

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y TEXTIL



“PREPARACION DE COMPUESTOS EPOXICOS”

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUIMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACION DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

MIRTHA ROCIO ZEGARRA BASURCO

LIMA – PERU

2006

A mi Familia

Agradecimiento:

*Al Ingeniero Walter Zaldivar por su asesoría en la
elaboración del presente Informe.*

RESUMEN

Las resinas epóxicas o epoxídicas, son productos obtenidos de la química del petróleo en forma de sólidos o de líquidos desde baja a alta viscosidad. Por si solos son solubles y fusibles y no poseen ninguna propiedad mecánica reseñable.

Los compuestos epóxicos se obtienen de la mezcla de las resinas epóxicas con agentes modificadores (diluyentes, flexibilizadores, pigmentos, cargas). Estas resinas reaccionan con grupos amino, carboxilo (endurecedores o agentes de curado), para formar un polímero tridimensional irreversible, insoluble e infusible que poseerá una serie de características de las que antes carecía.

El presente informe tiene como objetivo presentar una visión técnica acerca de la preparación de los compuestos epóxicos de 100 % sólidos, por lo que abarca: una introducción, en la que se intenta enmarcar el trabajo, y ocho capítulos en los que se desarrolla las diferentes partes del informe y los apartados dedicados a las recomendaciones, conclusiones y anexo.

En el capítulo II se explican los conceptos básicos que se deben saber para poder entender mejor los capítulos posteriores.

Las características y propiedades de las resinas epóxicas se explican en el capítulo III.

En el capítulo IV se hace una explicación de cada una de las materias primas que se utilizan para la preparación de los compuestos epóxicos.

Las más importantes reacciones de curado que ocurren con las resinas epóxicas se detallan en el capítulo V.

En el capítulo VI se describe como se realiza la preparación de los compuestos epóxicos

Las pruebas más importantes que se deben realizar para determinar las propiedades de los compuestos epóxicos se indican en el capítulo VII.

En el capítulo VIII se da una descripción de las principales aplicaciones de las resinas epóxicas en la industria.

Finalmente en el capítulo IX se propone una formulación de un compuesto epóxico.

INDICE

I.	INTRODUCCION.....	9
II.	CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	11
	II.1 Compuestos Epóxicos.....	12
	II.2 Resinas Epóxicas.....	12
	II.3 Endurecedor o Agente de Curado.....	15
	II.4 Tiempo de curado.....	16
III.	PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS GENERALES.....	17
IV.	MATERIAS PRIMAS PARA LA PREPARACION DE COMPUESTOS EPOXICOS.....	21
	IV.1 Resinas Epóxicas.....	22
	IV.1.1 Parámetros que caracterizan a las resinas epóxicas.....	23
	IV.2 Diluyentes.....	24
	IV.3 Flexibilizadores.....	25
	IV.4 Cargas.....	26
	IV.5 Pigmentos.....	27
	IV.6 Aditivos.....	27
	IV.7 Endurecedor o Agente de Curado.....	27
V.	REACCIONES DE ENDURECIMIENTO Y CURADO.....	33
VI.	PREPARACION DE COMPUESTOS EPOXICOS.....	38
	VI.1 Equipos.....	39
	VI.1.1 Molino Tricilíndrico.....	39
	VI.1.2 Mezcladora Planetaria.....	40

VI.2 Manufactura	42
VII. PRUEBAS DE LABORATORIO	43
VII.1 Tiempo Abierto o Pot life.....	44
VII.2 Resistencia a la compresión.....	45
VII.3 Resistencia a la tracción.....	46
VII.4 Resistencia al impacto	47
VII.5 Dureza Shore	49
VII.6 Resistencia Dieléctrica.....	50
VIII. APLICACIONES DE LAS RESINAS EPOXICAS	53
VIII.1 Pinturas y Acabados.....	54
VIII.2 Adhesivos.....	55
VIII.3 Materiales Compuestos	55
VIII.4 Sistemas Eléctricos y Electrónicos.....	56
VIII.5 Consumo y Aplicaciones Nauticas.....	57
IX. FORMULACION DE UN COMPUESTO EPOXICO DE 100 % SOLIDOS.....	58
X. RECOMENDACIONES.....	61
XI. CONCLUSIONES.....	63
XII. BIBLIOGRAFIA	65
XIII. ANEXO	68

I. INTRODUCCION

I. INTRODUCCION

Los compuestos de resinas epóxicas han tenido amplia aceptación y su uso se ha extendido a las actividades donde se requiere un polímero de mucha resistencia mecánica.

Cuando en 1946 la firma CIBA adquirió la licencia de explotación de las resinas derivadas de la Epiclorhidrina y Bisfenol A, comenzó el espectacular desarrollo que han experimentado los compuestos epóxicos. Las resinas epóxicas son productos obtenidos mediante reacciones de condensación (en presencia de hidróxido de sodio) entre la epiclorhidrina y el bisfenol A. El resultado de esta reacción es un polímero de cadena larga con grupos epóxicos en sus extremos.

Las resinas epóxicas no se secan por sí solas y necesitan ser modificadas con ciertos ácidos grasos o combinadas con agentes de curado, para formar una estructura tridimensional por polimerización o reticulación, con el fin de crear una película sólida a temperatura ambiente.

Las resinas epóxicas son ampliamente utilizadas como matrices para materiales compuestos o composites en diferentes tipos de aplicaciones, donde son requeridas sus propiedades dieléctricas, químicas, térmicas y mecánicas.

II. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

II. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

II.1 Compuestos epóxicos

Se conoce como compuestos o composites epóxicos a una mezcla de resinas epóxicas y un refuerzo a base de fibra de vidrio, de fibra de carbono, u otras materias, y de ahí que tengan características particulares de resistencia mecánica. Estas resinas reaccionan con grupos amino, carboxilo, oxhidrilo (endurecedores o agentes de curado), para formar un polímero tridimensional irreversible, insoluble e infusible que poseerá una serie de características de las que antes carecía.

II.2 Resinas Epóxicas

Las resinas epóxicas o poliepóxidos son compuestos termoestables que contienen uno o más anillos oxirano (Fig. II.1), en el que un átomo de oxígeno se encuentra unido a dos átomos de carbono adyacentes. La naturaleza tensionada de este anillo le confiere su alta reactividad, siendo fácilmente atacado por la mayoría de las sustancias nucleófilas, para dar compuestos de adición [1-2].

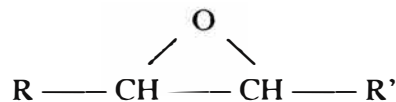
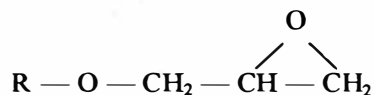
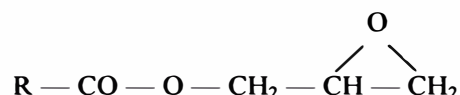
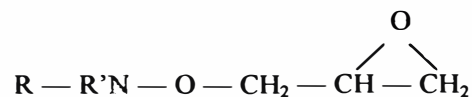
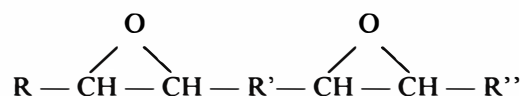
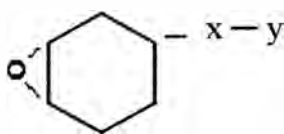


Fig. II.1 Grupo oxirano

Según el origen de los grupos oxirano, las familias de las resinas epóxicas se dividen en 5 grupos fundamentales [1]:

➤ **Eteres glicéricos**➤ **Esteres glicéricos**➤ **Aminas glicéricas**➤ **Alifáticas lineales**➤ **Cicloalifáticas**

x: éster, éter, amina

y: H o grupo cíclico

Comercialmente, los éteres son los más importantes, ya que el 95% de las resinas epóxicas utilizadas son glicidil éteres obtenidos por la reacción entre la epiclorhidrina y el bisfenol-A en presencia de hidróxido de sodio [1-3]. El resultado de esta reacción es un polímero de cadena larga con grupos oxirano o epóxicos en sus extremos (Fig. II.2) [4]. La resina epóxica más utilizada es el diglicidil éter bisfenol A (DGEBA).

