



Universidad San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN
EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO**

Abdi Surriel Stuard Gil Méndez

Asesorado por el Ing. Manuel Emilio Figueroa Solares

Guatemala, octubre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPIEDAD ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN
EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ABDI SURIEL STUARD GIL MÉNDEZ

ASESORADO POR EL ING. MANUEL EMILIO FIGUEROA SOLARES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés De La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

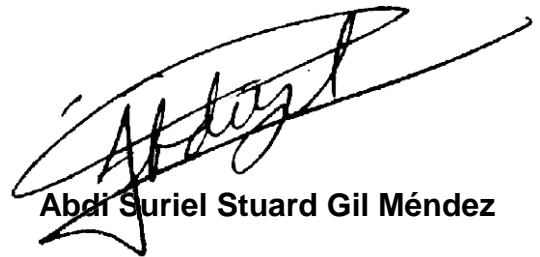
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha agosto 2018.



Abdi Suriel Stuard Gil Méndez

Guatemala 06 de mayo de 2020

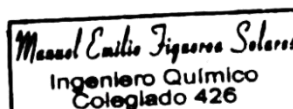
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Abdi Suriel Stuard Gil Méndez, quien se identifica con el registro académico 2013-14700 y con el CUI 2537 71943 0101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Manuel Emilio Figueroa Solares

ASESOR

Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 426



Guatemala, 30 de julio de 2020.
Ref. EIQ.TG-IF.026.2020.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **031-2018**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Abdi Surriel Stuard Gil Méndez**.
Identificado con número de carné: **2537719430101**.
Identificado con registro académico: **201314700**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Manuel Emilio Figueroa Solares, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Jorge Emilio Godínez Lemus
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



Guatemala, 29 de octubre de 2020.

Ref. EIQ.277.2020

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO** del(la) estudiante Abdi Suriel Stuard Gil Méndez, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

Williams G. Álvarez Mejía
"Id y Enseñad a Todos"
DIRECCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
Escuela de Ingeniería Química
Ing. Williams G. Álvarez Mejía, I.I.E.
DIRECTOR

Cc. Archivo
WGAM/impea



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA

DTG. 351.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPIEDADES ANTICORROSIVAS DE UN ACEITE PARA SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS DE ACERO NEGRO Y GALVANIZADO**, presentado por el estudiante universitario: **Abdi Suriel Stuard Gil Méndez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por su bendición, misericordia, protección, fuerza en momentos de debilidad y permitirme alcanzar esta meta.

Mis padres

Estuardo Gil y Elisa Méndez por haberme dado la oportunidad de desarrollarme como profesional, su amor, su apoyo incondicional y un excelente ejemplo de vida a seguir.

Mis hermanos

Anyi y Estuardo Gil por estar siempre presente, su complicidad, sus consejos y apoyo a seguir adelante.

Mi tía y prima

Josefa y Priscila Méndez por su cariño, cuidado y creer siempre en mí.

Mi abuela

Esperanza García por su sabiduría, amor y consejos.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la fuerza para seguir siempre adelante, su amor y sabiendo que toda buena dádiva viene de Él permitiendo convertirme en profesional.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por permitirme la educación superior y darme las herramientas para poder desarrollarme profesionalmente.
- Mis padres** Por acompañarme en cada etapa de mi vida universitaria, por su amor, su sacrificio y esfuerzo diario sabiendo que este logro no sería posible sin su apoyo incondicional.
- Ing. Emilio Figueroa** Por sus consejos, guía para tomar esta carrera universitaria y todo su apoyo brindado para culminarla.

Mis amigos

Por permitirme vivir la mejor etapa de mi vida agradezco a mis amigos de sistemas, químicos e industriales. En especial a Krisbel Orellana, Vallery Klimowitz, Roselin del Cid, Alejandra Martínez, José Amado y David Padilla.

Mi novia

Melannie Chávez por impulsarme siempre a alcanzar mis metas, su consejo, amor, paciencia, comprensión, amistad y su apoyo incondicional fueron vitales para alcanzar este logro sabiendo que lograremos grandes cosas juntos.

INDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. El acero	3
2.1.1. Acero negro o acero al carbono.....	3
2.1.2. Acero galvanizado	4
2.2. La corrosión en el acero	5
2.2.1. Definición y propiedades.....	8
2.2.2. Proceso de corrosión del acero galvanizado	10
2.3. Mecanismo de protección del acero galvanizado	12
2.3.1. Protección barrera	13
2.3.2. Protección barrera debido a los productos de corrosión de zinc.....	13

	Protección catódica	13
2.4.	Limpieza y decapado	14
	2.3.3.	
	2.4.1. Decapado	14
	2.4.2. Almacenaje.....	15
2.5.	Tratamientos químicos	15
2.6.	Ambientes corrosivos	16
	2.6.1. Atmósfera	18
	2.6.2. Agua.....	18
2.7.	Formas de corrosión	19
	2.7.1. Corrosión electroquímica.....	19
	2.7.2. Corrosión galvánica.....	22
	2.7.3. Corrosión atmosférica	23
	2.7.4. Corrosión uniforme	25
	2.7.5. Corrosión por picaduras	25
	2.7.6. Corrosión intergranular.....	27
2.8.	Aceite protector de metales.....	28
	2.8.1. Características	28
	2.8.2. Aplicaciones	28
	2.8.3. Cualidades	29
	2.8.4. Recomendaciones.....	29
	2.8.5. Aceite actual.....	29
	2.8.6. Aceite propuesto	30
2.9.	Ensayos de caracterización	30
	2.9.1. Ensayos acelerados	30

	Prueba de apilamiento húmedo	31
2.9.3.	Prueba de cámara o niebla salina	31
2.9.2.		
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	33
3.1.	Variables.....	33
3.2.	Delimitación del campo de estudio	33
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	34
3.4.	Recursos materiales disponibles	34
3.5.	Técnica cuantitativa	37
3.5.1.	Prueba de apilamiento húmedo	38
3.5.2.	Prueba de niebla o cámara salina	41
3.5.3.	Medición de la corrosión presente en las láminas ..	44
3.6.	Análisis estadístico	45
4.	RESULTADOS	49
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	61
	APÉNDICES	67

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Producción anual del acero a nivel mundial	5
2.	Óxido presente en una lámina de acero.....	6
3.	Micrografía de las capas intermetálicas de un convencional acero galvanizado obtenido por inmersión en caliente.....	9
4.	Representación esquemática de las etapas de corrosión del acero galvanizado	11
5.	Esquema de protección catódica del recubrimiento del zinc sobre el acero	14
6.	Reacciones metal-ambiente corrosivo	17
7.	Esquema de una corrosión electroquímica típica	20
8.	Tasa de corrosión (corriente)	23
9.	Corrosión uniforme.....	25
10.	Corrosión por picaduras	27
11.	Corrosión intergranular	28
12.	Prueba de apilamiento húmedo.....	39
13.	Prueba de niebla o cámara salina.....	42
14.	Cuantificación de óxido presente	44
15.	Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de apilamiento húmedo	49
16.	Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de apilamiento húmedo	50
17.	Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de cámara salina	51

18.	Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de cámara salina	52
-----	---	----

TABLAS

I.	Características de las capas intermetálicas de Fe-Zn del galvanizado por inmersión en caliente	9
II.	Productos formados por la exposición del zinc en diferentes medios	12
III.	Variables independientes y dependientes	33
IV.	Equipo de laboratorio a utilizar.....	35
V.	Cristalería a utilizar	36
VI.	Reactivos a utilizar.....	37
VII.	Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de apilamiento húmedo	45
VIII.	Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de cámara salina	46
IX.	Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de apilamiento húmedo	46
X.	Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de cámara salina	47
XI.	Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado y acero negro, al variar el aceite utilizado mediante el método de cámara salina y apilamiento húmedo	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Cm	Centímetros
cm²	Centímetros cuadrados
R²	Coeficiente de correlación de Pearson
F	F Fisher
F_c	F Fisher crítica
G	Gramos
MI	Mililitros
M	Molar
N_{Ox}	Número de cuadros oxidados
N_T	Número de cuadros totales
% <i>Ox_{aceite actual}</i>	Porcentaje de oxidación con el aceite actual
% <i>Ox_{aceite nuevo}</i>	Porcentaje de oxidación con el aceite nuevo
% <i>Ox_{ah}</i>	Porcentaje de oxidación en la prueba de apilamiento húmedo.
% <i>Ox_{cs}</i>	Porcentaje de oxidación en la prueba de cámara salina
T	Tiempo (días).

GLOSARIO

Acero galvanizado	Es un tipo de acero recubierto con varias capas de zinc. El recubrimiento de zinc protege al acero de la oxidación, haciendo que sea un material más duradero y resistente.
Acero negro	Es el hierro normal que sale directamente del proceso de fundición. Este tipo de acero no ha pasado por ningún tratamiento.
Corrosión	Es el proceso de degradación de materiales metálicos, como consecuencia de una reacción óxido-reducción, al estar en contacto con factores de su entorno.
Decapar	Proceso donde las piezas metálicas son inmersas en disoluciones muy concentradas de ácido clorhídrico, para determinar la concentración de zinc que posee.
Oxidación	Es el proceso donde los átomos de metal pasan de un estado neutral a una carga positiva de iones, al estar en contacto con el oxígeno, produciendo el óxido.

Pasivante	Es el agente encargado de formar una película relativamente inerte sobre la superficie de un material metálico, protegiéndolo contra de la acción de agentes oxidantes externos.
Recubrimiento metálico	Capa protectora que tienen la finalidad de retrasar y/o reducir el deterioro de estructuras fabricadas con acero.
Siderúrgica	Es una planta industrial dedicada al proceso completo de producir acero a partir del mineral de hierro.
Tratamiento térmico	Es un proceso en el cual se mejora las propiedades físicas y mecánicas del material mediante un calentamiento a temperaturas adecuadas y una velocidad controlada de enfriamiento.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se analizaron las propiedades anticorrosivas de un nuevo aceite, comparándolo con las propiedades del aceite comercial que se utiliza en una empresa siderúrgica trasnacional, por medio de la aplicación de ambos aceites en láminas de acero galvanizado, que poseen un tratamiento térmico con zinc, y láminas de acero negro, que no poseen ningún tratamiento. La comparación de los aceites se realizó a partir del porcentaje de corrosión que presentaron las diferentes láminas con ambos aceites, en función del tiempo, con el fin de proponer el aceite nuevo como una mejor alternativa para el uso interno de la empresa.

Se analizó la corrosión mediante dos pruebas, la prueba de cámara salina y la prueba de apilamiento húmedo. La primera prueba consistió en exponer el material a condiciones rigurosas en un ambiente húmedo con sal, el segundo método consistió en colocar una cama de agua entre cada lámina, apilarlas y colocarlas en una bolsa hermética para evitar que el agua se filtrara, exponiéndola posteriormente a la intemperie. Finalmente se cuantificó el óxido que presentaron las muestras de láminas de acero galvanizado y acero negro, para luego graficar el comportamiento de ambos aceites en función del tiempo.

Se determinó que el aceite actual permite proteger el material de oxidación 7 días más para la prueba de apilamiento húmedo y 1 día adicional para la prueba de cámara salina que el aceite nuevo, sin embargo, la calidad – precio presentada en el aceite nuevo permitiría sustituir el aceite actual parcialmente a corto plazo y totalmente a largo plazo.

OBJETIVOS

General

Evaluar las propiedades anticorrosivas de un aceite para su aplicación en productos de acero negro y galvanizado, poniéndolo como una alternativa al uso del aceite actual en la industria siderúrgica.

Específicos

1. Determinar el porcentaje de óxido presente en el acero negro en función del tiempo, utilizando el aceite actual y el aceite nuevo como recubrimiento en la prueba de apilamiento húmedo.
2. Determinar el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado en función del tiempo, utilizando el aceite actual y el aceite nuevo como recubrimiento en la prueba de apilamiento húmedo.
3. Determinar el porcentaje de óxido presente en el acero negro en función del tiempo, utilizando el aceite actual y el aceite nuevo como recubrimiento en la prueba de cámara salina.
4. Determinar el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado en función del tiempo, utilizando el aceite actual y el aceite nuevo como recubrimiento en la prueba de cámara salina.

5. Determinar la viabilidad del aceite propuesto en producto terminado de acero negro y acero galvanizado.

HIPÓTESIS

- Hipótesis nula (H0):

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1):

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0):

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1):

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0)

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1)

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0)

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1)

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0)

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1)

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0)

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1)

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0)

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1)

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite actual con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0)

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de

cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1)

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina utilizando como recubrimiento el aceite nuevo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis nula (H0)

No existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado y acero negro, al variar el aceite utilizado mediante el método de cámara salina y apilamiento húmedo con un nivel de significancia del 5 %.

- Hipótesis alternativa (H1)

Existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado y acero negro, al variar el aceite utilizado mediante el método de cámara salina y apilamiento húmedo con un nivel de significancia del 5 %.

INTRODUCCIÓN

La empresa siderúrgica trasnacional busca proveer a sus clientes el acero con las mejores condiciones de calidad posibles. Los rollos de acero importados de Rusia, México y Japón entran a la planta como acero negro y son trasladados al área de galvanizado donde, mediante el uso de una paila, se le aplica una capa de galvanizado según las especificaciones del cliente, debido a que la capa de galvanizado está en función de la cantidad de gramos/cm² que desee el cliente según el destino de uso, así mismo varían los costos del material, posteriormente en la línea de producción se le adhiere una capa de cromo, conocido como el pasivante.

El material galvanizado necesita una capa protectora adicional para disminuir la corrosión que pudiese presentarse en el producto terminado, el cual es un aceite protector que funciona de forma positiva contra la humedad del ambiente, que es la condición que provoca usualmente la corrosión.

Al finalizar el proceso de galvanizado y adherencia del pasivante en el horno, se le aplica una capa delgada del aceite protector, finalmente el operario le rocía una última capa de aceite protector en los costados del rollo, para luego ser trasladado al área de embarques y transformados, donde los equipos en conjunto con los operarios le brindan el perfil deseado a los rollos de acero galvanizado, es decir, transforman los rollos en lámina de primera calidad según las especificaciones del cliente.

El aceite protector que se utiliza actualmente es relativamente caro, además ha existido en muy pocas ocasiones el inconveniente que por falta de control y la demanda alta de producción que tiene la empresa siderúrgica, la línea de producción se ha detenido totalmente debido a la falta de aceite protector que no fue solicitado por la bodega de suministros; es por ello que se desea buscar otro tipo de aceite que cumpla con las condiciones de calidad mínimas requeridas para evitar que el material sufra corrosión alguna y disminuya los costos de operación del producto terminado para obtener mayores ganancias, brindando siempre la calidad conocida por los clientes de la empresa siderúrgica trasnacional.

Para determinar la viabilidad de un nuevo aceite protector que cumpla con todos los requerimientos deseados por la empresa es de vital importancia realizar dos pruebas comparativas donde se evalúan mediante una serie de repeticiones la aparición de óxido rojo en las pruebas de acero negro y la aparición de óxido blanco en las pruebas de acero galvanizado.

Al finalizar la fase experimental se encontró la aparición de óxido rojo y óxido blanco en las láminas de acero negro y acero galvanizado respectivamente, demostrando las hipótesis propuestas mediante un análisis de varianza (ANOVA) presentando porcentajes de corrosión en las láminas con el aceite propuesto y aceite actual muy similares que pueden atribuir a la sustitución parcial del aceite actual a corto plazo y total a largo plazo generando así mayores ingresos por el bajo costo del aceite propuesto.

1. ANTECEDENTES

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, se realizó el estudio de investigación titulado Propuesta de control estadístico para el proceso de galvanizado de alambre por inmersión en caliente, en esta investigación se localizaron las operaciones que son susceptibles a cambios, tales como el decapado y paila de galvanizado. Cada operación está comprendida de una serie de variables, dentro de las que pueden mencionarse concentración del ácido clorhídrico, porcentaje de hierro disuelto, densidades relativas y temperaturas. Para Mazariegos los defectos en los productos terminados, tales como la mala adherencia de zinc, manchas blancas y alambre quemado, son consecuencias provocadas por la falta de control en las variables del proceso.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se realizó el estudio de investigación titulado Conocimiento y prevención de la corrosión, se expone que la corrosión no se puede evitar, más el objetivo principal está en controlarla, ya sea en el metal, en la interface o en el medio ambiente corrosivo. Se tienen distintos grados de protección indica Vallejo, y según su grado de importancia están; el diseño en el cual se evitan los puntos sensibles de ataque, se utilizan recubrimientos protectores metálicos y no metálicos, se deciden los materiales resistentes a la corrosión, se hace uso de protección catódica, y finalmente se alteran los medios por medio de inhibidores.

