



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

**DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN
DEL ACERO AL CARBONO, CON BASE A LAS HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS
DEL MERCADO NACIONAL, EN CONCORDANCIA CON LAS NORMAS ISO 12944 Y SU
CONSIDERACIÓN COMO INVERSIONES EN LA PRESERVACIÓN DE ACTIVOS**

Hugo Fernando Diaz Samayoa

Asesorado por el ing. Carlos Roberto Archila Quevedo

Guatemala, julio de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN
DEL ACERO AL CARBONO, CON BASE A LAS HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS
DEL MERCADO NACIONAL, EN CONCORDANCIA CON LAS NORMAS ISO 12944 Y SU
CONSIDERACIÓN COMO INVERSIONES EN LA PRESERVACIÓN DE ACTIVOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HUGO FERNANDO DÍAZ SAMAYOA

ASESORADO POR ING. CARLOS ROBERTO ARCHILA QUEVEDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JULIO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Adela Marroquín González
EXAMINADORA	Inga. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera

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:

DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO, CON BASE A LAS HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS DEL MERCADO NACIONAL, EN CONCORDANCIA CON LAS NORMAS ISO 12944 Y SU CONSIDERACIÓN COMO INVERSIONES EN LA PRESERVACIÓN DE ACTIVOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de mayo de 2021.



Hugo Fernando Diaz Samayoa

Guatemala, 7 de septiembre de 2022

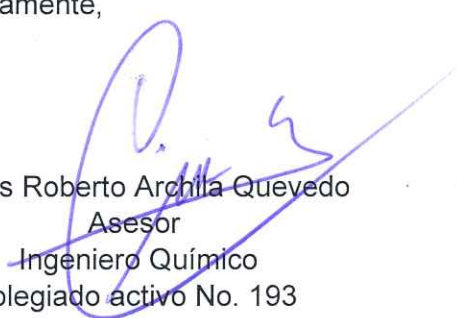
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Reciba un cordial saludo, deseándole éxitos en sus actividades diarias.

Hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: **“DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO, CON BASE A LAS HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS DEL MERCADO NACIONAL, EN CONCORDANCIA CON LAS NORMAS ISO 12944 Y SU CONSIDERACIÓN COMO INVERSIONES EN LA PRESERVACIÓN DE ACTIVOS”**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, **Hugo Fernando Díaz Samayoa**, quien se identifica con **Registro Académico No. 000057188** y con el Documento Personal de Identificación -DPI-, con Código Único de Identificación -CUI- No. 1607 99244 0101.

Sin nada más que agregar, me suscribo, agradeciendo su atención.

Atentamente,


Carlos Roberto Archila Quevedo
Asesor
Ingeniero Químico
Colegiado activo No. 193

Ing. Carlos Archila Quevedo MA
Ingeniero Químico
Colegiado 193



Guatemala, 08 de marzo de 2023.
Ref. EIQ.TG-IF.006.2023.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **001-2021**, 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: **Hugo Fernando Díaz Samayoa**.
Identificado con número de carné: **1607992440101**.
Identificado con registro académico: **57188**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **TESIS (Informe Final, Cierre de Pensum sin 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:



**DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA
CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO, CON BASE A LAS HOJAS TÉCNICAS
DE LOS PRODUCTOS DEL MERCADO NACIONAL, EN CONCORDANCIA CON
LAS NORMAS ISO 12944 Y SU CONSIDERACIÓN COMO INVERSIONES EN LA
PRESERVACIÓN DE ACTIVOS**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Carlos Roberto Archila Quevedo, 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"


Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col/ No. 1443

Adela María Marroquín González
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.148.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO, CON BASE A LAS HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS DEL MERCADO NACIONAL, EN CONCORDANCIA CON LAS NORMAS ISO 12944 Y SU CONSIDERACIÓN COMO INVERSIONES EN LA PRESERVACIÓN DE ACTIVOS**, presentado por: **Hugo Fernando Diaz Samayoa** , procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Alvarez-Mejia: Mg.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, julio de 2023.

LNG.DECANATO.OI.544.2023

El Decano 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: **DESARROLLO DE UNA GUÍA PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO, CON BASE A LAS HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS DEL MERCADO NACIONAL, EN CONCORDANCIA CON LAS NORMAS ISO 12944 Y SU CONSIDERACIÓN COMO INVERSIONES EN LA PRESERVACIÓN DE ACTIVOS**, presentado por: **Hugo Fernando Diaz Samayo**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería
★

Guatemala, julio de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por su infinito amor y permitirme superarme como ser humano.

**Mi familia, amigos en el
cielo**

Un pequeño tributo a su descanso eterno.

**Mi familia, amigos en la
tierra**

Por su apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Casa de estudio que me permitió formarme profesionalmente en la facultad de ingeniería, escuela de Ingeniería Química.

**Ing. Carlos Roberto
Archila Quevedo**

Por compartir su experiencia y asesoría en este trabajo de graduación.

**Inga. Marylin Caribel
Rojas Maldonado**

Por su profesionalismo como guía en los procesos de graduación de ingeniería Química.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
GENERAL.....	XXV
ESPECÍFICOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	7
1.3. Determinación del problema.....	9
1.3.1. Definición	10
1.3.2. Delimitación	11
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Hierro.....	13
2.1.1. Definición	14
2.1.2. Características físicas.....	14
2.1.3. Características químicas.....	15
2.1.4. Características mecánicas.....	15
2.2. Acero	16
2.2.1. Definición	16
2.2.2. Características	16

2.2.3.	Producción mundial y local del acero	21
2.2.4.	Consumo aparente de acero en Guatemala.....	24
2.3.	Corrosión.....	25
2.3.1.	Definición.....	26
2.3.2.	Aportes científicos al estudio y comprensión de la corrosión.....	26
2.4.	Corrosión según la forma	29
2.4.1.	Corrosión uniforme	29
2.4.2.	Corrosión en placas.....	30
2.4.3.	Corrosión por picado o <i>pitting</i>	31
2.4.4.	Corrosión intragranular	32
2.4.5.	Corrosión fisurante o bajo tensión	33
2.5.	Corrosión según el medio	34
2.5.1.	Corrosión química	34
2.5.2.	Fundamento de electroquímica	43
2.5.3.	Corrosión electroquímica.....	50
2.6.	Termodinámica de la corrosión	54
2.7.	Cinética de la corrosión.....	57
2.7.1.	Métodos gravimétricos	57
2.7.2.	Medios eléctricos.....	60
2.8.	Corrosión atmosférica	61
2.8.1.	Corrosión seca	61
2.8.2.	Corrosión húmeda	61
2.8.3.	Corrosión mojada	62
2.8.4.	Influencia de contaminantes en la corrosión atmosférica.....	62
2.8.5.	Otros factores que influyen en la corrosión atmosférica.....	63
2.9.	Consecuencias de la corrosión del acero.....	63

2.9.1.	Consecuencia económica.....	64
2.9.2.	Contaminación y accidentes	65
2.10.	Generalidades de la norma ISO 12944	67
2.10.1.	Introducción	67
2.10.2.	12944-2. Clasificación de ambiente	70
2.10.3.	12944-3. Consideraciones sobre el diseño.....	71
2.10.4.	12944-4. Tipos y preparación de superficie	71
2.10.5.	12944-5. Sistema de pintura protectora.....	75
2.10.6.	12944-6. Ensayos de en el laboratorio	82
2.10.7.	12944-7. Ejecución y supervisión de trabajos de pintado.....	85
2.10.8.	12944-8. Especificaciones para trabajos nuevos y mantenimiento	86
2.10.9.	12944-9. Sistema de pintura protectores y métodos de ensayo de comportamiento en laboratorios para estructuras de ultramar y estructuras afines.....	90
2.11.	Recubrimiento y principales constituyentes.....	90
2.11.1.	Clorocauchos.....	91
2.11.2.	Copolímeros de cloruro de polivinilo	93
2.11.3.	Polímeros acrílicos.....	95
2.11.4.	Resinas alquídicas.....	97
2.11.5.	Resinas epoxídicas.....	101
2.11.6.	Resina poliuretánicas.....	107
2.11.7.	Resina etilsilicato	111
2.11.8.	Resina a base de polisiloxanos	115
2.12.	Pigmentos.....	116
2.12.1.	Dióxido de titanio	117
2.12.2.	Óxido de hierro	118

2.12.3.	Pigmentos a base de zinc	119
2.13.	Aditivos.....	119
2.14.	Hojas técnicas de pinturas y recubrimientos	120
2.14.1.	Rendimiento	121
2.14.2.	Densidad y viscosidad.....	121
2.14.3.	Porcentaje de sólidos en peso y porcentaje en volumen.....	123
2.14.4.	Compuestos orgánicos volátiles (COV).....	125
2.15.	Herramientas financieras	125
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	129
3.1.	Variables	129
3.1.1.	Variables independientes	129
3.1.2.	Variables dependientes	130
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	130
3.3.	Recursos humanos disponibles	130
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	131
3.4.1.	Equipo de cómputo.....	131
3.4.2.	Hoja técnica.....	131
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa	131
3.5.1.	Técnica cualitativa	131
3.5.2.	Técnica cuantitativa.....	132
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	133
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	134
3.7.1.	Formación de sistemas de protección anticorrosiva por empresa	134

3.7.2.	Sistema de protección anticorrosiva por nivel de corrosividad	137
3.7.3.	Guía de selección de recubrimientos.....	138
3.8.	Análisis estadístico	138
4.	RESULTADOS	139
4.1.	Empresas fabricantes e importadoras de recubrimiento	139
4.2.	Datos de hoja técnica por empresa	141
4.2.1.	Celco, Color In, Comex, Copebase y Duwest.....	141
4.2.2.	Grupo Solid.....	142
4.2.3.	Pindegua, Kendall, Lincon y Pintuco.....	144
4.2.4.	Sur Color.....	145
4.2.5.	Primum, Quimicos, Segal, Quindeca y Sherwin Williams	146
4.2.6.	Tipos ligantes disponibles por empresa.....	147
4.2.7.	Empresa y tipos de ligante como recubrimiento anticorrosivo reducible en agua BA	149
4.2.8.	Rangos de compuestos orgánicos volátiles BA, BS.....	150
4.2.9.	Recubrimiento que utilizan la norma ISO-12944-5150	
4.3.	Sistema de protección por empresa	151
4.4.	Protección anticorrosiva por nivel de corrosividad.....	156
4.5.	Guía de selección de recubrimientos	161
4.5.1.	Clasifique el ambiente corrosivo	162
4.5.2.	Preparación de superficie (referencia de la norma ISO-12944-4).....	163
4.5.3.	Durabilidad requerida, según la norma ISO 12944-1.....	164

4.5.4.	Sistema de recubrimiento protectores según la norma ISO 12944-5.....	164
4.5.5.	Ejecución y control del proceso de revestimiento según la norma ISO 12944-7	166
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	169
5.1.	Proveedores de anticorrosivos en Guatemala	169
5.2.	Recubrimientos anticorrosivos solubles en agua	169
5.3.	Utilización de la norma ISO 12944.....	170
5.4.	Sistemas de protección anticorrosiva.....	170
5.4.1.	Nivel C-2.....	172
5.4.2.	Nivel C-3.....	172
5.4.3.	Nivel C-4.....	173
5.4.4.	Nivel C5-I.....	174
5.4.5.	Nivel C5-M.....	175
5.4.6.	Nivel IM-2	176
5.5.	Guía de selección de recubrimientos	176
	CONCLUSIONES.....	179
	RECOMENDACIONES	183
	REFERENCIAS	185
	APÉNDICES.....	207
	ANEXOS.....	211

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de fases del hierro-carbóno	19
2.	Proceso de corrosión del acero.....	27
3.	Motor corroído.....	28
4.	Mecanismo y formas de la corrosión.....	29
5.	Corrosión uniforme.....	30
6.	Corrosión en placas	31
7.	Corrosión por picado	32
8.	Corrosión intragranular.....	33
9.	Corrosión fisurante	34
10.	Corrosión seca con presencia de O ₂	35
11.	Óxidación en la reacción seca, reacción R1, R2, R3.	36
12.	Formación de óxido en la corrosión seca.....	38
13.	Ley parabólica de crecimiento de óxido	40
14.	Estructura del óxido de hierro ante los 500 °C y los 900 °C.....	42
15.	Esquema de una celda galvánica de Zn-Cu.....	47
16.	Celda para electrodeposición de la plata	49
17.	Corrosión electroquímica a nivel de superficie.....	53
18.	Circuito eléctrico del potencióstato.....	59
19.	Fórmula estructural del clorocaucho alifático	92
20.	Estructura química de monómeros y polímeros vinílicos	94
21.	Resina acrílica estirenada	96
22.	Materias primas para la obtención de alquídicos puros	100

23.	Estructura de una resina alquídica pura	100
24.	Función epóxido	102
25.	Estructura química del bisfenol A y bisfenol F	103
26.	Estructura del 1 cloro-2,3-epoxipropano o epiclorhidrina.....	103
27.	Epóxido a partir de bisfenol A y epiclorhidrina	104
28.	Estructura epoxídica a partir de bisfenol F y epiclorhidrina.....	105
29.	Película de resina epóxica con curado complejo	107
30.	Poliisocianato aromático, 2,4, diisocianato de tolueno	108
31.	Poliisocianato alifático, tetrametilén disocianato.....	109
32.	Reacción del isocianato con resina hidroxiladas	111
33.	Estructura química del silicato de etilo.....	112
34.	Segunda etapa de curado del silicato de etilo	113
35.	Polímero de polidimetilsiloxano a partir de su monómero	115
36.	Distribución porcentual de fabricantes e importadoras	141
37.	Ligantes por empresa disponibles en Guatemala.....	148
38.	Protección anticorrosiva por empresa y tipo de ligante	149
39.	Fabricante e importadoras que comercializan BA	150
40.	Propuesta para la identificación del nivel de corrosividad	162

TABLAS

I.	Producción mundial de acero crudo.....	22
II.	Producción de acero crudo en miles de toneladas métricas.....	23
III.	Exportaciones e importaciones de hierro y chatarra.....	24
IV.	Consumo aparente del acero.....	25
V.	Relaciones de Pilling y Bedworth para óxidos	41
VI.	Potenciales estándar de reducción a 25 °C y 1 Atm.....	46
VII.	Potenciales de celda de R5 a R9.....	56

VIII.	Estimación de las pérdidas por corrosión para Guatemala.....	65
IX.	Durabilidad de sistemas según ISO	70
X.	Clasificación de ambientes.....	69
XI.	Agresividad atmosférica	70
XII.	Corrosividad en combinación con T, P, S según ISO 9224.....	70
XIII.	Categorías de estado inicial del acero	72
XIV.	Grados de preparación de superficies	73
XV.	Equivalencias de normas ISO, SSPC y NACE.....	75
XVI.	Corrosividad C2.....	77
XVII.	Corrosividad C3.....	80
XVIII.	Corrosividad C4.....	79
XIX.	Corrosividad C5-I y C5-M.....	80
XX.	Corrosividad IM-1, IM-2, IM-3, IM-4	81
XXI.	Resistencia física y química de los ligantes	82
XXII.	Procedimientos de ensayo para sistemas de pinturas	84
XXIII.	Tipos comerciales de polímeros de clorocaucho	93
XXIV.	Resinas alquídicas según el contenido de aceites.....	99
XXV.	Curado de una película zinc silicato a 3 mils de EPS	113
XXVI.	Equivalencias de viscosidad	122
XXVII.	Empresas fabricantes e importadoras.....	140
XXVIII.	Celco, Color-In, Comex, Copebase y Duwest.....	142
XXIX.	Grupo Solid.....	143
XXX.	Pindegua, Kendall, Lanco y Pintuco.....	144
XXXI.	Sur Color	145
XXXII.	Primium, Quimicos Segs, Quindeca y Sherwin Williams.....	147
XXXIII.	Sistema de protección Celco.....	152
XXXIV.	Sistemas de protección Comex.....	152
XXXV.	Sistemas de protección Copabase.....	153
XXXVI.	Sistemas de protección Grupo Solid	153

XXXVII.	Sistemas de protección Lanco.....	154
XXXVIII.	Sistemas de protección Pintuco.....	154
XXXIX.	Sistemas de protección Sur Color	155
XL.	Sistemas de protección Sherwin Williams	156
XLI.	Nivel de corrosividad C2	157
XLII.	Nivel de corrosividad C3	158
XLIII.	Nivel de corrosividad C4	159
XLIV.	Nivel de corrosividad C5-I.....	160
XLV.	Nivel de corrosividad C5-M.....	161
XLVI.	Nivel de corrosividad IM-2	161

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm²	Área en centímetros
m²	Área en metros
ΔG	Cambio de la energía libre de Gibbs
r	Coeficiente de variación de Pearson
PURC	Combinación de resinas de poliuretanos
EPC	Combinación de resinas epoxídicas
COV	Compuestos orgánicos volátiles en g/L
CVP	Concentración volumétrica de pigmento en %
F	Constante de Faraday = 96 500 coul/mol
Kp	Constante de proporcionalidad en la corrosión química para crecimiento parabólico de óxido
K	Constante de proporcionalidad en la corrosión química para crecimiento lineal de óxido
d	Densidad del metal en la corrosión química
D	Densidad del óxido en la corrosión química
kg/g	Densidad
σ	Desviación estándar o típica
SO₂	Dióxido de azufre
US\$	Dólares americanos
e⁻	Electrón
S	Elemento azufre
C	Elemento carbono
Cl	Elemento cloro

Cu	Elemento cobre
Fe	Elemento hierro
Zn	Elemento zinc
G	Energía de Gibbs
eq	Equivalente químico
Y	Espesor de la capa de óxido en la corrosión química
gal	Galón
g	Gramos
OH	Hidroxilo
HR	Humedad relativa en %
pH	Indicador de acidez o alcalinidad
amp	Intensidad de corriente
Cl⁻	Ión cloruro
Cu⁺²	Ión cúprico
Fe²⁺ Fe³⁺	Ión ferroso y férrico
H⁺	Ión hidrógeno
Zn⁺²	Ión zinc
kg	Kilogramo
kj	Kilojoules
L	Litro
cm	Longitud en centímetros
≥	Mayor o igual que
>	Mayor que
\bar{X}	Media aritmética
≤	Menor o igual que
<	Menor que
μm	Micra o micrón
mils	Milésimas de pulgada
mg	Miligramos

mm	Milímetro
n	Número de electrones
NO	Óxido nítrico
NO₂	Óxido nitroso
O₂	Oxígeno molecular
w	Peso del metal en la corrosión química
W	Peso molecular del óxido en la corrosión química
AY	Polímeros acrílicos
%V	Porcentaje de sólidos por unidad de volumen
%	Porcentaj
ε	Potencial de electrodo en voltios
Q/g	Quetzales por galón
A	Recubrimiento de acabado, expuesto al ambiente
I	Recubrimiento intermedio entre el 1ero y el acabado
P	Recubrimiento primario (fondo o primer)
P.W	Relación de Pilling y Bedworth en la corrosión Q
m²/g	Rendimiento de una pintura o recubrimiento
AK	Resina Alquídica
CR	Resinas a base de clorocauchos
PVC	Resinas a base de clorocauchos
PVC	Resinas a base de copolímeros de PVC
EP	Resinas a base de epoxídicos
EP	Resinas a base de epoxídicos
ESI	Resina de Etilsilicato
PUR	Resina a base de Poliuretanos
aq	Solución acuosa
M	Solución con concentración expresada en moles/litro
FeSO	Sulfato de hierro
TIR	Tasa interna de retorno

°C	Temperatura en Celsius
h	Tiempo en horas
atm	Unidad de presión en atmósferas
mPa.s	Viscosidad en milipascal-segundo
KU	Viscosidad en unidades Krebs
cm³	Volumen

GLOSARIO

Ácido linoleico	Ácido graso de la linaza, poliinsaturado pues tiene dos dobles enlaces en su molécula.
Ácido linolénico	Ácido graso de origen vegetal que presenta dos dobles enlaces en su molécula, por lo que dice que es poliinsaturado.
Ácido oleico	Ácido de origen vegetal, monoinsaturado pues tiene un doble enlace en su molécula.
Airless	Equipo para aplicar pinturas o recubrimientos por pulverización, pero sin que el aire y el producto se mezclen. Se utiliza para áreas grandes.
Alto horno	Horno de gran altura para fundir el mineral de hierro y obtener este metal en formas más puras o aleadas. Su fuente de energía es el carbón vegetal.
Amidas	Son compuestos derivados de las aminas primarias o secundarias y un dímero o trímero de ácido graso.
Aminas	Se clasifican de acuerdo con el número de átomos de hidrógeno del amoníaco que se sustituyen por grupos orgánicos. Las que tienen un solo grupo se llaman

aminas primarias, las que tienen dos se llaman aminas secundarias y las que tienen tres, aminas terciarias.

Antifloculantes Compuestos para evitar la formación de flóculos del recubrimiento dentro del envase.

Antinatas Es un compuesto que evita que los recubrimientos alquidáticos, sobre todo, formen natas dentro del envase.

Arco eléctrico Horno para la fundición del mineral de hierro con el uso de electricidad.

CIF Del inglés Insurance and Freight, Cost, seguro y flete al puerto de destino convenido. Término de comercio internacional que se utiliza en las operaciones de compraventa, en que el transporte de la mercancía se realiza por barco (mar o vías de navegación interior).

Cinética En este trabajo se aplica a la velocidad con que ocurren las reacciones químicas de la corrosión del hierro.

Copolímero Es una macromolécula compuesta por dos o más monómeros o unidades repetitivas distintas, que se pueden unir de diferentes formas por medio de enlaces químicos. Los monómeros pueden distribuirse de forma aleatoria o periódica.

Dispersantes	Es un agente químico utilizado para obtener una mejor homogenización de las cargas y pigmentos en una fase líquida, utilizando un agente que humecte y disperse y se evita la aglomeración posterior del pigmento.
Dureza de un recubrimiento	Es la resistencia que ofrece un material o recubrimiento a la alteración permanente mediante la aplicación de una fuerza mecánica como puede ser la presión, frote o rayado.
Dureza del agua	Es la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular, sales de magnesio y calcio. Normalmente el dato se refiere al calcio y su unidad es miligramos/litro.
Electrostático	Término aplicado a sistema de aplicación de pintura en polvo que fundamenta su aplicabilidad a través de cargas eléctricas.
Enlace covalente de coordinación	Enlace en el que el par de electrones compartidos por dos átomos es aportado por solo uno de ellos.
EPH	Indicativo de espesor de película húmeda para una pintura o recubrimiento al terminar de aplicarla sobre un sustrato.
EPS	Indicativo de espesor de película seca para una pintura o recubrimiento luego de su proceso de secado o curado.

Estado de oxidación	Cantidad pérdida o ganada de electrones de un átomo. Pérdida implica oxidación y ganancia implica reducción. El hierro presenta estados de oxidación +2 y +3.
Éster	Son compuestos que se forman por la reacción de ente ácidos y alcoholes, generando agua como subproducto.
Éteres	Son compuestos que tienen un átomo de oxígeno unido a dos radicales hidrocarbonados.
FOB	Del inglés Free On Board, Libre a bordo, puerto de carga convenido una cláusula de comercio internacional que se utiliza para operaciones de compraventa en las que el transporte de la mercancía se realiza por barco.
Homopolímero	Se le denomina así al polímero que está formado por el mismo monómero a lo largo de toda su cadena.
Índice de refracción	Valor que mide el poder de cubrición de un pigmento. A mayor valor, mayor poder cubrimiento.
Intragranular	Se aplica el término cuando la grieta de corrosión se propaga a través de las fronteras de grano.
Melamina	Compuesto orgánico que forma parte del grupo de las amino-resinas.

Monómero	Es una molécula de pequeña masa molecular que está unida a otros monómeros, a veces cientos o miles, por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, formando macromoléculas llamadas polímeros.
Nucleación	Son pequeñas cantidades de óxido o de sulfuro que aparecen sobre la superficie del acero. Inicialmente son pocos, pero con el tiempo crecen hasta cubrir toda la superficie.
Oxidación	Proceso de formación de película seca de ciertos recubrimientos como los alquídicos en que los dobles enlaces reaccionan con el oxígeno molecular del aire. También se aplica al proceso de corrosión del hierro.
PIB	Siglas del producto interno bruto. conjunto de los bienes y servicios producidos en un país durante un espacio de tiempo, generalmente un año. Se utilizan dos tipos de PIB. El nominal que basa su cálculo en los precios del año considerado. El real que utiliza un año de referencia para los precios y permite establecer las condiciones de cambio de la producción. La residencia del factor productivo puede ser fuera del país de medición.
Pistola convencional	Dispositivo para pulverizar pinturas a través de un recipiente que contiene poco volumen y alta presión

de aire generada por un compresor. El aire y la pintura se mezclan en el conducto de salida.

Plastificante	Compuesto adicionado en bajas cantidades, flexibiliza las resinas que componen un recubrimiento.
Producto Nacional Bruto	Productos o servicios producidos dentro del país de medición.
REDOX	Término normalmente utilizado para indicar reacciones químicas de óxido – reducción.
Resinas hidroxiladas	Expresión que hace referencia a resinas que tienen el grupo OH.
Secantes	Compuestos que se caracterizan por tener iones metálicos, como cobalto, zirconio y manganeso; su acción es acelerar el proceso oxidativo para la formación de la película seca de recubrimiento. Normalmente se usan en sistemas alquídicos.
Sistema disperso	Son mezclas de dos o más sustancias simples o compuestas en donde hay una fase dispersa o discontinua, que en la mayoría de casos está en menor cantidad, y una fase dispersante o continua, que generalmente interviene en mayor proporción.
Sólidos disueltos	Es el número de miligramos del residuo que queda después de evaporar una muestra de agua

previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con abertura de 1,5 micras. El agua se evapora y el residuo se lleva hasta 180 °C. El resultado se reporta en miligramos/litro.

Solventes alifáticos Se caracterizan por su débil olor y alta velocidad de evaporación, están formados por una mezcla de parafinas tipo normal, iso y cicloparafinas.

Solventes aromáticos Son hidrocarburos insaturados, con forma de anillo (denominado anillo bencénico o aromático) y es considerada una forma poliinsaturada del ciclohexano.

Transgranular Se aplica el término cuando la grieta de corrosión se propaga a través de los granos.

RESUMEN

En esta investigación se propuso un guía para la selección de sistemas de protección del acero al carbono contra la corrosión bajo los criterios de la norma ISO 12944 con base en el análisis de las hojas técnicas de los recubrimientos que para el efecto, tiene el mercado nacional y evaluar su costo de aplicación como inversiones en la preservación de activos.

Se revisó los mecanismos de corrosión, físicos, químicos, termodinámicos, cinéticos, así como las consecuencias que por no controlar su desarrollo se pueden dar en afectación económica, de productividad, seguridad y contaminación.

El estudio de la norma ISO 12944 permitió correlacionar los parámetros de las hojas técnicas de cada recubrimiento para conformar sistemas de protección con desempeño en ambientes corrosivos, distribuidos en las categorías que la norma establece, para lo que se tabularon los datos de cada producto, agrupados por empresa en orden alfabético, indicando su nombre o código, grado de preparación de superficie requerida, tipo de ligante, función dentro del sistema de protección, capacidad de protección en niveles de corrosividad, según ISO 12944 por semejanza o concordancia, tipo de diluyente, es decir base agua y base solvente, densidad, espesor recomendado, viscosidad, sólidos por volumen en porcentaje, compuestos orgánicos volátiles y precio público en Quetzales por galón.

Con las características y valores anteriores, adicionando la información de ISO 12944, en cuanto a pérdidas de acero por nivel de corrosividad, espesores

recomendados, durabilidades en años y costo de aplicación por metro cuadrado, se integraron 40 sistemas de protección, tabulados inicialmente por empresa y luego, por niveles de corrosividad, en las que se calculó las tasas internas de retorno para verificar su uso, no como gasto sino como inversión en la preservación de activos y, finalmente, se determinó el costo medio, la desviación estándar y coeficiente de variación de Pearson por nivel corrosivo.

Los resultados indicaron que únicamente el 12 % de los recubrimientos disponibles hacen referencia a la norma, el 11 % son solubles al agua en ambientes moderados; sin embargo, al establecer las semejanzas del resto, dadas sus propiedades, con la norma ISO 12944, permitió asignar los sistemas en las categorías de ambientes corrosivos C2, que incluye C1, C3, C4, C5-I, C5-M e IM-2.

Los costos de aplicación por metro cuadrado, sobre una base de cálculo de igual superficie de acero, determinaron que los sistemas anticorrosivos son inversiones en la preservación de activos, siempre que la vida útil sea igual o mayor a 10 años, hasta un máximo de 25 años, que establece la norma, pues presentan tasas internas de retorno positivas.

La guía de selección se estructuró con fundamento en la norma y en los sistemas conformados, sin especificar empresa, marca o sistema en particular.

OBJETIVOS

General

Proponer una guía de sistemas de protección anticorrosiva para el acero bajo las consideraciones de las normas ISO 12944 con recubrimientos del mercado nacional, a través de la información de sus hojas técnicas y que puedan considerarse como inversiones en la preservación de activos.

Específicos

1. Comprender los mecanismos de la corrosión del hierro en el acero, considerando los aspectos físicos, químicos, termodinámicos y cinéticos como un proceso natural hacia su estado combinado.
2. Analizar las consecuencias económicas, de productividad, contaminación y seguridad que la corrosión provoca al no controlar su desarrollo.
3. Conocer las normas ISO 12944, como un estándar internacional para la protección del acero en contra de la corrosión a través de recubrimientos de tipos de pinturas.
4. Determinar, a través del estudio de las hojas técnicas de los recubrimientos anticorrosivos del mercado guatemalteco, las características de protección contra la corrosión y resistencia a las acciones del medio ambiente en que se desempeñe, asociadas a las normas ISO 12944.

5. Caracterizar los sistemas de protección anticorrosiva como inversiones en la preservación de activos, a través de la tasa interna de retorno, tomando en consideración los costos de los sistemas y el costo por unidad área corroída, durante la vida útil de dichos sistemas.

INTRODUCCIÓN

El acero es la aleación de mayor uso en el mundo por lo que constituye el 95 % de la producción metálica en todo el orbe. Guatemala consume alrededor de 554,000 toneladas métricas anuales, equivalentes a 727 millones de dólares, según registros del Banco de Guatemala. El 40 % de la producción mundial es para reponer equipos que han sido destruidos por el fenómeno corrosivo y en Guatemala no hay institución pública o privada que registre los daños y las pérdidas monetarias por corrosión.

Estudios de diversas fuentes entre las que figura NACE, siglas que corresponden a National Association of Corrosion Engineers y el informe Hoar, que se presentó en Inglaterra en 1969, establecen que las pérdidas por corrosión de este material inciden alrededor del 3 % en el valor del PIB.

El objetivo de este trabajo se encaminó hacia el establecimiento de una guía de selección de recubrimientos para la conformación de sistemas de protección del acero, según diferentes tipos de agresividad ambiental, tomando como referente las norma ISO 12944 y la información técnica de los productos disponibles en el país.

Se presenta un compendio del acero como material a proteger considerando aspectos económicos, químicos, físicos, termodinámicos y cinéticos.

La norma ISO 12944 se desarrolla de una forma sencilla y clara, indicando los elementos más importantes, así como las descripciones de los ligantes o resinas que componen los recubrimientos que en dicha se norma se consideran.

El análisis de las hojas técnicas se hace de una forma tabular, estableciendo las concordancias y semejanzas con ISO para proponer sistemas anticorrosivos en todos los ambientes corrosivos y su cuantificación financiera como inversiones en la preservación de activos, a través del cálculo de la tasa interna de retorno.

1. MARCO CONCEPTUAL

El hierro, como constituyente principal del acero, al sumar el 95 % de la producción metálica mundial lo convierte en el metal de mayor uso en la industria y comercio (Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Minería, 2016).

1.1. Antecedentes

Refinar el hierro de su estado natural oxidado y posteriormente, transformarlo en acero, requiere de bastante energía y con el paso del tiempo y en combinación con factores ambientales naturales, urbanos e industriales, retomará su estado original, proceso que se conoce como corrosión.

La cinética de este proceso variará según las condiciones en los que el acero se desempeñe y nunca se detendrá. Lo que vuelve útil a este metal es que, además de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, esta cinética puede llegar a ser muy lenta si se aplica una protección adecuada sobre la superficie expuesta al medio corrosivo y como consecuencia, una vida útil extensa de equipos, estructuras, chimeneas, tuberías o cualquier activo que adecuadamente se proteja de dicho medio (Chaverra, 2016).

Al revisar las tesis de la escuela de Ingeniería Química, de la facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, no se encontró tema similar al que se presenta en este trabajo, por lo que se revisó otros documentos de nivel internacional.

Se publicó el artículo *Diseño de una especificación de recubrimientos*, escrito por el Ingeniero Nicolás F. Oriundo de la Cruz, certificado por la National Association of Corrosion Engineers, conocida por sus siglas NACE, con identificación LEVEL 2 CIP No. 39046 con fecha 14 de junio de 2016 en la revista INPRA Latina, orientada a temas sobre pinturas y recubrimientos, con sede en Miami, Estados Unidos (Oriundo De la Cruz, 2016).

Resalta la importancia de las especificaciones técnicas en un proyecto de protección y conservación de activos de cualquier empresa industrial; de hecho, una errónea especificación generará pérdidas económicas pues la falla del sistema de protección puede implicar paralizaciones, fugas, contaminaciones y en el peor de los casos, tragedias humanas.

Establece que lo ideal es realizar pruebas de resistencia y funcionalidad de los sistemas propuestos, pero esto requiere demasiado tiempo por lo que es práctico utilizar experiencias previas y que se plasman en estándares, normas, y artículos, entre otros.

Los criterios básicos que se deben seguir para la especificación de un sistema de protección anticorrosiva inician con la clasificación de ambientes, ya que el 80 % de las estructuras están expuestas al ambiente y las mayores pérdidas por corrosión se deben a la acción atmosférica; recomienda apoyarse con la norma ISO 12944-2.

El tiempo estimado de protección de la estructura, aconseja referirse a la norma ISO 12944-1.

En cuanto a las consideraciones de diseño es importante, revisarlas, pues esto establece el tratamiento de superficie previo a la aplicación del sistema de

protección; además, permite evaluar si hay contacto de metales disímiles, ambientes incompatibles, trampas de agua y ranuras, entre otros.

La preparación de superficie debe ser acorde a lo recomendado por el proveedor del sistema de protección anticorrosiva.

Finalmente, la selección del sistema de recubrimientos, una vez completadas las etapas anteriores, establecen las opciones de protección en las que debe considerarse el costo, la disponibilidad del mercado local, asesoría del proveedor y garantías, entre otros. Es muy útil apoyarse con la norma ISO 12944-5 y las especificaciones para preparación de superficies de la Steel Structures Paint Council, conocida como SSPC.

Concluye, que todo este proceso debe proveer:

- Confianza en que el sistema de protección es el adecuado
- Enfoque objetivo de la selección del sistema
- Una matriz simple y clara de las opciones de protección
- Vida del sistema elegido significativa
- Normas universalmente aceptadas

El Ingeniero Oriundo de la Cruz fundamenta su artículo con la utilización de normas de tres organizaciones internacionales: NACE, ISO Y SSPC.

NACE fue creada en 1943, en Houston Texas, Estados Unidos y desde entonces, se ha dedicado el estudio y promulgación de propuestas para la protección de metales. Es considerada como una autoridad en materia de corrosión que cuenta con más de 36 000 miembros en 140 países y realiza entrenamiento técnico, programas de certificación, conferencias, estándares de

la industria, reportes, publicaciones técnicas, entre otras. Su experiencia industrial ha sido aeroespacial, química, servicios de agua potable, servicios sanitarios, transporte, militar, eléctrica, gas, infraestructura y marina (*NACE International*, s.f.).

La ISO, International Organization for Standardization, fundada en Londres, Inglaterra, en 1947, es una agrupación no gubernamental que, 25 países, a través de la normalización, trataron de contribuir con la reconstrucción del mundo, luego de la segunda guerra mundial.

En la actualidad cuenta con más de 21,500 normas y más de 163 países miembros para los campos tecnológicos, ambientales y sociales. Guatemala está asociada a ISO a través de la Comisión Guatemalteca de Normas conocida como COGUANOR, la que depende del Ministerio de Economía.

La aplicabilidad de sus normas es de carácter voluntario y pretende unificar los criterios de trabajo y medición en todo el orbe (*ISO*, s.f.).

En 1998 establece la norma 12944 para la protección del acero mediante sistemas de pintura (*Hempel*, s.f.).

La SSPC, Steel Structures Paint Council es creada en Estados Unidos en el año de 1950. Su principal misión es la protección y preservación de superficies de concreto y acero a través del uso de procedimientos adecuados de limpieza y preparación de superficies, aplicación de protectores y recubrimientos de alto rendimiento. Es la organización líder a nivel mundial en fuente de información para preparación de superficies, selección y aplicación de recubrimientos, regulaciones ambientales, regulaciones de salud y seguridad que afectan la industria por lo que también es referente de la ISO (*AMPP*, 2018).

Del 6 al 10 de marzo de 2016, NACE publicó un estudio de dos años sobre el impacto de la corrosión y en el mismo indica que el costo mundial por pérdidas en corrosión es del 3.4 % del PIB mundial. El valor corresponde específicamente a los costos directos, debido a que es muy difícil cuantificar los costos indirectos.

Los costos directos implican básicamente la reposición de equipos y accesorios, así como costos de mano de obra, mientras que los indirectos contemplan pérdidas de producto, paros de fabricación, accidentes y contaminaciones.

El estudio se presentó en la conferencia Corrosión 2016 en Vancouver, Canadá y examinó los aspectos económicos de la corrosión y el papel de la gestión de la corrosión en el establecimiento de mejores prácticas en la industria.

La conferencia concluyó que la aplicación de buenas prácticas de prevención de la corrosión podría generar ahorros globales entre el 15 % y el 35 % del costo de los daños (Chaverra, 2016).

La tesis *Selección de Sistemas de Pinturas para Protección Anticorrosiva del Acero en Ambientes Industriales*, fue desarrollada en 2006 por Juan Antonio Quiróz García para obtener el título de Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima, Perú (Quiróz García, 2006).

Hace referencia a la importancia de la protección del acero utilizando sistemas de pinturas anticorrosivas, pues son materiales de bajo costo comparados con aleaciones de mayor resistencia a la corrosión o de reposición de activos, parcial o totalmente, de composición igual o similar al acero inicial. Justifica su investigación desde tres perspectivas.

La primera es económica al señalar las pérdidas por corrosión a través del informe Hoar y que las cuantifica en 3.5 % del Producto Nacional Bruto.

La segunda perspectiva en el campo termodinámico, puesto que la obtención del hierro y luego su conformación como acero lo convierte en un material inestable dado que el estado de más baja energía de este metal es el estado combinado, ya sea en forma de óxidos, sulfuros, cloruros, carbonatos, fosfatos u otros compuestos.

La tercera se refiere a la protección adecuada con pinturas anticorrosivas, ya que pueden generar ahorros del 22.7 % en la pérdida por material corroído.

Establece que los sustratos principales a nivel industrial se clasifican en acero al carbono, hierro fundido, acero galvanizado, aluminio y concreto. De la división anterior, centra su estudio en sustratos de acero al carbono y acero galvanizado por ser los más utilizados a nivel industrial en su país.

Presenta las formas de preparación de superficies recomendadas por NACE y SSPC, lista los factores que intervienen en el proceso de corrosión, así como los tipos de esta, que se han identificado y describe los constituyentes principales de las pinturas anticorrosivas separados en resinas, pigmentos y aditivos.

Este trabajo no se fundamentó en experimentación de laboratorio o de campo, sino en un análisis teórico de los principales constituyentes, con base en la información técnica de fabricantes de dichos materiales y de productores de pinturas anticorrosivas.

Establece los sistemas de protección en base a las propiedades de los constituyentes principales de las pinturas anticorrosivas, como variables de una matriz en la que se conjugan ambientes corrosivos de varios tipos. Toda esta información la ordena a través de un programa en Excel para que sirva como hoja genérica de consulta.

Sus conclusiones se basan en la concordancia entre la literatura especializada y las especificaciones de resinas, pigmentos, aditivos y pinturas anticorrosivas como tal.

1.2. Justificación

El uso del hierro como acero, en el diseño y construcción de equipos industriales, líneas de conducción, puentes, torres y estructuras en general, convierte a este material en el más importante en todas las naciones desarrolladas y en vías de desarrollo del planeta. Sus características físicas, químicas, mecánicas y su precio bajo, con relación a otros metales, lo hacen el que ocupe el 95 % de la producción mundial metálica y el de mayor consumo.

Al refinar el hierro, despojándolo del oxígeno, ya sea por mineral de hierro o reciclaje de chatarra, se genera un material de múltiples propósitos, pero que retomará, tarde o temprano, su estado natural combinado ya que el metal puro o aleado como acero, se constituye en un sistema termodinámicamente inestable al poseer bastante energía, generada en el proceso de alto horno o de arco eléctrico. El metal buscará un nivel energético más bajo que le permita estabilidad química y eso lo logra a través de la corrosión. La velocidad a la que esto ocurre depende del medio en el que se encuentre. Al irse degradando, sus propiedades se van perdiendo y en casos ya extremos, deformando, hasta convertirse totalmente en herrumbre.

Reponer equipos en una planta, detener la producción por fallas, accidentes, contaminar por fugas de líquidos o gases, perder una obra de arte, aislar una comunidad por el desplome de un puente, son muchos de los problemas que la falta de atención a la corrosión puede ocasionar y todos estos, con un factor común que es pérdidas monetarias altas y en casos extremos, pérdidas de vidas humanas. Ningún ingeniero o persona con sentido de responsabilidad desea tener cualquiera de estos eventos.

Si bien, existen infinidad de estudios referentes al tema de la corrosión, aún hoy, muchos profesionales de la ingeniería y ramas afines, que tengan bajo su responsabilidad un activo de acero, no tienen plena conciencia del problema de la corrosión y las consecuencias que, por no actuar a tiempo, va a generar.

Estamos en una época en que hemos tratado de ser más conscientes sobre la preservación del medio ambiente, mejorar la productividad y buscar ventajas competitivas sostenibles al aplicar buenas prácticas de manufactura, como parte de un proceso de gestión total de la calidad; entonces, el control de corrosión de todo activo de acero a través de protección con el uso de tecnologías anticorrosivas de superficie debe ser considerada con seriedad.

La preservación del acero implica protegerlo de agentes corrosivos y el uso de pinturas es el más utilizado por su costo más accesible y relativa facilidad de aplicación, siempre y cuando se haga de la manera correcta.

En Guatemala, a través de sus fábricas e importadoras, se tienen opciones de protección; sin embargo, esta protección se limita, generalmente, al precio más bajo y a la acción de pintar, en vez de proteger por medio de un sistema adecuado.

Un sistema anticorrosivo considera la acción del medio ambiente en el que el acero se desempeña, las propiedades de resistencia a ese medio de los constituyentes de su formulación y los requerimientos de preparación del sustrato, la forma de aplicación y la estimación de la vida útil, por lo que se constituye en una tecnología anticorrosiva de superficie y el Ingeniero Químico debe ser un profesional con la capacidad de resolver problemas complejos relacionados con la industria y el medio ambiente y dentro de estos, el mantenimiento de equipos, instalaciones y conducciones no puede quedar excluido.

Con muy contadas excepciones, como Cementos Progreso, las industrias y comercio guatemalteco en general, no tienen protocolos de mantenimiento para el control de corrosión.

Por lo anterior, se hizo un análisis de las especificaciones técnicas de los diferentes productos del mercado nacional; así como un estudio teórico de las resinas constituyentes, pigmentos y aditivos para proponer sistemas genéricos de protección anticorrosiva adecuados a los diferentes ambientes que se presentan, con los fundamentos de las normas ISO 12944, de manera que se constituyan en tecnologías anticorrosivas de superficie para el hierro y el acero, cuantificadas como inversiones en la protección y preservación de activos y no como gastos de mantenimiento.

1.3. Determinación del problema

Guatemala utiliza derivados del hierro, como el acero, para diversidad de actividades de construcción, industria, infraestructura, urbanización, entre otras. Se consumen aproximadamente 554,000 toneladas métricas cada año como

promedio de 2013 a 2020 con datos procesados de reportes del Banco de Guatemala.

1.3.1. Definición

El hierro se corroe a velocidades de degradación que varían según las condiciones del medio circundante en que se desempeña, por lo que debe ser protegido, no pintado.

El recubrimiento que se utiliza es normalmente a través de pintura anticorrosiva, cuya elección se fundamenta generalmente en el menor precio posible, ya sea que se aplique directamente por el responsable de los bienes a proteger o se recurra a una empresa contratista de aplicación.