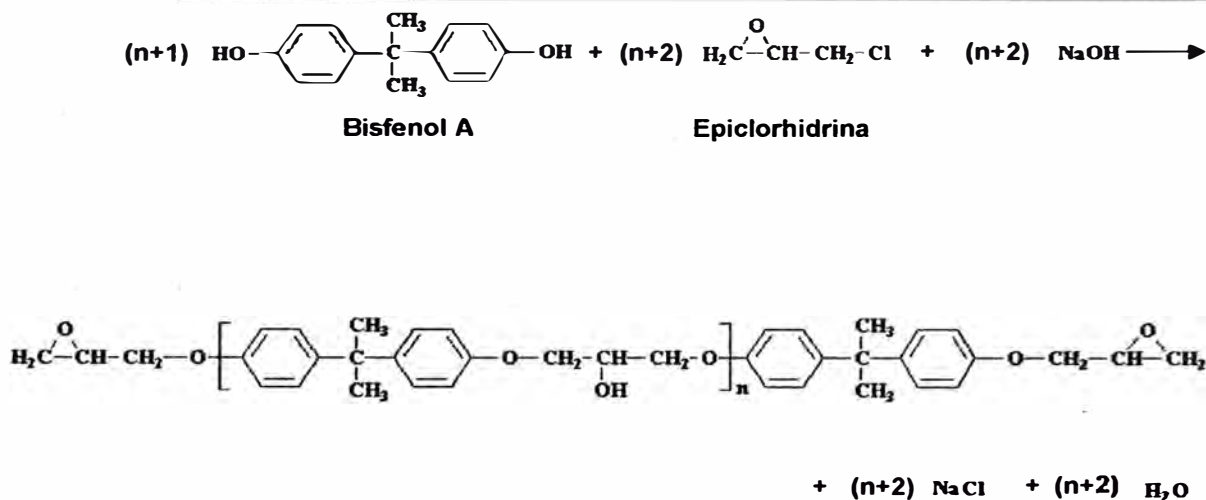


Fig. II.2 Estructura Básica de las resinas epóxicas

Siendo n el grado de polimerización que depende de la proporción de los reaccionantes y que hará variar consecuentemente el peso molecular de las resinas. Por lo general, las resinas comerciales son mezclas de diferentes pesos, de modo que se conoce el peso molecular promedio pero no la distribución de los oligómeros en la muestra. Las resinas epóxicas líquidas tienen valores de n entre 0 y 1, mientras que para valores de n iguales o superiores a 2 son sólidas [1-2].

Las propiedades generales de las resinas epóxicas, clasificadas según la longitud de su cadena, se muestran en la Tabla II.1

Tabla II.1 Propiedades de las resinas epóxicas

Longitud de cadena (n)	Peso molecular (aprox.)	Punto de fusión (°C)	Centros reactivos	Posibles aplicaciones
0-1	400	Líquidas	Oxirano	Curado en frío por aminas para recubrimientos
2	1000	70	Oxirano	
4	2000	100	Oxirano-Hidroxilo	Esteres epoxídicos
8	3500	130	Hidroxilo	Secado por temperatura con resinas amínicas o fenólicas
12	6000	150	Hidroxilo	

Este tipo de resina presenta características bastante interesantes en lo que se refiere a su interacción química con otras resinas termoendurecibles, pues genera productos finales con muy buenas propiedades de resistencia a la abrasión química, dieléctrica, flexibilidad y adherencia. Las resinas epóxicas no secan por sí solas y necesitan ser modificadas con ciertos ácidos grasos o combinadas con agentes de curado, para formar una estructura tridimensional por polimerización o reticulación con algunos materiales, con el fin de crear una película sólida a temperatura ambiente [5].

II.3 Endurecedor o Agente de Curado

Es un producto químico puro, una mezcla o un polímero complejo, que cuando se añade a una mezcla macromolecular determinada, como la resina epóxica, en cantidades superiores a las catalíticas, reacciona con ésta, y la convierte en un polímero irreversible, de estructura reticulada (tridimensional), que poseerá una serie de características perfectamente definidas que antes carecía por sí sola [1].

Las resinas epóxicas se pueden curar o reticular a través del anillo oxirano por una gran variedad de compuestos químicos. Los más

comunes son los endurecedores polifuncionales: aminas alifáticas, aminas aromáticas, poliamidas; y los endurecedores catalíticos: aminas terciarias, ácidos de Lewis [3].

II.4 Tiempo de Curado

El período de transición del sistema epóxico (mezcla de resina epóxica, agentes modificadores y agente de curado) del estado líquido al estado sólido se conoce como el tiempo de curado. Puede dividirse en tres fases distintas, que se describen a continuación. La velocidad de la reacción y el *tiempo total de curado* varían y dependen de la temperatura ambiental y la masa de la mezcla [6].

➤ Tiempo abierto

El tiempo abierto es el período en el cual la mezcla resina /agente de curado se encuentra en estado líquido y se puede trabajar con ella.

➤ Fase inicial del curado

Después del estado líquido, la mezcla resina /agente de curado pasa al *estado de aglutinación*, generalmente denominado "fase verde". En esta condición la mezcla epóxica ya no es pegajosa, pero es todavía posible hacerle mella con la uña del pulgar y es demasiado blando para lijarlo.

➤ Fase final del curado

La mezcla epóxica se ha curado, ahora está al estado sólido, y ha desarrollado el 90% de su resistencia definitiva, la cual es alcanzada generalmente al cabo de una semana.

III. PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS GENERALES

III. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las propiedades y características generales de las resinas epóxicas preparadas se pueden resumir en:

➤ **Mínima contracción durante el proceso de curado:**

La contracción es de aproximadamente 2 %, ya que habitualmente el proceso no implica la separación de productos secundarios volátiles.

➤ **Se utilizan a temperatura ambiente o algo más elevada**

Esto depende del tipo de agente de curado que se utiliza. Las reacciones con aminas líquidas pueden realizarse a temperatura ambiente: 15 – 30 °C, mientras que las reacciones con anhídridos ácidos ocurren a temperatura elevada: 100-150 °C.

➤ **Adhesividad:**

Por su estructura química rica en grupos polares hidroxilos y éteres, las resinas epóxicas son excelentes adhesivos, sin necesidad de tiempos de exposición largos ni de grandes presiones.

➤ **Excelentes propiedades mecánicas:**

Superior a las de cualquier otro recubrimiento. Su bajo índice de contracción disminuye la posibilidad de tensiones. La Tabla III.1 muestra una comparación de las propiedades mecánicas de sistemas epóxicos, curados con dietilentriamina (DETA) y trietilentetramina (TETA).

Tabla III.1 Propiedades mecánicas de sistemas epóxicos curados con DETA y TETA

Sistema resina/endurecedor	Resistencia a la Compresión (psi)	Resistencia a la Tensión (psi)	Resistencia al impacto Izod (ft-lb/in)
Resina epóxica + DETA (10-11 % en peso)	16500	11400	0.4
Resina epóxica + TETA (13-14 % en peso)	16300	11400	0.4

Fuente: Bruins P., "Epoxy Resin Technology".

➤ **Alto poder de aislamiento eléctrico:**

Los sistemas curados con aductos de aminas alifáticas son los que presentan mejor aislamiento eléctrico, alrededor de los 450-500 V/mil (Voltios/milésima de pulgada).

➤ **Gran resistencia química:**

La cual vendrá influenciada por el agente de curado utilizado. La tabla III.2 muestra la resistencia química de algunos agentes de curado.

Tabla III.2 Resistencia química de algunos agentes de curado

Resistencia Química		
Ácidos	Solventes	Agua
Lo mejor posible	Lo mejor posible	Lo mejor posible
Amina aromática	Amina alifática	Poliamida
Amina cicloalifática	Aduetos de aminas alifáticas	Amina cicloalifática
Amina alifática	Amina cicloalifática	Amina alifática
Aduetos de aminas alifáticas	Amina aromática	Aduetos de aminas alifáticas
Poliamida	Poliamida	Amina aromática

Fuente: <http://www2.sherwin-williams.com/im/pulppaper/epoxy1.asp?nav=Tools>

Nota: La resistencia química de los agentes de curado aumenta de abajo hacia arriba.

➤ **Gran versatilidad:**

Siendo las resinas epóxicas preparadas los polímeros termoestables más versátiles, ya que pueden alterarse sus propiedades solamente con variar cualquiera de los agentes modificadores (diluyentes y flexibilizadores, cargas), y/o los agentes de curado.

**IV. MATERIAS PRIMAS PARA LA PREPARACION DE
COMPUESTOS EPOXICOS**

IV. MATERIAS PRIMAS PARA LA PREPARACION DE COMPUESTOS EPOXICOS

Las formulaciones epóxicas para la preparación de los compuestos epóxicos de 100% sólidos, se constituyen en base a dos componentes básicos, PARTE A: resina epóxica y PARTE B: agente de curado o endurecedor. Generalmente en la resina epóxica (PARTE A) van incorporados agentes modificadores, tales como diluyentes, flexibilizadores, cargas y otros, que tienen por objeto modificar las propiedades físicas o químicas de dicha formulación, o abaratarla.

IV.1 Resinas Epóxicas

Se obtienen comúnmente por la reacción entre bisfenol-A y epiclorhidrina en presencia de hidróxido de sodio (Fig. IV.1) [4].