En la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la División de Estudios de Posgrados de la Universidad Autónoma de Nuevo León, se realizó el estudio

de investigación titulado Evaluación de la corrosión atmosférica del acero expuesto en diversas atmosferas, hace énfasis en que uno de los problemas más graves causados por los avances de la tecnología, es la corrosión de los materiales como consecuencia de la agresividad atmosférica, incluyendo la destrucción de las estructuras metálicas, construcciones, metales y aleaciones, debido a que 80% están expuestos a este medio. Considera Garcés que se tiene un conocimiento más preciso de las pérdidas, directas e indirectas, que la corrosión significa para los países desarrollados. Está aceptado que el 50% de estas pérdidas es debido a la corrosión atmosférica.

En la Universidad Tecnológica de Pererira, Colombia realizó un artículo científico publicado en Scientia Et Technica titulado Corrosión del acero al carbono, acero galvanizado y aluminio en diferentes atmósferas colombianas, realizó un estudio de corrosión atmosférica que incluye ambientes de diferente agresividad. En este trabajo comenta Vega se evaluó el comportamiento del acero al carbono, acero galvanizado y aluminio expuestos durante 8 meses en 21 sitios colombianos de diferente agresividad.

En la Universidad Católica de Perú de la Escuela de Posgrado, se realizó el estudio de investigación titulado Estudio del tanato de zinc como pigmento inhibidor para el pintado del acero galvanizado, se estudia la capacidad de protección que puede ofrecer el tanato de zinc, un nuevo pigmento anticorrosivo obtenido a partir del polvo de tara (*Caesalpinia Spinosa*), y óxido de zinc, sobre el acero galvanizado nuevo y envejecido, es decir, con productos de corrosión del zinc y acero sobre su superficie. En el 2017 Chumán comenta que el nuevo pigmento pretende reemplazar a los pigmentos convencionales. Se evaluó el comportamiento anticorrosivo en condiciones naturales y mediante ensayos acelerados. Fueron evaluados en ensayos de corrosión acelerada, en cámara de dióxido de azufre y niebla salina, en donde se evaluó el grado de oxidación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El acero

El acero es distinto al hierro y ambos materiales no deben confundirse. La diferencia principal entre el hierro y el acero se halla en el porcentaje de carbono: el acero básicamente es hierro con porcentaje de carbono de entre el 0,03 % y el 1,075 %.

Los componentes principales que constituyen el acero se encuentran en la naturaleza con abundancia. El acero puede ser reciclado de forma indefinida sin perder sus atributos, lo que favorece su producción a gran escala.

2.1.1. Acero negro o acero al carbono

Si tenemos el hierro en una aleación con el carbón en una proporción menor al 2 % en carbono es denominado acero al carbono o acero negro. La dureza y la resistencia mecánica pueden ser determinadas por la proporción de carbono y el tratamiento térmico del acero, por ellos es necesario tener bajo estrictas condiciones de control el contenido de carbono que es sometido posteriormente a un tratamiento térmico que permite darle las cualidades apropiadas de acuerdo al futuro uso.

Según la cantidad de carbono presente, los aceros pueden ser definidos:

- Aceros con bajo contenido en carbono (menos del 0,30 %)
- Aceros con medio contenido en carbono (entre 0,30 y 0,50 %)
- Aceros con alto contenido en carbono (más de 0,5 %)

La dureza notable cuando se realiza el temple no la adquieren los aceros de bajo carbono, ya que únicamente mejoran sus propiedades mecánicas como la rigidez y resistencia. Los de medio contenido de carbono pueden adquirir una dureza particularmente mayor y resistencia en gran medida, mientras los de alto carbono endurecen notablemente y se tornan frágiles.

2.1.2. Acero galvanizado

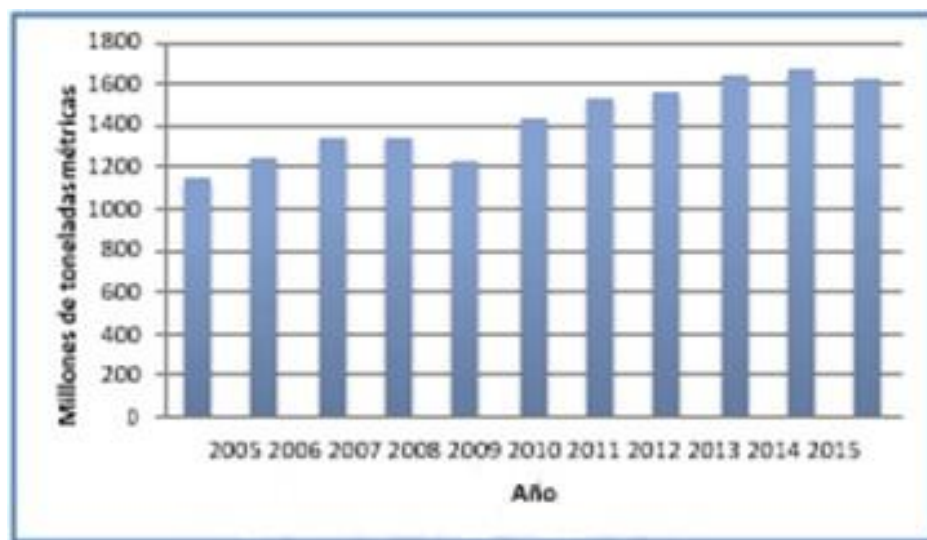
El zinc y aleaciones base zinc se han sido utilizados desde tiempos remotos como revestimientos protectores contra la corrosión para productos de hierro y acero. Su efectividad se debe a que este metal actúa como una capa barrera muy adherente y, además, proporciona una protección galvánica; es decir, actúa como ánodo de sacrificio.

Durante los últimos años se ha registrado una producción anual de más de 13 millones de toneladas de zinc en el mundo, utilizándose más del 50% en la industria del acero galvanizado. Las principales potencias son productores de zinc y anualmente se tiene miles de toneladas métricas de su producción a nivel mundial como se muestra en la figura 1.

Existen diversas técnicas para aplicar un recubrimiento de zinc, entre ellas se encuentran: el galvanizado por inmersión en caliente (*Hot-dip galvanizing*), el

electro-zincado, la metalización de zinc (*Hot spray zinc*), el zincado mecánico y las pinturas ricas en zinc. De todas las técnicas mencionadas, el galvanizado por inmersión en caliente es considerado como uno de los más efectivos métodos de aplicación del zinc.

Figura 1. **Producción anual del acero a nivel mundial**



Fuente: elaboración propia, adaptado con base en la Asociación Internacional del Acero.

2.2. La corrosión en el acero

La corrosión en el acero y en otros metales, no es más que el desgaste que sufren los metales por la continua exposición a los factores climáticos o externos que hacen de las suyas alterando la composición eléctrica del metal y logrando así que se deterioren las moléculas y partículas, con lo que terminará por hacerse una completa destrucción de las propiedades físicas de fuerza y resistencia que el metal ofrece, siendo ahora débil y nada resistente a la tensión y a la exposición que debe soportar este tipo de estructuras a cualquier construcción.

Se entiende como oxidación a la reacción química llevada a cabo donde un metal o un no metal cede electrones. La reducción es básicamente lo contrario a la oxidación y se entiende como una especie que acepta los electrones. Las reacciones redox (óxido-reducción), siempre se dan juntas, cuando sustancia se reduce, siempre es por la acción de otra que se oxida.

El nombre de "oxidación" proviene de que, en la mayoría de estas reacciones, la transferencia de electrones se da mediante la adquisición de átomos de oxígeno (cesión de electrones) o viceversa.

Figura 2. **Óxido presente en una lámina de acero**



Fuente: HARALD, Biebel. *Hierro, rusty, láminas de metal, óxido, acero-placa.*
<https://www.alamy.es/foto-hierro-rusty-laminas-de-metal-oxido-acero-placa-telon-de-fondo-fondo-placa-132178331.html>. Consulta: 14 de mayo de 2018.

La corrosión suele ocurrir de diversas formas y se clasifican según la apariencia del metal corroído. Las formas más comunes que afectan a los metales se pueden determinar mediante los siguientes tipos de corrosiones:

- Corrosión uniforme: es la más importante, común, simple y conocida, y ocurre en metales y aleaciones relativamente homogéneas expuestas a ambientes similares.
- Corrosión localizada: esta corrosión comienza a desarrollarse con un metal en un ambiente que no se encuentra de forma homogénea y la diferencia proviene de orígenes múltiples tanto a nivel de material como del medio ambiente.
- Corrosión galvánica: se lleva a cabo cuando 2 metales distintos, se encuentran en contacto eléctrico (o conectados por un conductor eléctrico) son expuestas a una solución conductora de electricidad.
- Picaduras: se caracteriza por un ataque localizado que está generalmente asociado a la fractura local de una película pasiva de la estructura de acero.
- Agrietamiento: es bastante parecido a la que se genera por picaduras, únicamente difiere en que el agrietamiento ocurre en regiones de pequeño volumen que son confinadas y donde el medio presenta estancamiento, tales como los espacios existentes entre dos placas remachadas o atornilladas, regiones sobre juntas, entre otros.

Se estimó que la corrosión genera un costo total de \$ 2,5 trillones, equivalente a 3,4 % del producto bruto interno (PBI), en el año 2013. Tales pérdidas económicas se clasifican en pérdidas directas e indirectas. Las pérdidas directas son aquellos costos necesarios para la reparación o reemplazo de estructuras, maquinarias o equipos que han sido afectados por la corrosión,

mientras que los costos indirectos son más difíciles de establecer y podemos ejemplificarlos como: pérdidas por parada de producción, pérdidas de productos o por contaminación de los mismos, pérdidas por accidentes, lesiones y hasta las muertes, entre otros.

Es por ello que la búsqueda de métodos de protección del acero frente a la corrosión atmosférica se ha vuelto un asunto de suma importancia. Por ende, los recubrimientos metálicos y orgánicos son los métodos de protección más utilizados, y tienen la finalidad de retrasar o reducir el deterioro de estructuras fabricadas con acero. Entre ellos, los recubrimientos de zinc son, probablemente, los más efectivos para la protección del acero contra la corrosión.

2.2.1. Definición y propiedades

El galvanizado por inmersión en caliente se obtiene por inmersión de las piezas a proteger en un baño de zinc fundido. En este proceso tiene lugar la interdifusión de ambos elementos, formándose varias capas aleadas y una capa externa de zinc de la misma composición que el baño de galvanizado. La figura 3 muestra una micrografía de las capas formadas al solidificar el recubrimiento de galvanizado, mientras que la tabla 1 brinda las características más relevantes de cada capa.

Los parámetros que van a caracterizar el recubrimiento del galvanizado son: la temperatura del baño de zinc fundido, el tiempo de inmersión, la velocidad con la que se retira el material y la composición del baño. Por otro lado, el galvanizado en continuo o en línea, es un proceso derivado del galvanizado por inmersión en caliente. Este proceso es aplicado generalmente para láminas de acero, que son continuamente inmersas en el baño fundido. La diferencia metalúrgica de ambos

procesos es que en el galvanizado en continuo hay poca presencia de aleación hierro/zinc.

Figura 3. **Micrografía de las capas intermetálicas de un convencional acero galvanizado obtenido por inmersión en caliente**



Fuente: CERVANTES, Benjamín. *¿Qué es el acero?* <https://www.aacero.org/es/page/el-acero/que-es-el-acero>. Consulta: mayo de 2018.

Tabla I. **Características de las capas intermetálicas de Fe-Zn del galvanizado por inmersión en caliente**

Variables	Fase			
	η -eta	ζ -zeta	δ -delta	γ -gamma
Estequiometría	Zn	FeZn ₁₃	FeZn ₁₀	Fe ₃ Zn ₁₀
% en peso de hierro	0	5-6	7-11,5	23,5-28
Estructura cristalina	HCP	Monoclínico	Hexagonal	BCC
Átomos/Celda unitaria	6	28	555	52
Dureza (DPN)	70	179	244	250

Fuente: elaboración propia, adaptado con base en SHIBLI, Sims.

El acero galvanizado es el método de protección principalmente utilizado en el sector de construcción, también es usado en la industria automovilística, y para la protección de puentes, oleoductos, torres de refrigeración, y para aumentar la vida útil de electrodomésticos, ferrocarriles, obras de electrificación, entre otros. Esta técnica genera una alta demanda mundial, porque brinda una excelente resistencia a la corrosión y puede ser aplicado a distintas formas de piezas. Además, posee una baja densidad, bajo costo y puede ser reciclado.

2.2.2. Proceso de corrosión del acero galvanizado

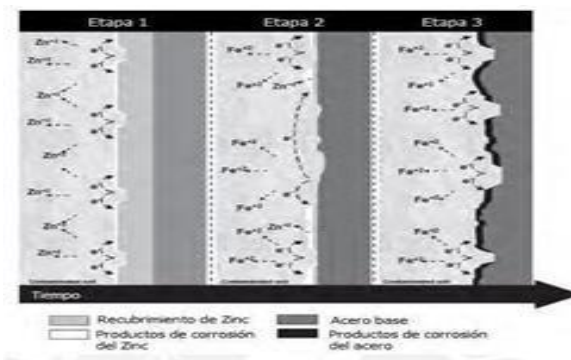
El proceso de corrosión del acero galvanizado es complejo y ha sido descrito en 3 etapas. La figura 4, esquematiza tales etapas. En la primera etapa toma lugar la disolución de la capa de zinc, la cual es reemplazada progresivamente por la formación de productos de corrosión del zinc, principalmente del óxido de zinc, la cual forma una capa adherente, porosa, de color blanco. Además, en esta etapa, la protección galvánica que el zinc otorga al acero ocurre cuando pequeñas áreas del acero son expuestas al medio ambiente debido a rasguños u otras imperfecciones. En la segunda etapa, se evidencia un incremento en el espesor de la capa de productos de corrosión, mientras que el zinc se agota. Durante esta etapa, el frente de corrosión alcanza la capa de aleación de Zn-Fe y el acero galvanizado experimenta un cambio de su potencial de corrosión a valores más nobles. Por último, en la tercera fase, la velocidad de corrosión del hierro incrementa rápidamente, debido a la ausencia de la capa de zinc y sus óxidos correspondientes, que protegían al sustrato.

Los productos de corrosión del zinc expuesto a la atmósfera son influenciados por la presencia de los constituyentes del aire, tales como CO₂, SO_x y Cl⁻ y por la humedad presente. Los productos de reacción más frecuentes

son presentados en la tabla 2. De los productos generados, resalta la pátina de zinc, compuesta por el hidróxido de zinc (producto de la reacción entre el zinc y la humedad), y las sales básicas de zinc formadas. Por consiguiente, la composición de la pátina de zinc dependerá del medio de exposición, y también del tiempo al que estará expuesto el material. Entre ellas, la pátina de zinc compuesta por una película básica de carbonato de zinc (formada por el CO₂ del medio) se caracteriza por ser una capa muy adherente, relativamente insoluble y responsable de la protección tipo barrera contra la corrosión.

En un ambiente marino, que es húmedo y salobre, tienden a formarse en la superficie cloruros de zinc y oxicloruros, que junto a las partículas de sales precipitadas aceleran la corrosión del sustrato. Por otro lado, en una atmósfera ácida, generada en una zona industrial, la capa de zinc se disuelve relativamente de manera rápida formando sulfato de zinc. Este compuesto se hidroliza con la humedad del ambiente, reduciendo rápidamente la capa protectora de galvanizado.

Figura 4. **Representación esquemática de las etapas de corrosión del acero galvanizado**



Fuente: PADILLA, Vivian. *Etapas del acero galvanizado*. <https://curiosoando.com/que-es-el-acero-galvanizado>. Consulta: febrero de 2018.

