



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE TRES MÉTODOS DE
PROTECCIÓN ANTICORROSIVA Y ESTIMACIÓN DE LA
VELOCIDAD DE CORROSIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM G1-03
EN PLACAS DE ACERO ASTM A36.”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

JOE MIGUEL CAIZA VEGA

FAUSTO ANÍBAL GAMBOA RODRÍGUEZ

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE TRES MÉTODOS DE
PROTECCIÓN ANTICORROSIVA Y ESTIMACIÓN DE LA
VELOCIDAD DE CORROSIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM G1-03
EN PLACAS DE ACERO ASTM A36.”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES: JOE MIGUEL CAIZA VEGA

FAUSTO ANÍBAL GAMBOA RODRÍGUEZ

DIRECTOR: Ing. EDISSON FERNANDO CALDERÓN FREIRE MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Joe Miguel Caiza Vega y Fausto Aníbal Gamboa Rodríguez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Joe Miguel Caiza Vega y Fausto Aníbal Gamboa Rodríguez, declaramos que el presente trabajo de integración curricular es de nuestra autoría y los resultados son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 09 de junio del 2022



Joe Miguel Caiza Vega

CI: 2101037618

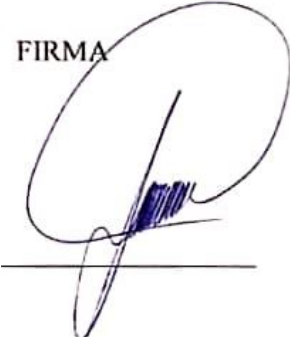




Fausto Aníbal Gamboa Rodríguez

CI:180485215-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA.
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto Técnico, **COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE TRES MÉTODOS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA Y ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM G1-03 EN PLACAS DE ACERO ASTM A36**, realizado por los señores: **JOE MIGUEL CAIZA VEGA Y FAUSTO ANÍBAL GAMBOA RODRÍGUEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Marco Antonio Ordóñez Viñán PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022/06/09
Ing. Edison Fernando Calderón Freire. DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022/06/09
Ing. Eduardo Segundo Hernández Dávila MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022/06/09

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones. A mi padre, a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí.

Joe Miguel Caiza Vega

Agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de formar parte de una familia maravillosa y a quienes dedico este trabajo con todo mi corazón y en especial a mi madre que, gracias a su esfuerzo y dedicación, pudo brindarme la oportunidad de poder crecer moral y profesionalmente, enseñándome cada día, y motivándome a no rendirme jamás, muchos de mis logros se lo debo a ella y siempre seguiré contando con el apoyo incondicional de tan ser especial.

Fausto Aníbal Gamboa Rodríguez

AGRADECIMIENTO

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial, mi madre y mi padre que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible, así mismo, agradezco infinitamente a mis hermanos que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que les puedo enseñar. De igual forma, agradezco a mi director de tesis, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo, a los profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento.

Joe Miguel Caiza Vega

Primeramente, agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este instante, a mis profesores que me forjaron a ser la persona que soy hoy en día, y en especial a mi querida ESPOCH que me abrió las puertas del conocimiento y me albergó todo este tiempo en sus aulas y lugares de recreación que fueron como mi segundo hogar. A mis colegas y amigos que fueron compañeros de muchas aventuras en este arduo camino y también agradezco a mis hermanos por esas palabras de aliento.

Fausto Aníbal Gamboa Rodríguez

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPITULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación y actualidad.....	3
1.3. Planteamiento del problema	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	5

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Fundamentos de la corrosión electroquímica.	7
2.1.1. <i>Corrosión atmosférica</i>	8
2.2. Factores que influyen en la corrosión de aceros ASTM A36.....	8
2.2.1. <i>Acidez de la solución</i>	8
2.2.2. <i>Sales disueltas</i>	9
2.2.3. <i>Capas protectoras</i>	9
2.2.4. <i>Concentración de oxígeno.</i>	9
2.2.5. <i>Temperatura</i>	9
2.2.6. <i>Diferencia de potencial.</i>	10
2.3. Formas de corrosión	10
2.4. Incidencia de la corrosión en la economía	11

2.5.	Los aceros al carbono	11
2.5.1.	Acero ASTM A36	12
2.6.	Tamaño de la muestra	13
2.6.1.	Estimación de la media muestral	13
2.7.	Polímeros	13
2.7.1.	Los polímeros y la resistencia a la corrosión	14
2.8.	Ensayos de corrosión por inmersión.	14
2.8.1.	ASTM G44-21. Práctica estándar para la exposición de metales y aleaciones por inmersión alternativa en una solución neutra de cloruro de sodio al 3,5%.	15
2.8.1.1.	La concentración de las soluciones.....	15
2.8.1.2.	Porcentaje masa-volumen.....	16
2.8.2.	Norma ASTM G31: 2021. Práctica estándar para pruebas de inmersión de metales en laboratorio.....	16
2.8.3.	Norma ASTM G1-03:2017. Práctica estándar para preparar, limpiar y evaluar muestras en pruebas de corrosión.....	16
2.8.3.1.	Limpieza de muestras después de la prueba. peso constante final.....	17
2.8.3.2.	Velocidad de corrosión.....	17
2.8.4.	Norma NACE/ SSPC- SP2. Limpieza con herramientas manuales.	18
2.8.5.	Norma NACE/SSPC-SP3. Limpieza con herramientas manuales mecánicas	19
2.8.6.	Norma SSPC-PA 1. Pintado de acero para taller, campo y mantenimiento.	19
2.9.	Control de la corrosión.....	19
2.10.	Protección con revestimiento	20
2.11.	Sistemas de tratamientos de pinturas según el tipo de exposición	20
2.11.1.	Tipo A: Depósitos y elementos en inmersión	20
2.11.2.	Tipo B: Depósitos y elementos en inmersión	20
2.11.3.	Tipo C: Inmersión en agua salina	21
2.11.3.1.	Sin abrasión y/o impacto:.....	21
2.11.3.2.	En condiciones de abrasión y/o impacto:.....	21
2.12.	Protección catódica mediante ánodos de sacrificio.....	21
2.12.1.	Densidad de corriente mínima para la protección catódica.	22
2.12.2.	Agua salada: ánodo de sacrificio de aluminio.	23
2.12.3.	Diseño de ánodos de sacrificio para aceros al carbono sumergidos.....	23
2.12.4.	Cálculo del número de ánodos y su duración.....	24
2.13.	Protección catódica con corriente impresa.....	25
2.13.1.	Generalidades de un regulador de voltaje	26
2.13.2.	Regulador de voltaje	26

2.13.2.1. Fuentes de energía solar	27
2.14. Medición del espesor por ultrasonido	27

CAPITULO III

3. ENSAYOS DE CORROSIÓN	29
3.1. Metodología	29
3.1.1. Descripción del método	29
3.2. Caracterización de los equipos	29
3.2.1. Adquisición del acero ASTM A36 y cálculo del tamaño de muestra de las placas testigos para realizar el ensayo de corrosión	31
3.3. Materiales	32
3.4. Procedimiento	32
3.4.1. Corte de las placas testigos de acero ASTM A36	32
3.4.2. Limpieza de las placas testigos.	32
3.4.3. Registro inicial de datos.	34
3.5. Placas de control	35
3.6. Aplicación de pintura anticorrosiva según la norma SSPC-PA 1:2016	35
3.6.1. Procedimiento para la aplicación de pintura la pintura epóxica según la norma SSPC-PA1	37
3.7. Ánodo de sacrificio	37
3.7.1. Cálculo de la masa del ánodo de sacrificio	37
3.7.2. Ubicación de las placas testigos en los soportes	38
3.7.2.1. Procedimiento de ubicación de placas testigos en los soportes según la norma ASTM G31-21	39
3.8. Preparación de la solución salina según la norma ASTM G44 para realizar el ensayo de corrosión.	39
3.8.1. Cantidad de soluto y solvente	40
3.8.2. Preparación de la solución	41
3.8.2.1. Medición del pH de la solución salina	41
3.9. Ánodo de sacrificio con corriente impresa	42
3.10. Preparación para la prueba de corrosión por inmersión según la norma ASTM G31-21 42	
3.10.1. Procedimiento para pruebas de corrosión por inmersión según la norma ASTMG31-21	43
3.11. Comparación de muestras respecto a la velocidad de corrosión	43

3.12.	Costos de protección anticorrosiva.	43
3.12.1.	<i>Costos de protección superficial con pintura epóxicas</i>	44
3.12.2.	<i>Costos de protección catódica por ánodo de sacrificio</i>	44
3.12.3.	<i>Costos de protección catódica por ánodo de sacrificio por corriente impresa</i>	44

CAPITULO IV

4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	45
4.1	Evaluación de la tasa de corrosión	45
4.1.1.	<i>Cálculos de la tasa de corrosión</i>	45
4.2.	Fichas de recolección y tabulación de datos	46
4.2.1.	<i>Estimación de la velocidad de corrosión basado en la norma ASTM G1-03</i>	46
4.2.2.	<i>Acero A-36 placas de control sin protección superficial</i>	46
4.2.3.	<i>Acero A-36 placas con protección superficial epóxico</i>	47
4.2.4.	<i>Acero A-36 placas con protección por ánodo de sacrificio.</i>	47
4.2.5.	<i>Acero A-36 placas con protección por corriente impresa</i>	48
4.3.	Comparación de las velocidades medias de corrosión	48
4.4.	Comparación de la pérdida de espesor	52
4.5.	Comparación de costos de aplicación	52
4.6.	Comparación del rendimiento vs costo	53

CONCLUSIONES	55
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	56
------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Potenciales estándar de oxidación y reducción a 25 °C.....	10
Tabla 2-2:	Formas y mecanismos de corrosión.....	11
Tabla 3-2:	Requerimientos mecánicos para el acero ASTM A36.....	12
Tabla 4-2:	Valores y unidades de la constante K.....	18
Tabla 5-2:	Categoría del material según la resistencia a la corrosión.....	18
Tabla 6-2:	Densidad de corriente para el acero en varios ambientes	23
Tabla 7-2:	Propiedades físicas y electroquímicas de: Mg, Zn y Al	23
Tabla 8-2:	Valores electroquímicos para el cálculo de la vida de los ánodos.....	24
Tabla 1-3:	Número de probetas a utilizar.....	32
Tabla 2-3:	Codificación de probetas	34
Tabla 3-3:	Condiciones ambientales para aplicar recubrimiento	37
Tabla 4-3:	Costos de aplicación de protección superficial.....	44
Tabla 5-3:	Costos de aplicación de protección catódica por ánodo de sacrificio.....	44
Tabla 6-3:	Costos de aplicación de protección catódica con corriente impresa.....	44
Tabla 1-4:	Designación de las probetas	45
Tabla 2-4:	Media de la velocidad de corrosión.....	51
Tabla 3-4:	Valores de comparación para la distribución normal	48
Tabla 4-4:	Comparación estadística de V_c vs V_e	49
Tabla 5-4:	Comparación estadística de V_c vs V_a	49
Tabla 6-4:	Comparación estadística de V_c vs V_i	50
Tabla 7-4:	Comparación estadística de V_e vs V_a	50
Tabla 8-4:	Comparación estadística de V_e vs V_i	50
Tabla 9-4:	Comparación estadística de V_a vs V_i	51
Tabla 10-4:	Costo de aplicación.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Corrosión electroquímica.....	7
Figura 2-2:	Celda de corrosión galvánica	22
Figura 3-2:	Circuito regulador de voltaje.....	26
Figura 4-2:	Regulador de voltaje	26
Figura 5-2:	Medidor de espesores por ultrasonido	28
Figura 1-3:	Placas de hacer ASTM A-36.....	31
Figura 2-3:	Dimensiones de las placas testigos	32
Figura 3-3:	SSPC-SP02	33
Figura 4-3:	SSPC-SP03	33
Figura 5-3:	Acabado tipo espejo.....	33
Figura 6-3:	Medición de espesor por ultrasonido a placas testigos	35
Figura 7-3:	Balanza de precisión digital	35
Figura 8-3:	Pintura Epoxi-poliamina	36
Figura 9-3:	Soporte de placas testigos	39
Figura 10-3:	Masa del soluto	40
Figura 11-3:	Elementos para preparar la solución	41
Figura 12-3:	Preparación de la solución	41
Figura 13-3:	Medición del pH	42
Figura 14-3:	Protección por corriente impresa	42
Figura 15-3:	Ajuste de la distribución normal	43

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4:	Comparación del rendimiento	51
Gráfico 2-4:	Comparación de la pérdida de espesor	52
Gráfico 3-4:	Comparación de los costos	53
Gráfico 4-4:	Comparación del rendimiento vs costos.....	54

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ASTM	Sociedad Americana para pruebas y materiales.
SSPC	Consejo de Pintura de Estructuras de Acero.
NACE	Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión.
Mpy	Mili pulgadas por año.
PP	Polipropileno.
NaCl	Cloruro de sodio
Ksi	1000 libras por pulgada cuadrada.
l	Litro
Vc	Velocidad de corrosión de probetas de control
Ve	Velocidad de corrosión de las probetas con recubrimiento epóxico.
Va	Velocidad de corrosión de las probetas con protección por ánodo de sacrificio.
Vi	Velocidad de corrosión de las probetas con protección por corriente impresa.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: RETIRO DE PLACAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODO DE SACRIFICIO

ANEXO B: RETIRO DE PLACAS DE CONTROL

ANEXO C: RETIRO DE PLACAS CON PINTURA EPÓXICA

ANEXO D: RETIRO DE PLACAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODO DE SACRIFICIO POR CORRIENTE IMPRESA

ANEXO E: PLACA CON PINTURA EPÓXICA AFECTADA DESPUÉS DE LA PRUEBA CORROSIVA

ANEXO F: FICHA TÉCNICA DE LA PINTURA EPOXI POLIAMIDA

ANEXO G: PERFORACIÓN PARA SUJECCIÓN DE PLACAS

ANEXO H: PREPARACIÓN PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODO DE SACRIFICIO

ANEXO I: MEDICIÓN DE ESPESOR POR ULTRASONIDO A PLACA TESTIGO

ANEXO J: GEL PARA ACOPLAMIENTO ULTRASÓNICO

ANEXO K: COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS MUESTRAS

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue comparar el rendimiento de tres métodos de protección anticorrosiva y estimar la velocidad de corrosión según la norma ASTM G1-03 en placas de acero ASTM A36. La metodología aplicada sigue el procedimiento establecido en las normas ASTM G31-21 y ASTM G1-03, mientras que para la corrosión se utilizó una solución química basada en las normas ASTM G44. La velocidad de corrosión se llevó a cabo mediante el cálculo del tamaño de muestra óptimo de número de placas testigos de acero A36 a sumergir en una solución de cloruro de sodio al 3.5%, colocado en 4 cubas de polipropileno, simulando el ambiente corrosivo en condiciones que contenían un pH entre 6-7 y una temperatura entre 25-30°C. Para el primer método se aplicó un recubrimiento polimérico según la norma SSPC-PA 1 mediante pinturas epóxicas de alto sólidos en volumen teniendo una velocidad de corrosión de 0.0502 mm/año, en el segundo método se aplicó protección catódica por ánodo de sacrificio en las placas testigos obteniendo una velocidad de 0,0275 mm/año y para el tercer método se empleó un ánodo de sacrificio por corriente impresa en el cual utilizaremos una fuente externa para hacer circular corriente entre el ánodo y cátodo, teniendo como resultado 0,0096 mm/año. Se concluye que el método óptimo para combatir la corrosión es la protección catódica por ánodo de sacrificio, a comparación de los demás métodos su rendimiento y costo de implementación es el más bajo, ya que su aplicación tiene un valor aproximado de 0,12 USD/cm² y su velocidad media de corrosión es de 0,0275 mm/año. Se recomienda que se use polímeros directamente sobre la superficie del metal a proteger, como una protección adicional, ya que ampliaría enormemente la eficiencia de cualquier método anticorrosivo, reduciendo el ataque electroquímico que genera la corrosión.

PALABRAS CLAVE: <CORROSIÓN>, <PROTECCIÓN SUPERFICIAL>, <VELOCIDAD DE CORROSIÓN>, < ACERO ASTM A36>, < ÁNODO DE SACRIFICIO>.

1508-DBRA-UTP-2022

SUMMARY

The objective of this study was to compare the performance of three anticorrosion protection methods and estimate the corrosion rate according to the ASTM G1-03 standard in ASTM A36 steel plates. The applied methodology follows the procedure established in the ASTM G31-21 and ASTM G1-03 standards. While a chemical solution based on the ASTM G44 standards was used for corrosion. The corrosion rate was carried out by calculating the optimal sample size of the number of steel witness plates A36 to be immersed in a 3.5% sodium chloride solution, placed in 4 polypropylene vats, simulating the corrosive environment under conditions containing a pH between 6-7 and a temperature between 25-30°C. For the first method, a polymeric coating was applied according to the SSPC-PA 1 standard using high volume solids epoxy paints with a corrosion rate of 0,0502 mm/year. In the second method, cathodic protection was applied by sacrificial anode on the witness plates obtaining a speed of 0,0275 mm/year. The third method used a sacrificial anode by impressed current in which an external source was used to circulate current between the anode and cathode, resulting in 0,0096 mm/ year. It is concluded that the optimal method to combat corrosion is cathodic protection by sacrificial anode. Compared to other methods, its performance and implementation cost, it is the lowest since its application has an approximate value of 0,12 USD/ cm² and its average corrosion rate is 0,0275 mm/year. It is recommended that polymers be used directly on the surface of the metal to be protected, as an additional protection, since it would greatly increase the efficiency of any anticorrosive method, reducing the electrochemical attack that generates corrosion

Keywords: <CORROSION>, <SURFACE PROTECTION>, <CORROSION RATE>, <ASTM A36 STEEL>, <SACRIFICIAL ANODE>.



Lic. Sandra Paulina Porras Pumalema Mgs.

C.I. 0603357062

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo del ensayo de corrosión de la comparación del rendimiento de tres métodos de protección anticorrosiva en placas de acero A36 es necesario como primer paso calcular el tamaño de muestra óptimo para obtener la cantidad de placas testigos de acero A36 que se va a exponer al ensayo por cada método y crear las condiciones del ambiente corrosivo, se deberá adquirir 4 cubas de polipropileno (recipientes que contendrán unas sustancias altamente corrosivas) elegido por su gran resistencia a agentes químicos para simular un ambiente corrosivo extremo mediante la alteración del grado de salinidad y el pH y acelerar el proceso.

Para el primer método de protección anticorrosiva se realiza la preparación de las placas de acero al carbono A36 según la norma SSPC-SP1 Y SSPC-SP2 y se aplicará un recubrimiento polimérico según la norma SSPC-PA 1 mediante pinturas epóxicas de alto sólidos en volumen, posteriormente se los introduce en el ambiente corrosivo.

