



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

**EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS MEDIANTE VARIACIONES EN LA
RESINA EPÓXICA Y EN LA PROPORCIÓN DEL AGENTE DE CURADO PARA SU
APLICACIÓN EN SUPERFICIES DE ACERO, A NIVEL DE LABORATORIO**

Vivian María Salazar De León

Asesorado por la Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera e

Inga. María de los Ángeles Rivas López

Guatemala, julio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS MEDIANTE VARIACIONES EN LA
RESINA EPÓXICA Y EN LA PROPORCIÓN DEL AGENTE DE CURADO PARA SU
APLICACIÓN EN SUPERFICIES DE ACERO, A NIVEL DE LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

VIVIAN MARÍA SALAZAR DE LEÓN

ASESORADO POR LA INGA. LORENA VICTORIA PINEDA CABRERA E
INGA. MARÍA DE LOS ÁNGELES RIVAS LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, JULIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADORA	Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS MEDIANTE VARIACIONES EN LA RESINA EPÓXICA Y EN LA PROPORCIÓN DEL AGENTE DE CURADO PARA SU APLICACIÓN EN SUPERFICIES DE ACERO, A NIVEL DE LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de octubre de 2011.



Vivian María Salazar De León



Guatemala, 14 de febrero de 2012

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

Por este medio hago constar que he revisado y apruebo el informe final del trabajo de graduación planteado por la estudiante **VIVIAN MARÍA SALAZAR DE LEÓN**, con carné **200611017**, para su Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.) titulado **“Evaluación de recubrimientos epóxicos mediante variaciones en la resina epóxica y en la proporción del agente de curado para su aplicación en superficies de acero, a nivel de laboratorio”**.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

María de los Angeles Rivas López
Ingeniera Química
Colegiada No. 1536

Inga. María de los Angeles Rivas López
Colegiada No. 1536
Asesora técnica



Guatemala, 24 de abril de 2012.
Ref.EPS.D.445.04.12.

Ing. Williams G. Alvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente


Estimado Ingeniero Alvarez Mejía.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS MEDIANTE VARIACIONES EN LA RESINA EPÓXICA Y EN LA PROPORCIÓN DEL AGENTE DE CURADO PARA SU APLICACIÓN EN SUPERFICIES DE ACERO, A NIVEL LABORATORIO"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria **Vivian María Salazar de León**, quien fue debidamente asesorada y supervisada por la Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora -Supervisora de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Norma Ileana Sarmiento Zedeno de Serrano
Directora Unidad de EPS

NISZ/ra





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 29 de mayo de 2012
 Ref. EI.Q.TG-IF.026.2012

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-217-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
 -Modalidad EPS-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Vivian María Salazar de León.**

Identificada con número de carné: **2006-11017.**

Previo a optar al título de INGENIERA QUÍMICA.

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:

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS MEDIANTE VARIACIONES EN LA RESINA EPÓXICA Y EN LA PROPORCIÓN DEL AGENTE DE CURADO PARA SU APLICACIÓN EN SUPERFICIES DE ACERO, A NIVEL LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera: **María Rivas López.**

Habiendo encontrado el referido informe final del 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"

 Ing. César Alfonso García
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación

ESCUELA DE
 INGENIERIA QUÍMICA

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
 ACREDITADO POR
 Agencia Centroamericana de Acreditación de
 Programas de Arquitectura y de Ingeniería
 Período 2009 - 2012

ACAA I



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.094.2012

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (EPS final) de la estudiante **VIVIAN MARÍA SALAZAR DE LEÓN** titulado: **"EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS MEDIANTE VARIACIONES EN LA RESINA EPÓXICA Y EN LA PROPORCIÓN DEL AGENTE DE CURADO PARA SU APLICACIÓN EN SUPERFICIES DE ACERO, A NIVEL DE LABORATORIO"**.
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, julio de 2012

Cc: Archivo
VMMV/ale



DTG. 321.2012

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: **EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS MEDIANTE VARIACIONES EN LA RESINA EPÓXICA Y EN LA PROPORCIÓN DEL AGENTE DE CURADO PARA SU APLICACIÓN EN SUPERFICIES DE ACERO, A NIVEL LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria **Vivian María Salazar De León**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 11 de julio de 2012.

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por haberme bendecido de tantas maneras desde el primer día de mi vida. Para ti sea la gloria y la honra Señor Jesús.
- Mi padre** José Rubén Salazar Hernández, pues me ha dado el mejor ejemplo de vida. Papi, te amo, este triunfo también es tuyo.
- Mi madre** Vivian Gisela De León Custodio, pues me ha brindado su apoyo y su amor incondicional. Te amo y te bendigo.
- Mis hermanos** Jorge, Marlene, Ligia y Carlos; por su cariño y apoyo.
- Mi novio** Juan Girón, quien me ha alegrado la vida con su cariño y amistad. Te amo.
- Mi familia** A todos mis tíos, primos y en especial a mi abuelo Mario. Todos me han dado ánimo para alcanzar esta gran meta.
- Mis amigos** Pues gracias a su cariño, este trayecto ha sido toda una aventura.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la vida y la oportunidad de culminar mis estudios universitarios. Todo lo que soy y lo que espero ser se lo debo a Él.
- Grupo Solid** Por recibirme con las puertas abiertas para el desarrollo de este trabajo de graduación. Es un orgullo pertenecer a la Sociedad de Grandes Soñadores –SGS Solid.
- Lic. Franz Barrios** Por asesorarme e introducirme al mundo de las pinturas. En usted he encontrado a un excelente maestro y persona, le deseo grandes bendiciones.
- Inga. María Rivas** Por ayudarme desde el inicio de este proyecto sin ningún reparo. Mil gracias.
- Área Técnica** Por ayudarme de una u otra forma en este trabajo: Ing. Lic. Fernando Iriarte, Rolando Yantuche, Mario Ramírez y a todos los miembros del departamento Técnico y Control de Calidad. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.
- Ing. César García** Por asesorarme, aportar valiosas ideas y compartir su conocimiento conmigo.

**Inga. Lorena
Pineda**

Por animarme a seguir adelante en todo momento. Su asesoría fue muy valiosa para mi, gracias por sus consejos y su cariño.

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por haber sido mi casa de estudios, en donde tuve una excelente formación académica.

**Sociedad
guatemalteca**

Por brindarme la oportunidad de estudiar la carrera más bella. Prometo ser una profesional que contribuya con el desarrollo de nuestro país, Guatemala.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Pinturas y recubrimientos.....	3
2.1.1. Componentes.....	3
2.1.1.1. Resinas o ligantes	4
2.1.1.2. Solventes	5
2.1.1.3. Pigmentos	5
2.1.1.4. Aditivos.....	6
2.1.2. Fabricación.....	7
2.1.3. Funciones.....	7
2.2. Clasificación de los recubrimientos	8
2.2.1. Sistemas de pinturas.....	8
2.2.2. Según el ambiente circundante.....	9
2.2.2.1. Interiores	9
2.2.2.2. Exteriores	9
2.2.3. Campo de aplicación.....	9
2.2.3.1. Arquitectónicas.....	10

2.2.3.2.	De protección industrial	10
2.2.3.2.1.	Resistencia a la corrosión	10
2.2.3.2.2.	Resistencia química	11
2.2.3.2.3.	Resistencia al intemperismo	11
2.2.3.3.	Mantenimiento Industrial	11
2.2.4.	Proceso de curado	11
2.2.4.1.	Evaporación del solvente	12
2.2.4.2.	Secado por oxidación	12
2.2.4.3.	Polimerización por reacción química	12
2.3.	Recubrimientos epóxicos	13
2.3.1.	Resinas epóxicas	14
2.3.1.1.	Derivadas del bisfenol A	14
2.3.1.2.	Derivadas del bisfenol F	15
2.3.1.3.	Epóxicas fenólicas novolacs	16
2.3.1.4.	Modificadas	16
2.3.2.	Agentes de curado	17
2.3.2.1.	Aminas	17
2.3.2.2.	Poliamidas alquídicas	17
2.3.2.3.	Poliamidas	18
2.3.3.	Preparación del sustrato	19
2.3.4.	Métodos de aplicación	21
2.4.	Normas ASTM para la evaluación de recubrimientos	22
2.4.1.	Propiedades fisicoquímicas de diseño	22
2.4.1.1.	Densidad	22
2.4.1.2.	Viscosidad	22
2.4.1.3.	Brillo	23
2.4.1.4.	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	23
2.4.1.5.	Escurrecimiento (<i>sagging</i>)	23
2.4.1.6.	Grado de dispersión	23

2.4.1.7.	Sólidos por peso.....	24
2.4.2.	Propiedades fisicoquímicas durante su aplicación.....	24
2.4.3.	Propiedades físicas de la película.....	24
2.4.3.1.	Adherencia.....	25
2.4.3.2.	Resistencia al impacto.....	25
2.4.3.3.	Flexibilidad.....	25
2.4.3.4.	Espesor.....	25
2.4.3.5.	Dureza.....	26
2.4.4.	Desempeño de los recubrimientos.....	26
3.	METODOLOGÍA.....	27
3.1.	Descripción de variables.....	27
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	29
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	30
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	30
3.4.1.	Materia prima de pinturas (polímeros).....	30
3.4.2.	Reactivos.....	30
3.4.3.	Solventes.....	31
3.4.4.	Equipos de preparación de pinturas.....	31
3.4.5.	Equipos de aplicación de pinturas.....	31
3.4.6.	Sustratos para los recubrimientos.....	32
3.4.7.	Cristalería y accesorios.....	32
3.4.8.	Instrumentos para las evaluaciones.....	32
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa.....	33
3.5.1.	Pruebas de diseño de las formulaciones.....	33
3.5.2.	Pruebas físicas de los recubrimientos.....	34
3.5.3.	Pruebas de desempeño.....	33
3.5.4.	Metodología experimental.....	35
3.5.5.	Elección del diseño experimental.....	35

3.5.6.	Diseño de tratamientos	36
3.6.	Recolección y ordenamiento e la información	37
3.6.1.	Información relativa a la producción de pinturas.....	38
3.6.2.	Normas ASTM	38
3.6.3.	Datos experimentales	38
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	39
3.7.1.	Primera etapa: formulación y diseño de pinturas	39
3.7.2.	Segunda etapa: evaluación de las propiedades físicoquímicas de diseño y de aplicación	40
3.7.3.	Tercera etapa: evaluación de las propiedades físicas del recubrimiento	40
3.7.4.	Cuarta etapa: evaluaciones de desempeño.....	41
3.8.	Análisis estadístico	42
4.	RESULTADOS	45
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53
6.	LOGROS OBTENIDOS	63
	CONCLUSIONES.....	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	APÉNDICES.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Proceso de curado por polimerización por reacción química	13
2. Grupo epóxico u oxirano	14
3. Resina derivada del bisfenol A.....	15
4. Resina derivada del bisfenol F.....	15
5. Resina epoxi modificada	16
6. Acero sin tratamiento y posterior al <i>sandblasting</i>	57
7. Batería de láminas recubiertas, mezclas uno a cinco	58
8. Disposición de láminas dentro de la cámara de inmersión	58
9. Cámara de inmersión para láminas sumergidas en gasolina.....	59

TABLAS

I. Descripción de variables	27
II. Tratamientos efectuados para cada unidad experimental.....	37
III. Identificación de pinturas epóxicas evaluadas	39
IV. Tabulación para las propiedades fisicoquímicas.....	40
V. Tabulación para las propiedades físicas de las películas.....	41
VI. Tabulación para el desempeño químico de las pinturas	42
VII. Fuentes de variación del ANOVA de un factor de efectos fijos balanceados	43
VIII. Fórmulas del ANOVA unifactorial de efectos fijos balanceados.....	43
IX. Mezclas de pintura en función de la proporción y tipo de resina epóxica.....	45

X.	Inmersiones requeridas en pintura para recubrir el acero.....	46
XI.	Propiedades fisicoquímicas de los recubrimientos con resina epóxica derivada del bisfenol A	47
XII.	Propiedades fisicoquímicas de los recubrimientos con resina resina epóxica fenólica	48
XIII.	Propiedades físicas de los recubrimientos.....	49
XIV.	Propiedades físico-mecánicas de los recubrimientos: resistencia al impacto delantero y trasero (con masa punzante de 2 lb)	50
XV.	Desempeño de los recubrimientos (h) en función del químico de prueba, del tipo y proporción de resina epóxica, mediante la técnica de inmersión a 25°C	50
XVI.	Desempeño de las películas en función del químico de prueba, tipo y proporción de resina epóxica, ante la oxidación (oscurecimiento) luego de 500 horas de inmersión a 25°C.....	51
XVII.	Desempeño de las películas en función del químico de prueba, del tipo y proporción de resina epóxica, ante la formación de ampollas luego de 500 horas de inmersión a 25°C.....	51
XVIII.	Adherencia final de los recubrimientos al acero (porcentaje) en función del químico de prueba, del tipo y proporción de resina epóxica, luego de 500 horas de inmersión a 25°C.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Adherencia
B	Brillo
cps	Centipoises
COV	Compuestos orgánicos volátiles
CQ	Compuesto químico de inmersión
ρ	Densidad
D	Dureza del recubrimiento
S	Escurrimiento (<i>sagging</i>)
E	Espesor de película
F	Flexibilidad
GA	Grado de ampollamiento
GD	Grado de dispersión

GO	Grado de oxidación
g	Gramos
H	Hegman
h	Horas
lb	Libra
L	Litro
mil	Milésima de pulgada
min	Minuto
#	Número
%	Porcentaje
PL	<i>Pot life</i>
PR	Proporción de resinas
in	Pulgada
RI	Resistencia al impacto
RE	Resina epóxica

s	Segundos
SP	Sólidos por peso
t	Tiempo de secado
KU	Unidades Kreb
μ	Viscosidad

GLOSARIO

Acabado	Capa final de un sistema de pintura. Su textura, color, brillo y otras propiedades influyen en la apariencia de la superficie.
Corrosión	Proceso químico por el cual un metal es oxidado por sustancias de su entorno.
Curado	Proceso por el cual una pintura o recubrimiento se endurece y adquiere sus características de resistencia definitiva.
Dispersión	Proceso productivo en el cual se disminuye el tamaño de partícula de los pigmentos, mediante el uso de energía mecánica, de modo que los agregados de pigmento sean rotos y las partículas queden suspendidas dentro del vehículo de la pintura.
Fondo	Recubrimiento primario o imprimante; un producto que se aplica como primera capa de un sistema de pintura y que cumple con una o varias de las siguientes funciones: mejorar la apariencia, el rendimiento y la adherencia de las capas de acabado y proteger la superficie de la corrosión.

Leneta	Hoja de papel contraste, utilizada en la industria de pinturas, con una porción de color blanco y otra de color negro. Al aplicar pintura sobre este tipo de papel, es posible apreciar el poder cubriente de la misma.
Nivelación	Habilidad de un recubrimiento para fluir después de ser aplicado, de tal manera que desaparecen defectos tales como marcas de brocha y piel de naranja, dando como resultado un acabado homogéneo.
Película	Capa que producen las pinturas una vez aplicadas sobre la superficie.
Polímero	Molécula de alto peso molecular, formada por el encadenamiento de un gran número de moléculas de baja masa molecular (monómeros).
<i>Pot life</i>	Vida útil de mezcla. Corresponde al tiempo máximo en que debe ser utilizada la mezcla de los dos componentes de la pintura. Luego de este tiempo, la mezcla se endurece a causa de la reacción química entre ambos componentes.
Preparación de superficie	Tratamiento manual, mecánico, químico o térmico que se hace con el fin de acondicionar una superficie; proporcionando una superficie limpia, seca y con una rugosidad apropiada para la adherencia y durabilidad de la pintura por aplicar.