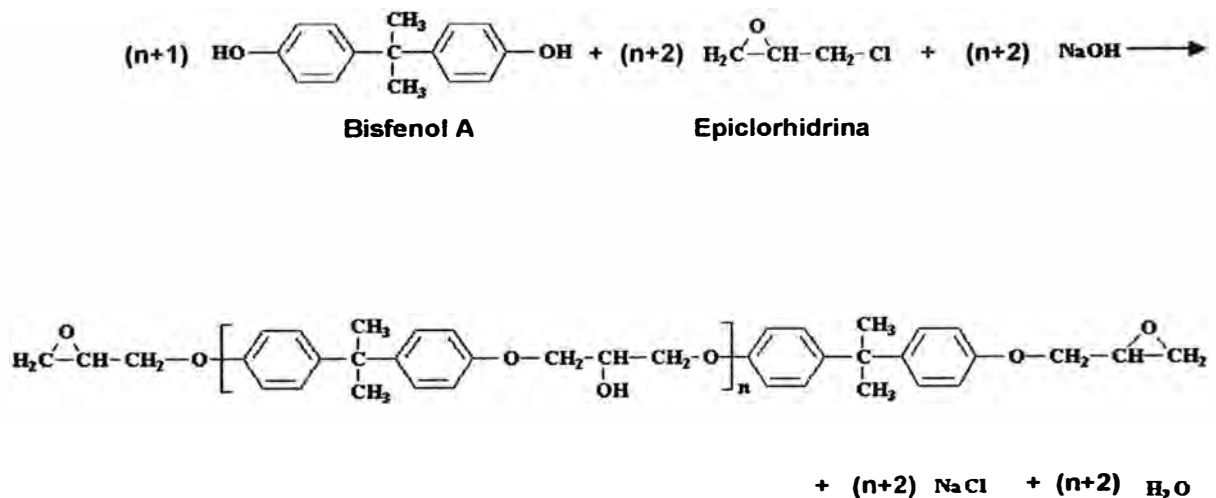


Fig. IV.1 Obtención de una molécula de DGEBA

Según las cantidades en que se adicionan los constituyentes y las condiciones en que se efectúan las reacciones, se obtienen resinas sólidas, viscosas o líquidas.

Son característicos los grupos oxirano o epóxicos, muy reactivos, comprendidos en la molécula de la resina. Desaparecen durante el curado.

IV.1.1 Parámetros que caracterizan a las resinas epóxicas :

Las resinas epóxicas se caracterizan por:

➤ **Peso Molecular**

Cuando el peso molecular es superior a 908 son sólidas, mientras que resinas con menor peso molecular son líquidas o semisólidas.

➤ **Equivalente epoxi**

Peso molecular de la resina epóxica dividida entre el número de grupos oxirano o epóxicos que contiene.

➤ **Contenido de cloro reactivo**

Es el cloro presente en forma de cloruro hidrolizable, como consecuencia de la presencia de trazas clorhídricas en el proceso de síntesis.

➤ **Color de la resina**

Este se debe al resultado de los grupos fenólicos libres y que por oxidación forman quinonas coloreadas. La resina

epóxica líquida (E.Epx 185-192) tiene un color Gardner máximo de 1.

➤ **Viscosidad**

Aumenta a medida que crece el peso molecular.

IV.2 Diluyentes

Permiten reducir la viscosidad de la PARTE A (resina epóxica y agentes modificadores) de la formulación epóxica, facilitando su aplicación y aumentando la capacidad para contener carga. Pueden ser inertes y reactivos.

Los diluyentes inertes o no reactivos, reducen la viscosidad de forma apreciable. El diluyente permanece en el curado pero no está químicamente unido a él.

Los diluyentes reactivos son los de mayor utilización. Habitualmente son compuestos monoepoxídicos, como la Epiclorhidrina, que reaccionan con el sistema epóxico (resina epóxica, agentes modificadores y agente de curado) quedando químicamente unidos a él [1].

Algunos de los diluyentes reactivos más usados hoy en día son mostrados en la tabla IV.1

Tabla IV.1 Propiedades típicas de diluyentes reactivos

Diluyente	Viscosidad (cp)	Densidad (g/ml)	Peso equivalente epoxi
Butil glicidil eter	1-2	0.91	130-135
Cresil glicidil eter	5-10	1.08	175-195
Fenil glicidil eter	4-7	1.11	150-165
C ₁₂ -C ₁₄ glicidil eter	6-10	0.89	280-300

IV.3 Flexibilizadores (Plastificantes)

Su misión es reducir la rigidez del sistema epóxico, mejorando su flexibilidad y aumentando su grado de deformación elástica, así como la de incrementar la procesabilidad de las mezclas [1].

El flexibilizador se disuelve en el polímero, disminuye la atracción entre las cadenas poliméricas y permite que se deslicen entre sí. En el caso de redes poliméricas como las constituidas por las resinas epóxicas, el flexibilizador se introduce antes de la formación de la estructura química, y por lo tanto puede afectar no sólo a las características del polímero resultante, sino también a su proceso de formación [7].

Entre los flexibilizadores o plastificantes más comunes tenemos el dibutil ftalato (DBP) y dioctil ftalato (DOP).

IV.4 Cargas

Utilizadas para abaratar o mejorar algunas propiedades de la formulación epóxica (ver Tabla IV.2). Suelen ir incorporadas en la resina. En ocasiones pueden llegar a representar hasta un 80% en peso del producto final, de aquí estriba su importancia y la necesidad de conocer su naturaleza, granulometría y forma en las propiedades generales de la formulación.

Su naturaleza es muy diversa. Puede ser sílice, cuarzo, grafito, sulfato de bario, fibra de vidrio, etc. Dentro de las cargas, se consideran a los agentes tixotrópicos que confieren a la formulación epóxica una estructura capaz de soportar elevados esfuerzos cortantes, evitando su descuelgue. Las más comunes son las micas, bentonitas o fibras de vidrio [1].

La Tabla IV.2 resume las propiedades que se pueden obtener o mejorar en los compuestos epóxicos, con la incorporación apropiada de una carga [3].

Tabla IV.2 Propiedades mejoradas por efecto de las cargas

Propiedad mejorada	Carga
Costo	Dióxido de silicio, Carbonato de Calcio
Densidad	Microesferas de vidrio
Resistencia al impacto	Fibra de Vidrio
Resistencia a la tensión	Fibra de Vidrio
Resistencia a la compresión	Dióxido de Silicio
Resistencia dieléctrica	Mica, Dióxido de Silicio

Fuente: Bruins P., "Epoxy Resin Technology".

IV.5 Pigmentos

La finalidad de los pigmentos no es otra que la de dar color, opacidad y en algunos casos inhibir de la corrosión. Generalmente son de origen mineral y tienen como misión principal cubrir el soporte con el aspecto deseado, y en ocasiones reforzar la acción del ligante. En la Tabla IV.3 se detallan algunos de los pigmentos más comunes que se utilizan en la formulación epóxica.

Tabla IV.3 Principales pigmentos utilizados en la formulación de compuestos epóxicos

Pigmentos
Cromato de Plomo (amarillo de Cromo) - PbCrO_4
Cromato de Zinc (amarillo) - ZnCrO_4
Oxido de Cromo (esmeralda) - CrO_2
Oxido de Hierro (rojo) - Fe_2O_3
Dióxido de Titanio (blanco) - TiO_2

IV.6 Aditivos

Son sustancias añadidas en pequeñas cantidades a un recubrimiento para mejorar o modificar una o más propiedades [2].

Los aditivos más importantes utilizados en la preparación de los compuestos epóxicos están resumidos en la tabla IV.4.

Tabla IV.4 Tipos de Aditivos

Aditivo	Efecto	Tipos
Dispersante	Mejora la dispersión del pigmento	Poliacrilato de sodio, hexametáfosfato de sodio
Humectante	Mejora la humectación de las partículas de carga	Sales de alquilamonio, sales de ester fosfórico
Antiespumante	Elimina las burbujas de aire durante el proceso de elaboración y en el momento de la aplicación	Aceites minerales emulsionados, alcoholes, aditivos de silicona
Nivelante	Evita la cáscara de naranja, el flotado de pigmentos	Acrilatos, siliconas modificadas, polímeros fluorados

IV.7 Endurecedor o Agente de Curado

Tiene por misión reaccionar con los anillos oxirano de la resina epóxica para transformar un polímero lineal soluble en un polímero entrecruzado (reticulado) insoluble e infusible [1].

Los endurecedores pueden clasificarse en 2 grandes grupos: catalíticos y polifuncionales:

Los endurecedores catalíticos dan lugar a la reacción de homopolimerización de la resina. Estos endurecedores se utilizan de 1 a 5 % en peso respecto a la resina epóxica. Entre los endurecedores catalíticos más importantes tenemos las aminas terciarias (Fig. IV.2) y ácidos de Lewis.

Los endurecedores polifuncionales, en cantidades estequiométricas, actúan como reactivos o comonómeros, dando lugar

al entrecruzamiento de las moléculas de resina a través de ellos mismos.

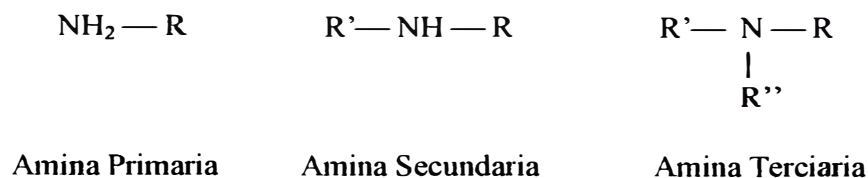


Fig. IV.2 Tipos de Aminas

Los agentes polifuncionales son de estructura química diversa, caracterizándose por la presencia de hidrógenos activos. Los de más amplia utilización incluyen aminas alifáticas primarias y secundarias, poliaminas primarias y secundarias, ácidos polibásicos y anhídridos (Fig. IV.6).