Tabla II. **Productos formados por la exposición del zinc en diferentes medios**

Principales reacciones en medio urbano	
Formación de óxido de zinc:	$2\text{Zn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{ZnO}$
Formación de hidróxido de zinc:	$2\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Zn(OH)}_2$
Formación de la pátina de zinc:	$5\text{Zn(OH)}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn(OH)}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
Principales reacciones en atmosfera salina y marina	
Formación de Cloruro de zinc	$2\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 2\text{NaCl} \rightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{Zn(OH)}_2 + 2\text{NaOH}$
Formación de Oxiclورو de zinc	$2\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{NaCl} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Zn(OCl)}_2 + 4\text{NaOH}$
Bajo depósito de sales	$\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ (Incrustación de sales en la superficie)
Principales reacciones en atmosfera industrial	
Formación de Sulfato de zinc	$\text{Zn} + \text{O}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{ZnSO}_4$
Disolución de la pátina de zinc	$2\text{Zn(HCO}_3)_2 + \text{O}_2 + 2\text{SO}_2 \rightarrow 2\text{ZnSO}_4 + 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
Hidrólisis del sulfato de zinc	$2\text{ZnSO}_4 + 2\text{SO}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{ZnSO}_4 + 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Fuente: elaboración propia, adaptado con base en EIJSVERGEN, Johann.

2.3. Mecanismo de protección del acero galvanizado

La efectividad del acero galvanizado se debe a la combinación de tres distintos mecanismos: 1) el efecto barrera debido a la capa de zinc; 2) el efecto barrera de la capa formada por los productos de corrosión del zinc 3) la acción catódica que otorga la interacción galvánica del zinc con el acero. A continuación, se detallará brevemente los mecanismos de protección.

2.3.1. Protección barrera

Se basa en el aislamiento del acero con el ambiente y los electrolitos, el sistema barrera será eficiente mientras el recubrimiento de zinc permanezca intacto e impenetrable.

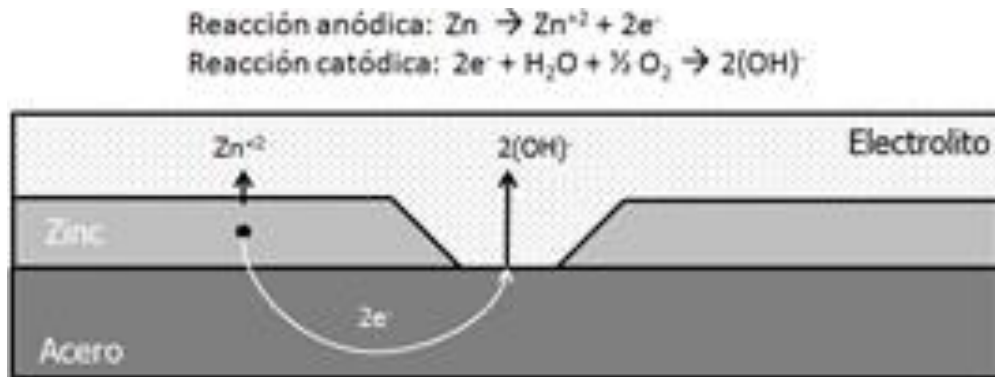
2.3.2. Protección barrera debido a los productos de corrosión de zinc

La reacción del recubrimiento de zinc con la atmosfera forma una capa de productos de corrosión, entre ellos la pátina de zinc, que impermeabiliza el metal a proteger de los agentes externos.

2.3.3. Protección catódica

El mecanismo por protección catódica también es conocido como protección por sacrificio, y es presentado en la figura 5. El zinc por ser un metal más activo que el hierro actúa como ánodo y el hierro por ser más noble actúa como cátodo. Por tal motivo, al estar conectados eléctricamente el zinc y acero, y en presencia de un electrolito el zinc empieza a consumirse (corroerse), mientras que el acero es protegido. Debido a la protección catódica, el galvanizado será capaz de proteger al acero cuando este es expuesto a la atmósfera, por posibles arañazos, cortes, entre otros.

Figura 5. **Esquema de protección catódica del recubrimiento del zinc sobre el acero**



Fuente: PORTER, Ferney. *Protección del acero galvanizado*.

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn104.html>. Consulta: febrero de 2018.

2.4. Limpieza y decapado

En el departamento de calidad, se estima la cantidad de gramos por centímetro cuadrado de zinc que posee una lámina de acero galvanizado utilizando una solución de ácido clorhídrico al 1,1 M. Algunos materiales quemarán si permite que ellos entren en contacto con su piel u ojos. Algunos también pueden ser venenosos. Si estos materiales son utilizados adecuadamente, no son peligrosos. Para su propia protección, debe aprender a cómo manejarlos con seguridad.

2.4.1. Decapado

En general todos los productos deben ser decapados en solución ácida antes de la galvanización en inmersión caliente. Los ácidos más comúnmente utilizados son el sulfúrico, fluorhídrico, muriático y clorhídrico.

Las quemaduras con ácido son muy dolorosas para la piel y los ojos. Ellas sanan muy lentamente y las quemaduras severas pueden ser fatales.

Respirar los vapores del ácido es doloroso y dañino. Se debe tener mucho cuidado al manejar ácido y al trabajar cerca de los tanques de decapado.

2.4.2. Almacenaje

- Los ácidos debieran ser almacenados en un lugar fresco, bien ventilado
- No almacenar el ácido cerca de tuberías calientes ni bajo el sol. Puede explotar.

2.5. Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos, tradicionales, utilizados sobre la superficie de acero galvanizado son el fosfatado y el cromatado. Tales métodos, también conocidos como tratamientos de conversión, tienen como objetivo mejorar la adhesión de la pintura y la resistencia a la corrosión. Además, el fosfatado reduce el desgaste, mejora la resistencia eléctrica y otorga características estéticas, por lo que es usado en diversas industrias.

El tratamiento de fosfatado sobre la superficie de zinc radica en la formación de una película insoluble y protectora, con estructura cristalina. La composición del recubrimiento formado está influenciada por diversos factores, tales como, el método de aplicación (rociado o inmersión), por los compuestos químicos del baño, el tipo y cantidad de aceleradores adicionados, entre otros. Generalmente, el medio químico de conversión más utilizado para piezas galvanizadas consiste

en una solución de fosfato ácido de zinc ($Zn(H_2PO_4)_2$), junto con compuestos oxidantes, aceleradores, por ejemplo, el nitrato, nitrito, clorato, entre otros.

Similarmente, el proceso de cromatado forma una película protectora sobre el sustrato metálico, dicha película es producto de la reacción entre los iones del metal base con compuestos químicos a base de cromo, entre ellos el ácido crómico (H_2CrO_4), como compuesto principal. Sin embargo, el uso de cromo ha sido extensamente restringido, debido a que el $Cr+6$ es altamente tóxico y cancerígeno para la salud y también generan un impacto negativo para el medio ambiente.

2.6. Ambientes corrosivos

El medio ambiente corrosivo, desempeña un papel fundamental y condiciona el comportamiento del metal, entre las características químicas esenciales del medio ambiente, se señalan:

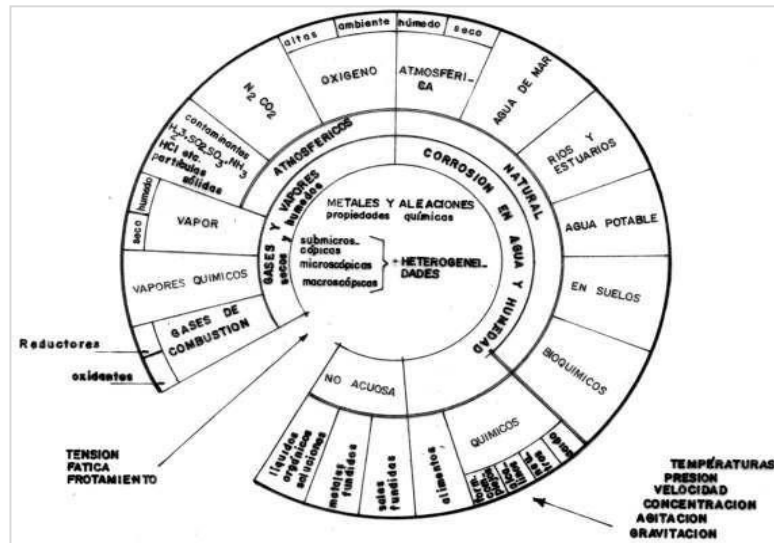
- La composición del medio con la concentración de cada componente, no olvidando las impurezas que pueden tener un papel más importante que los componentes principales.
- En el caso de un líquido el PH.
- En el caso de una solución, la dosificación en oxígeno o gases disueltos, que a su vez pueden depender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

Los efectos de estos factores químicos pueden depender de las condiciones físicas del medio mismo como: de su estado físico; de la temperatura, no solo del medio, sino también del metal, que muchas veces son diferentes; y del movimiento relativo del medio.

La figura 6 muestra el panorama tan vasto de relaciones metal ambiente que se presentan en la práctica. Observando el centro de la figura 6, se ve que el metal puede tener heterogeneidades que influyen en el proceso de corrosión cambiando sus propiedades químicas.

Se observa que los metales pueden estar sujetos a influencias mecánicas, tensión, fatiga, frotamiento, entre otros.

Figura 6. Reacciones metal-ambiente corrosivo



Fuente. VELÁSQUEZ, Pedro. *Corrosión e incrustación en tuberías*.

<https://cienciaonthecrest.com/2016/10/13/la-corrosion-de-los-metales/>. Consulta: mayo de 2018.

Lo anterior en referencia al metal, en el medio ambiente el número de parámetros aumenta considerablemente y si además se añaden las variables de concentración, presión, temperaturas, entre otros, se llega a la siguiente conclusión.

De que el número de variables que afectan los problemas de corrosión es tan grande, que es imposible encontrar métodos únicos que ofrezcan solución para todos los casos posibles, por tanto, el número de métodos anticorrosivos también tiene forzosamente que ser muy numeroso.

2.6.1. Atmósfera

Aunque la corrosión atmosférica no es espectacular, el costo sí lo es, ascendiendo a varios billones de dólares anuales.

Después de mucha experimentación los Ingenieros especializados en corrosión han encontrado tres diferentes tasas de corrosión en ambientes industriales, marinos y rurales.

2.6.2. Agua

El agua es la causa de muchos problemas de corrosión, ningún material de construcción o recubrimiento es ideal para todas las exposiciones en agua. El problema de la corrosión del agua se complica por la existencia de muchos tipos de aguas, creando cada una de ellas sus propias condiciones de ataque.

Las aguas de pantano son ordinariamente ácidas y corroen rápidamente el hierro y el concreto. Las aguas sulfurosas reaccionan rápidamente con los metales como el hierro, el bronce, cobre, entre otros.

Aguas duras o de alto contenido de sales son aguas de alta conductividad y usualmente con una gran cantidad de iones cloruro, los cuales forman rápidamente las áreas anódicas y catódicas sobre el hierro, resultandos severos picados.

Las aguas de alta pureza disuelven rápidamente el calcio del concreto, dejando expuestos los agregados y destruyendo así la estructura, al equilibrarse el calcio en el agua ya no seguirá disolviendo más, por suerte casi toda el agua (excepto la que venga de los deshielos), es suficientemente dura o contiene bastante calcio para prevenir cualquier reacción.

El ataque del agua fresca varía grandemente dependiendo de las sales y gases que lleva disueltos. Los principales contaminantes son iones de cloro, compuestos de azufre, compuestos de hierro y sales de calcio. Las aguas de los ríos y lagos pueden contener una gran variedad de sales naturales, ácidos y otras materias químicas derivadas de las estructuras geológica y mineral de sus lechos y riberas.

2.7. Formas de corrosión

Es muy importante en este punto, examinar las formas específicas de corrosión, las características que manifiestan y sus alcances. Siendo la corrosión un fenómeno muy complicado, lo más seguro es que se presenten simultáneamente en el elemento metálico, tanto la corrosión uniforme en toda la superficie como una corrosión localizada por picaduras o ínter granular.

2.7.1. Corrosión electroquímica

El tipo de corrosión que más frecuentemente tiene lugar ocurre a temperatura ambiente o a una temperatura próxima a ella, como resultado de la reacción de los metales con el agua o con soluciones acuosas de sales, ácidos o bases.

reducirse más. Los electrones producidos por la reacción anódica fluyen a través del metal y se consumen en la reacción catódica.

La disposición de productos de la reacción es, frecuentemente decisiva para controlar la velocidad de la corrosión; puede disolverse o desprenderse como un gas y, en casos no inhibe la continuación de la reacción.

En otros casos se forma un compuesto insoluble que puede cubrir la superficie metálica y reducir eficazmente la velocidad de la corrosión posterior. Sin embargo, el compuesto insoluble de la figura 7, se ha formado a cierta distancia de la zona de corrosión y tiene poco valor protector. Con la variedad de los casos de corrosión electroquímica, los factores electroquímicos desempeñan un papel muy importante, entre los que se pueden mencionar:

- La naturaleza y el lugar del metal en la escala de los potenciales normales (potencial de electrodo) aunque esto no sea más que una indicación de la tendencia a la corrosión.
- La naturaleza de las impurezas en el metal o que se pueden depositar.
- La conductividad eléctrica del medio.
- La existencia de una corriente eléctrica.
- La presencia del oxígeno.
- La presencia de un medio electrolítico.
- La sobre tensión del oxígeno y del hidrógeno sobre el metal en el medio considerado.

De una cierta manera, se puede decir que todo estado de desequilibrio electroquímico del metal puede provocar la corrosión electroquímica y los factores citados pueden acarrear un desequilibrio electroquímico del metal.

Hay que resaltar, que no precisamente tiene que existir un acople de materiales de distinto potencial de electrodo para que se dé la corrosión electroquímica, ya que esta se puede dar con la presencia de un solo metal que por su disposición estructural después de distintos procesos metalúrgicos aparezcan diferentes fases en las aleaciones con potenciales electroquímicos distintos; de una manera semejante ocurre con los metales que contienen impurezas.

2.7.2. Corrosión galvánica

En forma general toda corrosión depende de la acción galvánica, pero este término significa específicamente un tipo de corrosión electroquímica que ocurre debido a que dos materiales de diferente potencial de solución están en contacto, como en la figura. 7.

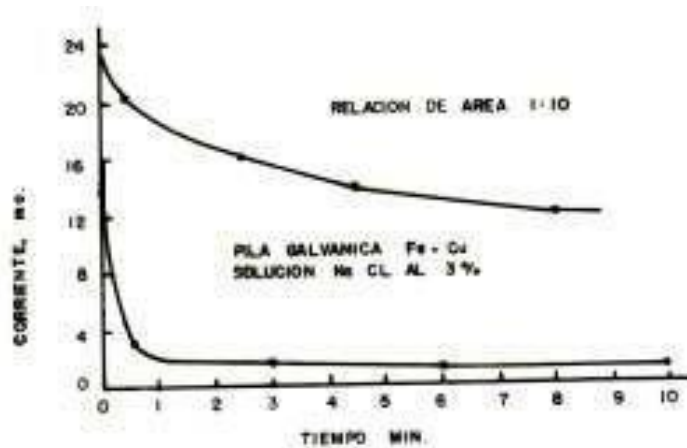
Existen muchos casos de corrosión galvánica, por ejemplo, los recubrimientos galvanizados en los que el miembro más reactivo del par (zinc), se usa deliberadamente como un ánodo de sacrificio, para proteger al otro metal. En el caso común del acero o alambre galvanizado, el acero se recubre con zinc, ya sea sumergiéndolo en zinc fundido o por electrodeposición.

Con frecuencia se usan remaches de un material diferente del de la estructura básica, especialmente, como algo oportuno en las reparaciones. En el caso de remaches de cobre en lámina de acero hay una gran área de ánodo (el acero), y la acción galvánica no es grave. Sin embargo, cuando se utilizan remaches de acero en una lámina de cobre toda la parte metálica se concentra en una pequeña región anódica y hay una gran área para que las reacciones catódicas absorban los electrones. La corrosión es catastrófica, la figura 8

muestra el efecto del área ánodo a cátodo en la tasa de corrosión (corriente), en un sistema hierro-cobre.

Por lo tanto, se debe evitar el acople galvánico especialmente en sistemas expuestos a soluciones acuosas.

