2006). *ASM Handbook: Volume 13C*. Obtenido de <https://rb.gy/qz0isd>
- Charnng, T., & Lansing, F. (1982). Review of Corrosion Causes and Corrosion control in a technical facility. *NASA Technical Reports*, 145-156. Obtenido de <https://rb.gy/8pdkep>
- Chico, B., Otero, E., Mariaca, L., & Morcillo, M. (1998). La corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa. *Revista de Metalurgia*, 34, 71-74. Obtenido de <https://rb.gy/bmr3dk>
- ECCA. (2011). *The Basics of Corrosion*. Obtenido de <https://rb.gy/ni2hdy>
- Evans, U. R. (2018). *An introuction to Metallic Corrosion* (Tercera ed.). EDITORIAL Reverte.
- Fernández Domene, R. M., Sánchez Tovar, R., Lucas Granados, B., & García Antón, J. (2018). *Corrosión*. (D. d. Ingeniería, Ed.) Valencia, España: Universitat Politecnica De Valencia.
- Garita, L., Rodríguez Yáñez, J., & Robles, J. (2014). Modelado de la velocidad de corrosion de Acero de baja aleaccion en Costa Rica. *Revista Ingenieria*, 24 (2), 79-90.
- Genescá Llongueras, J. (1994). *Más allá de la herrumbre*. FC3- Fondo de Cultura Económica. Obtenido de <https://rb.gy/cneoe0>
- Koch, G. V. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study (IMPACT)*. Houston: NACE international.
- Lai, G. Y. (2007). *High- Temperature Corrosion and Materials Applications*.
- Mariaca, L., Genesca, J., Uruchurtu, J., & Salvador, L. (1999). *Corrosividad Atmosférica (MICAT-México)*. Plaza y Valdez.
- Menjivar Benítez, C. (2019). *Corrosión del acero al carbono y del aluminio en diferentes tipos de atmósferas de El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamerica "José Simeón Cañas". Obtenido de <https://rb.gy/jw7ak0>
- NACE. (1984). METODOS DE PRUEBA Y EVALUACION DE CORROSION.
- Ramirez Reyes, J., García Navarro, N., Galicia Aguilar, G., Lugo , G., Gallardo, E., Tenorio, J., . . . Uruchurtu Chavarín, J. (2015). 1 Índices de Corrosividad Atmosférica en Veracruz. Predicción de la Función Dosis/Respuesta. *Congreso Internacional de Ingeniería y Ciencias Químicas*, 1-10. Obtenido de <https://rb.gy/jeq2tm>
- Rivero, S., Chico, B., de la Fuente , D., & Morcillo, M. (2007). Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del regimen de vientos. *REVISTA DE METALURGIA*(43), 370-383.

Roberge, P. R. (2008). *CORROSION ENGINEERING Principles and Practice*. McGraw-Hill.

Robert H., P. (2003). *Manual del Ingeniero Químico* (Vol. 6). McGraw Hill education.

Rojas Canales, C. A., & Varas González, E. A. (2010). *Construcción de mapas de información de niveles de corrosión Georeferenciales*. Valparaíso, Chile: Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería. Obtenido de <https://rb.gy/0vgvd9>

Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *28*(3), 127-136. Obtenido de <https://rb.gy/z6lqtd>

Vázquez, M. (2015). *La corrosión: el peor de los villanos cuando dominan los metales*. Eudem. Obtenido de <https://rb.gy/vtygmu>

Vinueza Madrigal, P. A. (2008). *Determinación de la corrosividad atmosférica en la Ciudad de Esmeraldas Parte II*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <https://rb.gy/9fnmxt>

Anexos

Anexos A: Colocación de estaciones de monitoreo

A continuación, en las Figuras A.1, A.2 y A.3 se muestran las probetas de acero galvanizado, hierro y aluminio antes de ser colocados en cada una de las estaciones.



Figura A. 2 Probetas de Hierro



Figura A. 1 Probetas de Acero Inoxidable



Figura A. 3 Probetas de Aluminio

Para cada estación de monitoreo se utilizó coronas de acero al carbono, donde cada pieza quedó suspendida por una cinta de material plástico aislando así el sistema de cualquier tipo de celda galvánica u otro agente corrosivo, como se muestra en la Figura A.4.



Figura A. 4 Sistema de monitoreo de la corrosión

Las colocaciones de cada sistema de probetas de ensayo fueron colocadas en puntos donde se obtuviera la menor interferencia posible y la mayor exposición al aerosol marino o mejor conocido como salitre por los habitantes de la zona, tal como se muestra en la Figura A.5.



Figura A. 5 Ubicación y colocación estratégica de los sistemas de monitoreo en cada una de las estaciones

Anexo B: Propiedades químicas de Hierro y Acero Inoxidable

A continuación, en la Tabla B.1 se detallan las composiciones químicas de hierro y acero inoxidable utilizados en el ensayo de corrosión.