Generalmente, no se hacen las pruebas de campo previas, ni consideraciones del medio corrosivo industrial, marino o urbano, por lo que un análisis de las especificaciones dadas en las hojas técnicas bajo las normas ISO 12944 debe ser de mucha utilidad.

Esta forma de protección se considera un gasto y jamás una inversión a través de la prolongación de la vida útil del activo.

Debe observarse que según el decreto 78-2005 se creó la *Ley del Sistema Nacional de la Calidad*, el que establece en su artículo 7 que la creación o implementación de normas debe ser responsabilidad del Consejo Nacional de Normalización y que incluye las cámaras de Industria, Comercio, Construcción, del Agro, gremial de exportadores de productos no tradicionales, rectores de universidades y presidentes de colegios profesionales (Congreso de la República de Guatemala, 2019).

No existe institución pública o privada que registre los daños y las pérdidas monetarias por corrosión en el país, de manera que estas pudieran ser gigantescas y no cuantificadas. Tampoco hay datos sobre los niveles de contaminación del aire en áreas industriales, marinas y urbanas.

Al buscar información referente a la corrosión, sus efectos y su control en el medio nacional, prácticamente no se encuentra nada, lo que implica que, en este campo, hay mucho por hacer.

Los conocimientos y la cultura de protección anticorrosiva no son suficientes todavía para la preservación del acero, hace falta estudio, divulgación, concientización y registro.

Un sistema de protección anticorrosiva debería ser legalmente considerado como un activo, puesto que desempeña una función específica, tiene una vida útil y un costo que le debe incrementar el valor al activo que protege y, como consecuencia, debería aplicarse el beneficio de la depreciación.

1.3.2. Delimitación

Este trabajo se limita a una guía para la protección del acero frente a la corrosión en sus diferentes formas comerciales e industriales disponibles en el mercado guatemalteco, como sustrato a proteger, por medio de propuestas teóricas de sistemas de recubrimientos anticorrosivos, derivados del estudio de las hojas técnicas de los productos disponibles en el mercado nacional en concordancia y /o semejanza con la norma ISO 12944.

No se consideran aceros inoxidable ni aleaciones especializadas. Tampoco se incluyen otros metales, aleaciones o materiales en general que sean susceptibles de corroerse.

Los sistemas de protección del acero no circunscriben geográficamente su utilización, a menos que expresamente se especifique, por lo que su aplicabilidad se extiende a cualquier estructura, equipo o tubería dentro del territorio nacional.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se revisa todo lo concerniente al hierro, partiendo de su ubicación en la tabla periódica como elemento, sus características físicas, químicas, mecánicas, la formación de aceros, el diagrama de fases, los tipos de acero, el proceso de corrosión, sus clasificaciones, los aspectos químicos, termodinámicos, cinéticos, su producción y consumo en el país, las consecuencias que la falta de atención a la corrosión genera.

La norma ISO 12944 se revisa de manera completa y dentro de esta, los ligantes o resinas típicas para la protección del acero; se incluye las generalidades de los componentes de las pinturas, así como los parámetros que las hojas técnicas deben incluir para la elección de sistemas de protección anticorrosiva.

2.1. Hierro

Es el cuarto elemento más abundante en la tierra, con un 5 % de la masa total de esta; le precede el aluminio como elemento metálico con 8 % (Lenntech, s.f.). Su utilización es de tal magnitud que ocupa el 95 % de la producción metálica en el mundo (Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Minería, 2016), siendo la mayor parte para la obtención de aceros.

2.1.1. Definición

Elemento químico con número atómico 26 que se ubica en la columna 8, período 4 de la tabla periódica, perteneciendo a los metales de transición. Su símbolo es el Fe proveniente del latín *ferrum*, con masa atómica de 55.847 uma.

Su estructura electrónica es $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$ y en la cual, los orbitales d, que son 5, tienen capacidad de tener dos electrones por orbital, es decir, 10 en total. El hierro tiene 6 electrones, por lo que presenta un déficit de 4 en dicho orbital. Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada IUPAC, por sus siglas en inglés, los metales de transición pueden dar lugar a la formación de cationes; para el caso del hierro, presenta estados de oxidación +2 y +3 (Burns, 2011).

2.1.2. Características físicas

Dentro de sus características físicas más importantes se pueden listar las siguientes:

- Color plateado y brillo metálico.
- Sólido a temperatura ambiente.
- Buen conductor del calor y la electricidad.
- Altos puntos de fusión y ebullición.
- Tiene propiedades magnéticas.

El hierro puro, 99.5 % de pureza, no es muy utilizable debido a que es de extrema dureza y quebradizo, por lo que su única aplicabilidad es a través de su potencial magnético. Por el contrario, al alearse con carbono y otros metales, sus propiedades de dureza, fragilidad y resistencia cambian drásticamente, por lo que

es como industrialmente se produce y comercia en todo el mundo y el término que se aplica genéricamente es el de acero (Katz, 2011).

2.1.3. Características químicas

En la naturaleza se encuentra en forma de óxidos, sulfuros, fosfatos, carbonatos y otros compuestos: Pirita [FeS_2], chamosita [$\text{Fe}_3(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_{10})\cdot 3\text{H}_2\text{O}$], goethita [$\text{Fe}^{+3} \text{O}(\text{OH})$], hematitas u oligisto [Fe_2O_3], limonita [$\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$], magnetita [Fe_3O_4 o $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$], siderita [FeCO_3], ilmenita [FeTiO_3] y vivianita [$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$] (Lenntech, s.f.).

Es un metal activo, se combina con los halógenos flúor, cloro, bromo y yodo; además con azufre, fósforo, carbono y silicio. Desplaza al hidrógeno de los ácidos diluidos; forma óxidos metálicos ferroso y férrico al reaccionar con el oxígeno.

Es atacado lentamente por el oxígeno a temperatura ambiente y con mucha rapidez a temperaturas elevadas.

Forma compuestos de coordinación por su facilidad de establecer enlaces covalentes debido a la participación de electrones 3d, por su tendencia a reaccionar con diferentes estados de oxidación y a su relativa facilidad de cambiar de un estado de oxidación a otro.

2.1.4. Características mecánicas

El hierro puro no presenta propiedades mecánicas interesantes dado que es muy duro y quebradizo, por lo que lo único aprovechable es su potencial magnético.

2.2. Acero

No se conoce el período ni la cultura en la cual se empezó a utilizar el término acero y su etimología, que deriva del latín *aciarium*, y que proviene del vocablo *acies*, significa filo y, en consecuencia, este material hacía alusión a las armas blancas (Pérez Porto & Gardey, 2009).

2.2.1. Definición

El acero se define como una aleación de hierro y pequeñas cantidades de carbono con lo que adquiere gran dureza y elasticidad (Pérez Porto & Gardey, 2009).

2.2.2. Características

Es una aleación de composición química compleja. Además de hierro, cuyo contenido puede estar entre 97 % y 99.5 % en peso, contiene carbono entre 0.08 % y 2 %, Por el proceso de producción, puede haber trazas de manganeso y silicio. Durante la refinación, no se elimina totalmente azufre, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y fósforo y, casualmente, puede haber presencia de cromo, níquel, cobre y otros como tungsteno, también llamado wolframio, y molibdeno.

La aleación importante es hierro-carbono y es a lo que se refieren los términos acero y fundiciones, por lo que las aleaciones férreas se basan en el contenido de carbono. Los aceros inoxidable contienen cromo y níquel en valores que pueden estar arriba del 8 %.

Las aleaciones férreas pueden agruparse en tres categorías:

- Hierro. Con un contenido de carbono menor al 0.08 %.
- Acero. El carbono puede estar entre el 0.08 % y 2 %.
- Fundición. El carbono presenta valores mayores a 2.1 %.

Se pueden clasificar según varios criterios: composición química, microestructura, propiedades, uso, métodos de conformación, métodos de acabado, forma del producto, tratamiento térmico, entre otros. (Molina Pérez, 2011).

En 1868 Dmitry Chernov, de origen ruso a través del estudio del acero demostró que este no es el mismo material a diferentes temperaturas, sino que sufre transformaciones polimórficas o alotrópicas (EcuRed, s.f.).

En los resultados de Chernov estableció puntos críticos del hierro en función de la temperatura con influencia del material aleado, siendo el carbono el más importante. Hasta los 911 °C el hierro presenta una estructura cristalina centrada en el cuerpo llamada α -hierro o ferrita. Este material tiene bajas cantidades de carbono y tiene propiedades de ductilidad y forjabilidad, además de ser ferromagnético, propiedad que pierde a los 770 °C (EcuRed, s.f.).

Entre 911 °C y 1,400 °C la estructura cristalina se centra en las caras y recibe el nombre de austenita o γ -hierro con mayor deformabilidad y paramagnetismo.

De los 1,400 °C a los 1,538 °C cristaliza de nuevo a una estructura centrada en el centro, pero con mayor distanciamiento entre átomos debido a la temperatura. Es en esencia α – hierro, pero debido a la separación entre átomos se llama δ -hierro (EcuRed, s.f.).

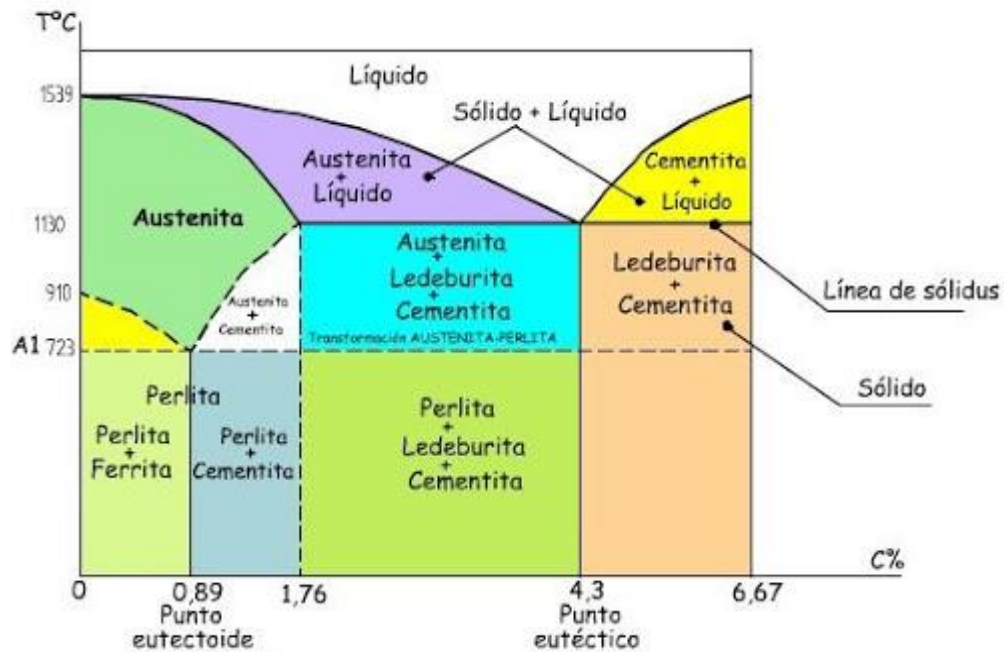
Cuando la temperatura está alrededor de los 1,000 °C el carbono se difunde en el hierro y hay una reacción química en la que se forma carburo de hierro, Fe_3C , llamado cementita, de tal forma que los aceros al carbono están constituidos esencialmente de ferrita y cementita (EcuRed, s.f.).

Según los procesos de enfriamiento se obtienen otros constituyentes como la ledeburita que es una composición eutéctica o mezcla homogénea de austenita y cementita con un contenido de 4.3 % de carbono. Las perlitas que se constituyen de ferrita y cementita con 0.77 % de carbono aproximadamente (EcuRed, s.f.).

La martensita es otra estructura característica de los aceros aleados y es una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita. Es el constituyente de los aceros templados con alta dureza, pero muy quebradizos (EcuRed, s.f.).

Los resultados de Chernov se agrupan en un diagrama conocido como el diagrama hierro-carbono o equilibrio de fases Fe-C. En el eje horizontal se cuantifica el porcentaje de carbono, generalmente en porcentaje en peso y en el eje vertical la temperatura. Según los puntos críticos, descritos anteriormente y la formación de estructuras alotrópicas del hierro se obtienen las regiones características de los aceros (EcuRed, s.f.). En la Figura 1 se muestra el diagrama de fases del hierro-carbono.

Figura 1. Diagrama de fases del hierro-carbono



Fuente: Diagramaweb (s.f.). Consultado el 8 de mayo de 2021. Recuperado de Diagramaweb.com:<https://diagramaweb.com/hierro-carbono/>.

El diagrama de fases hierro-carbono es el mapa que indica cómo, cuándo y en qué condiciones debe realizarse un tratamiento térmico y los resultados que deben esperarse del mismo.

Las aleaciones con contenido menor de 0,08 %, conocidas como hierro dulce o hierro de forja tienen aplicación en la fabricación de electroimanes y artículos decorativos forjados. Es muy blando y poroso por lo que es fácilmente oxidable (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, s.f.).

Los aceros, clasificados con contenido de carbono entre 0.08 % y 2 % se subdividen en tres tipos: Acero de bajo carbono, aceros de medio carbono y aceros de alto carbono.

Los aceros de bajo carbono se encuentran entre 0.08 % y 0.25 %; son blandos y dúctiles, pueden moldearse en alambres e hilos sin romperse. Aceros 1018 y 1020 son típicos de esta categoría y se utilizan en la industria automotriz, tuberías, elementos estructurales de edificios y puentes, varillas de refuerzo, corazas de barcos y otros (MIPSA, s.f.).

Carbono entre 0.25 % y 0.60 % definen a los aceros de medio carbono. Tienen más resistencia, pero menos ductilidad. Se emplean en piezas de alta resistencia al desgaste como engranes, ejes, chumaceras, entre otros. La soldabilidad requiere ciertos cuidados. Aceros como el 1045 y el 4140 se incluyen en este rango (MIPSA, s.f.).

Los aceros de alto carbono que van de 0.60 % al 2 % son menos dúctiles que los anteriores. Se añaden otros elementos como el wolframio para incrementar su dureza y se utilizan para la fabricación de herramientas (MIPSA, s.f.).

El término fundiciones se aplica a aquellos aceros con un contenido mayor al 2.1 % de carbono. El más característico es el hierro gris o hierro colado con un contenido de carbono entre el 2.1 % y el 3.3 % (MIPSA, s.f.). Una característica de este tipo de acero es que el carbono se encuentra como grafito en la microestructura. Su principal aplicación es en la industria automotriz en lo referente a partes de motor incluyendo el bloque de este. Se presentan tres tipos de fundiciones: blanca, gris y nodular. La primera incluye silicio, la segunda

exhibe una estructura en forma de laminillas y la tercera incluye magnesio en su estructura con muy buenas propiedades de resistencia mecánica.

2.2.3. Producción mundial y local del acero

Dada la importancia de la industria del acero en el mundo, existen organizaciones estructuradas y enfocadas hacia este ramo. El 10 de junio de 1967, en Bélgica nace la International Iron and Steel Institute, IISI y en 2008 cambia su nombre a World Steel Association, en español Asociación Mundial del acero, conocida como Wordsteel.

Agrupada a 160 empresas productoras de acero y para ser miembro de esta organización, que también opera sin fines de lucro, se debe producir 1.8 millones de toneladas métricas de acero al año y operar independientemente. Sus miembros representan el 85 % de la producción mundial.

Las publicaciones de esta institución implican las producciones mundiales de acero crudo o acero útil por año y cuyos datos se resumen en la tabla I (Statista, 2021)

En Latinoamérica funciona la Asociación Latinoamericana del Acero, conocida por sus siglas ALACERO. Opera sin fines de lucro y, a través de la industria del acero de América Latina busca fomentar los valores de integración regional, innovación tecnológica, excelencia en recursos humanos, responsabilidad empresarial y sustentabilidad socio-ambiental.

ALACERO está reconocida como organismo consultor especial por las Naciones Unidas y como organismo internacional no gubernamental por parte del gobierno de Chile, en donde tiene su sede.

Funciona desde 1959 y recopila datos sobre el mercado del acero, no solo en Latinoamérica, sino que abarca el resto del mundo y es reconocida por la Worldsteel (Asociación Latinoamericana del Acero, 2017).

Tabla I. **Producción mundial de acero crudo**

AÑO	Producción en millones de toneladas de acero crudo	Variación porcentual respecto al año anterior
2010	1,433	0.00
2011	1,538	7.33
2012	1,560	1.43
2013	1,652	5.90
2014	1,674	1.33
2015	1,623	-3.05
2016	1,631	0.49
2017	1,735	6.38
2018	1,826	5.24
2019	1,875	2.68
2020	1,880	0.27

Fuente: Datos de: Statista. (2021). *Producción global de acero crudo*. Consultado el 29 de Junio de 2022. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/600143/produccion-global-de-acero-crudo/>.

Guatemala no está afiliada a ALACERO, pero al ser productor de hierro y acero es contabilizada su manufactura en los diferentes informes que esta institución presenta a lo largo del tiempo. La tabla II presenta las fabricaciones de acero crudo por país latinoamericano productor de 2013 a 2017; los datos de 2017 son estimados ya que el cuadro se elaboró en ese año.

Tabla II. **Producción de acero crudo en miles de toneladas métricas**

País	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Brasil	34,163	33,912	33,256	31,275	34,365	3,407	32,569	30,498
México	18,208	19,008	18,828	18,811	19,924	20,441	18,387	16,277
Argentina	5,186	5,488	5,028	4,126	4,624	5,162	4,645	3,510
Chile	1,323	1,079	1,112	1,153	1,158	1,145	1,133	1,182
Colombia	1,236	1,208	1,358	1,272	1,253	1,219	1,333	1,101
Perú	1,069	1,078	1,082	1,168	1,207	1,217	1,230	731
Ecuador	570	667	720	576	561	583	607	482
Guatemala	385	395	403	314	294	300	306	243
Cuba	322	256	284	244	221	225	230	185
El Salvador	118	121	124	100	96	99	102	82
Uruguay	91	94	97	61	58	60	62	49
Venezuela	2,139	1,485	1,345	553	444	129	51	29
Otros	654	560	639	70	24	25	26	23
Totales	65,464	65,351	64,276	59,723	64,229	66,012	60,681	54,392

Fuente: Datos de: Cámara Argentina del acero. (2022). *Estadísticas Latinoamérica 2022*.
 (Cámara Argentina del Acero) Consultado el 29 de Junio de 2022. Recuperado de
<http://www.acero.org.ar/estadisticas-latinoamerica/>.

Al revisar los datos de las tablas I y II, la contribución de Guatemala en la producción de acero crudo es menos del 1 % en ambos casos.

Los datos de la tabla II muestran una producción anual casi constante con una media aritmética de 330 000 toneladas métricas anuales como acero útil y que proviene del reciclaje de chatarra. Esta chatarra se compone por lo recolectado, valga el término, de chatarreras y otra es importada como desperdicios y desechos de metales.

El acero producido localmente es a través de Aceros de Guatemala que opera con dos plantas, Intupersa y Sidegua; Corporación Acerera Centroamericana S.A con Hierro del Rayo y Aceros Suárez. Parte de esta

producción es exportada, pero también se importa una gran cantidad para cubrir la demanda nacional. Esta actividad económica es registrada por el Banco de Guatemala quien emite los informes de comercio en general y elabora cuadros estadísticos de acceso público. La Tabla III es un extracto de dicha información.

Tabla III. Exportaciones e importaciones de hierro y chatarra

Años	Exportaciones FOB US\$				Importaciones CIF US\$	
	Desperdicios y chatarra US\$	Hierro y acero US\$	Kilogramos de acero	US\$/Kg FOB	Desperdicios y chatarra US\$	Hierro y acero US\$
2013	2,768,771	85,594,301	96,306,000	0.89	17,577,534	437,532,866
2014	2,270,579	142,852,074	127,788,900	1.12	19,148,692	468,315,669
2015	1,098,334	222,895,639	1,563,820,500	1.36	5,286,633	461,599,548
2016	1,418,207	191,346,887	190,436,700	1.00	5,570,559	430,210,221
2017	3,007,786	237,180,990	229,422,700	1.03	29,362,039	502,517,772
2018	4,870,627	302,202,421	209,862,792	1.44	46,209,610	580,293,373
2019	2,802,206	359,025,600	211,212,600	1.70	40,376,394	552,317,732
2020	1,676,883	434,154,900	224,303,200	1.94	37,311,627	526,798,214

Fuente: Datos de: Banco de Guatemala (2021). Exportaciones (FOB) realizadas, Años: 1994-2021. Consultado el 11 de mayo de 2022. Recuperado de <https://banguat.gob.gt/es/page/exportaciones-fob-realizadas-0>. Importaciones CIF realizadas, Años:1994-2019.

2.2.4. Consumo aparente de acero en Guatemala

No se encontró información de institución pública o privada sobre el consumo aparente del acero en Guatemala; por lo tanto, los datos que se consignan en la tabla IV se establecen con la información de la tabla II y la tabla III, calculando el consumo aparente como la producción nacional más las

importaciones menos las exportaciones. La finalidad de esto es tener valores en peso y moneda que permitan ser considerados para los impactos de la corrosión en el país. El precio de referencia utilizado corresponde al valor FOB unitario de las exportaciones en la tabla III.

Tabla IV. **Consumo aparente del acero**

Años	Toneladas métricas	US\$
2013	780,436.59	694,588,565.00
2014	774,878.21	867,863,595.00
2015	578,517.58	786,783,909.00
2016	552,863.33	552,863,334.00
2017	528,811.31	597,556,782.00
2018	504,478.64	686,090,952.00
2019	419,701.26	713,492,147.00
2020	290,755.07	564,064,842.00

Fuente: elaboración propia, realizado en Excel con datos de las tablas II y III.

Las medias aritméticas son 553 805 toneladas métricas y US\$ 726 869 391,00 para los años considerados, que constituyen la cantidad de material y su valor monetario a proteger de la corrosión.

2.3. Corrosión

El término corrosión, viene del vocablo latino *corrodere*, que derivó en *corrōsum* y llegó a nuestro idioma como corrosión. El concepto alude al acto y el resultado de corroer: destruir, arruinar, carcomer o desgastar algo de manera paulatina (Definiciona, s.f.).

2.3.1. Definición

La corrosión metálica se define como el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma de mayor estabilidad o de menor energía interna_(Definiciona, s.f.).

2.3.2. Aportes científicos al estudio y comprensión de la corrosión

El científico germano-suizo Christian Schönbein, que vivió entre 1799 y 1868, en un experimento con el hierro, observó que se corroe en los ácidos diluidos como el nítrico, pero cuando se sumerge en el mismo, pero concentrado, forma una capa de óxido que lo hace pasivo (Best Concept Group, 2018).

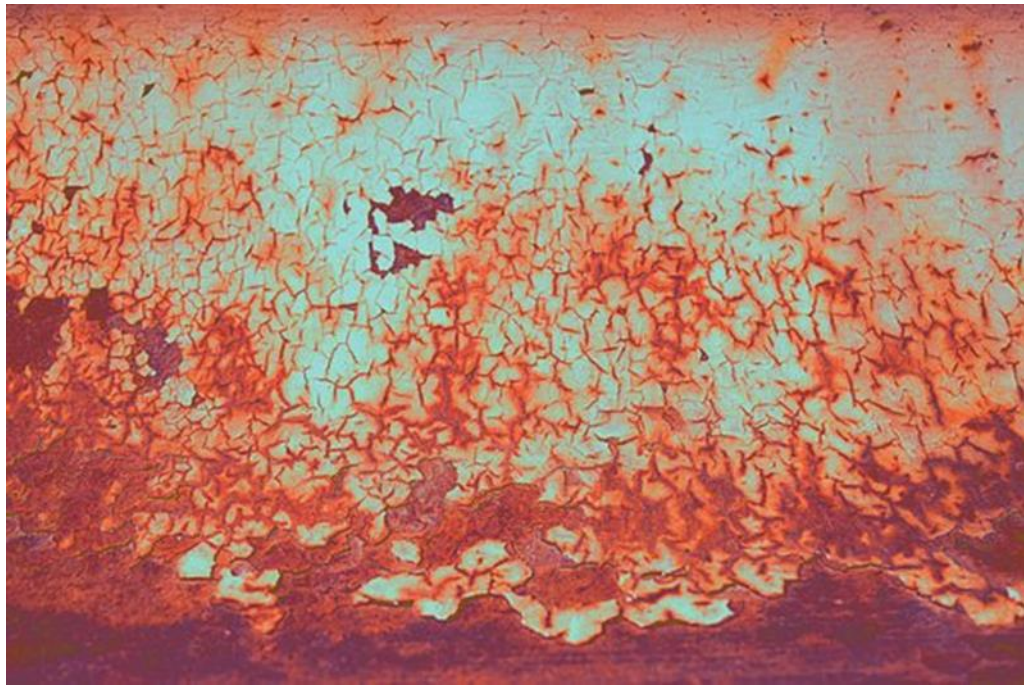
El mecanismo de formación del óxido se consideró inicialmente como una reacción química en el que el hierro se une al oxígeno para formar óxido de hierro.

En 1819, el francés Louis Jacques Thénard y en 1830, el físico suizo Auguste Arthur De la Rive hicieron mención de que la corrosión es un proceso esencialmente electroquímico; sin embargo, la corrosión química, también llamada seca, fue considerada en 1923 por N. B. Pilling y R. E. Bedworth (Galvele, 1979).

Es hasta 1932 que el inglés Erick Richardson Evans y el también inglés, Dr. Thomas Percy Hoar demuestran que durante la corrosión se cumplen las leyes de electrólisis de Faraday y quien las había publicado en 1834 (Galvele,

1979). Las figuras 2 y 3 son un ejemplo de la paulatina degradación del hierro en el acero.

Figura 2. **Proceso de corrosión del acero**



Fuente: Pixabay (s.f.). *Corrosión*. Consultado el 7 de julio de 2021. Recuperado de <https://pixabay.com/es/images/search/corrosi%C3%B3n/>.

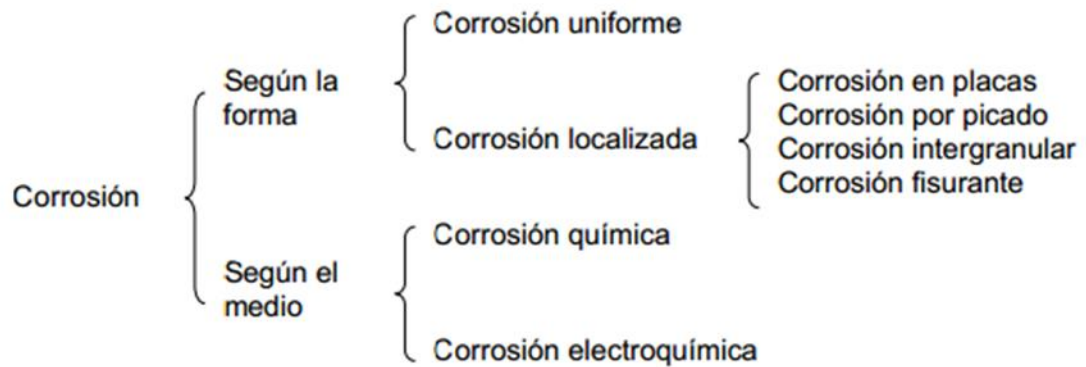
Figura 3. **Motor corroído**



Fuente: Pixabay (s.f.). Corrosión. Consultado el 7 de julio de 2021. Recuperado de <https://pixabay.com/es/images/search/corrosi%C3%B3n/>.

El proceso corrosivo que es la interacción del metal con el medio que lo circunda, sigue pasos complejos y puede presentarse de diversas formas y a través de diferentes mecanismos como se muestra en la figura 4.

Figura 4. **Mecanismo y formas de la corrosión**



Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira (2015). *Metalografía*. Consultado el 13 de junio de 2021. Recuperado de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-corrosion-y-procesos-de-corrosion/>.

2.4. Corrosión según la forma

La corrosión en el acero puede presentarse de varias formas, lo que dependerá del material en sí mismo, además del ambiente que lo circunda y las condiciones de operación.

2.4.1. Corrosión uniforme

El ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica y la penetración media es igual en todos los puntos. Esta es la forma más benigna de corrosión pues permite calcular fácilmente la vida útil de los materiales corroídos. La figura 5 muestra una superficie con esta característica.

Figura 5. **Corrosión uniforme**



Fuente:– Ingeniería mecánica (2016). *Tipos de Corrosión*. Consultado el 14 de junio de 2021.
Recuperado de. <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/06/corrosion-de-deterioro-uniforme-o.htm.l>.

2.4.2. Corrosión en placas

Incluye la corrosión uniforme y corrosión localizada. El ataque se extiende más en algunas zonas, pero se presenta como un ataque general, lo cual puede observarse en la figura 6.

Figura 6. **Corrosión en placas**



Fuente: Ing. Marítima (2016). *Corrosión*. Consultado el 11 de junio de 2021. Recuperado de <http://ingmaritima.blogspot.com/2017/03/la-corrosion.html>.

2.4.3. Corrosión por picado o *pitting*

Durante el picado, como muestra la figura 7, el ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas, propagándose hacia el interior del metal en forma de canales cilíndricos. Puede generarse también por la fricción entre dos superficies metálicas, denominada corrosión por fricción o por cavitación al estar el metal en contacto con un líquido y formar burbujas lo que ocasiona picaduras en la superficie y microbiológica, que es cuando ciertos microorganismos retienen agua y esto genera grietas en el metal. Este tipo de ataque, así como el intergranular y el fisurante, son las formas más peligrosas bajo las cuales se puede presentar la corrosión pues puede generar fugas de líquido o gas y contaminar, dañar, o explotar.

Figura 7. **Corrosión por picado**

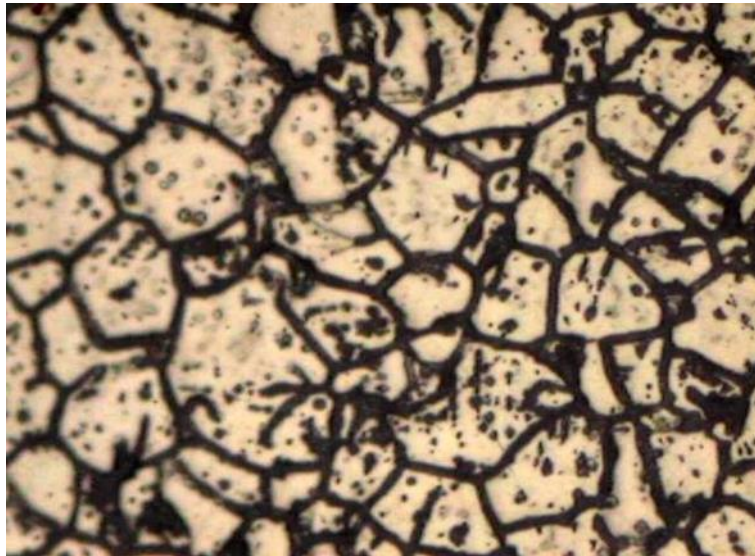


Fuente: – Ingeniería mecánica (2016). *Tipos de Corrosión*. Consultado el 14 de junio de 2021.
Recuperado de. <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/06/corrosion-de-deterioro-uniforme-o.html>.

2.4.4. Corrosión intragranular

Se presenta como una franja estrecha de ataque que se propaga a lo largo de los límites de grano. La figura 8 muestra un esquema de este tipo de corrosión que también incluye la corrosión por erosión y la corrosión por esfuerzo. La erosión se genera por el movimiento relativo entre superficie metálica y medio en forma paralela y el esfuerzo por transformaciones internas en una deformación en frío.

Figura 8. **Corrosión intragranular**



Fuente: Ingeniería mecánica (2016). *Tipos de Corrosión*. Consultado el 14 de junio de 2021. Recuperado de. <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/06/corrosion-de-deterioro-uniforme-o.html>.

2.4.5. Corrosión fisurante o bajo tensión

Conocida también como corrosión bajo tensión. Puede presentarse cuando un metal está sometido simultáneamente a la acción de un medio corrosivo y a tensiones mecánicas de tracción. Se forman fisuras que pueden ser transgranulares o intergranulares que se propagan hacia el interior del metal hasta que las tensiones ceden y el metal se fractura.

La velocidad de propagación puede oscilar en general entre 1 mm/h y 10 mm/h. En la figura 9 se evidencia este tipo de ataque y la fractura como consecuencia final.

Figura 9. **Corrosión fisurante**



Fuente:– Ingeniería mecánica (2016). *Tipos de Corrosión*. Consultado el 14 de junio de 2021. Recuperado de. <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/06/corrosion-de-deterioro-uniforme-o.html>.

Cualquiera de las formas de corrosión presentadas se origina según el medio en el que el acero se desempeña.

2.5. Corrosión según el medio

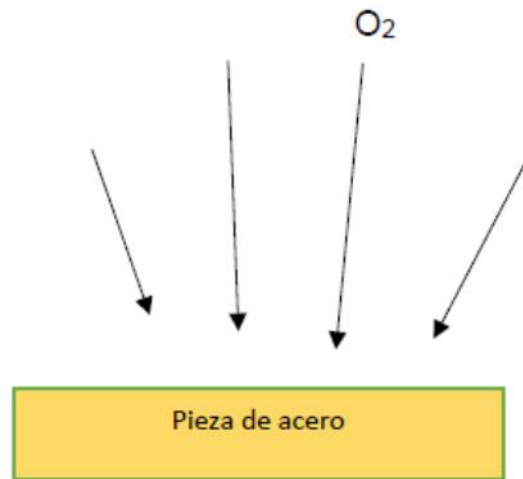
El entorno en el cual el acero se desempeñe será determinante para el tipo de corrosión que se presente.

2.5.1. Corrosión química

La corrosión química también se denomina corrosión seca. Si se expone una superficie metálica limpia a la acción del oxígeno el metal comenzará a formar óxidos bajo un mecanismo de enlace iónico que implica la pérdida de

electrones del metal proceso que se denomina oxidación y la ganancia de ellos por el oxígeno lo que se conoce como reducción; ver figura 10.

Figura 10. **Corrosión seca con presencia de O₂**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo son las que se indican como R1, R2 y R3. Estas reacciones químicas son sencillas ya que es por un proceso de oxidación-reducción; sin embargo, el proceso de formación de capas es complejo como lo indica la figura 11 (Galvele, 1979).



Figura 11. Oxidación en la reacción seca, reacción R1, R2, R3



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Según la temperatura y la concentración de oxidante se observarán diferentes comportamientos.

A baja temperatura, menor a 500 °C, la primera etapa será la formación de una capa adsorbida de oxígeno. Si la temperatura es suficientemente baja o la concentración del oxidante escaso, la reacción puede detenerse después de formar dicha capa adsorbida. A mayor temperatura y concentración de oxidante se forma una película de óxido cuyo grosor varía según las condiciones (Galvele, 1979).

Se utiliza una clasificación arbitraria para diferenciar las películas delgadas de las gruesas del óxido formado. Si el espesor es menor a 0.000007 metros o 0.7 micrones se denomina óxido delgado y si es mayor o igual a este valor se llama óxido grueso (Galvele, 1979).

En la oxidación y sulfuración de metales, durante la etapa inicial de crecimiento de la película en la interfase, se forman núcleos de óxido o de sulfuro. Los núcleos van extendiéndose sobre toda la superficie, hasta cubrirla

completamente. Seguidamente se genera el engrosamiento del óxido. Se trata de un proceso de nucleación homogénea que depende de la temperatura y de la presión del oxidante.

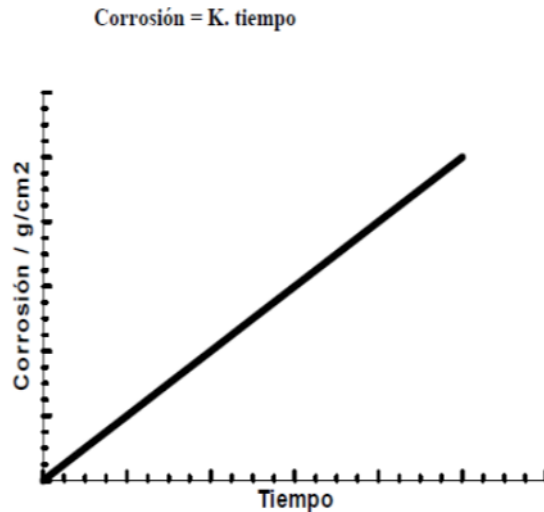
El número de núcleos es independiente del tiempo y aumenta con la presión parcial del oxidante. Aunque la nucleación sólo aparece en las etapas iniciales de la oxidación, su existencia define propiedades importantes como la textura, estructura y crecimiento de capas de los óxidos más gruesos.

Si la temperatura es alta, mayor a 500 °C, el metal y el O₂ reaccionan y forman óxido metálico en la superficie. Dado que este no es volátil, se acumula en dicha superficie. Como ya se indicó antes, primero se formarán núcleos y luego estos crecerán (Galvele, 1979).

Si la película formada es porosa y el O₂ sigue contactando al metal, la formación de óxido seguirá hasta consumir el metal o agotar el O₂. Además del hierro, se comportan de esta manera el sodio, potasio, calcio y bario, alcalinos y alcalinotérreos.

El grado de corrosión se expresa por el aumento de peso de óxido por unidad de área. La propagación de esta corrosión es en forma lineal al tiempo. K es una constante que identifica la pendiente de la recta como muestra la figura 12 (Galvele, 1979).

Figura 12. **Formación de óxido en la corrosión seca**



Fuente: elaboración propia, realizado con datos de Galvele, J. R. (1979).-corrosión, p.9.

Las capas de óxido que se van formando deberían pasivar el metal al ya no permitir más contacto de oxígeno o sulfuro con él metal. En algunos casos esto es así, como por ejemplo el aluminio, que al oxidarse forma una capa protectora. Los estudios han establecido que esto depende de la porosidad del óxido que se va formando.

En 1923, Pilling y Bedworth establecieron una relación matemática para diferenciar los metales que forman capas protectoras de óxido y los que no lo forman.

El criterio dice que si el volumen de óxido formado es menor que el metal que reemplaza, la estructura del óxido es porosa. Si pasa lo contrario, se formará una capa de óxido homogénea y continua.

La relación matemática de Pilling y Bedworth, P.B. se escribe así:

$$P.B. = W.d/w.D \quad E. 1$$

En esta ecuación W es el peso molecular del óxido, w el peso del metal; D es la densidad del óxido y d es la densidad del metal.

Si la relación es menor a 1, el óxido es poroso y si la relación es mayor que 1, el óxido es continuo (Galvele, 1979).

Cuando la relación es mayor que 1, una vez que ha formado una capa de óxido adherente, el metal queda separado del oxígeno, por lo que la oxidación se efectúa por difusión del metal a través del óxido. La velocidad de aumento de espesor de óxido será inversamente proporcional al espesor de óxido ya formado.

$$dy/dt = k(1/y) \quad E. 2$$

y = Espesor de la capa de óxido

t = Tiempo

k_p = una constante

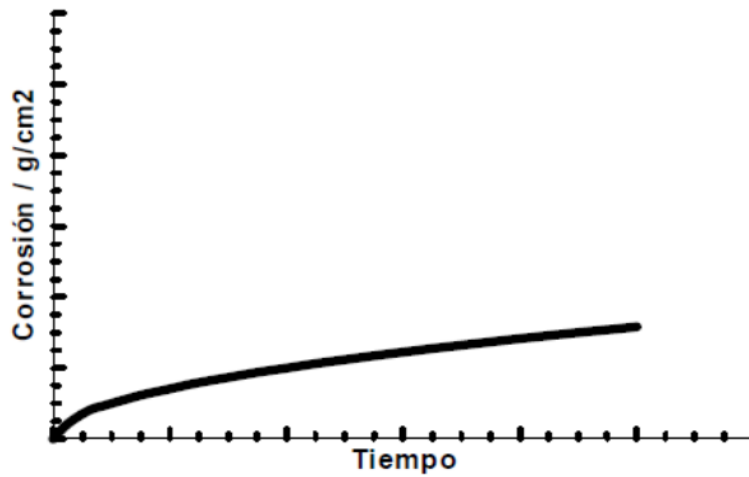
dy/dt = velocidad de aumento de espesor del óxido.

Al integrar esta la ecuación E. 2 el resultado es:

$$y = k_p \sqrt{t} \quad E. 3$$

Se obtiene una ley parabólica de crecimiento de óxido, según se muestra en la figura 13 (Galvele, 1979).

Figura 13. **Ley parabólica de crecimiento de óxido**



Fuente: elaboración propia, realizado con datos de Galvele, J. R. (1979).-corrosión, p.9.

Los resultados de Pilling y Bedworth se muestran en la tabla V.

Tabla V. **Relaciones de Pilling y Bedworth para óxidos**

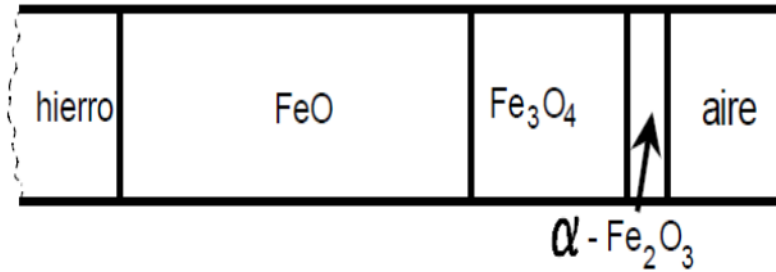
Aluminio	Al ₂ O ₃	1.29	Litio	Li ₂ O	0.57
Bario	BaO	0.69	Magnesio	MgO	0.81
Cadmio	CdO	1.21	Manganeso	MnO ₂	2.27
Calcio	CaO	0.64	Níquel	NiO	1.70
Cesio	Cs ₂ O	0.47	Plomo	PbO	1.28
Circonio	ZrO ₂	1.49	Potasio	K ₂ O	0.45
Cobalto	CoO	1.75	Silicio	SiO ₂	1.89
Cobre	Cu ₂ O	1.67	Sodio	Na ₂ O	0.58
Cromo	Cr ₂ O ₃	2.02	Titanio	TiO ₂	1.76
Estaño	SnO	1.28	Torio	ThO ₂	1.35
Estroncio	SrO	0.65	Tungsteno	WO ₂	1.88
Hierro	Fe ₃ O ₄	2.10	Zinc	ZnO	1.59

Fuente: elaboración propia, realizado en Excel con datos de Galvele, J. R. (1979).-*corrosión*, p 10.

El hierro tiene una relación P.B. de 2.10 lo que implica que luego de la formación de óxido como capa primaria, la oxidación siguiente sigue el proceso de difusión. Para este metal igual que con cobre, cobalto y níquel, no es el oxígeno el que se difunde o el azufre para el caso de los sulfuros, sino le metal mismo. Esta ocurrencia es factible entre 500 °C y 900 °C.

Al presentar el hierro dos valencias, +2 y +3, el proceso de oxidación es complejo y cuya estructura en capas es como se muestra en la figura 14. En esta se indica la superficie del hierro, seguido de una capa de monóxido de hierro, encima de esta una mezcla compleja de monóxido y trióxido de hierro (FeO + Fe₂O₃ → Fe₃O₄) y externamente, en contacto con el aire, trióxido de hierro con una estructura identificada como σ-Fe₂O₃, conocida como hematita (Galvele, 1979).

Figura 14. Estructura del óxido de hierro ante los 500 °C y los 900 °C



Fuente: elaboración propia, realizado en Excel con datos de Galvele, J. R. (1979).-corrosión p.10.

En la estructura de óxido formada, los aniones, ya sea de oxígeno o de sulfuro se apilan en forma compacta y los cationes se distribuyen en los intersticios de dicho apilamiento. Estas estructuras no son perfectas, es decir no se presenta una estequiometría como lo indican las ecuaciones químicas R.1, R.2 y R.3.

Esta no estequiometría varía conforme cambia la temperatura y se refleja en ciertas propiedades del óxido como el color Y solubilidad.

Se puede presentar exceso de cationes o exceso de aniones y el resultado será que las conducciones eléctricas se generarán según sea el caso. El FeO presenta muchos defectos a alta temperatura y su capacidad pasivadora es muy pobre.

La presencia de aleantes en la estructura del acero producirá variantes en cuánto a la concentración de defectos debido al acomodo de estos en los apilamientos aniónicos.

Se ha establecido que la corrosión seca solo ocurre a temperaturas altas de 500 °C o más y no es usual; se consideró necesario analizarla dado que en ciertas condiciones de operación puede presentarse (Galvele, 1979), como ejemplo un horno industrial como el de Peltrum S. A. en Amatitlán.