Recubrimiento	Término genérico para pinturas, lacas, barnices, esmaltes, etc.
Reología	Es el estudio del comportamiento de los líquidos, en cuanto a su manera de fluir y su deformación.
Resina	Es el componente principal de una pintura, pues es el responsable de formar la película sólida, al estar seca la pintura. Químicamente es un polímero, el cual mantiene ligados a los componentes de la pintura, por su poder aglutinante.
Sustrato	Corresponde a la superficie que es recubierta por la pintura. En general, los materiales que se recubren más comúnmente son metales que incluyen hierro dentro de su composición.
Vehículo	Se le denomina así, a la fase continua de la pintura, constituida por la resina y los solventes de la fórmula.

RESUMEN

El proyecto permitió realizar una evaluación de revestimientos epóxicos en reacción con poliamida, para el recubrimiento interior de tanques, a partir de evaluaciones estandarizadas de brillo, resistencia al impacto, flexibilidad, dureza, nivelación, resistencia al ataque químico, entre otras. Dichas evaluaciones tuvieron como fin, el determinar las proporciones de mezcla en las cuales se presentaran los mejores resultados de desempeño, para el recubrimiento de tanques de acero.

Como parte de la metodología del proyecto, se presentaron cinco etapas del proceso de diseño: formulación de dos recubrimientos epóxicos de imprimación, realización de pruebas fisicoquímicas relativas a los parámetros de diseño, aplicación del recubrimiento, pruebas físicas y evaluaciones de desempeño del recubrimiento. A partir de este proceso, se concluyó en el diseño de la formulación de un fondo epóxico para el recubrimiento interno de tanques de metal, a partir de la variabilidad de las proporciones entre los dos componentes reactivos de un recubrimiento epóxico, así como la variabilidad de la molécula de grupos funcionales epoxi en la reacción.

OBJETIVOS

General

Evaluar la proporción de mezcla para la aplicación de recubrimientos epóxicos primarios, en función del tipo de resina epóxica y de la concentración de poliamida, a través del cumplimiento de especificaciones normalizadas ASTM para pinturas.

Específicos

1. Examinar las formulaciones propuestas a través del cumplimiento de parámetros reológicos y de diseño.
2. Especificar el procedimiento de aplicación de los recubrimientos mediante la técnica de inmersión.
3. Determinar el grado de resistencia fisicoquímica de los recubrimientos ante la inmersión en diferentes compuestos químicos.

HIPÓTESIS

Hipótesis científica

La proporción de resina poliamida en las pinturas epóxicas guarda una relación directa con la resistencia de los recubrimientos al ataque químico.

Hipótesis estadística

H_0 : No existe diferencia significativa entre la resistencia de los recubrimientos epóxicos al ataque químico.

H_a : Existe diferencia significativa entre la resistencia de los recubrimientos epóxicos al ataque químico.

INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos epóxicos son pinturas de dos componentes que reaccionan entre sí, para formar una red polimérica resistente a ciertas condiciones químicas y ambientales. Uno de los componentes reactivos de la pintura es la resina con grupos funcionales epoxi, el otro, es un agente curante o endurecedor constituido por grupos amina o poliamida. Una de las funciones principales de las pinturas epóxicas es proteger superficies metálicas del ataque del agua, intemperie y sustancias químicas.

En la actualidad, los tanques de acero se utilizan en todo el mundo para almacenar productos químicos diversos, tal como solventes, fertilizantes, y derivados del petróleo, entre muchas aplicaciones. Para alargar la vida útil del tanque y prevenir problemas, tales como la oxidación del acero y posibles fugas, se utilizan recubrimientos, los cuales constituyen una capa protectora de naturaleza polimérica ante las condiciones de servicio del tanque. En la mayoría de los casos, el recubrimiento interno y externo de un tanque, es una pintura.

Para que una industria de pinturas pueda ofrecer un producto que sirva como recubrimiento de tanques de acero, este debe ser formulado y evaluado. Se estudiaron dos pinturas epóxicas, realizando dos tipos de variación: de resina epóxica y de proporciones entre dicha resina y el agente curante poliamídico. Para ello se procedió a la formulación de las pinturas, su fabricación, evaluación e interpretación de resultados.

Las pinturas epóxicas formuladas cumplieron con determinados parámetros fisicoquímicos, tales como el porcentaje de sólidos, la viscosidad, el brillo, el tiempo de secado y de curado, la flexibilidad, la dureza y la fineza de partícula. La posterior evaluación de la pintura epóxica consistió en tratar paneles de acero, aplicar el recubrimiento respectivo y realizar diferentes pruebas estandarizadas de resistencia química y física, para la verificación de su funcionamiento en condiciones de servicio.

Se utilizaron diferentes compuestos químicos para su exposición directa con el recubrimiento: agua, etanol, xileno, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio y gasolina. Además se evaluó la adherencia del recubrimiento y se monitorearon las probetas recubiertas de acero, en búsqueda de fisuras y ampollas, con el fin de determinar si las pinturas aplicadas son aptas para el recubrimiento interior de tanques metálicos, en condiciones de almacenamiento. A su vez, se determinó a partir de dichas pruebas, la funcionalidad de los polímeros y su proporción entre componentes reactivos, en dependencia directa del solvente almacenado.

1. ANTECEDENTES

En el ámbito nacional, el ingeniero Luis Rosales, plantea en su tesis “Uso de recubrimientos anticorrosivos para la industria” (1981), que las resinas epóxicas catalizadas forman películas de buena resistencia al calor y excelente resistencia a la humedad, a los álcalis y a la abrasión. También afirma que los recubrimientos vinílicos son duraderos, de secado rápido y con excelente resistencia al agua de mar, a los ácidos y álcalis.

Carlos Ortega expone en su investigación “Sistemas de protección a base de recubrimientos y pinturas para uso industrial y marino como herramienta de mantenimiento preventivo” (2008), que para dar un mantenimiento eficiente a base de recubrimientos se debe considerar las condiciones del ambiente, la selección del sistema protector, la correcta preparación de la superficie, la aplicación del sistema y el control del ciclo programado de mantenimiento.

De acuerdo con Jesús González, en su trabajo titulado como “La pintura como inhibidor de corrosión en las estructuras de acero especialmente expuestas y su rendimiento” (2011), se puede obtener un sistema de protección contra la corrosión a través del uso de un sistema a base de pintura. González concluye que al utilizar pintura como recubrimiento inhibidor de corrosión, hay que tener en cuenta la preparación del sustrato, el tipo de pintura y su aplicación; la capa de recubrimiento elegida y el fácil mantenimiento.

Sergio González, como parte de su investigación “Laboratory evaluation of corrosion resistance at metallic substrates by an organic coating: delamination effects” (2011), monitoreó el comportamiento de una imprimación epoxi-

poliamida ante la corrosión, aplicada sobre acero galvanizado. González mantuvo el acero recubierto inmerso en una solución acuosa de cloruro de sodio al 3% en peso. Se examinó un recubrimiento intacto y uno con defectos, pudiendo concluir que el acero con revestimiento defectuoso no sella y no es efectivo para la protección del metal.

Jelena Bajat, dentro de su trabajo titulado como “Adhesion and corrosion resistance of epoxy primers used in the automotive industry” (2011), analizó tres pinturas epóxicas, pudiendo observar diferentes tendencias de adhesión al exponer el metal ante un agente corrosivo (solución de cloruro de sodio al 3%). Además confirmó que al utilizar pintura epóxica pigmentada, se obtiene una mejor protección del sustrato.

Rosa Pla expone en su trabajo “Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación” (2006), que puede utilizarse pintura para proteger entre el 80 y 90% de las superficies, por ser un tipo de aplicación relativamente sencilla y económica. Pla menciona que la pintura formulada con resina epóxica presenta muy buena adherencia a la mayoría de sustratos, alta impermeabilidad y una elevada resistencia química ante la inmersión de muchos productos químicos. Además concluye que la resina y la pintura epoxi presentan una excelente resistencia térmica.

2. MARCO TEÓRICO

La composición de una pintura permite comprender su mecanismo de curado y sus propiedades de desempeño. A continuación se describen los elementos de un recubrimiento y las formas estandarizadas para su evaluación.

2.1. Pinturas y recubrimientos

Una pintura o recubrimiento es una mezcla heterogénea de componentes que una vez aplicada y seca forma una película continua, delgada y sólida; por acción de procedimientos físicos y/o químicos. De acuerdo con Clive Hare, en su libro “Protective coatings”, expone que la finalidad primordial de una pintura es actuar como barrera física entre dos materiales o sustancias reactivas. La pintura está compuesta por una red o matriz polimérica, que le confiere diferentes propiedades de resistencia.

El término pintura en el lenguaje común es uno de los términos más utilizados para revestimientos, esmaltes, acabados, etc. La industria moderna abarca todo refiriéndose a recubrimientos de superficies. Todas las terminologías anteriores denotan diferencias por lo general relacionadas con la utilidad (es decir, acabados, imprimaciones, selladores).

2.1.1. Componentes

Todo recubrimiento se compone de cuatro elementos principales: resina, solvente, pigmento y aditivos. Estos elementos tienen funciones definidas y son comunes en todo tipo de pintura.

2.1.1.1. Resinas o ligantes

Las resinas son el componente principal de todo recubrimiento, se les conoce como aglutinantes o ligantes; en conjunto con los solventes constituyen el vehículo de la pintura. En general, las resinas son polímeros de alta complejidad orgánica. Su capacidad como aglutinante le confiere a la pintura la mayoría de sus propiedades físicas y químicas. La resina constituye la matriz del recubrimiento, la fase continua a la cual se incorporan los otros componentes. Es la principal barrera física que un recubrimiento puede brindar al sustrato y en esencia, es el pegamento que une a la pintura cohesivamente entre sí y adhesivamente al sustrato.

La forma de aplicación, el tiempo de secado, el aspecto, la resistencia al agua, a la abrasión, a la intemperie y a los productos químicos, dependen en gran manera de la resina utilizada en la pintura. Existe una gran variedad de ligantes, desde las colas vegetales y animales, hasta productos de síntesis macromolecular. También las hay de distintas características, desde resinas que secan por simple evaporación de solvente, hasta otras que reaccionan con un agente de curado. Algunas resinas secan a temperatura ambiente y otras requieren de una fuente de calor. En cada caso se buscan las características deseadas para la película que formará el ligante.

Los recubrimientos generalmente son nombrados según el nombre genérico de la resina que contienen. Las más utilizadas son: emulsiones acrílicas y vinílicas, alquídicas, fenólicas, bituminosas, con caucho clorado, epóxicas, poliuretanos, breas, siliconas y nitrocelulósicas.

2.1.1.2. Solventes

Los solventes se usan para hacer posible la aplicación del recubrimiento. En los sistemas con curado químico, el volumen de solvente también controla la reactividad del sistema, al impedir el acceso entre sí, de los componentes químicamente reactivos antes y durante del proceso de aplicación. Los sistemas de solventes generalmente son mezclas de diferentes solventes, diseñados para facilitar el manejo de la pintura y mejorar las propiedades de la película sólida, en función de sus respectivas presiones de vapor.

La función de los solventes es darle a la pintura la viscosidad óptima y solubilizar las resinas, otra característica de los solventes es su volatilidad, por lo que no forman parte de la matriz polimérica; para elegir un solvente se consideran sus propiedades de disolución, temperatura de ebullición, velocidad de evaporación, flamabilidad y estabilidad química. Los solventes más utilizados son hidrocarburos alifáticos y aromáticos, los solventes oxigenados suelen utilizarse por su polaridad. Los más comunes son los alcoholes como el metanol, etanol, isopropanol, butanol y los ésteres como el acetato de etilo, butilo y amilo; las cetonas como la metil y etil acetona, el agua se utiliza cuando la pintura es una emulsión.

2.1.1.3. Pigmentos

Los pigmentos son compuestos orgánicos o inorgánicos cuya misión es proporcionar color y poder cubriente a la pintura, son sólidos y pueden agregarse a la pintura de forma individual o como mezcla, al estar dispersos en el vehículo, los pigmentos imparten propiedades de resistencia mecánica y a la corrosión a la matriz polimérica. Una de las relaciones más críticas en la tecnología de pinturas es la relación de volumen entre el pigmento y el vehículo.

Los pigmentos pueden ser de origen natural o sintético. Un pigmento cubriente es aquel que debido a su opacidad, es capaz de cubrir una superficie. Un pigmento anticorrosivo es aquel que luego de reducir su tamaño de partícula y estar disperso en el vehículo, es capaz de inhibir la corrosión de los metales ferrosos, entre las características deseadas de un pigmento están: que no reaccione con la resina, que sea de fácil humectación y dispersión, que posea alta resistencia al calor, a la luz y a los agentes químicos. Dentro de la amplia gama de pigmentos, también están las denominadas “cargas” o materiales de relleno, pues permiten aumentar la cantidad de sólidos por volumen de la pintura, a un precio razonable. Entre las cargas más comunes se encuentra el carbonato de calcio, el sulfato de bario, la mica, sales fosfatadas, entre otros.

La mayoría de pigmentos son inorgánicos, tal como los óxidos y los silicatos. El dióxido de titanio, negro de humo y óxido de hierro añaden color y opacidad a la pintura, algunos pigmentos protegen a los vehículos que son sensibles a la luz, de los efectos de la radiación ultravioleta. Existen pigmentos que le dan a la pintura propiedades de retardancia al fuego.

2.1.1.4. Aditivos

En adición a la resina, solvente y pigmento, existen numerosos subcomponentes en una pintura, estos subcomponentes son los aditivos, los cuales varían en función del tipo de vehículo y del uso deseado para el recubrimiento; entre los aditivos más comunes se utilizan los compuestos que modifican la consistencia de la pintura y las propiedades de sedimentación de los pigmentos; plastificantes para controlar la flexibilidad del recubrimiento, espesantes, antiespumantes, antioxidantes, secantes, catalizadores, dispersantes, biocidas, agentes coalescentes, estabilizantes ante el calor y la luz ultravioleta.

2.1.2. Fabricación

La primera de las fases para la fabricación de pinturas corresponde al proceso de mezcla, en ella, se homogenizan las resinas, se añade una porción de los solventes y los aditivos; posteriormente se añaden los pigmentos, durante un proceso de dispersión, de modo que se genera una mezcla pastosa con agitación de alta velocidad y fuerte tensión de corte, que permite romper los agregados de pigmento.

En algunos casos, la siguiente fase productiva consiste en la molienda del producto obtenido en la fase anterior, con esta operación unitaria se obtiene un tamaño de partícula homogéneo y lo suficientemente pequeño para obtener las características de textura, cubrimiento y color deseadas; la tercera fase consiste en la dilución de la pasta molida, manteniendo la agitación y agregando el resto de los componentes de la fórmula. La última etapa consiste en ajustar la viscosidad de la pintura. Luego de la fabricación, se procede a la evaluación de la pintura, para verificar sus propiedades (viscosidad, color, fineza, densidad, poder cubriente, rendimiento, entre otros).

2.1.3. Funciones

La principal función de las pinturas es proteger la superficie que recubren. La utilización de recubrimientos evita el deterioro significativo producido por las condiciones que rodean a la superficie de interés, pudiendo ser utilizados en obras industriales, arquitectónicas, marinas y otras. Además, las pinturas cumplen con el fin de decorar ambientes, mediante la combinación de brillos, colores y texturas de acabados. Las pinturas son utilizadas para identificar y señalizar tuberías, maquinaria, calles, autopistas, etc.

2.2. Clasificación de los recubrimientos

Los recubrimientos pueden dividirse en grupos, según diferentes categorías. Estas categorías se relacionan con el tipo de sustrato que recubrirá la pintura, con la ubicación física del sustrato y las condiciones circundantes, según las condiciones de uso que se les vaya a dar a las pinturas (si estarán expuestas con sustancias, materiales abrasivos, si serán lavadas frecuentemente), o bien, según el mecanismo de polimerización de las pinturas.