Figura 8. Tasa de corrosión (corriente)



Fuente. FLINN, Richard A. y TROJAN, Paul K. *Materiales de ingeniería y sus aplicaciones*. p. 420.

2.7.3. Corrosión atmosférica

El aire contiene siempre cierta cantidad de vapor de agua a una temperatura determinada, el aire no puede contener más vapor de agua que el valor de saturación, llamado punto de rocío. Si la cantidad de vapor de agua excede el valor de saturación, una parte de este vapor de agua se condensa y se deposita sobre los objetos, en particular sobre las superficies metálicas.

La capa de agua, así depositada sobre un metal, puede ser muy tenue, del espesor de algunas moléculas.

Los gases constitutivos del aire (N_2 , O_2), y las impurezas gaseosas o sólidas contenidas en el aire (vapores industriales, como: CO_2 , SO_4 , NH_3 , SH_2 , NCL , NO_2), pueden disolverse en esta película con bastante facilidad, puesto que estos gases son muy solubles en el agua. Ocurre lo mismo para las distintas sales.

Una película líquida muy tenue solo presenta una resistencia muy débil a la difusión del oxígeno del aire a través del electrolito hacia la superficie metálica.

En estas condiciones, la corrosión evoluciona con una intensa despolarización por oxígeno de las regiones catódicas, incluso cuando el electrolito presenta una reacción ácida.

En cambio, la resistencia eléctrica de una capa líquida delgada es muy elevada, de tal manera que, si la diferencia de potencial es bastante elevada entre las regiones catódicas y anódicas, la corriente de corrosión será débil.

A medida que aumenta el espesor de la capa líquida, su resistencia eléctrica disminuye y la corriente de corrosión aumenta.

Desde el punto de vista práctico, la corrosión atmosférica es muy importante, puesto que el fenómeno de condensación del vapor de agua se produce fácilmente cuando la temperatura del aire varía entre el día y la noche, por ejemplo. Se intenta en la medida de lo posible proteger los metales cubriéndolos con grasa, pintura o barniz.

2.7.4. Corrosión uniforme

La superficie del metal es atacada uniformemente con la misma velocidad en todos los puntos.

Los productos de la corrosión se acumulan en ella o se desprenden. La pérdida de peso es también uniforme en toda la superficie. El metal es atacado solamente en su superficie y las partes internas guardan íntegramente sus propiedades.

El término "ataque uniforme" se aplica a cualquier forma de corrosión en la que toda la superficie del metal se corroe en el mismo grado, por tal circunstancia es fácil estimar la vida útil de un material dado y no es de temer una falla inesperada (figura 9).

Figura 9. Corrosión uniforme



Fuente. VIET, Loik. *Corrosión e incrustación en tuberías*. p. 414.

2.7.5. Corrosión por picaduras

La corrosión por picaduras, en lugar de una tasa de corrosión total (corrosión uniforme), es la que dicta la escogencia de los materiales. Es poco cómodo poseer un tanque de almacenamiento de gasolina que está 99,9 % intacto, pero en el que hay numerosas picaduras que se han formado desde el exterior.

Esta situación molesta puede evitarse al comprender las causas de las picaduras y la certeza de que hay algunas combinaciones bien conocidas de materiales y ambientes que tienen la tendencia a este fenómeno.

Hasta hace poco la formación de una picadura se consideraba simplemente una situación especial de una celda por concentración de oxígeno, pero ello no explicaba la función importante de iones tales como los cloruros.

El concepto más reciente es que una picadura comienza a formarse en una discontinuidad de la superficie tal como una inclusión o marcas de amoladora, una celda por concentración de oxígeno se desarrolla entre la discontinuidad y el material que lo circunda.

El hecho de que involucre los iones de cloruro se debe a que dentro de la incipiente picadura los iones metálicos positivos se disuelven y acumulan, estos atraen los iones cloruro. La concentración de cloruro metálico comienza a formarse en la picadura.

La combinación de iones cloruro e hidrógeno acelera el ataque. Para probar este mecanismo se ha encontrado que el fluido dentro de las grietas expuestas a una solución de cloruro de sodio diluida neutra contiene de 3 a 10 veces más iones cloruro que la solución en bruto y un PH de 4 en lugar de 7.

La corrosión de grietas sigue el mismo mecanismo que la corrosión de picaduras, puesto que la grieta sirve como un hueco ya listo en el que la concentración es baja.

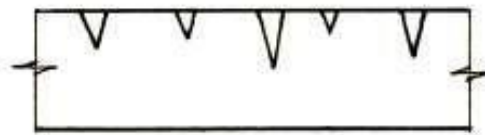
Para combatir la picadura el aspecto más importante es evitar las combinaciones de materiales y ambientes que se saben que son susceptibles a

él. Por ejemplo, muchos de los materiales con superficies pasivas exhiben picaduras debido a la gran diferencia de potencial entre las regiones pasivas y activas del hueco. Además, se sabe que los iones de cloro destruyen localmente las capas pasivas.

Entre los materiales del tipo inoxidable, desde el más susceptible hasta el menos susceptible, se encuentra la siguiente secuencia para el agua salada.

- Acero Inoxidable tipo 304 (18 % Cr, 8 % Ni)
- Acero Inoxidable tipo 316 (18 % Cr, 8 % Ni, 2 % Mo) Titanio

Figura 10. **Corrosión por picaduras**



Fuente. VIET, Loik. *Corrosión e incrustación en tuberías*. p. 414.

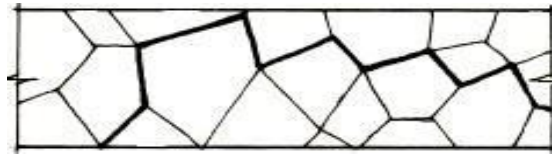
2.7.6. **Corrosión intergranular**

Al igual que la corrosión por picaduras, es también una corrosión localizada, pero en este caso la estructura del metal desempeña un papel, puesto que la corrosión progresa siguiendo los contornos de los cristales del metal.

La corrosión ínter granular tiene lugar cuando existe una pronunciada diferencia de reactividad entre los límites de grano y el resto de la aleación. Esta diferencia se establece en el acero inoxidable, cuando se forman carburos de cromo en los límites de grano durante el calentamiento del acero en el intervalo

de los 482-760 °C. De este modo, la región de los límites de grano se empobrece en cromo y se torna anódica con respecto a las regiones circundantes. Entonces, puede producirse la corrosión a lo largo de los límites de grano y dar origen a serios desperfectos.

Figura 11. **Corrosión intergranular**



Fuente. VIET, Loik. *Corrosión e incrustación en tuberías*. p. 414.

2.8. Aceite protector de metales

2.8.1. Características

El aceite protector de metales es un aceite de baja viscosidad que contiene aceites básicos, un solvente y una combinación de aditivos que evitan la corrosión y la formación de manchas amarillas sobre las planchas de acero y herrumbre blanca sobre el acero galvanizado. La evaporación del solvente proporciona una oleosa película protectora del metal.

2.8.2. Aplicaciones

Recomendado para planchas de acero, herramientas manuales, rodamientos y superficies altamente mecanizadas bajo condiciones moderadas de almacenamiento, despacho o manipulación entre procesos.

2.8.3. Cualidades

- Protección contra herrumbre
- Protección contra la formación de manchas amarillas
- Protección contra la corrosión
- Protección contra la oxidación
- Fácilmente removible de las piezas

2.8.4. Recomendaciones

- Manténgase fuera del alcance de los niños
- Evite el contacto prolongado con la piel
- En caso de contacto lave con abundante agua y jabón
- No vierta aceite usado en las alcantarillas

2.8.5. Aceite actual

- El estado del aceite es líquido
- Posee destilados (petróleo), parafínicos ligeros hidrotratados (solvente de hidrocarburo) en un 85% - 90%.
- Alto costo.
- Contiene cera parafínica refinada en un 10% - 15%.

2.8.6. Aceite propuesto

- El estado del aceite es líquido
- Posee destilados (petróleo), parafínicos ligeros hidrotratados (solvente de hidrocarburo) en un 80 % - 85 %.
- Bajo costo.
- Contiene cera parafínica refinada en un 15 % - 20 %.

2.9. Ensayos de caracterización

2.9.1. Ensayos acelerados

Los ensayos acelerados son comúnmente usados para evaluar y comparar las propiedades anticorrosivas de formulaciones de recubrimiento orgánico y pretratamientos desarrollados por la industria. Puede que, en muchos casos, la correlación entre los métodos de ensayo y el comportamiento de los recubrimientos bajo condiciones de servicio reales no sea la esperada por la simplificación de los parámetros. Sin embargo, el desarrollo de cámaras que combinan diferentes ciclos, y condiciones reducen la diferencia con los escenarios reales.

Ensayos de ambientes de cloruro de sodio, tales como las cámaras de niebla salina, que simulan ambientes marinos, han sido métodos utilizados para estudiar los mecanismos de corrosión de acero galvanizado. El progreso de corrosión de acero galvanizado en el ensayo de niebla salina procede por la degradación del recubrimiento de zinc, formando un óxido blanco que depende temporalmente de la fracción de área de la capa de recubrimiento.

2.9.2. Prueba de apilamiento húmedo

La prueba de apilamiento húmedo básicamente consiste en acelerar el proceso de corrosión en un material mediante la utilización de agua bajo ambientes rigurosos al que son expuestos los materiales, permitiendo que la oxidación se lleve a cabo en un periodo de tiempo más corto, el cual es utilizado posteriormente para análisis y resultados que permitan al laboratorista comparar con una muestra patrón los resultados obtenidos en el estudio de la prueba.

2.9.3. Prueba de cámara o niebla salina

En la actualidad constantemente se presentan cambios climáticos en el medio ambiente cada vez más agresivos estos mismos provocan una reacción química en los materiales conocida como corrosión, la corrosión es un proceso destructivo en el que poco a poco deteriora a un cierto material hasta el grado de afectar la utilidad del mismo, numerosas tragedias podrían suceder si se presentara una falla inesperada debido a este factor.

En la industria constantemente se desarrollan diferentes tipos de recubrimientos en los que es necesario el conocer un tiempo estimado de exposición al medio ambiente, para verificar que el mismo cumpla con su propósito que es prolongar la corrosión.

En el laboratorio se cuenta con la prueba de cámara salina, que simula los ambientes más corrosivos y dañinos para los materiales y de este modo en comparativa se determina las horas de exposición a la superficie que este tendría hasta que presentara su falla y de ese modo ayuda a tomar una decisión definitiva en el material.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Tabla III. **Variables independientes y dependientes**

No	Variables independientes
1	Tiempo de exposición de acero negro (apilamiento húmedo)
2	Tiempo de exposición de acero negro (cámara salina)
3	Tiempo de exposición de acero galvanizado (apilamiento húmedo)
4	Tiempo de exposición de acero galvanizado (cámara salina)
No	Variables dependientes
1	Porcentaje de corrosión en acero negro (apilamiento húmedo)
2	Porcentaje de corrosión en acero negro (cámara salina)
3	Porcentaje de corrosión en acero galvanizado (apilamiento húmedo)
4	Porcentaje de corrosión en acero galvanizado (cámara salina)

Fuente: Elaboración propia

3.2. Delimitación del campo de estudio

La principal limitante del presente trabajo de graduación fue la confidencialidad de la empresa en donde se desarrolló el estudio, es por ello que se reservó el nombre de dicha empresa, su ubicación, marcas y especificaciones de insumos utilizados, fichas técnicas o especificaciones de materias primas y productos terminados, marca y especificaciones técnicas de maquinaria, así

como nombres de trabajadores y colaboradores involucrados en el proceso productivo.

El estudio se realizó comparando el aceite que se utiliza actualmente en la industria siderúrgica, el cual es aplicado sobre el acero galvanizado y el pasivante (cromo hexavalente). Se espera que el aceite propuesto permita disminuir los costos variables de la empresa a corto plazo, represente una opción viable como alternativa, cumpliendo los estándares de calidad mínimos de la empresa y el cliente. A largo plazo se espera que el aceite propuesto sustituya totalmente el aceite utilizado actualmente, cambiando la dinámica y la forma en que opera la empresa.

La experimentación del presente estudio se ajustó según los tiempos de producción de la empresa galvanizadora, y del laboratorio de calidad. Algunas pruebas y fechas planificadas fueron coordinadas y reprogramadas para poder cumplir con los objetivos y realizarlos de la mejor forma.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador	Br. Abdi Suriel Stuard Gil Méndez
Asesor	Ing Qco. Manuel Emilio Figueroa Solares

3.4. Recursos materiales disponibles


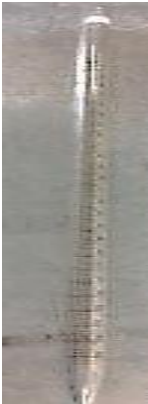

A continuación, se detalla el equipo, cristalería y reactivos que se utilizaron para la fase experimental del trabajo de graduación:

Tabla IV. **Equipo de laboratorio a utilizar**

Equipo	Imagen	Descripción y capacidad	Uso
Balanza analítica.		Tipo: electrónico Modelo: Ex 423 Máximo alcance: 420 g Incertidumbre: $\pm 0,0005$ g.	Se utilizó para pesar muestras de acero y reactivos.
Campana de extracción de gases.		Extracción 0,9 m/s	Se utilizó para realizar soluciones en el laboratorio.
Cámara de niebla salina.		Modelo: Q-Fog/SSP600 Presión máxima de rociado de aire: 30 psi.	Se utilizó para realizar ensayo de niebla salina.

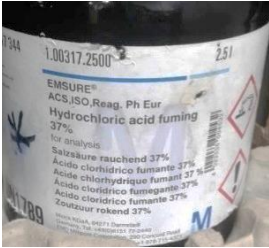
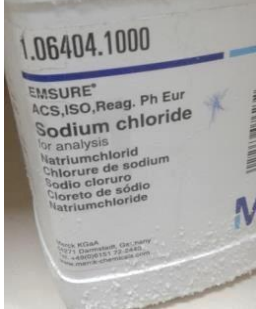

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Cristalería a utilizar**

Cristalería	Imagen	Descripción y capacidad	Uso
Beacker		Capacidad máxima 250 ml.	Se utilizó para verter el aceite a utilizar.
Pipeta		Capacidad máxima 25 ml Incertidumbre: $\pm 0,05$ ml.	Se utilizó para medir la capa a utilizar.
Probeta		Capacidad máxima 100 ml Incertidumbre: $\pm 0,5$ ml.	Se utilizó para mediciones y preparación del aceite a utilizar.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Reactivos a utilizar**

Reactivo	Imagen	Uso
Ácido clorhídrico		Ensayo de determinación de cromo en lámina.
Cloruro de sodio		Utilizado para la elaboración de la solución salina para el ensayo de niebla salina.
Agua desmineralizada		Utilizada para realizar soluciones en el laboratorio, y la realización del ensayo de apilamiento húmedo.

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cuantitativa

El estudio propuesto tuvo un enfoque cuantitativo debido a que las variables de estudio fueron cuantificables y se calcularon datos numéricos para la fase experimental, lo que permitió demostrar si el aceite nuevo es una propuesta viable a utilizar en la industria siderúrgica.