2.5.2. Fundamento de electroquímica

Las reacciones químicas donde se produce una transferencia de electrones entre átomos se conocen como reacciones *redox* o reacciones de oxidación-reducción y son las reacciones típicas en el tema electroquímico, pues mediante ellas, se llevan a cabo los procesos que generan electricidad o en caso contrario, son producidas como consecuencia de ella.

Si la reacción electroquímica produce efectos eléctricos a través del consumo de energía química el dispositivo se llama celda Galvánica o celda voltaica en honor a Luigi Galvani y Alessandro Volta; ambos italianos y de profesiones médico y físico respectivamente. Galvani, que vivió entre 1737 y 1798 fue un estudioso de la fisiología y su interacción con la electricidad. Volta, cuya vida ocurrió entre 1745 y 1827 construyó la primera pila eléctrica y la primera demostración se realizó en el año de 1800 (EcuRed, s.f.).

Por el contrario, si la reacción electroquímica es causada por una fuente externa de energía eléctrica, almacenando energía química, el dispositivo se denomina celda electrolítica. Esta fue desarrollada por William Nicholson, británico, que vivió entre 1753 y 1815 mientras estudiaba el funcionamiento de las baterías en 1800 (EcuRed, s.f.).

Michael Faraday, contemporáneo de Nicholson, también británico, vivió entre 1791 y 1867, en 1834 publicó las leyes de la electrólisis (Ecured, s.f.).

Estas son:

- Primera ley: la masa de una sustancia depositada o liberada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que ha atravesado la celda.
- Segunda ley: la masa de distintas sustancias depositadas por la misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales al equivalente químico, eq de cada una; siendo este eq, la masa de sustancia liberada por el paso de 1 mol de electrones.

Derivado de estas leyes se tiene la constante de Faraday que corresponde a 96 500 coul/mol y que es el producto de la carga del electrón por el número de Avogadro.

Para describir el funcionamiento de las celdas deben definirse algunos términos:

- Electrodo se compone del sufijo odo que significa camino, por lo que el término hace referencia a camino de los electrones.
- En ánodo, el prefijo anas significa arriba, por lo que el término hace referencia a camino arriba (EcuRed, s.f.).
- En cátodo, el prefijo cathas significa abajo, por lo que el término hace referencia a camino abajo (EcuRed, s.f.).
- Ion significa caminante y de ello anión significa que se dirige al ánodo y catión que se dirige al cátodo (Definición. de, s.f.).
- Oxidación como proceso de pérdida de electrones y que ocurre en el ánodo (Burns, 2011).
- Reducción como proceso de ganancia de electrones y que ocurre en el cátodo (Burns, 2011).

Ya que en las reacciones redox hay acompañamiento de energía eléctrica, generada o añadida, hay una diferencia de potencial. Este, es llamado Potencial de electrodo con símbolo ε y es una magnitud que expresada en voltios representado por V, indica la tendencia hacia la reducción, es decir, hacia la aceptación de electrones de una de las especies participantes en la reacción, es decir, a mayor valor de potencial de electrodo, mayor tendencia a la reducción (Galvele, 1979).

No es posible medir potenciales absolutos sino relativos en cuanto a las diferencias potencial de las especies reaccionantes, por lo que para simplificar los cálculos se definió el potencial de electrodo hacia la reducción del hidrógeno con valor de cero. La reacción de reducción del hidrógeno, como semirreacción es:



Cada reacción tiene un potencial de electrodo, siendo una propiedad intensiva de esta y para establecer las condiciones estándar de dicho potencial se utilizan soluciones 1 M de los iones a cuantificar a 25 °C y 1 atm de presión; M es la molaridad. El criterio de los resultados establece que si $\varepsilon > 0$ los iones se reducirán frente al hidrógeno, es decir, el hidrógeno se oxidaría. Si $\varepsilon < 0$ los iones se oxidarán frente al hidrógeno, es decir, el hidrógeno se reduciría (PERRY, 1976).

En tabla VI se presentan los potenciales de electrodo hacia la reducción de varios iones. Los valores se calculan como potencial mediante la ecuación:

$$\varepsilon_{\text{pila}} = \varepsilon_{\text{cátodo}} - \varepsilon_{\text{ánodo}} \qquad \text{E. 4}$$

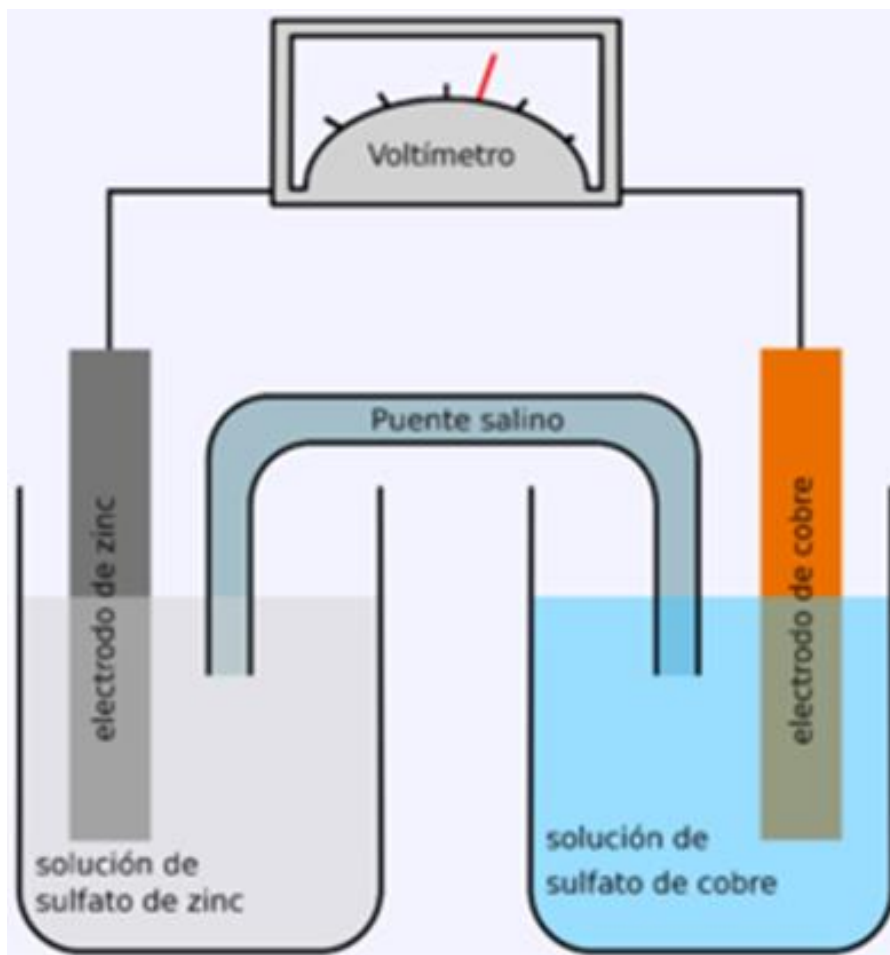
Tabla VI. Potenciales estándar de reducción a 25 °C y 1 Atm

Semireacción de reducción		E°(V)	
Agente oxidante fuerte ↑	$F_2(g) + 2 e^- \rightarrow 2 F^-(aq)$	2.87	
	$H_2O_2(aq) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \rightarrow 2 H_2O(l)$	1.78	
	$MnO_4^-(aq) + 8 H^+(aq) + 5 e^- \rightarrow Mn^{2+}(aq) + 4 H_2O(l)$	1.51	
	$Cl_2(g) + 2 e^- \rightarrow 2 Cl^-(aq)$	1.36	
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14 H^+(aq) + 6 e^- \rightarrow 2 Cr^{3+}(aq) + 7 H_2O(l)$	1.33	
	$O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O(l)$	1.23	
	$Br_2(l) + 2 e^- \rightarrow 2 Br^-(aq)$	1.09	
	$Ag^+(aq) + e^- \rightarrow Ag(s)$	0.80	
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \rightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77	
	$O_2(g) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \rightarrow H_2O_2(aq)$	0.70	
	$I_2(s) + 2 e^- \rightarrow 2 I^-(aq)$	0.54	
	$O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-(aq)$	0.40	
	$Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Cu(s)$	0.34	
	$Sn^{4+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15	
	$2 H^+(aq) + 2 e^- \rightarrow H_2(g)$	0	
	Agente oxidante débil ↓	$Pb^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Pb(s)$	-0.13
		$Ni^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Ni(s)$	-0.26
$Cd^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Cd(s)$		-0.40	
$Fe^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Fe(s)$		-0.45	
$Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Zn(s)$		-0.76	
$2 H_2O(l) + 2 e^- \rightarrow H_2(g) + 2 OH^-(aq)$		-0.83	
$Al^{3+}(aq) + 3 e^- \rightarrow Al(s)$		-1.66	
$Mg^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Mg(s)$		-2.37	
$Na^+(aq) + e^- \rightarrow Na(s)$		-2.71	
$Li^+(aq) + e^- \rightarrow Li(s)$		-3.04	

Fuente: Delgado del Valle, M.(2013). Ciencia y restauración, procesos REDOX. Consultado el 26 de agosto de 2022. Recuperado de <https://cienciayrestauracion.blogspot.com/search?q=potencial+de+reducci%C3%B3n>.

En las figuras 15 y 16 se muestra el esquema básico de celdas galvánica y electrolítica. La diferencia entre ambos tipos de celda es que la celda galvánica produce energía eléctrica a través de una reacción química y en la electrolítica, es necesario incorporar una fuente externa de energía como una batería para que la reacción química se lleve a cabo.

Figura 15. Esquema de una celda galvánica de Zn-Cu



Fuente: Borneo. R. (2012). Clases de química, celdas galvánicas y electrolíticas. Consultado el 5 de agosto de 2021. Recuperado de <http://clasesdequimica.blogspot.com/2012/06/celdas-galvanicas-y-electroliticas.html>.

La figura 15 muestra un electrodo de zinc dentro de una solución 1 M de sulfato de zinc que produce iones Zn^{+2} y otro electrodo de cobre en una solución de sulfato de cobre que produce iones Cu^{+2} . Las soluciones están separadas por una membrana porosa que evita se mezclen. Los electrodos están conectados en la parte exterior de la celda por un cable, el que tiene un interruptor y un

voltímetro. Al cerrar el circuito se produce un flujo de electrones que sale del electrodo de zinc y se dirige al electrodo de cobre. El voltímetro indica 1.10 voltios. El voltaje obtenido puede establecerse de la tabla VI con los datos para el zinc y para el cobre:

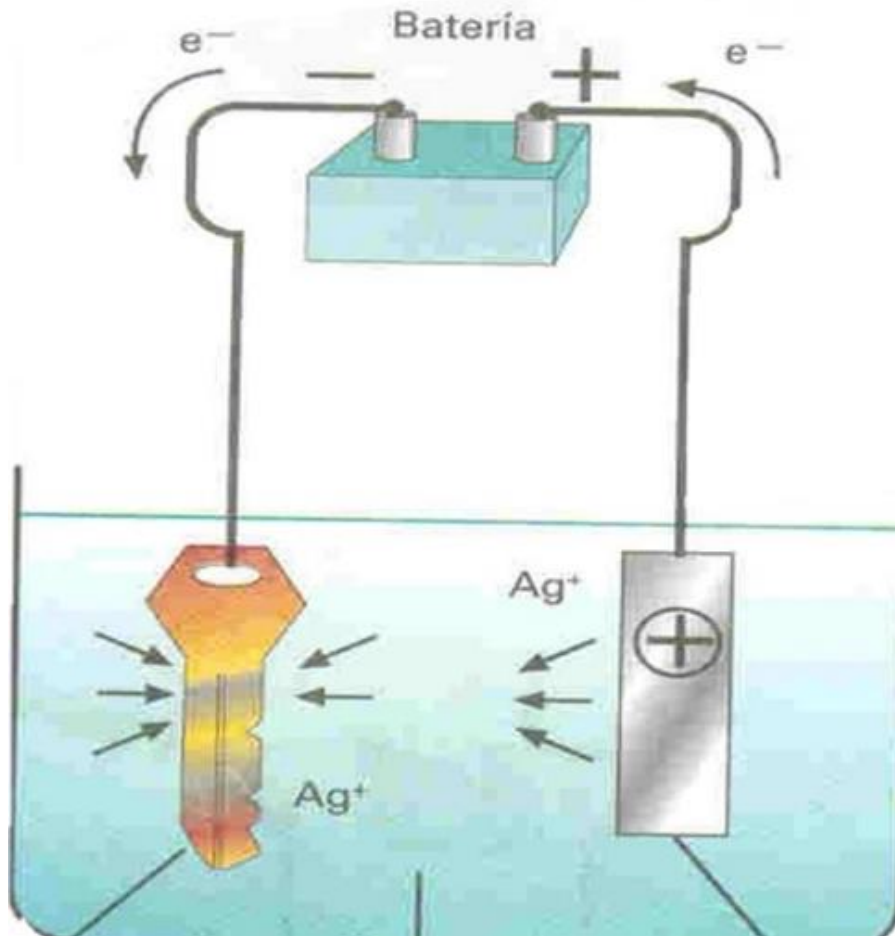
$$\text{Zn} = - 0.76 \text{ Volts como ánodo}$$

$$\text{Cu} = + 0.34 \text{ Volts como cátodo}$$

$$\mathcal{E}_{\text{Zn-Cu}} = 0.34 - (-0.76) = 1.10 \text{ V}$$

Esta celda galvánica descrita no tiene ningún fin práctico más que mostrar de una manera didáctica el proceso de oxidación de un metal, la reducción del otro y la consecuente generación de energía eléctrica.

Figura 16. Celda para electrodeposición de la plata



Fuente: Borneo. R. (2012). Clases de química, celdas galvánicas y electrolíticas. Consultado el 5 de agosto de 2021. Recuperado de <http://clasesdequimica.blogspot.com/2012/06/celdas-galvanicas-y-electroliticas.html>.

La celda electrolítica de la figura 16 muestra un esquema sencillo en el cual, a través de la incorporación de energía eléctrica de una fuente externa se logra la migración de iones del ánodo al cátodo. Su utilización escapa al tema central de este trabajo de diseño de investigación y ésta breve descripción es para diferenciarla de la celda galvánica.

2.5.3. Corrosión electroquímica

La idea de que la corrosión es un proceso electroquímico es bastante antigua. Surgió como resultado de los primeros trabajos de pilas galvánicas y se supuso que durante la corrosión actuaban micropilas en el metal. La primera mención del tema se atribuye a De la Rive en 1830, en tanto que otros la adjudican Thénard en 1819. La demostración cuantitativa de la relación entre corrientes eléctricas y ataque de metales en corrosión se debe a Evans y Hoar en 1932 (Galvele, 1979).

En los procesos de corrosión electroquímica sucede que, en general, circulan sobre el material expuesto corrientes eléctricas que originan el ataque. Las causas más frecuentes son:

- Dos o más metales distintos en contacto, que es lo que se conoce como corrosión galvánica.
- Presencia de fases diferentes en una misma aleación.
- Presencia de capas de óxidos conductores de electrones, como por ejemplo el óxido de laminación en chapas de hierro.
- Diferentes grados de aireación de una pieza metálica. Se ha observado que en las zonas en que escasea el oxígeno, se comportan como ánodos cuando están unidas a otras zonas con buena aireación.

- Corrientes inducidas por circuitos eléctricos mal aislados, como el caso de corrientes vagabundas en estructuras metálicas enterradas. (Galvele, 1979).
- Presencia de oxidantes en el medio, que causan la disolución electroquímica de un metal aun cuando éste sea puro, sin segundas fases y aislado de otros metales.

En general, estas corrientes eléctricas se inician por un potencial eléctrico o voltaje que permite la circulación de estas y que, sin lugar a duda, los electrones libres del metal son los responsables de esto (Galvele, 1979).

El potencial eléctrico o diferencia de potencial es la fuerza impulsora de las reacciones electroquímicas de corrosión y entre mayor sea esta diferencia de potencial, mayor será la fuerza impulsora y, por ende, la velocidad de corrosión será mayor.

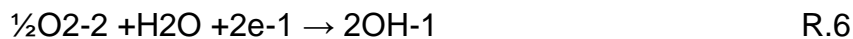
El hierro y otros metales al estar en estado puro o normalmente aleado, están en una forma reducida, puesto que se ha requerido de energía para despojarle el oxígeno o azufre que tenía en su estado natural; por lo tanto, constituye en sí, un sistema termodinámico inestable, y que buscará un estado de equilibrio en zonas de mínima energía.

De la misma forma que el proceso de la celda galvánica, es el que se produce en la corrosión del acero en la superficie del metal, que está en contacto con el medio circundante.

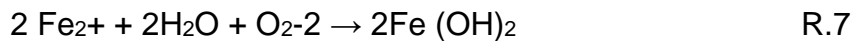
En el ánodo, que es donde se produce la oxidación, el hierro tendría la reacción siguiente (Burns, 2011):



Por otro lado, y simultáneamente, en el cátodo se produciría la reducción que casi siempre es del oxígeno molecular disuelto en agua, el cual se reduce a iones hidróxido:



Los iones hidróxido pueden reaccionar con el ion Fe^{2+} para formar hidróxido de hierro II que es insoluble.



El hidróxido de hierro II se oxida pasando a hidróxido de hierro III:



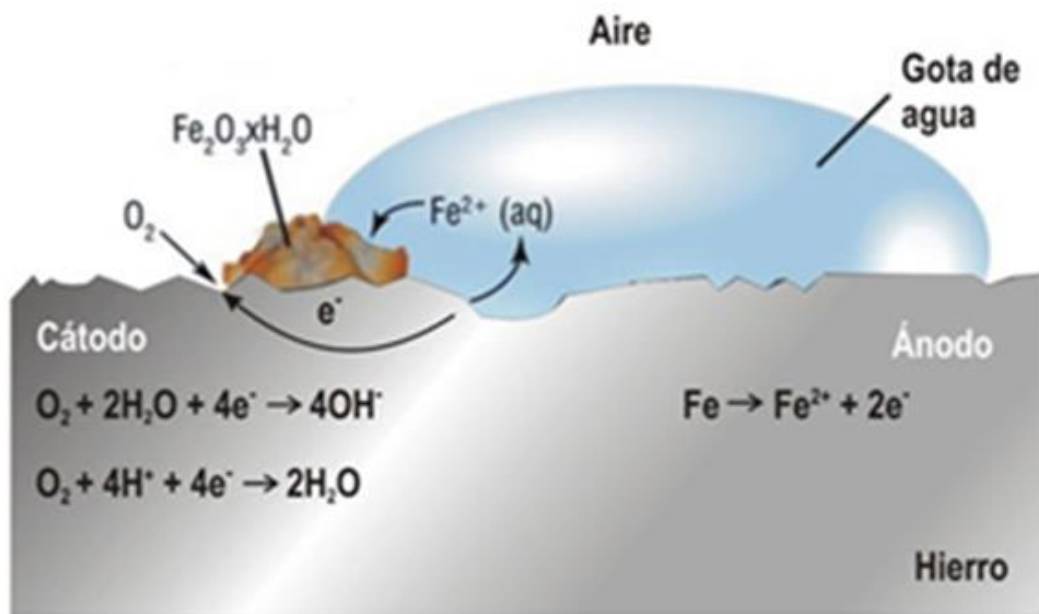
El hidróxido de hierro III sufre una deshidratación parcial formando un óxido hidratado, que es lo que se conoce como herrumbre y que, según el grado de hidratación, puede presentar diferente color y aspecto.



A nivel de la superficie del acero, una gota de agua constituye el medio electrolítico para la formación de una microcelda, es decir, la formación de una zona anódica y una zona catódica. En los bordes de la gota hay suficiente oxígeno que hacen que esta zona se convierta en cátodo y en el centro de la misma, el oxígeno es escaso, constituyéndose en ánodo con lo que se completa el circuito para la microcelda de corrosión.

Las zonas anódicas y catódicas se generan por diferencias en la estructura cristalina, mezclas de óxidos metálicos, aleantes y su composición, cantidad de oxígeno presente y conductividad eléctrica del medio. Ver Figura17.

Figura 17. **Corrosión electroquímica a nivel de superficie**



Fuente: Castaño, E. (2016). Corrosión de metales. Consultado el 13 de agosto de 2021.
 Recuperado de <https://cienciadelux.com/2016/10/13/la-corrosion-de-los-metales/>.

La Corrosión del acero es un proceso electroquímico que, debido a la naturaleza aleada del material, permite que este se lleve a cabo a temperatura ambiente, dado que interactúa con el medio, el cual presenta diferencias, dependiendo de si este es rural, citadino, industrial o marino.

Su avance puede ser lento o rápido, dependiendo de las características mencionadas y su mecanismo de reacción es complejo.

2.6. Termodinámica de la corrosión

El estado de existencia más estable para un metal es su forma combinada, o dicho desde un punto de vista termodinámico, es el estado de más baja energía, ya sea en forma de óxido, sulfuro, cloruro, sulfatos o carbonatos. El obtener el acero por alto horno o reciclar chatarra en horno de arco eléctrico es ir en contra de una reacción que ocurre espontáneamente en la naturaleza; por lo tanto, el hierro en el acero se constituye en un sistema termodinámico inestable. Expresado de otra forma, el acero, a través del hierro y el agua o humedad formará microceldas galvánicas que permitirán la oxidación del metal.

Al considerar al hierro en el acero como un sistema termodinámico, este posee energía almacenada en su estructura atómica derivado del movimiento, vibración y posición de las partículas subatómicas. A este conjunto de energías se les agrupa bajo el concepto macroscópico de energía interna, representada por la letra U. La energía interna es una variable de estado, pues depende las condiciones en que se calcule y que pueden ser, condiciones iniciales, finales o intermedias. La primera ley termodinámica establece que la energía interna de un sistema aumenta si se le suministra calor Q o se hace algún trabajo W sobre él, de modo que $\Delta U = Q + W$, según el criterio IUPAC y este es el caso del proceso de refinación del hierro.

Cuando el hierro se corroe, es decir, se oxida el trabajo que realiza es eléctrico, puesto que mueve electrones en una dirección (Smith, Van Ness, & Abbott, 1995).

La reacción química de oxidación intercambia energía con el medio ambiente, lo que implica una variación de la entalpía H a presión constante; además, la entropía S cambia hacia el incremento del desorden, según la

segunda ley de la termodinámica. Con estas consideraciones y utilizando la ecuación de variación de la energía libre de Gibbs, en donde T es la temperatura se establece que:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S. \quad E.5$$

La cuantificación de ΔG establece la espontaneidad o no espontaneidad de las reacciones químicas. El criterio es que si $\Delta G < 0$, la reacción es espontánea y si $\Delta G > 0$, la reacción requiere de energía para que se lleve a cabo (Smith, Van Ness, & Abbott, 1995).

La forma de la ecuación E.5 no es útil para el estudio de las reacciones electroquímicas puesto que los valores de entalpía y entropía no son fáciles de calcular; sin embargo, esta ecuación puede transformarse en una equivalente y con parámetros más accesibles, de acuerdo al tipo de reacción y se parte del concepto en el que se establece que, la energía libre de Gibbs es una energía útil, aprovechable como trabajo; en consecuencia:

$$\Delta G = W \quad E.6$$

W, que es el trabajo eléctrico que permite mover los electrones del ánodo al cátodo se define como $nF\mathcal{E}_{pila}$, por lo que la ecuación E.6 se transforma en la ecuación E.7 (Smith, Van Ness, & Abbott, 1995).

$$\Delta G = -nF\mathcal{E}_{pila} \quad E.7$$

n = Electrones transferidos

F = Constante de Faraday

\mathcal{E}_{pila} = Potencial de la pila.

Con los valores de la tabla VI y adicionando el potencial de reducción del oxígeno (Galvele, 1979) se estiman los potenciales de celda para las reacciones de R5 a R9 con la ecuación E.4 en la tabla VII.

Tabla VII. **Potenciales de celda de R5 a R9**

Reacciones	Potencial de reducción en voltios	Ánodo "A" Cátodo "C"	Potencial de celda (E.4) voltios
R5	-0.409	A	
R6	1.229	C	1.638
R7	---		
R8	0.770	C	1.179
R9	---		

Fuente: elaboración propia, realizado en Excel.

Utilizando valores del potencial de celda en base a la ecuación E.7 son deducibles los valores de ΔG , serán menores que cero. Entre la oxidación del hierro y la reducción del oxígeno en las reacciones R5 y R6 se han movido 2 electrones, por lo que ΔG tendrá un valor de -316.134 kj.

Para la reacción en la oxidación adicional de hierro en R5 y R8 se libera un electrón, por lo que ΔG es -158 kj. Los potenciales estándar están calculados a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 Atm y son soluciones 1 M , es decir, condiciones estándar y lo que permite establecer que la corrosión del acero por el proceso electroquímico ocurre a temperatura ambiente y presión atmosférica de forma espontánea y representa un problema para la vida útil de equipos, tuberías, estructuras y accesorios industriales, comerciales o domiciliarios.

2.7. Cinética de la corrosión

La rapidez con que suceden las reacciones de corrosión del acero tiene mucha importancia para los procesos industriales en la práctica de la ingeniería química. Sin embargo, la cinética química no es aún una ciencia exacta.

Desde un punto de vista práctico, no es posible todavía formular relaciones matemáticas sencillas y generalizadas que expresen la cinética de las reacciones. El proceso de corrosión del acero y en general, de los metales es complejo por lo que datos experimentales y análisis cinético es un problema individual (PERRY, 1976).

Las velocidades de corrosión del acero pueden establecerse por métodos gravimétricos y por medios eléctricos utilizando un potencióstato (Meas Vong, 1991).

2.7.1. Métodos gravimétricos

Este método fue el primero que se utilizó para establecer velocidades de corrosión de metales. Relaciona la cantidad de material corroído en un tiempo establecido, con la densidad y área del material para calcular la pérdida de espesor de este por unidad de tiempo (Meas Vong, 1991).

Para el caso del hierro tendríamos la siguiente secuencia de factores:

$(g \text{ Fe/h}) (1 \text{ cm}^3 \text{ Fe}/7.8 \text{ g Fe})(1/ \text{cm}^2) = \text{cm de penetración/h}$; la densidad del hierro está tomada de PERRY, (1976).

Esta forma implica considerar una corrosión uniforme como la de la figura 5; sin embargo, si la corrosión se presenta por picadura como en la figura 7, los datos de la relación anterior serán más bajos y la falla ocurrirá antes de lo que los valores indiquen (Meas Vong, 1991).

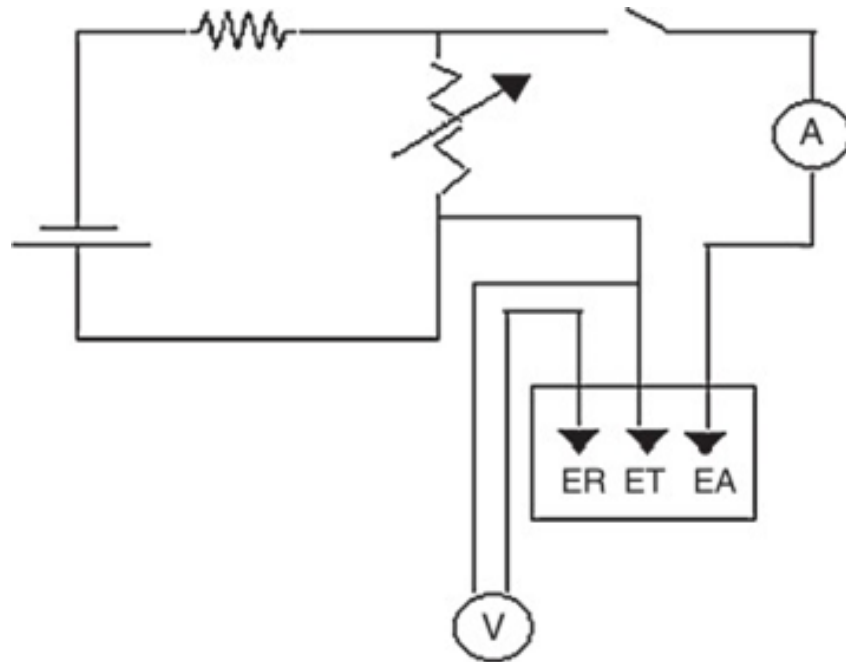
No es una estimación fiable puesto que los factores ambientales son variables y de igual forma, la superficie del acero no es una estructura continua pues ya se ha indicado que está formada por granos que constituyen microceldas.

2.7.2. Medios eléctricos

La cinética electroquímica utiliza ecuaciones matemáticas elaboradas para correlacionar los datos experimentales al medir la corrosión en celdas galvánicas diseñadas para tal fin, combinando variables químicas, termodinámicas y eléctricas. Parte del estudio de reacciones homogéneas a heterogéneas como es el caso de la corrosión.

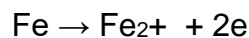
En 1942 Kickling, mencionado por GALVELE (1979), construyó un dispositivo que llamó potencióstato. Permite mantener constante el potencial de la celda y que este no se afecte por la corriente eléctrica. La corriente que se registra por el amperímetro es la que se utiliza como velocidad de corrosión de la celda galvánica. Se construye una curva de polarización potencioestática a partir de los valores de corriente medidos en cada potencial. Este dispositivo se sigue utilizando en la actualidad. La figura 18 muestra el circuito; los detalles de operación están fuera del campo del diseño de investigación de este trabajo por lo que solo se presenta la figura como muestra del dispositivo.

Figura 18. **Circuito eléctrico del potencióstato**



Fuente: Wikipedia (2019). Esquema de un potencióstato. Consultado el 13 de agosto de 2021.
Recuperado de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/72/Potentiostat3.png>.

Al establecer la corriente y las dimensiones del ánodo se establece la densidad de corriente en amp/cm^2 que es a la que el ánodo se corroe y con la aplicación de las leyes de Faraday, el "eq" que es el equivalente gramoso y el área del ánodo, se puede determinar la velocidad de corrosión en $\text{g/cm}^2\text{-día}$, en mm/día o alguna otra forma conveniente. Los cálculos fueron hechos por Galvele, (1979). Para la oxidación del hierro se tiene:



R.5

$$\text{Peso equivalente} = 55.85 \text{ g/2 eq} = 27.9 \text{ g/eq}$$

Constante de Faraday = 96 500 Coul/eq

Si la corriente aplicada al potencióstato es de 1 amp y el área del ánodo es de 1 cm², la densidad de corriente es de 1 amp/cm².

De la Física sabemos que 1 amp = 1 coul/s (Halliday & Resnick, 1975).

La densidad de corriente se puede escribir como 1 coul/cm²-s.

Los equivalentes gramo por unidad de área y tiempo serán:

$$(1 \text{ coul/ cm}^2\text{-s})(1\text{eq}/96,500 \text{ coul}) = 1.04 \times 10^{-5} \text{ eq/cm}^2\text{-s};$$

La masa corroída de hierro por unidad de área y tiempo es:

$$(1.04 \times 10^{-5} \text{ eq/ cm}^2\text{-s})(27.9 \text{ g/eq}) = 2.9 \times 10^{-4} \text{ g/ cm}^2\text{-s};$$

$$\text{este valor equivale a } (2.9 \times 10^{-4} \text{ g/ cm}^2\text{-s})(86,400 \text{ s/día}) = 25.06 \text{ g/cm}^2\text{-día}.$$

De manera similar se puede calcular la velocidad de penetración en el proceso de corrosión con el valor de la masa corroída por unidad de área – tiempo y la densidad del metal (PERRY, 1976): $(25.06 \text{ g/cm}^2\text{-día})(1 \text{ cm}^3/7.8 \text{ g}) = 3.2 \text{ cm/día}$.

Al igual que el método gravimétrico, el cálculo por métodos eléctricos es bajo condiciones controladas y el acero expuesto a un medio de corrosivo suma muchas variables que normalmente actúan dentro del medio ambiente y constituyen lo que se conoce como corrosión atmosférica, mayor causante del proceso electroquímico.

Las condiciones de exposición y composición del acero completan los factores que afectan las formas y velocidades de corrosión

2.8. Corrosión atmosférica

Es la degradación de un material expuesto al aire y sus contaminantes en vez de estar sumergido en un líquido. Abarca la atmósfera exterior y lugares cerrados; sus características físicas más importantes son la temperatura entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa entre 20 % y 100 %. Se Clasifica en seca, húmeda y mojada (Garcés Rodríguez, 2002).

2.8.1. Corrosión seca

En la corrosión seca la característica es la ausencia de humedad, siendo la temperatura el factor importante tal como se presentó en la corrosión química.

2.8.2. Corrosión húmeda

En la corrosión húmeda hay un valor considerado crítico que está alrededor del 70 % de humedad relativa, arriba del cual el agua constituye el electrolito necesario para el transporte de corriente. Normalmente, la película no es visible y dependiendo del grosor de esta, la corrosión procederá a través del mecanismo electroquímico. Productos de la corrosión ya formados, presencia de sales u otros contaminantes que adsorban agua favorecerán el proceso (Garcés Rodríguez, 2002).

2.8.3. Corrosión mojada

La corrosión mojada se identifica por la presencia de gotas o películas de agua visibles causadas por lluvias, rocío o nieblas. Esta puede contenerse en grietas, ondulaciones o trampas de condensación. La velocidad de difusión del oxígeno es el parámetro determinante de la cinética de corrosión.

Un factor importante es la dirección y velocidad del viento pues este puede arrastrar contaminantes como cloruros y sulfuros. De hecho, la corrosión es más intensa en superficies verticales que con inclinaciones de 45° o menos (Garcés Rodríguez, 2002) .

2.8.4. Influencia de contaminantes en la corrosión atmosférica

Los contaminantes que más influyen en la corrosión por acción del medio ambiente son el SO₂ y el ión Cl⁻, normalmente a través de cloruro de sodio.

De estos contaminantes, el de mayor influencia es el SO₂ y su acción queda determinada por el nivel de humedad relativa. Los productos de la corrosión sobre la superficie metálica favorecen la captación de agua y esto estimula la acumulación de SO₂ sobre el hierro llegando a formar FeSO₄ a través de reacciones complejas (Bilurbina Alter, Iribarren Iaco, & Liesa Mestres, 2004).

Las concentraciones de SO₂ pueden ser perjudiciales para el hierro desde 0.012 mg/m³ y valores máximos registrados del orden de 0.250 mg/m³ (Muñoz Ledo & Uruchurtu Chavarín, 2002).

Los cloruros también tienen un efecto importante sobre la velocidad de corrosión, sobre todo en ambientes marinos y costeros. La presencia de agua es notable en valores de humedad relativa superiores al 70 %. Si el ion presenta una tasa de depósito entre 3 mg/m² y 1 500 mg/m² sobre el hierro, el proceso de corrosión se incrementa (Muñoz Ledo & Uruchurtu Chavarín, 2002).

La corrosión, causada por la acción del medio ambiente es la que genera la mayor cantidad de pérdidas de material de acero. Se considera que el 50 % del deterioro por corrosión se deba a la agresividad atmosférica (González Fernández, 1984).

2.8.5. Otros factores que influyen en la corrosión atmosférica

La radiación solar, presencia de óxidos de nitrógeno, vapores de ácidos fuertes y débiles, álcalis, hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos, aerosoles, partículas suspendidas en el aire, bacterias aerobias y anaerobias hongos y algas (Campos Ortega & Campos Ortega , 2004), son otros factores que su presencia en ambientes industriales, urbanos y marinos afectan al hierro y promueven el proceso de corrosión. Por lo tanto, es deducible el hecho de que el hierro es un material, que su retorno al estado combinado utiliza una matriz gigantesca de condiciones y materiales para llevar a cabo dicho proceso.

2.9. Consecuencias de la corrosión del acero

En la sección 1.1 se indicó que el hierro ocupa el 95 % de la producción metálica mundial y, de hecho, el consumo per cápita de acero en el mundo es de 181 kilogramos (Grupo el comercio, 2015). Vivimos en la era del hierro pues casi todo lo que nos rodea tiene, por lo menos algo de ese material.

El hierro se corroe en el agua, en el suelo, en presencia de ácidos, en presencia de álcalis, vapor de agua, gases de combustión, entre otros. El deterioro es notorio y con solo ver a nuestro alrededor encontramos clavos oxidados, carrocerías dañadas, equipos industriales con algún grado de corrosión, obras de arte que se han perdido por este fenómeno, juegos infantiles con riesgo de ruptura, en fin, la corrosión nos acompaña en la vida diaria. Se ha estimado que el 40 % de la producción mundial de acero es para reponer equipos que han sido destruidos por el fenómeno corrosivo (González Fernández, 1984).

2.9.1. Consecuencia económica

En marzo de 1969, en Inglaterra, se creó una comisión para medir el nivel económico de la corrosión y establecer métodos de prevención. El Dr. Hoar fue el responsable de dicha comisión junto a otros 21 científicos y se llamó el informe Hoar. Dicho informe concluyó que las pérdidas por corrosión eran del 3.5 % del PIB y que un adecuado control de la corrosión podría ahorrar un 25 % de estos costos. Estos costos son directos, es decir por reposición e instalación. Los costos por fugas, paros, contaminaciones o accidentes no es posible cuantificarlos de forma general. (Díez Ortega, 2008).

De la sección de antecedentes, estudios más recientes como la conferencia sobre corrosión llevada a cabo en Vancouver, Canadá en 2016, organizada por NACE, se confirma el valor de las pérdidas por corrosión en 3.4 % con relación al PIB mundial (Chaverra, 2016).

Con estas mediciones, se presenta en la tabla VIII, el valor estimado de pérdida por corrosión, considerando un valor entero del 3 %. Los datos del PIB y de las tasas de cambio ponderadas se tomaron de datos estadísticos del Banco de Guatemala con una pérdida media de US\$ 2 065.07.

Tabla VIII. **Estimación de las pérdidas por corrosión para Guatemala**

Años	PIB en millones de Quetzales	Tasa de cambio	PIB en millones de Dólares	Pérdida en millones de Dólares (3%)
2013	Q416,383.2	Q7.86845	\$52,918.1	\$1,587.5
2014	Q447,326.3	Q7.74405	\$57,763.9	\$1,732.9
2015	Q476,022.8	Q7.66978	\$62,064.7	\$1,861.9
2016	Q502,001.7	Q7.61594	\$65,914.6	\$1,977.4
2017	Q526,200.4	Q7.36433	\$71,452.6	\$2,143.6
2018	Q549,790.0	Q7.53545	\$72,960.5	\$2,188.8
2019	Q590,416.6	Q7.71413	\$76,537.0	\$2,296.1
2020	Q581,664.3	Q7.73918	\$75,158.4	\$2,254.8

Fuente: Datos de Banco de Guatemala (s.f.) Producto interno bruto año de referencia 2013. Consultado el 26 de agosto de 2022. Recuperado de <https://www.banguat.gob.gt/es/page/producto-interno-bruto-tasas-de-variacion>. Tipo de cambio. Consultado el 26 de agosto de 2022. Recuperado de <https://banguat.gob.gt/es/page/venta-promedio-del-mes>.

La falta de atención a la corrosión, además de impactar en las economías de los países, también ocasiona accidentes que van desde contaminaciones por fugas, explosiones o desprendimientos de partes mecánicas; algunos de estos con pérdidas de vidas humanas.

2.9.2. Contaminación y accidentes

El 7 de diciembre de 2009, en Illinois, Estados Unidos, se registró una explosión en un reactor de la empresa *NDK Crystal* cuya actividad industrial es la fabricación de cristales de cuarzo. El reactor era de 15 metros de altura, 2 metros de diámetro y 20 centímetros de espesor. Una parte de este de 3,000 kilogramos voló 150 metros y se incrustó en un edificio cercano provocando un herido y daños materiales. Otra parte cayó en una gasolinera cercana y mató una

persona. La investigación a cargo de *Chemical Safety Board* concluyó que la corrosión había ocasionado el debilitamiento de las paredes del equipo y no soportó las condiciones de temperatura y presión del proceso. La empresa no atendió las recomendaciones del fabricante del reactor en cuanto a las revisiones periódicas como mantenimiento preventivo de la estructura del equipo (Prevención Integral, 2013).

El 26 de Julio de 2017, en una feria en Ohio, Estados Unidos, una atracción mecánica sufrió un desprendimiento de una de las piezas giratorias, lo que ocasionó una joven fallecida y siete heridos. Un exceso de herrumbre, acumulado en una de las vigas de soporte generó el adelgazamiento de la misma y cedió debido a las fuerzas que se generan durante la operación de la atracción. Derivado de esto, hubo necesidad de crear un protocolo más estricto de control de los juegos antes de poder ser puestas en uso (Univisión, 2017) .

Existen muchos más registros de daños de todo tipo ocasionados por la corrosión, sobre todo en países en donde se ha venido tomando conciencia de la importancia de su control. Lamentablemente, Guatemala no entra en esta categoría.

La termodinámica demuestra que el proceso de corrosión es espontáneo, nunca se detendrá, pues es un mecanismo natural el retornar al estado combinado del que el hierro partió para conformar el acero. La finalidad de proteger el material contra todos los factores que ocasionan su deterioro no es eliminar la corrosión, sino disminuir su cinética para incrementar al máximo posible su vida útil y prevenir fallas que puedan derivar en consecuencias no deseadas.

2.10. Generalidades de la norma ISO 12944

Esta norma, que no constituye una obligación, pues se considera una guía de uso voluntario, es una referencia internacional para el establecimiento de sistemas de protección del acero de bajo contenido de carbono, menores a 0.25 %, acero galvanizado en caliente y superficies recubiertas de zinc proyectado térmicamente, mediante la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.

Clasifica la agresividad del ambiente corrosivo según determinadas características de humedad, salinidad y presencia de agentes químicos en un lugar y tiempo determinados. Propone sistemas de protección anticorrosiva con espesores específicos para estimar la durabilidad antes de un mantenimiento o aplicación de nuevo recubrimiento. Incluye, además, metodologías de ensayo en laboratorio, guía para supervisión de trabajos de aplicación, desarrollo de especificaciones para trabajos nuevos o mantenimiento y sistemas para estructuras en ultramar, seccionadas en 9 partes (UNE, Normalización Española, 2018).

2.10.1. Introducción

Se define el campo de aplicación, las normas auxiliares que pueden consultarse y una descripción de las demás secciones. Lo más importante es que establece las vidas útiles de los sistemas anticorrosivos, las que dependen del sistema mismo, el diseño de la estructura, condiciones iniciales del acero, grado y calidad de la preparación de la superficie, condiciones de juntas, soldaduras y bordes, condiciones ambientales durante y después de la aplicación y de la calidad misma de la aplicación. Ver tabla IX (UNE, Normalización Española, 2018).

Tabla IX. **Durabilidad de sistemas según ISO**

Calidad de duración	Mínimo en años	Máximo en años
Baja	2	5 (7)
Media	5 (7)	15
Alta	15	25

Fuente: Datos de Industrial Coatings Solutions (s.f.) Revestimientos para protección anticorrosiva de estructuras metálicas, según ISO 12944.Consultado el 1 de enero de 2020.

Recuperado de https://www.cin-ics.com/download/ICS_Doc_Apoio_210x297mm_ES_ma_v1.pdf.

2.10.2. 12944-2. Clasificación de ambiente

Las características más importantes de corrosión están en función del tiempo de humectación, que incluye el efecto de la humedad y temperatura más los niveles de contaminación de sulfuros y cloruros, lo que permite establecer las categorías de corrosividad, que asocian las pérdidas de acero por formación de herrumbre en masa y en penetración, así como los ambientes típicos en exteriores e interiores que se indican como guía informativa. Ver tabla X. (UNE, Normalización Española, 2018).