B.1. Composición química Hierro A36

Composición química en porcentajes para placas y barras de Hierro.

Tabla B. 1

Composición química del Hierro A36

	Composición química (% , ≤), para placas y barras de acero, ancho ≤ 380 mm (15 pulg.)						
Acero	C	Si	MN	P	S	Cu	Espesor (d), mm (pulg)
ASTM A36	0.26	0.40	Sin requisitos	0.04	0.05	0.20	d ≤ 20 (0.75)
	0.27	0.40	0.60-0.90	0.04	0.05	0.20	20 < d ≤ 40 (0.75 < d ≤ 1.5)
	0.28	0.40	0.60-0.91	0.04	0.05	0.20	40 < d ≤ 100 (1.5 < d ≤ 4)
	0.29	0.40	0.60-0.92	0.04	0.05	0.20	> 100 (4)

B.2. Composición química Acero Inoxidable AISI 304

La Tabla B.2. muestra la composición química en porcentajes peso/peso para placas y barras de acero inoxidable.

Tabla B. 2

Composición química del Acero Inoxidable AISI 304

Grado	304
Designación UNS	S30400
CARBONO (C) max.	0.08 % (\leq)
MANGANESO (Mn) max.	2.00 % (\leq)
FOSFORO (P) max.	0.04 % (\leq)
AZUFRE (S) max.	0.03 % (\leq)
SILICIO (Si) max.	0.75 % (\leq)
CROMO (Cr) max.	18.0 a 20.0 % (\leq)
NIQUEL (Ni)	8.0 a 11.0% (\leq)
MOLIBDENO (Mo)	-----
OTROS ELEMENTOS	-----

Anexo C: Cálculos de velocidad de corrosión según norma ISO 9226

La obtención de las razones de corrosión fue mediante la ecuación definida en la norma ISO 9226: 2012.

$$r_{Corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t}$$

Donde:

Δm : pérdida de masa, en gramos; masa inicial menos masa final.

A: área de la superficie, en metros cuadrados; largo por ancho de la placa.

t: tiempo de exposición, en años

C.1. Ejemplo para obtención de razones de corrosión para testigos de aluminio:

$m_{inicial} = 5.4923 \text{ g}$

$m_{final} = 5.4915 \text{ g}$ (masa luego de 360 h de exposición al ambiente marino)

t= 360 h (dividir entre 8760 para convertir a años)

A= 0.04 m*0.05 m

$$r_{Corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} = \frac{5.4923 \text{ g} - 5.4915 \text{ g}}{(0.04 \text{ m} * 0.05 \text{ m}) \left(\frac{360 \text{ h}}{8760}\right)} = 9.7333 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$$

C.2. Ejemplo obtención razones de corrosión para testigos de hierro:

$m_{inicial} = 18.6223 \text{ g}$

$m_{final} = 18.5640 \text{ g}$ (masa luego de 360 h de exposición al ambiente marino)

t= 360 h (dividir entre 8760 para convertir a años)

A= 0.04*0.05

$$r_{Corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} = \frac{18.6223 \text{ g} - 18.5640 \text{ g}}{(0.04 \text{ m} * 0.05 \text{ m}) \left(\frac{360 \text{ h}}{8760} \right)} = 721.4112 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$$

C.3. Ejemplo obtención razones de corrosión para testigos de acero inoxidable:

$$r_{Corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} = \frac{12.2643 \text{ g} - 12.2636 \text{ g}}{(0.04 \text{ m} * 0.05 \text{ m}) \left(\frac{360 \text{ h}}{8760} \right)} = 8.5158 \text{ g/m}^2 \cdot \text{año}$$

Anexo D: Práctica de laboratorio de Determinación de Razones de Corrosión: limpieza química de testigos gravimétricos.

La limpieza utilizada para cada una de las probetas de ensayo fue basada en la normativa ASTM G1-03, previamente a su posterior pesaje.

A continuación, se detalla la práctica de laboratorio utilizada para la limpieza de cada una de las piezas.

PRÁCTICA DE LABORATORIO DE DETERMINACIÓN DE RAZONES DE CORROSIÓN: LIMPIEZA QUÍMICA DE TESTIGOS GRAVIMÉTRICOS.

OBJETIVO: Aplicar la normativa ASTM G1-03 para dar una limpieza química apropiada a los especímenes metálicos conocidos como testigos gravimétricos con el fin de eliminar cualquier traza de óxidos que tengan presentes previos a su pesaje.