También pueden clasificarse en función de la temperatura de trabajo: agentes de curado en frío, los cuales actúan a temperatura ambiente, incluso en atmósferas húmedas; y agentes de curado en caliente, cuyo entrecruzamiento se produce al elevar la temperatura alrededor de los 120°C [1].

Los agentes endurecedores más comunes pueden clasificarse de la siguiente forma:

➤ **Aminas Alifáticas**

Las aminas alifáticas se forman cuando uno o más hidrógenos del amoníaco (NH_3) son sustituidos por uno o más grupos alquil. Si sólo hay un grupo alquil se dice que la amina es alifática primaria, si hay dos grupos alquil, la amina es alifática secundaria. Las poliaminas alifáticas son cadenas de carbono que contienen dos o

Materias primas para la preparación de compuestos epóxicos

más grupos de aminas alifáticas. En general las aminas líquidas reaccionan a temperatura ambiente.

Las poliaminas alifáticas son las que se usan más frecuentemente como agentes de curado en las formulaciones epóxicas, esto debido a las altas propiedades mecánicas que se consiguen, así como a la posibilidad de efectuar la reacción de curado a bajas temperaturas, siendo las más importantes la etilendiamina (ETA, Fig. IV.3), dietilentriamina (DETA) y trietilentetramina (TETA) [3].



Fig. IV.3 Etilendiamina (ETA)

➤ **Aminas Cicloalifáticas**

Las aminas cicloalifáticas se forman cuando uno o más hidrógenos del amoniaco (NH_3) son sustituidos por uno o más grupos cicloalquil. Curan a bajas temperaturas y en condiciones húmedas. Los sistemas que lo emplean presentan buena estabilidad de color, adherencia y resistencia química muy buena. Entre las aminas cicloalifáticas tenemos a la piperidina (Fig.IV.4).

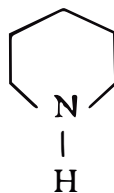


Fig. IV.4 Piperidina

➤ **Aduetos de Aminas**

Son mezclas de resinas que han reaccionado parcialmente y que tiene un exceso de amina.

➤ **Poliamidas**

Las poliamidas son productos de la reacción de ácidos grasos insaturados con poliaminas primarias.

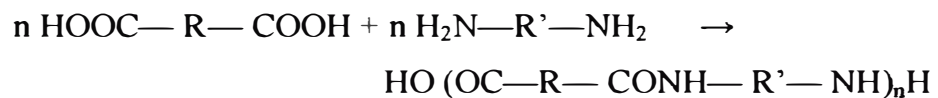


Fig. IV.5 Poliamida

Estos compuestos actúan de forma similar que las poliaminas alifáticas, reaccionan a temperatura ambiente. Las poliamidas usadas como agentes de curado presentan películas con mejor flexibilidad y resistencia al agua que las poliaminas [5].

➤ **Anhidridos ácidos**

Los anhidridos provienen de la condensación de dos ácidos carboxílicos y la pérdida de una molécula de agua (Fig. IV.6). Los sistemas curados con anhidridos ácidos son generalmente muy estables térmica y químicamente; no obstante su baja exotermia requiere que los sistemas que los emplean, estén curados por períodos relativamente largos a temperatura elevada [3]. Entre los anhidridos ácidos tenemos al anhidrido ftálico.

Materias primas para la preparación de compuestos epóxicos

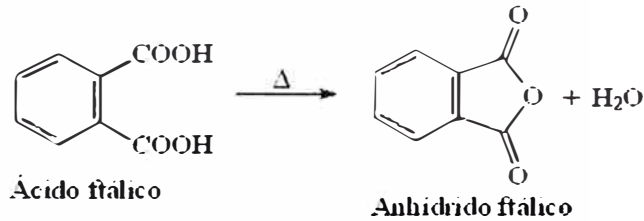


Fig. IV.6 Obtención del anhídrido ftálico

➤ **Catalizadores**

Las resinas epóxicas pueden ser polimerizadas por varios catalizadores como los ácidos de Lewis o aminas terciarias (Fig. IV.2)

Las aminas terciarias se forman cuando los tres hidrógenos del amoniaco (NH₃) son sustituidos por grupos alquil o aril, entre las más usadas tenemos la bencildimetilamina.

El ácido de Lewis más usado es el complejo de trifluoruro de boro monoetilamina (C₂H₅NH₂.BF₃). Los sistemas epóxicos que emplean estos catalizadores necesitan ser curados a altas temperaturas (con aminas terciarias 65-90°C, con ácidos de Lewis 150-175°C), obteniéndose sistemas con buena resistencia química pero baja flexibilidad.

V. REACCIONES DE ENDURECIMIENTO Y CURADO

V. REACCIONES DE ENDURECIMIENTO Y CURADO

Las resinas epóxicas por sí mismas, no presentan ninguna propiedad técnica útil hasta que son endurecidas de manera efectiva mediante reacciones químicas. Su estructura química ha de ser transformada en un entramado o red tridimensional, con enlaces covalentes en todas las direcciones.

Puesto que las resinas epóxicas base son lineales, es necesario normalmente en el momento de la aplicación, añadir un agente de entrecruzamiento adecuado que transforme el polímero lineal soluble en un polímero entrecruzado insoluble e infusible. Este proceso se conoce con el nombre de curado, entrecruzamiento o endurecimiento de la resina [1].

El mecanismo de curado implica la interacción del anillo oxirano, fundamentalmente con hidrógenos activos, dando como resultado la apertura del ciclo.

El mecanismo principal de algunas reacciones de curado se puede resumir a continuación:

➤ **Aminas primarias**

El mecanismo que se produce es esencialmente el que se muestra en la siguiente figura:

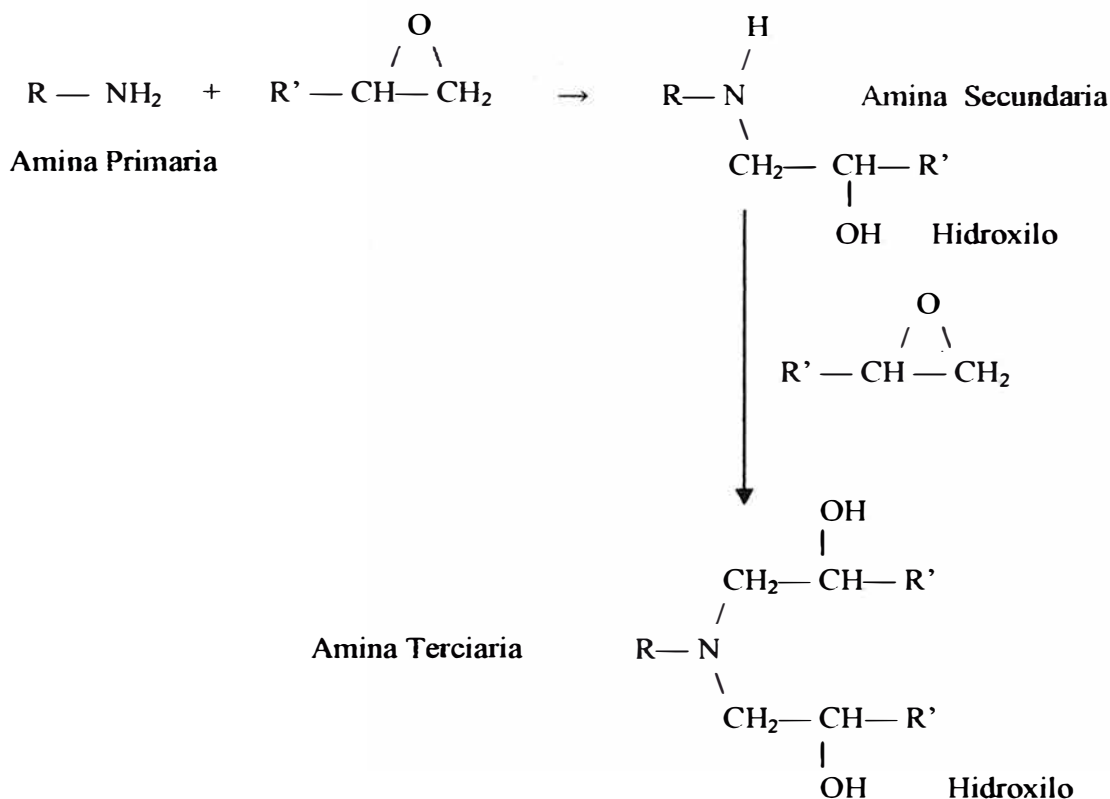


Fig. V.1 Reacción de curado entre una amina y un grupo oxirano

En el primer paso se produce la reacción entre una amina primaria y un anillo oxirano, formando un grupo hidroxilo y una amina secundaria. La amina secundaria, formada en esta primera reacción, reacciona con otro grupo oxirano formando una amina terciaria y un nuevo grupo hidroxilo. Los grupos hidroxilos que actúan como catalizadores, son generados en estas dos reacciones de condensación. Durante este proceso los grupos hidroxilos formados podrían dar una reacción de eterificación con los grupos oxirano [8].