Tabla X. Clasificación de ambientes

Categoría	Calidad de corrosividad	Pérdida de peso anual en g/m ²	Pérdida de espesor en μm	Exterior	Interior
C1	Muy baja	≤ 10	≤ 1,3	No aplica	Oficinas, almacenes, colegios, hoteles.
C2	Baja	< 10 ≤ 200	< 1,3 ≤ 25	Bajos niveles de contaminación. Rural en su mayor parte.	Alguna condensación como gimnasios (SPA).
C3	Media	< 200 ≤ 400	< 25 ≤ 50	Ambientes industriales y urbanos con nivel medio de SO ₂ . Áreas industriales y costeras de baja salinidad.	Plantas de alimentos, lavanderías, plantas de cerveza y lácteos.
C4	Alta	< 400 ≤ 650	< 50 ≤ 80	Zonas industriales y costeras de media salinidad.	Plantas químicas, piscinas, astilleros.
C5-I	Muy alta (industrial)	< 650 ≤ 1 500	< 80 ≤ 200	Áreas industriales de alta humedad y ambiente agresivo.	Áreas de alta condensación y alta contaminación.
C5-M	Muy alta (marino)	< 650 ≤ 1 500	< 80 ≤ 200	Zonas de tierra y marítimas de alta salinidad.	Áreas de alta condensación y alta contaminación.
CX	Extrema	< 1 500 ≤ 5 500	< 200 ≤ 700	Estructuras en alta mar con humedad extrema y atmósferas muy agresivas.	No aplica
Categoría	Calidad de corrosividad	Pérdida de peso anual en g/m ²	Pérdida de espesor en μm	Exterior	Interior
IM 1	Estructuras sumergidas en agua dulce	No especificado	No especificado	Muelles	No aplica
IM 2	Estructuras sumergidas en agua de mar	No especificado	No especificado	Muelle, estructuras de perforación	No aplica
IM 3	Estructuras enterradas en el suelo	No especificado	No especificado	Tuberías, oleoductos.	No aplica
IM 4	Agua de mar y protección catódica	No especificado	No especificado	Tuberías, oleoductos.	No aplica

Fuente: Datos de Docplayer (2017). Clasificación de ambientes. Consultado el 1 de enero de 2020. Recuperado de <https://docplayer.es/18164520-01-norma-une-en-iso-12944-a-clasificacion-de-ambientes.html>.

Las concentraciones de sulfuros y cloruros no se indican más que de manera cualitativa, lo que puede derivar en una asignación errónea de categoría; sin embargo, ISO 9224 tiene clasificados los niveles de sulfuros y cloruros, así como los tiempos de humectación para las diferentes categorías de corrosividad (Muñoz Ledo & Uruchurtu Chavarín, 2002). Los datos se consignan en las Tablas XI y XII.

Tabla XI. **Agresividad atmosférica**

Categoría	Tiempo de humectación (h/año)	Categoría	Depósito de SO ₂ (mg/m ² día)	Categoría	Depósito de Cl ⁻ (mg/m ² día)
T1	< 10	P0	≤ 10	S0	≤ 3
T2	≤ 10 ≤ 250	P1	< 10 ≤ 35	S1	< 3 ≤ 60
T3	≤ 250 ≤ 2 500	P2	< 35 ≤ 80	S2	< 60 ≤ 300
T4	≤ 2 500 ≤ 5 500	P3	< 80 ≤ 200	S3	< 300 ≤ 1 500
T5	> 5 500				

Fuente: Datos de Muñoz Ledo, y otros, (2002). Contaminantes ambientales. Consultado el 3 de enero de 2020. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37018103.pdf>.

Tabla XII. **Corrosividad en combinación con T, P, S según ISO 9224**

	T1			T2			T3			T4			T5		
	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3
P0-P1	1	1	1-2	1	2	3-4	2-3	3-4	4	3	4	5	4	5	5
P2	1	1	1-2	1-2	1-2	3-4	3-4	3-4	4-5	4	4	5	5	5	5
P3	1-2	1-2	2	2	3	4	4	4-5	5	5	5	5	5	5	5

Fuente: Datos de Muñoz Ledo, y otros, (2002). Contaminantes ambientales. Consultado el 3 de enero de 2020. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37018103.pdf>.

Las pérdidas de masa y penetración normalmente no son establecidas en nuestro país, puesto que no se hacen mediciones previas de corrosividad de ambientes. El criterio de sistema anticorrosivo se basa en la experiencia del ofertador, que puede ser de una empresa pinturera o de un contratista.

2.10.3. 12944-3. Consideraciones sobre el diseño

Esta sección trata sobre el diseño de estructuras de aceros que van a ser recubiertas con sistemas anticorrosivos para evitar las apariciones prematuras de corrosión y la degradación del recubrimiento antes de su vida útil prevista.

Proporciona ejemplos de diseño, que establece como apropiados e inapropiados, con el fin de evitar problemas de inspección y mantenimiento. También considera la manipulación y transporte de estructuras (UNE, Normalización Española, 2018).

2.10.4. 12944-4. Tipos y preparación de superficie

Un revestimiento protector del acero puede ser formulado con la más compleja combinación de materiales que le otorguen características únicas dentro de su capacidad de resistencia a agentes atmosféricos, químicos, polvos y nieblas; sin embargo, si la preparación de superficie no es adecuada, si hay suciedad, herrumbre, escamas, aceite, humedad o cualquier materia extraña al acero el revestimiento fallará prematuramente. Si se aplica un recubrimiento contaminado con productos de corrosión, estos quedan atrapados entre la superficie metálica y el recubrimiento. Muchos de estos productos son total o parcialmente solubles, entrarán en actividad al pasar el agua a través de la película de recubrimiento, disolverá dichos productos y se formará una solución muy concentrada de ellos en contraposición a la solución de productos diluídos

en el exterior. Bajo estas condiciones, habrá una fuerte tendencia para atraer más agua hacia el interior para igualar las concentraciones en ambos lados. Esto, que se denomina efecto osmótico, formará ampollas llenas de líquido, de ahí que la preparación adecuada de la superficie del acero es vital para otorgar la mejor vida útil del protector (Abarca García, 2003) .

La sección 4 de la norma ISO 12944 establece procedimientos puntuales para el éxito de la preparación de la superficie del acero. Primero debe conocerse el estado inicial del metal, para lo cual se establecen 4 grados identificados con las letras A, B, C y D. La tabla XIII resume dichos grados y en ella se menciona la cascarilla de laminación que está compuesta por Fe, O, Fe₂O₃ y Fe₃O₄ (UNE, Normalización Española, 2018).

Tabla XIII. **Categorías de estado inicial del acero**

Grado	Descripción
A	Superficie de acero con la cascarilla de laminación, prácticamente sin corrosión.
B	Superficie de acero con principio de corrosión, la cascarilla se desprende.
C	No hay cascarilla de laminación y si corrosión visible. Se elimina por raspado.
D	Presencia abundante de corrosión y cavidades visibles.

Fuente: Datos de Docplayer (s.f.). Como seleccionar el sistema de pintura adecuado. Consultado el 26 de agosto de 2022. Recuperado de <https://docplayer.es/2872971-Como-seleccionar-el-sistema-de-pintura-adecuado.html>.

La norma ISO 12944-4 se fundamenta en la norma ISO 8501-1 para los grados de preparación de superficie. Estos se nombran utilizando la nomenclatura que indica en la Tabla XIV. En Guatemala no se utiliza el término granallado; se usa el chorro de arena de río y se aplica el término en inglés *sand blasting*. El método es eficaz, muchas veces no es posible utilizarlo por riesgos

de contaminación, inaccesibilidad del equipo de chorro de arena a la superficie de acero, a pesar de ser requerido por el sistema anticorrosivo. Para los equipos de chorro de agua a alta presión, esta puede estar en un rango amplio que depende de la capacidad del aparato y de los requerimientos de uso; de 5 000 y 30 000 psi (Infocorrosión, 2017). El decapado ácido, casi no se practica debido al riesgo de seguridad industrial. Se hace en procesos industriales como productos de peltre.

Tabla XIV. **Grados de preparación de superficies**

Grado	Nombre	Descripción	Grado inicial
Sa 1	Limpieza ligera con granallado ligero	Se eliminan la cascarilla de laminación, la herrumbre y los recubrimientos de pintura, sales solubles y residuos de soldadura débilmente adherida.	B, C, D
Sa 2	Limpieza minuciosa con granallado	Se eliminan la cascarilla de laminación, la herrumbre y los recubrimientos de pintura, sales solubles y residuos de soldadura fuertemente adherida.	B, C, D
Sa 2½	Limpieza muy minuciosa con granallado	Cualquier traza de contaminación se debe presentar como ligeras manchas con forma de pequeños círculos o franjas.	A, B, C, D
Sa 3	Granallado para lograr un metal visualmente limpio	Se eliminan la cascarilla de laminación, la herrumbre y los recubrimientos de pintura, sales solubles y residuos de soldadura. La superficie debe tener un color metálico uniforme.	A, B, C, D
St 2	Limpieza manual y mecánica minuciosa	Se eliminan la cascarilla de laminación, la herrumbre y los recubrimientos de pintura, sales solubles y residuos de soldadura débilmente adherida.	B, C, D
St 3	Limpieza manual y mecánica muy minuciosa	Se eliminan la cascarilla de laminación, la herrumbre y los recubrimientos de pintura, sales solubles y residuos de soldadura. La superficie debe tener un color metálico uniforme.	B, C, D
Wa 1	Chorroado ligero con agua a alta presión	Se eliminan la cascarilla de laminación, la herrumbre y los recubrimientos de pintura, sales solubles y residuos de soldadura débilmente adherida.	B, C, D

Continuación de la tabla XIV.

Grado	Nombre	Descripción	Grado inicial
Wa 2	Chorroado minucioso con agua a alta presión	Se eliminan la cascarilla de laminación, la herrumbre y los recubrimientos de pintura, sales solubles y residuos de soldadura fuertemente adherida.	A, B, C, D
Wa 2½	Chorroado muy minucioso con agua a alta presión	Cualquier traza de contaminación se debe presentar como ligeras manchas con forma de pequeños círculos o franjas.	A, B, C, D
Be	Decapado ácido	Eliminación total de la cascarilla de laminación, herrumbre, recubrimientos y sales solubles.	A, B, C, D

Fuente: Datos de Bernardo Ecenarro S. A. (s.f.). Norma UNE en ISO 12944 preparación de superficies. Consultado el 26 de agosto de 2022. Recuperado de https://www.bernardoecenarro.com/uploads/guias/pdf/guia02/es/cap_naranja_01_b.pdf.

Los grados de preparación de superficies del acero de la ISO 12944-4 tienen sus equivalencias con las de SSPC y de NACE, las que se resumen en la tabla XV.

Tabla XV. **Equivalencias de normas ISO, SSPC y NACE**

ISO	SSPC	NACE
Sa 1	SP 7	No. 4
Sa 2	SP 6	No. 3
Sa 2½	SP 10	No. 2
Sa 3	SP 5	No. 1
St 2	SP 2	No se encontró
St 3	SP 3	No se encontró
Wa 1	SP 12	No. 5
Wa 2	SP 12	No. 5
Wa 2½	SP 12	No. 5
Be	SP 8	No se encontró

Fuente: Datos de Cym Materiales S. A. (2015). Preparación de superficie -Norma SSPC. Consultado el 2 de enero de 2020. Recuperado de <https://cym.com.ar/intranet/Preparacion-de-superficies-norma-SSPC-granallado-cymmateriales-shotblasting.pdf>.

2.10.5. 12944-5. Sistema de pintura protectora

Los sistemas protectores para el acero están referidos a la resina o ligante como genérico, que junto a pigmentos, aditivos y solventes forman el recubrimiento anticorrosivo (UNE, Normalización Española, 2018). La película seca EPS que se forma al aplicar el producto tiene un espesor que en el Sistema Internacional se expresa en micra, o micrón, su símbolo es μm y equivale a la milésima parte de un milímetro, es decir a 0.000001 metros. En algunas ocasiones, dependiendo del fabricante y del producto se especifican grosores de película húmeda EPH, que también se expresan con la misma unidad.

En Guatemala las especificaciones para grosores de película seca de pinturas y recubrimientos normalmente se establecen en mils que significa

milésimas de pulgada; 1 μm equivale a 0.0303701 mils. Los espesores de película seca que considera esta norma son superiores a 3 mils u 80 μm .

Los sistemas están indicados en imprimaciones, que para nuestro medio corresponde a lo que se llama fondo o primario; luego, capas intermedias y capas de acabado. La norma también define capa de anclaje que corresponden a un producto que mejora la adherencia entre capas y la capa en franja, que se utiliza como aplicación adicional en áreas de bordes y soldaduras.

Las resinas típicas (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2008) que a continuación se indican, han sido incluidas debido a sus buenos resultados y satisfacer las pruebas de la norma ISO 12944-6. Su descripción, características, propiedades y mecanismos de formación de película seca o curada se presentan en la sección 2.11. Las resinas típicas con sus símbolos, según la norma son las que se indican a continuación

:

- Clorocauchos CR
- Copolímeros de cloruro de polivinilo PVC
- Polímeros acrílicos AY
- Alquídicos AK
- Epoxídicos EP
- Combinación de epoxídicos EPC
- Poliuretano PUR
- Combinaciones de poliuretanos PURC
- Etilsilicato ESI

El pigmento de zinc que se utiliza con las diferentes resinas, que se identifica como Zn (R) debe ser ≥ 80 % en masa para fondos. Los diferentes pigmentos utilizados en las formulaciones se indican como Misc.

En las tablas de la XVI a la XX, se presentan los sistemas propuestos por la norma para protección de acero de baja aleación por cada categoría de corrosividad, a partir de categoría C2. Si se necesita especificar un sistema en categoría C1, es recomendable utilizar los sistemas de la categoría C2 de más baja durabilidad. Se calculó los espesores de película seca en mils, pues la norma solo los presenta en micras.

Las propiedades de resistencia física y química de las resinas, también llamadas ligantes se presentan en la tabla XXI.

Tabla XVI. **Corrosividad C2**

Sustrato: Acero al carbono de baja aleación												
Preparación de superficie: Sa2½ Para grados de oxidación A, B, C .												
Sistema	Capa (s) de fondo o primario					Capa (s) siguientes	SITEMA DE RECUBRIMIENTO			Durabilidad		
	Ligante	Pigmentación	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)	Ligante	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)	B	M	A
A2.01	AK	Misc	1	40	2	AK	2	80	3			
A2.02	AK	Misc	1-2	80	3	AK	2-3	120	5			
A2.03	AK	Misc	1-2	80	3	AK, AY, PVC, CR	2-4	160	6			
A2.04	AK	Misc	1-2	100	4	-	1-2	100	4			
A2.05	AY, PVC, CR	Misc	1-2	80	3	AY, PVC, CR	2-4	160	6			
A2.06	EP	Misc	1-2	80	3	EP, PUR	2-3	120	5			
A2.07	EP	Misc	1-2	80	3	EP, PUR	2-4	160	6			
A2.08	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	-	1	60	2			

Fuente: Asociación Española de Normalización (2018). UNE EN ISO 12955-5. Consultado el 17 de junio de 2021. Recuperado de https://simogasl.com/wp-content/uploads/2019/11/Iso_12944_5_2008.pdf.

Tabla XVII. Corrosividad C3

Sustrato: Acero al carbono de baja aleación												
Preparación de superficie: Sa2½ Para grados de oxidación A, B, C .												
Sistema	Capa (s) de fondo o primario					Capa (s) siguientes	SITEMA DE RECUBRIMIENTO			Durabilidad		
	Ligante	Pigmentación	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)		Ligante	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)	B	M
A3.01	AK	Misc	1-2	80	3	AK	2-3	120	5			
A3.02	AK	Misc	1-2	80	3	AK	2-4	160	6			
A3.03	AK	Misc	1-2	80	3	AK	3-5	200	8			
A3.04	AK	Misc	1-2	80	3	AY, PVC, CR	3-5	200	8			
A3.05	AY, PVC, CR	Misc	1-2	80	3	AY, PVC, CR	2-4	160	6			
A3.06	AY, PVC, CR	Misc	1-2	80	3	AY, PVC, CR	3-5	200	8			
A3.07	EP	Misc	1	80	3	EP, PUR	2-3	120	5			
A3.08	EP	Misc	1	80	3	EP, PUR	2-4	160	6			
A3.09	EP	Misc	1	80	3	EP, PUR	3-5	200	8			
A3.10	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	-	1	60	2			
A3.11	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	2	160	6			
A3.12	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	AY, PVC, CR	2-3	160	6			
A3.13	EP, PUR	Zn (R)	1	60	2	AY, PVC, CR	3	200	8			

Fuente: Asociación Española de Normalización (2018). UNE EN ISO 12955-5. Consultado el 17 de junio de 2021. Recuperado de https://simogasl.com/wp-content/uploads/2019/11/Iso_12944_5_2008.pdf.

Tabla XVIII. Corrosividad C4

Sustrato: Acero al carbono de baja aleación												
Preparación de superficie: Sa2½ Para grados de oxidación A, B, C .												
Sistema	Capa (s) de fondo o primario					Capa (s) siguientes	SITEMA DE RECUBRIMIENTO			Durabilidad		
	Ligante	Pigmentación	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)		Ligante	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)	B	M
A4.01	AK	Misc	1-2	80	3	AK	3-5	200	8			
A4.02	AK	Misc	1-2	80	3	AY, CR, PVC	3-5	200	8			
A4.03	AK	Misc	1-2	80	3	AY, CR, PVC	3-5	240	9			
A4.04	AY, PVC, CR	Misc	1-2	80	3	AY, CR, PVC	3-5	200	8			
A4.05	AY, PVC, CR	Misc	1-2	80	3	AY, CR, PVC	3-5	240	9			
A4.06	EP	Misc	1-2	160	6	AY, CR, PVC	2-3	200	8			
A4.07	EP	Misc	1-2	160	6	AY, CR, PVC	2-3	280	11			
A4.08	EP	Misc	1	80	3	EP, PUR	2-3	240	9			
A4.09	EP	Misc	1	80	3	EP, PUR	2-3	280	11			
A4.10	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	AY, CR, PVC	2-3	160	6			
A4.11	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	AY, CR, PVC	2-4	200	8			
A4.12	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	AY, CR, PVC	3-4	240	9			
A4.13	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	2-3	160	6			
A4.14	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	2-3	200	8			
A4.15	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	3-4	240	9			
A4.16	ESI	Zn (R)	1	60	2	-	1	60	2			

Fuente: Asociación Española de Normalización (2018). UNE EN ISO 12955-5. Consultado el 17 de junio de 2021. Recuperado de https://simogasl.com/wp-content/uploads/2019/11/Iso_12944_5_2008.pdf.

Tabla XIX. Corrosividad C5-I y C5-M

Sustrato: Acero al carbono de baja aleación												
Preparación de superficie: Sa2½ Para grados de oxidación A, B, C.												
Sistema	Capa (s) de fondo o primario					Capa (s) siguientes	SITEMA DE RECUBRIMIENTO			Durabilidad		
	Ligante	Pigmentación	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)		Ligante	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)	B	M
C5-I												
A5I.01	EP,PUR	Misc	1-2	120	5	AY, CR, PVC	3-4	200	8			
A5I.02	EP,PUR	Misc	1	80	3	EP, PUR	3-4	320	13			
A5I.03	EP,PUR	Misc	1	150	6	EP, PUR	2	300	12			
A5I.04	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	3-4	240	9			
A5I.05	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	3-5	320	13			
A5I.06	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	AY, CR, PVC	4-5	320	13			
C5-M												
A5M.01	EP,PUR	Misc	1	150	6	EP, PUR	2	300	12			
A5M.02	EP,PUR	Misc	1	80	3	EP, PUR	3-4	320	13			
A5M.03	EP,PUR	Misc	1	400	16	-	1	400	16			
A5M.04	EP,PUR	Misc	1	250	10	EP, PUR	2	500	20			
A5M.05	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	4	240	9			
A5M.06	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	4-5	320	13			
A5M.07	EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	2	EPC	3-4	400	16			
A5M.08	EPC	Misc	1	100	4	EPC	3	300	12			

Fuente: Asociación Española de Normalización (2018). *UNE EN ISO 12955-5*. Consultado el 17 de junio de 2021. Recuperado de https://simogasl.com/wp-content/uploads/2019/11/Iso_12944_5_2008.pdf.

Tabla XX. Corrosividad IM-1, IM-2, IM-3, IM-4

Sustrato: Acero al carbono de baja aleación												
Preparación de superficie: Sa2½ Para grados de oxidación A, B, C .												
Sistema	Capa (s) de fondo o primario					Capa (s) siguientes	SITEMA DE RECUBRIMIENTO			Durabilidad		
	Ligante	Pigmentación	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)		Ligante	No. De capas	EPS (µm)	EPS (Mils)	B	M
A6.01	EP	Zn (R)	1	60	2	EP, PUR	3-5	360	14			
A6.02	EP	Zn (R)	1	60	2	EP, PURC	3-5	540	21			
A6.03	EP	Misc	1	80	3	EP, PUR	2-4	380	15			
A6.04	EP	Misc	1	80	3	EPGF, EP, PUR	3	500	20			
A6.05	EP	Misc	1	80	3	EP	2	330	13			
A6.06	EP	Misc	1	800	31	-	-	800	31			
A6.07	ESI	Zn (R)	1	60	2	EP, EPGF	3	450	18			
A6.08	EP	Misc	1	80	3	EPGF	3	800	31			
A6.09	EP,PUR	Misc	1	80	3	-	1-3	400	16			
A6.10	EP,PUR	Zn (R)	-	-	-	-	1-3	600	24			

Fuente: Asociación Española de Normalización (2018). *UNE EN ISO 12955-5*. Consultado el 17 de junio de 2021. Recuperado de https://simogasl.com/wp-content/uploads/2019/11/Iso_12944_5_2008.pdf.

Tabla XXI. Resistencia física y química de los ligantes

Propiedad B = Buena L = limitada P = Pobre NR = No relevante	Policloruro de vinilo	Clorocaucho	Acrílico	Alquídico	Poliuretano aromático	Poliuretano alifático	Etil silicato de zinc	Epoxídico	Combinación de epoxis
	PVC	CR	AY	AK	PUR (ar)	PUR (al)	ESI	EP	EPC
Retención de brillo	L	L	L	L	P	B	NR	P	P
Retención de color	L	L	B	L	P	B	NR	P	P
Inmersión en agua	L	B	L	P	L	P	L	B	B
Lluvia	B	B	B	L	B	P	L	B	B
Inmersión en disolventes	P	P	P	L	B	L	B	B	L
Salpicaduras de disolventes	P	P	P	B	B	B	B	B	B
Inmersión en ácidos	L	B	L	L	B	L	P	L	B
Salpicaduras de ácidos	B	B	L	L	B	B	P	B	B
Inmersión en álcalis	L	L	L	L	L	L	P	B	B
Salpicaduras de álcalis	B	B	L	L	B	B	P	B	B
temperatura hasta 70° C	P	P	L	B	B	B	B	B	B
De 70° C a 120° C	NR	NR	L	B	B	B	B	B	L
De 120° C a 150° C	NR	NR	L	P	L	P	B	L	L
De 150° C a 400° C	NR	NR	NR	NR	NR	NR	B	NR	NR
Resistencia a la abrasión	P	P	P	L	B	L	B	B	L
Resistencia al impacto	L	L	L	L	B	L	L	B	L
Flexibilidad	B	B	B	L	L	B	P	L	L
Dureza	L	L	L	B	B	L	B	B	B

Fuente: Asociación Española de Normalización (2018). UNE EN ISO 12955-5. Consultado el 17 de junio de 2021. Recuperado de https://simogasl.com/wp-content/uploads/2019/11/Iso_12944_5_2008.pdf.

2.10.6. 12944-6. Ensayos de en el laboratorio

Los ensayos de laboratorio están dirigidos a acero sin recubrir, galvanizado en caliente y acero recubierto con protección térmica de zinc; por lo

tanto, los aceros previamente pintados no son considerados. Su aplicabilidad es para fabricantes de recubrimientos que evalúan las propiedades de resistencia de sus productos a agentes atmosféricos y químicos. En casos excepcionales, es utilizada por empresas industriales, marinas y contratistas de aplicación, que utilicen protocolos formales al considerar opciones de protección contra la corrosión. El procedimiento consiste en utilizar láminas, llamadas probetas, de acero de la misma composición del equipo, estructura o tubería que se vaya a proteger. El tamaño mínimo de estas debe de ser de 15 cm x 7 cm con un espesor no menor a 2 mm; la preparación de superficie debe ser Sa 2½ o Sa 3 (UNE, Normalización Española, 2018).

Establecido el sistema a evaluar para una categoría de corrosividad según ISO 12944-2, se definen intervalos de durabilidad baja, media y alta y se utilizan las normas ISO 2812-1 para resistencia química, ISO 2812-2 para inmersión en agua, ISO 6270 para condensación en agua e ISO 7253 para niebla salina neutra; la durabilidad se expresa en horas (Docplayer, 2017).

La norma ISO 2812-1 Trata de la inmersión en líquidos diferente al agua, incluyendo materiales pastosos y evaluar la resistencia del sistema y si es necesario, evaluar el daño al sustrato (UNE, Normalización Española, 2018). La norma ISO 2812-2 determina la resistencia del recubrimiento a evaluar en inmersión total o parcial en agua (UNE, Normalización Española, 2007). ISO 6270 evalúa resistencia del recubrimiento en cuanto a la condensación de humedad (UNE, Normalización Española, 2019).

ISO 7253 considera la resistencia del recubrimiento en una cámara de niebla salina neutra con pH entre 6.5 y 7.2 con una precipitación de 1 ml/h a 2 ml/h a una temperatura de 35 °C. El contenido de cloruro de sodio es del 5 % finamente pulverizado (UNE, Normalización Española, 2002).

Los valores en horas de durabilidad, según cada caso descrito deben ser iguales o superar a los indicados en la tabla XXII.

Tabla XXII. **Procedimientos de ensayos para sistemas de pinturas**

Categoría de corrosividad	Durabilidad	ISO 28212-1 Resistencia química (horas)	ISO 28212-2 Inmersión en agua (horas)	ISO 6270 Condensación de agua (horas)	ISO 7253 Niebla salina neutra (horas)
C2	Baja	-		48	
	Media	-		48	
	Alta	-		120	
C3	Baja	-		48	120
	Media	-		120	240
	Alta	-		240	480
C4	Baja	-		120	240
	Media	-		240	480
	Alta	-		480	720
C5-I	Baja	168		240	480
	Media	168		480	720
	Alta	168		720	1 440
C5-M	Baja	-		240	480
	Media	-		480	720
	Alta	-		720	1 440
IM1	Baja	-		-	-
	Media	-	2 000	720	-
	Alta	-	3 000	1 440	-
IM2	Baja	-		-	-
	Media	-	2 000	-	720
	Alta	-	3 000	-	1 440
IM3	Baja	-		-	-
	Media	-	2 000	-	720
	Alta	-	3 000	-	1 440

Fuente: Bernardo Ecenarro S. A. (s.f.). Norma UNE en ISO 12944 preparación de superficies.
Consultado el 26 de agosto de 2022. Recuperado de
https://www.bernardoecenarro.com/uploads/guias/pdf/guia02/es/cap_naranja_01_b.pdf.

Las pruebas para corrosividad CX e IM4 no están disponibles en la norma ISO 12944-6; se consideran en ISO 12944-9.

2.10.7. 12944-7. Ejecución y supervisión de trabajos de pintado

Aplicar un recubrimiento de protección contra la corrosión implica una serie de pasos debidamente diferenciados. No se puede pasar al siguiente si el anterior no llena los requerimientos mínimos necesarios. Si se asume que la ejecución se ha llevado a cabo, sin una estricta supervisión, la probabilidad de falla será muy alta y a lo que hay que agregar los costos por ejecución de garantías.

Antes de ejecutar la aplicación del sistema protector debe revisarse el activo, sus alrededores, las condiciones de clima, las horas posibles de aplicación, el área de almacenaje de los recubrimientos, fuentes de agua potable, alimentos u otros materiales que pudieran contaminarse; las condiciones de acceso a bordes, soldaduras, vueltas, altura; establecer los equipos y métodos de higiene, seguridad y protección ambiental.

Determinar la condición del sustrato según descripción de la tabla XIII o bien, la condición del recubrimiento que tiene y los focos de corrosión visibles sobre dicho recubrimiento.

La preparación de superficie es vital y debe apegarse estrictamente al sistema que se haya definido según el grado indicado en la tabla XIV.

Una vez concluida la preparación, debe verificarse los perfiles de rugosidad según ISO 1302 o por algún método sugerido por el fabricante de los recubrimientos (UNE, Normalización Española, 2018).

Según el método de aplicación que puede ser brocha, rodillo, pulverización con pistola convencional, airless, electrostático u otro, deberá tenerse presente

los rendimientos de aplicación por unidad de tiempo y los rendimientos por unidad de volumen, las diluciones que en cada caso puedan requerirse, los tiempos para la formación de película seca, según sea el proceso de la resina genérica, es decir, evaporación, oxidación o reacción, los que se presentarán en la sección 2.11.

Utilizar los instrumentos necesarios para medir los parámetros que el sistema predice como película seca, otros como la adherencia, microporos, brillo, película seca. Estas mediciones deben ser tantas como la superficie lo requiera, en función del área y de las áreas de mayor dificultad.

Todos los pasos deben estar indicados claramente y anotar los resultados cualitativos y cuantitativos que comparen el estándar con el valor obtenido de manera de poder hacer las correcciones o ajustes necesarios, antes de pasar a la siguiente etapa (UNE, Normalización Española, 2018).

2.10.8. 12944-8. Especificaciones para trabajos nuevos y mantenimiento

Para el desarrollo de especificaciones de sistemas de recubrimientos protectores contra la corrosión, esta norma diferencia lo referente a trabajos nuevos y trabajos de mantenimiento.

Debe establecerse el nivel de corrosividad del área en donde el acero que conforma el equipo, estructura, tubería u otro, opere o se vaya a desempeñar, según sea el caso. Los niveles de corrosividad se establecen en la norma ISO 12944-2 y se presentan en la tabla X.

El historial de humedad atmosférica, o producida como consecuencia de un proceso industrial específico, la temperatura de operación y gradientes de temperatura, exposición a rayos solares, agua de lluvia, agentes químicos, inmersión en agua u otros líquidos y condiciones de agua como dureza, pH, sólidos disueltos, entre otros; efectos mecánicos por abrasión, nivel de contaminación del aire, contacto con alimentos; en el caso de aceros enterrados, las condiciones del suelo, pH de este, microorganismos como bacterias, levaduras, mohos, hongos y otros, como por ejemplo, niveles de amoníaco en áreas rurales, son los datos ideales que el especialista debe reunir para definir las condiciones de agresividad a las que el acero estará expuesto y con ello, establecer la matriz de sistemas de protección que junto a consideraciones de durabilidad y costo, definirán por parte del responsable del activo, el recubrimiento a aplicar.

Disponibilidad de tiempo para la ejecución del trabajo, espacio de almacenamiento de productos y equipos de aplicación, manejo de desechos, equipos de seguridad, facilidad o complejidad de acceso a la superficie son importantes para desarrollar un diagrama de flujo para la planificación de trabajos nuevos y de mantenimiento.

Informes de avance de trabajo que reúnan datos de preparación de superficie, producto aplicado y espesor son parte de esta norma.

Finalmente, el resultado de la aplicación del sistema protector, espesor total alcanzado, pruebas de *pin hole*, o en español, pequeños agujeros, que deben ser eliminados; programación de visitas de seguimiento, acorde a la durabilidad escogida, complementan el trabajo (UNE, Normalización Española, 2018).

2.10.9. 12944-9. Sistema de pintura protectores y métodos de ensayo de comportamiento en laboratorios para estructuras de ultramar y estructuras afines

Esta es la última sección del conjunto de normas ISO 12944, se agregó en 2018 y consituye sistemas protectores y pruebas de laboratorio para condiciones muy extremas que clasifica como CX para ambientes industriales e IM-4 para condiciones marinas. Los sistemas sugeridos se presentan en la tabla XIX que corresponden a sistemas con espesor iguales o mayores a 280 μm , equivalente a 11 mils para ambientes CX y 800 μm , o 31 mils, para ambientes IM-4.

Esta categoría extrema establece pérdidas de peso entre 1,500 g/cm^2 y 5 000 g/cm^2 y espesores entre 200 μm y 700 μm tal como se indica en la tabla X. Las pruebas de resistencia son similares en su evaluación a los datos presentados en la tabla XXII con 4 200 horas mínimas (UNE, Normalización Española, 2018; Romero Ruiz, 2018).

2.11. Recubrimiento y principales constituyentes

Los recubrimientos anticorrosivos se dividen en metálicos, inorgánicos y orgánicos. Un ejemplo de recubrimiento metálico es el galvanizado del acero mediante capas finas de zinc que funcionan como ánodos de sacrificio, es decir, se corroen protegiendo al hierro contenido en el acero. Los recubrimientos inorgánicos se refieren al uso de vidrio y mezclas cerámicas.

Los recubrimientos orgánicos son resinas o polímeros naturales o sintéticos, generalmente líquidos, que en combinación con pigmentos, solventes y aditivos al secarse forman películas delgadas. La propiedad de recubrimiento

anticorrosivo establece que al aplicar esta mezcla sobre una superficie metálica debe formar una capa uniforme que actúe como barrera entre el metal y el medio ambiente, que sea flexible, adherente, que brinde máxima protección contra la corrosión y resista la acción de rayos ultravioleta, contaminantes como gases corrosivos, polvos y nieblas (Orozco Cruz, 2011).

Un recubrimiento líquido, comúnmente pintura, bajo la consideración físico-química es un sistema disperso, constituida por sólidos en partículas muy finas en un medio fluido denominado vehículo. El vehículo es una sustancia filmógena y aglutinante llamada ligante que se compone de resina natural o sintética, diluida con solvente o mezcla de ellos y que, en algunas formulaciones, sobre todo, ecológicas el solvente es agua; además, se le incorporan aditivos para conferir características específicas como plastificantes, secantes, antinatas, antifloculantes, dispersantes, entre otros. (Giudice & Pereyra, 2009).

La formación de película depende del tipo de resina utilizado en la formulación y el mecanismo puede ser de naturaleza física o química. Se distinguen dos mecanismos: secado y curado.

El mecanismo de secado es el cambio físico de una película líquida en forma de capa delgada, aplicada sobre el sustrato, al estado sólido por la evaporación de solventes y las propiedades de flexibilidad, dureza, adherencia y otras, dependen de la composición del ligante o resina. Se les denomina termoplásticas y sus características es que se vuelven a disolver por contacto con solventes similares a los utilizados en su formulación. Su secado es rápido y el espesor de la película seca depende de los sólidos por volumen del producto.

En la pintura con polímeros de látex el secado se produce por evaporación del agua, y durante este proceso las partículas del polímero coalescen, es decir

se aproximan unas a otras formando una película continua que no permite que se disuelvan por adición de agua.

El curado es un mecanismo en el que, además de la evaporación de solventes, se desarrollan reacciones químicas de diferente complejidad, ya sea con elementos del medio ambiente, generalmente el oxígeno o con elementos que se incorporan en la formulación. El curado involucra entonces, cambios físicos y químicos que transforman un material termoplástico a una condición final termoestable como sólido insoluble.

La conversión es a través de la fijación del oxígeno del aire a los dobles y triples enlaces del ligante por lo que se produce una polimerización auto-oxidativa que genera estructuras lineales y cíclicas (Giudice & Pereyra, 2009).

Hay otras formulaciones de recubrimientos denominados no convencionales como los epóxicos y los poliuretanos que se presentan en dos envases; uno de ellos contiene el vehículo con los pigmentos dispersados y el otro el agente de curado para que al mezclarse se produzca la copolimerización.

Las reacciones de curado aumentan el tamaño del copolímero y se eliminan grupos funcionales libres.

Dado que el material formado ya no es soluble en solventes, las propiedades fisicomecánicas se presentan de buenas a excelentes, dependiendo del ligante específico.

Las propiedades que los diferentes ligantes deben presentar, luego del proceso de curado, incluyen resistencia al agua, resistencia a la transferencia de vapor de agua, resistencia al pasaje de iones como los cloruro, sulfato y

carbonato, resistencia a los fenómenos osmóticos, resistencia a la intemperie, a los agentes químicos, polvos y nieblas; buena adherencia al sustrato, que puede ser el metal o capa de recubrimiento en un sistema de protección, resistencia a la abrasión, elasticidad, resistencia a las bacterias, hongos y mohos, resistencia a niveles de temperatura (Giudice & Pereyra, 2009). En la tabla XXI se indican las propiedades de resistencia física y química de los ligantes sugeridos por la norma ISO 12944.

2.11.1. Clorocauchos

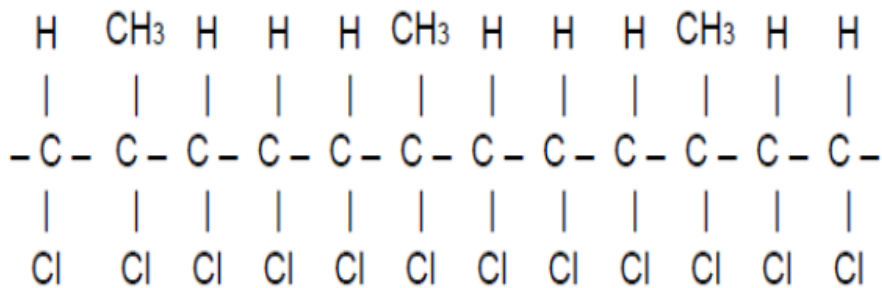
Las resinas de clorocauchos se obtienen a partir del isopreno cuya fórmula química semidesarrollada es $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}_2)$ Es un hidrocarburo alifático de cadena larga lineal y constituye la unidad estructural de gran cantidad de sustancias naturales como el caucho, aceites esenciales, que son fracciones líquidas volátiles que contienen los aromas de las plantas; carotenoides o pigmentos liposolubles de las plantas y esteroides, que se constituyen como complejos orgánicos y conforman las hormonas y ácidos biliares (Primo Yúfera, 2007).

Luego del proceso de cloración en medio ácido, se obtiene un polímero con enlaces simples C-C, C-H, C-Cl que le confieren elevada estabilidad química, la hacen resistente al agua, a sales inorgánicas, ácidos, álcalis, gases industriales inorgánicos como dióxido de carbono, dióxido de azufre, a excepción de los óxidos nitrosos NO y NO₂. Tiene buena resistencia a los aceites minerales, derivados líquidos del petróleo y baja resistencia a los gases orgánicos como los liberados en la quema de combustibles y evaporación de solventes tipo alifático y aromático. Su resistencia a aceites vegetales también es baja. El enlace C-Cl es estable a 90 °C (Calvo Carbonell, 2011).

El mecanismo de formación de película es a través de secado por evaporación de solventes. Debido a ello es que su resistencia a solventes orgánicos es pobre como se indica en la tabla XXI.

La fórmula estructural se presenta en la figura 19. Su distribución es alifática, aunque se cree que en el proceso de cloración se pueden generar algunas estructuras cíclicas (Calvo Carbonell, 2011).

Figura 19. **Fórmula estructural del clorocaucho alifático**



Fuente: Calvo Carbonell, J. (2011). Pinturas y recubrimientos: Introducción a su tecnología.

Consultado el 2 de febrero de 2020. Recuperado de

https://books.google.com.gt/books?id=sH3K_xGpHggC&pg=PA73&lpg=PA73&dq=qu%C3%ADmica+de+las+resinas+de+clorocaucho&source=bl&ots=qxfUNIndWB&sig=ACfU3U3-LMPxqU1-sk9gscFwJSBJZp-xmA&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiT9tym4LbnAhUhrIkKHY2TBb0Q6AEwDnoECAoQAQ#v=onepage&q

Las resinas de clorocaucho se comercializan normalmente en 5 tipos. Los de bajo peso molecular tienen mayor compatibilidad con otras sustancias y al mismo tiempo, son más fáciles de aplicar. En la tabla XXIII se resumen estas variedades. Los valores de la columna de viscosidad se obtienen de una solución al 20 % de clorocaucho en una mezcla de tolueno y butanol en relación 95 a 5 en volumen.

Tabla XXIII. **Tipos comerciales de polímeros de clorocaucho**

Tipo	Peso molecular medio	Viscosidad mpa.s	Densidad g/cm³
5	20,000	4 - 5	1.6
10	70,000	8.5 - 10	1.6
20	135,000	17 - 25	1.6
40	165,000	35 -55	1.6
90	185,000	80 - 115	1.6

Fuente: Calvo Carbonell, J. (2011). Pinturas y recubrimientos: Introducción a su tecnología. Consultado el 2 de febrero de 2020. Recuperado de https://books.google.com.gt/books?id=sH3K_xGpHggC&pg=PA73&lpg=PA73&dq=qu%C3%ADmica+de+las+resinas+de+clorocaucho&source=bl&ots=qxfUNIndWB&sig=ACfU3U3-LMPxqU1-sk9gscFwJSBJZp-xmA&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiT9tym4LbnAhUhrIkKHY2TBb0Q6AEwDnoECAoQAQ#v=onepage&q

Los tipos 5 y 10 se utilizan para las formulaciones de recubrimientos anticorrosivos, 20 y 40 para pinturas de tráfico o señalización y la 90 para piscinas.

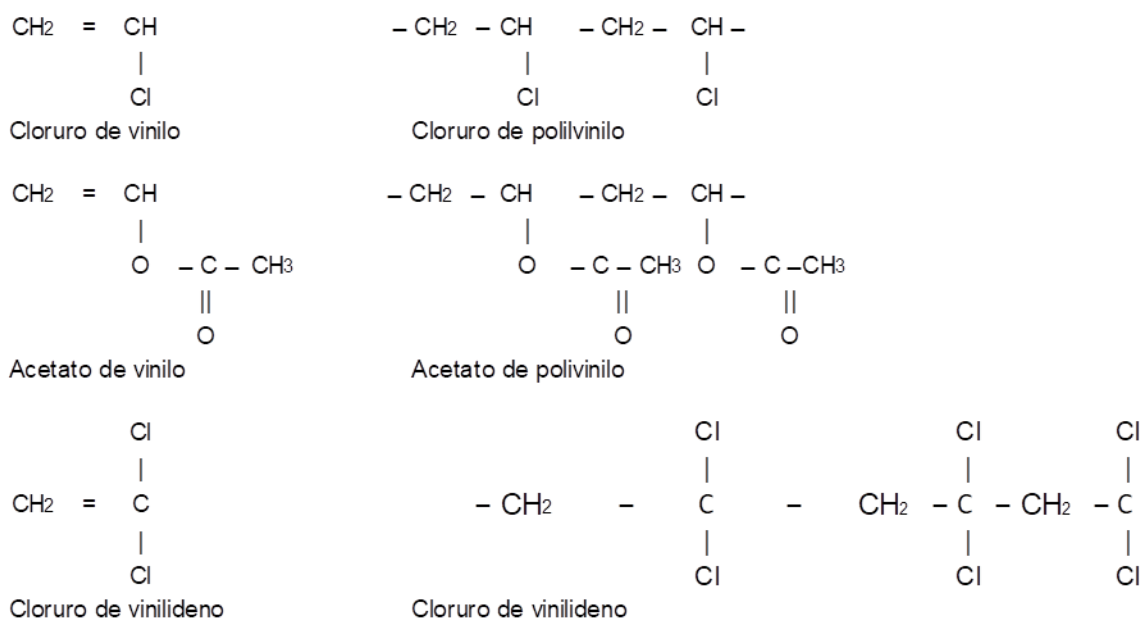
Su compatibilidad con otras resinas es buena, lo cual permite formulaciones anticorrosivas muy variadas. Entre estas, se incluyen alquídicas, acrílicas, entre otras. No son solubles en solventes alifáticos, sí en aromáticos como el tolueno y el xileno (Calvo Carbonell, 2011).

2.11.2. Copolímeros de cloruro de polivinilo

Esta familia de resinas se obtiene a partir de diversos monómeros con dobles enlaces, como el cloruro de vinilo, acetato de vinilo y cloruro de vinilideno. En la figura 20 se presentan las estructuras químicas de estos monómeros.

Pueden ser homopolímeros, como el PVC utilizado en la fabricación de tuberías para conducción de agua, copolímeros o heteropolímeros, como resinas cloruro-acetato de polivinilo. Los grupos presentes definen las propiedades del producto final.

Figura 20. **Estructura química de monómeros y polímeros vinílicos**



Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.84.

Se comercializan en forma de polvo blanco-amarillento y los copolímeros que están presentes son el cloruro y el acetato de vinilo; se agregan otras sustancias para obtener características especiales como, por ejemplo, el ácido maleico, $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$, que mejora a la adhesión y la resistencia a la corrosión.

En los sistemas de protección se combinan los productos vinílicos con cauchos clorados, epóxicos y alquídicos por su gran compatibilidad.

Son diluibles en solventes como la metil etil cetona, metil isobutil cetona y acetato de cellosolve; el uso de tolueno y xileno también es factible.

Pueden aplicarse con cualquier medio tomando en cuenta que la preparación de superficie debe ser rigurosa y de acuerdo a las especificaciones indicadas en las tablas de la XVI a la XX, pues su capacidad de adherencia es limitada.

Tienen un secado rápido, buena flexibilidad, resistencia al agua, que incluye inmersión en agua de mar y agua dulce; resistencia a ácidos inorgánicos, álcalis, cloro y sus derivados, buena retención de brillo, facilidad para el repinte. La solubilización superficial de la película permite que la aplicación de un sistema homogéneo resulte en una mejor interacción entre capas.