2.2.1. Sistemas de pinturas

Cuando el objetivo principal de la aplicación de pintura es proteger una superficie, puede no ser suficiente emplear un solo recubrimiento, por lo que se aplican dos o más capas de pinturas con características diferentes. A esto se le denomina sistema de pintura. La conformación más común de un sistema de pintura consiste en un recubrimiento primario, uno intermedio y un acabado.

El recubrimiento primario, imprimación o recubrimiento de fondo es el más importante de todos en un sistema de pinturas; debe tener propiedades de alta adherencia con el sustrato y con las capas subsiguientes. Además, debe contar con estabilidad química, compatibilidad con el recubrimiento posterior y flexibilidad, los recubrimientos intermedios suelen tener buenas propiedades fisicoquímicas debido a que la relación pigmento-aglutinante es alta, sin embargo no presentan buena apariencia final. Los recubrimientos de acabado se caracterizan por su buena presentación visual; además debe actuar como una barrera para el medio circundante, aportando resistencia al agua, a los agentes químicos y al ambiente.

2.2.2. Según el ambiente circundante

Las pinturas deben tener propiedades específicas de resistencia, según el medio que las rodee y/o las sustancias que estarán en contacto con ellas, por ello existen recubrimientos para interiores y exteriores.

2.2.2.1. Interiores

A las pinturas que deben aplicarse en un ambiente cerrado y/o donde no hay condiciones atmosféricas, se le denomina recubrimientos interiores, tal es el caso de los recubrimientos internos de tanques, los cuales deben formularse para resistir el contacto con las sustancias que serán almacenadas.

2.2.2.2. Exteriores

Muchas pinturas deben aplicarse en un medio expuesto a las condiciones atmosféricas: luz solar, lluvia, brisa, agua marina, viento, entre otras, a las pinturas que deben soportar estas condiciones se les denomina recubrimientos exteriores, por ende, deben estar formulados para evitar la degradación ante la radiación ultravioleta, el intemperismo, la corrosión atmosférica, abrasión, etc.

2.2.3. Campo de aplicación

El fin deseado para una pintura da origen a toda una gama de ellas, según el ámbito en que se apliquen las pinturas, o el propósito que tengan, pueden ser arquitectónicas, de protección y mantenimiento industrial.

2.2.3.1. Arquitectónicas

Este tipo de pinturas se aplica para recubrir y proteger paredes, pisos, techos, puertas, etc., se utiliza en residencias, oficinas y para decoración, las hay para interiores y exteriores. Generalmente se utilizan brochas, rodillos y pistolas de aire para su aplicación.

2.2.3.2. De protección industrial

En este grupo se encuentran las pinturas que se aplican para proteger estructuras, con el fin de prevenir el ataque de los agentes atmosféricos y/o de los contaminantes industriales. Al tratarse específicamente de recubrimientos para metal, la pintura debe proteger al sustrato de diferentes condiciones para evitar la degradación de la película y por ende, el daño de la superficie.

2.2.3.2.1. Resistencia a la corrosión

La corrosión del hierro y otros metales es un proceso en el cual el metal es atacado químicamente por alguna sustancia de su entorno para producir un compuesto metálico no deseado, degradando así la superficie, la corrosión o enmohecimiento del hierro tiene importantes repercusiones económicas. Este deterioro del metal requiere oxígeno y agua, otros factores, como el pH de la solución en contacto con el metal y la presencia de sales aceleran la corrosión.

La corrosión es un proceso electroquímico favorable en el aire a temperatura ambiente. Por tanto debe inhibirse con una barrera que proteja al sustrato metálico. Una capa de pintura puede prevenir la corrosión, pues impide que el oxígeno y el agua alcancen la superficie del metal.

2.2.3.2.2. Resistencia química

El recubrimiento de un metal debe ser capaz de soportar el contacto con oxígeno y otros componentes oxidantes reductores, ácidos y álcalis, alcoholes, compuestos orgánicos, la resistencia que el recubrimiento presente ante estos atacantes químicos le permitirá proteger al metal de la degradación.

2.2.3.2.3. Resistencia al intemperismo

Un recubrimiento de metal debe ser formulado para resistir la radiación ultravioleta, específicamente para ambientes a la intemperie, pues este tipo de radiación puede degradar la matriz polimérica de la pintura y dejar al sustrato expuesto a los efectos negativos de la luz solar. Además, el recubrimiento debe ser resistente ante la exposición con el agua, el viento u otras condiciones específicas del entorno.

2.2.3.3. Mantenimiento industrial

Las pinturas usadas en mantenimiento industrial son un variado grupo, que generalmente son de secado al aire, dado que considerable cantidad de pintura es aplicada sobre objetos, piezas y maquinarias que no se pueden trasladar o son demasiado grandes para el secado en un horno, ejemplo de estas pinturas son: interior y exterior de edificios industriales, líneas de tráfico sobre pavimento, equipos para la construcción, etc.

2.2.4. Proceso de curado

El proceso de curado consiste en la formación de la película sólida, la polimerización obedece a mecanismos diferentes, o una combinación de ellos.

2.2.4.1. Evaporación del solvente

La resina, formadora de la película, queda expuesta sobre la superficie luego de la evaporación del solvente de la pintura, dentro de este mecanismo se encuentran las pinturas vinílicas, nitrocelulósicas, acrílicas y del caucho.

2.2.4.2. Secado por oxidación

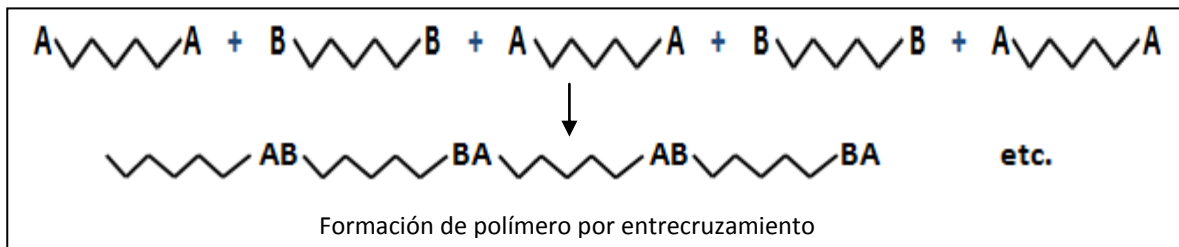
La película se forma como resultado de la reacción del ligante de la pintura con el oxígeno del aire, es una polimerización de tipo auto-oxidante. Pertenecen a este grupo las pinturas con resinas de aceites secantes y resinas alquídicas; en este tipo de pinturas es común utilizar catalizadores, para acelerar el proceso de secado de las pinturas. Estos catalizadores consisten en sales metálicas, generalmente de zirconio, manganeso y calcio.

2.2.4.3. Polimerización por reacción química

El polímero se forma como el producto de la reacción química entre dos o más componentes de la pintura, las pinturas que curan por reacción química suelen utilizarse para el mantenimiento industrial de alto rendimiento. Dentro de este grupo se encuentran las pinturas con resinas epóxicas y de poliuretano, el proceso de curado se da por la reacción entre la resina de la pintura y un agente de curado. Si la reacción química toma lugar a temperatura ambiente, las dos resinas reactivas deben ser empacadas separadamente como un sistema de dos componentes y ser mezcladas justo antes de su aplicación, la reacción procederá inmediatamente y la aplicación debe ser completada dentro de un período finito de tiempo.

Las dos resinas que reaccionan poseen grupos reactivos complementarios en sus moléculas, el esquema general del proceso de curado por reacción química es el siguiente:

Figura 1. **Proceso de curado por polimerización por reacción química**



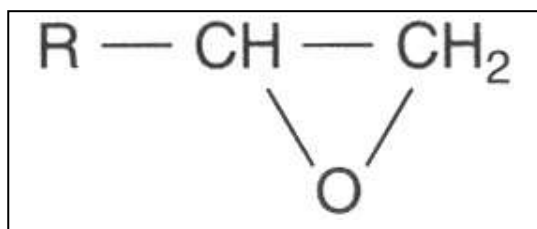
Fuente: Hare, Clive. *Protective coatings*. p. 49.

Dentro de esta clasificación también se incluyen las pinturas que curan por acción de las altas temperaturas, como las pinturas horneables, una vez aplicadas, requieren de calor para poder curar; estas pinturas son usadas en los acabados para la industria metalmeccánica y automotriz.

2.3. Recubrimientos epóxicos

Las pinturas epóxicas se caracterizan por su alta capacidad de adhesión. Pueden ser utilizadas en recubrimientos con curado a temperatura ambiente, en sistemas de altas temperaturas, o bien, como recubrimientos en polvo, en todos los casos, la resina epóxica le da a la pintura buenas propiedades de adhesión, resistencia a la corrosión, a los químicos y al calor, además de excelentes propiedades mecánicas y físicas. El grupo epóxico, o grupo oxirano de la resina tiene la siguiente forma:

Figura 2. **Grupo epóxico u oxirano**



Fuente: Hare, Clive. *Protective coatings*. p. 188.

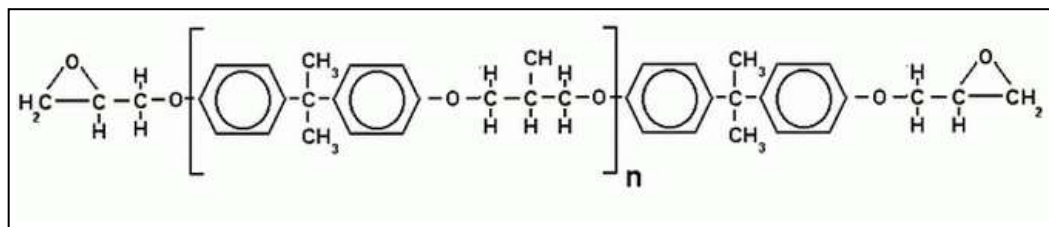
2.3.1. Resinas epóxicas

De manera general, un recubrimiento epóxico es aquel en el que un anillo epoxídico o grupo oxirano juega el papel en la síntesis del aglutinante o en curado, la mayoría de resinas epoxi se basan en los productos de condensación del bisfenol A (difenilolpropano) con la epiclorhidrina, en presencia de un agente des-hidrohalogenante, como el hidróxido de sodio. Esta reacción es conocida como el proceso Taffy, el cual se utiliza para producir resinas epóxicas de bajo peso molecular.

2.3.1.1. Derivadas del bisfenol A

El grupo oxirano es capaz de reaccionar con hidrógenos amínicos, tioles, ácidos carboxílicos, ésteres de cianato e isocianato, también reacciona con aminas alifáticas y aromáticas, amidas, polisulfuros, especies fenólicas, entre otro, las resinas epóxicas derivadas del bisfenol A pueden tener pesos moleculares delimitados por rangos: bajo (350-380), mediano (350-600), alto (900-985) y muy alto (15 000-50 000), según la relación molar entre el bisfenol A y la epiclorhidrina. Las resinas derivadas del bisfenol A tienen la estructura molecular mostrada en la siguiente figura.

Figura 3. Resina derivada del bisfenol A

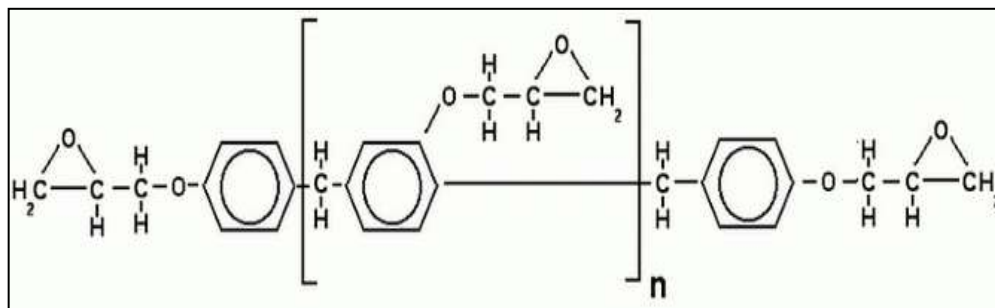


Fuente: Hare, Clive. *Protective coatings*. p. 192.

2.3.1.2. Derivadas del bisfenol F

Existen resinas epóxicas derivadas del bisfenol F (éter diglicídico) con la epiclorhidrina. Estas resinas son menos viscosas (3 000-8 000 cps) que las provenientes del bisfenol A (11 000-16 000 cps), los recubrimientos con resinas epóxicas basadas en el bisfenol F son utilizadas en la actualidad en barcos, puentes, tanques, contenedores, entre otros. Este tipo de resinas tiene la siguiente forma:

Figura 4. Resina derivada del bisfenol F



Fuente: Hare, Clive. *Protective coatings*. p. 194.

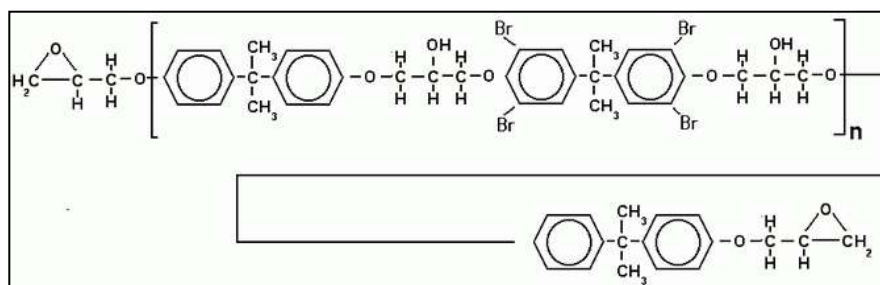
2.3.1.3. Epóxicas fenólicas novolacs

Mientras aumenta la demanda por resistencia química extrema de los recubrimientos, se incrementa el uso de resinas epóxicas multifuncionales que poseen densidades más altas de entrecruzamiento, las resinas epoxi fenólicas novolacs son preparadas por la epoxidación de las resinas fenólicas novolac con epiclorohidrina, estas resinas poseen gran viscosidad; sus estructuras dan origen a polímeros rígidos con gran entrecruzamiento; poseen elevada resistencia al calor y a los compuestos químicos, al ser comparadas con las resinas derivadas del bisfenol A y del bisfenol F.

2.3.1.4. Modificadas

Este grupo abarca a las resinas epóxicas poliglicólicas y a las basadas en cardanol, existen las variedades epoxi acriladas, derivadas del alquitrán, modificadas con caucho y en emulsión con agua. Las resinas bromadas son a base de epiclorohidrina y tetrabromobisfenol A; tienen la siguiente forma.

Figura 5. Resina epoxi modificada



Fuente: Hare, Clive. *Protective coatings*. p. 201.

2.3.2. Agentes de curado

Los agentes de curado son resinas que poseen nitrógeno dentro de su estructura y que reaccionan con la resina epóxica, para dar origen a la polimerización y por ende, a la formación de la película, a continuación se describen los agentes curantes más utilizados.

2.3.2.1. Aminas

Las resinas epóxicas que curan con aminas son las más utilizadas para recubrimientos de aplicaciones de mantenimiento, estas resinas incluyen a las especies amidas y amido-amina para el entrecruzamiento. Estos agentes de curado reaccionan rápidamente, todas las reacciones de resinas epoxi que curan con aminas se basan en la apertura del anillo oxirano con los hidrógenos activos de la amina; adicionalmente, la estructura molecular del agente curante y la naturaleza del hidrógeno amínico afecta la velocidad de reacción. Estos sistemas son bicomponentes y curan a temperatura ambiente.