Para el segundo método de protección anticorrosiva que se denomina ánodo de sacrificio, en función a la serie electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico con relación a otro, si se encuentra por encima de él en esta serie. Así, por ejemplo, el hierro será anódico respecto al cobre y catódico respecto al aluminio a favor del que actúa de cátodo, se construirá un circuito en el cual a las placas de acero A36 estarán unidas individualmente a una muestra de aluminio el cual mediante diferencial de potencial protegerá al material actuando como ánodo.

Para el tercer y último método anticorrosivo denominado ánodo de sacrificio por corriente impresa en el cual utilizaremos una fuente externa para hacer circular corriente entre el ánodo y cátodo, mediante esta manera reduciremos la corrosión en el cátodo a proteger, cabe recalcar que en este método se puede reducir el número de ánodos pero se debería aumentar la cantidad de corriente necesaria, esto se debe a que entre el metal a proteger y el metal a sacrificarse no se considera la diferencia de potencial de dichos elementos.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.

1.1. Antecedentes

El deterioro es la fuerza más destructiva que se encuentra sobre la tierra. Todo objeto después de ser fabricado inmediatamente empieza a deteriorarse dando la presencia de la corrosión que es una amenaza ya que aumenta el costo de los materiales, la infraestructura, el transporte, ya que conlleva costos de mantenimiento. En Estado Unidos, esto asciende a unos 550 mil millones de dólares al año. Solamente hablando del acero, de cada 10 toneladas fabricadas al año, se pierde 25% por corrosión. La reparación y reemplazo en el material más utilizado en la actualidad es el acero al carbono por varias propiedades que cumple dicho material. Para evaluar las consecuencias causadas por la corrosión se utilizan las normas estandarizadas que son: ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) y G1 (Práctica estándar para preparar, limpiar y evaluar muestras de prueba de corrosión (Celada , 2020 pág. 14).

El acero estructural constituye una proporción importante de los aceros producidos en las plantas siderúrgicas. Históricamente, un 90% de la producción mundial corresponde a aceros al carbono y el 10% restante a aceros aleados como aceros inoxidables y de herramientas. Los aceros reúnen características que hacen indispensables en la industria ya que contienen resistencia, plasticidad y versatilidad que está presente en todas partes como pueden ser las vías de ferrocarril, en las calles, en los automóviles, en las construcciones, en las cañerías de agua, en la maquinaria que genera y conduce la energía. En las herramientas de las fábricas, los aceros son los más afectados por el fenómeno de la corrosión ya que es un proceso natural en el cual el material tiende a regresar a su estado natural en forma de óxido (Linares, 2018 pág. 19).

En el Ecuador la corrosión es un enemigo silencioso que ocasiona costos anuales al realizar recubrimientos, que incluyen la preparación de la estructura para aplicar el recubrimiento, costos generados por la parada del equipo para realizar el mantenimiento, costos relacionados con la pérdida de eficiencia y productividad, y los problemas de seguridad y salud asociados a la corrosión con frecuencia, generalmente estos costos se ignoran.

En el Ecuador se han realizado diversas investigaciones enfocadas al estudio del impacto de la corrosión en estructuras de hormigón armado principalmente en la región costa en la cual se

detalla el uso de protección anticorrosiva y evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado por tal motivo se propone la necesidad de realizar un estudio práctico que compare tres métodos de protección anticorrosiva en acero al carbono ASTM A36 por ser uno de los metales más comunes en la construcción de estructuras al aire libre.

1.2. Justificación y actualidad

El efecto de la corrosión tiene graves consecuencias, entre las que destacan son: reducir la eficiencia de un proceso, costos por mantenimiento, costos por paro de producción, costos por reemplazo de equipos, poner en riesgo la salud del personal, aumentar la contaminación por los productos generados, entre muchas otras más. Este problema representa uno de los principales obstáculos en la industria ecuatoriana. En 2016 la Organización Nacional Asociación de Ingenieros de Corrosión (NACE) estimó que el costo global de la corrosión es de 2,5 billones de dólares estadounidenses al año (NACE, 2016).

Mediante el estudio presente se demostrará una comparación desde el punto de vista técnico y económico del rendimiento de diferentes métodos de protección superficial sometidos a ambientes de extrema corrosión en aceros estructurales y la estimación del tiempo de vida útil de los materiales afectados por la corrosión, de tal manera que se elegirá los componentes más fiables.

Las empresas en la actualidad no generan información nueva acerca de combatir la corrosión, de tal manera tampoco realizan un estudio profundo o análisis costo-beneficio que ocasiona el fenómeno de la corrosión, por tal motivo, esto produce un mayor costo elevado al momento de realizar el reemplazo total de dicho elemento afectado, produciendo que su costo sea más valioso que al momento de realizar la aplicación de un método anticorrosivo conservando aun la estructura en sí, aumentando su vida útil, y minimizando la compra de nuevos activos físicos (Fernández y Granados 2018).

Dentro de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, específicamente en la Carrera de Mantenimiento Industrial no hay investigaciones previas a este tema de estudio, de tal manera que esta indagación aportará considerablemente como guía para futuras generaciones y profesionales relacionados al campo ya que aporta a las líneas de investigación de la institución como es eficiencia energética y tecnología de materiales en busca de nuevos mecanismos y técnicas de control de la corrosión integrando nuevas investigaciones.

Todo esto también ha motivado la realización de este trabajo cuyo objetivo es evaluar, utilizando los distintos conceptos teóricos relacionados con la corrosión y la efectividad de tres métodos de protección anticorrosiva que son poco conocidos en la actualidad lo cual permite aportar con información del rendimiento, eficiencia y se plantea la experimentación práctica del uso de ultrasonido como método de diagnóstico de la pérdida de material.

La presencia de la corrosión en cualquier ambiente se presenta de forma natural y espontánea por tal motivo que dicho proceso corrosivo en relación a la contaminación ambiental es el menos tomado en cuenta y por ende obliga a desechar los materiales afectados sin darles la mínima consideración de volverlos a utilizar ante esta situación, se analizó que el proyecto será direccionado a ampliar la vida de los metales, siendo el medio ambiente el principal beneficiario de esta investigación, ya que, sí se aplican de forma correcta el mejor método anticorrosivo, se reducirá los desechos de metales afectados, de tal forma también se ahorrará la energía empleada para volver a crear y procesar dichos materiales y así generar menos contaminación industrial dándole un respiro al aire de nuestro planeta Tierra generando un futuro comprometedor a generaciones posteriores.

1.3. Planteamiento del problema

De los tres métodos de protección anticorrosiva, protección superficial, ánodo de sacrificio y protección catódica por corriente impresa, cuál será el método que posea más rendimiento y efectividad en un ambiente de extrema corrosión, este fenómeno en los metales es uno de los procesos naturales que conlleva al acero a regresar a su estado natural que más ha repercutido de forma negativa en la industria del último siglo. Se estima que el costo que genera el daño de materiales por corrosión asciende en los países desarrollados a aproximadamente el 3,5 % del PIB (Producto Interno Bruto). De esta cantidad, el 20% podría ser ahorrado de aprovechar al máximo las tecnologías y cuidados existentes para mitigar este proceso físico químico de corrosión. Del total de daños por desgaste en metales de la industria en general, aproximadamente un 18% se produce en la manufactura de la construcción (Paredes, y otros, 2017 pág. 1).

Las empresas hoy en día no toman en cuenta la magnitud de las consecuencias que genera la corrosión que tiene que ver directamente con los costos causados por el deterioro del acero que incluyen el costo de realizar el mantenimiento correctivo y preventivo, protección a corto plazo o el cambio completo de la estructura que se encuentra expuesta al ambiente corrosivo y además hay que tomar en cuenta los costos que genera las consecuencias de la corrosión entre las cuales tenemos (Jiménez y Cabrera 2014, p. 1):

- Paradas imprevistas para realizar el mantenimiento correctivo.
- Pérdidas de productos y contaminación.
- Pérdidas de eficiencia de fugas en intercambiadores de calor.
- Contaminación por derrames causados por fugas en cañerías.
- Sobredimensionamiento de la protección anticorrosiva.

El objetivo del proyecto es comparar el rendimiento de los tres métodos de protección anticorrosiva, estimar la velocidad de corrosión en función de cada método. El proyecto se justifica porque es necesario generar información que sea comprobada que evidencie el rendimiento de cada método de protección anticorrosiva, mediante un análisis técnico económico y en un futuro sea una fuente de consulta para aplicarlo en la industria.

En el Ecuador, principalmente en las regiones costa y amazonía son las más afectadas por este fenómeno principalmente en la costa por el tema de la atmósfera salina, la influencia directa que tienen los parámetros meteorológicos (particularmente el tiempo de humectación) como la concentración de la contaminación atmosférica (fundamentalmente de dióxido de azufre SO_2 en ambientes urbanos y de cloruros Cl en marinos) y en la región amazónica con la humedad. El tema de los métodos de protección contra la corrosión hoy en día no es muy conocido, más que el tradicional recubrimiento con pinturas epóxicas y no existe avances de investigaciones y de la adecuada utilización, de tal manera que las empresas de la industria ecuatoriana realizan métodos tradicionales y sin ningún procedimiento óptimo para evitar la corrosión, obteniendo malos resultados y pérdidas económicas para la empresa (Villota et al. 2014, p. 1).

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Comparar el rendimiento de tres métodos de protección anticorrosiva y estimar la velocidad de corrosión según la norma ASTM G1-03 en placas de acero ASTM A36.

1.4.2. *Objetivos específicos*

Calcular el tamaño de la muestra de las probetas de acero ASTM A36 y plantear las condiciones del ambiente corrosivo para someterlas al ensayo.

Medir la pérdida de masa en las placas de acero ASTM A36 para estimar la velocidad de corrosión basado en la norma ASTM G1-03 en función de cada método de protección anticorrosiva.

Calcular la pérdida de espesor del material en las placas de acero ASTM A36 concluido el ensayo mediante ultrasonido como método de diagnóstico basado en la norma ASTM E-797 en función de cada método de protección anticorrosiva

Evaluar el rendimiento técnico económico de los tres métodos de protección anticorrosivo para establecer el método más eficiente según las condiciones planteadas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos de la corrosión electroquímica.

La corrosión de los metales se debe a la ley de la entropía por la cual las cosas tienden a volver a un estado más caótico y desordenada, es decir, después de un tiempo adecuado vuelve a su estado natural, capaz de disolver cualquier metal, en la corrosión más común en ambientes costeros y húmedos, en ambientes húmedos, un fenómeno llamada corrosión húmeda ocurre cuando el metal entra en contacto con un electrolito (agua, soluciones salinas, ácidos, bases, etc.) (Quiroga et al. 2016, p. 38).

La naturaleza de la corrosión es electroquímica es decir es necesario que exista un flujo de electrones que circule entre dos zonas del metal, conocidas como ánodos y cátodos, ambas debidamente separadas a una cierta distancia y unidas por una sustancia llamado electrolito para comprender el diferencial de potencial eléctrico o serie galvánica, ya que ésta es responsable del flujo de corriente liberado en el ánodo que consume el cátodo, esta serie es de gran importancia ya que ayuda a definir las zonas o metales que actuarán como ánodos y cátodos.

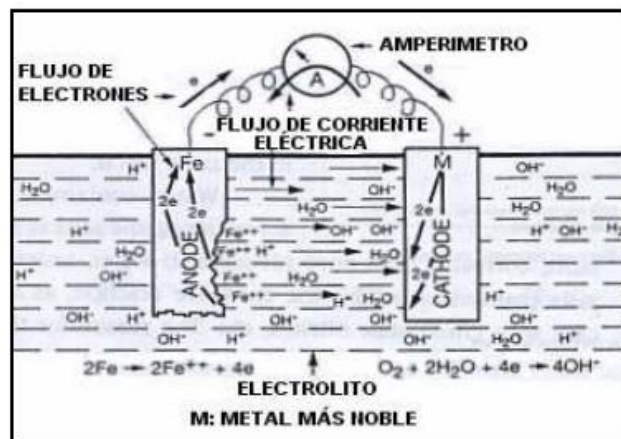


Figura 1-2: Corrosion electroquímica

Fuente: (Quiroga et al. 2016).

El circuito que produce la corrosión está constituido por los elementos fundamentales como:

- **Ánodo:** Cede electrones del circuito y se corroe sacrificándose.

- **Cátodo:** Recibe electrones del circuito a través de una reacción química.
- El ánodo y el cátodo deben de estar unidos eléctricamente, generalmente un contacto físico, que permita un flujo de electrones entre ánodo y cátodo.
- Un **electrolito** líquido debe de estar en contacto tanto el ánodo como el cátodo, es el conductor que cierra el circuito, de esta manera los iones metálicos salen de la superficie del ánodo y aseguran que los iones se muevan hacia el cátodo para aceptar los electrones (Fabricio y Vintimilla 2015, p. 5–7).

2.1.1. *Corrosión atmosférica*

La mayoría de los tipos de corrosión ocurren en la atmósfera. Este tipo de corrosión es peculiar puesto que, en la corrosión de los metales no existen grandes cantidades de electrolito como sucede en la corrosión electroquímica, así también no es posible determinar la diferencia de potencial ni la dirección de la polarización. Sin embargo, todos los factores electroquímicos (ánodo, cátodo, electrolito) importantes aparecen en la corrosión atmosférica.

Una variedad de factores afecta el comportamiento de la corrosión atmosférica de los materiales que incluye: la lluvia, el rocío, la condensación, humedad, el tiempo de humectación, temperatura, radiación solar, viento, contaminantes transportados por el aire.

2.2. **Factores que influyen en la corrosión de aceros ASTM A36.**

Existen muchos factores que influyen para dar origen al proceso de corrosión, donde se debe tomar en cuenta tanto las características del material sobre el que incide y el medio que lo rodea a este, a continuación, se mencionan algunos factores, considerados los de mayor efecto sobre el proceso corrosivo.

2.2.1. *Acidez de la solución*

El pH de una solución es una propiedad que define la cantidad de iones de hidrógeno libres en dicha solución. Si el pH es menor a 7 ($\text{pH} < 7$) se dice que la solución es ácida. Esto significa que existe una concentración relativamente alta de iones de hidrógeno libres en la solución, los cuales son capaces de recibir electrones para poder estabilizarse. Debido a la capacidad de aceptar electrones, las soluciones ácidas son más corrosivas que las soluciones neutras ($\text{pH} = 7$) así como de soluciones alcalinas ($\text{pH} > 7$), ya que permiten que la zona anódica reacciona en mayor proporción, ya que se liberan electrones de tales reacciones (López et al. 2016, p. 14–15). s

2.2.2. 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. Por otro lado, las sales alcalinas, incrementan el pH de la solución electrolítica, por lo que en algunos casos funcionan como inhibidores del proceso de corrosión. Ejemplos de estas sales son el fosfato trisódico, tetraborato de sodio, silicato de sodio y el carbonato de sodio.

2.2.3. Capas protectoras

La tendencia a la corrosión de un material se puede reducir con la existencia de capas que protejan su superficie. Estas capas pueden ser aplicadas artificialmente, en forma de recubrimientos o pueden aparecer a través del fenómeno de pasividad o por la formación de productos de corrosión que impiden el avance del proceso corrosivo.

2.2.4. 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 metales o aleaciones, cuan mayor sea la concentración de O_2 mayor capacidad tendrá el material de formar la capa protectora de que lo caracteriza.

2.2.5. Temperatura

La velocidad de corrosión tiende a aumentar al incrementar la temperatura, debido a que se acelera la difusión del oxígeno del medio hacia el material afectado, inclusive a través de capas de pasivación, se ha demostrado que un aumento en la temperatura de $2^\circ C$ incrementa al doble la tasa de corrosión. La temperatura, representa el factor más importante para el desarrollo del proceso de corrosión por oxidación, como se mencionó con anterioridad (López et al. 2018, p. 14–15).

La oxidación con relación exponencial a la temperatura se origina respecto al concepto eléctrico de crecimiento de la película. De tal modo que la conductancia que esta requiere de la cantidad de efectos de la red y su movilidad, y considerando que estas dos variables cambian con el opuesto

de la temperatura y contemplando que la velocidad es proporcional a la conductancia, también cambiaría exponencialmente (Evans y Company 2018, p. 248).

2.2.6. Diferencia de potencial.

Cuando existe diferencia de potencial en los materiales expuestos a las mismas condiciones, tal como sucede con el zinc y acero en agua salada, el metal con un valor de potencial estándar de oxidación mayor se corroerá y protegerá al metal con el potencial estándar de oxidación menor (Evans y Company 2018, p. 60).

Tabla 1-2: Potenciales estándar de oxidación y reducción a 25 °C

Reacción de corrosión	Potencial normal E^0 (V)
$K \rightarrow K^+ + e^-$	-2,92 (Activo)
$Na \rightarrow Na^+ + e^-$	-2,7
$Mg \rightarrow Mg^{+2} + 2e^-$	-2,3
$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^-$	-1,6
$Zn \rightarrow Zn^{+2} + 2e^-$	0,763
$Cr \rightarrow Cr^{+3} + 3e^-$	0,710
$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^-$	0,440
$Cd \rightarrow Cd^{+2} + 2e^-$	0,402
$Co \rightarrow Co^{+2} + 2e^-$	0,270
$Ni \rightarrow Ni^{+2} + 2e^-$	0,230
$Sn \rightarrow Sn^{+2} + 2e^-$	0,140
$Pb \rightarrow Pb^{+2} + 2e^-$	0,126
$H_2 \rightarrow 2H + 2e^-$	0,00
$Sn^{+2} \rightarrow Sn^{+4} + 2e^-$	0,15
$Cu \rightarrow Cu^{+2} + 2e^-$	0,34
$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$	0,40
$Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3} + e^-$	0,77
$2Hg \rightarrow Hg_2^{+2} + 2e^-$	0,79
$Pd \rightarrow Pd^{+2} + 2e^-$	0,83
$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H + 4e^-$	1,23
$Pt \rightarrow Pt^{+2} + 2e^-$	1,200
$Au \rightarrow Au^{+3} + 3e^-$	1,420 (Noble)

Fuente: (Fernández y Granados 2018b, p. 14)

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2021

2.3. Formas de corrosión

La corrosión se manifiesta en formas que tienen ciertas similitudes y que por tanto se pueden clasificar por ciertos grupos específicos. La **Tabla 2-2** muestra una clasificación de la corrosión de acuerdo con los mecanismos del ataque y los tipos de corrosión se menciona bajo cada mecanismo.

Tabla 2-2: Formas y mecanismos de corrosión

Corrosión general	Corrosión localizada	Corrosión con influencia metalúrgica	Degradación mecánicamente asistida	Daño asistido por el ambiente
<ul style="list-style-type: none">• Atmosférica.• Galvánica	<ul style="list-style-type: none">• Grietas.• Picadura.	<ul style="list-style-type: none">• Intergranular.• Desalación.	<ul style="list-style-type: none">• Erosión.• Cavitación.	<ul style="list-style-type: none">• Corrosión bajo esfuerzo.