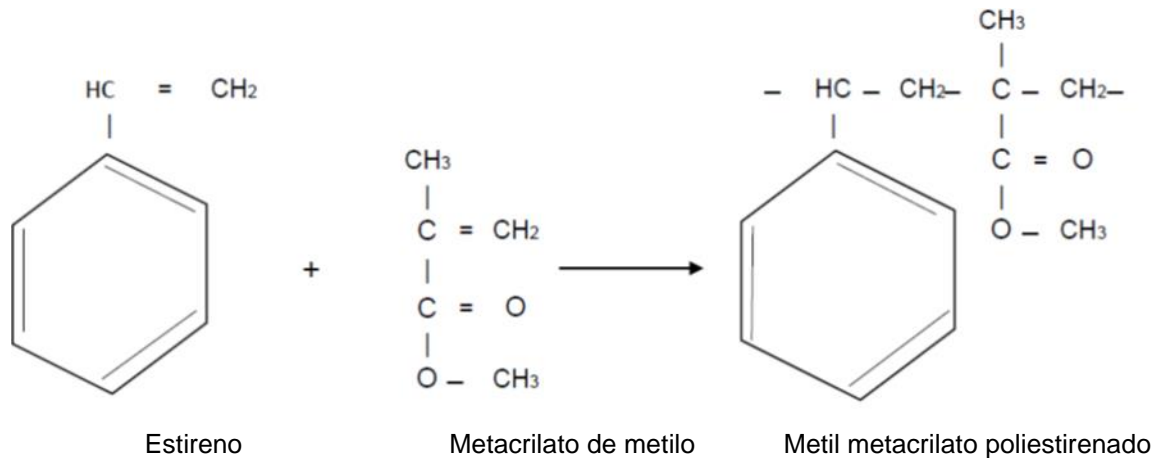
Las resinas vinílicas pueden modificarse con resinas alquídicas y con resina epóxica–amínica, que se describen en 2.11.5. En el primer caso, aumentan la resistencia de las resinas alquídicas y disminuyen el costo de las resinas vinílicas. En el segundo caso combinan la adherencia, dureza y resistencia química de las resinas epóxicas con la durabilidad, flexibilidad y facilidad de pintado de las resinas vinílicas (Giudice & Pereyra, 2009).

2.11.3. Polímeros acrílicos

Las resinas acrílicas se fabrican por polimerización de diferentes monómeros constituidos por ésteres de los ácidos acrílico y metil acrílico con diferentes alcoholes. La reacción de polimerización de los monómeros acrílicos es una reacción típica de adición en los dobles enlaces de los monómeros correspondientes. Esta reacción de adición es similar a la que se muestra en la

figura 21 para la obtención del metil metracrilato poli estirenado a partir de estireno y el metacrilato de metilo.

Figura 21. **Resina acrílica estirenada**



Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.68.

Las resinas acrílicas incluyen una gran variedad de polímeros. La selección de monómeros que forma parte de la estructura del polímero define las propiedades finales y los mecanismos curados, por lo que se clasifican en reactivas o termoestables y no reactivas o termoplásticas.

Las resinas termoestables tienen varios grupos funcionales libres, particularmente hidroxilo, lo que los hace aptos para reaccionar con otros grupos presentes en la coresina seleccionada, melamina, epóxica, isocianato, entre otras y esto genera el entrecruzamiento de moléculas para formar la película y obtener las propiedades mecánicas y químicas deseadas.

Son incoloras, retienen el color, muy buena resistencia a la intemperie, agentes químicos y excelentes propiedades mecánicas.

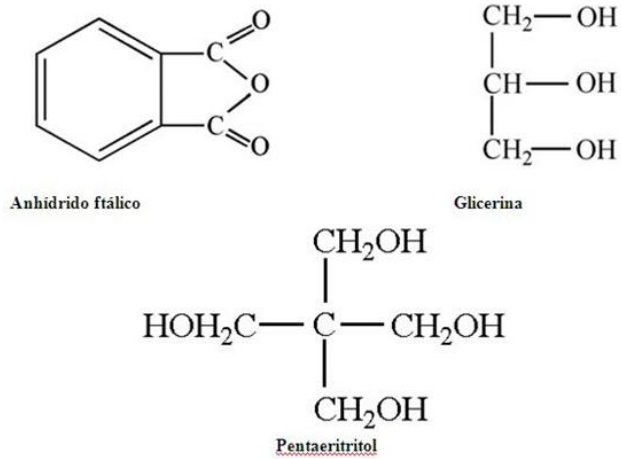
Las resinas termoplásticas tienen largas cadenas hidrocarbonadas lineales o levemente ramificadas con nula capacidad de entrecruzamiento. No tienen grupos funcionales libres por lo que su mecanismo de secado es por evaporación de solventes y dadas sus propiedades de rápido secado, dureza y resistencia a naftas, gasolinas, kerosenes y similares, se destinan al repintado de vehículos automotores (Giudice & Pereyra, 2009).

2.11.4. Resinas alquídicas

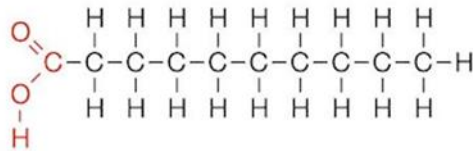
Las resinas alquídicas son las más usadas en la industria de pinturas y recubrimientos. Consisten en un material polimérico derivado de la reacción de polialcoholes y poliácidos y de ahí el nombre alkyd, en español, alquídico; las primeras dos sílabas al se refieren al polialcohol y kyd hace referencia a ácido (Temesio, 2016).

Un alquid puro es un polímero formado únicamente por la reacción de poliesterificación del anhídrido ftálico como diácido y glicerina o pentaeritritol como polialcoholes, llamados polioles y ácidos grasos secantes, semisecantes o no secantes en diferentes proporciones entre sí, como modificadores primarios del poliéster. La Figura 22 muestra las estructuras químicas.

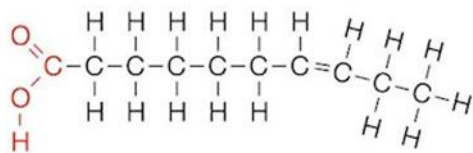
Figura 22. **Materias primas para la obtención de alquídicos puros**



Saturado



Insaturado



Ácidos grasos

Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.59.

Los modificadores primarios proveen propiedades particulares a la resina alquídica. El aceite de lino permite un adecuado secado, resistencia al agua y al exterior, aunque tiende al amarillamiento. Estas propiedades mejoran combinando el aceite de lino con aceite de tung.

El aceite de soya mejora la resistencia al amarillamiento, pero disminuye su velocidad de secado y su resistencia al agua y al exterior.

Los aceites naturales mencionados contienen ácido oleico, linoleico y linolénico en diferentes proporciones y dichas proporciones son suficientes para proveer las propiedades mencionadas (Giudice & Pereyra, 2009).

En los ácidos grasos, la característica de secante, semisecante o no secante, está relacionada con el grado de insaturación de la estructura y la que puede ser alta, media o baja respectivamente (QuimiNet, 2007).

En el campo de las pinturas, las resinas alquídicas se clasifican de acuerdo al contenido de aceite, según se indica en la Tabla XXIV.

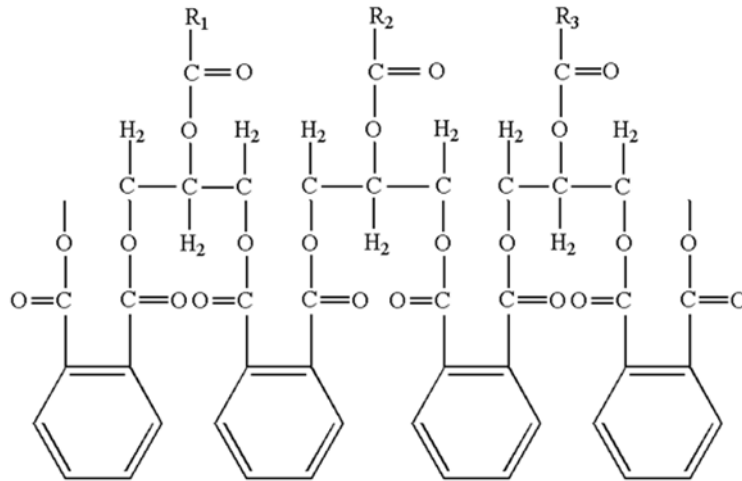
Tabla XXIV. **Resinas alquídicas según el contenido de aceites**

Clasificación	Corta	Media	Larga
Nivel de aceite (%)	20 - 45	45 - 55	55 - 80

Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.64.

Conforme aumenta el contenido de aceite, la solubilidad de la resina en solventes alifáticos como el solvente mineral se incrementa y de manera inversa, la solubilidad en solventes aromáticos como el tolueno o xileno. En la figura 23 se muestra la estructura química de una resina alquídica pura.

Figura 23. Estructura de una resina alquídica pura



Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.60.

Se obtienen resinas alquídicas con modificadores específicos. Estas se fabrican por incluir en su formulación otros poliácidos y polialcoholes diferentes al ftálico y la glicerina o pentaeritritol. Estos poliácidos y polialcoholes se les llama modificadores estructurales.

También se obtienen alquídicos modificados por reacción con compuestos fenólicos, derivados de colofonia, acrílicos, epóxicos, vinílicos, etc.; estos materiales se llaman modificadores específicos de poliéster y la razón de estas modificaciones es mejorar sus propiedades de resistencia y protección (Giudice & Pereyra, 2009).

Modificadores específicos como la colofonia, que es una resina natural obtenida de coníferas, mejoran el secado y la dureza, pero se afecta la retención de color y resistencia al exterior.

Resinas fenólicas-formaldehído permiten películas de gran dureza y elevada resistencia al agua y agentes químicos diversos.

Modificaciones con resinas acrílicas imparten mejores características de secado, resistencia química, durabilidad al exterior y retención de color y brillo.

Las posibilidades de modificar las resinas alquídicas con otro tipo de materiales específicos son prácticamente infinita. Una de las incorporaciones, derivado de la responsabilidad ambiental es alquídicas diluibles en agua para disminuir la emisión de solventes volátiles.

El proceso de secado, que requiere la adición de agentes secantes como aditivos es a través de la oxidación, que permite al O₂ del aire, romper las dobles ligaduras de la cadena polimérica y formar una película seca, que de acuerdo a los modificadores primarios, estructurales o específicos, tenga propiedades y características determinadas.

Su utilización principal es en recubrimientos como primario anticorrosivo y recubrimientos de acabado para ambientes industriales no muy agresivos (Giudice & Pereyra, 2009).

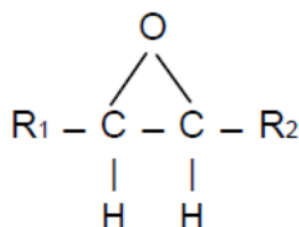
2.11.5. Resinas epoxídicas

Las resinas epoxídicas, también llamadas epóxicas, son polímeros complejos que contienen, además de otros grupos funcionales, el grupo epóxido; este grupo, según el sistema de nomenclatura utilizado, también se denomina óxido de alqueno o, según la IUPAC, oxirano. Dependiendo del origen de los grupos oxiranos, la familia de las resinas epóxicas se dividen en cinco grupos

fundamentales: Éteres glicéricos, ésteres glicéricos, aminos glicéricos, alifáticas lineales y cicloalifáticas (Tecnología de los plásticos , 2011).

El grupo epóxido es un éter cíclico en el que un átomo de oxígeno está unido a dos átomos de carbono adyacentes por enlaces sencillos; esta formación triangular es muy tensionada y por lo tanto, muy reactiva lo que permite la polimerización, homo o hetero y posteriormente, ya como uso final, la reticulación, es decir cadenas cruzadas, a través de reacciones con aminos o amidas. Las resinas epóxicas reticuladas tienen propiedades de alta dureza, resistencia química y resistencia térmica (Calvo Carbonell, 2011). La Figura 24 muestra una estructura típica de este grupo funcional.

Figura 24. **Función epóxido**

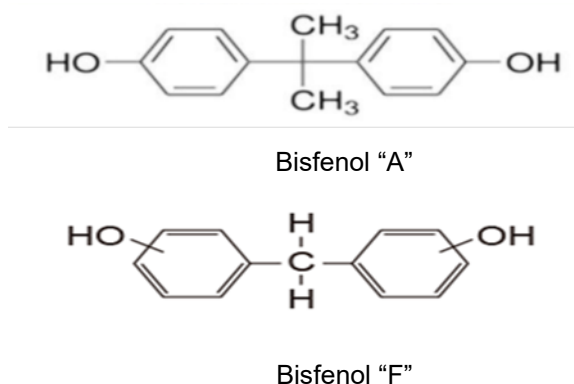


Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.92.

La mayor producción es a través de la reacción de difenilol propano con epíclorhidrina. El primero, comúnmente llamado bisfenol A, es un compuesto orgánico con dos grupos fenólicos; La clasificación A es por los grupos metilo unidos al carbono central de la estructura. En algunas aplicaciones especiales, como contacto de la resina epóxica con alimentos, el bisfenol utilizado es el F (Calvo Carbonell, 2011). Ambas estructuras se muestran en la figura 25.

El segundo, la epiclorhidrina, es un compuesto organoclorado y epóxido, derivado del propileno y el cloro y que combina la reactividad del grupo epóxido con la del cloro en una estructura de propileno. Su nombre químico es 1-cloro-2,3-epoxipropano. La Figura 26 presenta esta estructura.

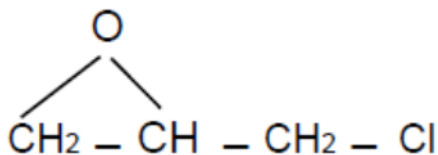
Figura 25. **Estructura química del bisfenol A y bisfenol F**



Fuente: Datos de Hentges, Steven (2019). Bisfenol F: de la madre naturaleza a usted.

Consultado el 28 de agosto de 2022. Recuperado de <https://es.factsaboutbpa.org/blog/bisphenol-f-mother-nature-you/>.

Figura 26. **Estructura del 1 cloro-2,3-epoxipropano o epiclorhidrina**



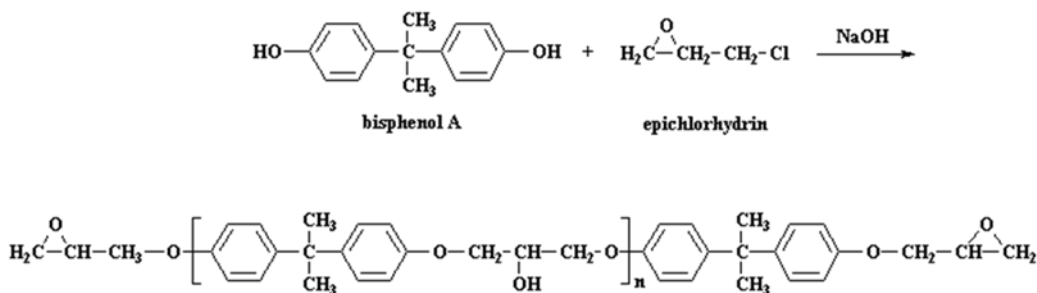
Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos.p.92.

El grado en que se polimeriza el bisfenol utilizado con la epiclorhidrina determina el tipo de resina epóxica obtenida. Las de estado líquido y semisólidas tienen bajo peso molecular, bajo punto de fusión y solubilidad en solventes aromáticos como el tolueno o xileno; las de estado sólido tienen alto peso molecular, alto punto de fusión y baja solubilidad en productos oxigenados muy activos como las cetonas o glicocéteres como el butilcellosolve.

En la figura 27 se muestra la reacción entre el bisfenol A y la epiclorhidrina. El mecanismo de esta reacción escapa al objetivo de este trabajo, por lo que solo se presenta el producto final. El grado de polimerización indicado por el subíndice n puede ser desde cero hasta 12. A partir de pesos moleculares de 908, la resina epóxica es sólida (Tecnología de los plásticos , 2011).

En la producción de resinas epóxicas la reacción de la figura 27 ocupa un 95 % de la producción total derivado de la reactividad de la epiclorhidrina y el bajo costo del bisfenol A.(Tecnología de los plásticos , 2011)

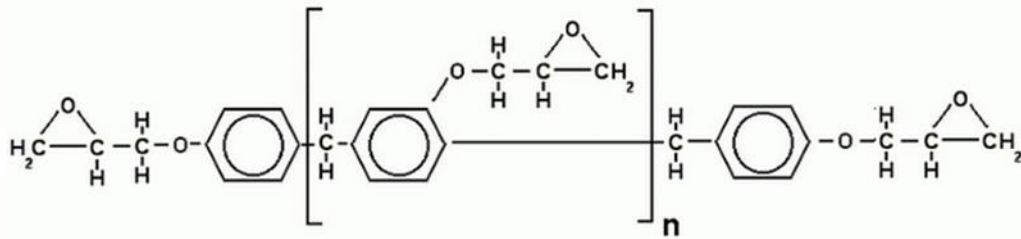
Figura 27. **Epóxido a partir de bisfenol A y epiclorhidrina**



Fuente: Tecnología de los plásticos (2011). Resinas epoxi. Consultado el 12 de abril de 2020.
 Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/resina-epoxi.html>.

En la figura 28 se presenta una estructura epoxídica a partir de Bisfenol F con Epiclorhidrina sin indicar los reactivos.

Figura 28. Estructura epoxídica a partir de bisfenol F y epiclorhidrina



Fuente: Tecnología de los plásticos (2011). Resinas epoxi. Consultado el 12 de abril de 2020.
Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/resina-epoxi.html>.

Aunque el bisfenol F permite obtener resinas con mejores propiedades de resistencia mecánica, química y térmica, el bisfenol A es el más utilizado en la síntesis de resinas para recubrimientos.

Las resinas obtenidas en sí mismas no generan ninguna propiedad especial. Estas se obtienen al combinarse con otros compuestos para generar el curado, es decir, pasar del estado líquido al estado sólido por un proceso de entrecruzamiento de la cadena polimérica comúnmente llamado *cross-linking*.

Se estableció que el curado de las resinas es un conjunto de reacciones y cambios físicos en el que el material pasa hacia una condición termoestable. En las resinas epoxicas el mecanismo de curado implica tres estados característicos que determinan el ciclo de uso del recubrimiento: *pot life*, tiempo de gel y tiempo de curado.

El *pot life* es el tiempo de mezcla en que el recubrimiento epóxico está en estado líquido y en condiciones de aplicación.

El tiempo de gel implica un material semisólido con mucha dificultad para fluir, si no es que nula, por lo que es importante tener presente esta condición para no generar desperdicios de material.

El tiempo de curado es el mecanismo en que la reacción cambia a la condición termoestable y debe ocurrir ya con el material aplicado en la superficie a proteger.

Los agentes de curado de uso más frecuente son poliaminas alifáticas lineales y cíclicas, amido-aminas y poliamidas (Giudice & Pereyra, 2009).

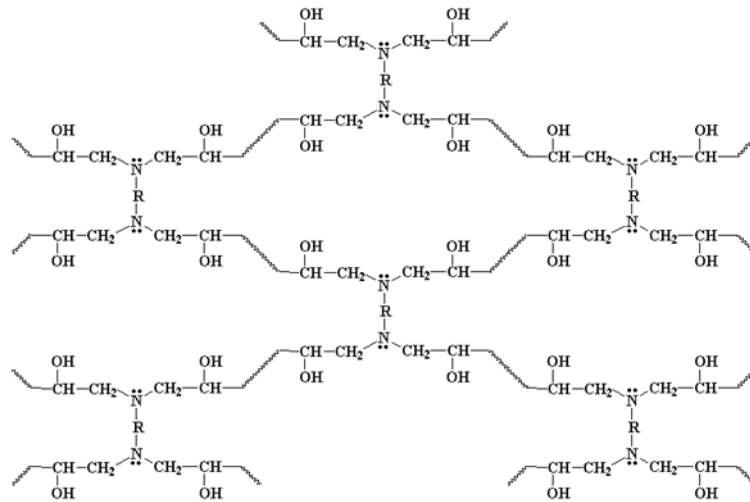
Los epóxicos curados con agentes poliamínicos como la dietilentriamina y la trietilentriamina tienen gran resistencia mecánica y una resistencia menor a las resinas epóxicas curadas con poliamidas (Giudice & Pereyra, 2009).

El uso de poliamidas como agente de curado genera una mezcla con un *potlife* un poco más prolongado y como consecuencia, el cambio al estado termoestable es más lento; sin embargo, las propiedades de la película final presentan un mejor balance de dureza y flexibilidad, mayor resistencia al agua y resistencia química (Giudice & Pereyra, 2009). En la Figura 29 se presenta una estructura epóxica curada con una diamina.

En los últimos años se han desarrollado mezclas de resinas epóxi-fenólicas y epóxi-poliuretánicas con propiedades muy características como mayor resistencia a solventes y agentes químico, así como retención de brillo.

Derivado de las regulaciones ambientales también se han desarrollado resinas epóxicas diluibles con agua (Giudice & Pereyra, 2009).

Figura 29. Película de resina epóxica con curado complejo



Fuente: Universidad del Sur de Mississippi (1996). Making epoxy resins. Consultado el 26 de abril de 2020. Recuperado de <https://pslc.ws/spanish/eposyn.htm>.

2.11.6. Resina poliuretánicas

Los poliuretanos se obtienen de la reacción química entre isocianatos y alcoholes polihídricos, es decir, polioles o polialcoholes (Tecnología de los plásticos, 2011). El isocianato es un grupo químico con fórmula $-N=C=O$ y los alcoholes polihídricos $R'OH$.

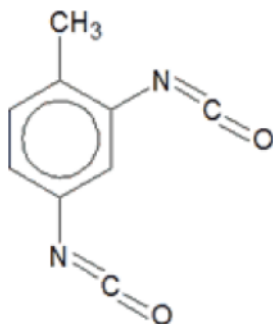
La palabra uretano hace referencia a la propiedad de flexibilidad de los polímeros que se obtienen (Farlex, 2003) y que pueden ser termoestables o termofijos. Dentro de los termoestables se incluyen las espumas flexibles o

rígidas, por ejemplo, y como poliuretanos termofijos, además de las pinturas, también se incluyen adhesivos, fibras y otros similares.

En la producción de resinas de poliuretano se distinguen poliuretanos aromáticos y poliuretanos alifáticos. Los primeros tienen grupos isocianato vinculados al anillo bencénico y en los segundos, el isocianato está unido a un carbono de cadena alifática; de hecho, la cadena polimérica puede presentar anillos bencénicos, pero estos no están asociados al grupo isocianato. La figura 30 muestra las estructuras aromáticas del 2,6 diisocianato de tolueno y del 4,4' diisocianato de difenil metano; la figura 31 presenta la estructura alifática del tetrametilén di isocianato.

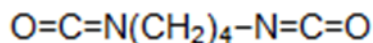
El diisocianato de tolueno, TDI por sus siglas en inglés, es el más utilizado en la producción de polímeros de uretano. Este compuesto es preparado como prepolímero con polioles como el trimetilol propano en tal proporción que hay grupos isocianato no reaccionados.

Figura 30. **Poliisocianato aromático, 2,4, diisocianato de tolueno**



Fuente: Textos científicos (s.f.). Diisocianato de tolueno (TDI). Consultado el 28 de agosto de 2022. Recuperado de <https://www.textoscientificos.com/quimica/tdi>.

Figura 31. **Poliisocianato alifático, tetrametilén diisocianato**



Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos.p.104.

Los recubrimientos de poliuretano se comercializan como poliuretanos de dos componentes y poliuretanos de un componente.

En los recubrimientos de dos componentes, los grupos reactivos del poliisocianato se combinan con diferentes resinas hidroxiladas como poliésteres, poliéteres, acrílicas y epóxicas.

Uno de los componentes contiene la base poliuretánica y aporta la capacidad de entrecruzamiento y el otro contiene los polímeros hidroxilados, que además de otorgar las propiedades características, permite la extensión de la cadena polimérica.

Los sistemas de poliuretanos con base poliéster se utilizan en la industria naval, transporte pesado, maquinaria agrícola, aeronaves, entre otros.

La combinación poliéter-poliuretano generalmente tiene menor costo y mayor resistencia a la abrasión. En ciertas formulaciones se utilizan con glicoles o aceite de ricino obteniéndose mejor resistencia al agua, a los agentes atmosféricos y a sustratos alcalinos (Giudice & Pereyra, 2009).

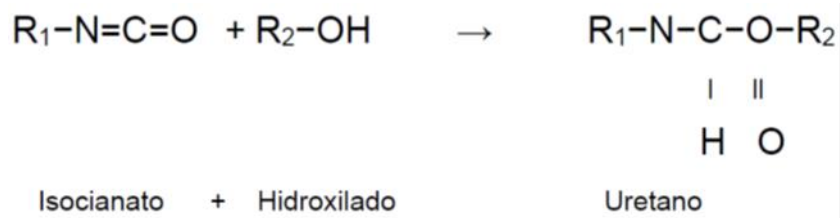
En los sistemas de poliuretano y acrílico los grupos hidroxilo requeridos para que reaccionen con la función isocianato están presentes en la cadena del polímero acrílico y son aportados por los monómeros hidroxilados.

Tienen gran resistencia a la intemperie, agentes químicos, radiación ultravioleta y estabilidad a altas temperaturas por lo que son muy utilizados en aplicaciones industriales, construcción, maquinaria pesada y aeronaves.

Los epoxi-poliuretanos forman la película, igual que en los sistemas anteriores por la reacción de los grupos hidroxilo e isocianato a temperatura ambiente y con propiedades de buena flexibilidad, adherencia sobre metales y resistencia química, aunque con baja resistencia a la luz ultravioleta. Su uso principal es en envases metálicos y electrodomésticos.

La relación en peso para generar la reacción de entrecruzamiento se establece con el peso equivalente del poliols el cual consiste en el peso molecular de este dividido entre el número de grupos hidroxilo; si el poliisocianato es el derivado de tolueno, este contiene un 48.3 % en peso de isocianato que tiene un peso molecular de 42 y reacciona con un hidroxilo de peso molecular 17 (Giudice & Pereyra, 2009). En la figura 32 se presenta la reacción típica del isocianato con el compuesto hidroxilado.

Figura 32. **Reacción del isocianato con resina hidroxiladas**



Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.107.

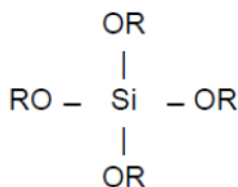
Los poliuretanos de un componente se obtienen por reacción del grupo isocianato con productos de alcoholisis de aceites secantes lo que permite una oxidación a través del O₂ del aire que actúa en la estructura insaturada del aceite secante. No son recomendados para contacto permanente con agua, agentes químicos y solventes alifáticos o aromáticos, aunque tienen buena resistencia a la intemperie y es de fácil repintado (Giudice & Pereyra, 2009).

2.11.7. **Resina etilsilicato**

El uso del silicato de etilo es específico para la formulación de productos anticorrosivos con alta pigmentación de zinc. Los solventes incluidos en la formulación de la resina están conformados por una combinación de alcoholes, hidrocarburos aromáticos y glicoles (Giudice & Pereyra, 2009).

El silicato de etilo es un líquido incoloro con fórmula química C₈H₂₀O₄Si, con un peso molecular de 208.33 y también se denomina tetraetilo ortosilicato, tetraetoxisilano o ácido silícico ester tetraetílico (Quimipur, s.l.u., s.f.). Su fórmula estructural se presenta en la figura 33.

Figura 33. **Estructura química del silicato de etilo**



Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.114.

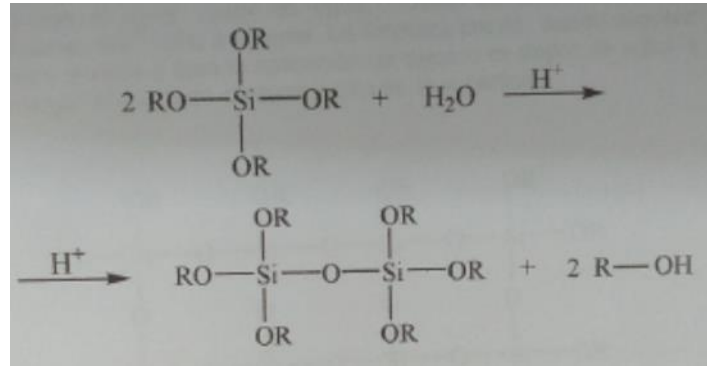
La finalidad del zinc en la resina de silicato de etilo es similar a la del galvanizado de una lámina de hierro, es decir, generar una protección catódica en la que el zinc, por tener un potencial de electrodo de -0.76 , que es menor que el del hierro con un valor de -0.44 , se oxida antes que el hierro por lo que se denomina ánodo de sacrificio.

En la etapa inicial de la exposición del recubrimiento la película es porosa y el zinc actúa como ánodo de sacrificio; luego, los productos de corrosión del zinc se depositan en la superficie y en el interior de la película y lo que hace es llenar la porosidad y establecer un efecto barrera (Giudice & Pereyra, 2009).

El mecanismo de secado sigue una serie de etapas. En primer lugar, para un espesor de $75 \mu\text{m}$ o casi 3 mils de película aplicada a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y 70 % HR se evapora la mezcla de solventes en un rango de tiempo entre 5 y 10 minutos.

La humedad del aire provee el agua necesaria para una reacción de hidrólisis con lo cual el radical etilo se transforma en alcohol etílico, el cual se evapora. Al agotarse estos radicales la película es prácticamente inorgánica (Giudice & Pereyra, 2009). Esta secuencia se muestra en la

Figura 34. **Segunda etapa de curado del silicato de etilo**



Fuente: [Fotografía de Hugo Fernando Díaz Samayoa]. (Guatemala 2021). Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos p.114.

La velocidad de curado es directamente proporcional a la temperatura, tanto para la primera como para la segunda etapa y el suministro del vapor de agua procedente del aire es vital, de lo contrario, el curado no se completa. Ver Tabla XXV en la que se muestra el tiempo de curado a 75 µm o 3 mils de película seca (Giudice & Pereyra, 2009).

Tabla XXV. **Curado de una película zinc silicato a 3 mils de EPS**

Temperatura °C	Tiempo en días
-15	7
0	3
5	2
20	1
30	0.75
100	No cura

Fuente: Datos de Giudice, C. A. & Pereyra, A. M. (2009). Tecnología de pinturas y recubrimientos.p.115.

El polvo de zinc se vende por separado y debe agregarse en la cantidad indicada a la solución de resina de silicato de etilo y mezcla de solventes; la concentración, que ha sido previamente calculada, debe presentar una distribución del tamaño de partículas de tal forma que se logre un empaquetamiento suficientemente denso.

Estas partículas pueden ser esféricas o laminares. Las primeras tienen un contacto tangencial, mientras que las segundas un contacto sobre una línea recta. La mayor densidad se encuentra en una combinación de ambas y a los que se adiciona cargas minerales como extendedores para que no haya porosidad.

La aplicación de estos recubrimientos sobre sustratos metálicos requiere de una adecuada preparación de superficie pues su característica de adhesión al metal no es la mejor; además, para evitar una acelerada reacción del zinc con agua, vapor de agua, dióxido de carbono y otros contaminantes atmosféricos es recomendable utilizar otro recubrimiento de terminación, que según el grado de corrosividad del ambiente, ha de elegirse y tomando en cuenta que el sistema etilsilicato esté completamente curado.

La película formada tiene fuerte adhesión a sustratos debidamente granallados, exhibe alta dureza, resistencia a la abrasión, conductividad eléctrica que permite la protección catódica, estable hasta 350 °C, buena resistencia a solventes alifáticos, aromáticos e hidrocarburos clorados, al petróleo y una adecuada protección al metal en inmersión en agua de mar. Su desempeño se ve disminuido con la presencia de álcalis y ácidos si este no tiene una adecuada capa de terminación (Giudice & Pereyra, 2009).

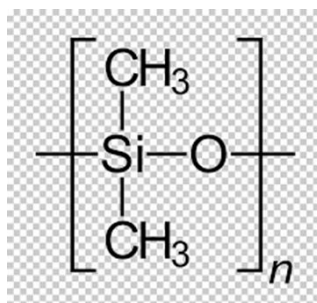
2.11.8. Resina a base de polisiloxanos

Las recubrimientos a base de polisiloxanos no están considerados en los sistemas descritos en la sección 2.10.5; sin embargo, se incluyen dentro del marco teórico pues constituyen la última generación de productos para la corrosión en categorías C5-I y C5-M. No se encuentran disponibles en el mercado guatemalteco, pero por lo menos se conoce de una aplicación de estos en la industria guatemalteca en 2018 con información proporcionada por ejecutivo de Sur Color S. A.

Los polisiloxanos son también llamados siliconas ya que en su cadena principal contienen enlaces de silicio y oxígeno y grupos metilo, etilo o fenilo (Tecnología de los plásticos, 2011).

Se considera un polímero oligomérico, pues tiene una parte inorgánica, ya que en su cadena principal contiene átomos de silicio y oxígeno y también orgánica, por los grupos metilo, etilo y fenilo. En la figura 35 se muestra la estructura del polidimetilsiloxano.

Figura 35. **Polímero de polidimetilsiloxano a partir de su monómero**



Fuente: Tecnología de los plásticos (2011). Siliconas. Consultado el 22 de agosto de 2022.

Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/siliconas.html>.

La comercialización a gran escala de polisiloxanos para recubrimientos industriales apareció en la década de 1990 y actualmente no se usan solas, sino que se combinan con otras resinas para aprovechar las propiedades en conjunto y obtener productos de gran resistencia para ambientes altamente corrosivos como los sistemas epoxy-polisiloxanos (XJY Silicones, s.f.).

El polisiloxano conserva sus propiedades físicas en un rango de temperatura amplio que va de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que tiene una excelente flexibilidad a bajas temperaturas. Es resistente a altas temperaturas y oxidación, tiene buena estabilidad en ambientes químicos y presenta buena resistencia a la intemperie, repelencia al agua y propiedades dieléctricas (XJY Silicones, s.f.)

2.12. Pigmentos

Los pigmentos son partículas sólidas pequeñas que deben ser insolubles en la resina que compone el recubrimiento, además, no reactivos químicamente con el resto de las sustancias de la formulación (Giudice & Pereyra, 2009).

En relación a la función que desempeñan en un recubrimiento, se clasifican en pigmentos funcionales y pigmentos extendedores. Los pigmentos funcionales, como el término lo sugieren, tienen funcionalidad específica, como resistencia a la corrosión de metales, llamados inhibidores o de efecto barrera, otros actúan como biocidas, como los óxidos de cobre, retardadores de fuego, entre otros. (Giudice & Pereyra, 2009).

Los pigmentos para formulaciones anticorrosivas inhibidoras pueden reaccionar con la superficie metálica o desarrollar una reacción química como el zinc que se oxida frente al hierro. Los pigmentos de efecto barrera aumentan la

impermeabilidad de la resina lo que restringe significativamente el ingreso de humedad y oxígeno hacia el metal (Giudice & Pereyra, 2009).

Los pigmentos extendedores se refieren a materiales sólidos de relleno para bajar costos principalmente.

Con relación a su composición química, los pigmentos también se clasifican en inorgánicos y orgánicos. Por su estructura se dividen en cristalinos o de moléculas ordenadas y amorfas o moléculas al azar.

Otra forma de clasificarlos es por la forma y tamaño de las partículas, pudiendo ser esféricas, nodulares, aciculares y laminares.

Consideraciones de opacidad o poder cubriente, densidad, tamaño medio, resistencia a diferentes pH, índice de refracción, y otras características, son importantes para el formulador de recubrimientos y pinturas (Giudice & Pereyra, 2009).

Dentro del estudio de este trabajo es importante conocer las propiedades anticorrosivas de los pigmentos más utilizados y su función protectora en el recubrimiento o sistema anticorrosivo.

2.12.1. Dióxido de titanio

El dióxido de titanio de fórmula TiO_2 , es el pigmento blanco de mayor uso en la industria de pinturas y recubrimientos en general. Por su estructura química tetragonal se comercializa bajo los términos rutilo y anatase, siendo el rutilo el de mayor consumo debido a sus propiedades de alta opacidad, propiedades ópticas inactivas, gran estabilidad física y química del cristal. Ofrece un excelente

resultado óptico, alta blancura, ligereza y brillo, fuerte poder de reducción de color, buenas propiedades de dispersión, además de bajo costo y baja toxicidad (Giudice & Pereyra, 2009).

2.12.2. Óxido de hierro

Los óxidos de hierro se obtienen industrialmente en colores amarillo, rojo, negro y marrón. Constituyen una familia de pigmentos muy utilizados en diferentes tipos de recubrimientos como fondos o imprimaciones, intermedios y de acabado expuestos directamente al ambiente debido a sus propiedades de insolubilidad en agua y en solventes orgánicos, alta resistencia a la luz, álcalis, entre otros (Giudice & Pereyra, 2009).

El óxido de hierro amarillo es en esencia el mineral conocido como goethita o goetita, cuya fórmula suele escribirse como $\alpha\text{-FeOOH}$ que es un oxihidróxido de hierro III, es decir $\alpha\text{-Fe}^{+3}\text{O}(\text{OH})$, aunque también se considera un óxido de hierro III hidratado $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ y conforme pierde agua el color tiende hacia el marrón (Castaño & Arroyave, 1998).

El óxido de hierro de color rojo puede ser hematita que contiene en mayor proporción óxido de hierro III y por su estructura trigonal se identifica como $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Tiene buena resistencia a ácidos y álcalis por lo que su uso como pigmento para imprimaciones anticorrosivas es de uso muy extendido (Castaño & Arroyave, 1998).

El óxido de hierro negro es un complejo inorgánico llamado magnetita cuya fórmula química es Fe_3O_4 pero que es más representativo indicar que es una mezcla de óxido ferroso y óxido férrico $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Castaño & Arroyave, 1998).

El óxido de hierro marrón se obtiene a partir de minerales de maghemita que contienen γ - Fe_2O_3 de estructura octogonal que es la que le confiere el color particular, además de ser uno de los óxidos de mayor abundancia en la naturaleza (Castaño & Arroyave, 1998).

2.12.3. Pigmentos a base de zinc

Las pigmentaciones a base de zinc, sea este de partículas esféricas o laminares actúan como ánodo frente al acero, de manera que éste se comporta como cátodo. Al revisar los datos consignados en la tabla VI, se encuentra que el potencial estándar hacia la reducción del zinc es -0.76 y el del hierro es -0.44 ; esto indica que el zinc tiende a oxidarse antes que el hierro pues es más electronegativo, lo que hace que, en una superficie de acero recubierta con zinc, este sea el ánodo y el acero el cátodo, acción que se conoce como protección catódica (Giudice & Pereyra, 2009).

Es importante establecer que, para recubrimientos a base de zinc, el tipo de pigmento, ya que los que contienen cromo, como el cromato de zinc, ZnCrO_4 , son tóxicos, por lo que, al no existir una restricción en su uso, debe tomarse las precauciones del caso o buscar una alternativa que no lo contenga. Muchas formulaciones utilizan el fosfato de zinc $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$.

2.13. Aditivos

Los aditivos son compuestos químicos que normalmente se incluyen en las formulaciones de pinturas y recubrimientos en cantidades que no exceden en promedio el 2 % en peso, pero influyen en alto grado en las propiedades del material, tanto en estado líquido como en estado sólido, es decir, ya formada la película.

La lista es extensa y variada pues hay aditivos para facilitar la dispersión de los pigmentos, para evitar la sedimentación, para el secado en sistemas oxidativos como los alquídicos, estabilizadores de la luz como los absorbedores de luz ultravioleta, entre otras.

Las hojas técnicas de los recubrimientos a considerar para un sistema de protección específico deben indicar las propiedades relevantes, lo que es un indicativo de la utilización de aditivos durante la formulación (Giudice & Pereyra, 2009)

2.14. Hojas técnicas de pinturas y recubrimientos

Las hojas o fichas técnicas son documentos físicos o electrónicos que resumen la descripción de un recubrimiento, los usos recomendados en cuanto a sustratos, sugiere métodos de preparación de superficie y ambiente; diluyentes que deben utilizarse, formas de aplicación, tiempos de secado, espesores de película seca en mils; en algunas ocasiones, espesores de película húmeda, condiciones de manejo en cuanto a seguridad y toxicología.

Dentro de las propiedades o valores físicos se incluyen, entre otros, el rendimiento en metros²/ galón, la densidad en kilogramos/galón, la viscosidad en unidades Krebs, el porcentaje de sólidos en peso, el porcentaje de sólidos en volumen, el VOC, que abrevia *volatile organic compound* en libras/galón, gramos/litro, resistencia a temperaturas determinadas, adherencia, según ISO 2409, (Neurtek, Instruments, s.f.).

2.14.1. Rendimiento

El rendimiento, que en Guatemala se acostumbra a expresar en metros cuadrados por galón, m^2/gal , es la característica que inicialmente se busca en un recubrimiento cualquiera, pues este es asociado al precio y, en consecuencia, al costo de aplicación. El rendimiento depende del espesor de película húmeda o de película seca; entre más grosor de acabado final, menos rendimiento por unidad de superficie.

Normalmente el rendimiento se expresa en función de un grosor de película seca de referencia que puede ser 1 mils o 1.5 mils, dependiendo del fabricante.

2.14.2. Densidad y viscosidad

La densidad, como propiedad física intrínseca de la materia, es un valor que siempre se indica en las hojas técnicas de los recubrimientos. Se utiliza el término peso en vez de masa, pero esto es por razones de costumbre. Dado que los recubrimientos son líquidos viscosos, las variaciones de esta característica con los rangos de temperatura de aplicación no son significativas.

En la industria de pinturas y recubrimientos se establecen los valores de viscosidad dinámica a través de un viscosímetro llamado Stormer y los de viscosidad cinemática por medio de la copa Ford y la copa Zahn.

El viscosímetro Stormer puede registrar la viscosidad dinámica en Unidades Krebs, KU, cuyo nombre corresponde al apellido de su inventor. Su determinación está especificada por la norma ASTM D562 (ASTM International, 2011)

Las copas Ford y Zahn son dispositivos para medir viscosidades bajas y medias de manera cinemática, siendo la unidad correspondiente el segundo, con procedimientos de medición establecidos en ASTM D1200 y D41212 (ASTM International, 2011). Los Fabricantes las elaboran con orificios de salida de diferentes diámetros y las clasifican en números nominales en relación a este valor.

En la tabla XXVI se presentan las equivalencias entre centipoises, unidades Krebs y segundos en las copas Ford No. 4 y Zahn No. 2. La unidad en el sistema internacional para la viscosidad es el poise, g/cm–s; el centipoise es 1/100 poises (McCabe & Smith, 1978).

Tabla XXVI. **Equivalencias de viscosidad**

Centipoises	Unidades Krebs	Copa Ford No. 4 (segundos)	Copa Zahn No. 2 (segundos)
60	33	25	27
80	37	31	34
100	40	34	41
120	43	41	49
140	46	45	58
160	48	50	66
200	52	58	82
220	54	62	-
240	56	65	-
280	59	70	-
300	60	74	-
1 300	95	-	-
2 500	114	-	-
4 500	136	-	-

Fuente: Google (s.f.) Viscosity conversion table. Consultado el 19 de julio de 2020. Recuperado de <https://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&tl=es&u=https%3A%2F%2Fj.b5z.net%2Fi%2Fu%2F2119873%2Fi%2Fdata%2Fviscosity.pdf&anno=2&prev=search>.

2.14.3. Porcentaje de sólidos en peso y porcentaje en volumen

Estos parámetros físicos de los recubrimientos indican el material no volátil expresado sobre bases de masa y de volumen.

El material volátil lo constituyen todos aquellos componentes que pasan del estado líquido a estado de gas, es decir, solventes orgánicos o agua, por acción de la temperatura y se integran al ambiente luego de aplicar el recubrimiento sobre un sustrato.

El más utilizado de estos porcentajes es el porcentaje en volumen. Al dividir el espesor de película seca requerido de un recubrimiento, entre el valor de fracción de la unidad del porcentaje en volumen se obtiene el espesor de película húmeda que debe dejarse sobre la superficie y para la que existen medidores de fácil utilización.

Por relaciones matemáticas sencillas puede calcularse el rendimiento teórico en unidades de superficie por unidad de volumen tomando como referencia el espesor de película seca especificado en el sistema de protección. Para el caso de Guatemala, los recubrimientos se venden en unidades de galón, los espesores de película seca se indican en mils y las superficies a recubrir en metros cuadrados; el rendimiento teórico en metros cuadrados por galón se obtiene a partir de la ecuación E.8, la que es una deducción propia.

$$R_t = (1.49 \times \%V) / \text{No. Mil} \qquad \text{E.8}$$

El inverso del rendimiento teórico es el consumo en unidades de volumen por unidad de superficie. Al multiplicar el valor de consumo por el precio del

recubrimiento, que normalmente está dado en Quetzales por galón se obtiene el valor monetario por unidad de superficie.