2.3.2.2. Poliaminas alquílicas

Otros sistemas de curado utilizan poliaminas alifáticas no modificadas, alquílicas, tal como la dietilén triamina, trietilén tetramina y tetraetilén pentamina, cada una de estas resinas tiene dos hidrógenos primarios; y tres, cuatro y cinco hidrógenos secundarios, respectivamente, cuando el hidrógeno primario reacciona con el grupo oxirano, se forman aminas primarias. Cuando las aminas secundarias reaccionan, se obtienen aminas terciarias. Las películas que se forman poseen un entrecruzamiento muy unido y por ende, presentan alta resistencia química. Este tipo de aminas se volatiliza, reacciona con el

dióxido de carbono y la humedad, formando un carbonato que produce pérdidas de brillo, de adhesión y amarillamiento.

Las aminas alifáticas también funcionan como agentes de curado. Sin embargo, también poseen una alta presión de vapor. Suelen utilizarse como precursores en la preparación de agentes curantes como amido-aminas.

2.3.2.3. Poliamidas

Las resinas poliamídicas se producen por la pre-condensación de una amina primaria con un ácido dímero. Los ácidos dímeros son mezclas de ácidos grasos que han sido obtenidos por una polimerización catalítica del aceite de soya y/o de castor, luego del entrecruzamiento entre las resinas epóxica y poliamídica, se obtiene una película con alta resistencia química.

Sin embargo, las poliamidas poseen resistencia limitada a los ácidos oxidantes, ácidos minerales fuertes y ácidos orgánicos concentrados, la resistencia al agua y a la corrosión se incrementa en relación a las películas curadas con aminas; esta mejora se debe a la mayor adherencia otorgada por los enlaces amídicos.

Las películas pueden ser limpiadas con vapor o detergentes sin deteriorarse. La resistencia a las altas temperaturas no es tan buena como con las aminas aromáticas. Sin embargo, la resistencia con temperaturas por debajo de los 149 °C es buena.

Las películas formadas por los sistemas epoxi-poliamidas son de alto peso molecular, las relaciones estequiométrica con resinas de peso molecular mediano puede variar con la poliamida que se utilice, la vida útil luego de

mezcladas las resinas, o *pot life*, varía generalmente entre 6 y 12 horas. Este tipo de pinturas puede ser utilizado para el tratamiento y almacenamiento de agua, procesamiento de comidas y bebidas, transporte y manufactura en general, se utilizan en barcos, puentes, tuberías, interiores de tanques, pisos, paredes, en acero, aluminio y concreto.

Las aminas cicloalifáticas también pueden ser utilizadas como agentes curantes de las resinas epoxi. Son útiles para recubrimientos con bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles, son líquidas a temperatura ambiente. Si no se modifican, las aminas cicloalifáticas requieren de altas temperaturas para curar, por su parte, las aminas aromáticas producen polímeros rígidos al reaccionar con la resina epóxica, la resistencia física, química y al calor es mayor comparada con la de las aminas alifáticas. Las aminas aromáticas son generalmente materiales sólidos que requieren temperaturas de hasta 200 °C para curar.

2.3.3. Preparación del sustrato

El objetivo de la preparación del sustrato es mejorar la adherencia del recubrimiento a la superficie. Mientras más rugosa y limpia esté, habrá más sitios disponibles para la creación de enlaces polares entre la capa y la superficie. La preparación de la superficie consiste en la limpieza de materiales extraños que reduzcan la adherencia entre el sustrato y el recubrimiento, tal como polvo, grasa, aceite, herrumbre, óxido, restos de pintura, etc. La limpieza puede ser: con solventes, manual, mecánica, con flama, con chorro abrasivo a presión, por reacción química y/o por agentes atmosféricos.

Los recubrimientos internos para tanques sirven para proteger al sustrato del contenido del tanque o viceversa. Por ello, la preparación del acero de un

tanque es vital para poder aplicar el recubrimiento. El *sandblast* es un término en inglés que proviene de los vocablos *sand*, o arena y *blast*, que significa ráfaga o chorro. Este es el tratamiento obligatorio para la preparación del acero, pues permite limpiar el metal por la acción de una sustancia abrasiva (arena) expulsada en un chorro a presión, mediante el uso de un compresor. Esta técnica sirve para remover óxido, escamas de laminación y recubrimientos aplicados con anterioridad. Con el *sandblasting* se obtiene una superficie gris o blanquecina, con un patrón adecuado de anclaje para el recubrimiento.

Según la National Association of Corrosion Engineers (NACE), existen cuatro grados de preparación de superficie por *sandblasting*. Según The Society of Protective Coatings (SSPC), existen estándares de las preparaciones de superficie, equivalentes con los de NACE.

El primer estándar de la NACE corresponde a la limpieza con chorro abrasivo grado metal blanco. El NACE-1 garantiza una limpieza total, removiendo la grasa, aceite, suciedad, óxido, escamas de laminación, productos de la corrosión, pintura y cualquier otro material extraño. Una superficie tratada con este método, presenta un uniforme color gris claro, rugoso, que proporciona un excelente anclaje a los recubrimientos. El NACE-1 es equivalente al SSPC-SP5.

El NACE-2, equivalente al SSPC-SP10, corresponde a la limpieza con chorro abrasivo en grado de metal casi blanco. La superficie debe tener un color gris claro y deben eliminarse sombras de oxidación visibles en un 95%. El NACE-3, equivalente al SSPC-SP6, indica un grado comercial de limpieza por chorro abrasivo, en el cual se permiten sombras, rayas o decoloraciones causadas por manchas de óxidos, siempre que estas no rebasen la tercera parte de la superficie. El NACE-4 corresponde al SSPC-SP-7, indica una

limpieza con chorro abrasivo en grado ráfaga que permite que algunas partículas incrustantes y pintura no sean eliminadas del sustrato.

2.3.4. Métodos de aplicación

Con cualquier método de aplicación de pintura es indispensable conocer las condiciones del sustrato por recubrir, incluyendo su rugosidad y geometría. Para la aplicación con brocha se debe seleccionar adecuadamente el tamaño y tipo de cerda, el rodillo se utiliza para obtener una aplicación más rápida, una película homogénea y densa; cuanto más rugosa sea la superficie por recubrir, las fibras del rodillo deberán ser más largas.

El rociado o *spray* requiere de una pistola y un compresor. El aire traslada la pintura a la tobera de la pistola y luego hacia la superficie por pintar, el método de rociado sin aire se utiliza para recubrir grandes superficies en poco tiempo y con un rocío de exceso mínimo. La pintura pasa por un orificio muy pequeño, a presiones muy altas. La aplicación electrostática es un método en el cual las partículas de pintura cargadas eléctricamente se adhieren a la superficie por pintar. Las partículas pulverizadas de pintura permanecen adheridas por carga estática. Luego se procede a un horneado, para que la pintura se polimerice, como una película continua.

Otro de los métodos conocidos para la aplicación de pinturas es el de inmersión, este método permite abarcar toda la superficie del objeto que se desea pintar, siendo útil para evitar el apareamiento de fallas en el recubrimiento a causa de límites (apareamiento de corrosión en las orillas no recubiertas por ejemplo).

2.4. Normas ASTM para la evaluación de recubrimientos

La ASTM International, conocida como la American Society for Testing and Materials, se dedica al desarrollo y distribución de estándares internacionales, estos estándares se utilizan en todo el mundo para mejorar la calidad y seguridad de los productos, facilitar el acceso al mercado y al comercio, así como fortalecer la confianza de los consumidores. Hoy en día, ASTM International tiene cientos de normas para la industria de pinturas. Entre ellas, existen algunas útiles para la evaluación de recubrimientos.

2.4.1. Propiedades fisicoquímicas de diseño

Las propiedades fisicoquímicas de diseño de una pintura pueden ser evaluadas a través de normas específicas, de este modo, se puede comprobar si una pintura recién formulada cumple con los parámetros de aceptación.

2.4.1.1. Densidad

La Norma ASTM D 1475 permite determinar la densidad a una temperatura definida, para ello se utiliza un picnómetro para pinturas. Este picnómetro es conocido comúnmente como copa de peso por galón.

2.4.1.2. Viscosidad

La Norma ASTM D 562 permite expresar la consistencia de las pinturas en unidades Krebs. El equipo de medición es un viscosímetro tipo Stormer.

2.4.1.3. Brillo

La Norma ASTM D 523 establece el uso de un brillómetro, el cual consiste en una lámpara incandescente que proyecta un haz de luz. Se mide la reflectancia luminosa de la pintura, mediante la comparación con un estándar de vidrio negro, el método se realiza con un ángulo geométrico de 60°.

2.4.1.4. Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)

La Norma ASTM D 3960 permite determinar el contenido de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) de las pinturas; este tipo de compuestos participan en reacciones atmosféricas fotoquímicas, el COV se determina en función de la cantidad de agua y de compuestos sólidos orgánicos que no participan en las reacciones fotoquímicas, y la cantidad de sólidos o material no volátil.

2.4.1.5. Ecurrimiento (*sagging*)

La Norma ASTM D 4400 permite determinar el grado de escurrimiento de una pintura, mediante la utilización de un aplicador con varias muescas. Mediante aplicaciones en lenetas, se obtiene un patrón de escurrimiento que puede relacionarse con una escala para cuantificar el índice de anti-*sagging*.

2.4.1.6. Grado de dispersión

La Norma ASTM D 1210 permite determinar el grado de dispersión de una pintura. Normalmente, el pigmento de una pintura es dispersado en el vehículo mediante molienda, para romper los aglomerados del pigmento, esta norma sirve para establecer si dichos aglomerados han sido separados suficientemente como para que no interfieran con la apariencia y homogeneidad

final del recubrimiento, se utiliza un indicador de acero con disminución gradual de nivel por el que se extiende la pintura. Se observa el patrón de dispersión de las partículas y se lee el nivel en la escala Hegman.

2.4.1.7. Sólidos por peso

La Norma ASTM D 2369 permite establecer el contenido de materia no volátil de un recubrimiento, con respecto de la masa total, para ello, se hace uso de una charola de aluminio, en donde se pesa una cantidad conocida de muestra de pintura, luego se procede a calentar la muestra, en el mismo equipo en donde se pesa la muestra. Después de transcurrido el tiempo estipulado para el calentamiento, se obtiene el valor porcentual del contenido de no volátiles (el contenido de componentes volátiles se calcula por diferencias).

2.4.2. Propiedades fisicoquímicas durante su aplicación

La evaluación de propiedades de la pintura al momento de aplicarla puede ser realizada con Normas ASTM. La Norma ASTM D 1200 se utiliza para medir el tiempo que tarda la pintura en fluir a través de una Copa Ford, a una temperatura definida, el dato registrado en segundos puede ser convertido en unidades de viscosidad cinemática (centi Stokes) según indica la norma.

2.4.3. Propiedades físicas de la película

La película sólida puede ser evaluada en cuanto a ciertas características de resistencia física. Para realizar las pruebas, la pintura debe estar completamente seca y el proceso de curado finalizado.

2.4.3.1. Adherencia

Mediante la Norma ASTM D 3359 es posible determinar la adherencia porcentual de un recubrimiento al sustrato metálico, realizando cortes sobre la pintura con un patrón cuadrulado, para luego colocar y remover cinta adhesiva. Se establece así el nivel de adherencia, mediante comparaciones con ilustraciones mostradas en la norma.

2.4.3.2. Resistencia al impacto

La Norma ASTM D 2794 permite establecer la resistencia de una película de recubrimiento a los efectos de la deformación rápida. Los recubrimientos se aplican sobre paneles de acero, luego del proceso de curado, se deja caer un peso estándar sobre el panel, con el objetivo de deformar el recubrimiento y el sustrato. Luego de varias caídas del peso a diferentes distancias, se establece el punto en el que aparecen fisuras, reportando valores de libras-pulgadas.

2.4.3.3. Flexibilidad

La Norma ASTM D 522 permite establecer la resistencia de una película de recubrimiento a la aparición de fisuras, o la flexibilidad de la película sobre un sustrato metálico, los recubrimientos se aplican sobre paneles de acero. Luego del proceso de curado, los paneles se doblan sobre un mandrel para determinar la resistencia al agrietamiento.

2.4.3.4. Espesor

La Norma ASTM D 1005 permite establecer el espesor de la película seca de pintura. Para ello se utilizan micrómetros, realizando una serie de lecturas.

2.4.3.5. Dureza

La Norma ASTM D 3363 permite establecer la dureza de la película de un recubrimiento, haciendo uso de lápices con diferentes durezas de mina de grafito. La prueba consiste en colocar un panel recubierto de manera horizontal y sobre una superficie rígida. Se inclina el lápiz a 45° con respecto de la horizontal y se desliza sobre el panel. Se reporta la dureza del lápiz que no logra romper ni rayar la película.

2.5.4. Desempeño de los recubrimientos

La Norma ASTM D 1735 se utiliza para establecer la resistencia de los recubrimientos al agua. Para ello, se miden y controlan las condiciones de una cámara de inmersión. Al final de la prueba se reportan fallas en los recubrimientos: cambios de color, ampollas, pérdida de adhesión, pérdida de dureza y fragilidad. La Norma ASTM D 6943 indica que los paneles metálicos recubiertos deben ser expuestos directamente con el solvente de interés. Se inspeccionan los recubrimientos en búsqueda de ampollas, corrosión, levantamientos, decoloraciones y cambios de brillo.

3. METODOLOGÍA

Como parte de la metodología, se procedió a la cuantificación de las variables de respuesta, producto de las evaluaciones realizadas a los recubrimientos. En general, las variables corresponden a las propiedades físicas, químicas y de desempeño de las mezclas epóxicas-poliamida.

3.1. Descripción de variables

Las variables independientes, tales como el tipo de resina epóxica utilizada, junto con las variables dependientes, fueron tabuladas, para facilitar el orden secuencial de las evaluaciones. A continuación se describen las variables brevemente.

Tabla I. Descripción de variables

Variables independientes			
Nombre	Símbolo	Unidades	Descripción
Resina Epóxica	RE	-	Resina derivada de bisfenol A o Epóxica fenólica.
Proporción de Resinas	PR	-	5 proporciones másicas para pruebas de desempeño.
Compuesto Químico de Inmersión	CQ	-	Solventes para pruebas de desempeño: agua, etanol, xileno, gasolina, ácido clorhídrico e hidróxido de sodio al 5% de concentración.

Continuación de la tabla I.

Variables dependientes				
	Nombre	Símbolo	Unidades	Descripción
Fisicoquímicas	Densidad	ρ	lb/gal	Peso por galón de las mezclas.
	Viscosidad	μ	KU	Propiedad reológica de las pinturas.
	Brillo	B	%	En ángulo geométrico de 60°.
	Compuestos Orgánicos Volátiles	COV	g COV/L	Compuestos que pueden participar en reacciones fotoquímicas.
	<i>Sagging</i>	S	-	Grado de escurrimiento.
	Grado de dispersión	GD	H	Grado de fineza (tamaño de partícula) de los recubrimientos.
	Sólidos por peso	SP	%	Contenido másico de materia no volátil.
	Tiempo de secado	T	min	Tiempo requerido para el secado de la pintura al tacto.
	<i>Pot life</i>	PL	min	Vida útil de la pintura luego de mezclar las resinas.
De película	Adherencia	A	%	Grado de adhesión al sustrato.
	Resistencia al Impacto	RI	lb-in	Capacidad de resistir los efectos de deformación rápida.
	Flexibilidad	F	in	Resistencia al agrietamiento.
	Espesor	E	mil	Espesor de película seca.
	Dureza	D	-	Resistencia de la película a ser rayada.
	Viscosidad cinemática	α	s	Tiempo que tarda una pintura en fluir a través de una copa Ford # 4.
	Desempeño de Recubrimientos	-	h	Comportamiento de la pintura al contacto prolongado con el CQ.
	Grado de oxidación	GO	-	Calificación de la oxidación luego de determinado tiempo.
	Grado de ampollamiento	GA	-	Calificación de las ampollas presentes en un recubrimiento.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El estudio estuvo delimitado por las variables mencionadas anteriormente. Se formularon dos tipos de pintura, en función de la composición química de la resina epóxica, de entre todos los tipos disponibles a nivel comercial. Se realizaron cinco combinaciones másicas entre las resinas epóxica y poliamídica. Este tipo de variación permitió establecer cuál es la relación másica entre resinas que brinda al recubrimiento las mejores propiedades de resistencia, ante diferentes condiciones de servicio de un tanque.