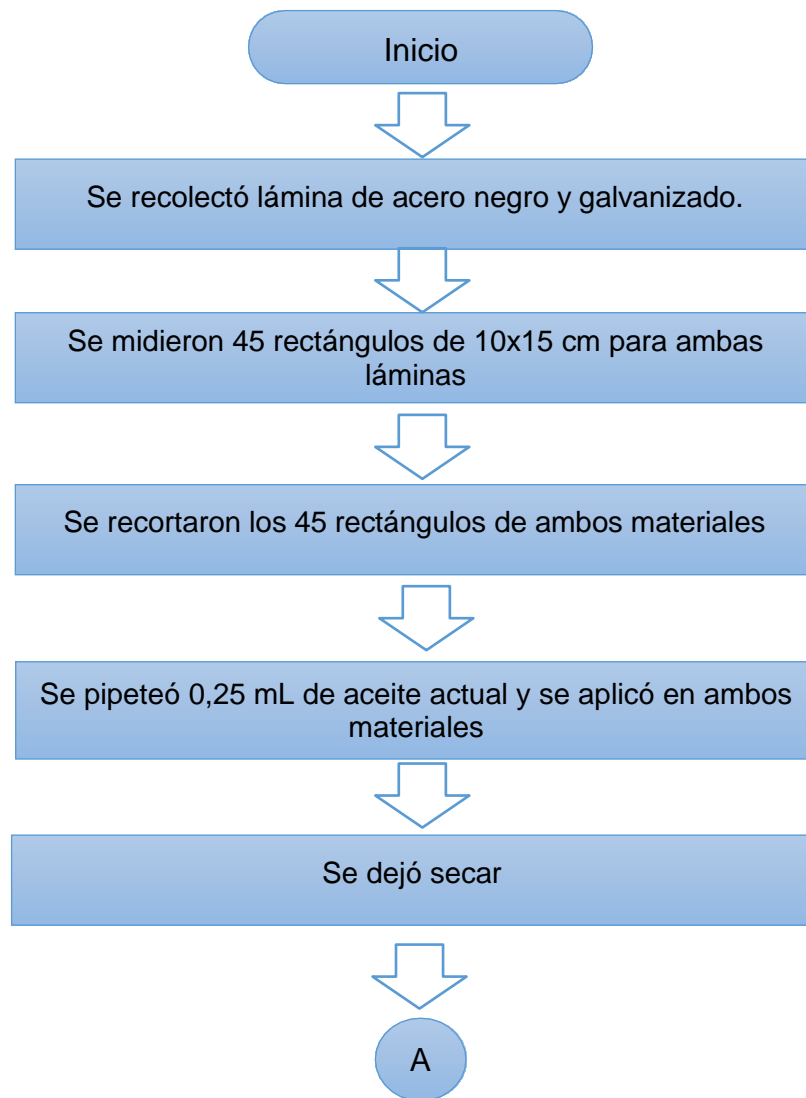
Se estableció la secuencia lógica a seguir para la ejecución de los ensayos, seguido de un diagrama de flujo que permita al lector una mayor comprensión del mismo.

3.5.1. Prueba de apilamiento húmedo

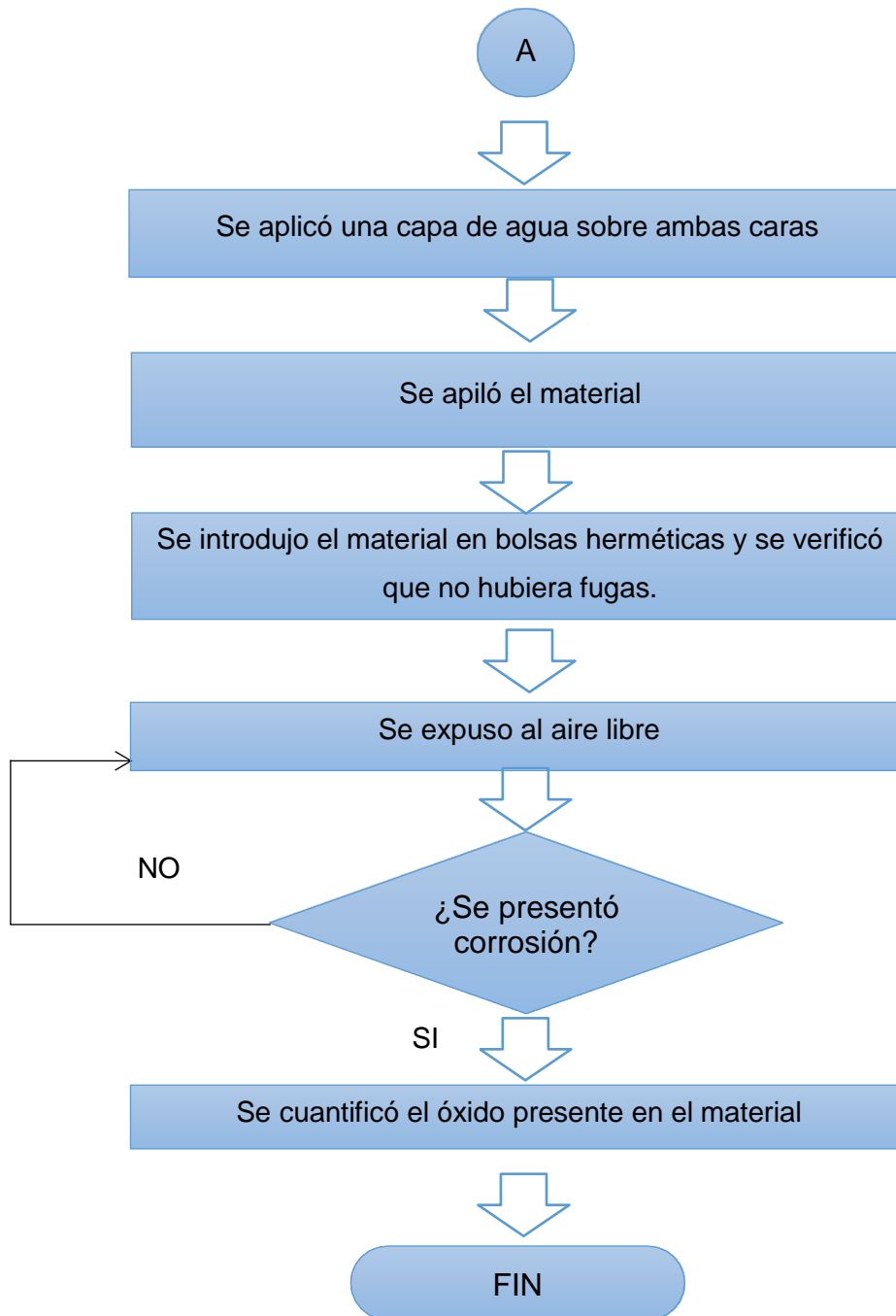
- Se recolectó una lámina de acero negro y una lámina de acero galvanizado.
- Se midieron 45 rectángulos de 10 cm de ancho y 15 cm de largo para el acero negro y el acero galvanizado.
- Se recortaron los 45 rectángulos medidos para ambos tipos de acero.
- Se lavó y secó debidamente el material para retirar la posibilidad de grasas y microorganismos que puedan afectar el desempeño del estudio.
- Se pipetearon 0,25 mL del aceite actual y se aplicó sobre ambas caras del acero negro y el acero galvanizado.
- Se pipetearon 0,25 mL del aceite nuevo y se aplicó sobre ambas caras del acero negro y el acero galvanizado.
- Se dejó secar por una hora, aproximadamente.
- Se aplicó una capa de agua sobre ambas caras.
- Se apiló el material.
- Se verificó que no existieran fugas en una bolsa hermética.
- Se introdujo el material en la bolsa hermética.
- Se expuso el material al aire libre y se observó el progreso semanalmente.

Diagrama de flujo para prueba de apilamiento húmedo

Figura 12. **Prueba de apilamiento húmedo**



Continuación de la figura 12.



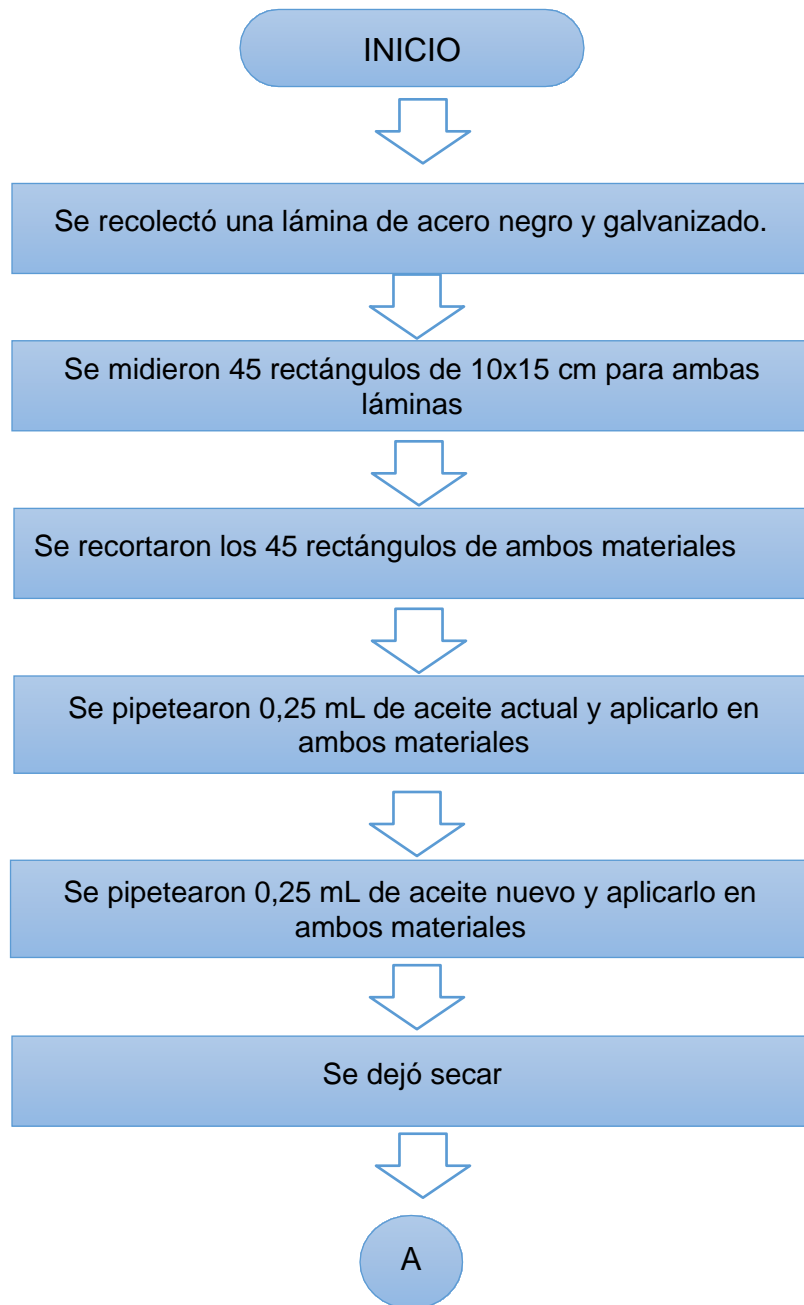
Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Prueba de niebla o cámara salina

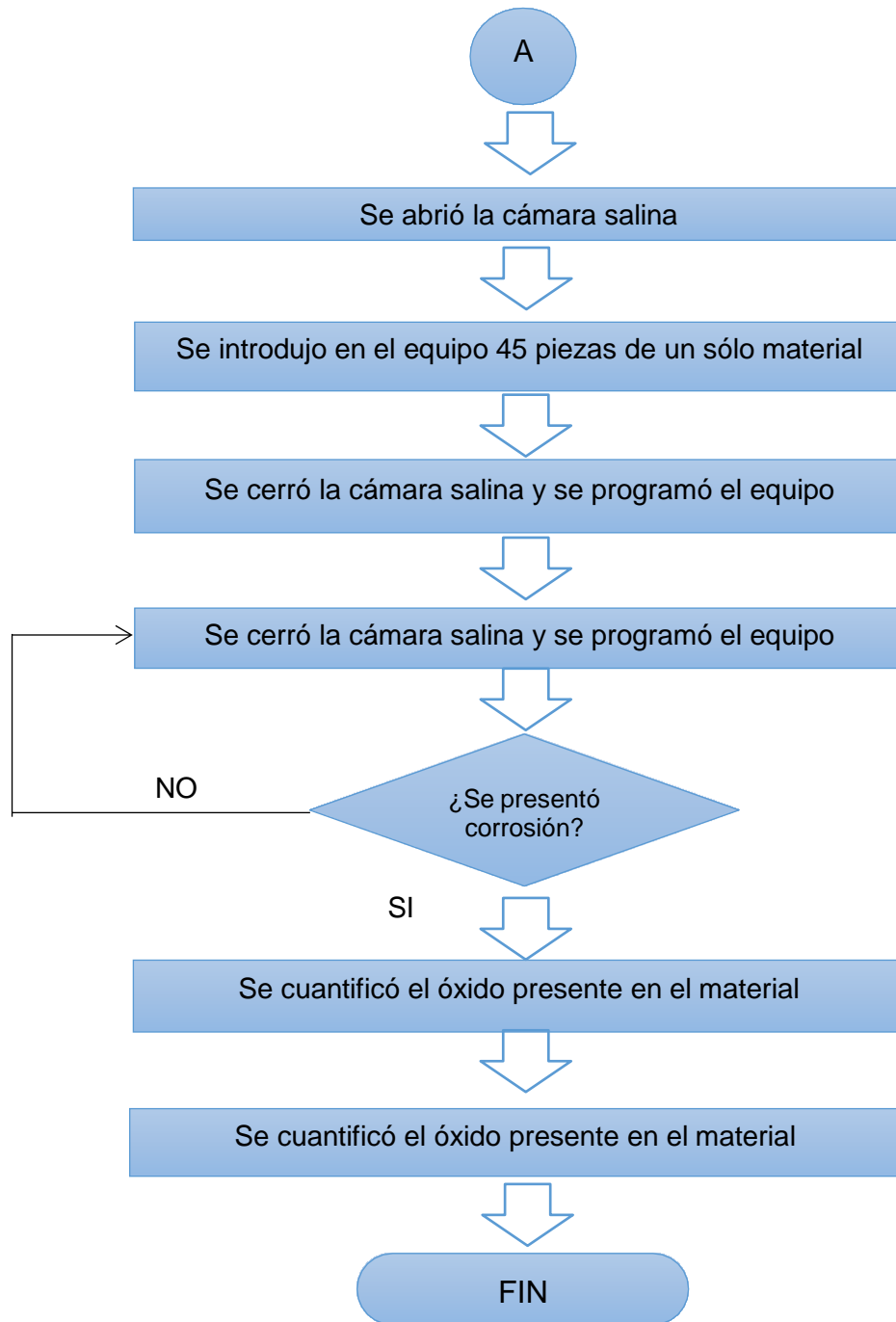
- Se recolectó una lámina de acero negro y una lámina de acero galvanizado.
- Se midieron 45 rectángulos de 10 cm de ancho y 15 cm de largo para el acero negro y el acero galvanizado.
- Se recortaron los 45 rectángulos medidos para ambos tipos de acero.
- Se lavó y secó debidamente el material para retirar la posibilidad de grasas y microorganismos que puedan afectar el desempeño del estudio.
- Se pipetearon 0,25 mL del aceite actual y se aplicaron sobre ambas caras del acero negro y el acero galvanizado.
- Se pipetearon 0,25 mL del aceite nuevo y se aplicaron sobre ambas caras del acero negro y el acero galvanizado.
- Se dejó secar por una hora aproximadamente.
- Se abrió la cámara salina.
- Se introdujo en el equipo 45 piezas de un solo material.
- Se verificó que las piezas se encontraran colocadas correctamente.
- Se cerró la cámara salina.
- Se programó el equipo y observó el progreso de corrosión cada hora.

Diagrama de flujo para prueba de niebla o cámara salina

Figura 13. **Prueba de niebla o cámara salina**



Continuación de la figura 13.



Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Medición de la corrosión presente en las láminas

Para cuantificar el óxido presente en las muestras de acero negro y acero galvanizado se utilizó una cuadrícula transparente de 10 cm de ancho y 15 cm de largo, con divisiones iguales de 1 cm² cada uno (figura 12), el cual se colocó sobre las muestras de acero y se contó la cantidad de cuadros oxidados para luego introducirlos en la ecuación siguiente:

$$\% \text{ óxido} = \frac{N_{ox}}{N_T} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Debido a que se utilizó una sola cuadrícula para el conteo de óxido en las láminas de acero negro y acero galvanizado con ambos aceites, la cantidad de cuadros totales siempre fue constante, siendo de 150 cuadros.

Figura 14. **Cuantificación de óxido presente**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados, se utilizó el programa de Microsoft Excel 365 ProPlus para realizar un análisis de varianza de un factor (ANOVA).

Tabla VII. **Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de apilamiento húmedo**

Hipótesis No.	Variables	F	Fc	F > Fc	Hipótesis aceptada
1	$\% O x_{aceite actual} - t$	461,0132	3,0204	Si	H1
2	$\% O x_{aceite nuevo} - t$	1958,3404	3,2296	Si	H1

Fuente: elaboración propia.

Se rechaza la hipótesis nula para cada uno de los casos, debido a que existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo, para el aceite actual como el aceite nuevo, utilizando un nivel de significancia del 5 %.