➤ **Aminas terciarias**

Esta reacción está facilitada por la acción catalítica de las aminas terciarias, es decir compuestos que no poseen hidrógeno reactivo.

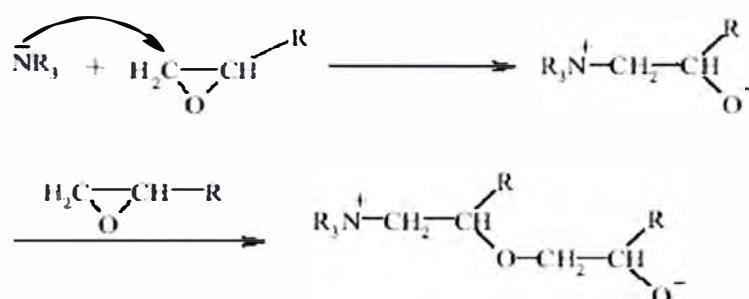


Fig. V.2 Mecanismo de eterificación catalizada por aminas terciarias

Según el mecanismo postulado, la reacción comienza con el ataque de la amina terciaria al anillo oxirano, el cual se abre y genera un alcoholato. Este alcoholato reacciona con otro anillo oxirano propagando la cadena de poliéter. En caso tratarse de monómeros diglicídicos, la propagación acaba dando lugar a un polímero entrecruzado.

Contrariamente al curado con aminas primarias, las aminas terciarias tan solo inician la reacción y por lo tanto sólo se incorporan a la estructura del polímero en crecimiento como grupo inicial. [8].

➤ **Reacción con anhídridos cicloalifáticos y aromáticos**

Los anhídridos no reaccionan fácilmente con las resinas epóxicas excepto en presencia de agua, alcohol, o un acelerador. Las aminas terciarias y las sales metálicas sirven a menudo para esta función [3-8].

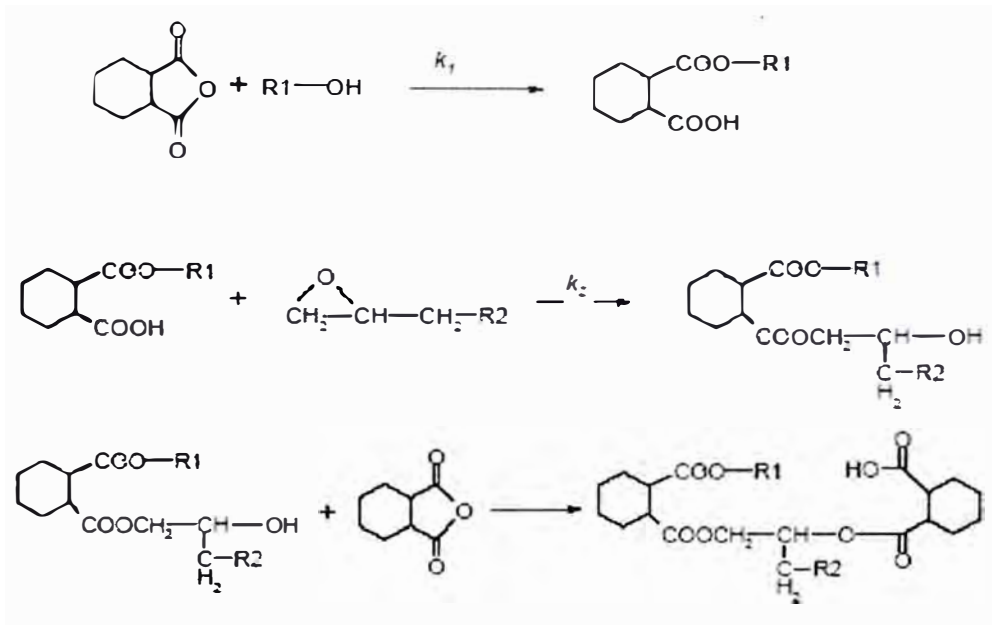


Fig. V.3 Reacción de curado entre un anhídrido y un grupo oxirano en presencia de un alcohol

VI. PREPARACION DE COMPUESTOS EPOXICOS

VI. PREPARACION DE COMPUESTOS EPOXICOS

VI.1 Equipos

La preparación de compuestos epóxicos de 100% sólidos, que curan a temperatura ambiente se realizan por separado, una con la resina epóxica y agentes modificadores, (PARTE A), y otra con el agente de curado (PARTE B).

Los equipos que se utilizan para la preparación de la PARTE A son el molino tricilíndrico y la mezcladora planetaria.

VI.1.1 Molino Tricilindrico

Este equipo se utiliza para la dispersión de los pigmentos en la resina epóxica. El molino tricilíndrico tiene 3 rodillos de acero ubicados tangencialmente uno al lado del otro, que rotan a diferentes velocidades. El material que se molerá se pone entre el rodillo de alimentación y el rodillo del centro. Cada rodillo adyacente rota a velocidades progresivamente más altas. El rodillo de alimentación puede rotar en 30 RPM, el rodillo del centro en 90 RPM y el rodillo de adelante a 270 RPM. El material es arrastrado entre los rodillos, los cuales al girar producen las fuerzas de corte necesarios para la dispersión. El material molido es quitado del rodillo de adelante por un cuchillo que funciona contra el rodillo [9].

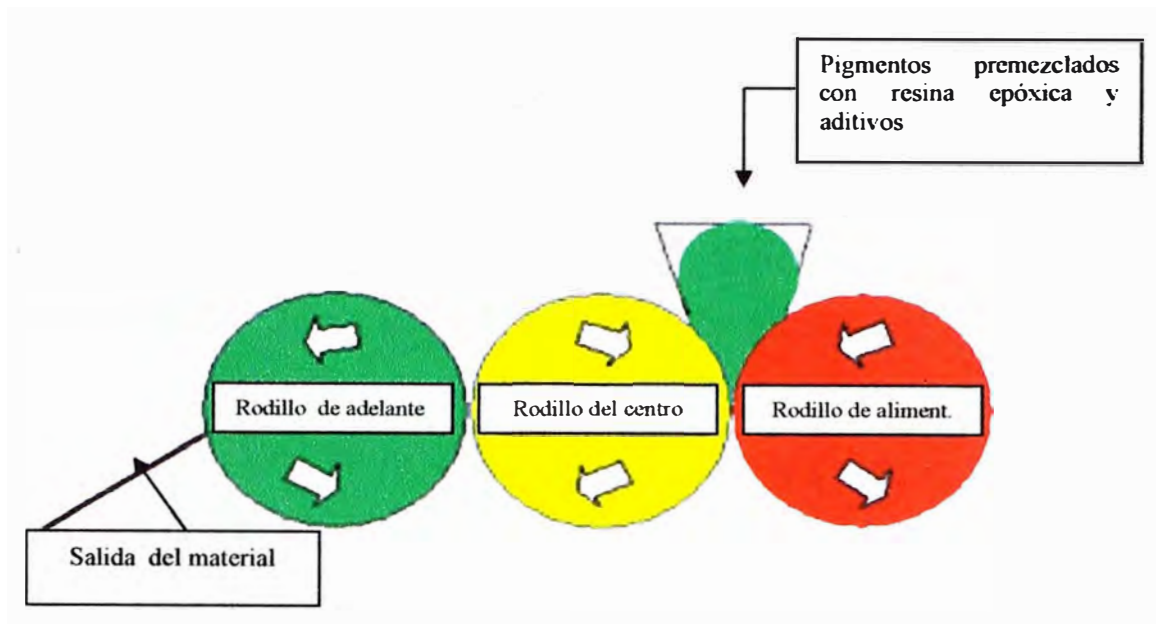


Fig. VI.1 Funcionamiento de los rodillos

VI.1.2 Mezcladora Planetaria

Este equipo está diseñado para mezclar y amasar materiales viscosos de hasta aproximadamente 6 millones de centipoises. Se utiliza para mezclar la resina epóxica con los agentes modificadores.

La mezcladora planetaria consiste en un recipiente o cuba de mezcla que contiene unas palas mezcladoras. Estas palas mezcladoras, que giran sobre si mismas, son transportadas con un movimiento circular por la cuba de mezcla. Las palas avanzan continuamente a lo largo de la periferia del recipiente, quitando el material de la pared del recipiente y transportándolo al interior [9].

La conjunción de todos estos elementos permite un perfecto amasado de toda la PARTE A.

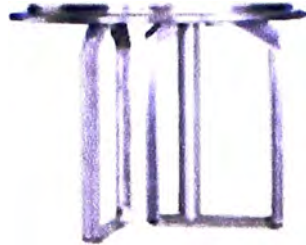


Fig. VI.2 Palas de Mezcla



Fig. VI.3 Mezcladora Planetaria

VI.2 Manufactura

- **PARTE A:** La preparación se divide en: dispersión del pigmento, y mezclado.

En la etapa de la dispersión, se mezcla una parte de la resina epóxica con el pigmento y aditivos y se muele en el molino tricilindrico, la pasta formada se recircula varias veces hasta obtener el grado de dispersión deseado.