Fuente: (Pacheco, 2017, p. 5)

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2021

2.4. Incidencia de la corrosión en la economía

La lucha contra la corrosión constituye una fuente significativa de gastos para la industria del petróleo y el gas. *British Petroleum* (BP) llevó a cabo un estudio de sus operaciones en el Mar del Norte en 1995, a raíz de ese estudio, la compañía estimó que las erogaciones para la prevención y el control de la corrosión ascendían al rededor del 8% de las erogaciones del capital total para sus proyectos. En la plataforma continental del Reino Unido, entre el 25% y el 30% de los costos operativos de BP, correspondían al control y el manejo de la corrosión. Los costos asociados con el reemplazo de los equipos corroídos de los mismos (Quiroga et al. 2016, p. 37).

En un estudio reciente, elaborado por la (NACE) de los EE. UU, se estima que el costo 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. En dicho estudio se determina también el ahorro que se lograría si se emplearan buenas prácticas para implementar técnicas efectivas de prevención y protección frente a la corrosión: entre 375-875 mil millones de dólares, lo que representa entre el 15% y el 35% de los costos totales asociados a la corrosión (Fernández y Lucas Granados 2018, p. 3).

2.5. Los aceros al carbono

Son aleaciones que contienen básicamente hierro (Fe), al que se le agrega un pequeño porcentaje de carbono (C) superior al 0,05% e inferior al 2% en peso y otros elementos como manganeso (Mn), fósforo (P), silicio (Si), que proporcionan mayor resistencia mecánica. “Entre los metales, el acero es uno de los más utilizados, el 90% de todos los metales producidos en el mundo es el acero”. (Ashby y Jones, 2018).

Los aceros se clasifican según su contenido de carbono:

- **Aceros bajos en carbono.** Se denominan suaves o dulces, el porcentaje de carbono está entre 0,03 y 0,25%.

- **Aceros medios en carbono.** Se denominan semidulces o semiduros, el porcentaje de carbono está entre 0,25 y 0,50 %.
- **Aceros altos en carbono.** Se denominan duros y extraduros, el porcentaje de carbono está entre 0,5 y 1,67%.

2.5.1. *Acero ASTM A36*

El acero ASTM A36 es uno de los aceros más versátiles, menos caros y tienen una pobre resistencia a la corrosión usualmente necesitan la protección de revestimientos o un medio ambiente condicionado. Esta generalización excluye los aceros inoxidable y aceros que están formulados con un alto contenido de cromo para cambiar su superficie químicamente (Quiroga et al. 2016, p. 40).

El acero A36 es un material considerado como un acero al carbono estructural, mismo que se aprovecha al máximo en la industria de la construcción por sus propiedades mecánicas que tiene y que se muestra en la **tabla 3-2**, en donde se rige bajo la norma ASTM A36. Este material puede ser utilizado como parte de hojas laminadas de acero, así como elementos de gran tamaño en donde se emplean los aceros conformados (Pacheco, 2017, p. 13).

Tabla 3-2: Requerimientos mecánicos para el acero ASTM A36

Propiedad	Valor
Densidad, kg/m ³	7850
Límite de fluencia, ksi (MPa)	32-36 (250 - 280)
Resistencia a la tensión, ksi (MPa)	58-80 (400 – 550)
Módulo de elasticidad, ksi	29000
Porcentaje de elongación mínimo, %	23 (50mm)
Punto de fusión, °C	1538

Fuente: (ASTM-A36, 2017)

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2021

Es uno de los aceros de mayor uso en el Ecuador, entre las aplicaciones más comunes dependiendo del espesor del acero se tiene, metalmecánica (puertas, ventanas, muebles, carrocerías), fabricación de tanques (lavado de crudo, almacenamiento de agua, plataformas, escaleras, etc.) y estructuras de puente.

2.6. Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra es importante para realizar una comparación entre datos recolectados, el objeto de la investigación es conocer el universo en un estudio pero en la mayoría de los casos el tamaño de la población hace imposible estudiar a todos por individual, por eso es que resulta conveniente la toma de una muestra de esa población, entre la muestra y la población debe de existir una relación directa, la muestra debe ser tomada al azar y debe tener un tamaño que garantice la presentación para permitir la interpretación correcta de los datos obtenidos, para poder inferir los valores de la muestra de la población se debe asegurar que la muestra sea tomada al azar ese tamaño se lo calcula en función de una fórmula que contiene tres datos independientes (González et al. 2014, p. 4).

2.6.1. Estimación de la media muestral

Para el cálculo del tamaño muestral es necesario fijar de antemano unos parámetros que dependen del tipo de estudio. En el caso de la estimación de una media, estos parámetros son la desviación

$$n = \frac{Z^2 * S^2}{e^2} \quad (1)$$

Donde:

- n:** El tamaño de testigos necesarios para el ensayo
- S:** Desviación estándar
- e:** Porcentaje de error 1%
- z:** Nivel de confianza 99%

2.7. Polímeros

La química de los polímeros es constituida y formada a partir de la combinación de moléculas más pequeñas que toman el nombre de monómeros. Su obtención puede ser natural, por ejemplo, el látex, las proteínas, el almidón y las resinas naturales. Por otro lado, se tiene los que se obtiene de forma sintética, que son producidas por el hombre, como el gas natural, el carbón, polipropileno, polietileno, entre otros, los polímeros tienen mayor estabilidad dimensional por el coeficiente de dilatación térmica. Respecto al metal, el plástico tiene menos rigidez y mayor elasticidad. Producen una pequeña dilatación del material por la absorción de la humedad. Tienen un coeficiente de dilatación térmica 20 veces mayor que los metales (Gutiérrez et al. 2019, p. 13–14).

2.7.1. Los polímeros y la resistencia a la corrosión

Se conoce que los polímeros son resistentes a la corrosión, pero esto depende de su estructura, de tal manera que para conseguir un polímero que sea altamente resistente a la corrosión hay que modificar sus propiedades. De acuerdo con este cambio se puede considerar que el polipropileno es el más apto, para soportar condiciones altas de corrosión, el proceso con el cual se consigue esta característica es la incorporación de aditivos al polímero, evitando la degradación oxidativa de acuerdo con este cambio se puede considerar que el polipropileno es el más apto, para soportar condiciones altas de corrosión (Valencia et al. 2019, p. 28).

Para el ensayo de corrosión según la norma ASTM G31 se utilizarán recipiente que están llenos de sustancias corrosivas, los cuales se ha seleccionado que sean de material de polipropileno ya que posee las siguientes propiedades (Caicedo et al. 2017).

- Sólido sin olor y color transparente.
- La densidad del polipropileno está comprendida entre 0.89 y 0.91 gr/ cm³. Es la más baja de los polímeros comerciales, de tal manera, permite la fabricación de productos ligeros debido a su relación masa/volumen.
- Tiene naturaleza apolar, y por esto posee gran resistencia a agentes químicos. Es decir, se dificulta la interacción directa de este polímero con otros químicos (ej. ácidos).
- Presenta poca absorción de agua, por lo tanto, no presenta mucha humedad ya que tiene un bajo coeficiente de absorción de humedad con un valor de 0.02 kg/ cm², h0.5.
- El polipropileno tiene una buena resistencia química pero una resistencia débil a los rayos UV, generando degradación.
- El PP es resistente a disolventes orgánicos (ej. cloroformo, acetona, tetrahidrofurano).
- El PP es insoluble en al agua.

2.8. Ensayos de corrosión por inmersión.

Los ensayos de inmersión son los más usados dentro de la industria, y se encuentra estandarizada por la norma ASTM G31 para probetas total y parcialmente inmersas, así como por la norma ASTM G44 para ensayos de inmersión intermitente, donde se introduce el espécimen por un tiempo, luego se saca, se seca y se vuelve a introducir en la solución de prueba y se repite la operación durante un “n” número de veces.

El tamaño y espesor de las probetas dependen del propósito del ensayo, naturaleza del material y aparatos usados, aunque lo más deseado es que tengan un área adecuada. El tamaño de las probetas ajustadas al proyecto se realizó con la norma ASTM G31 y ASTM B117, los cuales fueron para el ensayo de inmersión, las medidas obtenidas fueron 10 cm de largo por 5,08 cm de ancho por 0.557 cm de profundidad, el empleo de esta técnica es muy flexible, es decir, sus parámetros no son totalmente rígidos dependiendo de los resultados deseados. Como ejemplo de esto se puede mencionar que existe total libertad para el uso de las soluciones dentro de las cuales se efectúa la inmersión, solamente depende del criterio y objetivos del evaluador y que únicamente la norma pide que la composición se controle lo más posible, así como que el volumen de la solución se conserve constante en el caso de que se evapore. En el mismo sentido, se usa la temperatura que a juicio del evaluador sea la mejor, simplemente la que se emplee debe ser controlada en un margen de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, a menos de que se trate de una prueba donde se pretenda evaluar la temperatura ambiente y para lo cual se debe usar la más alta anticipada para los meses de verano. En el caso del inyectado de aire, solo se utiliza si la prueba así lo establece en su desarrollo experimental, aunque por lo general con la atmósfera natural inherente al proceso es más que suficiente (Covelli y Ferney 2018, p. 52).

2.8.1. *ASTM G44-21. Práctica estándar para la exposición de metales y aleaciones por inmersión alternativa en una solución neutra de cloruro de sodio al 3,5%.*

Esta práctica cubre los procedimientos para realizar pruebas de corrosión por inmersión alternativa en cloruro de sodio (NaCl) al 3,5%. Es principalmente para pruebas de aleaciones ferrosas, pero se puede utilizar para otros metales que presenten susceptibilidad a los iones de cloruro. Establece las condiciones ambientales de la prueba y los medios para controlarlas. Esta práctica se puede utilizar tanto para probetas de corrosión bajo tensión como para probetas de corrosión sin tensión. Históricamente, se ha utilizado para pruebas de agrietamiento por corrosión bajo tensión, pero a menudo se utiliza para otras formas de corrosión, como uniforme, por picadura, intergranular y galvánica (ASTMG44, 2021).

2.8.1.1. *La concentración de las soluciones*

De acuerdo con la cantidad de soluto presente, tendremos soluciones diluidas, saturadas y sobresaturadas. Si bien podemos diferenciar una solución concentrada de una diluida, no se puede determinar exactamente qué tan concentrada o diluida está. A continuación, veremos cómo se cuantifica la cantidad de soluto presente en una solución, a través del concepto de concentración de una solución que expresa la cantidad de soluto presente en una cantidad dada de solvente o de

solución. En términos cuantitativos, esto es la relación o proporción matemática entre la cantidad de soluto y la cantidad de solvente, entre soluto y solución, esta relación suele expresarse en porcentajes.

2.8.1.2. *Porcentaje masa-volumen*

Representa la masa de soluto en gramos por cada 100 ml de solución. Se puede calcular según la expresión:

$$\% \text{ masa} = \frac{\text{masa de soluto}}{\text{volumen de la solución}} * 100\% \text{ se expresa en m/v} \quad (2)$$

2.8.2. *Norma ASTM G31: 2021. Práctica estándar para pruebas de inmersión de metales en laboratorio*

Describe procedimientos aceptados para los factores que influyen en pruebas de corrosión por inmersión en ambientes corrosivos, particularmente pérdida de masa. Esos factores incluyen la preparación de la muestra, aparatos, condiciones de prueba, métodos de limpieza de pruebas, evaluación de resultados, cálculos y reportes de velocidad de corrosión. Esta práctica también enfatiza la importancia de registrar todos los datos pertinentes y provee una lista de controles para reportar la información de la prueba (ASTM G31, 2021).

La norma, en lugar de estandarizar el procedimiento, es presentada como una guía de modo que varios de los escollos de cada prueba puedan ser evitados. La experiencia muestra que todos los metales y aleaciones no responden por igual a los muchos factores que afectan la corrosión y que las pruebas de corrosión dadas solo indican resultados, o pueden incluso entenderse completamente mal. En el diseño de cualquier prueba de corrosión, las consideraciones dadas deben ser para varios factores discutidos en esta norma, porque esos factores se ha encontrado que afectan determinantemente los resultados obtenidos (Jorge et al. 2018, p. 24).

2.8.3. *Norma ASTM G1-03:2017. Práctica estándar para preparar, limpiar y evaluar muestras en pruebas de corrosión.*

El alcance de esta práctica abarca el medio sugerido para llevar a cabo de manera eficiente la eliminación de los productos de corrosión con un mínimo de remoción de metal sano, después de

haberse completado las pruebas de inmersión, del mismo modo para evaluar los daños producidos por corrosión.

En un buen procedimiento de limpieza, se deben de eliminar solamente los productos de corrosión, evitando la eliminación del metal base. El procedimiento de limpieza para cada muestra debe repetirse sucesivamente, así como determinar la pérdida de masa después de cada período de limpieza. Posteriormente los resultados se grafican donde se debe representar el metal después de la remoción de los productos de corrosión. La solución empleada para la limpieza debe ser preparada con agua destilada y productos químicos dependiendo del material y sus productos de corrosión. Dicho procedimiento involucra la inmersión de la muestra corroída después del ensayo a cierta solución química para la limpieza total con un mínimo de eliminación de metal. Los tipos de procesamiento serán elegidos en función de las condiciones de prueba y del material de ésta (ASTMG1-03, 2017).

2.8.3.1. *Limpieza de muestras después de la prueba. peso constante final.*

La limpieza después de concluido el ensayo de corrosión consistió en sumergir los cupones de prueba dentro de una solución con ácido clorhídrico en un baño sumergido para remover los productos de corrosión adheridos en la superficie de las muestras (ASTM G 1), teniendo precaución de no atacar la muestra y evitar la remoción adicional de metal. (ASTMG1-03, 2017).

Para concluir la limpieza química, las muestras se sumergen en agua destilada para la solución de limpieza y finalmente las muestras se introducen en recipientes que contiene una solución de alcohol-acetona para evitar manchar las muestras.

Solución de limpieza tenemos:

- Ácido clorhídrico: 125 ml
- Hexametilentetramina: 0.875 g

2.8.3.2. *Velocidad de corrosión*

Con los datos obtenidos en los pasos anteriores se procedió al cálculo de la velocidad de corrosión aplicando la fórmula sugerida por la Norma ASTM G 1 (ASTMG1-03, 2017).

$$\text{Velocidad de corrosión} = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad (3)$$

Donde:

- K: Constante (en mpy)
T: Tiempo de exposición en horas a la más cercana 0.01 h
A: Área a la más cercana 0.01 cm²
W: Pérdida de masa en g, a la más cercana 1 mg (correctamente para cualquier pérdida durante la limpieza)
D: Densidad en g/cm³

Tabla 4-2: Valores y unidades de la constante K

Unidades	Constante (K)
Mili pulgadas por año (mpy)	3,45x10 ⁶
Pulgadas por año (ipy)	3,45x10 ³
Pulgadas por año (ipm)	2,87x10 ²
Milímetros por año (mm/y)	8,76x10 ⁴
Picómetros por segundo (pm/s)	2,87x10 ⁶
Gramos por metro cuadrado por hora (g/m ² h)	1,00x10 ⁴ xD
Miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd)	2,4x10 ⁶ xD
Microgramos por metro cuadrado por segundo (μg/m ² s)	2,78x10 ⁶ xD

Fuente: Norma ASTM G1, 2011, p.14

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2021

Tabla 5-2: Categoría del material según la resistencia a la corrosión

Resistencia a la corrosión	mm/año
Sobresaliente	<0,02
Muy buena	0,02-0,1
Buena	0,1-0,5
Regular	0,5-1
Mala	1-5
Inaceptable	>5

Fuente: Norma ASTM G1, 2011, p.14

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2021

2.8.4. Norma NACE/ SSPC- SP2. Limpieza con herramientas manuales.

La norma se especializa en la preparación del metal realizando una limpieza con herramientas manuales no accionadas mecánicamente como la utilización de cepillos manuales, lijas, etc. Antes de aplicar recubrimientos anticorrosivos en los mismos. Como desventaja en esta norma tenemos

que no se puede realizar un desprendimiento total de incrustaciones adheridas fuertemente sobre la superficie.

2.8.5. Norma NACE/SSPC-SP3. Limpieza con herramientas manuales mecánicas

A diferencia de la norma SSPC-SP2, las herramientas que se utilizan aquí son eléctricas o de igual forma pueden ser neumáticas como por ejemplo pulidoras, cepilladoras eléctricas, entre otras, de tal manera que agiliza el proceso de preparación de la superficie eliminando impurezas del elemento a trabajar cabe mencionar que este método puede no desprender en su totalidad todas las incrustaciones que se encuentren en la superficie.

2.8.6. Norma SSPC-PA 1. Pintado de acero para taller, campo y mantenimiento.

Esta especificación cubre los procedimientos para el pintado de superficies de acero. El alcance de esta especificación es bastante amplio, cubriendo los requisitos tanto específicos como generales para la aplicación de la pintura. Esta especificación no proporciona descripciones detalladas de la preparación de la superficie, los pretratamientos o la selección de los impermeables y capas de acabado. Esta especificación para el pintado de acero para taller, campo y mantenimiento tiene como fin ser utilizada para el acero que, debido a su condición de exposición, estará sometido al ataque corrosivo, ya sea del clima o de su ambiente de servicio, y cuando es esencial obtener una alta calidad de limpieza y pintado. No se contempla que los requisitos de esta especificación sean necesarios para la limpieza y el pintado de acero que no estará sometido a ataque corrosivo. (SSPC-PA 1, 2016).

2.9. Control de la corrosión.

Generalmente, este proceso no puede ser eliminado en su totalidad, pero si se puede llegar a controlar de una manera adecuada, consiguiendo que los materiales cumplan el ciclo de vida previsto desde un principio. Existen tres etapas muy importantes para definir el tiempo de vida de un elemento o material: el diseño, la construcción y el uso, (Covelli y Ferney 2018, p. 22)

La corrosión puede ser controlada o prevenida por métodos muy diferentes. Si lo miramos desde el punto de vista económico, las soluciones pueden variar y llegar a ser altamente decisivas. Como un claro ejemplo de esto, podemos nombrar la situación en la que un ingeniero debe enfrentarse económicamente entre elegir cambiar una pieza periódicamente, o desde un principio elegir un material más resistente a la corrosión, pero mucho más costoso.

2.10. Protección con revestimiento

En la actualidad es el método más aplicado para proteger a los metales ante la corrosión en un entorno agresivo, de tal manera que para este tipo de protección existen tres clases o tipos de recubrimientos que son: metálicos los cuales en ocasiones ofrecen una protección catódica en el caso que este falle localmente, como segundo tenemos los orgánicos que generan una barrera física entre el metal y el medio como ejemplo tenemos las resinas, las pinturas, lacas y también barnices y por último se menciona a los inorgánicos que incluyen revestimientos de vidrio, esmaltes y recubrimientos de inversión como son los fosfatos, cromatos y anodizado.