Tabla VIII. **Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de cámara salina**

Hipótesis No.	Variables	F	Fc	F > Fc	Hipótesis aceptada
3	$\% O x_{aceite\ actual} - t$	4210.0750	3,2296	Si	H1
4	$\% O x_{aceite\ nuevo} - t$	919.8145	3,5004	Si	H1

Fuente: elaboración propia.

Se rechaza la hipótesis nula para cada uno de los casos, debido a que existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero negro, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina para el aceite actual como el aceite nuevo, utilizando un nivel de significancia del 5 %.

Tabla IX. **Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de apilamiento húmedo**

Hipótesis No.	Variables	F	Fc	F > Fc	Hipótesis aceptada
5	$\% O x_{aceite\ actual} - t$	1918,5967	2,5073	Si	H1
6	$\% O x_{aceite\ nuevo} - t$	1393,5456	2,6037	Si	H1

Fuente: elaboración propia.

Se rechaza la hipótesis nula para cada uno de los casos, debido a que existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de apilamiento húmedo para el aceite actual como el aceite nuevo, utilizando un nivel de significancia del 5 %.

Tabla X. **Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de cámara salina**

Hipótesis No.	Variables	F	F _c	F > F _c	Hipótesis aceptada
7	$\% O x_{aceite actual} - t$	9569,4900	2,7173	Si	H1
8	$\% O x_{aceite nuevo} - t$	528,6480	2,8536	Si	H1

Fuente: elaboración propia.

Se rechaza la hipótesis nula para cada uno de los casos, debido a que existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado, al variar el tiempo de exposición mediante el método de cámara salina, para el aceite actual como con el aceite nuevo, utilizando un nivel de significancia del 5 %.

Tabla XI. **Análisis de varianza para el porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado y acero negro, al variar el aceite utilizado mediante el método de cámara salina y apilamiento húmedo**

Hipótesis No.	Variables	F	Fc	F > Fc	Hipótesis aceptada
9	$\%Ox_{cs} - aceite$	0,6647	18,5128	No	Ho
	$\%Ox_{ah} - aceite$	0,2356	18,5128	No	Ho

Fuente: elaboración propia.

Se acepta la hipótesis nula para cada uno de los casos, debido a que no existe diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado y acero negro, al variar el aceite utilizado mediante el método de cámara salina y apilamiento húmedo, utilizando un nivel de significancia del 5 %.

4. RESULTADOS

Figura 15. **Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de apilamiento húmedo**

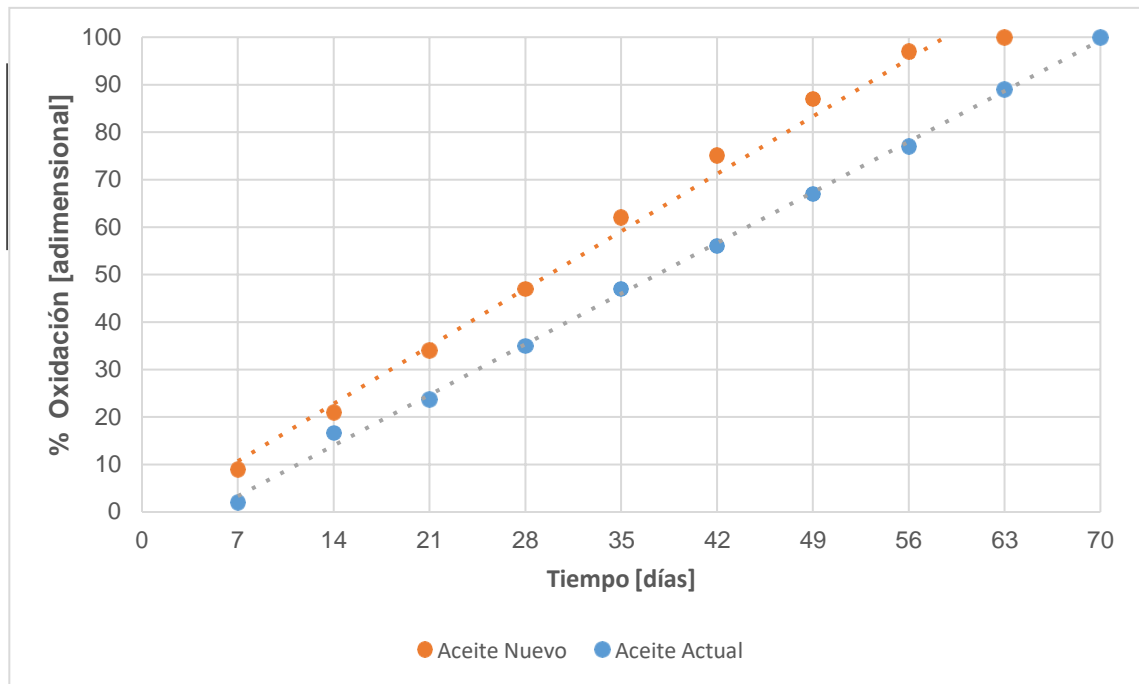
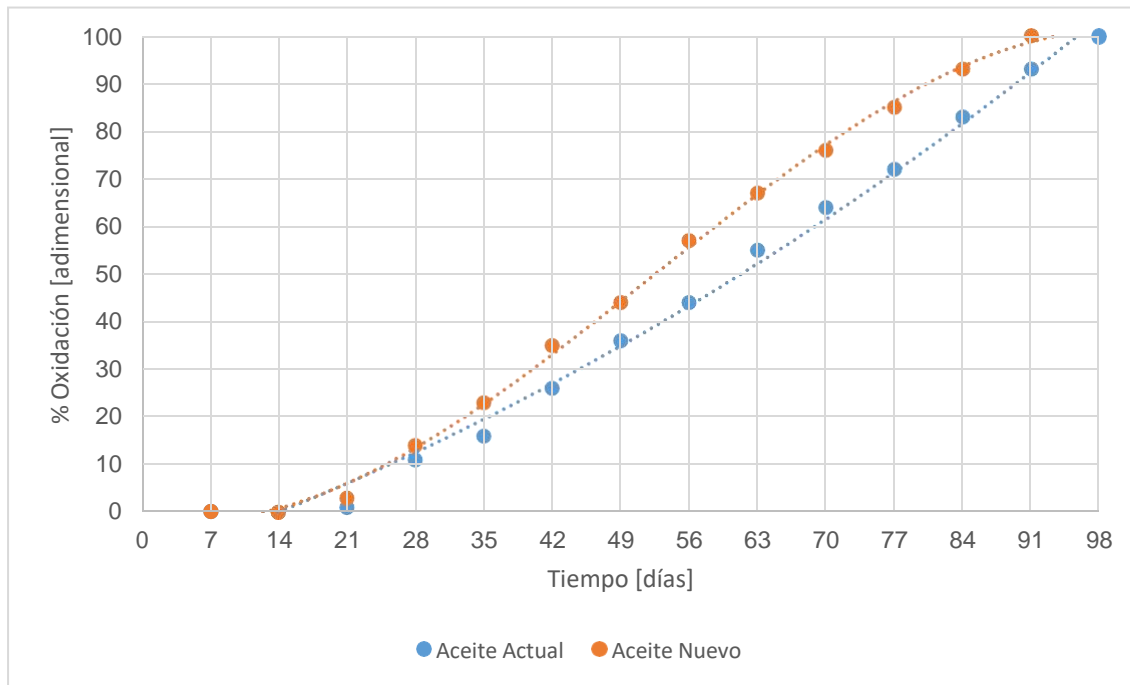


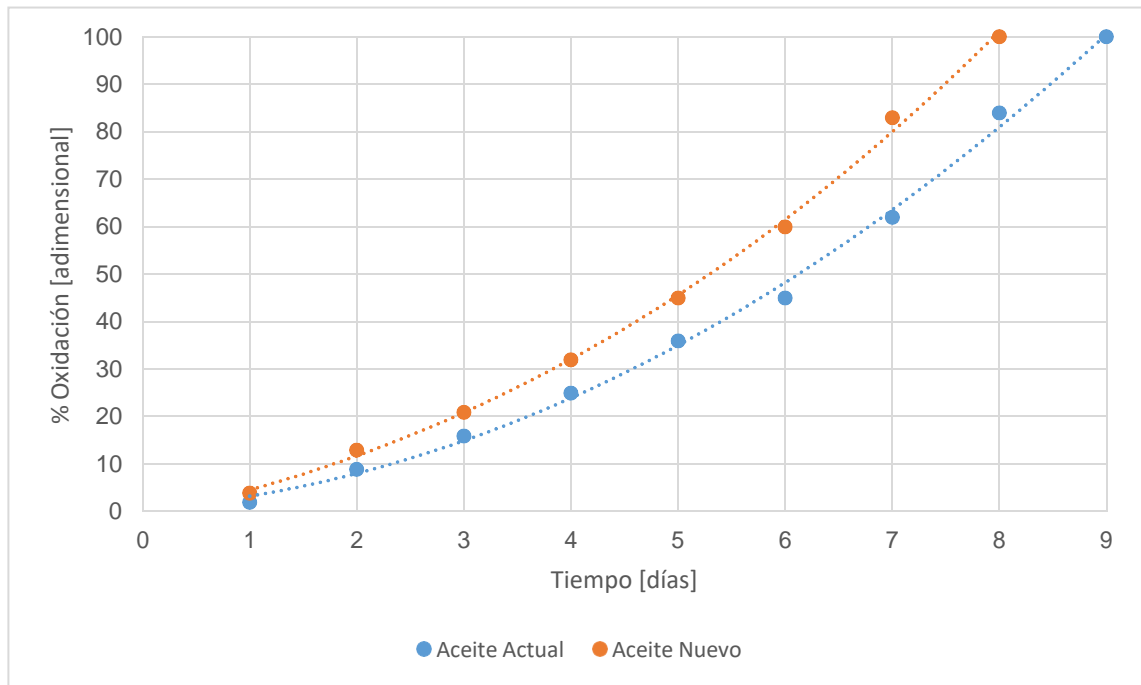
Figura 16. **Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de apilamiento húmedo**



Modelo matemático	R ²	Rango de Validez
$\%Ox_{\text{aceite actual}} = 0,0048t^2 + 0,6911t - 10,582$	0,9937	[7,98] días
$\%Ox_{\text{aceite nuevo}} = -0,0002t^3 + 0,0379t^2 - 0,3532t - 0,993$	0,9985	[7, 91] días

Fuente: elaboración propia.

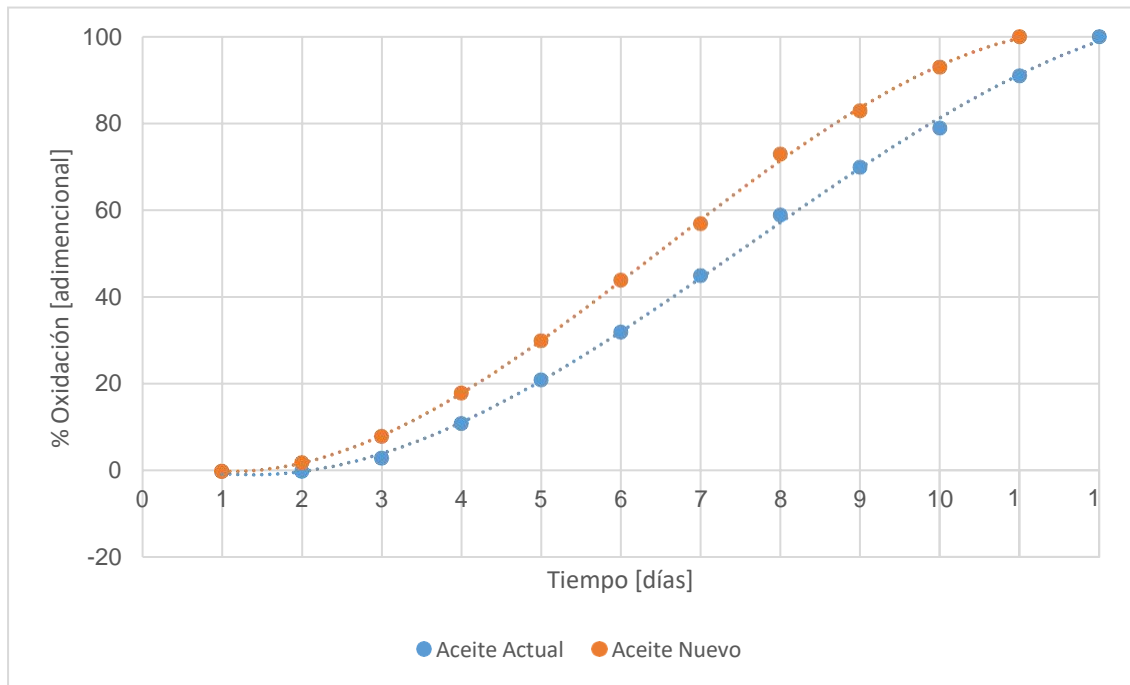
Figura 17. **Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero negro, en el método de cámara salina**



Modelo matemático	R ²	Rango de Validez
$\%Ox_{\text{aceite actual}} = 1,053t^2 + 1,6197t + 0,6667$	0,9970	[1, 9] días
$\%Ox_{\text{aceite nuevo}} = -0,2719t^3 + 4,5188t^2 - 8,3046t + 10,492$	0,9903	[1, 8] días

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Porcentaje de óxido presente en la lámina de acero galvanizado, en el método de cámara salina**



Modelo matemático	R ²	Rango de Validez
$\%Ox_{\text{aceite actual}} = -0,111t^3 + 2,53t^2 - 6,4196t + 3,5354$	0,9992	[1, 12] días
$\%Ox_{\text{aceite nuevo}} = -0,163t^3 + 3,1783t^2 - 6,492t + 3,4697$	0,9997	[1, 11] días

Fuente: elaboración propia.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El aceite empleado actualmente cumple de buena forma y protege efectivamente el producto terminado, a pesar de su buena calidad el precio por galón del aceite actual es de Q 212,64 por galón, el aceite propuesto tiene un precio de Q 135,80 por galón representando un 36,12 % más económico al compararlo con el aceite actual. En la línea de galvanizado, en la última etapa se le rocía homogéneamente una capa protectora del aceite, se estima aproximadamente que un galón de aceite es empleado para 25 TM y se tiene un volumen de producción anual en Guatemala de 300 000 TM, se tendría un ahorro empleando el aceite propuesto de Q 922 080,00 anuales.

En la figura 13 se muestra el porcentaje de oxidación del acero negro en función del tiempo con el método de apilamiento húmedo, utilizando el aceite actual y aceite nuevo como recubrimiento. Como se puede observar el aceite actual alcanzó el 100 % oxidación en el día 70, mientras las muestras de acero negro utilizando como recubrimiento el aceite nuevo alcanzaron el 100 % de oxidación en el día 63. Para efectos prácticos de la operación el aceite nuevo es admisible y puede ser empleado como una alternativa viable a suplir el aceite utilizado actualmente para los productos de acero negro, debido a que el aceite nuevo presenta propiedades anticorrosivas similares al aceite utilizado actualmente evidenciado en la prueba de apilamiento húmedo.

En la figura 14 analizando el porcentaje de oxidación del acero galvanizado en función del tiempo utilizando el aceite nuevo y actual como recubrimiento se observa que las muestras se oxidaron en su totalidad en 91 y 98 días

respectivamente con el método de apilamiento húmedo, demostrando que el aceite actual es un mejor inhibidor de corrosión que el aceite nuevo, sin embargo, la calidad – precio presentada por el aceite nuevo permitiría reemplazar el aceite que se utiliza actualmente. En el día de exposición 56 se ve el impacto más representativo del aceite nuevo con un 13 % de aumento en la corrosión, respecto al aceite actual. El acero galvanizado se ve mayormente afectado por la reacción con el agua presente formando hidróxido de zinc en el 57 % de la superficie del material utilizando como recubrimiento el aceite nuevo y 44 % en la superficie del material que tiene como recubrimiento el aceite actual.

Se observó para la prueba de apilamiento húmedo que el porcentaje de oxidación, en el acero negro y galvanizado, aumenta significativamente al transcurrir el tiempo utilizando como recubrimiento el aceite actual y nuevo.