Para realizar las pruebas de desempeño de los diferentes recubrimientos se varió la sustancia química en contacto directo con la pintura. Por ende, se seleccionaron seis solventes representativos de la industria general, para simular el almacenamiento de los mismos en un tanque de acero. Los solventes genéricos de prueba fueron: agua, etanol (alcohol), ácido clorhídrico (ácido), hidróxido de sodio (álcali), xileno (solvente aromático) y gasolina (mezcla de hidrocarburos).

3.3. Recursos humanos disponibles

A continuación se enlista el recurso humano de apoyo para el desarrollo de la investigación.

- Investigadora: Vivian Salazar
- Encargado de la empresa: Lic. Franz Barrios
- Asesora y supervisora docente: Inga. Lorena Pineda
- Asesora técnica: Inga. María de los Ángeles Rivas
- Director de Escuela de Ingeniería Química: Ing. Williams Álvarez

3.4. Recursos materiales disponibles

Se dispuso de resinas, pigmentos, cargas, solventes, aditivos, instrumentos de medición y otros materiales para realizar las evaluaciones de los recubrimientos, se contó también con varios materiales para la aplicación de las pinturas; a continuación se detallan los materiales utilizados.

3.4.1. Materia prima de pinturas (polímeros)

A continuación se enlista la materia prima utilizada para la elaboración de las pinturas durante la fase experimental del proyecto.

- Resina derivada del bisfenol A
- Resina epóxica fenólica
- Resina poliamida

3.4.2. Reactivos

Durante la fase experimental se utilizaron varios reactivos dentro de la formulación de las pinturas, estos componentes se enlistan a continuación.

- Dióxido de titanio
- Fosfato de zinc
- Silicato de magnesio
- Carbonato de calcio
- Bentonitas
- Sílica amorfa
- Ácido clorhídrico
- Hidróxido de sodio

3.4.3. Solventes

Para ajustar la viscosidad y las propiedades de aplicación de las pinturas se utilizó el siguiente conjunto de solventes orgánicos. Estos se enlistan a continuación.

- Butanol
- Xileno
- Tolueno
- Solvesso 100 (mezcla de solventes aromáticos)
- Butil acetato

3.4.4. Equipos de preparación de pinturas

Los siguientes equipos fueron utilizados para la fabricación de las muestras de pintura analizadas.

- Mezclador
- Dispensor
- Propelas de mezcla
- Discos de dispersión

3.4.5. Equipos de aplicación de pinturas

Para la aplicación de los recubrimientos epóxicos se contó con los siguientes utensilios.

- Pistola de aire
- Brochas

3.4.6. Sustratos para los recubrimientos

Las superficies en las que se aplicaron los recubrimientos epóxicos se enlistan a continuación.

- Paneles de acero
- Láminas galvanizadas
- Lenetas

3.4.7. Cristalería y accesorios

A continuación se enlistan los utensilios de laboratorio utilizados para la elaboración de los recubrimientos epóxicos.

- Beakers
- Probetas
- Espátula

3.4.8. Instrumentos para las evaluaciones

Para realizar las evaluaciones dictadas por las normas ASTM se utilizaron los siguientes artículos.

- Cámaras de inmersión
- Viscosímetro tipo Stormer
- Mandrel de flexibilidad
- Equipo Gardner de impacto
- Portaminas y minas de grafito con dureza desde 10H hasta 7B
- Grindómetro

- Medidor de pot life
- Medidor de secado por arrastre
- Medidor de sólidos masa
- Picnómetro
- Brillómetro
- Aplicador 3 y 6 mil
- Aplicador tipo sag
- Aplicador NYPC N-1
- Aplicador cúbico de 3 mil
- Micrómetro

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

Las evaluaciones de los recubrimientos fueron cuali-cuantitativas. Para la obtención de los resultados se utilizaron métodos estandarizados (ASTM). A continuación se enlistan las propiedades medidas, junto con la norma de referencia.

3.5.1. Pruebas de diseño de las formulaciones

A continuación se enlistan las propiedades que fueron medidas a la pintura para determinar sus condiciones iniciales.

- Densidad del recubrimiento (lb/gal): ASTM D 1475
- Propiedades reológicas (KU): ASTM D 562
- Brillo (%): ASTM D 523
- Sólidos por peso (%): ASTM D 2369
- Contenido de compuestos orgánicos volátiles (mg/L): ASTM D 3960
- Nivelación (mil): ASTM D 4062 y NYPC-44

- Escurrimiento o sagging: ASTM D 4400
- Tiempo de secado (min): ASTM D 5895
- Fineza de grano (H): ASTM D 1210

3.5.2. Pruebas físicas de los recubrimientos

A continuación se enlistan las evaluaciones realizadas a la matriz polimérica de los recubrimientos epóxicos.

- Adherencia al sustrato (%): ASTM D 3359
- Resistencia al impacto (lb-in): ASTM D 2794
- Resistencia a la fisuración, flexibilidad (in): ASTM D 522
- Espesor de película (mil): ASTM D 1005
- Dureza (escala H): ASTM D 3363
- Vida útil de mezcla o pot life (min): PCI, LB-MC-065

3.5.3. Pruebas de desempeño

A continuación se enlistan las evaluaciones realizadas a los recubrimientos, en función de su resistencia física y química.

- Resistencia a solventes (horas de exposición sin degradación de la película, posibles levantamientos, agrietamientos): ASTM D 6943
- Grado de oxidación en superficies de acero recubiertas (escala numérica, tipo de oxidación): ASTM D 610
- Grado de ampollamiento de las pinturas (escala numérica, descripción cualitativa de la frecuencia): ASTM D 714

3.5.4. Metodología experimental

La evaluación sistemática de los parámetros fisicoquímicos de las pinturas que se formularon, las propiedades de las mismas al momento de su aplicación y las de resistencia de los recubrimientos se realizaron de acuerdo con un diseño experimental. Con este diseño se facilitó el análisis los resultados, y la postulación de conclusiones, haciendo uso de herramientas estadísticas.

3.5.5. Elección del diseño experimental

Para el análisis de los datos se recurrió a un análisis de varianza (ANOVA) de un factor y efectos fijos balanceados. De esta manera pudo compararse las medias de datos y responder a la hipótesis acerca de si hay diferencias significativas entre medias. Se procedió a determinar el número de repeticiones o corridas experimentales, mediante la utilización de un contraste bilateral (distribución normal de dos colas):

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * p * q}{E^2} \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

Donde:

N = Número de corridas a realizar

p = Probabilidad de éxito

q = Probabilidad de fracaso

E = Error esperado

$Z_{\alpha/2}$ = Estadístico de prueba (al nivel de significancia α)

Para obtener estadísticamente el número de repeticiones, se utilizó un nivel de significancia $\alpha = 10\%$, puesto que se desea un nivel representativo de confianza para la prueba (es decir, el coeficiente de confianza, $1-\alpha$ es del 90%). Para conocer el valor de $Z_{\alpha/2}$ se leyó de la tabla de áreas bajo la curva normal, tipificada de 0 a Z, mediante una resta: probabilidad máxima de la curva (0.5, pues la tabla indica valores para la mitad de la campana de gauss) menos la probabilidad postulada de la significancia ($\alpha/2=0.05$), localizando así, el estadístico de prueba $Z_{\alpha/2} = 1,643$ (para una probabilidad de $0,5 - 0,05 = 0,45$) Tomando como base una probabilidad de éxito $p = 95\%$, y un máximo error aceptable de $E=20\%$, se llegó a:

$$N = \frac{(1,643)^2 * (0,95) * (0,05)}{(0,2)^2} = 3,20 \sim 3$$

Por tanto, se realizaron tres réplicas o muestreos para cada uno de los recubrimientos formulados, es decir, se utilizaron tres paneles metálicos para evaluar el comportamiento de un mismo recubrimiento ante determinada prueba fisicoquímica y de desempeño.

3.5.6. Diseño de tratamientos

A continuación se presenta el diseño de los tratamientos utilizado para cada unidad experimental.

Tabla II. **Tratamientos efectuados para cada unidad experimental**

TÍTULO DE LA PRUEBA DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DE FORMULACIÓN, O BIEN DE RESISTENCIA DEL RECUBRIMIENTO						
Relación másica	Resina A			Resina B		
	1	2	3	1	2	3
R_I	PF _{A,1,I}	PF _{A,2,I}	PF _{A,3,I}	PF _{B,1,I}	PF _{B,2,I}	PF _{B,3,I}
	PQ _{A,1,I}	PQ _{A,2,I}	PQ _{A,3,I}	PQ _{B,1,I}	PQ _{B,2,I}	PQ _{B,3,I}
R_{II}	PF _{A,1,II}	PF _{A,2,II}	PF _{A,3,II}	PF _{B,1,II}	PF _{B,2,II}	PF _{B,3,II}
	PQ _{A,1,II}	PQ _{A,2,II}	PQ _{A,3,II}	PQ _{B,1,II}	PQ _{B,2,II}	PQ _{B,3,II}
R_{III}	PF _{A,1,III}	PF _{A,2,III}	PF _{A,3,III}	PF _{B,1,III}	PF _{B,2,III}	PF _{B,3,III}
	PQ _{A,1,III}	PQ _{A,2,III}	PQ _{A,3,III}	PQ _{B,1,III}	PQ _{B,2,III}	PQ _{B,3,III}
R_{IV}	PF _{A,1,IV}	PF _{A,2,IV}	PF _{A,3,IV}	PF _{B,1,IV}	PF _{B,2,IV}	PF _{B,3,IV}
	PQ _{A,1,IV}	PQ _{A,2,IV}	PQ _{A,3,IV}	PQ _{B,1,IV}	PQ _{B,2,IV}	PQ _{B,3,IV}
R_V	PF _{A,1,V}	PF _{A,2,V}	PF _{A,3,V}	PF _{B,1,V}	PF _{B,2,V}	PF _{B,3,V}
	PQ _{A,1,V}	PQ _{A,2,V}	PQ _{A,3,V}	PQ _{B,1,V}	PQ _{B,2,V}	PQ _{B,3,V}

Fuente: elaboración propia.

En la tabla presentada las letras PF y PQ dentro de las casillas representan a las propiedades físicas y químicas, respectivamente, cuyos valores fueron tabulados.

3.6. **Recolección y ordenamiento de la información**

Para la evaluación de los recubrimientos epóxicos, se indagó en diferentes fuentes de información, acerca de los procesos productivos, de control de calidad y de evaluación de las pinturas, pudiendo delimitar el tipo de pruebas a realizar.

3.6.1. Información relativa a la producción de pinturas

Se inició la recolección de la información, mediante preguntas realizadas al director técnico de la empresa. Luego se procedió con la observación directa de la preparación de pinturas a nivel de laboratorio. Posteriormente se realizó una búsqueda exhaustiva de información concerniente a la producción de pinturas. Se obtuvo literatura especializada en el tema.

Luego de haber recibido una inducción general al tema de los recubrimientos epóxicos, por parte de personal del laboratorio de formulación, se inició la búsqueda de antecedentes relacionados con el campo de la formulación y desarrollo de pinturas. También se hizo uso de varias técnicas de estudio para ordenar las ideas e información recabada: lecturas comprensivas y elaboración de esquemas. Se hizo énfasis en el estudio de conceptos como resinas epóxicas, agentes de curado, poliamidas, polimerización, sustratos y relaciones estequiométricas. Se definió también el conjunto de variables de entrada y de salida del proyecto.

3.6.2. Normas ASTM

Se tuvo acceso a las Normas ASTM relacionadas con la industria de pinturas, para determinar las que fueron utilizadas para la evaluación de recubrimientos.

3.6.3. Datos experimentales

El siguiente paso para el ordenamiento de la información consistió en determinar el número de tratamientos, es decir, el número de conjuntos de condiciones experimentales de la unidad experimental. Según el diseño

planteado, existen 10 tratamientos, que surgen de las combinaciones entre las cinco proporciones másicas entre resinas y las dos resinas epóxicas utilizadas.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se inició el proceso con la clasificación de pruebas y/o evaluaciones en función de la cronología de las fases por realizar. Se plantearon cuatro fases para el desarrollo del proyecto.

3.7.1. Primera etapa: formulación y diseño de pinturas

A continuación se muestra la tabla de las pinturas evaluadas, en función del tipo de pintura, las variaciones másicas del agente curante y resinas epóxicas.

Tabla III. **Identificación de pinturas epóxicas evaluadas**

Relación másica A:B	Del bisfenol A	Fenólica
1,2 : 1	1	6
1,1 : 1	2	7
1 : 1	3	8
1 : 1,1	4	9
1 : 1,2	5	10

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Segunda etapa: evaluación de las propiedades físicoquímicas de diseño y de aplicación

Para cada prueba realizada a las pinturas, en su estado líquido, se tuvo el siguiente tipo de tabla. La siguiente es un ejemplo para la determinación del contenido de sólidos de los recubrimientos.

Tabla IV. **Tabulación para las propiedades físicoquímicas**

CONTENIDO DE SÓLIDOS (%)			
No. Mezcla	Resultado	No. Mezcla	Resultado
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Tercera etapa: evaluación de las propiedades físicas del recubrimiento

Se hizo una tabla para cada tipo de prueba realizada a las películas sólidas (adherencia, impacto delantero, impacto trasero, flexibilidad, espesor, dureza). A continuación se presenta un ejemplo de tabla para la determinación de la dureza de película.

Tabla V. **Tabulación para las propiedades físicas de las películas**

DUREZA (H, unidades en la escala de dureza de minas de grafito)						
Relación másica (A:B)	Resina del bisfenol A			Resina epóxica fenólica		
	1	2	3	1	2	3
1,2 : 1						
1,1 : 1						
1:1						
1:1,1						
1:1,2						

Fuente: elaboración propia.

3.7.4. Cuarta etapa: evaluaciones de desempeño

Para cada prueba de desempeño de los recubrimientos, se hizo una tabla con los datos de exposición, a continuación se presenta un ejemplo de tabla para la determinación de la resistencia de los recubrimientos a un solvente, luego de 500 horas de exposición.

Tabla VI. **Tabulación para el desempeño químico de las pinturas**

RESISTENCIA AL ÁCIDO CLORHÍDRICO. Grado de ampollamiento						
Relación máscica (A:B)	Resina del bisfenol A			Resina epóxica fenólica		
	1	2	3	1	2	3
1,2 : 1						
1,1 : 1						
1:1						
1:1,1						
1:1,2						

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico planeado para el presente estudio fue de tipo multivariable, acorde al diseño experimental mencionado anteriormente, sin embargo, por las razones que se mencionarán en la sección de interpretación de resultados, se limitó solamente a efectuar varios análisis de varianza ANOVA unifactoriales de efectos fijos balanceados a los datos obtenidos de las propiedades físicas de la película de pintura aplicada a las láminas de acero. Con este análisis se buscó determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los valores experimentales.

Las siguientes tablas muestran los parámetros en los que se basa el ANOVA realizado y las fórmulas matemáticas que sustentan al análisis de varianza:

Tabla VII. **Fuentes de variación del ANOVA de un factor de efectos fijos balanceados**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0
Tratamientos	SS_{Trat}	a-1	MS_{Trat}	$F_0 = \frac{MS_{Trat}}{MS_E}$
Error	SS_E	N-a	MS_E	
Total	SS_T	N-1		

Fuente: REYES, Memphis. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, de el área de operaciones unitarias.* p. 147.