Estos tipos de protectores se destacan por ser multifuncionales ya que se los puede combinar de muchas maneras posibles entre sí (Fernández y Granados 2018, p. 75).

2.11. Sistemas de tratamientos de pinturas según el tipo de exposición

En función de las condiciones de exposición o de trabajo a que se someta los elementos pintados, a continuación, mencionaremos los distintos sistemas de tratamientos de pinturas aplicables, según el tipo de exposición

2.11.1. Tipo A: Depósitos y elementos en inmersión

El tratamiento de pintura será:

- Aplicación: epoxi de dos componentes, curada con aminas. Espesor de película seca de 1 x 50 μ .
- Capa de acabado: epoxi amina sin disolvente. Espesor de película seca de 1 x 300 μ

En el caso de agua potable la pintura empleada en la capa de acabado deberá disponer de certificado alimentario.

2.11.2. Tipo B: Depósitos y elementos en inmersión

El tratamiento de pintura será:

- Aplicación: Epoxi poliamina/fenólica. Espesor de película seca 1 x 100 μ

- Capa intermedia: Epoxi poliamina/fenólica de capa gruesa. Espesor de película seca: 1 x 100µm
- Capa de acabado: Epoxi poliamina/fenólica de capa gruesa. Espesor de película seca: 1 x 100µ.

2.11.3. Tipo C: Inmersión en agua salina

2.11.3.1. Sin abrasión y/o impacto:

- Aplicación: Epoxi poliamida con hierro micáceo. Espesor de película seca 1 x 65µ
- Capa intermedia: Brea - epoxi. Espesor de película seca 1 x 200µ
- Capa de acabado: Brea - epoxi. Espesor de película seca 1 x 200µ.

2.11.3.2. En condiciones de abrasión y/o impacto:

- Aplicación: Epoxi poliamida con hierro micáceo. Espesor de película seca 1 x 65µ
- Capa de acabado: Epoxi poliamina de capa gruesa reforzado con fibra de vidrio. Espesor de película seca 1 x 400µ.(Ingemecánica 2021, p. 5).

2.12. Protección catódica mediante ánodos de sacrificio.

Cuando tenemos metales o estructuras en contacto mediante un electrolito, se crea un diferencial de potencial entre ellos denominada corriente galvánica. Esto produce que el metal más anódico o electronegativo se destruya con el tiempo siendo sacrificado. Esto se puede realizar fijándonos en la serie electroquímica de los metales, es decir, poniendo en contacto nuestras estructuras con un metal más electronegativo, mediante un electrolito. Esto se denomina protección catódica mediante ánodos de sacrificio donde existe el intercambio de electrones donde el ánodo se sacrifica por el material el cual va a ser protegido. En la protección por ánodos de sacrificio, la corriente polarizante, la suministra un ánodo de un metal menos noble acoplado a la estructura, que se deteriorará a su favor permaneciendo así de forma inalterable. Los materiales utilizados para esta técnica son diversos, pero los más comunes son las aleaciones de magnesio, zinc y aluminio. Concretamente el magnesio sin alear no puede ser utilizado para la protección catódica en ambientes marinos, debido a su deterioro excesivamente rápido (se emplean algunas de sus aleaciones) (Machín 2019, p. 26–27), el aluminio es de fácil disponibilidad y su costo no es elevado considerando también que es un gran conductor para poder realizar el intercambio de electrones facilitando así el flujo de estos.

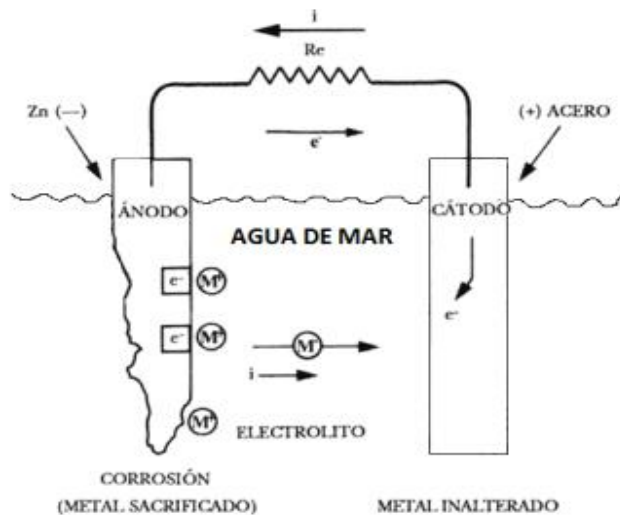


Figura 2-2: Celda de corrosión galvánica

Fuente: (Simoncini 2015, p. 46)

Para que un material pueda utilizarse como ánodo de sacrificio se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Su potencial debe ser más electronegativo como ánodo que el del metal a proteger.
- La intensidad de corriente que se establece en la pila formada no debe ser muy alta (ya que esto disminuirá el tiempo de vida útil del ánodo), por lo que el potencial electronegativo del ánodo de sacrificio no puede exceder en mucho al del metal a proteger.
- El metal debe ser de fácil adquisición y deberá de poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
- El metal deberá tener un costo razonable, de modo que, en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por amperio – año.

2.12.1. *Densidad de corriente mínima para la protección catódica.*

La densidad de corriente que debe suministrar cualquiera de los métodos precedentes para proteger el acero sin revestir sumergido en agua de mar es función directa de la velocidad de desplazamiento de ese metal en ese electrolito. Es quizá el parámetro para considerar más importante a la hora de aplicar protección catódica a una estructura determinada, y su importancia reside no solamente desde el punto de vista de la protección conseguida, sino que su magnitud incide directamente en la economía del sistema.

Tabla 6-2: Densidad de corriente para el acero en varios ambientes

Estado superficial	Medio agresivo	Densidad de corriente (mA/m ²)
Acero desnudo	Agua de mar (velocidad 0.5 m/s)	80-200
Acero desnudo	Agua de mar (velocidad 1-1.5 m/s)	150-600
Acero pintado (epoxi, vinílica,)	Agua de mar	25-35
Acero pintado sujeto a roces por hielos, fondos, etc.	Agua de mar	50-210
Acero pintado (aluminio bituminosa)	Agua de mar	35-50

Fuente: (Méndez 2017, p. 19)

Realizado por: Caiza Joe, Gamboa Fausto, 2021

Tabla 7-2: Propiedades físicas y electroquímicas de: Mg, Zn y Al

Propiedades	Mg	Zn	Al
Peso atómico (g)	24,32	65,38	26,97
Valencia	2	2	3
Rendimiento corriente (%)	60	90	50
Potencial normal a 25°C	-2,63	-1,05	-1,93
Potencial disolución en agua de mar (V Ag/AgCl)	-1,55	-1,05	-1,85

Fuente: (Simoncini 2015, p. 46)

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2021

2.12.2. Agua salada: ánodo de sacrificio de aluminio.

El zinc y el aluminio se usan generalmente en agua salada, donde la resistividad es generalmente menor. Las aplicaciones típicas son para los cascos de los barcos, tuberías y plataformas de producción, en motores marinos refrigerados con agua salada, en las hélices y los timones de barcos pequeños, y en la superficie interna de los tanques de almacenamiento.

2.12.3. Diseño de ánodos de sacrificio para aceros al carbono sumergidos.

Sí, circula una dada intensidad de corriente (el requerido para alcanzar la protección catódica adecuada), durante un tiempo prefijado (vida útil en servicio), la masa del metal disuelto se calcula de la siguiente manera

$$W = \frac{I * t * PA}{N * 96500} \quad (4)$$

W: Peso total del ánodo expresado en libras (lb): eslora de flotación expresada en pies.

I: Intensidad de corriente eléctrica (A).

- t:** Tiempo (s).
PA: Peso atómico del metal (g).
N: Valencia del elemento

La fórmula (4) permite calcular los gramos de masa disuelta considerando que el metal no sufre auto corrosión. Para un rendimiento de corriente del 90%, el aluminio es el que sufre la menor pérdida de peso ya que es el que proporciona mayor capacidad eléctrica, o sea el mayor número de Coulomb por kg de metal disuelto, como se observa en la **Tabla 8-2**.

Tabla 8-2: Valores electroquímicos para el cálculo de la vida de los ánodos

Metal anódico	Capacidad de corriente teórica (A · año/ kg)	Rendimiento (%)	Factor de utilización
Zinc (Zn)	0.094	90	85
Aluminio (Al)	0.340	90	85
Magnesio (Mg)	0.251	90	85

Fuente: (Simoncini 2015, p. 47)

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2021

Los rendimientos prácticos para cada metal nunca alcanzan el 100%, ya que industrialmente no se pueden fabricar ánodos galvánicos puros por sus altísimos costos. Los rendimientos normales están entre 50% y 90% del rendimiento teórico. En la **Tabla 8-2** se presentan los valores teóricos y prácticos de la capacidad eléctrica para los metales comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio (Simoncini 2015, p. 47).

2.12.4. Cálculo del número de ánodos y su duración.

Para conocer el número de ánodos que se van a necesitar para llevar a efecto la protección catódica, es fundamental determinar la intensidad total de corriente necesaria, la superficie a proteger y conocer la densidad de corriente de protección. Es conveniente, cuando se calcula la superficie de la estructura a proteger, observar si existe en ella posibles zonas de sombra, motivadas por refuerzos o cualquier otra circunstancia, ya que hay que tener muy en cuenta estas zonas en el momento de hacer la distribución de los ánodos, de lo contrario estarán sometidas a la acción de la corrosión. La intensidad total necesaria para protegerla está dada por:

$$\delta_c = \frac{I}{A} \quad (8)$$

Con la finalidad de conocer el número de ánodos que se necesitan para llevar a efecto la protección catódica es necesario determinar la superficie a proteger y calcular la densidad de corriente de protección. Como expresa la ecuación anterior, el producto del área de la superficie a proteger (en m^2) por la densidad de corriente de protección (en mA/m²) da la intensidad total necesaria para la protección catódica. Por otra parte, como se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo, el número N de ánodos es:

$$N_{\text{ánodos}} = \frac{I_{\text{total}}}{I_a} \quad (9)$$

Otro factor para tener en cuenta es la vida de los ánodos. Así, pues, si conocemos la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo I_a , su peso (kg), teniendo en cuenta su capacidad de corriente calculada teóricamente, así como su rendimiento y su factor de utilización, se calcula la vida del ánodo. El factor de utilización F_u puede ser el 85%, ya que cuando un ánodo se ha consumido en ese porcentaje debe sustituirse porque el material restante es insuficiente para mantener un porcentaje razonable de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar. El cálculo es el siguiente:

$$\text{Tiempo útil} = \frac{I * P * \eta * F_u}{I_a} \quad (10)$$

Donde:

I: Capacidad de corriente = A. Año / kg

P: Peso (kg) η = rendimiento

F_u : Factor de utilización.

2.13. Protección catódica con corriente impresa.

Esta protección se la considera como híbrida ya que es la unión del método de protección catódica convencional aproximadamente cien años después de dicha protección donde se utiliza una fuente externa ya puede ser una batería o pila a través de una unidad transformadora. Dicha corriente debe ser entregada constantemente distribuida con un cable conectado el polo positivo al ánodo y el polo negativo al cátodo teniendo un circuito cerrado entre el sistema. La aplicación de este tipo de protección anticorrosiva puede ser aplicado a largo y corto plazo, de esto dependerá la elección de la fuente de energía para suministrar dicha corriente (Becerra Mosquera et al. 2017, p. 4).

2.13.1. Generalidades de un regulador de voltaje

Este tipo de protección catódica se utiliza una fuente externa la cual suministra energía constante a la estructura a proteger, el cual debe funcionar al menos un tiempo largo de 10 años para garantizar la protección catódica por corriente impresa, de tal manera que se mencionaran los diferentes tipos de fuentes y equipos a utilizar.

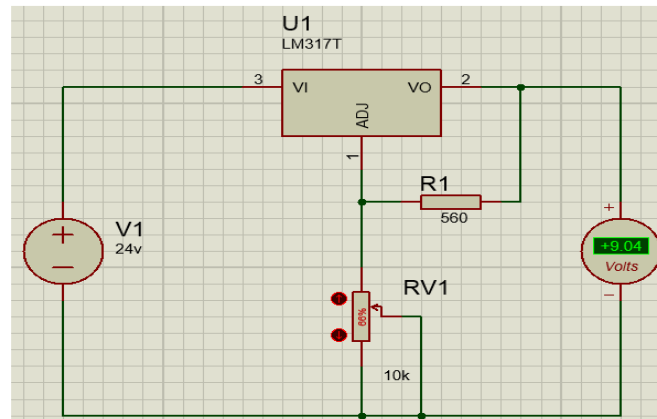


Figura 3-2: Circuito regulador de voltaje

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

2.13.2. Regulador de voltaje

Son equipos que transmite la energía en un solo sentido, aportando corriente directa, y siendo alimentados por corriente alterna ya sea 110 V o 220 V. La ventaja de estos equipos es de que se puede ajustar la tensión de salida y la intensidad de acuerdo con las necesidades del usuario de otro modo, si se necesita intensidades de altas corriente, se utiliza rectificadores trifásicos. Este proceso se da gracias al puente de Wheatstone compuesto por 4 diodos de selenio y silicio.



Figura 4-2: Regulador de voltaje

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

2.13.2.1. *Fuentes de energía solar*

Se emplea donde hay escasas de energía eléctrica como desiertos o zonas selváticas y se necesita aplicar protección catódica, de tal forma, se utiliza sistemas fotovoltaicos con baterías como banco de almacenamiento de energía para cuando no exista radiación solar y así poder seguir suministrando energía al sistema de protección.

2.14. Medición del espesor por ultrasonido

La mayoría de las veces que se utiliza esta medición de espesores por ultrasonido se debe cuando solo se tiene acceso a un solo lado del elemento a diagnosticar, y también cuando se hace imposible poder medir el espesor por razones vinculadas al tamaño del material. En otras palabras, no es necesario realizar un corte sobre el material a medir formando del grupo de ensayos no destructivos lo cual debemos considerar una ventaja principal. Se caracteriza por ser extremadamente precisa al momento de considerar el tiempo de tardía que genera un impulso acústico por una sonda ultrasónica al momento de recorrer el espesor de la pieza o elemento. La capacidad de esta medición tiende a poder medir cualquier material ya sea cerámico, fibra de vidrio, acero, etc. El rango o el alcance que se tiene para poder realizar la medición es desde los 0,08 mm hasta 635 mm, esto también varía dependiendo del material y también tomando en cuenta la selección de la onda (CYM MATERIALES SA).

La inspección ultrasónica es el método no destructivo más utilizado el cual se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, que se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material, la mayoría de las inspecciones ultrasónicas son realizadas en frecuencias entre 0.1 y 25 MHz debido a que las ondas de ultrasonido son vibraciones mecánicas y las amplitudes de las vibraciones producen esfuerzos en las piezas por debajo de su límite elástico, de esta manera los materiales no producirán deformaciones plásticas (Martínez, 2018, p. 25).

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas que consisten en vibraciones oscilatorias de partículas atómicas o moleculares de una sustancia. Las ondas de ultrasonido se comportan igual que las ondas de sonido audible ya que se pueden propagar a través de un medio elástico sea sólido, líquido o gaseoso, pero no al vacío. Cada onda viaja con características diferentes las cuales dependen del medio en el que se propaguen como un haz de luz.



Figura 5-2: Medidor de espesores por ultrasonido

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

CAPÍTULO III

3. ENSAYOS DE CORROSIÓN

Para el presente trabajo de investigación con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, se realiza los ensayos de corrosión siguiendo la metodología y los procedimientos planteados a continuación.

3.1. Metodología

La metodología aplicada, se basa en el desarrollo del procedimiento establecido en las normas ASTM G31-21, ASTM G1-03 para el desarrollo del ensayo de corrosión se utilizó una solución basada en las normas ASTM G44 de los testigos de acero ASTM A36 de comparación del rendimiento de tres métodos de protección anticorrosiva.

3.1.1. Descripción del método

El método empleado para la comparación del rendimiento de tres métodos de protección anticorrosiva en función de la velocidad de corrosión se basa en la norma ASTM G31-21, la norma describe los factores que influyen en las pruebas de corrosión por inmersión en laboratorio, en particular las pruebas de pérdida de masa. Estos factores incluyen aparato, muestreo, muestra de prueba, condiciones de prueba (composición de la solución de prueba, temperatura, burbujeo de gas, movimiento del fluido, volumen de la solución, método de soporte de las muestras de prueba, duración de la prueba), métodos de limpieza de las muestras de prueba. Al terminar este ensayo se procede a la medición de los espesores de cada placa mediante ultrasonido.

Los ensayos y métodos empleados se realizan mediante el diagrama de flujo **figura 1-3**

3.2. Caracterización de los equipos

La prueba de corrosión acelerada se la realiza en una cuba hermética de polipropileno resistente, como señala la norma ASTM G 44. Esta prueba requiere de una composición del 3,5% de solución de cloruro de sodio, dicha solución se encuentra almacenada en 4 reservorios plásticos con una capacidad de 10 litros cada uno. Las placas testigos a ensayar deben tener una limpieza previa a la realización de la prueba, y deben estar suspendidas dentro del recipiente hermético

de polipropileno, la temperatura de la cuba debe estar alrededor de los $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, y la presión no debe exceder a los 4 bares en su interior, como establece la norma.