La etapa de mezcla se realiza en la mezcladora planetaria. Se mezclan primero la resina epóxica con sus agentes modificadores, como los diluyentes y flexibilizadores. Una vez obtenida una mezcla uniforme se agrega la carga y se sigue mezclando. Al final se agrega la pasta obtenida en el molino tricilindrico, compuesta por el pigmento dispersado en la resina epóxica, para dar la tonalidad deseada.

- **PARTE B:** Generalmente la parte B, que contiene el agente de curado, no contiene carga, modificadores ni pigmentos. Por lo que la parte B está compuesta por el endurecedor puro.

La cantidad de agente de curado que se envasa, se calcula teniendo en cuenta la estequiometría de la combinación resina epóxica/agente de curado (ver anexo).

VII. PRUEBAS DE LABORATORIO

VII. PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio se realizan para evaluar diferentes tipos de propiedades que presentan los compuestos epóxicos.

Una vez preparada la formulación epóxica: PARTE A (resina y agentes modificadores) y PARTE B (agente de curado), ambas partes se mezclan y se procede a realizar las siguientes pruebas:

VII.1 Tiempo abierto o Pot life

Esta prueba se utiliza para determinar el tiempo en el cual la mezcla resina/agente de curado se encuentra en estado líquido y se puede trabajar con ella.

Si la reacción tiene lugar a temperatura ambiente, se mezcla la PARTE A (resina y agentes modificadores) y PARTE B (agente de curado), teniendo una masa total de aproximadamente 100g. Y mediante una evaluación exhaustiva e introduciendo una pequeña aguja al recipiente donde se encuentra la mezcla, a diversos intervalos de tiempo, se determina el tiempo en el cual se detecta una disminución en la trabajabilidad de la mezcla resina/agente de curado.

El pot life varia dependiendo del agente de curado que se utiliza, como se muestra en la tabla VII.1

Tabla VII.I Comparación del Pot life de algunos agentes de curado

Pot life
Largo
Poliamidas
Aminas cicloalifáticas
Aductos de Aminas alifáticas
Aminas alifáticas
Corto

Fuente: Manual de Air Products, “Epoxy Curing Agents”.

Nota: El pot life de los agentes de curado aumenta de abajo hacia arriba.

Las siguientes pruebas se realizan en la resina ya curada.

VII.2 Resistencia a la Compresión

Este método determina el máximo esfuerzo de compresión que puede resistir la resina ya curada sin romperse.

Los especímenes pueden ser bloques o cilindros. Según la norma ASTM D-695 [10], los bloques típicos son de 12.7 x 12.7 x 25.4 mm y los cilindros son de 12.7mm de diámetro y 25.4mm de largo.

El espécimen se pone entre las placas compresivas paralelas a la superficie de la máquina de prueba universal y se comprime en un índice constante de 1.3 mm/min (0.50 in/min). La carga soportada por el espécimen para producir la fractura se registra y se divide entre el área seccionada transversalmente (Norma ASTM D-695).

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{\text{carga a la rotura}}{\text{área seccionada transversalmente}}$$

VII.3 Resistencia a la Tracción

Tensión máxima que puede resistir sin romperse un material sometido a una carga de tracción.

El espécimen más común, según la norma ASTM D-638 es una barra extensible tipo I, como se muestra en la Fig. VII.1 y cuyas dimensiones están en la tabla VII.2.

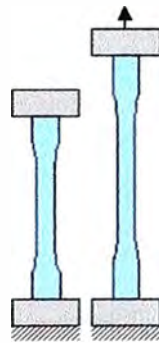


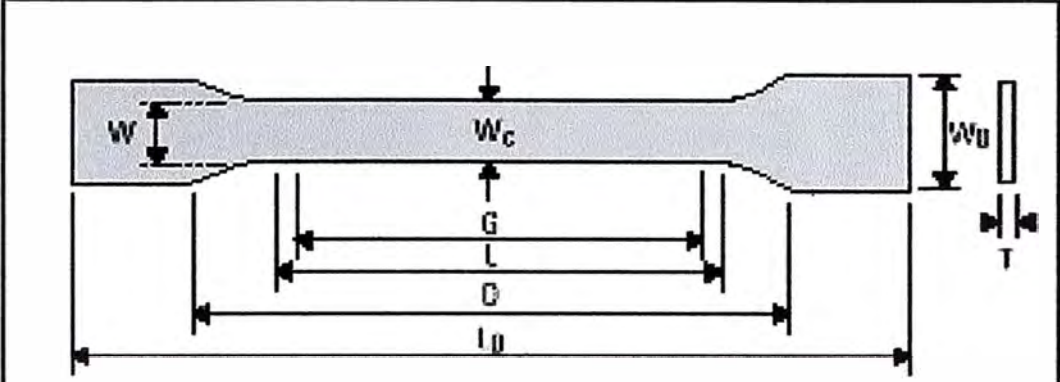
Fig. VII.1 Barra Extensible tipo I

Los especímenes de la prueba se colocan en los sujetadores de una máquina de prueba extensible universal, en una separación especificada del sujetador y se estiran hasta la rotura. Según la norma ASTM D-638, la velocidad de la prueba es determinada por el tipo de material, para este caso de los compuestos epóxicos, se usa 1.3mm/min [10-11].

Así se tiene:

$$\text{Resistencia a la tracción} = \frac{\text{carga a la rotura}}{\text{área representativa original del espécimen}}$$

Tabla VII.2 Dimensiones de la barra extensible



Dimensiones	7 o menos		Más de 7 y hasta 14 inclusive	≥ (0,16) o menos
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
W - Anchura de la sección estrecha	13 (0,50)	6 (0,25)	19 (0,75)	3,18 (0,125)
L - Longitud de la sección estrecha	57 (2,25)	57 (2,25)	57 (2,25)	9,53 (0,375)
Wc - Anchura total mín	19 (0,75)	19 (0,75)	29 (1,13)	9,53 (0,375)
LU - Longitud total mín	165 (6,5)	163 (7,2)	246 (9,7)	63,5 (2,5)
G - Longitud calibrada	50 (2,00)	50 (2,00)	50 (2,00)	7,62 (0,300)
D - Distancia entre cabezas de remache	115 (4,5)	135 (5,3)	115 (4,5)	25,4 (1,0)
R - Radio del hilo de la rosca	76 (3,00)	76 (3,00)	76 (3,00)	12,7 (0,5)

VII.4 Resistencia al impacto

La prueba de impacto Izod con hendidura mide la resistencia de los materiales al impacto de un péndulo que oscila. El probador por impacto es un artefacto sencillo en el que un péndulo tiene cierta energía potencial antes y después de romper el espécimen. La energía que se usa para romper el espécimen es proporcional a la diferencia de alturas antes y después del impacto [12].

$$\text{Resistencia al impacto} = (h_1 - h_2) \cdot \frac{W}{d}$$

Donde:

h_1 = altura del péndulo antes de romper el espécimen

h_2 = altura del péndulo después de romper el espécimen

W = Peso del péndulo

d = espesor del espécimen

A los especímenes de Izod se le hacen una hendidura para prevenir la deformación del espécimen sobre el impacto [10]. El espécimen estándar según la norma ASTM D-256 es de 64 x 12.7 x 3.2 mm. ($\frac{1}{2}$ x de $2\frac{1}{2}$ x $\frac{1}{8}$ pulgada). La profundidad debajo de la hendidura del espécimen es 10.2 mm (0.4 pulgada).

La prueba utiliza una viga soportada en un extremo y libre en el otro (Fig. VII.2) y el péndulo es lanzado y se le permite pulsar a través del espécimen. El impacto ocurre en el lado de la hendidura del espécimen. Si no ocurre la fractura, se utiliza un péndulo más pesado hasta que ocurra la falla [10-11].

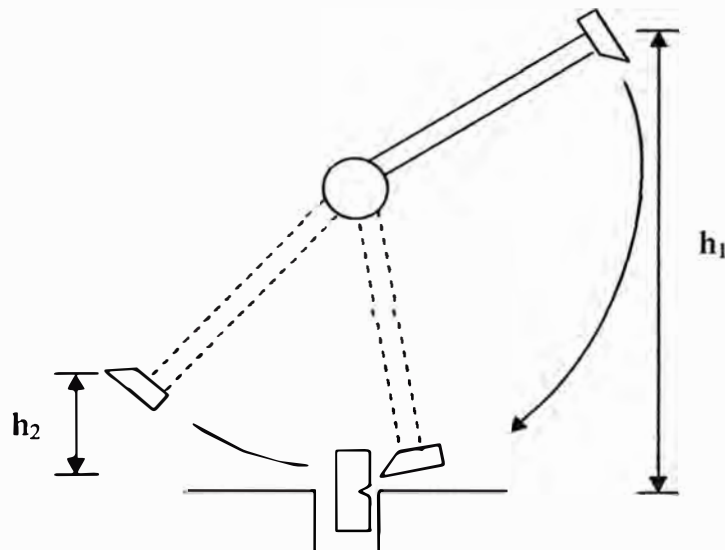


Fig. VII.2 Esquema de la Prueba de Impacto Izod

La fuerza de impacto es calculada dividiendo la energía del impacto en J (o pie-libra) por el espesor del espécimen, se expresa en J/m o ft-lb/in

VII.5 Dureza Shore

Se utiliza para medir la dureza de los materiales plásticos o elastómeros suaves.