En el proceso de formulación de un recubrimiento hay un factor importante que se toma en consideración y que se define como la concentración volumétrica de pigmento, CVP. Matemáticamente se expresa así:

$$\text{CVP} = [(\text{volumen de pigmentos}) / (\text{volumen de fracción no volátil de ligante})] \times 100. \quad \text{E.9}$$

Los valores de CVP indican características importantes del recubrimiento; por ejemplo, un CVP del 0 % implica la ausencia de pigmentación, por lo que se trata de un barníz, para un CVP del 20 % se establece un recubrimiento tipo esmalte, es decir, de alto brillo, resistencia al medio y bastante impermeable. Si el valor es del 40 % se tiene menos brillo y más porosidad. Los anticorrosivos se formulan dentro del rango del 35 % al 40 %.

El CVP no es un valor que se indique dentro de las hojas técnicas, pero debe mencionarse puesto que se relaciona directamente con el porcentaje de sólidos en volumen ya que en la medida que este aumenta, indica valores de CVP mayores. Hay un valor crítico, llamado concentración crítica volumétrica de pigmento, más allá de la cual, la resina no es capaz de cubrir a todo el pigmento presente durante la formación de la película seca y las propiedades del recubrimiento se ven afectadas pues se crean espacios que se llenan con aire (Abarca García, 2003).

2.14.4. Compuestos orgánicos volátiles (COV)

El COV indica la cantidad de material que se integra al ambiente luego de aplicar un recubrimiento sobre un sustrato. Si el diluyente es agua, esto no representa problema alguno; sin embargo, al ser compuestos orgánicos se contribuye al deterioro ambiental.

Los COV son todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente, alrededor de 20 °C o que son muy volátiles a dicha temperatura; es decir, que tiene una presión de vapor de 10 pascales o más y que se expresa en unidades de masa por unidad de volumen.

Estos hidrocarburos tienen cadenas de átomos de carbono inferiores a 12, además de oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Dentro de los más abundantes en el aire se encuentran el metano, tolueno, n-butano, n-pentano, propano y etileno (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2016).

La norma ISO 16000 es la referente internacional para esta temática. En Guatemala no hay legislación para esto o por lo menos no disponible.

2.15. Herramientas financieras

Si bien no existe un modelo matemático-financiero que permita estimar el valor de la inversión de un sistema de protección anticorrosiva, se han venido haciendo esfuerzos por concientizar a la industria en general, de que esta protección no es un proceso de pintado, en el que luego de preparar la superficie metálica, se transfiere un líquido, contenido en un envase, para que al secar forme una película con propiedades determinadas (De la Cruz Pérez, 2019).

La protección anticorrosiva debe ser considerada como un proceso de gestión de calidad en el control de la corrosión mediante el uso de recubrimientos en la que pueda medirse la rentabilidad, se asegure la productividad, la seguridad y se mantenga la calidad (De la Cruz Pérez, 2019). Valores fácilmente determinables, como lo es el costo de preparación de la superficie, el costo del material y el costo de aplicarlo permiten determinar el valor de la inversión inicial que generará ahorros en cuanto al material que no será corroído; sin embargo, estimar el valor de un posible daño material, humano o de productividad no es posible y se enmarca dentro del criterio probabilístico.

La estimación de la inversión implica los costos de protección anticorrosiva, sobre la base de mantener la superficie sin contacto de agentes corrosivos, durante el tiempo de vida del sistema aplicado y que incluya mantenimiento, reparaciones e inspecciones y aumentar la vida útil del activo (De la Cruz Pérez, 2019).

Para determinar la rentabilidad de un proyecto de protección anticorrosiva, al establecer la inversión, se deben definir los retornos en el tiempo. El material no corroído, que se cuantifica en la norma ISO 12944-5, el valor de la depreciación en cada período, según lo establece la ley correspondiente en el decreto 26-92 del Congreso de la República, capítulo VII, artículos del 16 al 19 (Decreto 26-92, 1992).

De lo anterior se deduce que la aplicabilidad de modelos matemáticos – financieros como el cálculo de la Tasa Interna de Retorno, TIR en un proyecto de esta naturaleza, es factible ya que se fundamenta en la igualdad de los costos de inversión con los ingresos o ahorros de un proyecto en particular, en un período de tiempo establecido a través de una tasa determinada (Sullivan, Wicks, & Luxhoj, 2004).

Si el activo es nuevo, el valor de adquisición más el valor de la protección anticorrosiva son depreciables, de manera que la determinación de la tasa interna de retorno va a favorecer dicha protección. Si el activo no es nuevo, la protección anticorrosiva es parte de los gastos de mantenimiento y no depreciable, favoreciendo únicamente la reducción del pago del impuesto sobre la renta, ISR; sin embargo, la protección anticorrosiva, a través de su vida útil, constituye una mejora permanente por lo que debería poder aplicarse la depreciación.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

El establecimiento de una guía de sistemas de recubrimientos de protección del acero, con productos del mercado nacional, en base a las normas ISO 12944, implicó un análisis documental de las hojas técnicas correspondientes, fabricados o importados en el país y se determinó las concordancias y semejanzas de sus propiedades y características con la norma.

3.1. Variables

Las empresas consideradas se registraron en la tabla XXVII y su elección se fundamentó en los datos de la gremial adscrita la Cámara de Industria de Guatemala (Cámara de Industria de Guatemala, 2021)

3.1.1. Variables independientes

- Empresa en orden alfabético.
- Ligante genérico, según lo establecido en el marco teórico, CR, PVC, AY, AK, EP, PUR, ESI.
- Función: P, primario, I, intermedio y A como acabado.
- Preparación de superficie en norma ISO 12944-4, referida a la tabla XV.
- Características de protección concordante o semejante a norma ISO 12944-5 de tabla XVI a tabla XX.
- Densidad en kg/gal, y rendimiento en m²/gal.
- Viscosidad en KU o centipoises si se excede el rango de la tabla XXVI.
- COV en g/L.
- Precio público en Q/gal.

3.1.2. Variables dependientes

- Sistema propuesto de protección anticorrosiva.
- Nivel de corrosividad máximo de protección.
- Durabilidad del sistema de protección.
- Costo de aplicación del sistema.
- Tasa interna de retorno

3.2. Delimitación del campo de estudio

Este estudio se circunscribió al establecimiento de una guía para la protección del acero de bajo carbono frente a la corrosión, mediante la revisión de los datos de 92 hojas técnicas digitales e impresas de uso público, de empresas fabricantes e importadoras de pinturas y recubrimientos en Guatemala; se determinaron las concordancias y semejanzas con los contenidos de la norma ISO 12944; por tanto, los sistemas de protección que se proponen son teóricos, sujetos al expertiz de cada proveedor.

Los 40 sistemas integrados, en los diferentes niveles de corrosividad, que la norma establece, no limitan su utilización geográfica y aunque los costos no sean constantes, según la zona, para la determinación de la tasa interna de retorno se utilizaron costos de aplicación generales y un sustrato de acero, conocido en el medio guatemalteco como hierro negro.

3.3. Recursos humanos disponibles

Tesista: Hugo Fernando Díaz Samayoa
Estudiante de Ingeniería Química

Asesor: Ingeniero Carlos Archila Quevedo
Ingeniero Químico
Universidad de San Carlos de Guatemala
Colegiado No. 193.

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos materiales se dividen en equipo de cómputo y hojas técnicas.

3.4.1. Equipo de cómputo

Computador e impresora personal con conexión a internet de empresa telefónica particular.

3.4.2. Hoja técnica

Obtenidas por la vía digital e impresa de los recubrimientos anticorrosivos disponibles en el mercado guatemalteco, así como charlas con técnicos de las diferentes empresas consultadas

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

La parte cualitativa básicamente es el registro de datos y la cualitativa conversiones y cálculos.

3.5.1. Técnica cualitativa

- Registro y análisis documental de las hojas técnicas para la tabulación de las variables descritas en la sección 3.1.

- Los grados de preparación de superficie se tabularon con su equivalente ISO según se establece en la tabla XV.
- Se establecieron sistemas de protección para diferentes niveles de corrosividad, con diferentes tipos de ligantes para alta durabilidad, salvo el sistema de Copebase que su hoja indica 5 años y el sistema para el nivel IM-2 que, dadas las condiciones, su vida útil es media en base a las propiedades analizadas con fundamento en la información de las tablas IX y de la XVI a la XX.

3.5.2. Técnica cuantitativa

Se convirtieron algunos de los datos de las hojas técnicas a las dimensionales indicadas en las variables de la sección 3.1.

- Se estandarizó a Quetzales por galón de los recubrimientos en los casos de presentaciones de 2 componentes.
- Se cálculo con las dimensiones, precio y densidad de lámina de acero para establecer su valor monetario en Quetzales por gramo y cuantificó la pérdida teórica por año en unidad monetaria y masa. Ver el apéndice 3.
- Estimado del costo por metro cuadrado con espesor de película seca en milésimas de pulgada de cada sistema de protección propuesto.
- Totalización del Costo del sistema con la adición del costo de aplicación.
- Determinación la tasa interna de retorno mediante la función TIR de Excel, considerando la inversión como valor negativo, como el costo del sistema y los flujos de efectivo anuales, positivos, como los ahorros expresados en el valor monetario de la pérdida de acero sin proteger.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se listó y contactó a las empresas fabricantes e importadoras de recubrimientos anticorrosivos en Guatemala. Estas se ordenaron alfabéticamente con su nombre común, tabulándose en la tabla XXVII.

Se obtuvo 92 hojas técnicas de las compañías fabricantes e importadoras a través de contacto directo con representantes y además, de sus páginas web.

Con la revisión de cada hoja técnica se tabuló los datos correspondientes a las variables listadas en la sección 3.1 y se consignaron en las tablas XXVIII a XXXII. Los datos de estas tablas son los siguientes:

- El código de cada recubrimiento es una combinación alfanumérica, un número o un nombre, según cada empresa.
- La preparación de superficie generalmente está indicada bajo las normas SSPC y se ha colocado su equivalente en ISO.
- La asignación de ligante es según la descripción general del recubrimiento en cuanto a su composición.
- La función de protección, como primario, intermedio o capa de acabado, en la mayoría de los casos está debidamente indicada, en otros, solo se refiere como recubrimiento de protección por lo que se consultó, a las empresas para no hacer una clasificación equivocada. Dicha función está indicada como X y el producto que se debe acompañar como sistema de protección se presenta con el código correspondiente.
- En cuanto a las características de protección, en los casos en que se especifica la concordancia con la norma ISO-12944 en la tabla X, se indicó con un asterísco doble para el nivel correspondiente y se explica al pie de

la tabulación; en los demás casos, se ha asignado según la descripción general del producto.

- Los recubrimientos con dilución de solventes orgánicos se indicaron como BS y los reducibles en agua como BA.
- La densidad se registro en kilogramos/galón.
- El rendimiento se expresó en unidades de metros cuadrados por galón a un espesor de referencia, indicado en mils; en la columna siguiente se anotó el EPS sugerido por el fabricante.
- La Viscosidad se indicó en KU, excepto en los que la consistencia es fuera de este sistema, por lo que se expresó en centipoises.
- Los sólidos por volumen, en % se utilizaron para verificar los rendimientos.
- Se incluyó la concentración de orgánicos volátiles en gramos por litro como referencia de su contribución a la contaminación ambiental.
- Los precios indicados son al público.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La tabulación, ordenamiento y procesamiento se estableció por empresa y luego por nivel de corrosividad lo que permitió la estructuración de la guía de selección.

3.7.1. Formación de sistemas de protección anticorrosiva por empresa

De los datos de las tabulaciones del apartado 3.6 se formaron 40 sistemas como lo sugieren las tablas de la XVI a la XX y consignadas en las tablas de la XXXIII a XL con la mejor concordancia de la norma ISO 12944-5, salvo los casos en que la norma está claramente especificada. La nomenclatura usada para identificar al sistema es la siguiente:

- S.x Ce, ligante, corrosividad, durabilidad para Celco.
- S.x Ci, ligante, corrosividad, durabilidad para Color-In.
- S.x Cm, ligante, corrosividad, durabilidad para Cómex.
- S.x, Co, ligante, corrosividad, durabilidad para Copebase.
- S.x Dw, ligante, corrosividad, durabilidad para Duwest.
- S.x Gs, ligante, corrosividad, durabilidad para Grupo Solid.
- S.x Pg, ligante, corrosividad, durabilidad para pinturas de Guatemala.
- S.x Pk, ligante, corrosividad, durabilidad para pinturas Kendall.
- S.x Pl, ligante, corrosividad, durabilidad para pinturas Lanco.
- S.x Pp, ligante, corrosividad, durabilidad para pinturas Pintuco.
- S.x Ps, ligante, corrosividad, durabilidad para pinturas Sur.
- S.x Pz, ligante, corrosividad, durabilidad para pinturas Primium Zr.
- S.x Qs, ligante, corrosividad, durabilidad para químicos Segá.
- S.x Pq, ligante, corrosividad, durabilidad para Quindeca.
- S.x Sw, ligante, corrosividad, durabilidad para Sherwin Williams.

El símbolo S.x es el número de sistema, donde x es el correlativo a partir del inciso 1 hasta el sistema 40 de la última empresa considerada, las letras siguientes son las siglas asignadas a la empresa; el ligante y la corrosividad, según las mismas siglas utilizadas en las tablas de la XVI a la XX.

El nivel de corrosividad y la pérdida máxima de acero en gramos por metro cuadrado corresponde a las asignaciones de la tabla X.

El valor monetario en Quetzales por gramos del metal se calculó en Q. 0.013/g, partiendo del precio de una lámina de acero de 4 pies X 8 pies X ¼ de pulgada de grosor de Q. 2 152.85 (El Arenal, s.f.) y de la densidad media del material, 7 900 Kg/m³. (Alphapedia, s.f.). La secuencia de operaciones numéricas utilizada se detalla en el apéndice 3.

El valor monetario de la pérdida en Quetzales por metro cuadrado, se obtuvo con el dato de la pérdida máxima por nivel de corrosividad de la tabla X en la columna que especifica gramos por metro cuadrado y el precio la lámina en quetzales por gramo.

Las columnas de primario, intermedio y acabado corresponden a los recubrimientos con cada función específica. Algunos productos pueden tener las 3 funciones, otros 2 y otros solo una. El código en la casilla indica los tipos de función en el sistema.

Los espesores de película seca se refieren, al primario o fondo y el otro, al sistema completo, es decir, la suma del primario, intermedio y acabado. Estos se consideraron con los criterios de las tablas XVI a XX.

Los valores monetarios en quetzales por metro cuadrado parcial y total fueron determinados con los precios por galón, sin IVA, y los inversos del rendimiento en metros cuadrados por galón, que se convierten en consumos en galones por metro cuadrado a un espesor dado en milésimas de pulgada. El orden de los cálculos es el siguiente:

$$Q/\text{gal} \times \text{gal}/\text{m}^2 = Q/\text{m}^2$$

$$Q/\text{m}^2 \times \frac{\text{mils requeridas}}{\text{mil especificadas}} = \frac{Q/\text{m}^2}{\text{Costo del sistema}}$$

Los costos de aplicación en sistemas para protección se cuantificaron consultando varios contratistas. Estos costos van de Q. 20.00 a Q. 220.00, según se requiera una preparación de superficie St 2 a Sa 2 ½.

La durabilidad de los sistemas anticorrosivos se asignó con los criterios de las tablas de la XVI a la XX que establecen la cualidad de alta, media o baja y se cuantificó en años con la referencia de la tabla IX, con tendencia hacia la calificación de alta durabilidad, 15, 20 y 25 años, para ser considerada como mejora permanente, salvo el caso de Copebase que establece 5 años de durabilidad en la hoja técnica y el sistema de Sur Color para el nivel IM-2 que solo permite una durabilidad media.

La tasa interna de retorno, TIR, se calculó a través de la función de Excel. Se consideró el costo de protección del sistema anticorrosivo en quetzales por metro cuadrado como la inversión del proyecto y el precio por gramo de la lámina por el total de pérdida máxima estimada en gramos por metro cuadrado que se indica en la tabla X, como el ahorro o preservación anual del activo que el sistema protector ofrece, durante la vida útil del mismo, según la norma ISO 12944-1 y la que se establece en rangos en la tabla IX más el costo del sistema aplicado, depreciado a 10 años, según el artículo 19, inciso g de la ley del ISR (Decreto 26-92, 1992).

No se consideró el valor del dinero en el tiempo a través de una tasa media inflacionaria anual.

3.7.2. Sistema de protección anticorrosiva por nivel de corrosividad

Las tablas de la XLI a la XLVI se ordenó la información en niveles de corrosividad para establecer que empresas ofrecen sistemas en cada uno de ellos.

3.7.3. Guía de selección de recubrimientos

En base a la información de las hojas técnicas y los resultados de las tablas con los sistemas propuestos se elaboró la guía de selección de recubrimientos para la protección anticorrosiva.

3.8. Análisis estadístico

Se utilizó las herramientas de la estadística descriptiva y se determinó la información siguiente:

- Distribución porcentual de proveedores de recubrimientos, clasificados en fabricantes e importadores.
- Tipos de ligante disponibles en el mercado nacional por empresa, descritos en la sección ISO 12944-5.
- Protección anticorrosiva por empresa y tipo de ligante, según el nivel de corrosividad.
- Determinación de los recubrimientos solubles en agua.
- Rango de emisión de compuesto orgánicos volátiles para solubilidad en agua y en solventes orgánicos.
- Empresas fabricantes o importadoras que en sus hojas técnicas establezcan sistemas de protección con referencia a la norma ISO 12944.
- Sistemas propuestos por empresa-ligante en cada nivel de corrosividad.
- Costo de sistemas de protección por durabilidad en cada nivel de corrosividad y determinación de la media aritmética \bar{X} , la desviación típica σ y el coeficiente de variación r en relación al costo total de los sistemas por nivel de corrosividad, utilizando las funciones de excel para dichos parámetros.

4. RESULTADOS

Los resultados, que inicialmente se presentan en tablas que establecen los recubrimientos anticorrosivos de las empresas en Guatemala, acorde a su disponibilidad y capacidad de protección, permiten establecer una guía de selección según cualquier requerimiento industrial y comercial, además de ser considerados como inversiones en la preservación de activos.

4.1. Empresas fabricantes e importadoras de recubrimiento

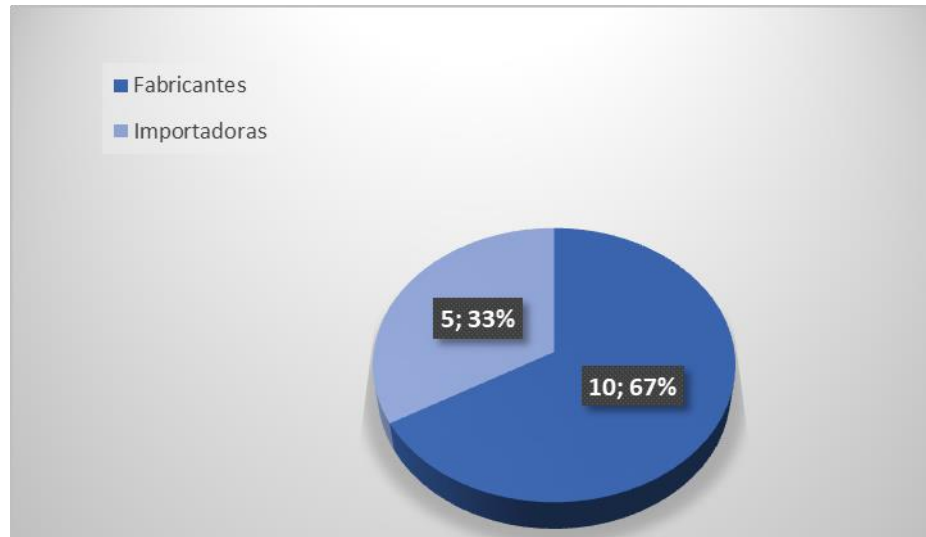
En la tabla XXVII se detallan las empresas proveedoras de recubrimientos en Guatemala con la indicación de fabricante e importador, así como las formas de contacto que se utilizaron para la obtención de las hojas técnicas. Los números telefónicos son de uso público. La figura 36 indica la distribución porcentual.

Tabla XXVII. **Empresas fabricantes e importadoras**

Empresa	Ubicación	Fabrica	Importa	Forma de contacto
Celco de Guatemala S. A.	Villa Nueva			https://celcodeguatemala.com/product-category/05-anticorrosivo/
Color - In S. A.	Guatemala			https://www.pinturascolorin.com/muestrario-pintura-anticorrosiva-color-in/
Cómex S, A.	Guatemala			Comex Decoshop, vía whatsapp, móvil 45704838, Sr Jeffri Castellanos
Copebase S. A.	Guatemala			https://copebase.com/pinturas-universal/24806370
Duwest Recubrimientos S. A.	Amatitlán			Pinturas el Volcán, tel. 23394012, Sr. Armando Mérida
Grupo Solid S. A.	Masagua			Ing. Mike Ascoli, Sr. Jesús Castillo, 23206262
Pinturas de Guatemala S. A.	Mixco			Gremial de fabricantes de pintura
Pinturas Kendall S. A.	San Miguel Petapa			https://pinturaskendall.com/
Pinturas Lanco	Guatemala			EPA, sector Portales
Pinturas Pintuco (Protecto)	Guatemala			Sr. Edy Mérida tel.23394531
Pinturas Sur S. A.	Guatemala			<hcabrerah@gruposur.com>
Primium de Guatemala S.A.	Villa Nueva			https://www.grupoprimum.com
Quimicos Segá S. A.	Guatemala			http://pinturassega.com/
Quindeca S. A.	Palencia			http://www.eltejar.gt/product-category/pintura/ Sr. Estuardo Gómez Chavarri
Sherwin Williams	Guatemala			<pinturasindustriales@hotmail.com> Ing. Rubén López

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 36. **Distribución porcentual de fabricantes e importadoras**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.2. Datos de hoja técnica por empresa

En las tablas siguientes se agrupan los datos de las hojas técnicas de cada empresa y sus diferentes tipos de ligante.

4.2.1. Celco, Color In, Comex, Copebase y Duwest

En la tabla XXVIII se consignan los recubrimientos de Celco, Color-In, Comex, Copebase; aunque se incluye Duwest como empresa, no fue posible tener recubrimientos, dado que están en proceso de cambio de propietarios y no tienen actualizados sus informaciones públicas; Duwest tenía la marca El Volcán.

Tabla XXVIII. **Celco, Color-In, Comex, Copebase y Duwest**

Empresa	Código	Superficie	Ligante	P	I	A	Nivel	Solvente base	Densidad Kg/gal	Rendimiento m ² /gal (mils)	EPS mils	Viscosidad KU	Sólidos/Volumen %	COV g/L	Q/gal
Celco S. A.	R-15	St 2	AK	X	X	X	C2	BS	3.9	55 (1.5)	NI	85 - 100	55	NI	134.00
	Gama	St 2	AK	X	X	X	C2	BS	3.65	23 (1.5)	NI	100 -130	23	NI	112.00
Color-In	700	St 2	AK	X	X	X	C2	BS	NI	NI	NI	NI	NI	NI	147.32
Comex	Flash coat	Sa2	AK	X	X	X	C2	BS	4.07	30 (1.5)	3	64 -100	38 - 50	max 550	359.93
	Ct-comex-100 total	Sa2	AK	X	X	X	C2	BS	3.88	28 (2)	2	75 - 95	40 - 53	max 450	357.14
Velmar	Velmar	St 2	AK	X	X	X	C3	BS	3.84	26 (1.5)	4	75 - 94	35 - 52	max 450	314.30
	Pimex AIP-72	St 2	AK	X			C4	BS	4.32	43 (1)	3	max 33	28 - 32	max 560	230.00
Acqua-100	Acqua-100	Sa2	AY		X	X	C2	BA	4.3	26 (1.5)	4	69 - 79	28 - 37	max 250	334.00
	E-10/Endurecedor	Sa2½*	EP	X	X	U-50	C5-M	BS	5.18	13 (8)	10	NI	70	max 240	1,289.30
Copebase	U-50/Endurecedor	Sa2½*	PUR	E-10	E-10	X	C5-M	BS	4.6	26 (3)	6	NI	52	max 450	833.00
	SR - 10	St 2	AK	X	X	X	C3 (5 años)	BS	4.31	44.65 (1)	NI	95 - 105	30.01	4.19	162.00
Duwest	No presenta														

* Indicado con norma SSPC y se ha colocado su equivalente ISO

Fuente: Datos de Celco de Guatemala (s.f.). Productos. Consultado el 28 de junio de 2022. Recuperado de <https://www.celcodeguatemala.com/product-category/05-anticorrosivo/>. Color-In pinturas (s.f.). Líneas de pintura. Consultado el 29 de junio de 2022. Recuperado de <https://www.pinturascolorin.com/colores-lineas-de-pinturas-color-in/muestrario-pintura-anticorrosiva-color-in/>. Castellanos, Jeffri (2021). Solicitud de hojas técnicas y precios. (H. Díaz Samayo, Entrevistador). Consultado el 30 de septiembre de 2021. Copebase S. A. (s.f.). Pinturas. Consultado el 24 de octubre de 2021. Recuperado de <https://copebase.com/pinturas-universal/>.

4.2.2. Grupo Solid

Los recubrimientos anticorrosivos de Grupo Solid se presentan en la tabla XXIX.

Tabla XXIX. Grupo Solid

Empres a	Código	Superficie	Ligante	P	I	A	Nivel	Solvente base	Densidad Kg/gal	Rendimiento m ² /gal (mils)	EPS mils	Viscosidad KU	Sólidos/Volumen %	COV g/L	Q/gal
G. Solid	Estándar 340x	Sa1	AK	X			C1	BS	4.2	47 (1)	3	90 - 100	29	NI	89.00
	Rustmaster 202x	Sa1	AK	X			C1	BS	4.9	56 (1)	2	90 - 95	37	NI	154.00
	Rustmaster 205x	Sa1	AK	X			C2	BS	4.9	58 (1)	4	85 - 95	45	NI	185.00
	Rustmaster 204x	St2*	AK	X	X	X	C2	BS	3.8	31 (1)	3	105 - 115	21	NI	149.00
	Transpoxy Deep Tanks	Sa2½*	EP	X	X	X	C4	BS	5.9	26 (3)	5	NI	52	418	723.00
	Transpoxy Guard 464	Sa2½*	EP	X	X	X	C4	BS	6.1	25 (6)	8	NI	100	22	675.00
	Transpoxy Mio Primer 164	Sa2½*	EP	X	X	X	C4	BS	6.2	29 (3)	3	NI	58	340	567.00
	Transpoxy Novacure 488	Sa2½*	EP	X	X	X	C4	BS	5.7	18 (8)	12	NI	96	34	625.00
	Transpoxy Resin 7900	Sa2½*	EP	X	X	X	C4	BS	4.2	38 (6)	8	NI	100	22	524.00
	Transpoxy T. Guard 118	Sa2½*	EP	X	X	X	C4	BS	5.7	37 (3)	5	NI	68	290	675.00
	Transpoxy T. Guard VA	Sa2½*	EP	X	X	X	C4	BS	4.9	25 (6)	10	NI	100	8	698.00
	Transozinc Epoxy primer 155	Sa2½*	EP/Zn	X			C5-M*	BS	NI	38 (2)	2	NI	50	450	1,300.00
	Transpoxy Barrier 216	Sa2½*	EP		TS15X	X	C5-M*	BS	5.3	26 (4)	6	NI	68	291	628.00
	Transpoxy Intermediate 219	Sa2½*	EP		EP/ZiX		C5-M*	BS	5.1	25 (3)	4	NI	50	447	1,719.00
	Transpoxy Masterbond BT	Sa2½*	EP	X	X	X	C5-M*	BS	5.3	30 (4)	6	NI	80	220	456.00
	Transpoxy Primer 9116	Sa2½*	EP	X	TB21	TB216	C5-M*	BS	5.3	48 (2)	3	NI	64	326	478.00
	Transpoxy Uniprimer	Sa2½*	EP	X	X	X	C5-M*	BS	4.9	39 (2)	2	NI	52	425	650.00
	Transozinc Silicate 152	Sa2½*	ESI/Zn	X	TB21	TB216	C5-M*	BS	8.7	42 (2)	3	NI	55	434	1,800.00
	Transurethane Gloss	NI	PUR		X	X	C5-I	BS	5.7	45 (2)	3	NI	62	360	776.00

*Indicado con norma SSPC y se ha colocado su equivalente ISO

** La hoja técnica específica que cumple con la norma ISO 12944

Fuente: Datos de La Paleta S. A. Grupo Solid (s.f.). Productos anticorrosivos. Consultado el 18 de noviembre de 2021. Recuperado de

<https://www.pinturaspaleta.com/productos/anticorrosivos>.

4.2.3. Pindegua, Kendall, Lincon y Pintuco

La tabla XXX tabula los recubrimientos de Lanco y Pintuco ya que Pindegua solo comercializa productos para el sector automotriz y Kendall en el segmento arquitectónico.

Tabla XXX. Pindegua, Kendall, Lanco y Pintuco

Empresa	Código	Superficie	Ligante	P	I	A	Nivel	Solvente base	Densidad Kg/gal	Rendimiento m ² /gal (mis)	EPS mis	Viscosidad KU	Sólidos/Volumen %	COV g/L	Q/gal
Pindegua	Solo automotriz														
Kendall	Solo arquitectónica														
Lanco	Anticorrosivo Indust. AC	St2*	AK	Oil Red	X	X	C2	BS	4.26	35(1)	3	85 - 95	19,90	200	228.00
	Painter Plus	St2*	AK	X	X	X	C3	BS	4.5	40(1)	NI	85 - 90	29	500	316.00
	Rapid Dry RD 3446	St3*	AK	Oil Red	X	X	C3	BS	4.04	40(1)	3	NI	16,63	400	225.00
	Speed Anti Rust SD 692	St3*	AK	Oil Red	X	X	C3	BS	4.25	60(1)	3	70 - 80	40	500	225.00
	Super Dry Mate SD 936	St3*	AK/PUR	Oil Red	X	X	C3	BS	4.8	63(1)	3	70 - 80	43	500	250.00
	Super Dry SD 900	St3*	AK/PUR	Oil Red	X	X	C4	BS	4.8	44(1)	3	70 - 80	43	500	234.00
	Aluminio SE 463	St3*	AK/PUR	Oil Red	X	X	C4	BS	4.25	60(1)	3	70 - 80	51	400	290.00
	Oil Red Oxide MM - 100	St3*	AK/PUR	X			C4	BS	4.9	64(1)	1.5	68 - 78	43	500	178.00
	Poliuretano MM-093	Sa1*	PUR	X	X	X	C3	BS	4.9	63(1)	1.5	70 - 80	43	500	378.00
Pintuco	ICO Antico. doméstico	Sa1	AK	X	X	X	C2	BS	3.8	20(1)	1.5	85 - 95	15	270	135.00
	Pintura anticorrosiva	St2	AK	X	X	X	C3	BS	4.1	40(1)	1.5	95 - 105	27	345	325.00
	Anticorrosivo minio	St2	AK	X			C3	BS	4.3	40(1)	1.5	85 - 90	28	340	415.00
	Corrotec primario	Sa2*	AK	X			C4	BS	5.4	74(1)	3	NI	50	400	478.44
	Fast dry esm indust.	Sa 2	AK	X	X		C4	BS	4.4	57(1)	3	NI	40	525	325.00
	Corroepoxy 720/721	Sa2 ½*	EP	X	X		C5-I	BS	4.2	32(1)	3	NI	42	310	930.00
	Corro rust 230(231)	Sa2 ½*	EP	X			C5-I	BS	NI	25(1)	3	NI	28	600	875.00

*Indicado con norma SSPC y se ha colocado su equivalente ISO

Fuente: Datos de Asesor (2021). Anticorrosivos y precios Lanco en EPA (H. Díaz Samayoa, Entrevistador). Consultado el 8 de diciembre de 2021. Mérida, Eddie (2022). Productos anticorrosivos y precios Pintuco (H. Díaz Samayoa, Entrevistador). Consultado el 7 de enero de 2022.

4.2.4. Sur Color

Los recubrimientos de Sur Color se resumen en la tabla XXXI. Se incluyó el recubrimiento 521-81076-000/999 con ligante de polisiloxano acrílico que no está considerado en la norma ISO 12044-5 pero que tiene propiedades de protección para niveles severos de ambientes corrosivos C5-M.

Tabla XXXI. Sur Color

Empresa	Código	Superficie	Ligante	P	I	A	Nivel	Solvente base	Densidad Kg/gal	Rendimiento m ² /gal (mils)	EPS mils	Viscosidad KU	Sólidos/ Volumen %	COV g/L	Q/gal
Sur Color	521-82054-307	Sa 3*	AK (con fosfato de Zn)	X	AK	AK	C3	B.S.	6.0-6.2	97 (1)	3	90-95	64-66	302	317.00
	521-82055-170	Sa 3*	AK	X	AK	AK	C3	B.S.	5.8-6.0	51 (1,5)	3	100-120	56-62	348	233.00
	521-82075-000	Sa 2	AK	55	X	X	C3	B.S.	4.3-4.5	49,5 (1)	2.5	80-90	34-35	450	206.00
	521-82074-000	Sa 2	AK	54	X	X	C3	B.S.	5.4-5.5	54 (1,5)	3	90-95	53-55	400	363.00
	521-82071-000	Sa 2	AK	54	X	X	C4	B.S.	4.7-4.9	72 (1)	2.5	80-85	47-49	445	357.00
	521-82058-720	Sa 3*	AK	X	AK	AK	C3	B.S.	5.4-5.6	80 (1)	2	80-86	72-74	338	175.00
	521-87072-000	Sa 2	AY	52	X	X	C3	B.A.	4.2-4.4	32,5 (1,5)	3	95-105	32-33	183	354.00
	521-87052-307	St 2*	AY	X	72	72	C3	B.A.	4.8-5.0	41 (1,5)	3	110-130	40-44	58	254.00
	521-83053-000	Sa 3*	AY	X	X	X	C3	B.S.	5.1-5.4	70,5(1)	2.5 a 5	90-105	46-48	410-425	391.00
	521-87055-307/999	Sa 3*	EP	X			C3	B.A.	4.8-4.9	77 (1)	3	115-125	49-53	20	520.00
	521-87061-720/999	Sa 2	EP, ESI (Zn)	X	EP		C3	B.A.	5.1-5.2	69 (1)	3	100-110	44-48	< 5	651.00
	521-86184-000/999	Sa 3*	EP	X	X	X	C4	B.S.	4.7-4.8	97 (1,5)	5 a 12	130-140	97	30	1,614.00
	521-86171-000/999	Sa 3*	EP	X	X	X	C5-I	B.S.	6.8-7.0	120 (1)	5 a 20	22-30 (mil cps)	79-81	167	670.00
	521-86052-600/999	Sa 3*	EP	X			C5-I	B.S.	5.9	70,5 (1)	3	85-95	46-48	472	420.80
	521-86181-000/999	Sa 3*	EP	X	X	X	C5-M	B.S.	4.8-5.0	150 (1)	5 a 15	96-110	100	20	1,649.00
	521-86087-000/999	Sa 3*	EP	X	X	X	C5-M	B.S.	4.9-5.2	150 (1)	5 a 15	26-30 (mil cps)	99-100	< 10	626.00
	521-86061-720/999	Sa 2	EP	51	X		C5-M	B.S.	5.7-6.0	78 (1)	1 a 5	90-100	54-56	390-400	468.00
	521-86057-720	Sa 3*	EP (Zn)	X			C5-M*	B.S.	13.93	121,5 (1)	3	73 (mil cps)	75	236	1,486.40
	521-86082-700/999	Sa 2	EP (Zn)	X	X		IM-2	B.S.	4.9-5.2	128 (1)	5 a 16	280-325 (mil cps)	87-88	120	511.20
	521-86051-307/999	Sa 3*	EP	X	EP, PUR	EP, PUR	IM-2	B.S.	5.5	70 (1)	2 a 5	100-110	48-50	411	448.80
	521-85051-720	Sa 3*	ESI (Zn)	X			C5-M*	B.S.	6.5	112,5 (1)	3	-	74-76	340	658.50
	521-87075-000/999	Sa 2	PUR	EP, ESI (Zn)	X	X	C3	B.A.	5.2-5.3	78 (1)	2	95-110	50-54	54	825.58
	521-81152-920	Sa 1	PUR	X			C5-I	B.S.	3.8	66 (1)	1.5	53-57	43-46	514	850.00
	521-84054-800	Sa 2½*	PUR (Zn)	X	X	X	C5-I	B.S.	4.4-4.6	63 (1)	2	80-85	40-44	604	677.00

Continuación de la tabla XXXI.

Empresa	Código	Superficie	Ligante	P	I	A	Nivel	Solvente base	Densidad Kg/gal	Rendimiento m ² /gal (mis)	EPS mis	Viscosidad KU	Sólidos/Volumen %	COV g/L	Q/gal	
	521-81151-720	Sa 3*	PUR (Zn)	X			C5-M	B.S.	10.8	100 (1)	3	85-95	66-68	315	1,613.00	
	521-81071-000	Sa 2	PUR	51	X	X	C5-M**	B.S.	4.8	96 (1)	3	100-105	63-65	350	621.60	
	521-81073-000/999	Sa 2	PUR	EP, ESI (Zn)	X	X	C5-M	B.S.	5.1-5.3	126 (1)	3	100-110	73-77	215	827.00	
	521-81181-700	Sa 2½*	PUR	X	X	X	IM-2	B.S.	5.03	82 (1)	3 a 16	75-84	54-56	400	350.00	
	521-81172-000	Sa 3*	PUR	151	X	X	IM-2	B.S.	5.7	93 (1)	3	70-80	60-64	335	1,010.00	
	521-81161-721	Sa 2	PUR		X		EP, PUR	IM-2	B.S.	5.4	93 (1)	3	75-85	60-64	378	579.00
	521-81076-000/999	Sa 2	Polisiloxano acrílico	51	X	X	C5-M*	B.S.	5.2	90 (1)	3	90-105	60-61	395	857.60	

* Indicado con norma SSPC y se ha colocado su equivalente ISO

** La hoja técnica especifica las características de protección bajo la norma ISO 12944

Fuente: Datos de Cabrera Hernández, Hugo (2022). Productos anticorrosivos y precios Sur Color (H. Díaz Samayoa, Entrevistador. Consultado el 8 de febrero de 2022.

4.2.5. Primium, Quimicos, Segal, Quindeca y Sherwin Williams

La tabla XXXII presenta los recubrimientos de Sherwin Williams; se presenta la información disponible de Primium, Químicos Segal y Quindeca; sin embargo, no es completa en varios de los datos para estas dos empresas, en los que aparece NI como no indicado.

Tabla XXXII. **Primium, Químicos Sega Quindeca y Sherwin Williams**

Empresa	Código	Superficie	Ligante	P	I	A	Nivel	Solvente base	Densidad Kg/gal	Rendimiento m ² /gal (mils)	EPS mils	Viscosidad KU	Sólidos/Volumen %	COV g/L	Q/gal
Primium(G. ZR)	Rustop	Sa 1	NI	X	X	X	C2	B.A.	NI	NI	NI	NI	NI	NI	215.00
	Fast dry	Sa 2	AK	X			C2	B.S.	NI	NI	NI	NI	NI	NI	175.00
	Standard	Sa 2	AK	X			C2	B.S.	NI	NI	NI	NI	NI	NI	248.00
Químicos Sega	Anticorrosivo base solvente	Sa 2	AK	X	X	X	C2	B.S.	4.1	NI	NI	105	NI	NI	185.00
	Anticorrosivo base agua	Sa 2	AY	X	X	X	C2	B.A.	4.8	NI	NI	110-115	NI	NI	210.00
	Fondo industrial	Sa 2	AY	X			C2	B.A.	5.4	NI	NI	140	NI	NI	275.00
Quindeca	Primavera	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	99.00	
Sherwin Williams	2000 Estructural	St 2	AK	X	AK	AK	C2	B.S.	5.1	59.5 (1)	2	NI	38-40	NI	180.00
	KemFaster Dry HS	Sa 2*	AK	Uni HS	X	X	C3	B.S.	5.1	74 (1)	3 a 4	NI	50	426	310.00
	Kem direct to metal	Sa 2*	AK	X	X	X	C3	B.S.	5.1	67 (1)	3	NI	43-47	485	265.00
	4000 Colonial	St 2	AK	X	AK	AK	C3	B.S.	5.7	66.5 (1)	2	NI	37-53	NI	240.00
	KromiK Universal HS metal primer	Sa 2*	AK	X	AK	AK, EP	C4	B.S.	5.5	77 (1)	5 a 7	NI	52	NI	540.00
	6000 Rustop	St 2	AK (Zn)	X	AK	AK	C4	B.S.	5	66.2 (1)	2	NI	41-48	NI	250.00
	Kem direct to metal	Sa 2*	AY	AY	AY, AK	AY, AK	C3	B.A.	4.9	54 (1)	3	NI	36	228	335.00
	Kem cati coat	Sa 2*	EP	X	X	X	C5-I	B.S.	4	70 (1)	5	NI	47	644	650.00

*Indicado con norma SSPC y se ha colocado su equivalente ISO

Fuente: Datos de Primium de Guatemala (s.f.). Conoce nuestros catálogos. Consultado el 3 de mayo de 2022. Recuperado de <https://www.grupoprimum.com/>. Pinturas Sega (s.f.). Productos para sus necesidades. Consultado el 17 de marzo de 2022. Recuperado de <http://pinturassega.com/>. El Tejar (s.f.). Pinturas. Consultado el 28 de mayo de 2022. Recuperado de <http://www.eltejar.gt/product-category/pintura/>. López L., Rubén H. Ing. (2022). Sherwin Williams, productos y precios (H. Díaz Samayoa, Entrevistador). Consultado el 25 de abril de 2022.

4.2.6. Tipos ligantes disponibles por empresa

A partir de la información de los recubrimientos anticorrosivos de las empresas en Guatemala, tanto fabricantes como importadoras, indicada en las tablas de la XXVIII a la XXXII se establecieron los tipos de ligante y así mismo, el tipo de protección, según el nivel de corrosividad que cada empresa tiene a disposición. Esta información se presenta en las figuras 37 y 38.

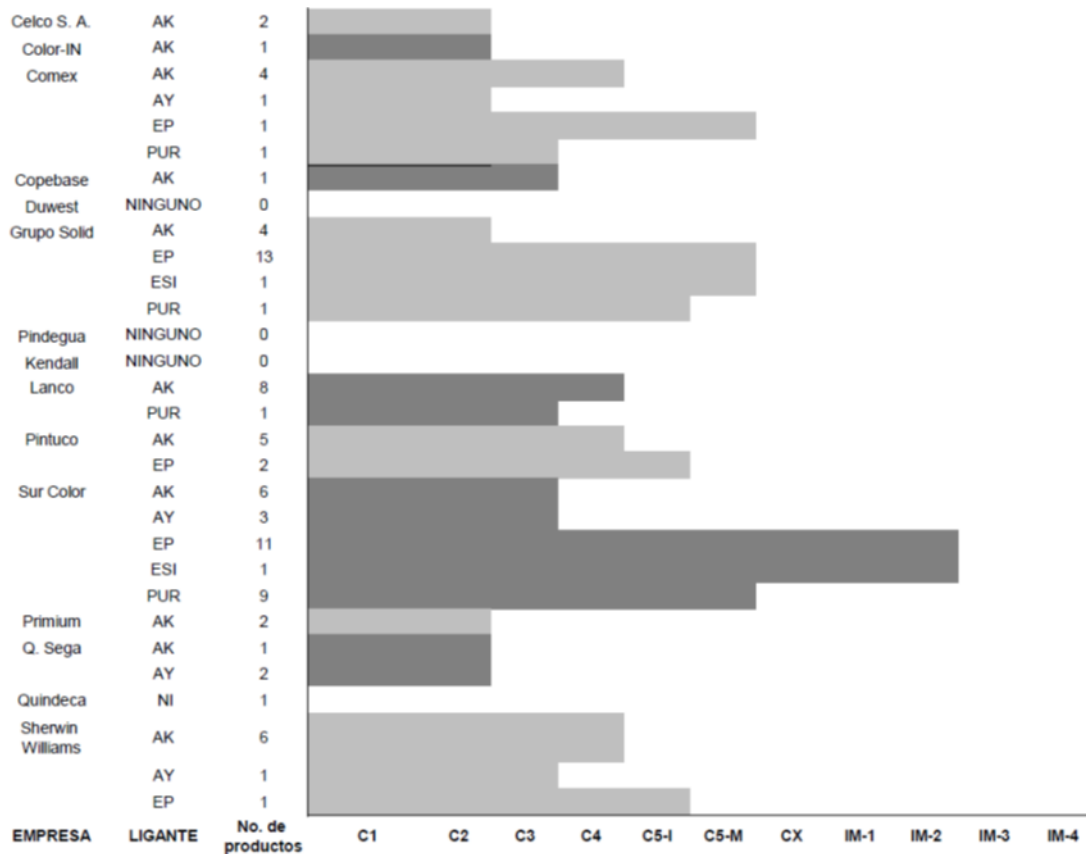
Figura 37. Ligantes por empresa disponibles en Guatemala

Total por empresa → Ligante ↓	2	1	7	1		19			9	7	30	2	3		8	89
PUR			1			1			1		9					12
ESI						1					1					2
EP			1			13				2	11				1	28
AY			1							3			2		1	7
AK	2	1	4	1		4			8*	5	6	2**	1	***	6	40
	CELCO	COLOR - IN	COMEX	COPEBASE	DUMWEST	G. SOLID	PINDEGUA	KENDALL	LANCO	PINTUCO	SURCOLOR	PRIMUM	Q. SEGA	QUINDECA	SHERWIN	†Total por ligante → Empresa

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Se revisaron 92 hojas técnicas, considerando las páginas web Primium y Quindeca; sin embargo, en la figura 37 se totalizan 89. La empresa Primium propone 3 recubrimientos, como lo indica la Tabla XXXII, pero en uno de ellos no se indica el ligante y Quindeca, en la misma tabla, da información muy general y precio en la página web de El Tejar, su empresa comercial, pero no es posible identificar a que grupo pertenece. Sur Color, en la tabla XXXI ofrece un recubrimiento con ligante polisiloxano acrílico, el que no está considerado en la figura 37 pues la norma ISO 12944-5 no lo incluye.