Los aditivos antioxidantes o inhibidores de oxidación en el aceite nuevo se agotan más rápidamente que en el aceite actual, debido a que las moléculas de la base lubricante reaccionan con catalizadores que conducen a una mayor formación de radicales libres, reaccionando con los hidrocarburos y liberando oxígeno para formar más radicales libres o compuestos oxigenados, por ello se ve un mayor grado de corrosión en las muestras que tienen como recubrimiento el aceite nuevo, sin embargo, en la figura 13 y 14 se ve que el agotamiento de los aditivos antioxidantes del aceite nuevo se ve desfasada solamente 7 días respecto al aceite actual, el factor económico y la protección adecuada respecto a la corrosión del aceite nuevo permiten ser una opción viable para reemplazar el aceite utilizado actualmente.

En la figura 15 se muestra el porcentaje de óxido, estudiado por medio del método de cámara salina, presente en una lámina de acero negro en función del tiempo, utilizando el aceite nuevo y el actual como recubrimiento. Se puede observar que la superficie de la lámina de acero negro con el aceite nuevo como recubrimiento alcanzó el 100 % de oxidación en el día 8, a diferencia de la lámina de acero negro con el aceite actual como recubrimiento, cuya superficie se oxidó en su totalidad en el día 9. Considerando que la capacidad anticorrosiva de ambos aceites tiene una diferencia de 1 día y la relación calidad – precio, se puede inferir que el aceite nuevo es una mejor alternativa para el tratamiento anticorrosivo de láminas de acero negro.

El porcentaje de oxidación en una lámina de acero galvanizado en función del tiempo por medio del método de cámara salina se puede observar en la figura 16, la cual muestra que, al utilizar el aceite nuevo como recubrimiento, la superficie de la lámina de acero galvanizado se oxida en su totalidad en 11 días, y cuando se utiliza el aceite actual para recubrir la lámina galvanizada, se observa que la superficie alcanza el 100 % de oxidación en el día 12. La diferencia en el tiempo de corrosión entre ambos aceites es de 8,33 %, sin embargo, al comparar este dato con el porcentaje de ahorro económico que presenta el aceite nuevo, se puede considerar que este aceite es una opción más viable para el recubrimiento de láminas de acero galvanizado.

En el estudio de oxidación por medio del método de cámara salina en el acero negro y galvanizado, se observó que el porcentaje de oxidación en la superficie de ambos materiales incrementó significativamente en el transcurso del tiempo, utilizando el aceite actual y el nuevo como recubrimiento. Con este método se pudo observar la capacidad anticorrosiva entre ambos aceites difirió por un día. Esto pudo ser ocasionado por que en el momento en que las moléculas de la base lubricante y aditivos, presentes en el aceite nuevo,

reaccionaron con catalizadores, formaron con mayor velocidad radicales libres. Con una mayor producción de estos radicales, comienza nuevamente una reacción entre los radicales y los hidrocarburos, produciendo rápidamente más radicales libres y compuestos oxigenados, dando como resultado una disminución considerable en los aditivos antioxidantes del aceite nuevo.

Este fenómeno da como resultado que la superficie de la lámina de acero negro y galvanizado recubierta con el aceite nuevo, alcance el 100 % de oxidación más rápido, sin embargo, la diferencia en el tiempo de oxidación es insignificante en comparación con la relación calidad – precio entre ambos aceites, y se infiere que el aceite actual puede ser remplazado por el aceite nuevo en el tratamiento anticorrosivo, sin bajar los estándares de calidad de las láminas de acero negro y galvanizadas.

Al comparar el comportamiento del porcentaje de oxidación presente en la superficie de las láminas de acero negro y galvanizado, con el método de cámara salina y apilamiento húmedo se observa un desfase de 1 y 7 días respectivamente para alcanzar el 100 % de oxidación sobre la superficie del material al utilizar el aceite actual respecto al aceite nuevo, lo cual permite evidenciar que la capacidad anticorrosiva del aceite nuevo y actual son similares. Se analizaron los datos estadísticamente y se concluye que no hay diferencia significativa en el porcentaje de óxido presente en el acero galvanizado y acero negro al variar el aceite utilizado en ambos métodos evidenciado en la tabla X del análisis estadístico.

El tiempo de desfase no es representativo en comparación con el ahorro económico que presenta el aceite nuevo, y se concluye que el aceite actual puede ser remplazado por el aceite propuesto.

CONCLUSIONES

1. En la prueba de apilamiento húmedo el acero negro alcanzó el 100 % de oxidación en 63 y 70 días, utilizando el aceite nuevo y el aceite actual como recubrimiento, respectivamente.
2. El acero galvanizado alcanzó el 100 % de oxidación en 91 y 98 días, utilizando el aceite nuevo y el aceite actual como recubrimiento, respectivamente, por medio de la prueba de apilamiento húmedo.
3. En la prueba de cámara salina el acero negro alcanzó el 100% de oxidación en 8 y 9 días, utilizando el aceite nuevo y el aceite actual como recubrimiento, respectivamente.
4. El acero galvanizado alcanzó el 100 % de oxidación en 11 y 12 días, utilizando el aceite nuevo y el aceite actual como recubrimiento, respectivamente, por medio de la prueba de cámara salina.
5. De acuerdo a la diferencia en el tiempo que tardó cada material en alcanzar el 100 % de oxidación, utilizando ambos aceites como recubrimiento, y considerando la relación calidad – precio, se puede concluir que el aceite propuesto es una opción viable para reemplazar el aceite utilizado actualmente en el producto terminado de acero negro y galvanizado.

RECOMENDACIONES

1. Al realizar el corte sobre la lámina utilizar el equipo de protección específico para evitar cortaduras.
2. Aplicar el aceite protector de forma homogénea sobre todo el material, ya sea acero negro o galvanizado para obtener resultados confiables.
3. Sellar las bolsas herméticas adecuadamente para evitar que se presenten fugas.
4. Realizar varias repeticiones de cada tratamiento para tener confiabilidad en los datos evaluados.
5. Mantener limpia y ordenada el área de trabajo para evitar confundir las muestras.
6. Asignar una numeración apropiada para cada tratamiento.
7. El experimento se debe realizar bajo las mismas condiciones para cada una de las muestras.
8. Limpiar y secar de forma adecuada las muestras previo a colocarles el aceite protector, ya que las partículas de polvo no permiten que se adhiera correctamente el aceite.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARANGO MAZARIEGOS, Christian Guillermo. *Propuesta de control estadístico para el proceso de galvanizado de alambre por inmersión en caliente*. Trabajo de postgrado de Ing. Mecánica Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 156 p.
2. AUJOR. Especialistas en tratamientos del acero inoxidable. *Limpieza, decapado y pasivado del acero inoxidable en aplicaciones industriales*. [en línea]. <<http://www.aias.es/JornadasTecnicasponenciaspdf/2015Ponencias%20Jornada1%2027515%20Subcontratacion/limpieza%20decapado%20y%20pasivado%20del%20acero%20inoxidable%20en%20aplicaciones%20industriales.2.pdf>>. [Consulta: 14 de mayo de 2018].
3. CERVANTES, Benjamín. *¿Qué es el acero?* [en línea]. <<https://www.alacero.org/es/page/el-acero/que-es-el-acero>>. [Consulta: junio de 2018].
4. CHUMÁN LÓPEZ, Margeo Javier. *Estudio del tanato de zinc como pigmento inhibidor para el pintado del acero galvanizado*. Trabajo de postgrado de Ing. Mecánica. Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Posgrado, 2017. 112 p.

5. Construmática. *El zinc como metal protector*. [en línea]. <http://www.construmatica.com/construpedia/El_Zinc_como_Metal_Protector>. [Consulta: noviembre de 2018].
6. Estructplan. *Tratamientos*. [en línea]. <<https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.aspIdEntrega=3086>>. [Consulta: agosto de 2018].
7. Euroval del Centro. *Propiedades del acero negro*. [en línea]. <<http://www.eurovaldelcentro.com.mx/propiedades-acero-negro.htm>>. [Consulta: febrero de 2019].
8. GalvInfoNote 2.1. *El proceso continuo de recubrimiento por inmersión en caliente para productos de planchas de acero*. [en línea]. <http://latiza.com/archivos_publicar/galvinfo/GalvInfoNote2.pdf>. [Consulta: enero de 2019].
9. GalvInfoNote 3.4. *Ensayo de niebla salina*. [en línea]. <http://latiza.com/archivos_publicar/galvinfo/GalvInfoNote3.pdf>. [Consulta: febrero de 2019].
10. GARCÉS RODRÍGUEZ, Roberto Carlos. *Evaluación de la corrosión atmosférica del acero expuesto en diversas atmósferas*. Trabajo de postgrado de Ciencias de la Ingeniería Mecánica. Universidad autónoma de Nuevo León, México: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2002. 182 p.

11. GARCÍA, Stefan. *¿Qué es el acero galvanizado?* [en línea]. <<https://curiosoando.com/que-es-el-acero-galvanizado>>. [Consulta: agosto de 2018].
12. InfoAcero. *Corrosión.* [en línea]. <<http://www.infoacero.cl/acero/corrosion.htm>>. [Consulta: octubre de 2018].
13. Instituto de Desarrollo Urbano. *Guía práctica de galvanizado por inmersión en caliente.* [en línea]. <http://www.andi.com.co/cf/PublishingImages/Paginas/Documentos_de_interes/Guia%20de%20Galvanizado%20Inmersi%C3%B3n%20en%20Caliente.pdf>. [Consulta: junio de 2019].
14. MÉNDEZ PÉREZ, Adonay. *Protección catódica: Ánodos de sacrificio.* Proyecto de Fin de Grado en Náutica y Transporte Marítimo. Universidad de La Laguna, España: Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, 2002. 41 p.
15. Nervion Pinturas. *Oxidación.* [en línea]. <<https://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/oxidacion.php>>. [Consulta: junio de 2019].
16. RMIG. *Acero al carbono (acero dulce).* [en línea]. <[http://rmig.com/es/info+t%C3%A9cnica/materia+prima/acero+al+carbono+\(acero+decapado\)](http://rmig.com/es/info+t%C3%A9cnica/materia+prima/acero+al+carbono+(acero+decapado))>. [Consulta: mayo de 2018].

17. ROCA RAMÍREZ, Jorge Rony. *Diseño experimental de una aleación zinc-aluminio para la reducción de la variabilidad de la concentración del aluminio en el proceso de galvanizado*. Trabajo de postgrado de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 75 p.
18. ROSALES, Luis. *Acero al carbono*. [en línea]. <<http://www.sabelotodo.org/herramientas/acerotemplado.html>>. [Consulta: marzo de 2019].
19. SAMPIERI, R. H. *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill, 2010. 899 p.
20. SANDOVAL, Walter. *Tipos de corrosión*. [en línea]. <<https://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion/tipos>>. [Consulta: junio de 2019].
21. QUEDNOW, Erick. *Procedimiento técnico para la generación de materiales certificados (MRC) en la calibración de un espectrómetro por esparcimiento de rayos x en la medición de deposición de capa de zinc en una línea de galvanizado en continuo*. Trabajo de postgrado de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 120 p.
22. VALLEJO, Julio. *Conocimiento y prevención de la corrosión*. Trabajo de postgrado de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 105 p.

23. VÁSQUEZ, Lucía. *Por qué se oxidan los metales al aire libre*. [en línea]. <<http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4770/por-que-se-oxidan-los-metales-al-aire-libre>>. [Consulta: febrero de 2019].
24. WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 752 p.

APÉNDICES

Datos calculados sobre el porcentaje de corrosión en la prueba de apilamiento húmedo.

Apéndice 1. **Porcentaje de corrosión presente en el acero negro en la prueba de apilamiento húmedo**

Porcentaje de corrosión para el día 7

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	4	2	0	0	1	3
Aceite nuevo	10	8	9	6	11	7

Porcentaje de corrosión para el día 14

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	17	14	18	16	15	19
Aceite nuevo	23	20	21	18	23	20

Porcentaje de corrosión para el día 21

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	23	27	22	20	26	28
Aceite nuevo	33	31	35	33	38	34

Continuación apéndice 1.

Porcentaje de corrosión para el día 28

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	33	38	35	39	33	34
Aceite nuevo	49	44	48	42	50	46

Porcentaje de corrosión para el día 35

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	45	43	48	50	45	48
Aceite nuevo	62	59	62	65	61	65

Porcentaje de corrosión para el día 42

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	53	57	58	60	54	53
Aceite nuevo	75	72	72	78	74	76

Porcentaje de corrosión para el día 49

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	67	65	66	70	69	64
Aceite nuevo	88	84	86	89	85	88

Continuación apéndice 1.

Porcentaje de corrosión para el día 56

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	73	78	74	82	76	79
Aceite nuevo	94	98	100	95	96	100

Porcentaje de corrosión para el día 63

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	85	90	88	91	89	92
Aceite nuevo	100	100	100	100	100	100

Porcentaje de corrosión para el día 70

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	100	100	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Porcentaje de corrosión presente en el acero galvanizado en la prueba de apilamiento húmedo**

Porcentaje de corrosión para el día 7

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	0	0	0	0	0	0
Aceite nuevo	0	0	0	0	0	0

Porcentaje de corrosión para el día 14

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	0	0	0	0	0	0
Aceite nuevo	0	0	0	0	0	0

Porcentaje de corrosión para el día 21

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	2	0	0	0	0	3
Aceite nuevo	5	2	2	0	2	4

Porcentaje de corrosión para el día 28

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	12	9	11	10	12	14
Aceite nuevo	15	13	12	13	16	12

Continuación apéndice 2.

Porcentaje de corrosión para el día 35

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	18	17	15	16	14	17
Aceite nuevo	21	24	20	23	25	24

Porcentaje de corrosión para el día 42

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	26	27	24	25	25	27
Aceite nuevo	33	35	34	38	32	36

Porcentaje de corrosión para el día 49

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	32	35	37	39	34	37
Aceite nuevo	41	43	40	45	48	46

Porcentaje de corrosión para el día 56

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	42	41	46	48	42	47
Aceite nuevo	54	57	60	58	56	57

Continuación apéndice 2.

Porcentaje de corrosión para el día 63

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	51	53	58	55	57	54
Aceite nuevo	66	68	65	70	69	65

Porcentaje de corrosión para el día 70

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	62	64	66	65	67	61
Aceite nuevo	73	76	75	79	78	76

Porcentaje de corrosión para el día 77

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	70	72	73	71	73	72
Aceite nuevo	82	85	83	85	88	84

Porcentaje de corrosión para el día 84

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	80	81	84	82	84	86
Aceite nuevo	92	90	94	93	96	92

Continuación apéndice 2.

Porcentaje de corrosión para el día 91

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	93	91	91	92	94	94
Aceite nuevo	100	100	100	100	100	100

Porcentaje de corrosión para el día 98

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	100	100	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Porcentaje de corrosión presente en el acero negro en la prueba de cámara salina**

Porcentaje de corrosión para el día 1

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	3	2	2	2	2	3
Aceite nuevo	5	4	3	4	5	5

Porcentaje de corrosión para el día 2

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	8	8	10	9	7	9
Aceite nuevo	15	12	13	12	14	13

Porcentaje de corrosión para el día 3

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	16	15	15	18	14	17
Aceite nuevo	23	20	21	20	20	22

Porcentaje de corrosión para el día 4

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	24	26	23	26	26	27
Aceite nuevo	31	32	34	32	31	32

Continuación apéndice 3.

Porcentaje de corrosión para el día 5

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	34	35	36	37	37	35
Aceite nuevo	42	45	46	48	44	43

Porcentaje de corrosión para el día 6

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	43	45	48	45	46	45
Aceite nuevo	58	62	60	63	58	60

Porcentaje de corrosión para el día 7

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	58	61	60	65	63	64
Aceite nuevo	82	86	80	81	85	84

Porcentaje de corrosión para el día 8

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	80	82	86	85	86	84
Aceite nuevo	100	100	100	100	100	100

Continuación apéndice 3.

Porcentaje de corrosión para el día 9

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	100	100	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Porcentaje de corrosión presente en el acero galvanizado en la prueba de cámara salina**

Porcentaje de corrosión para el día 1

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	0	0	0	0	0	0
Aceite nuevo	0	0	0	0	0	0

Porcentaje de corrosión para el día 2

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	0	0	0	0	0	0
Aceite nuevo	1	2	3	2	1	3

Continuación apéndice 4.