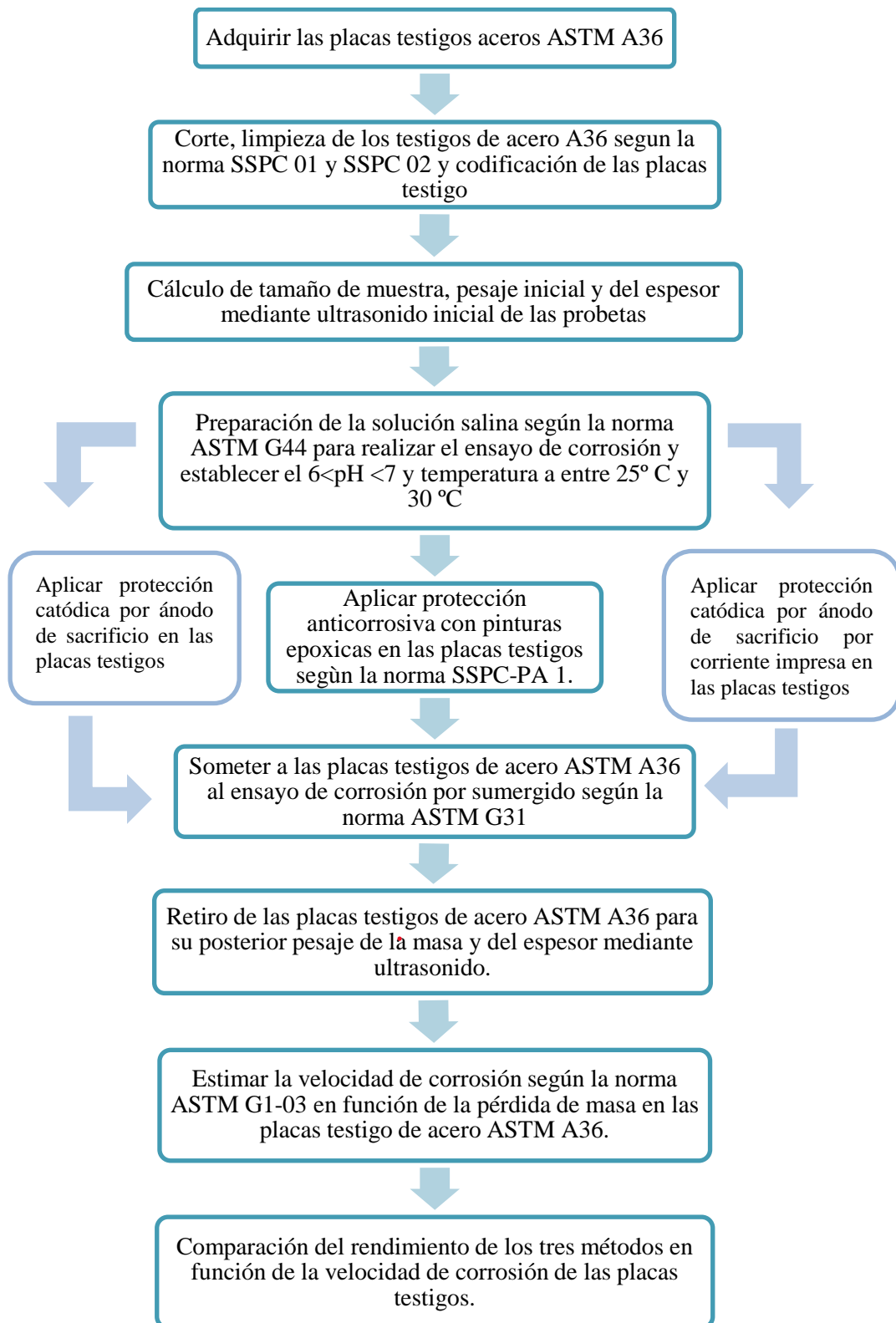


Figura 1-3: Diagrama de bloques del proceso experimental a seguir

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.2.1. *Adquisición del acero ASTM A36 y cálculo del tamaño de muestra de las placas testigos para realizar el ensayo de corrosión*

La compra y adquisición de las placas de acero ASTM A36 se lo realizó en la empresa ecuatoriana NOVACERO se adquiere la de placa de acero de 2" x 3/8".



Figura 2-3: Placas de hacer ASTM A-36

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Para el tamaño de muestra como lo especifica la norma ASTM G31 se lo debe realizar mediante cálculos estadísticos por lo que se utiliza el cálculo de tamaño de una media muestral para una población desconocida o infinita, se ha realizado mediante la aplicación de la fórmula (1) para este caso la unidad de S y e poseen las mismas unidades ya que se ha basado en los datos de las medidas de masa registradas de las 10 probetas.

Se calcula S mediante la recopilación de datos en excel utilizando la desviación estándar matemática de los siguientes valores a partir de los datos recolectados de la **tabla 2-3**, que son la masa de las 10 primeras probetas, Y se obtuvo un valor de $S = 2,407$ g.

Se obtiene el valor de $Z = 2,57$ por medio de la tabla de la distribución normal, el cálculo del tamaño de muestra por niveles de confianza al 99%; y se encontró el valor de e, promediando los pesos de las 10 probetas y multiplicándolo por el 1% ($e = 339,87\text{g} * 0,01$, $e = 3,3987\text{g}$).

$$n = \frac{2,57^2 * (2,407 \text{ g})^2}{(3,3987 \text{ g})^2}$$
$$n = 3,32 \text{ unidades}$$

Según la fórmula se tenía que utilizar solo 4 testigo, sin embargo, para obtener mejores resultados en el ensayo, se realizó el ensayo con 5 testigos.

3.3. Materiales

Tabla 1-3: Número de probetas a utilizar

Material	N° de elementos	Espesor (mm)	Características
Acero ASTM -A36	20	5.57	Placas. ver Figura 2-3 .
Aluminio 6063	02	20	Pedazos cilíndricos.

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.4. Procedimiento

3.4.1. Corte de las placas testigos de acero ASTM A36

El tamaño de las probetas ajustadas al proyecto se realizó con la norma ASTM G31-21, los cuales fueron, para el ensayo de inmersión, las medidas obtenidas fueron 10 cm de largo * 5,08 cm de ancho * 0.57 cm de grosor como se muestra en la **figura 3-3**.

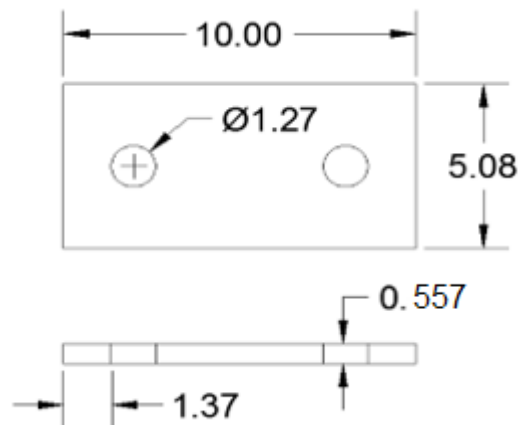


Figura 3-3: Dimensiones de las placas testigos

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.4.2. Limpieza de las placas testigos.

Para las probetas de acero ASTM A36 se realizó los cortes según las dimensiones establecidas , en total se realizó 20 placas y cada una se realizó una limpieza superficial según la norma SSPC-01 que consiste en la limpieza con lijas sobre la calamina, para de esta manera, eliminar cualquier presencia de impurezas tales como: grasas o limallas resultantes del proceso de corte, para tener

una correcta prueba de corrosión del acero para la aplicación de los tres métodos anticorrosivos que se tiene planeado luego se aplica la norma SSPC-02 que consiste en la utilización de máquinas eléctricas como pulidora, cepillo eléctrico, que ayuda considerablemente en la eliminación de la calamina sobre la superficie de las planchas de acero ASTM A36.



Figura 4-3: SSPC-SP02

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022



Figura 5-3: SSPC-SP03

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022



Figura 6-3: Acabado tipo espejo

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.4.3. Registro inicial de datos.

Realizar la medición y el registro de los parámetros: largo, ancho, con la utilización de un calibrador electrónico digital pie de rey, que posee una lectura de medición en milímetros y pulgadas en el rango de las centésimas (**Figura 2-3**), adicional a esto, con un medidor de espesores mediante ultrasonido de marca OLYMPUS como se puede observar en la **figura 7-3** se obtuvo el valor del espesor de cada placa y, también, la masa de las probetas, para lo cual se empleó una balanza de precisión electrónica de la marca SARTORIUS, con una capacidad de 600 gramos y una precisión en la lectura en el orden de décimos de gramos como se puede observar en la **Figura 8-3**.

Tabla 2-3: Codificación de probetas

N.º	Codificación	Tipo de Limpieza	Tipo de protección	Masa inicial (gr)	Espesor (mm)
1	PC01	SSPC 02 y SSPC 03.	Sin recubrimiento	341,30	5,57
2	PC02	SSPC 02 y SSPC 03	Sin recubrimiento	342,10	5,57
3	PC03	SSPC 02 y SSPC 03	Sin recubrimiento	336,90	5,57
4	PC04	SSPC 02 y SSPC 03	Sin recubrimiento	339,20	5,57
5	PC05	SSPC 02 y SSPC 03	Sin recubrimiento	338,30	5,57
N.º	Codificación	Tipo de Limpieza	Tipo de protección	Masa inicial (gr)	Espesor (mm)
1	RS01	SSPC 02 y SSPC 03.	Recubrimiento epoxi	338,30	5,57
2	RS02	SSPC 02 y SSPC 03	Recubrimiento epoxi	342,90	5,57
3	RS03	SSPC 02 y SSPC 03	Recubrimiento epoxi	343,70	5,57
4	RS04	SSPC 02 y SSPC 03	Recubrimiento epoxi	337,80	5,57
5	RS05	SSPC 02 y SSPC 03	Recubrimiento epoxi	338,20	5,57
N.º	Codificación	Tipo de Limpieza	Tipo de protección	Masa inicial (gr)	Espesor (mm)
1	AS01	SSPC 02 y SSPC 03.	Ánodo de sacrificio	344,90	5,57
2	AS02	SSPC 02 y SSPC 03.	Ánodo de sacrificio	340,00	5,57
3	AS03	SSPC 02 y SSPC 03.	Ánodo de sacrificio	340,00	5,57
4	AS04	SSPC 02 y SSPC 03.	Ánodo de sacrificio	337,30	5,57
5	AS05	SSPC 02 y SSPC 03.	Ánodo de sacrificio	337,60	5,57
N.º	Codificación	Tipo de Limpieza	Tipo de protección	Masa inicial (gr)	Espesor (mm)
1	CI01	SSPC 02 y SSPC 03.	Corriente impresa	340,00	5,57
2	CI02	SSPC 02 y SSPC 03.	Corriente impresa	342,50	5,57
3	CI03	SSPC 02 y SSPC 03.	Corriente impresa	334,10	5,57
4	CI04	SSPC 02 y SSPC 03.	Corriente impresa	343,20	5,57
5	CI05	SSPC 02 y SSPC 03.	Corriente impresa	339,50	5,57

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022



Figura 7-3: Medición de espesor por ultrasonido a placas testigos

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.5. Placas de control

Estas placas de control servirán para poder realizar la comparación en función de pérdida de masa y de peso, mismas que no tendrán ningún método anticorrosivo, siendo como punto de partida para determinar la eficiencia de cada método anticorrosivo, pero aun así estarán sometidas al ambiente corrosivo.



Figura 8-3: Balanza de precisión digital

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.6. Aplicación de pintura anticorrosiva según la norma SSPC-PA 1:2016

Para el ensayo de corrosión con recubrimientos superficiales se aplica pinturas epoxi poliamina con propiedades anticorrosivas como se puede observar en el ANEXO F con un color negro mate.

espesor de película seca $1 \times 100\mu$ y la aplicación de dos capas sólidas en volumen, las cuales fueron pintadas las probetas de acero ASTM A-36 por un técnico especializado y calificado en aplicación de recubrimientos anticorrosivos, teniendo en cuenta su hoja técnica de la pintura y basados en las especificaciones de la norma SSPC-PA 1, según los parámetros de la **Tabla 3-3**, se utilizó un equipo de recubrimiento por pulverización mediante una pistola de aire comprimido.

El tiempo de secado de las placas testigos fueron dos días, cumplido este período podemos someterlos a ensayos de corrosión según la norma ASTM G-31.



Figura 9-3: Pintura Epoxi-poliamina

Fuente: Quimicolor

Según la norma SSPC-PA 1 especifica las condiciones ambientales para aplicar recubrimientos superficiales los cuales se detallan en la siguiente **tabla 3-3** y se los consideró para la aplicación del recubrimiento de la pintura epoxi poliamina en las placas testigos para obtener una mejor adherencia de la pintura.

Para realizar la mezcla de los productos de pintura es necesario utilizar vasos cilíndricos, reglas de mezcla y consultar las fichas técnicas **ANEXO F**. Es importante mencionar que la mayoría de éstos tienen pesos específicos distintos, por lo cual la cantidad en volumen (ml.) no es proporcional en peso (gr.).

Los productos comercializados hoy en día requieren mayor cuidado al momento de preparar la mezcla, ya que están diseñados para combinarse con productos específicos y en cantidades exactas con el fin de obtener los resultados esperado

3.6.1. Procedimiento para la aplicación de pintura la pintura epóxica según la norma SSPC-PA1

- a) Realizar el control de las condiciones ambientales de acuerdo con la **tabla 3-3** como lo establece la norma SSPC-PA1 ver ANEXO L
- b) La cantidad de pintura con respecto a disolvente o catalizador en el proceso de mezcla dependerá de cada producto, y lo tenemos especificado por instrucciones del fabricante. Puede estar entre 2/1 y 4/1 en este caso será de relación 4/1.
- c) Generalmente para realizar la mezcla se suele usar un 50% de pintura epoxica, un 25% de diluyente(tuinner) y un 25% de catalizador en monocapa.
- d) En bicapa 75% de pintura y 25% de diluyente.
- e) Mínimo se dan 2 capas de pintura, esperando unos 20 min entre cada capa.

En algunos casos la pintura viene preparada con catalizador, como en el caso de la pintura bicapa.

Tabla 3-3: Condiciones ambientales para aplicar recubrimiento

Propiedad	Rango
Temperatura ambiental	15° C y 32°C
Humedad relativa	Inferior al 80%
Temperatura de la superficie	Inferior a los 50 °C
Temperatura de la pintura,	Inferior a los 35 °C

Fuente: SSPC-PA 1, 2016

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.7. Ánodo de sacrificio

Para este método anticorrosivo se utilizará el aluminio como ánodo de sacrificio, se tomó en consideración para el diseño del ánodo de sacrificio el mismo criterio que se utiliza para proteger los cascos de los barcos, y su conexión entre el ánodo y cátodo se lo realiza mediante un cable de cobre de calibre 16 evitando la caída de voltaje ente ánodo y cátodo.

3.7.1. Cálculo de la masa del ánodo de sacrificio

Se consideró una sola pieza de ánodo para las 5 placas testigos en función del área total de todas las placas como se muestra en la siguiente expresión:

$$A = b \cdot h \tag{11}$$

$$A=15,08*0,6*2+10*5,08 \text{ (cm}^2\text{)}*2$$

$$A=119,6 \text{ cm}^2$$

$$A=101,6\text{cm}^2 \times 5 \text{ placas}$$

$$A=598 \text{ cm}^2 \approx 0,0598 \text{ m}^2$$

Para la obtención del valor de la intensidad será en función de la densidad de corriente del agua de mar que tiene un valor de 200 mA/m^2 de acuerdo con la **tabla 6-2** para acero al desnudo sumergido en agua de mar se determina mediante la **fórmula (8)**:

$$\delta_c = \frac{I}{A}$$

$$I = \delta_c \times A$$

$$I = 220 \text{ mA/m}^2 \times 0,0598 \text{ m}^2$$

$$I = 13,16 \text{ mA}$$

De acuerdo con la **fórmula (4)** y con los datos obtenidos del área y la intensidad de corriente, y el tiempo estimado que serán tres meses al cual se someterá el ensayo de corrosión, se podrá obtener el peso y total del ánodo de sacrificio, para este caso, el peso total de aluminio se da de acuerdo con la siguiente expresión:

$$W = \frac{(0,01316A) \times (5184000 \text{ s}) \times (26,97 \text{ g})}{2 \times 96500 \text{ As}}$$

$$W = 273 \text{ g.}$$

Según los cálculos tenemos que para proteger un área de 598 cm^2 que corresponde al área de las 5 placas se necesita una masa de aluminio de 273 g en un tiempo estimado de tres meses.

3.7.2. *Ubicación de las placas testigos en los soportes*

De acuerdo a la norma ASTM G31-21 que especifica la guía estándar para pruebas de corrosión por inmersión en laboratorio de metales, las probetas de ensayo deben estar colocadas en soportes que no alteren el desempeño del ensayo, ya que el área debe de estar expuesta al 100% y no debe haber contacto entre ellas, razón por la cual se ha optado por emplear, cuerdas de plástico de material polímero, hay que tener en cuenta que dicho material es resistente a la reacción química que produce al estar expuesto a la salinidad de la solución, tener en cuenta que deben ser fáciles de retirar luego de cumplir el tiempo de exposición, las probetas se deben colocar de acuerdo con

la **Figura 10-3**, para ser fácilmente identificadas, la codificación de las probetas se muestra en la **Tabla 2-3**.

3.7.2.1. *Procedimiento de ubicación de placas testigos en los soportes según la norma ASTM G31-21*

- a) Se realiza el trazado de cada placa testigo para la perforación con una distancia de 1,37 cm de cada lado como se indica en la **Figura 3-3**.
- b) Utilizando un taladro de pedestal se realiza las dos perforaciones con un diámetro de 1.27 cm cada agujero a cada placa testigo.
- c) Después de terminar de realizar los agujeros, se procede a limar las rebabas ocasionadas por la perforación
- d) Posterior a esto se realiza el procedimiento de pintado de las placas.
- e) Utilizando cuerda de plástico, procederemos a pasarlo por uno de los agujeros de las placas posterior a esto se realiza un nudo en cada extremo para sujetar la placa de tal manera que exista una separación de cada una, este proceso lo vamos a realizar apilando cada una de las placas con sus posteriores nudos, hasta completar las cinco placas testigos como se observa en la **Figura 10-3**.



Figura 10-3: Soporte de las placas testigos.

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.8. Preparación de la solución salina según la norma ASTM G44 para realizar el ensayo de corrosión.

De acuerdo con la norma ASTM G44, se realizó la preparación del ambiente corrosivo en cuatro recipientes de polipropileno con capacidad de 10 litros cada uno, donde, por cada recipiente se mezcló 8 litros de agua destilada **Figura 13-3** con 350 gramos de cloruro de sodio y ácido muriático para poder controlar el pH que debe ser menor a 7 pH. Esta solución será aplicada para todos los tres métodos anticorrosivos incluido para las placas de control, con la finalidad de que

todas las placas testigos estén sometidas al mismo ambiente corrosivo y que los resultados sean lo más uniformes posibles.

3.8.1. *Cantidad de soluto y solvente*

La norma ASTM G44-21 establece la práctica estándar para la exposición de metales y aleaciones por inmersión alternativa en una solución neutra de cloruro de sodio al 3,5%. La solución salina se preparará disolviendo $3,5 \pm 0,1$ partes en peso de NaCl en 96,5 partes de agua, en el apartado se establece el cálculo de la cantidad de sal analítica requerida en un volumen de agua conocida, y además señala que la solución debe estar dada por una composición en masa del 3,5% de cloruro de sodio, y se la calcula mediante la siguiente expresión que representa la masa de soluto (en gr) por cada 100 ml. de solución. Se puede calcular según la **fórmula (2)** (ASTMG44, 2021).

$$\frac{\% \text{ masa} \cdot \text{volumen de la solución}}{100\%} = \text{masa de soluto}$$
$$\frac{3,5 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \% \cdot 10000 \text{ml}}{100\%} = \text{masa de soluto}$$

350 g NaCl = masa de soluto

Se debe tener en cuenta que se tiene un volumen de 10 litros debido a la configuración del reservorio. Por lo tanto, para obtener una solución de 3,5% NaCl, se debe mezclar 10 litros de agua tipo agua destilada y 350 g de sal en grano, con lo que obtendremos un volumen total de 10 litros de solución, que serán suficientes para completar esta solución se debe realizar en cuatro cubas para desarrollar los cuatro ensayos de corrosión.