Figura 38. **Protección anticorrosiva por empresa y tipo de ligante**

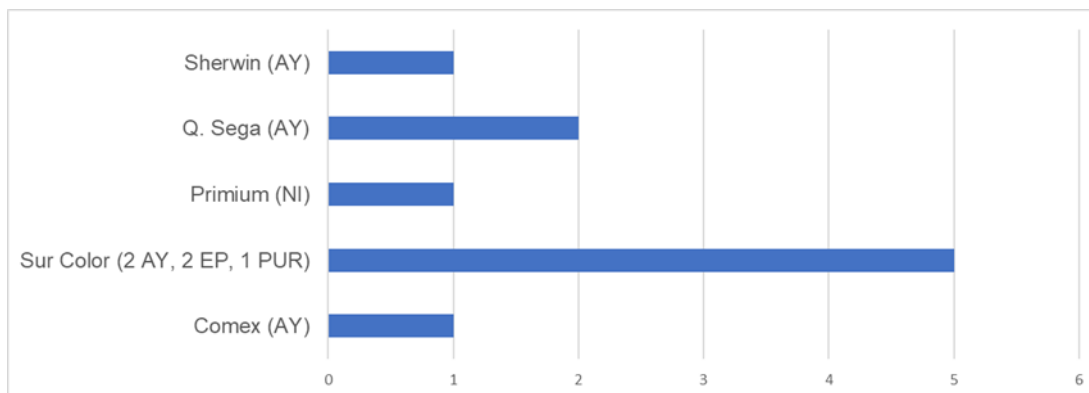


Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.2.7. **Empresa y tipos de ligante como recubrimiento anticorrosivo reducible en agua BA**

En las hojas técnicas, el solvente de dilución de los recubrimientos, en virtud de la contribución a la sostenibilidad ambiental fue diferenciado. En la figura 39 se muestran las empresas que tienen recubrimientos anticorrosivos solubles en agua y los ligantes correspondientes. Primum propone un recubrimiento anticorrosivo soluble al agua, pero no especifica el tipo de ligante. Las calidades de protección son C3 y C4.

Figura 39. **Fabricante e importadoras que comercializan BA**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.2.8. **Rangos de compuestos orgánicos volátiles BA, BS**

El rango de COV en g/L para recubrimientos reducibles en agua es de 5 a 250 y para los reducibles en solventes orgánicos es de 8 a 604.

4.2.9. **Recubrimiento que utilizan la norma ISO-12944-5**

Los recubrimientos, cuyas hojas técnicas hacen referencia a la norma ISO 12944 se restringen a 7 de Grupo Solid y 4 de Sur Color, es decir, 11 en total que representan el 12 % sobre el total de hojas técnicas revisadas, incluyendo el de polisiloxano acrílico. El nivel de corrosividad que describen es el C5-M en todos los casos y los ligantes son epóxicos, poliuretanos y etilsilicato.

4.3. Sistema de protección por empresa

Se integraron 40 sistemas de protección anticorrosiva para los diferentes niveles de corrosividad indicados en la tabla X e indicados en la figura 38, que van desde el nivel C2 hasta el nivel IM-2. De las 15 empresas consideradas, no es posible establecer sistemas de Color-In por tener un solo producto sin mayor información; Duwest, por no tener actualizados sus productos por cambio de propietarios; Pindegua, por comercializar sus productos dentro del segmento automotriz; Kendall, cuya participación en el mercado nacional es arquitectónico; Primium ofrece 3 anticorrosivos, pero sus hojas técnicas no tienen mayor información; Químicos Segá, igual que Primium ofrece 3 anticorrosivos pero sin los datos suficientes; Quindeca, con un solo producto, tampoco presenta valores requeridos.

Los sistemas propuestos se presentan a continuación, separados por empresa, en orden ascendente, por nivel de corrosividad y corresponden a las tablas de la XXXIII a la XL.

La norma ISO 12944-5 establece como preparación de superficie el grado Sa 2 ½ para todos los niveles de corrosividad. Corresponde a una limpieza profunda con granallado, como lo establece la tabla XIV. Con esta condición, los cálculos de costo de cada sistema incluyeron, además del costo de material, una media de Q. 20.00/m² de mano de obra sin chorro de arena y Q. 200.00/m² con chorro de arena. La determinación de la tasa interna de retorno se fundamentó en los flujos monetarios presentados en el apartado 3.7.

Tabla XXXIII. Sistema de protección Celco

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto l	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S1CeAKC 2A	NO	C2	200	0.013	2.60	R-15 (AK)	NO	R-15 (AK)	3	6	4.35	0	4.35	8.70	220.00	228.70	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S2CeAKC 2A	NO	C2	200	0.013	2.60	Gama (AK)	NO	Gama (AK)	3	6	8.70	0	8.70	17.40	220.00	237.40	A(15, 20, 25)	3, 3, 4

El EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXXIV. Sistemas de protección Comex

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto l	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S3CmAKC 2A	NO	C2	200	0.013	2.60	Flash coat (AK)	NO	Flash coat(AK)	3	6	21.42	0	21.42	42.84	220.00	262.84	A(15, 20, 25)	2, 3, 3
S4CmAKC 2A	NO	C2	200	0.013	2.60	Ct-comex-100 total (AK)	NO	Ct-comex-100 total (AK)	3	6	17.08	0	17.08	34.16	220.00	254.16	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S5CmAKC 3A	NO	C3	400	0.013	5.20	Ct-comex-100 total (AK)	NO	Vel-mar (AK)	3	8*	17.07	0	36.00	53.07	220.00	273.07	A(15, 20, 25)	4, 5, 6
S6CmEPP URC4A	NO	C4	650	0.013	8.45	E 10 (EP)	NO	U 50 (PUR)	3	11*	33.20	0	76.32	109.52	220.00	329.52	A(15, 20, 25)	6, 7, 7
S7CmEPP URC5A	NO	C5-M	1 500	0.013	19.5	E 10 (EP)	NO	U 50 (PUR)	3	13*	33.20	0	95.35	128.55	220.00	348.55	A(15, 20, 25)	11, 12, 12

* Sistemas sugeridos por el fabricante; el EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXXV. Sistema de protección Copabase

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S8CoAKC 3B	NO	C3	400	0.013	5.20	SR10 (AK)	NO	SR10 (AK)	3	5*	24.00	0	16.00	40.00	20.00	60.00	B(2, 3, 5)	-66,-46,-23

* Sistema sugerido por el fabricante; el EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXXVI. Sistemas de protección Grupo Solid

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S9GsAKC 2A	NO	C2	200	0.013	2.60	204X (AK)	NO	204X (AK)	3	6	12.9	0	12.9	25.80	220.00	245.80	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S10GsEP C4A	NO	C4	650	0.013	8.45	Mio primer 164 (EP)	NO	Mio primer 164 (EP)	6	11	34.92	0	29.10	64.02	220.00	284.02	A(15, 20, 25)	6, 7, 8
S11GsEP C4A	NO	C4	650	0.013	8.45	TTG 118 (EP)	NO	TTG 118 (EP)	6	11	34.91	0	29.09	64.00	220.00	284.00	A(15, 20, 25)	7, 7, 8
S12GsEP C4A	NO	C4	650	0.013	8.45	Nova-cure 48 (EP)	NO	Nova-cure 48 (EP)	6	11	23.28	0	19.4	42.68	220.00	262.68	A(15, 20, 25)	7, 7, 8
S13GsESI ZnEPC5A	SI	C5-M	1,500	0.013	19.50	TS 152 (ESI, Zn)	NO	TS 152 (ESI, Zn)	2	13*	38.27	0	59.31	97.58	220.00	317.58	A(15, 20, 25)	12, 12, 13
S14GsESI ZnEPPUR C5A	SI	C5-M	1,500	0.013	19.50	TS 152 (ESI, Zn)	219 (EP)	Trans. Gloss (PUR)	2	13* (4,7)	38.27	81.85	53.89	174.01	220.00	394.01	A(15, 20, 25)	10, 11, 11
S15GsEP C5A	SI	C5-M	1,500	0.013	19.50	Master Bond BT (EP)	NO	Master Bond BT (EP)	10	20*	33.93	0	33.93	67.86	220.00	287.86	A(15, 20, 25)	13, 13, 14
S16GsEP C5A	SI	C5-M	1,500	0.013	19.50	Uni-primer (EP)	NO	Uni-primer (EP)	10	20*	74.41	0	74.41	148.82	220.00	368.82	A(15, 20, 25)	10, 11, 12

* Sistemas sugeridos por el fabricante; el EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXXVII. **Sistemas de protección Lanco**

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto l	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S17PIAKC 2A	NO	C2	200	0.013	2.60	Oil Red (AK/PUR)	NO	A. AC (AK)	3	6*	7.45	0	17.45	24.90	220.00	244.90	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S18PIAKC 3A	NO	C3	400	0.013	5.20	Paint-er Plus (AK)	NO	Paint-er Plus (AK)	4	8*	28.21	0	28.21	56.42	220.00	276.42	A(15, 20, 25)	4, 5, 6
S19PIPUR C3A	NO	C3	400	0.013	5.20	MM 093 (PUR)	NO	MM 093 (PUR)	4	8*	21.42	0	21.42	42.84	220.00	262.84	A(15, 20, 25)	5, 5, 6
S20PIAKP URC4B	NO	C4	650	0.013	8.45	SD 900 (AK/PUR)	NO	SD 900 (AK/PUR)	4	8*	19.00	0	19.00	38.00	20.00	58.00	B(2, 3, 5)	-54,-32,-10
S21PIAKP URC4B	NO	C4	650	0.013	8.45	Oil Red (AK/PUR)	NO	SD 463 (AK/PUR)	4	8*	9.93	0	17.26	27.19	20.00	47.19	B(2, 3, 5)	-48,-26,-4

* Sistemas sugeridos por el fabricante; el EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXXVIII. **Sistemas de protección Pintuco**

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto l	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S22PpAK C2A	NO	C2	200	0.013	2.60	ICO Dom. (AK)	NO	ICO Dom. (AK)	3	6*	18.08	0	18.08	36.16	220.00	256.16	A(15, 20, 25)	3, 3, 3
S23PpAK C3A	NO	C3	400	0.013	5.20	Anticorrosiva (AK)	NO	Anticorrosiva (AK)	3	8*	21.76	0	36.27	21.76	220.00	241.76	A(15, 20, 25)	5, 6, 6
S24PpAK C4M	NO	C4	650	0.013	8.45	Corrotec primario (AK)	NO	Fast dry esm. ind. (AK)	3	8	17.32	0	25.45	17.32	20.00	37.32	B(2, 3, 5)	-40,-17, 4
S25PpEP C5A	NO	C5-I	1,500	0.013	19.50	Corro Rust 230/231 (EP)	NO	Corro Epoxy 720/721 (EP)	6	13	187.50	0	181.64	369.14	220.00	589.14	A(15, 20, 25)	7, 8, 8

* Sistemas sugeridos por el fabricante; el EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XXXIX. **Sistemas de protección Sur Color**

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto l	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S26PsPU REPC3A	NO	C3	400	0.013	5.20	87055 (EP)	NO	87075 (PUR)	3	8*	18.08	0	47.25	65.33	220.00	285.33	A(15, 20, 25)	4, 5, 5
S27PsEP C3A	NO	C3	400	0.013	5.20	87055 (EP)	87061 (EP)	87075 (PUR)	3	8	18.08	21.05	23.63	62.76	220.00	282.76	A(15, 20, 25)	3, 5, 7
S28PsAY C3A	NO	C3	400	0.013	5.20	83053 (AY)	NO	83053 (AY)	3	6*	14.85	0	24.76	14.85	220.00	234.85	A(15, 20, 25)	5, 6, 6
S29PsEP C4A	NO	C4	650	0.013	8.45	86184 (EP)	NO	86184 (EP)	5,5	11*	54.48	0	54.48	108.96	220.00	328.96	A(15, 20, 25)	6, 7, 7
S30PsPU RZnC5A	NO	C5-I	1,500	0.013	19.50	84054 (PUR Zn)	NO	84054 (PUR Zn)	2	13*	19.20	0	105.54	19.20	220.00	239.20	A(15, 20, 25)	15, 15, 16
S31PsEP C5A	NO	C5-I	1,500	0.013	19.50	86171 (EP)	NO	86171 (EP)	3	13*	14.96	0	49.85	64.81	220.00	284.81	A(15, 20, 25)	13, 14, 14
S32PsPU RESIC5A	SI	C5-M	1,500	0.013	19.50	85051 (ESI Zn)	NO	81073 (PUR)	2	13*	10.45	0	64.46	74.91	220.00	294.91	A(15, 20, 25)	12, 13, 13
S33PsPU RESIC5A	SI	C5-M	1,500	0.013	19.50	85051 (ESI Zn)	NO	81071 (PUR)	2	13*	10.45	0	63.6	74.05	220.00	294.05	A(15, 20, 25)	12, 13, 14
S34PsPU RIM2M	NO	IM-2 ^{oo}	5,500	0.013	71.50	81172 (PUR)	NO	NO	16	16	155.15	0	0	155.15	220.00	375.15	M(5, 10, 15)	-2, 26, 28

* Sistemas sugeridos por el fabricante; el EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX.

^{oo} La norma no especifica la pérdida. Se tomó el valor del nivel CX.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XL. **Sistemas de protección Sherwin Williams**

Sistema	ISO	Nivel	Pérdida máxima de acero en g/m ² al año	Valor en Q/g	Valor total de pérdida de acero en Q/m ² al año	P (ligante)	I (ligante)	A (ligante)	EPS P mils	EPS sistema mils	Q/m ² valor neto p	Q/m ² valor neto l	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Vida útil Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S35S ^{swAK} C2A	NO	C2	200	0.013	2.60	2000 Estructural (AK)	NO	Kem Faster dry HS (AK)	3	6*	8.10	0	11.22	19.32	220.00	239.32	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S36S ^{swAK} C3A	NO	C3	400	0.013		Kem Direct to metal (AK)	NO	Kem Direct to metal (AK)	3	8*	10.60	0	17.67	28.27	220.00	248.27	A(15, 20, 25)	5, 6, 6
S37S ^{swAY} C3A	NO	C3	400	0.013	5.20	Kem Direct to metal (AY)	NO	Kem Direct to metal (AY)	3	8*	16.62	0	27.70	44.32	220.00	264.32	A(15, 20, 25)	5, 5, 6
S38S ^{swAK} C4B	NO	C4	650	0.013	8.45	6000 Rus-top (AK)	NO	Kem Faster dry HS (AK)	3	8	10.12	0	18.70	28.82	20.00	48.82	B(2, 3, 5)	-49,-27,-5
S39S ^{swAY} AKC.4M	NO	C4	650	0.013	8.45	Kro-mik Universal (AK)	NO	Kem Direct to metal (AY)	3	9*	18.78	0	33.23	52.01	220.00	272.01	M(5, 10, 15)	-41, 5, 7
S40S ^{swEP} C5A	NO	C5-I	1,500	0.013	19.50	Kem cati coat (EP)	NO	Kem cati coat (EP)	3	13*	24.87	0	82.91	107.78	220.00	327.78	A(15, 20, 25)	11, 12, 13

* Sistemas sugeridos por el fabricante; el EPS corresponde a la especificación de corrosividad en las tablas XVI a XX.

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.4. Protección anticorrosiva por nivel de corrosividad

Las tablas de la XXXIII a la XL se constituye la información en las siguientes, tomando como referencia el nivel de corrosividad.

Los sistemas se presentan a partir del costo menor; al pie de la tabla se incluye la media del costo total por metro cuadrado, así como la desviación típica y el coeficiente de variación de pearson correspondiente.

Tabla XLI. Nivel de corrosividad C2

Sistema	P ligante	I ligante	A ligante	EPS P mils	EPS Sistema mils	solvente	Q/m ² valor neto P	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplica- ción	Q/m ² valor neto TOTAL	Durabilidad Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S1CeAKC2A	R-15(AK)	NO	R-15(AK)	3	6	BS	4.35	0	4.35	8.70	220.00	228.70	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S2CeAKC2A	Gama (AK)	NO	Gama (AK)	3	6	BS	8.70	0	8.70	17.40	220.00	237.40	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S35SvAKC2A	2000 Estructural (AK)	NO	Kem Faster dry HS (AK)	3	6*	BS	8.10	0	11.22	19.32	220.00	239.32	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S17PIAKC2A	OIL RED (AK/PUR)	NO	Anticorrosi vo AC(AK)	3	6*	BS	7.45	0	17.45	24.90	220.00	244.90	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S9GsAKC2A	204X(AK)	NO	204X(AK)	3	6	BS	12.9	0	12.9	25.80	220.00	245.80	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S4CmAKC2A	ct-comex- 100 TOTAL(AK)	NO	100 TOTAL(AK)	3	6	BS	17.08	0	17.08	34.16	220.00	254.16	A(15, 20, 25)	3, 3, 4
S22PpAKC2A	IC O DOMES- TICO(AK)	NO	IC O doméstico (AK)	3	6*	BS	18.08	0	18.08	36.16	220.00	256.16	A(15, 20, 25)	3, 3, 3
S3CmAKC2A	FLASH COAT(AK)	NO	Flash coat(AK)	3	6	BS	21.42	0	21.42	42.84	220.00	262.84	A(15, 20, 25)	2, 3, 3
DURABILIDAD A														
χ												=	246.16	
σ												=	10.44	
r												=	0.042	

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XLII. Nivel de corrosividad C3

Sistema	P ligante	I ligante	A ligante	EPS P mils	EPS Sistema mils	solvente	Q/m ² valor neto P	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplica- ción	Q/m ² valor neto	Durabilidad Alta, Media, Baja (años)	TIR %	
S8CoAKC3B	SR10(AK)	NO	SR10(AK)	3	5*	BS	24.00	0	16.00	40.00	20.00	60.00	B(2, 3, 5)	-66,-46,-23	
S28PsAYC3A	83053 (AY)	NO	83053 (AY)	3	6*	BS	14.85	0	24.76	14.85	220.00	234.85	A(15, 20, 25)	5, 6, 6	
S23PpAKC3A	Anticomóiva (AK)	NO	Anticomóiva (AK)	3	8*	BS	21.76	0	36.27	21.76	220.00	241.76	A(15, 20, 25)	5, 6, 6	
S36SvAKC3A	Kem direct to metal (AK)	NO	Kem direct to metal (AK)	3	8*	BS	10.60	0	17.67	28.27	220.00	248.27	A(15, 20, 25)	5, 6, 6	
S19PIPURC3A	MM093 (PUR)	NO	MM093 (PUR)	4	8*	BS	21.42	0	21.42	42.84	220.00	262.84	A(15, 20, 25)	5, 5, 6	
S37SvAYC3A	Kem direct to metal (AY)	NO	Kem direct to metal (AY)	3	8*	BA	16.62	0	27.70	44.32	220.00	264.32	A(15, 20, 25)	5, 5, 6	
S5CmAKC3A	Cl-comex-100 TOTAL(AK)	NO	Velmar (AK)	3	8*	BS	17.07	0	36.00	53.07	220.00	273.07	A(15, 20, 25)	4, 5, 6	
S18PIAKC3A	Painter plus(AK)	NO	Painter plus(AK)	4	8*	BS	28.21	0	28.21	56.42	220.00	276.42	A(15, 20, 25)	4, 5, 6	
S27PsePC3A	87055 (EP)	87061 (EP)	87075 (PUR)	3	8	BA	18.08	21.05	23.63	62.76	220.00	282.76	A(15, 20, 25)	3, 5, 7	
S26PsePUREP C3A	87055 (EP)	NO	87075 (PUR)	3	8*	BA	18.08	0	47.25	65.33	220.00	285.33	A(15, 20, 25)	4, 5, 5	
DURABILIDAD A															
													X̄	=	263.29
													σ	=	17.10
													r	=	0.065

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XLIII. Nivel de corrosividad C4

Sistema	P ligante	I ligante	A ligante	EPS P mils	EPS Sistema mils	solvente	Q/m ² valor neto P	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplica- ción	Q/m ² valor neto	Durabilidad Alta, Media, Baja (años)	TIR %	
S24PpAKC4M	Corotec primario (AK)	NO	Fast dry esm. ind. (AK)	3	8	BS	17.32	0	25.45	17.32	20.00	37.32	B(2, 3, 5)	-40,-17, 4	
S21PIAKPURC 4B	Oil red (AK/PUR)	NO	SD 463 (AK/PUR)	4	8*	BS	9.93	0	17.26	27.19	20.00	47.19	B(2, 3, 5)	-48,-26,-4	
S38S wAKC4B	6000 Rustop (AK)	NO	Kem Faster dryHS (AK)	3	8	BS	10.12	0	18.70	28.82	20.00	48.82	B(2, 3, 5)	-49,-27,-5	
S20PIAKPURC 4B	SD 900 (AK/PUR)	NO	SD900 (AK/PUR)	4	8*	BS	19.00	0	19.00	38.00	20.00	58.00	B(2, 3, 5)	-54,-32,-10	
S12GsEPC4A	Novacure 48(EP)	NO	Novacure 48(EP)	6	11	BS	23.28	0	19.4	42.68	220.00	262.68	A(15, 20, 25)	7, 7, 8	
S38SwAYAKC4M	Kramik universal (AK)	NO	Kem direct to metal (AY)	3	9*	BS/BA	18.78	0	33.23	52.01	220.00	272.01	M(5, 10, 15)	-41, 5, 7	
S11GsEPC4A	TTG 118 (EP)	NO	TTG 118 (EP)	6	11	BS	34.91	0	29.09	64.00	220.00	284.00	A(15, 20, 25)	7, 7, 8	
S10GsEPC4A	MIO primer 164(EP)	NO	MIO primer 164(EP)	6	11	BS	34.92	0	29.10	64.02	220.00	284.02	A(15, 20, 25)	6, 7, 8	
S29PsePC4A	86184 (EP)	NO	86184 (EP)	5,5	11*	BS	54.48	0	54.48	108.96	220.00	328.96	A(15, 20, 25)	6, 7, 7	
S8cmEPPURC4A	E 10(EP)	NO	U 50(PUR)	3	11*	BS	33.20	0	76.32	109.52	220.00	329.52	A(15, 20, 25)	6, 7, 7	
DURABILIDAD A; B															
													X̄	=	297.84; 51.34
													σ	=	26.81; 4.76
													r	=	0.090; 0.093

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XLIV. Nivel de corrosividad C5-I

Sistema	P ligante	I ligante	A ligante	EPS P mils	EPS Sistema mils	solvente	Q/m ² valor neto P	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplica- ción	Q/m ² valor neto	Durabilidad Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S30P _s PURZnC 5A	84054 (PUR Zn)	NO	84054 (PUR Zn)	2	13*	BS	19.20	0	105.54	19.20	220.00	239.20	A(15, 20, 25)	15, 15, 16
S31P _s EPc5A	86171 (EP)	NO	86171 (EP)	3	13*	BS	14.96	0	49.85	64.81	220.00	284.81	A(15, 20, 25)	13, 14, 14
S40S _v EPc5A	Kem cati coat (EP)	NO	Kem cati coat (EP)	3	13*	BS	24.87	0	82.91	107.78	220.00	327.78	A(15, 20, 25)	11, 12, 13
S25P _p EPc5A	Como Rust 230/231(EP)	NO	Como epoxy 720/721(EP)	6	13	BS	187.50	0	181.64	369.14	220.00	589.14	A(15, 20, 25)	7, 8, 8
DURABILIDAD A														
												X̄	=	360.23
												σ	=	135.82
												r	=	0.38

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XLV. Nivel de corrosividad C5-M

Sistema	P ligante	I ligante	A ligante	EPS P mils	EPS Sistema mils	solvente	Q/m ² valor neto P	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto	Durabilidad Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S15GsEPC5A	Master bond BT(EP)	NO	Masterbond BT(EP)	10	20*	BS	33.93	0	33.93	67.86	220.00	287.86	A(15, 20, 25)	13, 13, 14
S33PsPURESI C5A	85051 (ESI Zn)	NO	81071 (PUR)	2	13*	BS	10.45	0	63.6	74.05	220.00	294.05	A(15, 20, 25)	12, 13, 14
S32PsPURESI C5A	85051 (ESI Zn)	NO	81073 (PUR)	2	13*	BS	10.45	0	64.46	74.91	220.00	294.91	A(15, 20, 25)	12, 13, 13
S13GsE SIZnEP C5A	TS152 (ESI Zn)	NO	TB216 (EP)	2	13*	BS	38.27	0	59.31	97.58	220.00	317.58	A(15, 20, 25)	12, 12, 13
S7CmEPPURC5A	E 10(EP)	NO	U 50(PUR)	3	13*	BS	33.20	0	95.35	128.55	220.00	348.55	A(15, 20, 25)	11, 12, 12
S16GsEPC5A	Uniprimer (EP)	NO	Uniprimer (EP)	10	20*	BS	74.41	0	74.41	148.82	220.00	368.82	A(15, 20, 25)	10, 11, 12
S14GsE SIZnEP PURC5A	TS152 (ESI Zn)	219(EP)	Trans. glos(PUR)	2	13* (4,7)	BS	38.27	81.85	53.89	174.01	220.00	394.01	A(15, 20, 25)	10, 11, 11
DURABILIDAD A														
												X̄	=	329.4
												σ	=	38.54
												r	=	0.12

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla XLVI. Nivel de corrosividad IM-2

Sistema	P ligante	I ligante	A ligante	EPS P mils	EPS Sistema mils	solvente	Q/m ² valor neto P	Q/m ² valor neto I	Q/m ² valor neto A	Q/m ² valor sistema	Q/m ² aplicación	Q/m ² valor neto TOTAL	Durabilidad Alta, Media, Baja (años)	TIR %
S34PsPURIM2 M	81172 (PUR)	NO	NO	16	16	BS	155.15	0	0	155.15	220.00	375.15	M(5, 10, 15)	-2, 26, 28

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.5. Guía de selección de recubrimientos

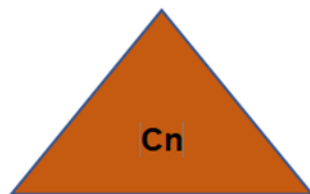
Los resultados del análisis de las hojas técnicas de cada producto y su combinación, para integrar sistemas de protección anticorrosiva, según el nivel

de corrosividad, han permitido estructurar una guía de selección, usando los criterios de la norma ISO 12944.

4.5.1. Clasifique el ambiente corrosivo

- De los niveles de corrosividad que se establecen en la tabla X, en Guatemala se tienen opciones de protección para C2, que incluye C1, C3, C4, C5-I, C5-M, IM-2.
- Dentro de una instalación los niveles de corrosividad pueden ser diferentes, por ejemplo, área de calderas, bodegas de almacenamiento, áreas interiores, áreas exteriores y las demás.
- Identifique los activos y áreas por nivel de corrosividad. Se propone el esquema de la figura 40. La forma triangular es porque la base representa el acero, un lado la humedad y el otro los agentes químicos como sulfuros y cloruros; el color marrón indica la formación de óxido y Cn el nivel de corrosividad correspondiente.

Figura 40. **Propuesta para la identificación del nivel de corrosividad**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

- Coloque una placa previamente pesada, del mismo tipo de acero a proteger sin recubrimiento alguno con el registro de fecha y por lo menos, una vez al año determine el peso; la diferencia le indicará la pérdida real

de material por unidad de superficie. Si hay más de una clasificación corrosiva utilice las placas necesarias. Esto se conoce como placa testigo.

4.5.2. Preparación de superficie (referencia de la norma ISO-12944-4)

- El estado de la superficie a proteger es fundamental antes de decidir aplicar cualquier recubrimiento; si la superficie no es tratada adecuadamente, lo que se ponga encima va a fracasar.
- La tabla XIII clasifica el estado del acero inicial en categorías A, B, C, D y la tabla XIV establece los grados de preparación de superficie en función del estado inicial.
- Los grados de preparación de superficie generalmente se presentan con normas SSPC; en la tabla XV se tienen las equivalencias con ISO.
- En las hojas técnicas se establece la preparación de superficie recomendada por producto, que debe compararse con la norma Sa 2 ½ que es la que la norma propone para todos los niveles de corrosividad. A mayor grado de preparación de superficie mayor éxito del revestimiento aplicado en protección y en durabilidad.
- Dentro del sistema que revestirá al acero, el grado de preparación de superficie corresponde al primario, que es el que estará en contacto directo con el metal.

4.5.3. Durabilidad requerida, según la norma ISO 12944-1

La durabilidad puede establecerse en función de la asignación de la tabla IX.

Su consideración dependerá del costo de aplicación del sistema y el hecho de que la ley de depreciación puede considerarse si el sistema es un revestimiento con mejora permanente de manera que una durabilidad alta es recomendable.

4.5.4. Sistema de recubrimiento protectores según la norma ISO 12944-5

- En función del nivel de corrosividad determinar los sistemas posibles, indicados en las tablas de la XXXIII a XL de la sección 4.4. Para un nivel C2, que incluye C1, se tienen 8 opciones con ligantes alquídicos, todos con durabilidad alta.
- En C3, 10 sistemas con 5 alquídicos, 2 acrílicos y 3 poliuretanos, dentro de los que, 3 son solubles en agua y un sistema es de durabilidad baja, según las indicaciones del fabricante.
- Para C4 también se han conformado 10 opciones con alquídicos y poliuretanos; dentro de estas, el uso de alquídicos es limitado por tener durabilidades bajas; los acrílicos tienen una vida media y los epóxicos y poliuretanos con durabilidad alta.
- En los niveles C5, tanto industrial como marino, los sistemas C5-M son más económicos; especifican directamente la norma ISO 12944 y ambos, suman 11 variedades dentro de las que los 6 son epóxicos, y 5 poliuretanos con primarios de etilsilicato.

- Para el nivel IM-2, dadas las condiciones, es posible la protección en una durabilidad media con un sistema poliuretánico.
- Si la hoja técnica no indica el nivel de corrosividad específicamente, bajo la norma ISO, la descripción de las propiedades del ligante sirve de orientación; en todo caso, es conveniente consultar al proveedor datos específicos y que certifique que las propiedades indicadas corresponden al nivel de corrosividad que puede proteger. En términos generales, las propiedades de resistencia de los ligantes se presentan en la tabla XXI, aunque debe recordarse que las modificaciones en las estructuras químicas son muy amplias.
- Las hojas técnicas recomiendan espesores de película que deben compararse con los que la norma sugiere. En caso de mucha discrepancia, debe consultarse con el proveedor para utilizar la referencia de la norma.
- Si son combinaciones de ligantes, las hojas técnicas deben indicar si hay compatibilidad y anclaje de uno hacia otro.
- De ser posible, utilizar sistemas base agua por los niveles de COV en las categorías de corrosividad permisibles.
- El costo de inversión del sistema debe estar en valor monetario por unidad de superficie. En el caso de tuberías muchas veces se emplea por unidad de longitud, pero con la geometría puede hacerse la transformación a área.
- La distribución del costo debe ser claramente especificada en preparación de superficie y aplicación de los recubrimientos; estos deben estar clasificados en primarios, intermedios y capas finales con sus espesores correspondientes.
- Es conveniente poder verificar los rendimientos con base al porcentaje de sólidos en volumen y la relación matemática de la ecuación E.8.
- La diferencia en la estimación de la durabilidad puede ser una o dos milésimas de espesor de película seca, normalmente del acabado. Verificar el incremento de costo para considerar el beneficio en el tiempo

de vida útil y considerar el sistema de protección como mejora permanente para tener el beneficio de la depreciación.

- Considerar la tasa interna de retorno permite tener un criterio de selección. A mayor tasa, menor costo de aplicación por unidad de superficie.
- Registrar la forma de aplicación, los tiempos de esta, los tiempos de secado, además de las normas generales de seguridad que deben ser conciliadas entre aplicador y contratante.

4.5.5. Ejecución y control del proceso de revestimiento según la norma ISO 12944-7

- Aplicar un sistema de protección anticorrosiva implica una serie de pasos claramente diferenciados. No se puede pasar al siguiente si el anterior no satisface el estándar establecido.
- Los equipos y normas de seguridad que preserven la vida de las personas, de los activos y, de la mejor manera, el medio ambiente, por lo que deben cumplirse a cabalidad. Las hojas técnicas incluyen hojas con la información de seguridad de cada producto.
- La preparación de la superficie debe satisfacer el requerimiento de la norma o bien, una preparación menor, si el primario se adherirá satisfactoriamente y la durabilidad no será afectada.
- Utilizar un formato sencillo, funcional y claro de los pasos requeridos, los datos cuantificables y los tiempos de ejecución. Este formato debe ser parte de la bitácora de proyecto de revestido anticorrosivo del activo.
- Es recomendable el diseño de las hojas técnicas de los recubrimientos a utilizar, que reúnan los datos necesarios para futuras referencias.
- El contratista debe tener los instrumentos necesarios para medir los parámetros como película seca, adherencia, microporos, brillo y dureza.

- El proyecto finalizado debe ser monitoreado periódicamente para trabajos de limpieza, mantenimiento o reparación, si fuera el caso.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla XXVII se consignaron las empresas fabricantes e importadoras de pinturas y recubrimientos en Guatemala; se totalizaron 15 compañías, de las que el 67 % es fabricante y el 33 % es importadora, como se muestra en la figura 36. Al revisar los productos específicos de cada una de ellas, 2 empresas no fabrican ni distribuyen productos anticorrosivos, como lo es Pindegua, que se concentra en el mercado automotriz y Kendall, cuyo mercado de atención es el arquitectónico. Duwest, por proceso de cambio de propietarios no tuvo sus hojas técnicas actualizadas al momento de realizar esta investigación, por lo que los productos anticorrosivos a revisar se redujeron a 12 empresas.

5.1. Proveedores de anticorrosivos en Guatemala

Con la revisión de las hojas técnicas de las 12 compañías se obtuvieron 92 hojas técnicas, de las que en el caso de Primium hubo un producto del que no especifica el tipo de ligante, de igual forma que en Quindeca y en ambos casos los pocos datos que publican no hacen posible su consideración para sistemas de protección anticorrosiva. El polisiloxano de Sur Color no se incluye dentro de la norma por lo que, si bien se menciona no se integró sistema.

5.2. Recubrimientos anticorrosivos solubles en agua

Dentro de la consideración de preservación ambiental, los productos solubles en agua para la protección anticorrosiva son muy pocos, pues totalizan 10, como lo muestra la Figura 39 y esto equivale al 11 %. Los niveles de protección

contra la corrosión son C3 y C4 como máximo y se incluyen copolímeros acrílicos, epóxicos y poliuretanos.

Mientras no se exijan regulaciones ambientales, el mercado de los solventes orgánicos tendrá dominio en su utilización, a pesar de que el rango de compuestos orgánicos volátiles en solubilidad al agua es mucho menor.

5.3. Utilización de la norma ISO 12944

Con las hojas técnicas de las 12 empresas, que totalizaron 92, solo 2 de ellas, Grupo Solid y Sur Color hacen referencia a la norma ISO 12944 en el nivel de corrosividad C5-M.

Grupo Solid ofrece 19 recubrimientos de los que solo 7, hacen uso de ella.

Sur Color tiene 31 recubrimientos y de los que únicamente 4 la utilizan.

De lo anterior, se deduce que el uso de ISO 12944 aún no es un tema de interés por parte de los oferentes; de hecho, en conversaciones sostenidas con algunos representantes, ni siquiera la conocen y, en consecuencia, los usuarios, probablemente mucho menos.

5.4. Sistemas de protección anticorrosiva

La integración de los 40 sistemas para los diferentes niveles de corrosividad, al realizarla, bajo especificación de la norma, sugerencia del fabricante y combinación de propiedades de ligantes, implica que la formación de estos es mucho mayor; sin embargo, con esta cantidad se cubren todos los

niveles corrosivos, desde C2, que incluye C1, hasta C5-M, con más de un sistema, exceptuando el IM-2 y por diferente empresa para cada nivel.

Las durabilidades de los sistemas se establecieron en función de la capacidad de resistencia de los ligantes a los agentes corrosivos y esta se cuantificó en vida útil por medio de los espesores de película seca, es decir, que la velocidad de degradación del polímero o polímeros aplicados puede mantenerse constante, pero el grosor determina su duración. Bajo esta consideración, los sistemas se integraron con la vida útil más alta, según lo establecen los valores de la norma, salvo casos particulares como en el nivel C3 y C4 en los que los alquídicos y acrílicos tienen limitaciones según lo establece la misma norma.

El nivel IM-2, por su severidad y el tipo de sistema integrado, no permite una durabilidad más allá de la consideración media.

Para una vida útil no mayor de 5 años, no se aplicó el costo de preparación de superficie tipo Sa 2 ½ ya que financieramente es un valor alto que no se compensa en el tiempo. Hay costos por probabilidad de fugas, paros, contaminaciones o accidentes que no es posible cuantificarlos, pero que sin duda alguna hacen que cualquier costo de protección anticorrosiva sea siempre una inversión.

La determinación de las tasas internas de retorno tomó en consideración la depreciación para durabilidades a partir de los 10 años. El fundamento radica en el hecho de que la protección anticorrosiva no es un trabajo de pintura; es un trabajo de revestimiento protector a base de polímeros en estado líquido con composiciones de especies químicas dispersas que protegen al acero y que permiten una mejora permanente del activo. El artículo 17 de la ley de

depreciación hace referencia al concepto de mejora permanente y los porcentajes aplicables en cada año, se indican en el artículo 19, inciso “g” que establece un 10 % para los bienes (Decreto 26-92, 1992)

5.4.1. Nivel C-2

Los sistemas adecuados en este nivel y que incluye el nivel C1, son revestimientos alquídicos. Estos ligantes son los más utilizados, pues dadas las condiciones corrosivas, que establecen bajos niveles de contaminación y alguna forma de condensación, como en los gimnasios, además de ambientes rurales, permiten que con el espesor de 6 milésimas de pulgada se obtenga una vida útil alta cuya menor duración debe ser de 15 años.

Como proyecto de inversión en protección anticorrosiva, las tasas internas de retorno están entre 2 % y 4 %, valor que es razonable al observar que la pérdida de material corroído es de 200 gramos por año.

La tabla XLI establece que la media de costo es de Q. 246,16 con una desviación típica de 10.44 y su coeficiente de variación es 4,2 %, por lo que cualquier empresa oferente de este tipo de productos puede satisfacer adecuadamente la protección requerida.

5.4.2. Nivel C-3

El nivel C3 se considera medio; asocia la presencia de dióxido de azufre, alguna salinidad, ambientes urbanos e industriales como plantas de cerveza, lácteos y lavanderías; genera material corroído a razón de 400 gramos por año.

Los sistemas resultantes para esta categoría no corresponden a un solo tipo de ligante. Los alquídicos son aplicables siempre que su espesor sea de 8 mils para una durabilidad alta; si el espesor es de 5 mils, la vida útil se considera baja y no puede considerarse una inversión sino un gasto de mantenimiento. Esto no significa que no proteja, sino que el costo de protección es alto.

Un espesor 6 mils corresponde a ligantes acrílicos y es prácticamente equivalente a un alquídico, salvo por el espesor final y el costo de aplicación.

Sistemas epóxico-poliuretano son aplicables en este nivel y la decisión de utilizarlos es más por razones de costo que por calidad de protección. En la tabla XLII se muestra que sus valores financieros son los más altos; sin embargo, la media es de Q. 263,29 con una desviación estándar de 17,10 y un coeficiente de variación del 6,5 % lo que indica una baja dispersión de costos de aplicación.

Las tasas internas de retorno son casi constantes en la durabilidad alta en cualquier tipo de ligante. En la durabilidad baja, como es el caso del sistema S8CoAKC3B, las tasas son totalmente negativas y es razonable, si se toma en cuenta que no puede depreciarse derivado de que su vida útil máxima es de 5 años.

5.4.3. Nivel C-4

El ambiente corrosivo C4 se considera alto y las condiciones de humedad como la de áreas de costa, zonas industriales de procesamiento químico y presencia de salinidad, son factores que generan pérdidas de acero por corrosión hasta de 650 gramos por año.

Los sistemas alquídicos, aunque tengan espesores de 8 mils, su velocidad de degradación va a ser mayor que en un ambiente C3 y como consecuencia, aunque pueden utilizarse, sus durabilidades van a ser bajas. Puede mejorarse la vida útil haciendo una combinación con acrílicos; sin embargo, la durabilidad será en extremo de 15 años. Las tasas internas de retorno son negativas, lo que implica que no pueden considerarse como inversiones.

Los sistemas epóxicos y combinaciones de estos con poliuretanos, con espesores de película de 11 mils permiten tener protecciones entre los 15 y 25 años. Las tasas internas de retorno son favorables para estos sistemas y dado que las pérdidas por material corroído son mayores, los porcentajes también aumentan, pues se ubican entre el 6 % y 8 % como se muestra en la tabla XLIII.

En los sistemas de durabilidad baja la preparación de superficie no consideró el grado Sa 2 ½, pues dado el tiempo en que debe reponerse este revestimiento, el costo es demasiado alto. La media de costo es de Q. 51,34, su desviación típica es 4,76 y su coeficiente de variación del 9,3 % lo que establece una variabilidad muy baja.

En la durabilidad alta si es aplicable la preparación de superficie de la norma; la media es de Q. 297,84, una desviación típica de 26,81 y un coeficiente de variación del 9 %.

5.4.4. Nivel C5-I

En esta categoría la alta humedad y presencia de derivados de azufre y iones cloruro es manifiesta; se considera muy alta dentro del sector industrial de manera que las pérdidas de acero ya son hasta de 1 500 gramos.

El uso de alquídicos no es recomendable, lo que puede verificarse en la tabla XLIV. Los ligantes epóxicos, poliuretanos y sus combinaciones en espesores de película de 13 mils, permiten tener durabilidades altas. Es aconsejable la utilización de recubrimientos ricos en zinc, como pigmento, que funciona como ánodo de sacrificio. En la Tabla XLIV se presentan los 4 sistemas posibles con durabilidad alta y es necesario un sistema de 13 mils de espesor para garantizar una buena barrera de protección con ligantes epóxicos y poliuretanos.

Las tasas internas de retorno pueden ser hasta del 15 %. El sistema S25PpEPC5A genera valores porcentuales menores debido a su costo de aplicación y esto hace que la media sea de Q. 360,23 con una desviación estándar de Q. 135,82 y el coeficiente de variación, dada la condición de costo del sistema indicado, muestra una alta variabilidad del 38 %.

5.4.5. Nivel C5-M

Esta categoría es similar a la C5-I; la pérdida máxima que la norma indica es la misma, es decir, 1 500 gramos por año y la diferencia es el hecho de existir zonas industriales muy cerca del mar y embarcaciones.