Tabla VIII. **Fórmulas del ANOVA unifactorial de efectos fijos balanceados**

Variable	Fórmula	Variable	Fórmula
SS_{Trat}	$\sum_{i=1}^a \bar{y}_i^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	MS_{Trat}	$\frac{SS_{Trat}}{a-1}$
SS_E	$SS_T - SS_{Trat}$	MS_E	$\frac{SS_E}{(N-a)}$
SS_T	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n \bar{y}_{ij}^2 - \frac{\bar{y}_{...}^2}{N}$	MS_T	$\frac{SS_T}{(N-a)}$

Fuente: REYES, Memphis. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, de el área de operaciones unitarias.* p. 147.

El criterio estadístico para aceptar o rechazar las hipótesis nulas es:

$$\text{Si } |F_{\text{calculada}}| > |F_{\text{tabulada}}| \Rightarrow \text{Se rechaza } H_0$$

$$\text{Si } |F_{\text{calculada}}| < |F_{\text{tabulada}}| \Rightarrow \text{Se acepta } H_0$$

El valor de la $|F_{\text{tabulada}}|$ se calcula en base a los valores de los grados de libertad de los efectos de los tratamientos y el error y un nivel de confianza de 95%.

4. RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación están referidos a un número de mezcla, constituido por la proporción másica de tipo A:B, el cual representa el exceso, déficit o equivalencia en masa de resina, en función del requerimiento estequiométrico de reacción, la nomenclatura A:B, corresponde a las masas porcentuales de resinas poliamida:epóxica, respectivamente. Las celdas marcadas corresponden a los tratamientos efectuados, en función del tipo de resina epóxica y de su proporción.

Tabla IX. **Mezclas de pintura en función de la proporción y tipo de resina epóxica**

Tratamiento (# mezcla)		Formulaciones con relación másica relativa A:B				
Bisfenol A	Fenólica	1,2:1,0	1,1:1,0	1,0:1,0	1,0:1,1	1,0:1,2
1	6	+				
2	7		+			
3	8			+		
4	9				+	
5	10					+

Fuente: elaboración propia.

El proceso de aplicación de la pintura consistió en realizar las mezclas epóxicas, para luego sumergir las láminas dentro de cada mezcla, antes de la aplicación se hizo pasar un cáñamo a través de un orificio y se identificaron las laminas; durante el proceso de aplicación se mantuvo cada lámina inmersa en la pintura por cuatro segundos, para luego sacarlas sosteniendo el cáñamo. Se removió cada lámina de la pintura lentamente, dejándolas totalmente fuera de la pintura en 8 segundos, de modo que no se presentara escurrimiento significativo, a continuación se presenta la cantidad de inmersiones en las mezclas de pintura necesarias para recubrir las láminas de acero y alcanzar un espesor promedio de película seca de 20 mil.

Tabla X. **Inmersiones requeridas en pintura para recubrir el acero**

Relación música A:B	# mezcla	# inmersiones
1.2:1.0	1 6	6 1
1.1:1.0	2 7	6 1
1.0:1.0	3 8	6 1
1.0:1.1	4 9	6 1
1.0:1.2	5 10	6 1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Propiedades fisicoquímicas de los recubrimientos con resina epóxica derivada del bisfenol A**

Propiedad	Unidades	Especificación	Número de mezcla				
			1	2	3	4	5
Densidad	lb/gal	14-18	15,93	15,84	15,73	15,62	15,51
Viscosidad	KU	60-150	69,5	69,1	68,6	68,4	68,0
COV	g/L	-	383,90	381,80	379,35	376,72	374,17
Escurrimiento	-	0-12	5	6	5	5	4
Escurrimiento (con dilución)	-	0-12	3	4	4	3	3
Grado de dispersión	H	≥ 5	5	5	5	5	5
Nivelación	-	0-160	7	7	6	7	7
Nivelación (con dilución)	-	0-160	8	7	7	8	7
Sólidos por peso	% peso/peso	≥ 70	79,9	79,89	79,89	79,89	79,88
Sólidos por volumen	% peso/ volumen	≥ 55	56,4	56,66	56,97	57,3	57,62
Tiempo de secado	min	-	15	15	15	15	15
<i>Pot life</i>	min	> 100	1017,7	817,6	802,0	782,7	683,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Propiedades fisicoquímicas de los recubrimientos con resina epóxica fenólica**

Propiedad	Unidades	Especificación	Número de mezcla				
			6	7	8	9	10
Densidad	lb/gal	14-18	16,43	16,35	16,26	16,16	16,07
Viscosidad	KU	60-150	102,7	102,4	101	100,2	99,2
COV	g/L	-	350,2	348,3	346,07	343,68	341,35
Escurrimiento	-	0-12	12	12	12	12	12
Escurrimiento (con dilución)	-	0-12	6	6	5	5	5
Grado de dispersión	H	≥ 5	5	5	5	5	5
Nivelación	-	0-160	0	0	0	0	0
Nivelación (con dilución)	-	0-160	3	3	1	0	1
Sólidos por peso	% peso/peso	≥ 70	82,21	82,22	82,24	82,25	82,27
Sólidos por volumen	% peso/volumen	≥ 55	59,98	60,2	60,45	60,72	60,98
Tiempo de secado	min	-	15	15	15	15	15
<i>Pot life</i>	min	> 100	464,4	454,1	398,3	396,1	367,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Propiedades físicas de los recubrimientos**

Epóxica del bisfenol A		Epóxica fenólica	
# mezcla	Adherencia (%)	# mezcla	Adherencia (%)
1	100	6	100
2	100	7	100
3	100	8	100
4	100	9	100
5	100	10	100
# mezcla	Brillo (%)	# mezcla	Brillo (%)
1	1,47	6	5,47
2	1,53	7	5,73
3	1,33	8	5,57
4	1,50	9	5,90
5	1,43	10	5,50
# mezcla	Flexibilidad (in)	# mezcla	Flexibilidad (in)
1	1	6	1
2	1	7	1
3	1	8	1
4	1	9	1
5	1	10	1
# mezcla	Espesor (mil)	# mezcla	Espesor (mil)
1	19,7	6	20,0
2	20,3	7	20,7
3	19,7	8	20,3
4	20,3	9	20,3
5	20,0	10	19,7
# mezcla	Dureza (H)	# mezcla	Dureza (H)
1	5	6	5
2	5	7	5
3	5	8	5
4	5	9	5
5	5	10	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Propiedades físico-mecánicas de los recubrimientos: resistencia al impacto delantero y trasero (con masa punzante de 2 lb)**

Epóxica del bisfenol A		Epóxica fenólica	
# mezcla	RI delantero (lb-in)	# mezcla	RI delantero (lb-in)
1	43,3	6	39,3
2	43,3	7	38,0
3	44,7	8	35,5
4	42,0	9	38,0
5	44,0	10	37,3
# mezcla	RI trasero (lb-in)	# mezcla	RI trasero (lb-in)
1	15,3	6	15,3
2	15,7	7	16,3
3	16,0	8	16,3
4	16,3	9	14,3
5	16,3	10	14,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Desempeño de los recubrimientos (h) en función del químico de prueba, del tipo y proporción de resina epóxica, mediante la técnica de inmersión a 25°C**

Relación A:B	# mezcla	Desempeño (h)					
		Agua	Etanol	Xileno	Ácido	Hidróxido	Gasolina
1,2:1,0	1 y 6	500	500	500	500	500	500
1,1:1,0	2 y 7	500	500	500	500	500	500
1,0:1,0	3 y 8	500	500	500	500	500	500
1,0:1,1	4 y 9	500	500	500	500	500	500
1,0:1,2	5 y 10	500	500	500	500	500	500

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Desempeño de las películas en función del químico de prueba, del tipo y proporción de resina epóxica, ante la oxidación (oscurecimiento) luego de 500 horas de inmersión a 25°C

Relación A:B	# mezcla	Grado de oxidación (escala de 0 a 5, donde 0 representa al grado nulo y 5 al grado máximo de oxidación)					
		Agua	Etanol	Xileno	Ácido	Hidróxido	Gasolina
1,2:1,0	1 y 6	0	0	0	0	0	0
1,1:1,0	2 y 7	0	0	0	0	0	0
1,0:1,0	3 y 8	0	0	0	0	0	0
1,0:1,1	4 y 9	0	0	0	0	0	0
1,0:1,2	5 y 10	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Desempeño de las películas en función del químico de prueba, del tipo y proporción de resina epóxica, ante la formación de ampollas luego de 500 horas de inmersión a 25°C

Relación A:B	# mezcla	Grado de formación de ampollas (escala de 0 a 5, donde 0 representa al grado nulo y 5 al grado máximo de formación de ampollas)					
		Agua	Etanol	Xileno	Ácido	Hidróxido	Gasolina
1,2:1,0	1 y 6	0	0	0	0	0	0
1,1:1,0	2 y 7	0	0	0	0	0	0
1,0:1,0	3 y 8	0	0	0	0	0	0
1,0:1,1	4 y 9	0	0	0	0	0	0
1,0:1,2	5 y 10	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Adherencia final de los recubrimientos al acero (%) en función del químico de prueba, del tipo y proporción de resina epóxica, luego de 500 horas de inmersión a 25°C

Relación A:B	# mezcla	Adherencia final (%)					
		Agua	Etanol	Xileno	Ácido	Hidróxido	Gasolina
1,2:1,0	1 y 6	100	100	100	100	100	100
1,1:1,0	2 y 7	100	100	100	100	100	100
1,0:1,0	3 y 8	100	100	100	100	100	100
1,0:1,1	4 y 9	100	100	100	100	100	100
1,0:1,2	5 y 10	100	100	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para hacer evidente las posibles diferencias entre recubrimientos epóxicos, se plantearon cinco variaciones másicas de resina poliamida, para los dos tipos de fondo a evaluar: derivados del bisfenol A y fenólicos, Estas variaciones másicas correspondieron a déficit en masa de poliamida con respecto del requerimiento estequiométrico del 10% y 20%. También se propuso mantener la relación másica de resinas reactivas sin ningún déficit ni exceso, es decir, utilizando el total de poliamida requerido por la estequiometría de reacción. Las otras variaciones realizadas, correspondieron al exceso de poliamida con respecto del requerimiento estequiométrico con la resina epóxica respectiva de un 10% y 20%.

Se plantearon varios parámetros de diseño para las fórmulas de recubrimientos, entre dichos parámetros se incluía que las mezclas madre de pintura, es decir, las mezclas que cumplían con el requerimiento estequiométrico debían tener una viscosidad a 25°C entre 60 y 150 KU, densidad a 25°C entre 14 y 18 lb/gal, contenido porcentual de sólidos por peso mayor o igual a 70, contenido porcentual de sólidos por volumen igual o mayor a 55, vida útil de mezcla o *pot life* superior a los 100 minutos, brillo bajo (mate), y fineza de grano mayor o igual a 5 unidades Hegman, luego de varias pruebas se llegó a la obtención de dos recubrimientos con estas características, uno con resina epóxica derivada del bisfenol A y otro con resina epóxica fenólica.

Al evaluar las propiedades fisicoquímicas de las diez mezclas, la que mayor distinción presentó entre un recubrimiento y otro, fue la del tiempo útil de mezcla o *pot life*. Este tiempo fue diferente para cada recubrimiento, mostrando

una tendencia en función de la cantidad de poliamida presente en la fórmula. Tanto para las mezclas que contenían resina epóxica derivada del bisfenol A, como para las que contenían resina epóxica fenólica, se evidenció que la cantidad de poliamida presente en el recubrimiento guarda una relación directa con el *pot life*. El *pot life* menor de las mezclas epóxicas fenólicas fue de más de 6 horas y el menor de las mezclas de bisfenol A fue de casi 11,5 horas.

En el caso de los fondos epóxico fenólico y poliamida se observó que con un 20% de exceso de poliamida con respecto del requerimiento estequiométrico se obtuvo un *pot life* promedio de 464 minutos, equivalente a 7 horas con 44 minutos. Para las mezclas con 10% de exceso de poliamida se obtuvo un *pot life* promedio de 454 minutos (poco más de 7 horas y media), para la mezcla sin exceso ni déficit de poliamida, se obtuvo un *pot life* promedio de 398 minutos, equivalentes a 6 horas con 38 minutos. Para la mezcla epóxica fenólica con 10% de déficit de poliamida se obtuvo un *pot life* promedio de 396 minutos (6 horas y 36 minutos), para la mezcla con déficit del 20% de poliamida se obtuvo un *pot life* promedio de casi 6 horas con 10 minutos.

Para los recubrimientos que contenían resina epóxica derivada del bisfenol A, se apreció una diferencia mayor entre los tiempos útiles de mezcla. Los *pot lives* promedio en minutos, para mezclas con el 20% y 10% de exceso de poliamida, sin exceso ni déficit de poliamida, con el 10% y 20% de déficit de poliamida fueron: 1018 (casi 17 horas), 818, 802, 783 y 684 (casi 11 horas y media), respectivamente.

Los *pot lives* obtenidos fueron satisfactorios, pues en general, se obtuvieron tiempos útiles de mezcla superiores a las 6 horas y menores a las 17 horas. Esto permitiría al usuario realizar la mezcla de pinturas (epóxica y poliamida), aplicarla en el tanque de manera interna sin tener que preocuparse

por el endurecimiento de la pintura que tiene mezclada en un recipiente por al menos 6 horas.

Al evaluar el resto de propiedades fisicoquímicas, se determinó que para los recubrimientos formulados con resina derivada del bisfenol A, las viscosidades presentaron un ligero descenso, al aumentar la cantidad de resina epóxica en la mezcla. Estas viscosidades se mantuvieron muy cercanas para todas las mezclas, variando entre 68,0 y 69,5 KU. La tendencia también se mantuvo para las viscosidades de los cinco recubrimientos epóxicos fenólicos: a mayor agente curante (poliamida), mayor viscosidad de mezcla. Para estos recubrimientos, las viscosidades variaron entre 99,2 y 102,7 KU.

Para el contenido de sólidos por peso, la tendencia mostró que este guarda una relación inversa con la proporción de agente curante, estas variaciones porcentuales fueron lo suficientemente pequeñas como para ser despreciadas. Para los recubrimientos epóxicos derivados del bisfenol A, se obtuvieron contenidos de sólidos cercanos al 79,9% y para los epóxicos fenólicos, cercanos al 82,2%. De acuerdo con las densidades obtenidas, se estableció que la proporción de poliamida es proporcional a la densidad de la mezcla, la variación en las densidades de los recubrimientos epóxicos fenólicos y epóxicos del bisfenol A, abarcan diferenciales de 0,36 y 0,42 lb/gal, entre el recubrimiento más denso y el menos denso, respectivamente.

En general, los recubrimientos epóxicos fenólicos presentaron mala nivelación, al ser comparados con los recubrimientos epóxicos derivados del bisfenol A. La nivelación mejoró aceptablemente para los recubrimientos epóxicos fenólicos, al diluir las mezclas con xileno, hasta alcanzar una viscosidad cinemática de 20 segundos, al hacer pasar la pintura por una Copa Ford número cuatro. Como contraparte, fueron los recubrimientos epóxicos

fenólicos los que presentaron menor escurrimiento o *sagging*, mientras que los recubrimientos epóxicos derivados del bisfenol A, presentaron mayor tendencia a chorrear o escurrir.

Los 10 recubrimientos evaluados presentaron el mismo grado de dispersión, alcanzando una fineza de grano de cinco unidades Hegman. La flexibilidad de los recubrimientos fue baja, presentando quiebres al utilizar el mandrel de una pulgada de diámetro, la adherencia inicial de los recubrimientos al sustrato fue del 100%. La dureza de los recubrimientos fue buena, alcanzando los cinco H en la escala de dureza del lápiz. Para todos los tipos de recubrimiento, se obtuvieron tiempos de secado promedio, en el registrador mecánico, de 15 minutos.