Figura 11-3: Masa del soluto

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.8.2. Preparación de la solución

Una vez calculadas las cantidades de soluto y solvente, se procede a realizar la mezcla para obtener la solución, es necesario mezclar de tal manera que la sal analítica se encuentre totalmente disuelta en el agua destilada. En la **Figura 12-3** se muestra los elementos para la de preparación de la solución salina.



Figura 12-3: Elementos para preparar la solución

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022



Figura 13-3: Preparación de la solución

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.8.2.1. Medición del pH de la solución salina

La norma ASTM G- 44, establece que el valor del pH de la solución salina recolectada en el interior de la cuba, recién preparada, debe estar dentro del rango de 6,4 a 7. Solo se utilizará ácido clorhídrico (HCl) o hidróxido de sodio (NaOH) reactivo diluido para ajustar el pH. Además, recomienda que la medición del pH se la debe realizar a una temperatura de 23 ± 3 °C (73 ± 5 °F) utilizando un pH-metro **Figura 14-3** la toma de datos del pH se la debe realizar una vez al día



Figura 14-3: Medición del pH

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.9. **Ánodo de sacrificio con corriente impresa**

De igual manera se utiliza el aluminio como ánodo de sacrificio y también tomando en cuenta que tenga la misma área de las placas testigos, para este caso el voltaje que se utiliza es de 3,5 V que va a hacer constante durante el tiempo de exposición al ambiente corrosivo, este voltaje y amperaje constante se lo va a controlar mediante un regulador de voltaje que indicará dichos valores, dependiendo de la reacción que tenga el ánodo sobre el catado, se irá modificando el voltaje, ya que se presenciará pérdida de material.

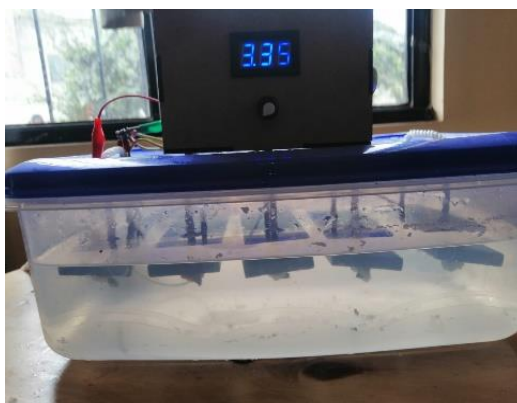


Figura 15-3: Protección por corriente impresa

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.10. **Preparación para la prueba de corrosión por inmersión según la norma ASTM G31-21**

Para realizar la inmersión de las placas testigos ya clasificadas por cada método anticorrosivo y de igual manera su aplicación se procede a llevar a cabo el ensayo siguiendo el siguiente procedimiento.

3.10.1. Procedimiento para pruebas de corrosión por inmersión según la norma ASTM G31-21

- a) El agua salina se coloca en cada recipiente de polipropileno con una cantidad de 8 litros cada uno, esta solución debe contener un porcentaje de NaCl de 3,5%
- b) Se controla el pH que debe estar entre 6,4 y 7, si no tiene estos valores se procede a rectificarlo con hidróxido de sodio hasta tener dichos valores deseados.
- c) Posterior a esto se debe controlar la temperatura a 23 ± 3 °C
- d) Se procede a colocar cada grupo de probetas en cada recipiente, tomando en cuenta que la superficie de las placas testigos deben estar totalmente en contacto con el agua salina.
- e) Finalmente se debe llevar un plan de inspección controlando el pH y la temperatura de la solución salina.

3.11. Comparación de muestras respecto a la velocidad de corrosión

Para la comparación de las muestras de acuerdo a la velocidad de corrosión se lo realiza mediante el programa R-studio el cual introduciremos los datos de las medias de velocidad de corrosión para su posterior análisis de acuerdo al valor (p-value) para poder evaluar la normalidad de los datos con la condición de $0,05 < p\text{-value} > 0,05$ como se indica en la figura 16-3, si el dato p-value es mayor a 0,05 se realiza un test de t.student caso contrario se realiza un test de Wilcoxon, posterior a esto se debe tomar la decisión de aceptar o rechazar las hipótesis planteada en el test como conclusión final.

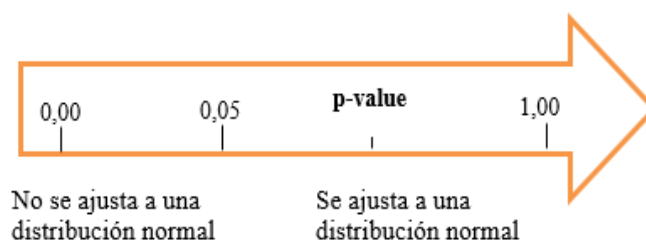


Figura 16-3: Ajuste de la distribución normal

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.12. Costos de protección anticorrosiva.

Para evaluar el rendimiento de los tres métodos de protección anticorrosiva se compara desde el punto de vista económico para ello se detallan los costos de la aplicación de cada método de protección anticorrosiva.

3.12.1. Costos de protección superficial con pintura epóxicas

Tabla 4-3: Costos de aplicación de protección superficial

Detalle	Cantidad	Unidad	Precio (USD)
Pintura epóxicas y catalizador	250	ml	10
Aplicación de la pintura			15
Total			25

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.12.2. Costos de protección catódica por ánodo de sacrificio

Tabla 5-3: Costos de aplicación de protección catódica por ánodo de sacrificio

Detalle	Cantidad	Unidad	Precio USD
Ánodo de aluminio 6063	300	gr	10
Cableado y conexiones	3	m	3
Total			13

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

3.12.3. Costos de protección catódica por ánodo de sacrificio por corriente impresa

Tabla 6-3: Costos de aplicación de protección catódica con corriente impresa

Detalle	Cantidad	Unidad	Precio USD
Rectificador de 12 V	1	und	50
Ánodo de aluminio 6063	1	und	10
Conexiones y cableado	5	m	5
Total			65

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se presenta la designación, significado y número de probetas necesarias para el desarrollo del ensayo, además, se muestra la codificación de las probetas para cada grupo de estudio, además, la obtención de la tasa de corrosión con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel.

Cabe mencionar que para cada grupo de estudio existe una ficha específica donde se puede evidenciar los parámetros tomados en cuenta para el correcto desarrollo del ensayo por sumergido en una solución salina.

4.1 Evaluación de la tasa de corrosión

Con los datos obtenidos se procede al cálculo de la tasa de corrosión, para comparar la efectividad del método de protección catódica por ánodo de sacrificio. Los cálculos de las fichas técnicas están codificados como lo indica la **Tabla 1-4**.

Tabla 1-4: Designación de las probetas

N.º	Designación	Significado	N.º Probetas
1	A36PSPS	Acero A-36 placas sin protección superficial	5
2	A36PCPC	Acero A-36 placas con protección superficial	5
3	A36PCAS	Acero A-36 placas con protección por ánodo de sacrificio	5
4	A36PCPC	Acero A-36 placas con protección por corriente impresa	5
Total			20

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.1.1. Cálculos de la tasa de corrosión

De acuerdo con lo establecido en la norma ASTM G1-03, se procederá a determinar la tasa de corrosión presentes en las probetas de estudio, mediante la **fórmula (4)**:

$$\text{Velocidad de corrosión} = \frac{(87600)(0,3g)}{(101,6 \text{ cm}^2)(1296 \text{ h})(7,81 \frac{g}{\text{cm}^3})}$$

$$\text{Velocidad de corrosión} = 0,0256 \text{ mm/año}$$

Se tomaron los valores del ítem N° 2 de la **Ficha Técnica 1**, para calcular la tasa de corrosión presente en la probeta, los demás ítems están calculados mediante una hoja de Excel.

4.2. Fichas de recolección y tabulación de datos

En las siguientes fichas expuestas se muestra los parámetros tomados en cuenta para realizar la correcta evaluación del ensayo de corrosión por sumergido que posteriormente servirán para realizar la construcción de una gráfica que representará los niveles de corrosión en función al tiempo que duró el ensayo. Por último, se registran las observaciones más relevantes que resultan al finalizar el ensayo, así como el criterio con el que se realizó las gráficas.

4.2.1. Estimación de la velocidad de corrosión basado en la norma ASTM G1-03

Cabe mencionar que dicho ensayo contempla cuatro etapas las cuales son: preparación, inspección, limpieza de las muestras y concluye con la evaluación de la tasa de corrosión, la cual se desarrolló con la ayuda de la norma ASTM G1.

4.2.2. Acero A-36 placas de control sin protección superficial

Ficha técnica 1: Recolección y tabulación de datos A36PSPS.

Ficha de recolección de datos								
Lugar:		Riobamba						
Fecha de inicio del ensayo:		2/12/2021						
Fecha de fin del ensayo		25/01/2021						
Ciudad:		Riobamba						
Materiales:		Cubas de polipropileno de 10 L			Codificación:		A36PSPC	
Norma:		ASTM G 31			Material:		A-36	
Ensayo:		Corrosión acelerada			Densidad:		7,81 g/cm ³	
Limpieza:		Manual-Desengrasante			Constante K:		87600	
Dimensiones		Largo (mm)		Ancho (mm)		Área (cm²)		101,6
		100		5,06				
Resultados								
N.º	Tiempo de Exposición (horas)	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	Pérdida de espesor (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	1296	5,57	5,53	0,04	338,3	337,0	1,3	0,1107
2	1296	5,57	5,55	0,02	342,9	342,6	0,3	0,0256
3	1296	5,57	5,56	0,01	343,7	343,1	0,6	0,0511
4	1296	5,57	5,57	0,00	337,8	337,7	0,1	0,0085
5	1296	5,57	5,53	0,04	338,2	337,1	1,1	0,0937

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.2.3. Acero A-36 placas con protección superficial epóxico

Ficha Técnica 2: Recolección y tabulación de datos A36PCPC.

Ficha de recolección de datos								
Lugar:		Riobamba						
Fecha de inicio del ensayo:		02/12/2021						
Fecha de fin del ensayo		25/01/2022						
Ciudad:		Riobamba						
Materiales:		Cubas de polipropileno de 10 L			Codificación:		A36PSPC	
Norma:		ASTM G 31			Material:		ASTM -A36	
Ensayo:		Corrosión acelerada			Densidad:		7,81	
Limpieza:		Manual-Desengrasante			Constante K:		87600	
Dimensiones		Largo (mm)		Ancho (mm)		Área (cm ²)		101,6
		100		5,06				
Resultados								
N.º	Tiempo de Exposición (horas)	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	Pérdida del espesor (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	1296	5,57	5,53	0,04	341,3	340,1	1,2	0,1022
2	1296	5,57	5,54	0,03	342,1	341,6	0,5	0,0426
3	1296	5,57	5,55	0,02	336,9	336,2	0,7	0,0596
4	1296	5,57	5,56	0,01	339,2	338,6	0,6	0,0511
5	1296	5,57	5,56	0,01	338,3	338,0	0,3	0,0256

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.2.4. Acero A-36 placas con protección por ánodo de sacrificio.

Ficha Técnica 3: Recolección y tabulación de datos A36PCAS

Ficha de recolección de datos								
Lugar:		Riobamba						
Fecha de inicio del ensayo:		2/12/2021						
Fecha de fin del ensayo		25/01/2021						
Ciudad:		Riobamba						
Materiales:		Cubas de polipropileno de 10 L			Codificación:		A36PSPC	
Norma:		ASTM G 31			Material:		A-36	
Ensayo:		Corrosión acelerada			Densidad:		7,81 g/cm ³	
Limpieza:		Manual-Desengrasante			Constante K:		87600	
Dimensiones		Largo (mm)		Ancho (mm)		Área (cm ²)		101,6
		100		5,06				
Resultados								
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	Pérdida de espesor (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	1296	5,57	5,55	0,02	338,3	337,5	0,8	0,0681
2	1296	5,57	5,57	0,00	342,9	342,8	0,1	0,0085
3	1296	5,57	5,56	0,01	343,7	343,5	0,2	0,0170
4	1296	5,57	5,55	0,02	337,8	337,7	0,1	0,0085
5	1296	5,57	5,54	0,03	338,2	337,2	1,0	0,0852

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.2.5. Acero A-36 placas con protección por corriente impresa

Ficha Técnica 4: Recolección y tabulación de datos A36PCPC

Ficha de recolección de datos								
Lugar:		Riobamba						
Fecha de inicio del ensayo:		2/12/2021						
Fecha de fin del ensayo		25/01/2021						
Ciudad:		Riobamba						
Materiales:		Cubas de polipropileno de 10 L		Codificación:		A36PSPC		
Norma:		ASTM G 31		Material:		A-36		
Ensayo:		Corrosión acelerada		Densidad:		7,81 g/cm ³		
Limpieza:		Manual-Desengrasante		Constante K:		87600		
Dimensiones		Largo (mm)		Ancho (mm)		Área (cm ²)		101,06
		100		5,06				
Resultados								
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	Pérdida de espesor (mm)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	1296	5,57	5,56	0,01	338,3	338,0	0,30	0,0256
2	1296	5,57	5,57	0,00	342,9	342,9	0,00	0,0000
3	1296	5,57	5,56	0,01	343,7	343,6	0,10	0,0085
4	1296	5,57	5,56	0,01	337,8	337,7	0,10	0,0085
5	1296	5,57	5,53	0,04	338,2	338,1	0,09	0,0077

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.3. Comparación de las velocidades medias de corrosión

Para evaluar el rendimiento de cada método de protección anticorrosiva se compara las medias de las velocidades de corrosión de los datos recolectados en función de cada método **gráfico 1-4**.

4.3.1. Comparación estadística de las muestras

Para dar más veracidad a estos datos se realiza una comparación de cada grupo de valores evaluando su normalidad introduciendo en el programa R-studio con el comando `shapiro.test(control)`, de todos los valores de la velocidad de corrosión del grupo de muestra de las fichas técnicas mostrando los siguientes valores en la **tabla 2-4**

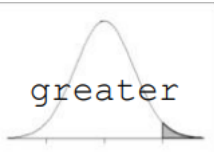
Tabla 2-4: Valores de comparación para la distribución normal

Método de protección	p-value
Placas de control	0,6416
Recubrimiento epóxico	0,5573
Ánodo de sacrificio	0,0873
Corriente impresa	0,0577

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

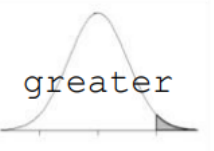
En la **Tabla 3-4** se puede evidenciar que todos los valores p-value son mayores a 0,05 entonces por lo tanto se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar los datos de cada una de las velocidades de corrosión se distribuyen normalmente con un nivel de confianza del 95%, dando lugar a realizar un test de t.student el comando t.studen(epoxico,control=T.alternative="greater") planteando las siguientes hipótesis siendo H0: hipótesis nula y H1: hipótesis alternativa para poder realizar la contrastación de hipótesis.

Tabla 3-4: Comparación estadística de V_c vs V_e

Comparación		Hipótesis	Representación Grafica	p-value
Placas de control vs recubrimiento epóxico	$V_c \leq V_e$	H0: La velocidad de corrosión de las probetas de control son menores que las probetas con recubrimiento epóxico		0,0058
	$V_c > V_e$	H1: La velocidad de corrosión de las probetas de control son mayores que las probetas con recubrimiento epóxico		
Contrastación de hipótesis: Como $p\text{-value} < 0,05$, se rechaza H_0 y se acepta H_1 , por lo tanto, se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de corrosión de las probetas de control es mayor que las probetas de recubrimiento epóxido con un nivel de confianza del 95%.				

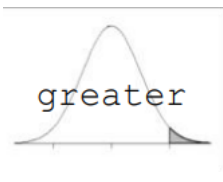
Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Tabla 4-4: Comparación estadística de V_c vs V_a

Comparación		Hipótesis	Representación grafica	p-value
Placas de control vs ánodo de sacrificio	$V_c \leq V_a$	H0: La velocidad de corrosión de las probetas de control son menores que las probetas con protección por ánodo de sacrificio.		0,00415
	$V_c > V_a$	H1: La velocidad de corrosión de las probetas de control son mayores que las probetas con protección por ánodo de sacrificio.		
Contrastación de hipótesis: Como $p\text{-value} < 0,05$, se rechaza H_0 y se acepta H_1 , por lo tanto, se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de corrosión de las probetas de control es mayor que las probetas de ánodo de sacrificio con un nivel de confianza del 95%.				

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Tabla 5-4: Comparación estadística de V_c vs V_i

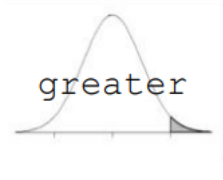
Comparación		Hipótesis	Representación gráfica	p-value
Placas de control vs protección catódica corriente impresa	$V_c \leq V_i$	H₀: La velocidad de corrosión de las probetas de control son menores que las probetas con protección por corriente impresa		0,037
	$V_c > V_i$	H₁: La velocidad de corrosión de las probetas de control son mayores que las probetas con protección por corriente impresa		

Contrastación de hipótesis:

Como p-value < 0,05, se rechaza H_0 y se acepta H_1 , por lo tanto, se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de corrosión de las probetas de control es mayor que las probetas de protección catódica por corriente impresa con un nivel de confianza del 95%.

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Tabla 6-4: Comparación estadística de V_e vs V_a

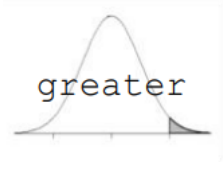
Comparación		Hipótesis	Representación gráfica	p-value
Recubrimiento epóxico vs ánodo de sacrificio	$V_e \leq V_a$	H₀: la velocidad de corrosión de las probetas con recubrimiento epóxico son menores que las probetas con protección por ánodo de sacrificio		0,0415
	$V_e > V_a$	H₁: La velocidad de corrosión de las probetas con recubrimiento epóxico son mayores que las probetas con protección por ánodo de sacrificio		

Contrastación de hipótesis:

Como p-value < 0,05, se rechaza H_0 y se acepta H_1 , por lo tanto, se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de corrosión de las probetas de recubrimiento epóxico es mayor que las probetas con protección por ánodo de sacrificio con un nivel de confianza del 95%.