El instrumento que se utiliza es el durómetro. La prueba mide la penetración de un indentador especificado en el material, bajo condiciones especificadas de fuerza y de tiempo.


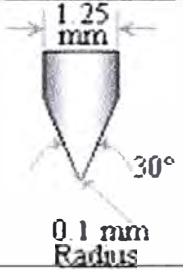
El espécimen, que es generalmente de 6.4 mm de espesor (ASTM D-2240) [10], primero se pone en una superficie plana dura. El indentador entonces se presiona en el espécimen cerciorándose de que es paralelo a la superficie, como se observa en la Fig. VII.3. La dureza se lee en el plazo de un segundo del contacto firme con el espécimen.



Fig. VII.3 Durómetro A

La dureza se expresa por un número el cual es inversamente proporcional a la profundidad de la huella hecha por el indentador. La escala de la dureza varía de 0 (para la penetración completa) a 100 (para ninguna penetración).

Tabla VII.3 Tipos y usos de los durómetros

Durómetro	Carga (N)	Uso	Indentador
A	12.5	Utilizado para materiales más suaves.	
D	50	Utilizado para materiales más duros.	

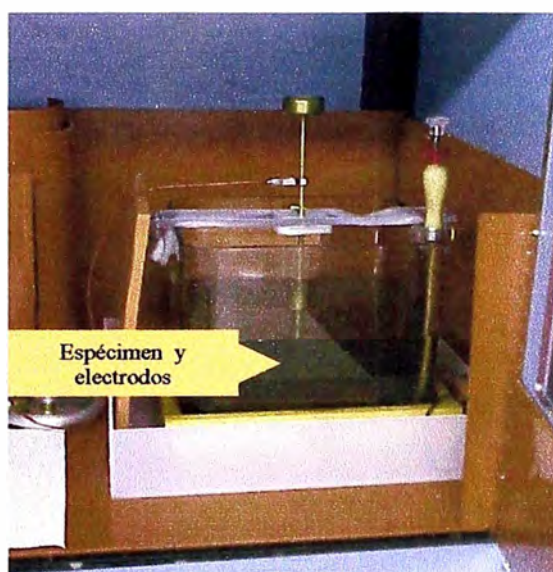
VII.6 Resistencia Dieléctrica

La resistencia dieléctrica se define como el voltaje máximo requerido para producir una interrupción dieléctrica a través del material. Mientras más alta es la resistencia dieléctrica de un material, es mejor su calidad como aislador [10].

El procedimiento que se utiliza es el método A (Norma ASTM D-149), que consiste en el espécimen de la prueba puesto entre dos electrodos en aceite (Fig.VII.4). Este método se detalla en la Tabla VII.4.

Tabla VII.4 Método para determinar la resistencia dieléctrica

Método	Nombre	Descripción
A	Corto Tiempo	El voltaje se aumenta a una velocidad uniforme hasta la interrupción dieléctrica del material.

**Fig. VII.4 Espécimen y electrodos sumergidos en aceite****Fig. VII.5 Espécimen después de ocurrida la interrupción dieléctrica**

El tipo recomendado del espécimen para esta prueba es una placa cilíndrica de 4 pulgadas de diámetro o más grande. Cualquier espesor de la muestra puede ser utilizado, el más común fluctúa entre 0.8 a 3.2 milímetros (0.032 a 0.125 pulgada).

La resistencia dieléctrica es calculada dividiendo el voltaje de interrupción por el espesor de la muestra. Los datos se expresan en Volts/mil (Voltios/milésima de pulgada) [10].

VIII. APLICACIONES DE LAS RESINAS EPOXICAS

VIII. APLICACIONES DE LAS RESINAS EPOXICAS

Las resinas epóxicas combinadas con los agentes de curado y en algunos casos con agentes modificadores (diluyentes, flexibilizadores, cargas, pigmentos, aditivos), tienen múltiples aplicaciones. Entre ellas citamos:

VIII.1 Pinturas y acabados

Las resinas epóxicas se usan mucho en capas de imprimación, tanto para proteger de la corrosión como para mejorar la adherencia de las posteriores capas de pintura. Las latas y contenedores metálicos se suelen revestir con sistemas epóxicos para evitar que se oxiden, especialmente en alimentos ácidos, como el tomate. También se emplea en decoraciones de suelos de alta resistencia [13].



Fig. VIII.1 Pinturas epóxicas

VIII.2 Adhesivos

Las resinas epóxicas corresponden a un tipo de adhesivos llamados estructurales o de ingeniería, los cuales son aquellos que deben soportar una carga mayor que el peso del adherente. Estos adhesivos se utilizan en la construcción de aviones, autos, bicicletas, esquís. Sirven para pegar gran cantidad de materiales como metal, madera, vidrio, concreto, etc., [3] y se puede conseguir que sean rígidos o flexibles, transparentes o de color, de secado rápido o lento [13]. La combinación que se utiliza es resina epóxica-poliamida.



Fig. VIII.2 Adhesivos para la construcción de aviones

VIII.3 Materiales compuestos

Las resinas epóxicas se usan tanto en la construcción de moldes, como de piezas maestras, laminados y otras ayudas a la producción industrial. Los resultados son más baratos, resistentes y rápidos de producir que los hechos de madera, metal, etc. Los compuestos de fibras y resina epóxica, aunque son más caros que lo de resinas de poliéster o de éster de vinilo, producen piezas más resistentes [13].

La combinación que se utiliza generalmente es resina epóxica-poliamina alifática

VIII.4 Sistemas eléctricos y electrónicos

En generación eléctrica, estas resinas se usan para encapsular o recubrir los motores, generadores, transformadores, reductoras, escobillas y aisladores, para protegerlos. Además, las resinas epóxicas son excelentes aislantes eléctricos y se usan en muchos componentes, para proteger de cortocircuitos, polvo, humedad, etc.

En la industria electrónica se usan con profusión para el encapsulado de los circuitos integrados y los transistores. También se usan en la fabricación de circuitos impresos; el tipo de circuito impreso más frecuente, el FR-4, no es más que un sándwich de capas de fibra de vidrio pegadas entre sí por resina epóxica [13].

Generalmente la combinación que se utiliza es resina epóxica-aducto de amina alifática.

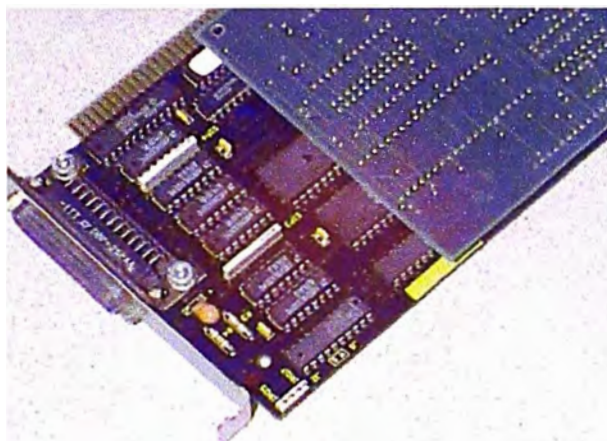


Fig. VIII.3 Encapsulado de circuitos

VIII.5 Consumo y aplicaciones náuticas

Se pueden encontrar resinas epóxicas en ferreterías y grandes almacenes, generalmente en forma de adhesivos de dos componentes. Se venden también en tiendas de náutica para reparación de barcos. Los sistemas epóxicos no suelen ser la última capa del recubrimiento de un barco porque presentan el inconveniente de ser atacadas por la radiación ultravioleta presente en la luz solar. Esta radiación provoca la ruptura del enlace del carbono adyacente a la unión fenilo, causando la degradación superficial del polímero [14]; es por esto que se suelen recubrir con barnices marinos o coberturas de gel de poliéster que protegen de los rayos UV [13]. Comúnmente la combinación que se utiliza es resina epóxica-poliamida.



Fig. VIII.4 Reparación de barcos

**IX. FORMULACION DE UN COMPUESTO EPOXICO
DE 100% SOLIDOS**

IX. FORMULACION DE UN COMPUESTO EPÓXICO DE 100 % SOLIDOS

Este es un compuesto epóxico de 100 % sólidos, que se utiliza en el respaldo del forro de las chancadoras. Este producto requiere tener buenas propiedades mecánicas, por lo que después de haber realizado toda una explicación de las materias primas que se utilizan en la preparación de compuestos epóxicos, la formulación sugerida es la siguiente:

PARTE A

Resina Epóxica

Diglicidil eter del bisfenol A (DGEBA): 20-30 %

Es la resina epóxica mas usada comercialmente con un E.Epx. entre 185-192.

Diluyente epóxico

Butil glicidil eter 1-5 %

Es el diluyente más usado en las formulaciones epóxicas, permite reducir la viscosidad de la formulación.