MATERIAL, APARATOS Y REACTIVOS:

MATERIAL Y APARATOS:	REACTIVOS:
<ul style="list-style-type: none"> • Balanza analítica • Desecador • 6 matraz Erlenmeyer 250 ml con tapa • Piseta • 3 vidrios de reloj • 5 cápsulas de porcelana • 1 espátula • 1 pinza metálica • 3 probetas 200 ml • 1 agitador 	<ul style="list-style-type: none"> • 5 ml ácido fosfórico (H_3PO_4) • 2 g trióxido de cromo (CrO_3) • 40 g hidróxido de sodio (NaOH) • 2 g zinc granulado • 5 g polvo de zinc • Agua destilada • 60 ml tolueno • 60 ml acetona • 30 g bicarbonato de sodio

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

-SI EL TESTIGO GRAVIMÉTRICO A TRATAR ES: **ALUMINIO**

Reactivos: ácido fosfórico, trióxido de cromo.

Procedimiento c.1.1 (Según norma ASTM G1-03):

1. Pesarse previo a cualquier tratamiento de limpieza el espécimen de aluminio, asimismo documentar su estado.
2. En un matraz Erlenmeyer preparar una solución ácida, para ello añadir 5 ml de ácido fosfórico y 2 g de trióxido de cromo y mezclar con el agitador.
3. Preparar una solución neutra de bicarbonato de sodio al 10%, para ello pesar 10 g de bicarbonato de sodio en un matraz y aforar con agua destilada a 100 ml.
4. Iniciar la limpieza química, para ello utilizar 5 cápsulas de porcelana y agregar en orden las siguientes soluciones: cápsula 1: 20 ml de tolueno.
5. Cápsula 2: solución ácida.
6. Cápsula 3: solución neutra.
7. Cápsula 4: 20 ml agua destilada.
8. Cápsula 5: 20 ml de acetona.
9. Con las pinzas sujetar el testigo metálico e introducirlo en cada una de las cápsulas en orden de la 1 a la 5. El tiempo de espera en cada solución es de 1 a 5 minutos dependiendo de la apariencia del testigo.
10. Envolver con papel al testigo e introducirlo en el desecador por 15 minutos.
11. Realizar el pesaje del espécimen y recolectar su peso luego de la limpieza química.

-SI EL TESTIGO GRAVIMÉTRICO A TRATAR ES: **HIERRO**

Reactivos: hidróxido de sodio, zinc granulado.

Procedimiento c.3.3 (Según norma ASTM G1-03):

1. Pesarse previo a cualquier tratamiento de limpieza el espécimen de hierro, asimismo documentar su estado.
2. En un matraz Erlenmeyer preparar una solución básica, para ello añadir 20 g de hidróxido de sodio y 2 g de zinc granulado, aforar hasta 100 ml con agua destilada y mezclar con el agitador.
3. Preparar una solución neutra de bicarbonato de sodio al 10%, para ello pesar 10 g de bicarbonato de sodio en un matraz y aforar con agua destilada a 100 ml.
4. Iniciar la limpieza química, para ello utilizar 5 cápsulas de porcelana y agregar en orden las siguientes soluciones: cápsula 1: 20 ml de tolueno.
5. Cápsula 2: solución básica.

6. Cápsula 3: solución neutra.
7. Cápsula 4: 20 ml agua destilada.
8. Cápsula 5: 20 ml de acetona.
9. Con las pinzas sujetar el testigo metálico e introducirlo en cada una de las cápsulas en orden de la 1 a la 5. El tiempo de espera en cada solución es de 1 a 5 minutos dependiendo de la apariencia del testigo.
10. Envolver con papel al testigo e introducirlo en el desecador por 15 minutos.
11. Realizar el pesaje del espécimen y recolectar su peso luego de la limpieza química.

-SI EL TESTIGO GRAVIMÉTRICO A TRATAR ES: **ACERO INOXIDABLE**

Reactivos: hidróxido de sodio, polvo de zinc.

Procedimiento c.7.6 (Según norma ASTM G1-03):

1. Pesar previo a cualquier tratamiento de limpieza el espécimen de acero inoxidable, asimismo documentar su estado.
2. En un matraz Erlenmeyer preparar una solución básica, para ello añadir 20 g de hidróxido de sodio y 5 g de zinc en polvo, aforar hasta 100 ml con agua destilada y mezclar con el agitador.
3. Preparar una solución neutra de bicarbonato de sodio al 10%, para ello pesar 10 g de bicarbonato de sodio en un matraz y aforar con agua destilada a 100 ml.
4. Iniciar la limpieza química, para ello utilizar 5 cápsulas de porcelana y agregar en orden las siguientes soluciones: cápsula 1: 20 ml de tolueno.
5. Cápsula 2: solución básica.
6. Cápsula 3: solución neutra.
7. Cápsula 4: 20 ml agua destilada.
8. Cápsula 5: 20 ml de acetona.
9. Con las pinzas sujetar el testigo metálico e introducirlo en cada una de las cápsulas en orden de la 1 a la 5. El tiempo de espera en cada solución es de 1 a 5 minutos dependiendo de la apariencia del testigo.
10. Envolver con papel al testigo e introducirlo en el desecador por 15 minutos.
11. Realizar el pesaje del espécimen y recolectar su peso luego de la limpieza química.