En cuanto a resistencia al impacto delantero o directo, los recubrimientos mostraron algunas variaciones, sin poder establecerse alguna tendencia relacionada con la proporción de agente curante. Las mezclas epóxicas fenólicas presentaron resistencias delanteras entre 35 y 40 lb-in. Por su parte, las mezclas derivadas del bisfenol A, presentaron resistencias delanteras entre 42 y 45 lb-in.

Las evaluaciones de resistencia al impacto indirecto o trasero, revelaron que los recubrimientos epóxicos fenólicos soportan entre 14 y 16,3 lb-in. Las mezclas epóxicas derivadas del bisfenol A soportaron impactos traseros entre 15,3 y 16 lb-in.

Para las evaluaciones de desempeño se optó por un acero con espesor de $\frac{1}{4}$ de pulgada. Se procedió al corte de las láminas o probetas y luego a la perforación de un agujero de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro, en la parte superior de las láminas. Para la preparación de la superficie, se realizó un tratamiento de

sandblasting tipo comercial, a modo de obtener un perfil de anclaje que brindara la adherencia óptima entre el sustrato y el recubrimiento respectivo. Inmediatamente después de tratar la superficie se inició con el proceso de aplicación de las pinturas, para evitar el proceso de oxidación del acero.

Figura 6. **Acero sin tratamiento y posterior al *sandblasting***



Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso de aplicación de recubrimientos se evidenció que todas las mezclas de pintura epóxica fenólica con variaciones en la proporción de poliamida requirieron una sola inmersión en pintura para alcanzar un espesor de película seca de 20 mil en promedio. Por su parte, con las mezclas de pintura epóxica derivada del bisfenol A con poliamida, se necesitó de seis procesos de aplicación de pintura por inmersión, para alcanzar el mismo espesor de película (20 mil). Para ambos tipos de fondo, se utilizó el mismo proceso de aplicación.

Luego de concluido el proceso de aplicación de recubrimientos, se esperó un total de ocho días, para asegurar que el proceso de curado de las pinturas se completara. A continuación se muestran una fotografía de las láminas recubiertas, durante el proceso de curado.

Figura 7. **Batería de láminas recubiertas, mezclas uno a cinco**



Fuente: elaboración propia.

Una vez colocadas las láminas de acero recubiertas dentro de la cámara de inmersión, se procedió al vertido del solvente respectivo. Se llenó la cámara, de manera que un 75% de la superficie total de las láminas estuviera inmersa en el compuesto químico de interés. Esto con el fin de tener un área testigo (correspondiente al 25% del área total) que permitiera comparar las propiedades de la película expuesta y de la no expuesta al solvente. Entre cada lámina se mantuvo una distancia mínima de una pulgada, para que todas las piezas estuvieran rodeadas completamente por el químico de prueba. Las cámaras se mantuvieron cerradas durante el período de exposición.

Figura 8. **Disposición de láminas dentro de la cámara de inmersión**



Fuente: elaboración propia.

Durante el período de exposición del acero recubierto con diferentes compuestos químicos se procedió con la compensación del solvente evaporado. Este fue el caso de la cámara de inmersión con gasolina y con etanol. Se revisaron las cámaras diariamente y se repuso el solvente perdido por evaporación, cuando era necesario. También se procedió a la evaluación periódica de las láminas recubiertas, en búsqueda de defectos de película, tales como apareamiento de ampollas, de óxido, de fisuras, levantamientos, cambios de color u otra anomalía. A continuación se muestra la cámara de inmersión para las láminas recubiertas sumergidas en la mezcla de hidrocarburos (gasolina).

Figura 9. **Cámara de inmersión para láminas sumergidas en gasolina**



Fuente: fase experimental.

Durante las 500 horas de exposición de los recubrimientos a cada uno de los seis solventes (agua, solución al 5% en peso de hidróxido de Sodio, solución al 5% en volumen de ácido clorhídrico, xileno, etanol y gasolina) se mantuvieron las propiedades de integridad de la película. No se apreció ningún defecto ni degradación de la matriz polimérica, tanto para las mezclas con resina derivada del bisfenol A, como para las de resina epóxica fenólica. La

integridad final de las matrices poliméricas pudo ser comprobada a través de la evaluación de la adherencia de la pintura al sustrato. Con esta evaluación se constató que todos los recubrimientos mantuvieron su adherencia al acero y por ende que no hubo degradación en las películas.

Al inicio de la investigación, se planteó un análisis estadístico de los datos de tipo multivariable, de modo que se pudiera determinar si había diferencia significativa entre las medias de los datos, resultado de las pruebas estandarizadas a cada uno de los recubrimientos. Sin embargo, al finalizar la fase experimental, se hizo evidente que muchos de los resultados obtenidos eran exactamente iguales para los 10 recubrimientos evaluados. Este fue el caso de los resultados de desempeño, en donde todas las pinturas alcanzaron las 500 horas de inmersión en los seis diferentes solventes de prueba, sin presentar oxidación, ampollamiento u otros defectos de película. La adherencia final de los recubrimientos fue también del 100% en todos los casos.

Al reportarse los mismos resultados de desempeño para los 10 recubrimientos estudiados, se confirmó que no habría diferencia significativa entre medias, teniendo que replantear el análisis de los datos. Fue así como se enfocó el análisis estadístico hacia todas aquellas variables de respuesta que no dependieran directamente de la fórmula y/o de la cantidad de agente curante. Es decir, se buscó analizar aquellas variables totalmente independientes de las formulaciones, tales como el espesor de película seca, brillo y resistencia al impacto. Por ende, se descartó el análisis de los datos con los cuales habría diferencia entre medias a causa de la composición de las mezclas, tales como la densidad, viscosidad y el contenido de sólidos por peso.

Luego de analizar los datos, de acuerdo con el modelo estadístico de ANOVA de un factor de efectos fijos balanceados, se pudo establecer si había

diferencias representativas entre las medias de espesores, brillos y resistencias al impacto, según el tipo de resina epóxica. Para ello se utilizó el estadístico de prueba F, para así determinar si las medias eran comparables o no.

Con el análisis de varianza, se logró determinar que no hay diferencia significativa entre las medias de espesores y resistencias al impacto (delantero y trasero), tanto para los recubrimientos con resina epóxica fenólica, como para los que contenían resina derivada del bisfenol A. En estos casos, se puede validar la hipótesis nula, la cual establece que no importando la proporción de agente curante en los recubrimientos, el espesor, resistencia al impacto delantero y resistencia al impacto trasero serán comparables (o equivalentes).

Por su parte, al analizar los brillos de los recubrimientos, se determinó que no hay diferencia significativa en los brillos de los recubrimientos con resina epóxica derivada del bisfenol A, en este caso, se acepta la hipótesis nula. Por su parte, se determinó que sí existe diferencia entre las medias de los brillos de los recubrimientos epóxicos fenólicos, teniendo que rechazar la hipótesis nula. Aun cuando haya diferencias entre los brillos de los recubrimientos epóxicos fenólicos, se puede afirmar que todos los recubrimientos presentaron brillo bajo, generando una superficie mate que contribuya con la adherencia de recubrimientos posteriores y con la adherencia de la imprimación al acero.

De acuerdo con los resultados de desempeño obtenidos y pudiendo afirmar que no hay diferencias significativas entre los espesores de película seca y resistencias al impacto, puede afirmarse que los mejores fondos epóxicos son los que menor proporción de agente curante incluyen dentro de su formulación, es decir, los recubrimientos epóxicos con un 20% de déficit de poliamida, con respecto del requerimiento másico de la estequiometría de

reacción presentaron excelente resistencia química, bajo condiciones de exposición que se asemejan a las de servicio de un tanque de acero.

Al comparar los costos de los dos recubrimientos con 20% de déficit de poliamida, con los de proporciones balanceadas (sin déficit ni exceso de poliamida), se evidencia un ahorro monetario sobre el costo de las fórmulas balanceadas del 15,85%. De las dos fórmulas propuestas (con 20% menos de agente endurecedor), la más barata es la del recubrimiento epóxico derivado del bisfenol A, presentando un ahorro del 15,92% con respecto del costo de fórmula del epóxico fenólico.

Para el recubrimiento interno de un tanque de acero que contendrá agua, etanol de grado industrial, xileno, solución de ácido clorhídrico al 5% en volumen, solución de hidróxido de sodio al 5% en peso o gasolina, se recomienda preparar la superficie mediante un *sandblasting* en grado comercial como mínimo, aplicar inmediatamente después uno de los recubrimientos epóxicos propuestos (derivado del bisfenol A o epóxico fenólico, con 20% de déficit de poliamida) hasta alcanzar un espesor de película seca de 20 mil. Con ello se puede afirmar que el recubrimiento no presentará degradación de la matriz polimérica, ante el contacto prolongado con dichos solventes.

6. LOGROS OBTENIDOS

1. Se desarrollaron 10 recubrimientos de tipo epóxico-poliamida que cumplieron con los parámetros iniciales de diseño y que son aptos para el recubrimiento interno de tanques de acero.
2. Se propuso a la empresa las formulaciones de recubrimiento epóxico fenólico y epóxico derivado del bisfenol A que presentan el menor costo de fórmula, para su producción.
3. Se diseñó un procedimiento de aplicación y un sistema de pruebas para la evaluación de recubrimientos con variaciones en la proporción másica de los componentes reactivos.
4. Se diseñó el proceso de dispersión y mezcla de revestimientos epóxicos-poliamida para el recubrimiento interno de tanques de acero.

CONCLUSIONES

1. Debido a su reología, las pinturas formuladas con resina epóxica derivada del bisfenol A presentaron menor capacidad de recubrimiento, al compararse con las pinturas epóxicas fenólicas, requiriendo de seis procesos de aplicación para alcanzar el espesor de película seca deseado, en lugar de uno.
2. La proporción másica de poliamida en los recubrimientos guarda una relación directa con la densidad, la viscosidad y el tiempo de vida útil de mezcla.
3. No existen diferencias significativas entre los espesores de película seca, para las medias de los recubrimientos epóxicos fenólicos y derivados del bisfenol A, respectivamente.
4. Los recubrimientos evaluados con resina epóxica derivada del bisfenol A presentaron tiempos de polimerización por condensación (*pot lives*) significativamente mayores a los de los recubrimientos epóxicos fenólicos, generando una reticulación más lenta que le permite al aplicador disponer de más tiempo para utilizar las mezclas.
5. Ninguno de los 10 recubrimientos presentó oxidación, formación de ampollas, pérdida de adherencia al acero o degradación en la matriz polimérica, luego de 500 horas de inmersión en los compuestos químicos y soluciones de prueba a 25°C.

RECOMENDACIONES

1. Analizar el desempeño de los 10 recubrimientos epóxicos, utilizando los mismos compuestos químicos y soluciones de prueba, a temperaturas de 40 y de 55°C.
2. Evaluar recubrimientos epóxicos con un agente curante diferente a la poliamida, tal como resinas de amina cicloalifática; para así determinar la resistencia química de este tipo de imprimaciones.
3. Incursionar en el desarrollo de acabados tipo epóxico fenólico-poliamida y epóxico de bisfenol A-poliamida, de acuerdo con nuevos parámetros de diseño.
4. Valorar la resistencia de los recubrimientos propuestos ante la radiación ultravioleta, intemperismo y otros factores; para determinar su viabilidad como recubrimientos externos de tanques de acero.
5. Determinar la resistencia química de los recubrimientos propuestos ante la inmersión en compuestos químicos como el tetrahidrofurano, acetona, ácido sulfúrico concentrado, *thinner*, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Standard practice for determining volatile organic compound (VOC) content of paints and related coatings: D 3960-98*. Estados Unidos: ASTM, 1998. 6 p.
2. _____. *Standard practice for immersion testing of industrial protective coatings: D 6943-03*. Estados Unidos: ASTM, 2003. 4 p.
3. _____. *Standard practice for testing water resistance of coatings using water fog apparatus: D 1735-99*. Estados Unidos: ASTM, 1999. 3 p.
4. _____. *Standard test method for consistency of paints using the Stormer viscometer: D 562-81*. Estados Unidos: ASTM, 1981. 5 p.
5. _____. *Standard test method for density of liquid coatings, inks, and related products: D 1475-98*. Estados Unidos: ASTM, 1998. 4 p.
6. _____. *Standard test method for evaluating degree of blistering of exterior paints: D 714-87*. Estados Unidos: ASTM, 1987. 6 p.
7. _____. *Standard test method for evaluating degree of rusting on painted steel surfaces: D 610-95*. Estados Unidos: ASTM, 1995. 9 p.
8. _____. *Standard test method for film hardness by pencil test: D 3363-00*. Estados Unidos: ASTM, 2000. 2 p.

9. _____. *Standard test method for fineness of dispersion of pigment-vehicle systems by Hegman-type gage: D 1210-96.* Estados Unidos: ASTM, 1996. 10 p.
10. _____. *Standard test method for leveling of paints by draw-down method: D 4062-99.* Estados Unidos: ASTM, 1999. 4 p.
11. _____. *Standard test method for mandrel bend test of attached organic coatings: D 522- 93a.* Estados Unidos: ASTM, 1993. 4 p.
12. _____. *Standard test method for measurement of dry-film thickness of organic coatings using micrometers: D 1005-95.* Estados Unidos: ASTM, 1995. 3 p.
13. _____. *Standard test method for resistance of organic coatings to the effects of rapid deformation (impact): D 2794-93.* Estados Unidos: ASTM, 1993. 2 p.
14. _____. *Standard test method for sag resistance of paints using a multinotch applicator: D 4400-99.* Estados Unidos: ASTM, 1999. 4 p.
15. _____. *Standard test method for specular gloss: D 523-89.* Estados Unidos: ASTM, 1989. 5 p.
16. _____. *Standard test method for viscosity by Ford viscosity cup: D 1200-94.* Estados Unidos: ASTM, 1994. 3 p.
17. _____. *Standard test method for volatile content of coatings: D 2369-98.* Estados Unidos: ASTM, 1998. 3 p.

18. _____. *Standard test methods for measuring adhesion by tape test: D 3359-97*. Estados Unidos: ASTM, 1997. 7 p.
19. _____. *Standard test method for measuring times of drying or curing during film formation of organic coatings using mechanical recorders: D 5895-96*. Estados Unidos: ASTM, 1996. 3 p.
20. BAJAT, Jelena B. *Adhesion and corrosion resistance of epoxy primers used in the automotive industry* [en línea]. *Journal of Adhesion Science and Technology* [ref. 04 de febrero de 2011]. Disponible en Web: <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=a43d88bfbd4-43d4-93b9-eefcdf6bc92b%40sessionmgr113&vid=4&hid=112>.
21. CALVO, Jordi. *Pinturas y recubrimientos*. España: Díaz de Santos, 2009. 353 p. ISBN 978-84-7978-883-4.
22. *Coatings and Linings for Immersion Service*. NACE Technical Group Committee (coord.). Texas: NACE, 1972. 146 p.
23. DEVORE, Jay L. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 7a. ed. México: Cengage Learning, 2008. 726 p.
24. GONZÁLEZ, Jesús. *La pintura como inhibidor de corrosión en las estructuras de acero especialmente expuestas y su rendimiento* [en línea]. *Informes de la Construcción* [ref. 15 de febrero de 2011]. Disponible en Web: <http://informesdeconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdeconstruccion/article/view/846/930>.

25. GONZÁLEZ, Sergio. *Laboratory evaluation of corrosion resistance at metallic substrates by an organic coating: delamination effects*. [en línea] Journal of Adhesion Science and Technology [ref. 10 de febrero de 2011]. Disponible en Web: <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=a43d88bf-bdaa-43d4-93b9-eefc-df6bc92b%40sessionmgr113&vid=20&hid=8>.
26. HARE, Clive. *Protective coatings*. Estados Unidos: Technology Publishing Company, 1994. 514 p.
27. ORTEGA, Carlos. *Sistemas de protección a base de recubrimientos y pinturas para uso industrial y marino: como herramienta de mantenimiento preventivo*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 61 p.
28. PLA, Rosa. *Aplicación de polímeros conductores en pinturas de imprimación*. Trabajo de graduación de Msc. en Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de los Materiales, Universidad Politécnica de Cataluña, 2006. 99 p.
29. REYES, Menphis. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. 165 p.
30. ROSALES, Luis. *Uso de recubrimientos anticorrosivos para la industria*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1981. 50 p.