Porcentaje de corrosión para el día 3

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	2	3	4	2	3	2
Aceite nuevo	7	9	8	7	9	10

Porcentaje de corrosión para el día 4

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	9	11	12	11	10	13
Aceite nuevo	19	18	17	17	20	18

Porcentaje de corrosión para el día 5

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	19	21	22	21	20	23
Aceite nuevo	32	31	28	29	30	32

Porcentaje de corrosión para el día 6

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	31	30	34	32	32	34
Aceite nuevo	42	44	40	42	46	48

Continuación apéndice 4.

Porcentaje de corrosión para el día 7

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	40	45	48	43	45	46
Aceite nuevo	57	56	55	56	58	62

Porcentaje de corrosión para el día 8

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	54	59	62	57	59	60
Aceite nuevo	72	73	70	71	73	77

Porcentaje de corrosión para el día 9

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	69	68	71	68	72	70
Aceite nuevo	85	82	80	83	84	86

Porcentaje de corrosión para el día 10

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	80	78	78	79	79	82
Aceite nuevo	95	92	90	93	94	96

Continuación apéndice 4.

Porcentaje de corrosión para el día 11

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	91	90	93	90	89	93
Aceite nuevo	100	100	100	100	100	100

Porcentaje de corrosión para el día 12

Aceite	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2	Cara 1	Cara 2
Aceite actual	100	100	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Medición y corte de los 45 rectángulos de acero negro y acero galvanizado



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Aplicación del aceite protector sobre las muestras de acero negro y galvanizado



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Secado de las muestras de acero negro y galvanizado**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Bolsas herméticas utilizadas para la prueba de apilamiento húmedo**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Equipo utilizado para la prueba de cámara salina**



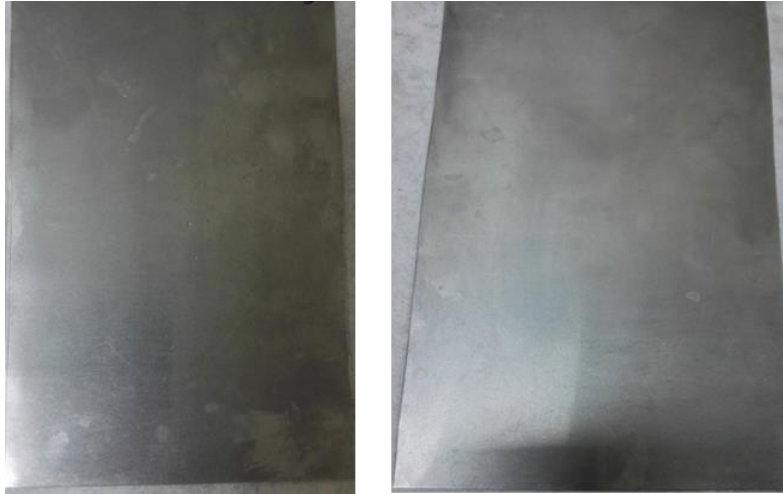
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Muestra representativa de acero negro utilizando el aceite actual como recubrimiento, posterior a 7 días de exposición**



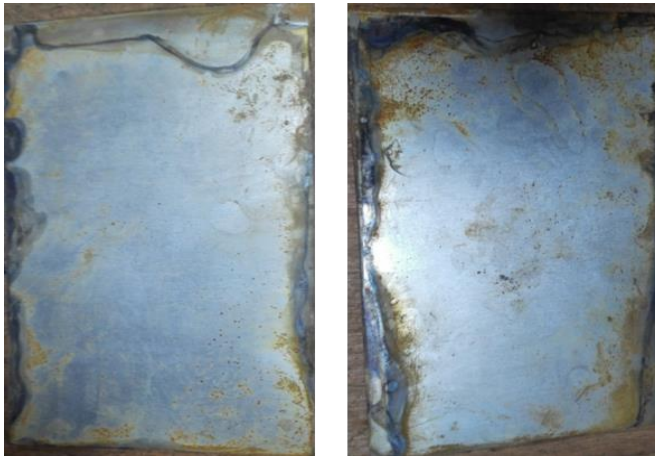
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Muestra representativa de acero negro utilizando el aceite nuevo como recubrimiento, posterior a 7 días de exposición**



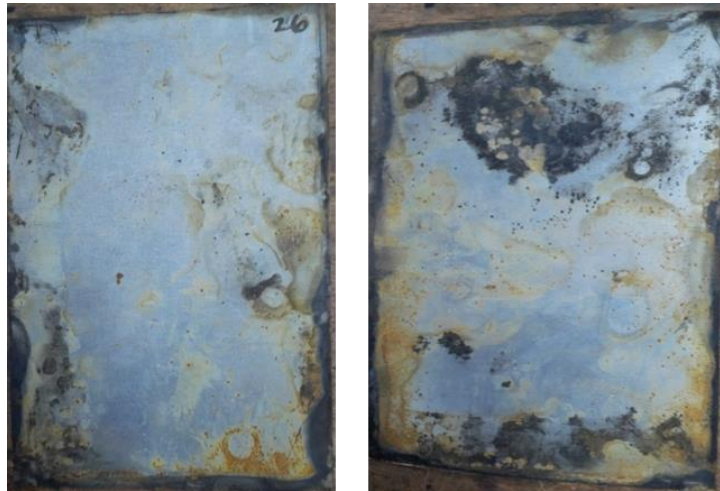
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Muestra representativa de acero negro utilizando el aceite actual como recubrimiento, posterior a 28 días de exposición**



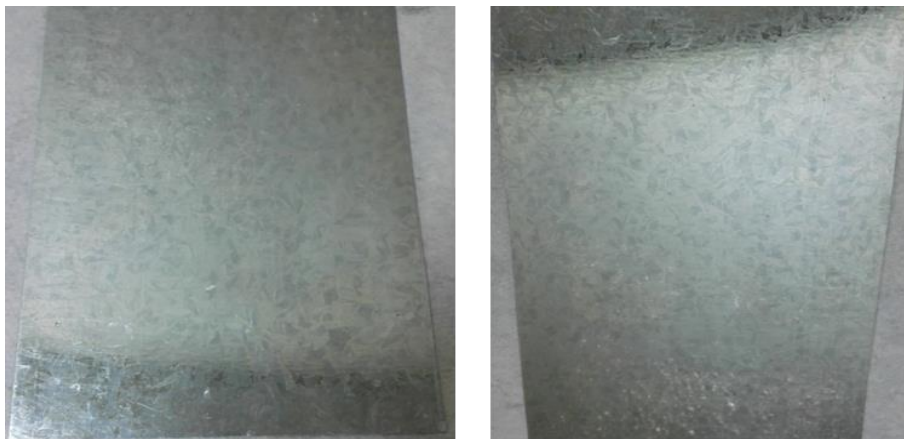
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Muestra representativa de acero negro utilizando el aceite nuevo como recubrimiento, posterior a 28 días de exposición**



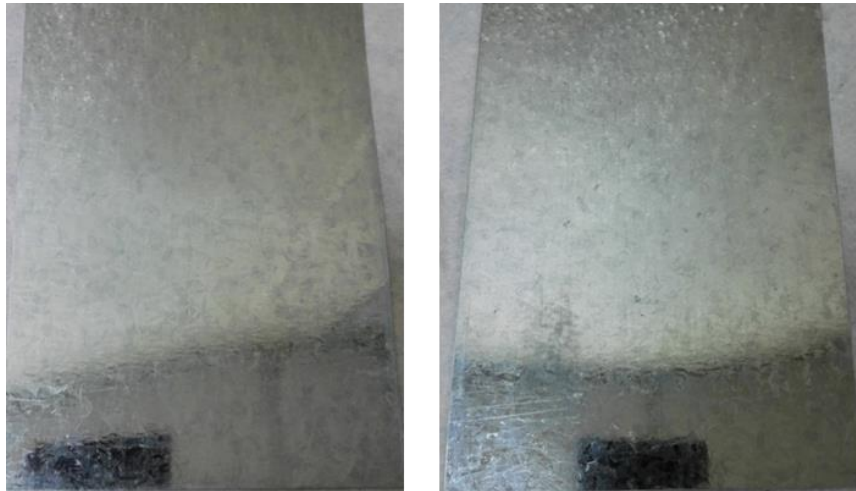
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Muestra representativa de acero galvanizado utilizando el aceite actual como recubrimiento, posterior a 7 días de exposición**



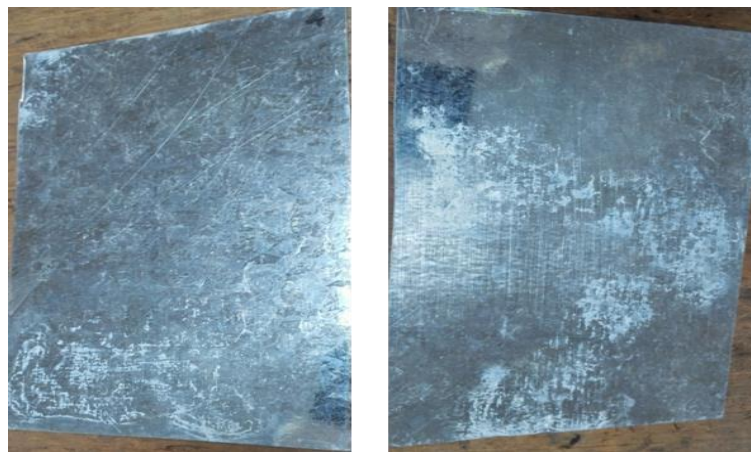
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Muestra representativa de acero galvanizado utilizando el aceite nuevo como recubrimiento, posterior a 7 días de exposición**



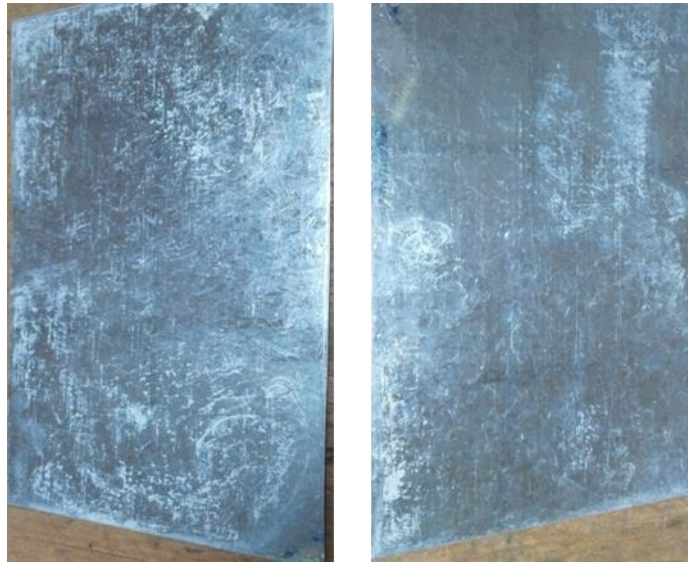
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Muestra representativa de acero galvanizado utilizando el aceite actual como recubrimiento, posterior a 28 días de exposición.**



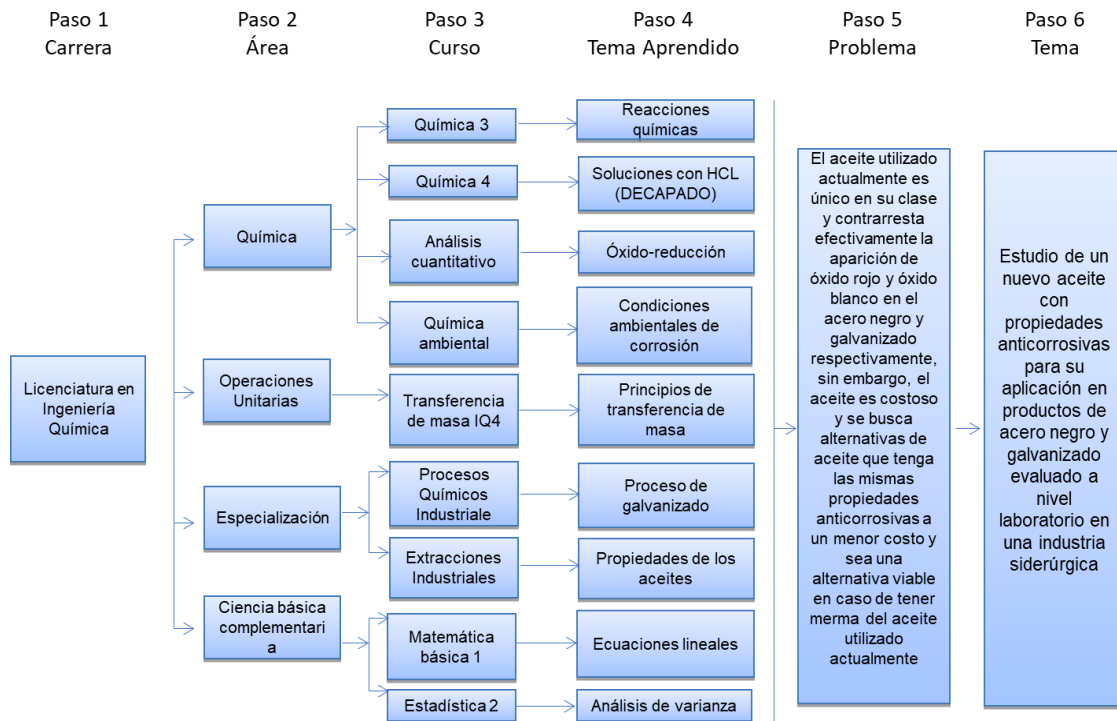
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Muestra representativa de acero galvanizado utilizando el aceite nuevo como recubrimiento, posterior a 28 días de exposición**



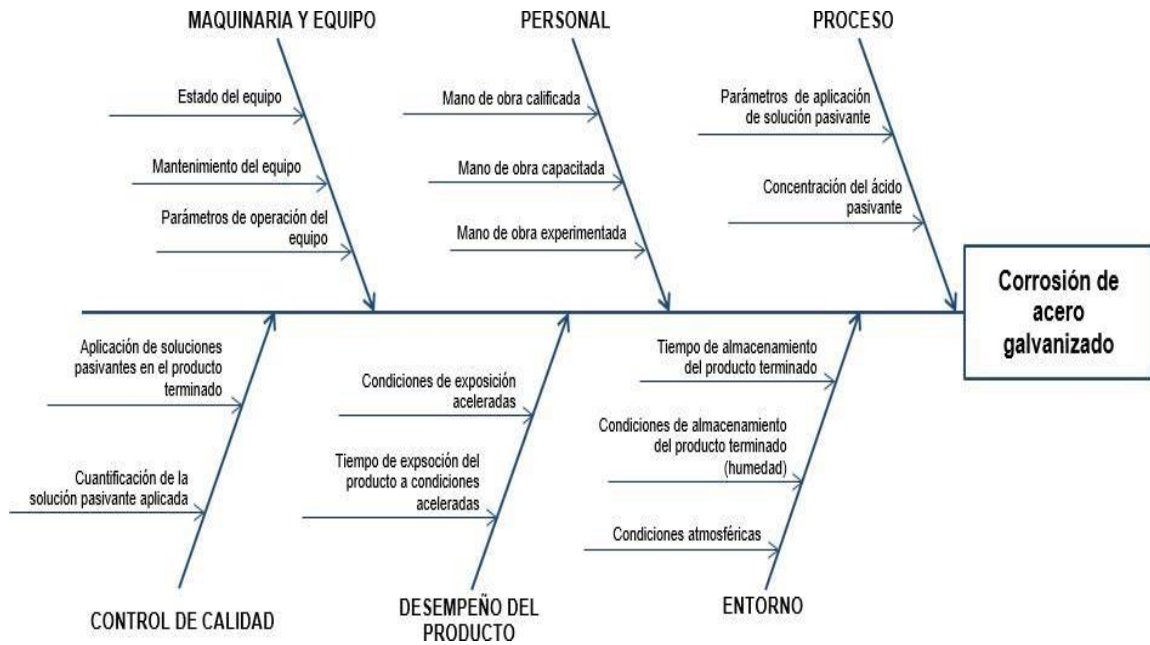
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. Diagrama de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.