La aplicabilidad de la norma ISO 12944 se especifica en esta categoría con excepción del sistema S7CmEPPURC5A de Cómex. Los ligantes, además de los epóxicos y poliuretanos, adicionan el uso de primarios con Etilsilicato como ligante, que siempre está formulado con pigmentaciones de zinc y que en base a su mecanismo de formación de película, se convierte en inorgánica con buen anclaje para los recubrimientos siguientes.

Siendo una categoría corrosiva sumamente agresiva, los espesores de película seca son de 13 mils, al igual que en el nivel C5-I y los parámetros estadísticos indican una media de Q. 329,40 que es menor que la de C5-I; la desviación típica es mucho más baja, que se confirma con el coeficiente de variación que es del 12 % por lo que tiene baja variabilidad.

Las tasas internas de retorno, como consecuencia de la pérdida de material corrido, que establece la norma son similares a las de C5-I, entre 10 % y 14 %.

5.4.6. Nivel IM-2

Esta categoría, que implica estructuras sumergidas en agua salada, tiene una corrosividad en extremo fuerte; sin embargo, la norma no establece la pérdida anual en gramos por año, de manera que para efectos de análisis se utilizó el valor de la categoría CX, de 5,500 g/año, que corresponde a estructuras en altamar como pozos de perforación.

Dado que es sumamente específica esta condición, en el mercado nacional, únicamente Sur Color presenta una opción, que es la que se indica en la tabla XLVI con un sistema a base de poliuretano y por las propiedades de resistencia de este ligante, la durabilidad máxima es media, de forma que las tasas internas de retorno son superiores al 25 % a partir de los 10 años de vida útil.

5.5. Guía de selección de recubrimientos

La guía, desarrollada en la sección 4.5 se fundamentó en los conceptos generales de la norma ISO 12944. No incluye ninguna referencia de sistema en

particular, puesto que es el responsable del activo, libre de elegir el proveedor que desee, aunque lo conveniente es evaluar más de una alternativa.

Lo importante de aplicar la guía es el hecho de que la protección anticorrosiva del acero es una operación que requiere principios de ingeniería y como tal, debe satisfacer requisitos técnicos y económicos ya que constituye un proceso de revestimiento, lejos de considerarse un trabajo de pintado de metales.

CONCLUSIONES

1. Se propuso una guía para la selección de sistemas de protección anticorrosiva para el acero bajo las consideraciones de la norma ISO 12944 con recubrimientos del mercado nacional, a través de la información de 89 hojas técnicas, integrados en 40 sistemas, para condiciones corrosivas C2, C3, C4, C5-I, C5-M e IM-2 y se evaluó financieramente cada uno de ellos; se determinó que el revestido de un activo es una inversión, al considerar el costo de estos con el valor del material no corroído y la depreciación, siempre que la durabilidad sea igual o mayor a 10 años hasta el tiempo máximo permisible que la norma establece en 25 años.
2. Se comprendió los mecanismos de la corrosión del hierro en el acero, al haber revisado, teóricamente, los aspectos físicos como un daño uniforme o localizado; reacciones electroquímicas como un proceso de oxidación y reducción, en el que el acero constituye un sistema termodinámico inestable y el hierro busca, de forma natural, un estado combinado como óxido con un nivel de energía mínimo para cuya cinética no presenta un esquema generalizado, por lo que el método de la placa testigo, indicado en la guía es práctico y sencillo de implementar.
3. Se revisó las consecuencias económicas, de productividad, contaminación y seguridad que la corrosión provoca al no controlar su desarrollo y permitió establecer que las pérdidas económicas pueden ser del orden del 3 % en relación al PIB, pues al no tener referentes locales, se aplicó los informes internacionales como el informe Hoar y de NACE.

Este porcentaje no incluye daños por disminución de productividad, aumento de contaminación o generación de accidentes. Los sistemas disponibles con bajos niveles de contaminación al ser aplicados, únicamente constituyen el 11 % de la disponibilidad total en ambientes moderados. Para ambientes severos a partir de C5 las emisiones pueden ser hasta de 604 gramos por litro.

4. El conocimiento de la norma ISO 12944, con sus 10 divisiones, como un estándar internacional para la protección del acero en contra de la corrosión a través de recubrimientos, permitió determinar que, de los productos del mercado nacional, el 12 % hacen referencia directa y el 88 % no, pero que puede establecerse su capacidad de protección, por semejanza, en la descripción de las características de desempeño en los diferentes ambientes corrosivos, lo que implica que no es un referente de uso generalizado.
5. Se determinó, a través del estudio de las hojas técnicas de los recubrimientos anticorrosivos del mercado guatemalteco, las características de protección contra la corrosión y resistencia a las acciones del medio ambiente en que se desempeñe, asociadas a las normas ISO 12944, conformando 40 sistemas, que no son los únicos, pero si representativos y de los que, se distribuyeron en ambientes C2, que incluye el C1, C3, C4, C5-I, C5-M e IM-2 con ligantes alquídicos, acrílicos, epóxicos, poliuretanos y etilsilicato, disponibles en Guatemala, tabulados en las tablas de la XXXIII a la XL.
6. Se caracterizó a los 40 sistemas de protección anticorrosiva como inversiones en la preservación de activos, a través del cálculo de la tasa interna de retorno, tomando en consideración los costos de los sistemas

aplicados como inversión y como flujos netos de efectivo, el costo por unidad área al año no corroída, y la depreciación durante la vida útil de dichos sistemas. Se determinó que, independiente del nivel corrosivo en que trabajen, serán inversiones recuperables siempre que la vida útil sea en un rango de 10 a 25 años.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar la guía de selección de recubrimientos para el control de la corrosión basado en la norma ISO 12944 como referente, para el revestido de acero como material principal en los activos de uso doméstico, comercial, industrial y marino y tener la opción de recuperar el costo de inversión a través de una durabilidad superior a los 10 años.
2. Promover el estudio de los mecanismos de la corrosión del hierro, pues debe ser un campo más profundo en la Facultad de Ingeniería y en especial, en la Escuela de Ingeniería Química. La corrosión es un proceso que está presente en todas las industrias, en todos los lugares y en todo momento; debe entenderse como una operación y proceso unitario al considerar los cambios físicos y químicos que ocurren.
3. Evaluar la estimación de las consecuencias económicas, de productividad, contaminación y seguridad que la corrosión provoca al no controlar su desarrollo debe ser emanada por instituciones públicas o privadas, como la gremial de fabricantes de pintura, adscrita a la Cámara de Industria, además de promover y concientizar sobre el uso de productos de bajas emisiones en compuestos orgánicos volátiles.
4. Solicitar, a través de instituciones adecuadas, tanto públicas como privadas, las actualizaciones de las hojas técnicas de los productos disponibles en Guatemala con las empresas fabricantes e importadoras, para referenciar los recubrimientos disponibles hacia la norma ISO 12944.

5. Promover la protección anticorrosiva en los diferentes ambientes que la norma establece, a través de la utilización de sistemas de recubrimientos, como materiales para el revestido y protección del acero, de manera que su desempeño se traduzca una protección efectiva durante la vida útil estimada.

6. Evaluar sobre la inversión, recuperable, en protección anticorrosiva para sistemas cuya durabilidad sea igual o mayor a 10 años.

REFERENCIAS

1. Abarca García, J. (2003). *Manual para el mantenimiento industrial: pinturas y revestimientos* (Cuarta ed.). San José, Costa Rica: Editorama.
2. Aldabe, S., Bonazzola, C., Aramendía, C., & Lacreu, L. (2004). *Química 2: química en acción*. Buenos Aires, Argentina: Colihue. Recuperado el 20 de marzo de 2020, de https://books.google.com.gt/books?id=nsTjBmyABXsC&pg=PA107&lpg=PA107&dq=oxidos+de+alqueno&source=bl&ots=5ddCGnD9FY&sig=ACfU3U0zMCLOf-ZjsCn8ktEVHneMA7Z3IA&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi-tPfcq6roAhUkiOAKHQW_AoQQ6AEwCnoECAgQAQ#v=onepage&q=oxidos%20de%20alqueno&.
3. Alphapedia. (s.f.). *Densidad del acero*. Recuperado el 5 de mayo de 2022, de Alphapedia web site: <https://www.alphapedia.net/densidad-del-acero/>.
4. AMPP. (s.f. de 2018). *The Society for Protective Coatings*. Recuperado el 6 de junio de 2018, de AMPP Web site: <https://www.sspc.org/>.
5. Asesor Técnico. (8 de diciembre de 2021). *Anticorrosivos y precios Lanco en EPA*. (H. Díaz Samayoa, Entrevistador) Recuperado el 8 de diciembre de 2021.

6. Asociación Española de Normalización y Certificación. (2008). *UNE - EN ISO 12944-5*. Recuperado el 17 de junio de 2021, de https://simogasl.com/wp-content/uploads/2019/11/Iso_12944_5_2008.pdf.
7. Asociación Latinoamericana del Acero. (2017). *América Latina en cifras*. Recuperado el 7 de diciembre de 2018, de https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america_latina_en_cifras_2017_0.pdf.
8. ASTM International. (septiembre/octubre de 2011). *Standardization News*. Recuperado el 9 de agosto de 2020, de Astm Web site: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO11/enrightD01_sps_o11.html.
9. Banco de Guatemala. (2021). *Guatemala: valor (FOB), volumen y precio medio de los 25 principales productos de exportación*. Recuperado el 11 de mayo de 2021, de <https://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/ceie/CG/2020/ceie01.html>
10. Banco de Guatemala. (2021). *Exportaciones (FOB) realizadas, Años: 1994-2021*. Recuperado el 9 de mayo de 2022, de Banco de Guatemala Web site: <https://banguat.gob.gt/es/page/exportaciones-fob-realizadas-0>.

11. Banco de Guatemala. (2021). *Guatemala: valor (FOB), volumen y precio medio de los 25 principales productos de exportación*. Recuperado el 11 de mayo de 2021, de <http://banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/ceie/CG/2016/ceie01.htm>.
12. Banco de Guatemala. (2021). *Guatemala: valor (FOB), volumen y precio medio de los 25 principales productos de exportación*. Recuperado el 11 de mayo de 2021, de <https://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/ceie/CG/2018/ceie01.htm>.
13. Banco de Guatemala. (2021). *Guatemala: valor (FOB), Volumen y precio medio de los 25 principales productos de exportación*. Recuperado el 11 de mayo de 2021, de <https://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/ceie/CG/2014/ceie01.htm>.
14. Banco de Guatemala. (2021). *Importaciones CIF realizadas, Años: 1994-2019*. Recuperado el 11 de mayo de 2021, de http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/comercio/sercom/2_POR_PRODUCTO/M_PROD_1994_2019.htm&e=150512.
15. Banco de Guatemala. (s.f.). *Producto interno bruto año de referencia 2013*. Recuperado el 2022 de agosto de 26, de <https://www.banguat.gob.gt/es/page/producto-interno-bruto-tasas-de-variacion>.

16. Banco de Guatemala. (s.f.). *tipo de cambio*. Recuperado el 26 de agosto de 2022, de <https://banguat.gob.gt/es/page/de-venta-promedio-del-mes>.
17. Bard, A. J., & Faulkner, L. (1985). *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications*. (A. W. Iberoamericana, Ed.) Recuperado el 4 de febrero de 2019, de http://microelectrochemalexbaeza.com/wp-content/uploads/2015/04/DOCUMENTO_APOYO_POTENCIAL_ELECTRODO_2010_II_20910.pdf.
18. Bernardo Ecenarro S. A. (s.f.). *Norma UNE en ISO 12944 preparación de superficies*. Recuperado el 26 de agosto de 2022, de https://www.bernardoecenarro.com/uploads/guias/pdf/guia02/es/cap_naranja_01_b.pdf.
19. Best Concept Group. (22 de marzo de 2018). *Revelando los misterios de la pasivación*. Recuperado el 9 de diciembre de 2018, de Best Concept Group Web site: <http://ferrepro.mx/revelando-los-misterios-de-la-pasivacion/>.
20. Bilurbina Alter, L., Iribarren Iaco, J., & Liesa Mestres, F. (2004). *Corrosión y protección*. Barcelona, España: UPC. Recuperado el 28 de diciembre de 2019, de <https://books.google.com.gt/books?id=jMzAenR2UHkC&pg=PA40&dq=contaminantes+que+incrementan+la+corrosi%C3%B3n+del+hierro&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi6w83evNnmAhWipFkKHRINBwkQ6wE>

IKDAA#v=onepage&q=contaminantes%20que%20incrementan%20la%20corrosi%C3%B3n%20del%.

21. Borgheresi, H., & Pfenniger, F. (2001). *Serie Galvánica*. (E. ICHA, Editor) Recuperado el 4 de febrero de 2019, de Serie Galvánica Web site: <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/soluciones-constructivas/corrosion>.
22. Borneo, R. (2012). *Clases de química, celdas galvánicas y electrolíticas*. (U. N. Córdoba, Editor) Recuperado el 5 de agosto de 2021, de clases de quimica.blogspot.com: <http://clasesdequimica.blogspot.com/2012/06/celdas-galvanicas-y-electroliticas.html>.
23. Burns, R. (2011). *Fundamentos de Química*. México: Pearson, Educación.
24. Cabrera Hernández, H. (8 de febrero de 2022). *Productos anticorrosivos y precios Sur Color*. (H. Díaz Samayoa, Entrevistador) Recuperado el 8 de febrero de 2022.
25. Calvo Carbonell, J. (2011). *Pinturas y recubrimientos: Introducción a su tecnología*. Madrid, España: Díaz de Santos. Recuperado el 2 de febrero de 2020, de https://books.google.com.gt/books?id=sH3K_xGpHggC&pg=PA73&lpg=PA73&dq=qu%C3%ADmica+de+las+resinas+de+clorocauch+o&source=bl&ots=qxfUNIndWB&sig=ACfU3U3-LMPxqU1-sk9gscFwJSBJZp-xmA&hl=es-

419&sa=X&ved=2ahUKEwiT9tym4LbnAhUhrIkKHY2TBb0Q6AEw
DnoECAoQAQ#v=onepage&q.

26. Cámara Argentina del acero. (2022). *Estadísticas Latinoamérica 2022*. (Cámara Argentina del Acero) Recuperado el 29 de Junio de 2022, de Estadísticas Latinoamérica Web site: <http://www.acero.org.ar/estadisticas-latinoamerica/>.
27. Cámara de Industria de Guatemala. (2021). *Gremial de fabricantes de pintura*. Recuperado el 2 de septiembre de 2021, de Grefap Web site: <https://cig.industriaguatemala.com/institucional/gremiales/gremial-de-fabricantes-de-pinturas-y-recubrimientos/>.
28. Campos Ortega, H., & Campos Ortega, C. (2004). *Corrosión bacteriana en metales*. IDESIA, 22(1), 29-34. Recuperado el 28 de diciembre de 2019, de http://www.idesia.cl/Vols/Numeros/IDESIA_24/CAP._3_CORROSION_BACTERIANA_EN_METALES_Autores_Humberto_R._Campos_Ortega_Claudio_H._Campos_Ortega.pdf.
29. Castaño, E. (13 de octubre de 2016). *Corrosión de los metales*. Recuperado el 13 de agosto de 2021, de Cienciaonthecest: <https://cienciadelux.com/2016/10/13/la-corrosion-de-los-metales/>.
30. Castaño, J., & Arroyave, C. (23 de abril de 1998). La funcionalidad de los óxidos de hierro. Recuperado el 8 de junio de 2020, de <file:///C:/Users/florida/Downloads/794-810-1-PB.pdf>.

31. Castellanos, J. (30 de septiembre de 2021). *Solicitud de hojas técnicas y precios*. (H. Díaz Samayoa, Entrevistador) Recuperado el 30 de septiembre de 2021.
32. Celco de Guatemala. (s.f.). *Productos*. Recuperado el 28 de junio de 2022, de : <https://www.celcodeguatemala.com/product-category/05-anticorrosivo/>.
33. Chaverra, D. (14 de Junio de 2016). *Costo global de la corrosión*. Recuperado el 3 de agosto de 2019, de Inpra Latina Web site: www.inpralatina.com.
34. Color-In pinturas. (s.f.). *Líneas de pintura*. Recuperado el 29 de junio de 2022, de <https://www.pinturascolorin.com/colores-lineas-de-pinturas-color-in/mostrario-pintura-anticorrosiva-color-in/>.
35. Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Minería. (2016). *Mercado Internacional del hierro y el acero* . Recuperado el 5 de mayo de 2018, de Cochilco Web site: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20internacional%20Hierro%20y%20Acero.pdf>.
36. Concepto Definición. (22 de julio de 2019). *Corrosión*. Recuperado el 13 de diciembre de 2019, de <https://conceptodefinicion.de/corrosion/>.
37. Copebase S. A. (s.f.). *Pinturas*. Recuperado el 24 de octubre de 2021, de <https://copebase.com/pinturas-universal/>.

38. Cym materiales S. A. (s.f.). *Preparación de superficies previo a la aplicación del revestimiento*. Recuperado el 2 de enero de 2020, de <https://cym.com.ar/intranet/Preparacion-de-superficies-previo-a-la-aplicacion-de-un-revestimiento-Pintura.pdf>.
39. Cym materiales S. A. (Agosto de 2015). *Preparación de Superficie - Norma SSPC*. Recuperado el 2 de enero de 2020, de <https://cym.com.ar/intranet/Preparacion-de-superficies-norma-SSPC-granallado-cymmateriales-shotblasting.pdf>.
40. De la Cruz Pérez, A. (19 de diciembre de 2019). *Gestión de la Corrosión en el Ciclo de Vida de los Activos*. Recuperado el 16 de agosto de 2020, de <https://infocorrosion.com/index.php/noticia/notas-patrocinadas/item/1043-gestion-de-la-corrosion-en-el-ciclo-de-vida-de-los-activos>.
41. Decreto 26-92. (1992). *ISR-Dec-26-92*. Recuperado el 30 de junio de 2022, de Web site: biblio3.url.edu.gt/Libros/2011/leyes/ley_isr.pdf.
42. Decreto 78-2005. (2019). *Ley del Sistema Nacional de la Calidad*. Recuperado el 17 de agosto de 2019, de https://www.google.com/search?q=decreto+78-2005&rlz=1C1CHBD_esGT801GT801&oq=Decreto+78&aqs=chrome.6.69i57j0l7.7347j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8.
43. Definición. de. (s.f.). *Definición de ión*. Recuperado el 4 de febrero de 2019, de Definición. de Web site: <https://definicion.de/ion/>.

44. Definiciona. (s.f.). *Definición y etimología de corrosión*. Recuperado el 9 de diciembre de 2018, de Definición y etimología Web site: <https://definiciona.com/corrosion/>.
45. Delgado del Valle, M. (9 de octubre de 2013). *Ciencia y restauración, procesos REDOX*. Recuperado el 26 de agosto de 2022, de <https://cienciayrestauracion.blogspot.com/search?q=potencial+de+reducci%C3%B3n>.
46. Diagramaweb. (s.f.). Recuperado el 8 de mayo de 2021, de Diagramaweb.com: <https://diagramaweb.com/hierro-carbono/>.
47. Díez Ortega, I. (2008). *Protección catódica de un buque Ro Ro de 210 plataformas*. Trabajo de fin de carrera de Ing. Técnico Naval. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Naval. Universidad de Cadiz. Recuperado el 28 de diciembre de 2019, de <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6473/b34208240.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
48. Docplayer. (2017). *ISO 12944 clasificación de ambientes*. Recuperado el 1 de enero de 2020, de Docplayer Web site: <https://docplayer.es/18164520-01-norma-une-en-iso-12944-a-clasificacion-de-ambientes.html>.
49. Docplayer. (s.f.). *Como seleccionar el sistema de pintura adecuado*. Recuperado el 26 de agosto de 2022, de <https://docplayer.es/2872971-Como-seleccionar-el-sistema-de-pintura-adecuado.html>.

50. EcuRed. (s.f.). *Celda electrolítica*. Recuperado el 4 de febrero de 2019, de EcuRed Web site: https://www.ecured.cu/Celda_electrol%C3%ADtica.
51. EcuRed. (s.f.). *Celda voltaica*. Recuperado el 4 de febrero de 2019, de EcuRed Web site: https://www.ecured.cu/Celda_voltaica.
52. EcuRed. (s.f.). *Electrodo*. Recuperado el 4 de febrero de 2019, de EcuRed Web site: <https://www.ecured.cu/Electrodo>.
53. Ecured. (s.f.). *Leyes de Faraday*. Recuperado el 4 de febrero de 2019, de EcuRed : https://www.ecured.cu/Leyes_de_la_electr%C3%B3lisis_de_Faraday.
54. El Arenal. (s.f.). Lámina Negra 4 X 8 X 1/4. Recuperado el 5 de mayo de 2022, de El Arenal Web site: <https://elarenal.com.gt/collections/aceros/products/lamina-negra-4-x-8-x-1-4?variant=32099997155379>.
55. El Tejar. (s.f.). *pinturas*. Recuperado el 28 de mayo de 2022, de <http://www.eltejar.gt/product-category/pintura/>.
56. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (s.f.). *Metalografía*. Recuperado el 7 de diciembre de 2018, de Metalurgia Web site: http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf, Imagen.1.

57. Farlex. (2003). *Uretano*. Recuperado el 10 de mayo de 2020, de THE FREE DICTIONARY Web site: <https://es.thefreedictionary.com/uretano>.
58. Galvele, J. R. (1979). *Corrosión*. Washington, D. C.: Eva. V. Chesneau.
59. Garcés Rodríguez, R. C. (2002). *Evaluación de la corrosión atmosférica del acero expuesto en diversas atmósferas*. Tesis de Ing. Mecánica. Universidad de Nuevo León, Facultad de Ingeniería. Recuperado el 28 de diciembre de 2019, de <http://eprints.uanl.mx/5170/1/1020147933.PDF>.
60. Giudice, C. A., & Pereyra, A. M. (2009). *Tecnología de pinturas y recubrimientos* (Primera ed.). Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
61. González Fernández, J. A. (1984). *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas & Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas.
62. Google. (s.f.). *Viscosity Conversion Table*. Recuperado el 19 de julio de 2020, de <https://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&tl=es&u=https%3A%2F%2Fj.b5z.net%2F%2Fu%2F2119873%2F%2Fdata%2Fviscosity.pdf&anno=2&prev=search>.
63. Grupo el comercio. (17 de Mayo de 2015). *La oxidación pone en alerta a los países*. Recuperado el 28 de diciembre de 2019, de Planeta - Ideas Web site: <https://especiales.elcomercio.com/planeta->

ideas/planeta/planeta-17-de-mayo-2015/oxidacion-hierro-alerta-paises-contaminacion.

64. Halliday, D., & Resnick, R. (1975). *Física, partes I y II* (Segunda ed., Vol. II). (J. Wiley, Ed., & S. Mosquiera R., Trad.) México: Continental S. A.
65. Hentges, S. (28 de mayo de 2019). *Bisfenol F: De la madre naturaleza a usted*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de <https://es.factsaboutbpa.org/blog/bisphenol-f-mother-nature-you/>.
66. Industrial Coatings Solutions. (s.f.). *Revestimientos para protección anticorrosiva de estructuras metálicas, según ISO 12944*. Recuperado el 1 de enero de 2020, de Cin Web site: https://www.cin-ics.com/download/ICS_Doc_Apoio_210x297mm_ES_ma_v1.pdf.
67. Infocorrosión. (24 de mayo de 2017). *Conociendo la limpieza con chorro de agua a presión*. Recuperado el 2 de enero de 2020, de Infocorrosión Web site: <http://www.infocorrosion.com/index.php/infocorrosion-vip/infoespeciales/item/743-conociendo-la-limpieza-con-chorro-de-agua-a-presion-waterjetting>.
68. Ing. Marítima. (2016). *Corrosión*. Recuperado el 11 de junio de 2021, de Ing. Marítima blogspot: <http://ingmaritima.blogspot.com/2017/03/la-corrosion.html>.

69. Ingeniería mecánica. (15 de junio de 2016). *Tipos de corrosión*. Recuperado el 14 de junio de 2021, de Ingeniería Mecánica blog : <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/06/corrosion-de-deterioro-uniforme-o.html>.
70. Katz, M. (2011). *Minerales de hierro*. (I. N. Tecnológica, Ed.) Recuperado el 5 de marzo de 2019, de Minerales de hierro Web site: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/minerales-de-hierro.pdf>.
71. La Paleta S. A. Grupo Solid. (s.f.). *Productos anticorrosivos*. Recuperado el noviembre de 18 de 2021, de <https://www.pinturaspaleta.com/productos/anticorrosivos>.
72. Lenntech. (s.f.). *Elementos químicos ordenados por su abundancia*. Recuperado el 4 de Diciembre de 2019, de Lenntech BV Web site: <https://www.lenntech.es/tabla-peiodica/abundancia.htm>.
73. López L., R. H. (25 de abril de 2022). Sherwin Williams, *productos y precios*. (H. F. Díaz Samayoa, Entrevistador) Recuperado el 25 de abril de 2022.
74. Martín, W. F., Gil Fundora, S., & Treto Monzón, B. (2014). Facultad de Ingeniería. Universidad Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". *Fundamentos de la Corrosión y Protección de Metales, 117*. Cuba. Recuperado el 27 de diciembre de 2019, de <file:///C:/Users/florida/Downloads/Libro%20Fundamentos%20de%20la%20Corrosion%20y%20Proteccion%20de%20Metales.pdf>.

75. McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1978). *Operaciones básicas de Ingeniería Química* (Cuarta ed., Vol. I). (F. Mato Vásquez, Trad.) Barcelona, España: Reverté S. A. Recuperado el 9 de agosto de 2020.
76. Meas Vong, Y. (1991). *Tres métodos para evaluar una velocidad de corrosión*. Recuperado el 8 de febrero de 2019, de file:///C:/Users/florida/Downloads/670-958-1-PB%20(2).pdf.
77. Mérida, E. (2022 de 7 de enero). *Productos anticorrosivos y precios Pintuco*. (H. Díaz Samayoa, Entrevistador) Recuperado el 7 de enero de 2022.
78. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2016). *Calidad y evaluación ambiental*. Recuperado el 16 de agosto de 2020, de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx.
79. MIPSAs. (s.f.). *Clasificación del acero*. Recuperado el 18 de abril de 2021, de <https://www.mipsa.com.mx/sabias-que/clasificacion-del-acero/>.
80. Molina Pérez, L. (Octubre de 2011). *Estudio Avanzado de Corrosión*. (U. P. Cataluña, Ed.) Recuperado el 7 de Diciembre de 2018, de Web site:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14738/ESTUDIO?sequence=1>.

81. Monografías. (s.f.). *Roturas por corrosión bajo tensión*. Recuperado el 13 de diciembre de 2018, de Monografías Web site: <https://www.monografias.com/trabajos-pdf2/corrosion/corrosion.shtml>.
82. Muñoz Ledo, R., & Uruchurtu Chavarín, J. (2002). *Contaminantes ambientales*. Recuperado el 3 de enero de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37018103.pdf>.
83. NACE International. (s.f.). (NACE, Ed.) Recuperado el 17 de Junio de 2018, de NACE International Web site: <https://www.nace.org/about>.
84. Neurtek, Instruments. (s.f.). *Ensayos de Adherencia de recubrimiento y métodos de prueba*. Recuperado el 5 de septiembre de 2020, de <https://www.neurtek.com/es/academia/pinturas-y-recubrimientos/ensayos-de-adherencia-de-recubrimiento-y-metodos-de-prueba#:~:text=Existen%20tres%20procedimientos%20diferentes%20para,rayado%20y%20prueba%20de%20extracci%C3%B3n>.
85. Oriundo De la Cruz, N. F. (2016). *Diseño de una especificación de recubrimientos*. (D. CHAVERRA, Ed.) Perú. Recuperado el 8 de mayo de 2018, de <https://www.zonadepinturas.com/201606146399/articulos/proteccion-de-superficies-y-control-de-corrosion/diseño-de-una-especificación-de-recubrimientos.html>.

86. Orozco Cruz, R. (2011). *Recubrimientos Anticorrosivos Ingeniería Química*. 8-41. Veracruz, México: Universidad Veracruzana. Recuperado el 20 de enero de 2020, de <https://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/05/6-UNIDAD-4-RECUBRIMIENTOS-ANTICORROSIVOS-INICIO.pdf>.
87. Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2009). *Definición de acero*. Recuperado el 8 de diciembre de 2018, de Definición. De Web site: <https://definicion.de/acero/>.
88. Perry, J. H. (1976). *Manual del Ingeniero Químico* (Tercera ed., Vol. II). (S. Alonso, Trad.) México: Uthea.
89. Pinturas Segs. (s.f.). *Productos para todas las necesidades*. Recuperado el 17 de marzo de 2022, de <http://pinturassega.com/>.
90. Pixabay. (s.f.). *Corrosión*. Recuperado el 7 de julio de 2021, de Pixabay.com: <https://pixabay.com/es/images/search/corrosi%C3%B3n/>.
91. Prevención Integral. (21 de noviembre de 2013). *Explosión por corrosión*. Recuperado el 29 de diciembre de 2019, de Prevención Integral Web site: <https://www.prevencionintegral.com/actualidad/noticias/2017/07/25/explosion-por-corrosion>.
92. Primium de Guatemala. (s.f.). *Conoce nuestros catálogos*. Recuperado el 3 de mayo de 2022, de <https://www.grupoprimum.com/>.

93. Primo Yúfera, E. (2007). *Química orgánica básica y aplicada de la moléculas a la industria* (Vol. II). Barcelona, España: Reverté S. A. Recuperado el 3 de febrero de 2020, de https://books.google.com.gt/books?id=aU_aBXvAB3MC&pg=PA927&lpg=PA927&dq=definiciones+de+%C3%A1cidos+esenciales,+carotenoides+y+esteroides&source=bl&ots=ywnJxxoU5t&sig=ACfU3U3SB3RZSSLDqwYMFiiKx6KtpVpqw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi64MXp_bjnAhVQ1VkKHWSCBVAQ6.
94. QuimiNet. (14 de febrero de 2007). *Resinas alquídicas*. Recuperado el 23 de febrero de 2020, de QuimiNet Web site: <https://www.quiminet.com/articulos/las-resinas-alquidicas-y-su-clasificacion-18388.htm>.
95. Quimipur, s.l.u. (s.f.). *Etilo Silicato QP*. Recuperado el 202 de mayo de 11, de <http://quimipur.com/productos/productos-quimicos/etilo-silicato>.
96. Quiróz García, J. (2006). *Selección de sistemas de pinturas para protección anticorrosiva del acero en ambientes industriales*. Lima, Perú: Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química y Textil. Recuperado el 8 de junio de 2018, de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1014/3/quiroz_gj.pdf.
97. Quirtmair, W. (2019). Recuperado el 7 de julio de 2021, de Formación de picaduras - Corrosión en las tuberías metálicas : <https://www.google.com.gt/search?q=imagenes+de+equipos+totalmente+corroidos&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahU>

KEwii75yc16rYAhUFYyYKHT19D74Q7AklQA&biw=1366&bih=635
#imgrc=_.

98. Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (1995). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. (Quinta ed.). (E. Urbina Medal, Trad.) México: McGraw-Hill.
99. Statista. (Enero de 2021). *Producción global de acero crudo*. Recuperado el 29 de Junio de 2022, de Statista Web site: <https://es.statista.com/estadisticas/600143/produccion-global-de-acero-crudo/>.
100. Sullivan, W. G., Wicks, E. M., & Luxhoj, J. T. (2004). *Ingeniería Económica de DeGarmo*. (Duodécima ed.). México: Pearson Educación de México, S. A. de C.V.
101. Tecnología de los plásticos . (5 de agosto de 2011). *Resina epoxi*. Recuperado el 12 de abril de 2020, de : <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/resina-epoxi.html>.
102. Tecnología de los plásticos. (11 de diciembre de 2011). *Siliconas*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/siliconas.html>.
103. Temesio, G. (21 de septiembre de 2016). *Resinas Alquílicas*. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de es. scribd. com:

<https://es.scribd.com/document/324819384/211520146-RESINAS-ALQUIDICAS-pdf>.

104. Textos científicos. (s.f.). *Diisocianato de tolueno (TDI)*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de <https://www.textoscientificos.com/quimica/tdi>.
105. UNE, Normalización Española. (2002). *UNE-EN-ISO 7253:2002*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0026863>.
106. UNE, Normalización Española. (2007). *UNE-EN-ISO 2812-2:2007*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0039968>.
107. UNE, Normalización Española. (11 de julio de 2018). *ISO 12944-1* . Recuperado el 1 de enero de 2020, de UNE Web site: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060797>.
108. UNE, Normalización Española. (2018). *UNE-EN-ISO 12944-2*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060800>.
109. UNE, Normalización Española. (de 2018). *UNE-EN-ISO 12944-3*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060803>.

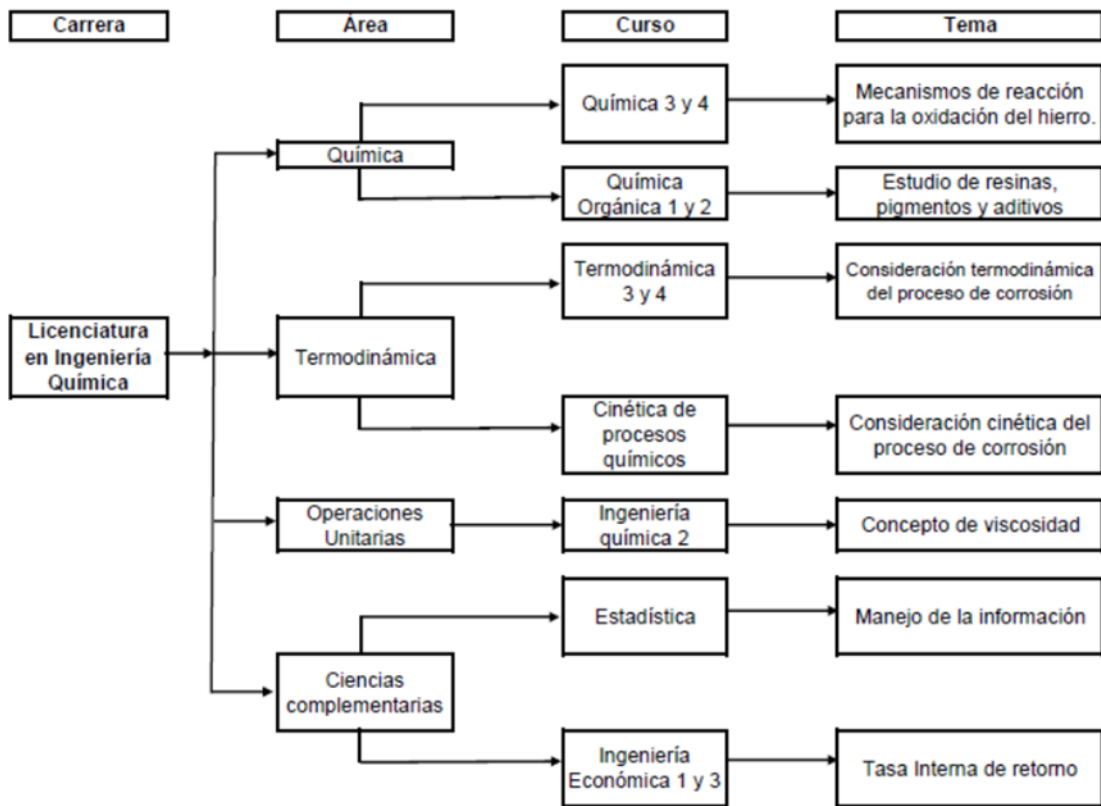
110. UNE, Normalización Española. (de de 2018). *UNE-EN-ISO 12944-4*. Recuperado el 18 de enero de 2020, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060804>.
111. UNE, Normalizacion Española. (2018). *UNE-EN-ISO 12944-6*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de file:///C:/Users/User/Downloads/EXT_MngfGwhq1vvZQl2JDCvE.pdf.
112. UNE, Normalización Española. (2018). *UNE-EN-ISO 12944-7:2108*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060817>.
113. UNE, Normalización Española. (2018). *UNE-EN-ISO 12944-8*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de https://www.google.com/search?q=iso+12944-8&rlz=1C1CHBD_esGT801GT801&oq=iso+12944-8&aqs=chrome..69i57j0l7.6779j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8.
114. UNE, Normalización Española. (2018). *UNE-EN-ISO 12944-9: 2018*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de file:///C:/Users/florida/Downloads/EXT_Tz9RnJiZ8HE7pDI975Uu.pdf.

115. UNE, Normalización Española. (2018). *UNE-EN-ISO 12955-5*. Recuperado el 18 de enero de 2020, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0064118>.
116. UNE, Normalización Española. (2019). *UNE-EN-ISO 6270-2: 2019*. Recuperado el 12 de enero de 2020, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0061496>.
117. Universidad del Sur de Mississippi. (1996). *Making epoxy resins*. Recuperado el 26 de abril de 2020, de Making Epoxy Resins : <https://pslc.ws/spanish/eposyn.htm>.
118. Universidad politécnica de Valencia. (s.f.). *Corrosión intragranular*. Recuperado el 13 de diciembre de 2018, de Upv. es Web site: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_4_5.html.
119. Universidad Tecnológica de Pereira. (12 de diciembre de 2015). *Metalografía*. Recuperado el 13 de julio de 2021, de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-corrosion-y-procesos-de-corrosion/>.
120. Univisión. (7 de agosto de 2017). *Univision Noticias*. Recuperado el 29 de diciembre de 2019, de Univisión Web site: <https://www.univision.com/noticias/accidentes/accidente-mortal-en-una-atraccion-mecanica-en-la-feria-de-ohio-fue-causado-por-la-corrosion-excesiva-segun-el-fabricante>.

121. Wikipedia. (11 de septiembre de 2019). *Esquema de un potencióstato*. (Fundación Wikimedia, Inc.) Recuperado el 13 de agosto de 2021, de Wikipedia Web site: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/72/Potentiostat3.png>.
122. World Steel Association. (s.f.). *World Steel Association*. Recuperado el 7 de 12 de 2018, de World Steel Association Web site: <https://www.worldsteel.org/>.
123. XJY Silicones. (s.f.). *Silicones*. Recuperado el 31 de mayo de 2020, de X J Y Silicones web site: <http://es.xjysilicone.com/tech-support/polysiloxane-uses.html>.

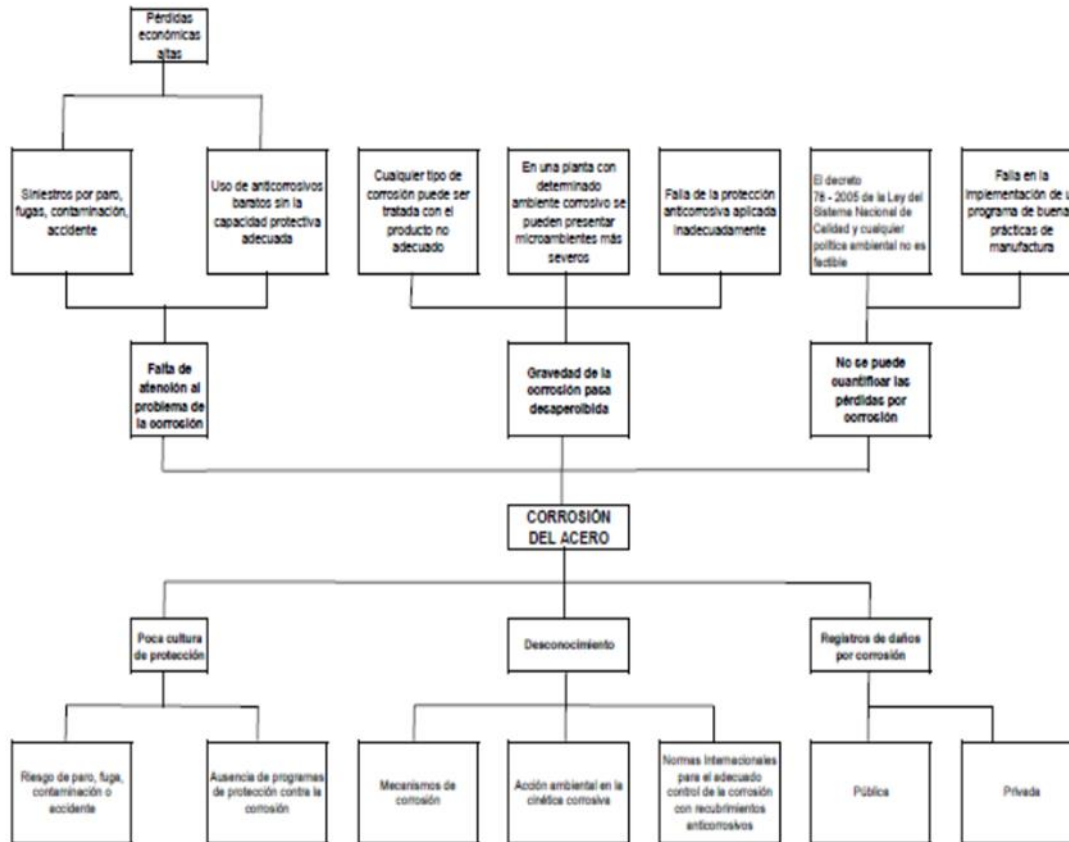
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Cálculo de la pérdida de acero en Q/g

Precio público de la lámina de acero	Q 2,152.85	Precio neto de la lámina de acero	Q 2,152.85 ÷ 1.12 =	Q 1,922.19
Dimensiones de la lámina en pies y pulgadas	4 x 8 x 1/4	Conversión a metros	4 pies X 1m/3.28 pies = 1.22 m	
			8 pies X 1m/3.28 pies = 2.44 m	
			1/4 pulgada X 0.0254 m/plg = 0.00635 m	
Volumen	1.22 m	X	2.44 m X 0.00635 m =	0.0189 m ³
Masa de la lámina			0.0189 m ³ X 7,900 Kg/m ³ =	149,331 Kg
Masa en gramos			149,331 Kg X 1,000 g/Kg =	149,331 g
Precio de la lámina en Quetzales por gramo			Q 1,922.19 ÷ 149,331 g =	Q 0.013/g

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Artículos 16, 17 y 19 del capítulo VII de la Ley del ISR

ARTICULO 16. Regla general

Las depreciaciones y amortizaciones cuya deducción admite esta ley, son las que corresponde efectuar sobre bienes de activo fijo e intangible, propiedad del contribuyente y que son utilizados en su negocio, industria, profesión, explotación o en otras actividades vinculadas a la producción de rentas gravadas. Cuando por cualquier circunstancia no se deduce en un período de imposición la cuota de depreciación de un bien, o se hace por un valor inferior al que corresponda, el contribuyente no tendrá derecho a deducir tal cuota de depreciación en períodos de imposición posteriores.

ARTICULO 17. Base de cálculo

El valor sobre el cual se calcula la depreciación es el de costo de adquisición o de producción o de revaluación de los bienes y, en su caso, el de las mejoras incorporadas con carácter permanente. El valor de costo incluye los gastos incurridos con motivo de la compra, instalación y montaje de los bienes y otros similares, hasta ponerlos en condición de ser usados. Sólo se admitirán depreciaciones y amortizaciones sobre el aumento en valores de activos que fueren activos fijos depreciables y que se hubieren revaluado y se hubiera pagado

Continuación del anexo 1.

el impuesto correspondiente, de acuerdo con lo establecido en el artículo 14 de esta ley.

ARTÍCULO 19. Porcentajes de depreciación

Se fijan los siguientes porcentajes anuales máximos de depreciación:

a) Edificios, construcciones e instalaciones adheridas a los inmuebles y sus mejoras. 5 %

b) Árboles, arbustos, frutales, otros árboles y especies vegetales que produzcan frutos o productos que generen rentas gravadas, con inclusión de los gastos capitalizables para formar las plantaciones. 15 %

c) Instalaciones no adheridas a los inmuebles; mobiliario y equipo de oficina; buques - tanques, barcos y material ferroviario marítimo fluvial o lacustre. 20 %

d) Los semovientes utilizados como animales de carga o de trabajo, maquinaria, vehículos en general, grúas, aviones, remolques, semiremolques, contenedores y material rodante de todo tipo, excluyendo el ferroviario. 20 %

e) Equipo de computación, incluyendo los programas. 33.33 %

f) Herramientas, porcelana, cristalería, mantelería, y similares; reproductores de raza, machos y hembras. En el último caso, la depreciación se calcula sobre el valor de costo de tales animales menos su valor como ganado común. 25 %

Continuación del anexo 1.

g) Para los bienes no indicados en los incisos anteriores. 10 %

Fuente: Decreto 26-92. (1992). (C. d. República, Ed.) Recuperado el 30 de junio de 2022, de
Web site: biblio3.url.edu.gt/Libros/2011/leyes/ley_isr.pdf.