31. SIMANCAS, Joaquín. *Estudio de distintas variables con influencia en el comportamiento en la atmósfera de recubrimientos anticorrosivos de pintura aplicados sobre acero*. Trabajo de graduación de Dr. en Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad Complutense de Madrid, 1992. 273 p.
32. The Society for Protective Coatings. *Joint surface preparation standard, white metal blast cleaning: SSPC-SP 5/NACE No. 1*. Estados Unidos: SSPC/NACE, 2007. 5 p.
33. _____. *Joint surface preparation standard, near-white metal blast cleaning: SSPC-SP 10/NACE No. 2*. Estados Unidos: SSPC/NACE, 2000. 5 p.
34. _____. *Joint surface preparation standard, commercial blast cleaning: SSPC-SP 6/NACE No. 3*. Estados Unidos: SSPC/NACE, 2007. 6 p.
35. _____. *Joint surface preparation standard, brush-off blast cleaning: SSPC-SP 7/NACE No. 4*. Estados Unidos: SSPC/NACE, 2007. 6 p.
36. TORRES LUQUE, Magda. *Estudio comparativo del proceso de corrosión en recubrimientos cerámicos, metálicos y orgánicos mediante técnicas electroquímicas*. Trabajo de graduación de Ing. de Materiales y Procesos. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2010. 170 p.

37. YAT BATÚN, Daniel. *Recubrimiento superficial por medio de resinas epóxicas para la aplicación de la industria en general*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 61 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Análisis estadístico

A continuación se presentan los datos tabulados, utilizados para aceptar o rechazar la hipótesis nula propuesta.

Apéndice 1.1. Análisis estadístico del brillo (%) de las películas con resina epóxica derivada del bisfenol A

Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	$y_{...}$
1	1,47	0,11	7,87	4,40	19,36	21,80
2	1,53	0,23	15,06	4,60	21,16	N
3	1,33	0,05	4,33	4,00	16,00	15
4	1,50	0,00	0,00	4,50	20,25	a
5	1,43	0,11	8,06	4,30	18,49	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_{calc}
Tratamientos	0,07	4	0,017	1,06
Error	0,16	10	0,016	Ft
Total	0,23	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

Dado que $|F_{calculada}| < |F_{tabulada}| \Rightarrow$ Se acepta H_0 . No existe diferencia significativa en el porcentaje de brillo medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica derivada del bisfenol A.

Apéndice 1.2. **Análisis estadístico del brillo (%) de las películas con resina epóxica fenólica**

Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	y_{\dots}
1	5,47	0,05	1,06	16,40	268,96	84,50
2	5,73	0,20	3,63	17,20	295,84	N
3	5,57	0,11	2,07	16,70	278,89	15
4	5,90	0,17	2,94	17,70	313,29	a
5	5,50	0,17	3,15	16,50	272,25	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_{calc}
Tratamientos	0,39	4	0,09	4,10
Error	0,24	10	0,02	F_t
Total	0,63	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

Dado que $|F_{\text{calculada}}| > |F_{\text{tabulada}}| \Rightarrow$ Se rechaza H_0 . Sí existe diferencia significativa en el porcentaje de brillo medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica fenólica.

Apéndice 1.3. **Análisis estadístico de la resistencia al impacto delantero (lb-in) de las películas con resina epóxica derivada del bisfenol A**

Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	y_{\dots}
1	43,33	3,05	7,05	130	16900	652
2	43,33	5,03	11,62	130	16900	N
3	44,67	4,16	9,32	134	17956	15
4	42,00	2,00	4,76	126	15876	a
5	44,00	3,46	7,87	132	17424	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_{calc}
Tratamientos	11,73	4	2,93	0,22
Error	136,00	10	13,60	F_t
Total	147,73	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

Dado que $|F_{\text{calculada}}| < |F_{\text{tabulada}}| \Rightarrow$ Se acepta H_0 . No existe diferencia significativa en la resistencia al impacto delantero medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica derivada del bisfenol A.

Apéndice 1.4. **Análisis estadístico de la resistencia al impacto delantero (lb-in) de las películas con resina epóxica fenólica**

Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	y...
1	39,33	4,16	10,58	118	13924	564
2	38,00	4,00	10,53	114	12996	N
3	35,33	4,16	11,78	106	11236	15
4	38,00	5,29	13,93	114	12996	a
5	37,33	4,61	12,37	112	12544	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F _{calc}
Tratamientos	25,60	4	6,40	0,32
Error	200,00	10	20,00	Ft
Total	225,60	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

Dado que $|F_{calculada}| < |F_{tabulada}| \Rightarrow$ Se acepta H_0 . No existe diferencia significativa en la resistencia al impacto delantero medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica fenólica.

Apéndice 1.5. **Análisis estadístico de la resistencia al impacto trasero (Ib-in) de las películas con resina epóxica derivada del bisfenol A**

Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	$y_{...}$
1	15,33	1,53	9,96	46	2116	239
2	15,67	2,89	18,43	47	2209	N
3	16,00	1,73	10,83	48	2304	15
4	16,33	2,52	15,41	49	2401	a
5	16,33	1,53	9,35	49	2401	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_{calc}
Tratamientos	2,27	4	0,57	0,13
Error	44,67	10	4,47	F_t
Total	46,93	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

Dado que $|F_{calculada}| < |F_{tabulada}| \Rightarrow$ Se acepta H_0 . No existe diferencia significativa en la resistencia al impacto trasero medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica derivada del bisfenol A.

Apéndice 1.6. **Análisis estadístico de la resistencia al impacto trasero (Ib-in) de las películas con resina epóxica fenólica**

Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	y...
1	15,33	2,08	13,58	46	2116	230
2	16,33	1,53	9,35	49	2401	N
3	16,33	1,53	9,35	49	2401	15
4	14,33	1,53	10,66	43	1849	a
5	14,33	1,16	8,06	43	1849	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F _{calc}
Tratamientos	12,00	4	3,00	1,18
Error	25,33	10	2,53	Ft
Total	37,33	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

Dado que $|F_{calculada}| < |F_{tabulada}| \Rightarrow$ Se acepta H_0 . No existe diferencia significativa en la resistencia al impacto trasero medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica fenólica.

Apéndice 1.7. **Análisis estadístico del espesor (mil) de las películas con resina epóxica derivada del bisfenol A**

Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	y_{\dots}
1	19,67	0,57	2,94	59	3481	300
2	20,33	0,57	2,84	61	3721	N
3	19,67	0,57	2,94	59	3481	15
4	20,33	0,57	2,84	61	3721	a
5	20,00	0,00	0,00	60	3600	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_{calc}
Tratamientos	1,33	4	0,33	1,25
Error	2,67	10	0,27	F_t
Total	4,00	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

Dado que $|F_{\text{calculada}}| < |F_{\text{tabulada}}| \Rightarrow$ Se acepta H_0 . No existe diferencia significativa en el espesor de película medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica derivada del bisfenol A.

Apéndice 1.8. **Análisis estadístico del espesor (mil) en las películas con resina epóxica fenólica**

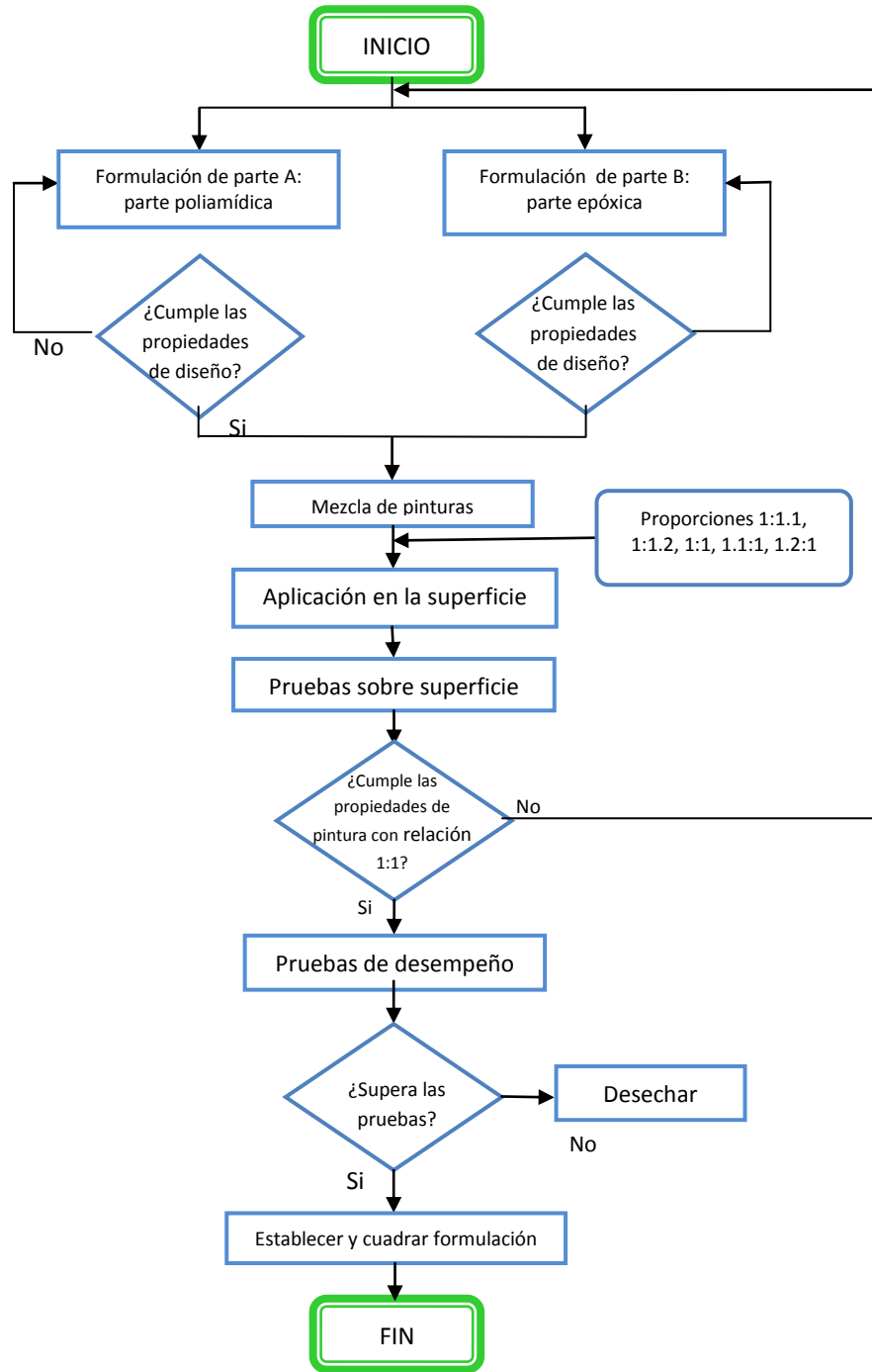
Ciclo	Promedio	Desviación estándar	% Desviación relativa	$\sum y_i$	$\sum y_i^2$	y...
1	20,00	0,00	0,00	60	3600	303
2	20,67	1,15	5,59	62	3844	N
3	20,33	0,57	2,84	61	3721	15
4	20,33	0,57	2,84	61	3721	a
5	19,67	0,57	2,94	59	3481	5

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F _{calc}
Tratamientos	1,73	4	0,433	0,93
Error	4,66	10	0,467	Ft
Total	6,40	14		3,48

Fuente: elaboración propia.

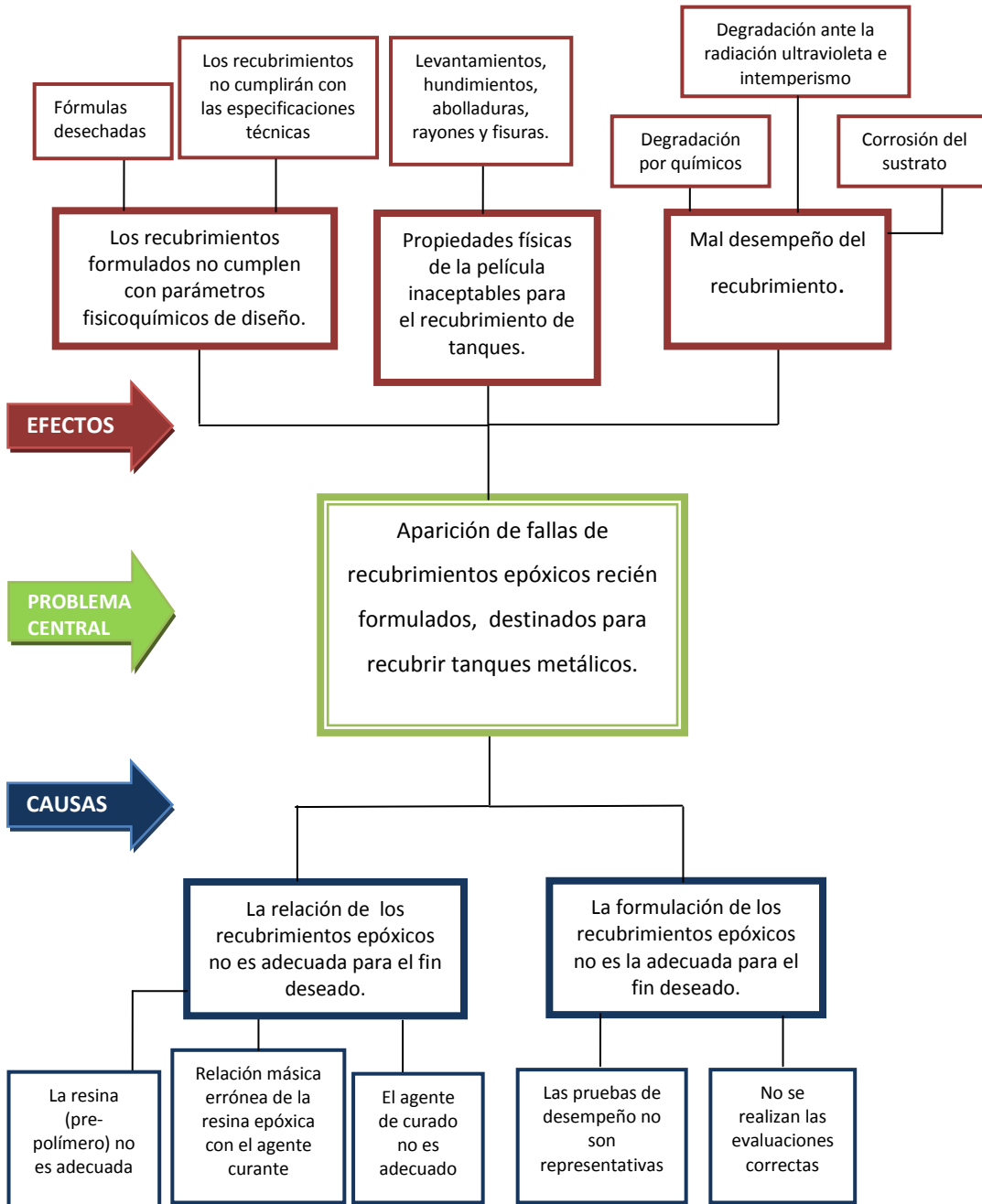
Dado que $|F_{calculada}| < |F_{tabulada}| \Rightarrow$ Se acepta H_0 . No existe diferencia significativa en el espesor de película medido en todas las mezclas de pintura con resina epóxica fenólica.

Apéndice 2. Diagrama de flujo



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.