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Tabla 7-4: Comparación estadística de V_e vs V_i

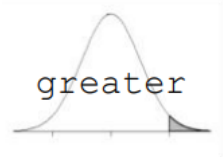
Comparación		Hipótesis	Representación gráfica	p-value
Recubrimiento epóxico vs corriente impresa	$V_e \leq V_i$	H₀: La velocidad de corrosión de las probetas con recubrimiento epóxico son menores que las probetas con protección por corriente impresa		0,0376
	$V_e > V_i$	H₁: La velocidad de corrosión de las probetas con recubrimiento epóxico son mayores que las probetas con protección por corriente impresa		

Contrastación de hipótesis:

Como p-value < 0,05, se rechaza H_0 y se acepta H_1 , por lo tanto, se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de corrosión de las probetas de recubrimiento epóxico es mayor que las probetas con protección por corriente impresa con un nivel de confianza del 95%.

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Tabla 8-4: Comparación estadística de V_a vs V_i

Comparación		Hipótesis	Representación grafica	p-value
Ánodo de sacrificio vs corriente impresa	$V_a \leq V_i$	H₀: La velocidad de corrosión de las probetas con ánodo de sacrificio es menor que las probetas con protección por corriente impresa.		0,0376
	$V_a > V_i$	H₁: La velocidad de corrosión de las probetas con ánodo de sacrificio es mayor que las probetas con protección por corriente impresa.		

Contrastación de hipótesis:

Como $p\text{-value} < 0,05$, se rechaza H_0 y se acepta H_1 , por lo tanto, se concluye que existe suficiente evidencia para aseverar que la velocidad de corrosión de las probetas de ánodo de sacrificio es mayor que las probetas con protección por corriente impresa con un nivel de confianza del 95%.

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

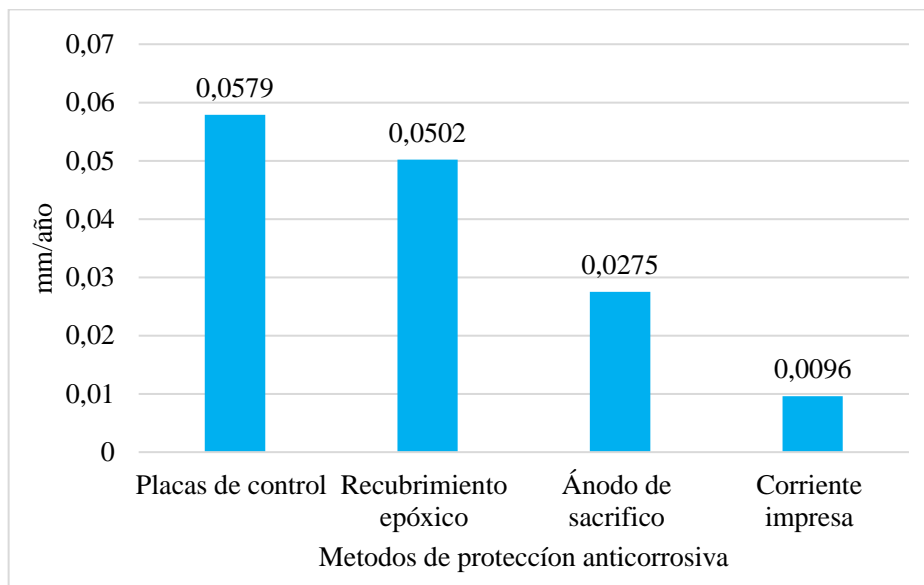


Gráfico 1-4: Comparación del rendimiento

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

Tabla 9-4: Media de la velocidad de corrosión

Método de protección	Media de la velocidad	Unidades
Placas de control	0,0579	(mm/año)
Recubrimiento epóxico	0,0502	(mm/año)
Ánodo de sacrificio	0,0275	(mm/año)
Corriente impresa	0,0096	(mm/año)

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.4. Comparación de la pérdida de espesor

La pérdida de espesor diagnosticado mediante ultrasonido después del ensayo de inmersión se compara este valor de la media de acuerdo con los datos obtenidos con anterioridad al ensayo, así como se demuestra en el **grafico 2-4**.

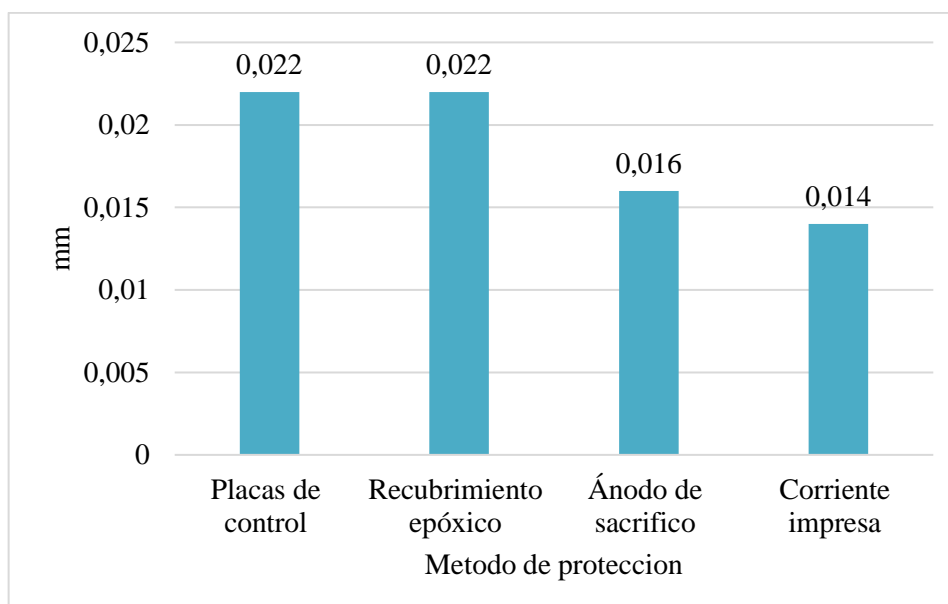


Gráfico 2-4: Comparación de la pérdida de espesor

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.5. Comparación de costos de aplicación

Para evaluar el rendimiento desde el punto de vista económico de cada método de protección anticorrosiva se compara el costo de la implantación se consideró los costos de diseño, adquisición de materiales e instalación de cada uno de los métodos y se hizo la relación con el área que se protege en cm² **Gráfico 2-4**.

Tabla 10-4: Costos de aplicación

Método de protección	Área (cm ²)	Costo (USD)	Costo por (cm ²)
Recubrimiento epóxico	101,6	25	0,2461
Ánodo de sacrificio	101,6	13	0,1280
Corriente impresa	101,6	65	0,6398

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

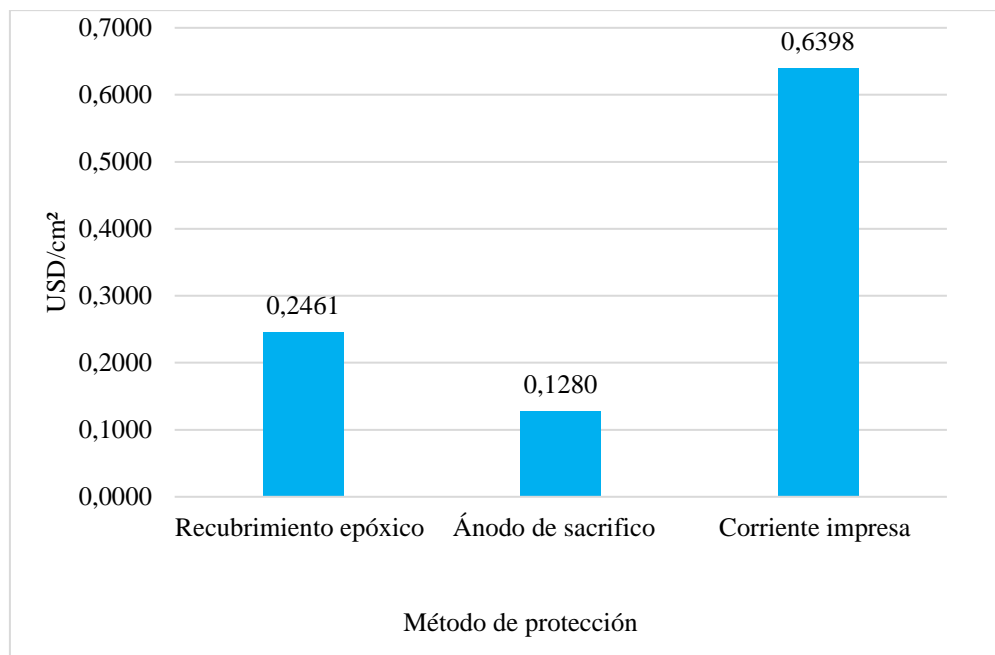


Gráfico 3-4: Comparación de los costos

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

4.6. Comparación del rendimiento vs costo

En el **grafico 4-4** se presentan reunidos en un solo gráfico todos los indicadores que se ha utilizado para evaluar el rendimiento de los tres métodos de protección anticorrosiva como son los costos de implementación y la velocidad de corrosión, para de esta forma de manera gráfica establecer que método de protección anticorrosiva tiene un rendimiento aceptable y un costo de implementación aceptable, las barras de color azul representa las medias de las velocidades de corrosión de cada uno los métodos anticorrosivos, la línea de tendencia roja representa el costo de implementación de cada uno de los tres métodos de implementación

En el **grafico 4-4** se traza una línea de color amarillo en el valor de la velocidad de corrosión de 0,02 mm/año este valor representa el límite de aceptación de velocidad muy buena para aceros al carbono este valor se lo estableció de acuerdo con la norma ASTM G 01 en la cual se establece un criterio para de acuerdo con el valor de la velocidad en la **Tabla 5-2**.

De manera grafica se establece que le método que más se acerca a los limite al límite de aceptación el método de protección anticorrosiva por ánodo de sacrificio ya que posee una velocidad de corrosión de 0,0275 mm/año que es considerable una velocidad de corrosión aceptable como lo establece la **Tabla 5-2** y desde el punto de vista económico es el método con el costo de implementación de 0,1280 USD/ cm² gráficamente el menor valor.

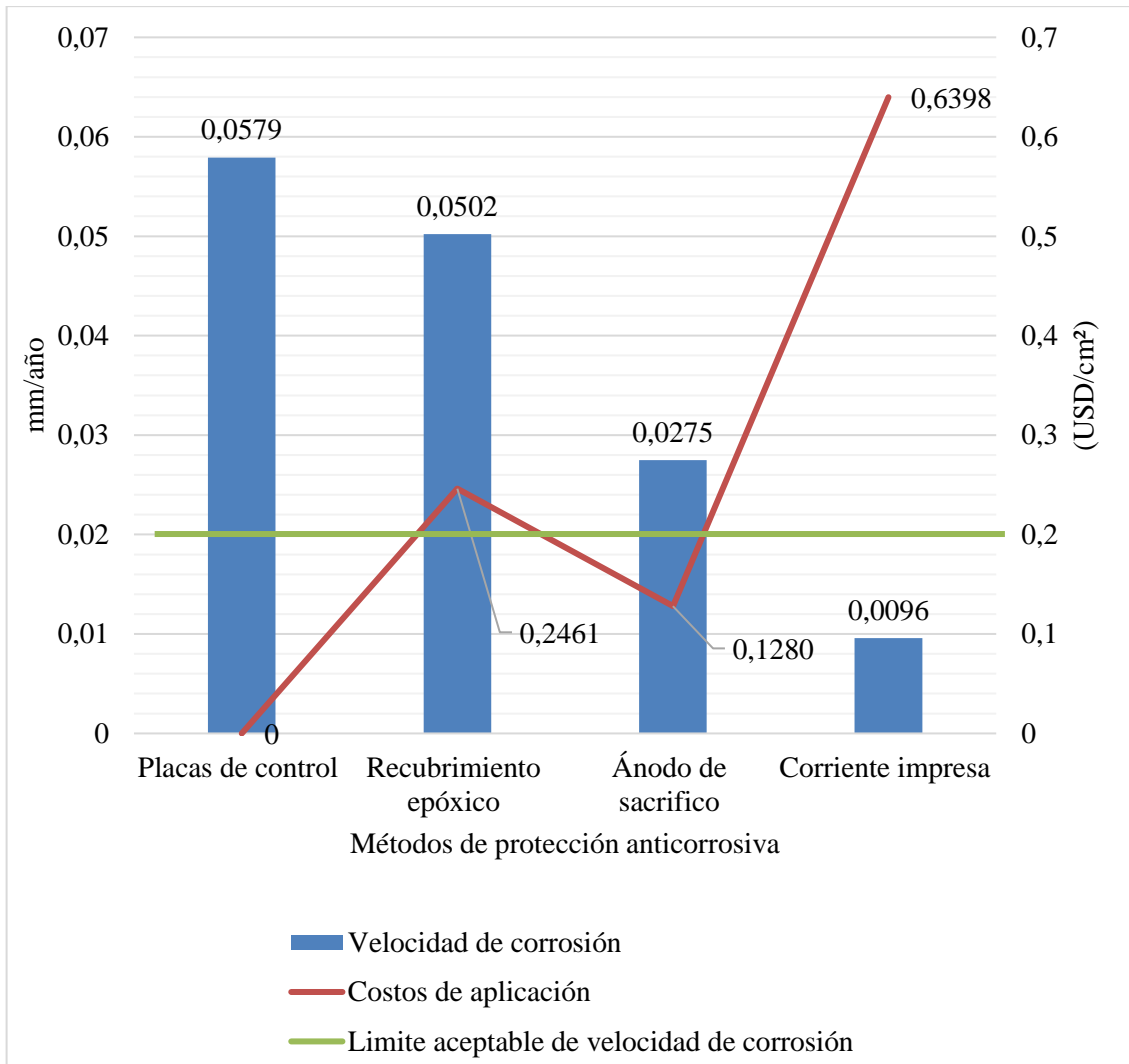


Gráfico 4-4: Comparación del rendimiento vs costos

Realizado por: Caiza Joe; Gamboa Fausto, 2022

CONCLUSIONES

El tamaño de muestra fue debidamente calculado con relación a una población infinita ya que en este caso se desconocía la población, los resultados arrojaron un valor de 3,32 unidades, dicho valor se aproximó a 5 unidades por cada método anticorrosivo, con el objetivo de tener una mejor precisión en el estudio y poder reducir el tamaño de error que puede existir en el proceso de estudio.

Se midió la pérdida de masa en las placas de acero ASTM A36 en función de cada método de protección anticorrosiva en el cual se evidencio que las placas de control tuvieron mayor pérdida de masa ya que están expuestas al material base sin ningún método anticorrosivo por otro lado se evidenció que las placas que estaban protegidas por el método de ánodo de sacrificio corriente impresa tuvieron la menor pérdida de masa.

El método de ánodo de sacrificio por corriente impresa se caracterizó por su baja velocidad de corrosión, siendo el único método que ofrece una protección de 0.0096 mm/año, ahorrando en costos de mantenimiento correctivo, pero no obstante la aplicación de esta protección es muy elevada por el motivo que se debe utilizar una fuente de energía externa para su función, incluyendo el valor de la energía, y los equipos a utilizar tiene un valor de USD 0,6398 por centímetro cuadrado para su ejecución.

Con respecto a la pérdida de espesor es casi irrelevante, ya que el desgaste en cada método anticorrosivo es de décimas de milímetros, pero aun así se debe recalcar que el método anticorrosivo por corriente impresa es el que menos pérdida de espesor presentó dando un valor de 0,094 milímetros por año.

El método óptimo para combatir la corrosión se trata de la protección catódica por ánodo de sacrificio, a comparación de los demás métodos su eficiencia y costo es el más accesible para el usuario, ya que su implementación tiene un valor aproximado de USD 0,1280 por cada centímetro cuadrado y su velocidad de corrosión es de 0,0275 mm/año.

Las placas de control fueron las más afectadas en este experimento con una velocidad de corrosión de 0,0579 mm/año, demostrando que aplicar cualquier método de protección anticorrosiva reduce enormemente la velocidad de corrosión disminuyendo costos de mantenimiento correctivo e incluso aplazando el reemplazo prematuro de los elementos afectados por este fenómeno.

RECOMENDACIONES

La utilización de polímeros como una protección adicional directamente sobre la superficie del metal a proteger, ampliaría enormemente la eficiencia de cualquier método anticorrosivo. La polianilina es un polímero que actúa sobre el metal como una capa protectora de tal manera que ennoblece dicha superficie reduciendo el ataque electroquímico que genera la corrosión.

Para combatir la corrosión existen muchas maneras de hacerlo, como por ejemplo tenemos la utilización de aleaciones que podemos cubrir el material o metal en su totalidad para protegerlo (acero cubierto con zinc), de igual forma podemos cubrir la superficie a proteger utilizando plásticos especiales (polímeros) que hoy en día existen muchos en la actualidad.

Implementar un plan de inspección más detallado cada vez que exista una modificación o un cambio importante ya puede ser de temperatura del ambiente, el pH, humedad, algún agente corrosivo o bacteria, ya que esto puede modificar el comportamiento de corrosión que se tiene previsto.

Con este proyecto como guía se puede ampliar el número de probetas a estudiar en investigaciones futuras mediante un muestreo de tipo no probabilístico donde el investigador tiene el libre albedrío de escoger el número de elementos a su conveniencia aumentando su tamaño muestral, esto aportará con resultados con mayor fiabilidad y por ende la investigación será más minuciosa.

De acuerdo con las condiciones que se presentó en este trabajo respecto al ambiente corrosivo, se recomienda realizar más ensayos en función de otras condiciones respecto al pH ya sea más ácido o alcalino, temperatura, humedad, aplicadas en la vida real o ajustadas a alguna realidad, como por ejemplo una industria de lácteos.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM G1-03. *Práctica estándar para preparar, limpiar y evaluar muestras de prueba de corrosión*

CADENA; QUIROZ; ALDÀS; LASCANO; VALLE. “Corrosión metálica en ambientes exteriores e interiores en las ciudades de Quito y Esmeraldas”. REVISTA EPN [En línea], (Ecuador)33.p. 1-32. [Consulta:8 Noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Corrosi%C3%B3n-Met%C3%A1lica-en-Ambientes-Exteriores-e-en-las-Villota-Ch%C3%A1vez/d963830e25c1487ae2e28a924615c2ab34c5a1d1>

CELADA , Nardín. Diseño de un sistema de protección catódica por corriente impresa para incrementar la vida útil de los tanques estacionarios de almacenamiento de 5000 y 3000 galones en el grifo “San Juan”-Lambayeque. [en línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo-Perú. 2020.pp 14-20[Consulta:6 Noviembre 2021]. Disponible en : <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/2465>

JIMENEZ, Charlie; & OCHOA, Dany. Determinación del nivel de corrosión de las líneas de vapor en el área de vulcanización de la empresa Continental Tire S.A mediante el procesamiento digital de imágenes. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería), Cuenca-Ecuador.2015. pp.1-10. [Consulta:6 Noviembre 2021]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7379>

LINARES. *La corrosión atmosférica del acero al carbono en ambientes costeros.* [En línea]. Madrid:Consejo Superior de investigaciones científicas, 2018. [Consulta: el: 7 de Noviembre de 2021.]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/>.