Cargas

Dióxido de silicio 40-60 %

Otorga unas buenas propiedades de resistencia a la compresión y de impacto a la formulación.

Formulación de un compuesto epóxico de 100% sólidos

Carbonato de Calcio : 5-10 %
 Reduce la exotermia de la reacción de curado y disminuye la contracción. Se utiliza para evitar que se asiente la carga.

Humectante

Sal de alquilamonio : 0.5-1 %
 Mejora la velocidad de humectación de la carga.

Antiespumante

Mezcla de hidrocarburos : 0.2-0.8 %
 (parafínicos, nafténicos)
 Previene la formación de espuma y burbujas durante la preparación y/o aplicación del producto.

PARTE B

Agente de Curado

Trietilentetramina (TETA) : 100% (13 - 14% respecto a la resina epóxica) -
 Poliamina alifática, se obtienen muy buenas propiedades mecánicas, y la reacción de curado se realiza a temperatura ambiente.

El producto final tiene muy buenas propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión (psi)	18000
Resistencia a la tracción (psi)	6200
Resistencia al impacto(ft-lb/in)	2.7

X. RECOMENDACIONES

X. RECOMENDACIONES

- Siempre antes de realizar la formulación del compuesto epóxico se debe determinar la relación estequiométrica de la combinación resina epóxica-agente de curado.
- Para obtener un compuesto epóxico de determinadas propiedades como flexibilidad, resistencia dieléctrica, resistencia química, se debe tener en cuenta principalmente el agente de curado que se utiliza.
- Después de iniciada la mezcla de la resina epóxica con el agente de curado, cuando la reacción ocurre a temperatura ambiente, se recomienda de 15 a 20 minutos de espera antes de la utilización del producto para que haya una interacción entre los componentes.

XI. CONCLUSIONES

XI. CONCLUSIONES

- La estructura química de las resinas epóxicas hacen posible un gran número de aplicaciones, ya sean pinturas, adhesivos, aisladores, materiales compuestos. Por sus características, se ha utilizado en diversas aplicaciones en empresas de mantenimiento de tanques y maquinaria, muebles, pisos y revestimientos cerámicos, en juntas de dilatación y estructuras de concreto, empaques, industria gráfica, pinturas de barcos y plataformas, adhesivos estructurales. En la industria electrónica, en barnices electroaislantes y en encapsulamiento; automotriz y muchas otras. Esto demuestra la gran versatilidad de esta resina, con excelentes resultados sumados a costos adecuados, y una óptima calidad del revestimiento final.
- Si la reacción de la resina epóxica con el agente de curado se realiza a temperatura ambiente, la resina y el agente de curado deben estar envasados por separado y mezclarse momentos antes de la aplicación según una proporción estequiométrica, asegurando un balance tal que cada grupo amino se combine en la proporción adecuada con los grupos oxirano presentes y para que la reacción entre ambos se realice en forma completa.
- El punto más crítico en la utilización de las resinas epóxicas es la fase de curado. Todas las reacciones con los grupos oxirano son exotérmicas, siendo la temperatura un factor decisivo en la velocidad, que aumenta al hacerlo la temperatura.

XII. BIBLIOGRAFIA

XII. BIBLIOGRAFIA

- [1] Coderh J., “Riesgos en el empleo de Resinas Epoxi”, Publicación Institucional de Ibermutuamur, 1999, pág. 40.
- [2] Rodríguez T., Tesis Doctoral: “Formulación y Evaluación de Imprimaciones Epoxis Anticorrosivas, Curables a Temperatura Ambiente”, España, 2004, pág. 13, 14, 24
- [3] Bruins P., “Epoxy Resin Technology”, USA, 1968, pág. 2, 4, 66, 121
- [4] Ciba- Geige, “Epoxy Resins and curing agents”, Publ. Nº. 24301/e., pág 3.
- [5] Jordano J, Maluf V, “Resinas epóxicas un polifacético componente”, Inpra Latina, Julio-Agosto 2005, pág. 18.
- [6] Has Team Aeromodelismo, “Manual Técnico del Epoxi”, Argentina, 2002, <http://www.hasteam.com.ar/Aero.htm>.
- [7] Wade L. G. Jr., “Química Orgánica”, México, 1993, pág. 1258.
- [8] Ribera D. Tesis: “Obtenció de LCT's a partir de reïnes epoxi cristall líquid amb estructura de dímer”, España, 2002. pág. 101, 122.
- [9] Charles Ross and Son Company,
<http://www.mixers.com/Proddetails.asp?ProdID=115>,
<http://www.mixers.com/Proddetails.asp?ProdID=58>.
- [10] Plastics Technology Laboratories, <http://www.ptli.com/default.asp>.

- [11] IDES The Plastics Web, ASTM, ISO & IEC Test Methods,
http://www.ides.com/property_descriptions/.
- [12] Rodríguez F., “Principios de Sistemas Poliméricos”, México, 1984,
pág. 237.
- [13] Wikipedia La Enciclopedia Libre, “Resina Epoxi”,
http://es.wikipedia.org/wiki/Resina_epoxi
- [14] Rojas J, “Química de las Pinturas en Polvo – Una Mirada al Interior del Polvo”, Inpra Latina, Julio-Agosto 2005, pág. 42.
- [15] Indur Resinas Sintéticas, “Formulación de Sistemas Epoxi”, 2005,
<http://www.indur.com/datos/pdf/Formulacion%20de%20Sistemas%20Epoxi.pdf>

XIII. ANEXO

ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBINACIÓN RESINA EPOXICA – AGENTE DE CURADO

La formulación de los sistemas epóxicos requiere el conocimiento de la estequiometría y el manejo de la mezcla entre los distintos componentes. Para la obtención de resultados óptimos, estos sistemas se formulan generalmente respetando las proporciones de resina epóxica y agente de curado, que surgen de los cálculos estequiométricos [15].

Para calcular la correcta relación de uso de un agente de curado y una resina epóxica se debe disponer de la siguiente información:

- Equivalente Hidrógeno Activo del agente de curado o de la mezcla de agentes de curado a usar.
- Equivalente Epoxi de la resina epóxica o mezcla de resinas epóxicas a usar.

La relación de uso puede calcularse sobre el total de componentes reactivos y no reactivos, es recomendable realizar los cálculos estequiométricos sobre los componentes reactivos y luego calcular las cantidades de componentes no reactivos a agregar.

El Equivalente Epoxi, se calcula dividiendo el peso molecular de la resina epóxica entre el número de grupos oxirano que contiene. El grupo oxirano reacciona con un átomo de H activo presente en el agente de curado. El Equivalente hidrógeno se determina dividiendo el peso molecular del agente de curado entre el número de hidrógenos activos.

Si queremos expresar la cantidad de agente de curado por cien partes de resina epóxica, se tiene:

$$\text{Agente de curado} = \frac{EHA}{E.Epx} \times 100$$

Donde:

EHA = Equivalente hidrógeno activo del agente de curado o de la mezcla de agentes de curado a usar.

$E.Epx$ = Equivalente Epoxi de la resina epóxica o mezcla de resinas epóxicas a usar

Mezclas de Resina Epóxicas

El equivalente epoxi de una mezcla n componentes (mezcla de resinas epóxicas de distintos E. Epx) se calcula con la siguiente fórmula [15]:

$$\frac{M_m}{E.Epx_m} = \frac{M_1}{E.Epx_1} + \frac{M_2}{E.Epx_2} + \frac{M_3}{E.Epx_3} + \dots + \frac{M_N}{E.Epx_N}$$

Luego...

$$E.Epx_m = \frac{M_m}{\frac{M_1}{E.Epx_1} + \frac{M_2}{E.Epx_2} + \frac{M_3}{E.Epx_3} + \dots + \frac{M_N}{E.Epx_N}}$$

Donde:

M_m = masa total de la mezcla de resinas epóxicas

$M_1 \dots M_N$ = masas individuales de cada resina epóxica de la mezcla

$E.Epx_1 \dots E.Epx_N$ = Equivalentes epoxi de cada resina epóxica de la mezcla

$E.Epx_m$ = Equivalente epoxi de la mezcla de resinas epóxica

Mezclas de Agentes de Curado

El equivalente Hidrógeno Activo de una mezcla de n componentes (mezcla de diferentes agentes de curado con distintos EHA.) se calcula con la siguiente fórmula [15]:

$$\frac{M_m}{EHA_m} = \frac{M_1}{EHA_1} + \frac{M_2}{EHA_2} + \frac{M_3}{EHA_3} + \dots + \frac{M_N}{EHA_N}$$

Luego...

$$E.Epx_m = \frac{M_m}{\frac{M_1}{EHA_1} + \frac{M_2}{EHA_2} + \frac{M_3}{EHA_3} + \dots + \frac{M_N}{EHA_N}}$$

Donde:

- M_m = masa total de la mezcla de agentes de curado
- $M_1 \dots M_N$ = masas individuales de cada agente de curado de la mezcla
- $EHA_1 \dots N$ = Equivalentes hidrógeno de cada agente de curado de la mezcla
- EHA_m = Equivalente hidrógeno de la mezcla de agentes de curado