LUCAS GRANADOS, Bianca; & SÁNCHEZ TOVAR, Rita. *Corrosión.* [En línea] Universidad Politécnica de Valencia. [Consulta: el: 10 de noviembre de 2021.] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/57467>

OTERO,Hilary. *Los elevados costes de la corrosión pueden ser disminuidos dramáticamente con soluciones adecuadas.* [blog]. [Consulta:6 noviembre].Disponible en: <https://institutoasteco.com/asteco/conoce-el-coste-de-la-corrosion-y-las-soluciones-de-loctite/#>

PAREDES, Josué; & PRIETO, Juan; & SANTOS, Eduardo. *Corrosión del acero en elementos de hormigón armado vigas y columnas*. [En línea], 2017, (Ecuador), pp. 1-4. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24384/1/Paper%20Paredes-Prieto.pdf>

ROSARIO, Samuel. "Protección catódica-diseño de ánodos de sacrificio". [En línea] 2017, (Perú) 7(13), pp. 37-40 [Consulta: 6 noviembre]. Disponible en: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/515/438>

ULICK R., Evans. *Corrosiones metálicas*. [En línea] España: Editorial Revertè, 2018. [Consulta: el: 7 de Noviembre de 2021.]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/105682>

LOACHAMIN NASIMBA, Jefferson Patricio. Diseño y simulación de protección catódica en la industria [en línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2019. [Consulta: 6 noviembre]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18175/1/UPS%20-%20ST004385.pdf>

GOMIS, Emilio. "La preparación superficial como factor capital de la protección anticorrosiva. Industria química" [En línea], (España) 33.p. 1-32. 2020, no 85, p. 36-39. [Consulta: 8 Noviembre 2021]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7728211>

GUTIÉRREZ QUISPE, Marlon Antony; LEÓN VILLANUEVA, Dalia Medalit. Influencia del Tipo de Preparación de Superficie y Tipo de Pintura Epoxicas Anticorrosiva sobre su Durabilidad, aplicado en Acero ASTM A-36, expuesto a un Ambiente Salino Controlado. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería), Trujillo, Perú. 2021. [Consulta: 9 noviembre]. Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/16802>

SSPC-SP1. *Estándares de preparación de superficies. Limpieza con solventes.*

SSPC-SP2. *Estandares de preparación de superficie. Limpieza con herramienta manual*

ASTM E797. *Practica estándar para medir el espesor mediante el método manual de contacto de pulso-con ultrasonido.*

SSPC-PA 1 *Especificación para la aplicación de pintura*

ZHAO, Péguy, & YING, Tao, & CAO, Fuyong, & ZENG Xiaoqin, & DING, Wenjiang.
Designing strategy por corrosion-resistant Mg Alloys based and film-covered models. [En línea],
2021. (Shangai) 10, p. 7. [Consulta:9 noviembre]. Disponible en:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2213956721002280?token=20A9670594196EC2E0B1BF9C76DF60E19CD7BEE8B4645955B9C7B343C2B9E2FC59F76F79C157B1D1B2C65088C5582505&originRegion=us-east-1&originCreation=20211110063342>

ANEXOS

ANEXO A: RETIRO DE PLACAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODO DE SACRIFICIO



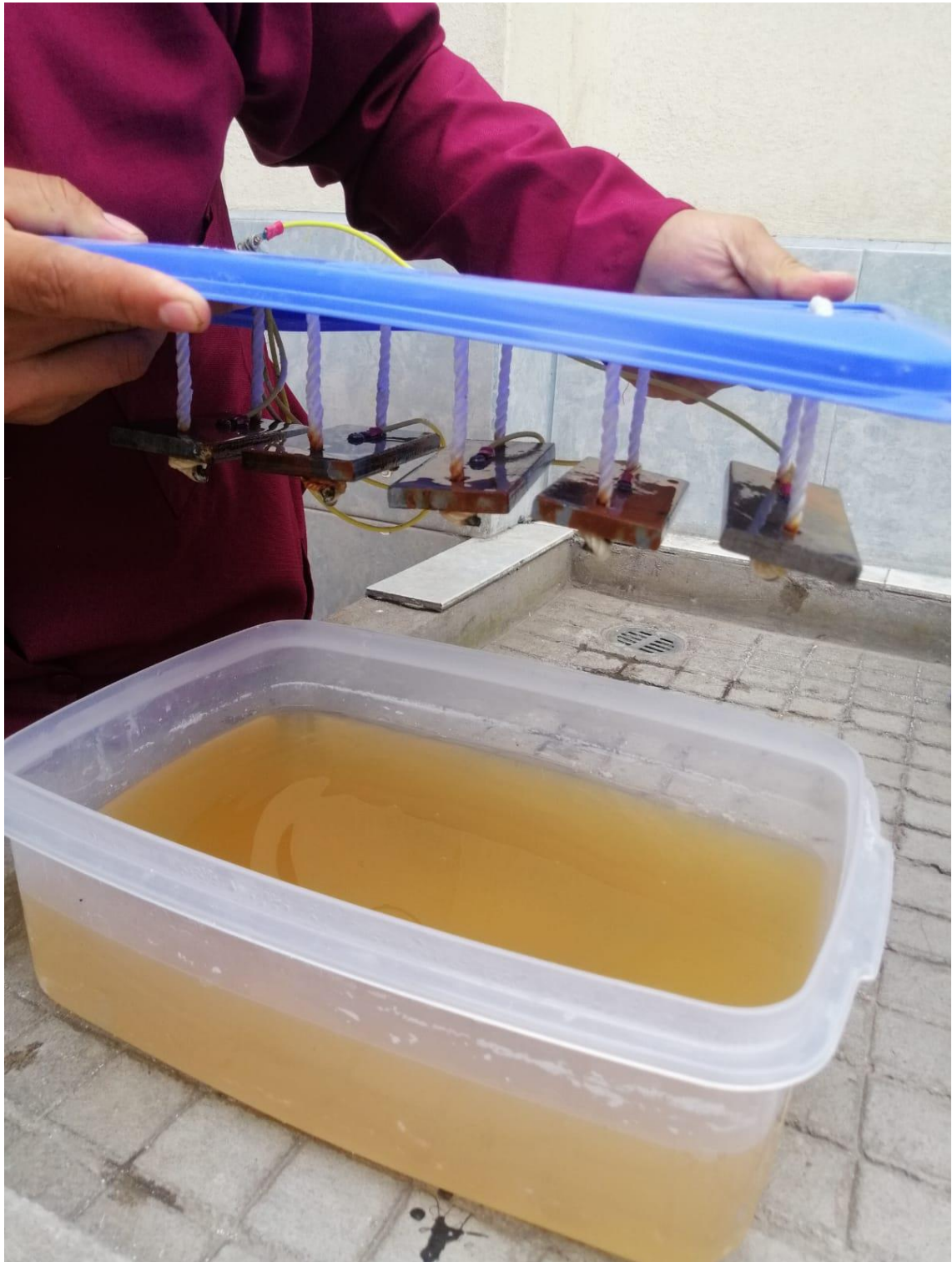
ANEXO B: RETIRO DE PLACAS DE CONTROL



ANEXO C: RETIRO DE PLACAS CON PINTURA EPÓXICA



ANEXO D: RETIRO DE PLACAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODO DE SACRIFICIO POR CORRIENTE IMPRESA



**ANEXO E: PLACA CON PINTURA EPÓXICA AFECTADA DESPUÉS DE LA PRUEBA
CORROSIVA**



ANEXO F: FICHA TÉCNICA DE LA PINTURA EPOXI POLIAMIDA



ACABADO EPOXI POLIAMIDA

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Producto de óptima calidad y alto brillo especialmente formulado para proporcionar un recubrimiento que forma una barrera de protección a equipos sometidos a condiciones de exposición a ambientes químicos y corrosivos proporcionándoles una alta resistencia contra la acción de los ácidos, álcalis, alcoholes, ésteres, diversos solventes, humedad, salitre, petróleo y sus derivados. Su uso está principalmente orientado a la protección de maquinarias, equipos, tanques, tuberías y todo tipo de estructuras en refinerías, embarcaciones, plantas químicas y petroquímicas, diques y astilleros, muelles y en general, en cualquier industria que requiera un excelente recubrimiento contra el daño ambiental para equipos e instalaciones; tanto en las superficies metálicas así como también en superficies de concreto, mampostería, madera, etc. Este acabado es recomendado para uso en interiores, donde se mantienen inalterables sus características de protección y brillo. También puede ser utilizado a la intemperie cuando se necesite proporcionar una máxima protección sin importar una pérdida gradual del brillo a través del tiempo.

CARACTERÍSTICAS

Color: Según carta de colores.
Acabado: Brillante.
Viscosidad: 500 - 1000 Cps sp 3 a 20 rpm a 25 °C.
Peso por galón: (3,40 ± 0,30) Kg/gal.
Vehículo: Epoxi/ Poliamida.
Tipo de pigmento: Orgánicos y anticorrosivos.
Tipo de solventes: Hidrocarburos aromáticos y oxigenados.
Sólidos por peso: (68 ± 3) %.
Sólidos por volumen: (39 ± 3) %.
Secamiento: Tacto 1 hora. Para repintar (10 - 12) horas. Duro 10 Horas. Para exponer a condiciones de inmersión ó condiciones ambientales extremas (6-7) días.
Inflamabilidad: Inflamable
Presentación: Parte A (Pigmentada) 2,84 Lts. Parte B (Catalizador) 0,946 Lts.
Rendimiento: (45 - 55) mts² por galón a 1,5 y 2 mils de espesor de película seca (25 a 30 mts² por galón para aplicación con brocha ó rodillo a un espesor de película seca de entre 2 y 3mils).

Proporciones de Mezcla	PRODUCTO	PARTES	VOLUMEN
	Fondo	3	3/4 Gal
	Catalizador	1	1/4 Gal
	Reductor	(15 - 20)%	Pistola Convencional

Vida útil: Una vez catalizado, la vida útil es de (8-10) horas, a 25 °C. A temperaturas superiores disminuye el tiempo de vida útil.

Aplicación: Brocha, Rodillo ó Pistola del tipo convencional.

PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES:

Diluyente: Se recomienda el uso del CONTROLADOR DE VISCOSIDAD PARA EPOXI QUIMICOLOR. Para aplicación a brocha o rodillo se puede utilizar el producto directamente sin diluir o con una reducción máxima del 10%. Para aplicación con equipos del tipo airless no se necesita dilución. Para aplicación con pistola convencional se recomienda una reducción con un 25% al 35%, hasta lograr una viscosidad de aplicación de 15" a 20" en Copa Ford N° 4 a una temperatura de 25°C.

Preparación de Superficie: Limpie bien la zona y acondiciónela utilizando lija o cepillo de alambre para obtener una superficie ligeramente rugosa y sin brillo con el objeto de lograr una buena adhesión. Considere adicionalmente el uso de medios mecánicos para superficies de hierro o acero.

FORMA DE APLICACIÓN

El producto puede ser aplicado en ambientes con humedad relativa de hasta el 80%. Para diferentes condiciones de uso se recomienda mantener los siguientes espesores de película seca (aplicación a pistola):

CONDICIONES DE USO	FONDO		ACABADO FINAL	
	Manos	Mils	Manos	Mils
Ambiente normal	2	3	2	3
Ambiente corrosivo/salinoso	3-4	4,5-6	3-4	4,5-6
Muy corrosivo/inmersión	4-6	6-9	3-4	4,5-6

PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES

-Mezclar bien la Base con el Catalizador Poliamida en las proporciones expuestas anteriormente, esperar unos veinte minutos antes de comenzar con la aplicación y luego aplicar; en el caso de aplicación a pistola, reducir el producto ya mezclado, filtrarlo y aplicarlo con una presión de 25 a 40 libras (para la pistola del tipo convencional).

-Evite la inhalación de sus vapores y el contacto prolongado con la piel. En caso de exposición prolongada con la piel o contacto accidental con los ojos, lavar con abundante agua durante 15 minutos y, si el ardor persiste consultar a un médico. En caso de ingestión accidental, NO INDUCIR EL VOMITO y acudir inmediatamente al médico con la etiqueta de este producto.

-El contenido de este producto es inflamable y sus vapores pueden ocasionar incendios, Mantener el envase bien cerrado en lugar limpio, seco y fresco, alejado del fuego, chispa o cualquier fuente de calor o ignición. NO reutilizar el envase.

-Mantener el ambiente de trabajo bien ventilado durante su aplicación y utilice implementos de seguridad debidamente aprobados (guantes, delantal, lentes protectores, mascarilla, etc.)

-En caso de incendio NO utilizar agua. Utilice solamente extintores de polvo químico seco o de anhídrido carbónico CO2.

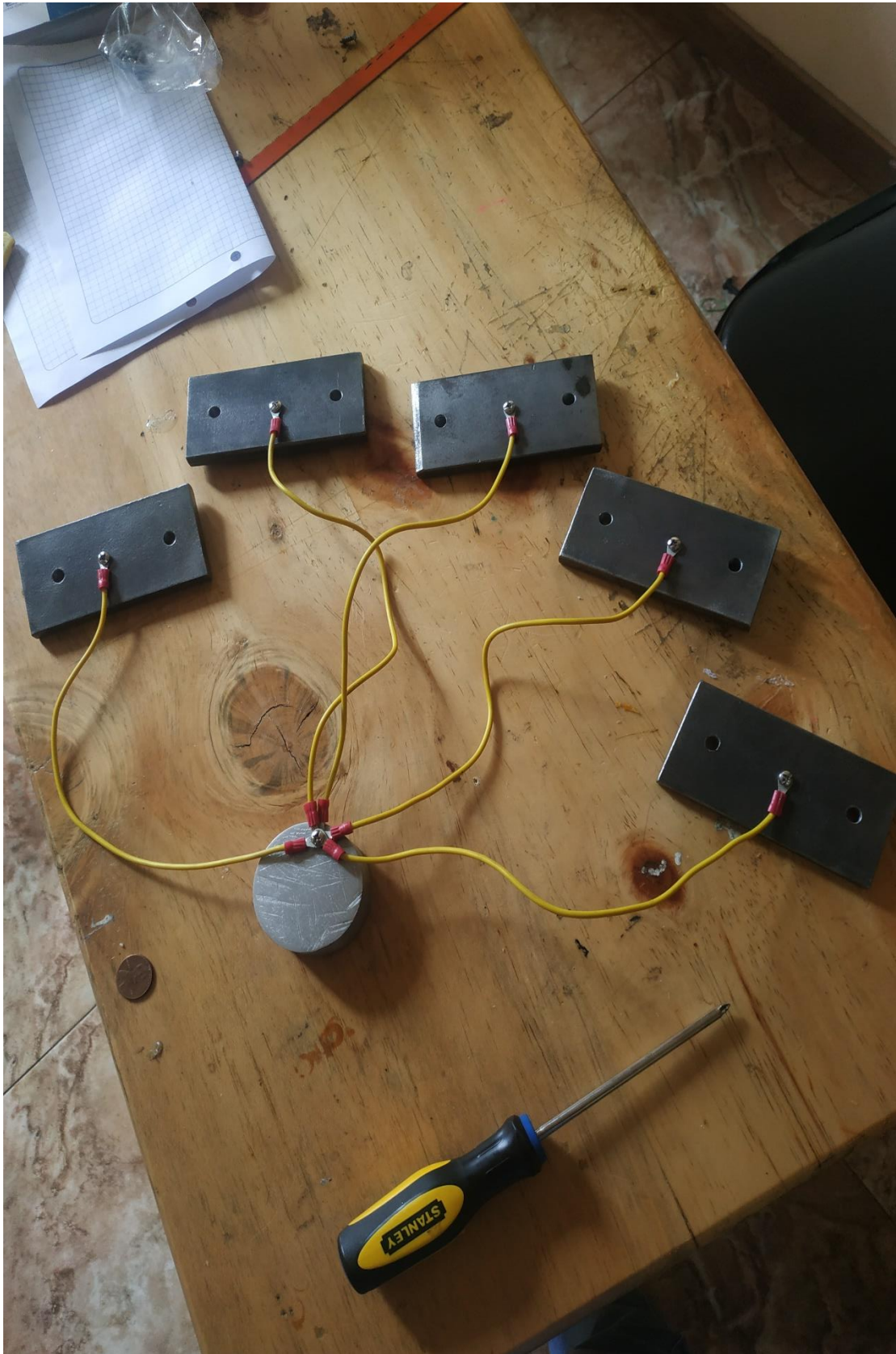
-Lea las instrucciones en las etiquetas de todos los productos antes de proceder a usarlos.

-Mantener este productos fuera del alcance de los niños.

ANEXO G: PERFORACIÓN PARA SUJECIÓN DE PLACAS



ANEXO H: PREPARACIÓN PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODO DE SACRIFICIO



ANEXO I: MEDICIÓN DE ESPESOR POR ULTRASONIDO A PLACA TESTIGO



ANEXO J: GEL PARA ACOPLAMIENTO ULTRASÓNICO



ANEXO K: COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS MUESTRAS

```
RGui (64-bit)
Archivo Editar Visualizar Misc Paquetes Ventanas Ayuda

R Console
> control=c(0.1107,0.0256,0.0511,0.0085,0.0937)
> epoxico=c(0.1022,0.0426,0.0596,0.0511,0.0256)
> anodo=c(0.0681,0.0085,0.0170,0.0085,0.0852)
> corriente=c(0.0256,0.0085,0.0085,0.0085,0.0937)
> shapiro.test(control)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  control
W = 0.93653, p-value = 0.6416

> shapiro.test(epoxico)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  epoxico
W = 0.92418, p-value = 0.5573

> shapiro.test(anodo)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  anodo
W = 0.80399, p-value = 0.0873

> shapiro.test(corriente)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  corriente
W = 0.67623, p-value = 0.005312

> t.test(control,epoxico=T,alternative="less")

      One Sample t-test
```

```
RGui (64-bit)
Archivo Editar Visualizar Misc Paquetes Ventanas Ayuda

R Console

      One Sample t-test

data:  control
t = 2.9714, df = 4, p-value = 0.9795
alternative hypothesis: true mean is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf 0.09947562
sample estimates:
mean of x
 0.05792

> t.test(anodo,control=T,alternative="less")

      One Sample t-test

data:  anodo
t = 2.2981, df = 4, p-value = 0.9584
alternative hypothesis: true mean is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf 0.0722094
sample estimates:
mean of x
 0.03746

> t.test(corriente,control=T,alternative="less")

      One Sample t-test

data:  corriente
t = 1.753, df = 4, p-value = 0.9228
alternative hypothesis: true mean is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf 0.0641787
sample estimates:
mean of x
 0.02896
```