

# Desarrollo de una pintura amigable al ambiente bajo la metodología taguchi

Belén María Paricaguán Morales

*Facultad de Ingeniería. Departamento de Estudios Básicos. Universidad de Carabobo, Valencia. Estado Carabobo, Venezuela.*

---

## Resumen.-

Los recubrimientos base solvente siguen ofreciendo ventajas de desempeños significativos en las mayorías de las aplicaciones industriales. La tecnología de base solvente es también la única forma de formular ciertos recubrimientos arquitectónicos de gran calidad donde se requiere una nivelación. Las desventajas de los recubrimientos base solventes no están relacionadas con su desempeño, sino con el medio ambiente y la sociedad, la mayoría de los solventes tienen Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), que pueden contribuir a la formación de ozono. Durante las dos últimas décadas, se han presentado significativos avances técnicos en los recubrimientos a base de agua, existe una presión regulatoria significativa para forzar a los usuarios de recubrimientos a reemplazar los tradicionales recubrimientos epóxicos base solvente por estas tecnologías alternativas. Se empleó la técnica de diseño de experimento bajo el método Taguchi, empleándose un arreglo ortogonal L9(3) 4; se obtuvo la combinación óptima de las materias primas A1,B1,C1,D2, a su vez se logró un recubrimiento con mínima variabilidad, mayor robustez y calidad; aunado a esto se redujo el número de ensayos garantizando un ahorro en costo y tiempo.

**Palabras clave:** Sistemas Epóxicos, Pinturas Reducibles en Agua, Resinas Epóxicas, Taguchi.

## New technology of friendly painting to the low atmosphere the methodology taguchi

### Abstract.-

The coatings bases it pays they continue offering advantages of significant acting in the majorities of the industrial applications. The base technology pays it is also the only form of formulating certain architectural coatings of great quality where a leveling is required. The disadvantages of the coatings base you pay they are not related with their acting, but with the environment and the society, most of the solvents have COV that can contribute to the formation of ozone. During two o'clock you finish decades, they have shown up significant advances technicians in the coatings with the help of water, a regulatory significant pressure exists to force the coatings users to replace the traditional coatings it bases it pays for these alternative technologies. I use the technology of design of experiment under the method Taguchi, there being used an orthogonal arrangement L9 (34). There was obtained the ideal combination of the raw materials (A1B1C1D2), in turn a covering was achieved by minimal variability, major hardness and quality; united to this the number of tests diminished guaranteeing a saving in cost and time.

**Keywords:** Systems Epoxy, Waterborne Epoxy, Epoxy Resin, Taguchi.

Recibido: 24 mayo 2010

Aceptado: 29 julio 2010

---

Correo-e: belenparicaguan@gmail.com,  
belenparicaguan@hotmail.com (Belén María  
Paricaguán Morales)

## 1. INTRODUCCIÓN

La química de las pinturas está íntimamente ligada a las sustancias filmógenas, ya que constituyen el componente fundamental en la formulación para obtener productos con propiedades preestablecidas con el fin de satisfacer las condiciones que determinan el sustrato y el medio ambiente. Los materiales formadores de película, también llamados frecuentemente ligantes, son polímeros o bien prepolímeros que forman una película cohesiva sobre un sustrato y que tienen como función aglutinar adecuadamente los pigmentos y extendedores luego del secado/curado [1]. El ligante o aglutinante se selecciona, desde un punto de vista técnico económico, considerando fundamentalmente las características del sustrato (naturaleza química, estado de la superficie, etc.), la acción agresiva del medio de exposición (acidez o alcalinidad, radiación UV, etc.), las exigencias fisicomecánicas de la película (dureza, resistencia a la erosión y los impactos, etc.), los requerimientos de preparación de la superficie previos (grado de limpieza, rugosidad, etc.), las condiciones de aplicabilidad y secado/curado (humedad relativa, temperatura, viento, etc.) y la expectativa de comportamiento en servicio (vida útil con mínimo o nulo mantenimiento, costos de materiales y mano de obra involucrados, etc.).

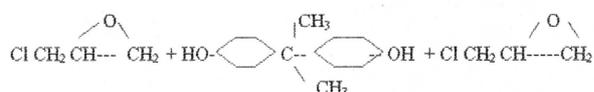
Ante los constantes cambios del entorno, donde se observa la tendencia hacia un mercado único, la internacionalización de los intercambios, la velocidad cabalgante del desarrollo tecnológico, las exigencias creciente de la calidad, entre otros, se propone un esquema de gestión gerencial con una visión global y sistemática de los negocios, que garantiza un verdadero desarrollo a las empresas; es por ello, que el presente trabajo de investigación propone la innovación de una nueva fórmula de pintura amigable al ambiente, basado en resinas epóxicas reducibles con agua, de alto desempeño, con niveles óptimos de calidad, y en menor costo, que cumpla con las mismas características de calidad, que una pintura a base solvente. Esta medida consiste en utilizar recubrimientos en base agua, como alternativa a los recubrimientos convencionales, y tiene como objetivo la reducción

de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles VOC y otros compuestos tóxicos que contienen los disolventes. Las pinturas solubles/dispersables en agua, contienen agua en lugar de disolventes volátiles, con lo que se reduce la toxicidad, mejora la seguridad y la salud laboral de los operarios, debido a que se producen menores emisiones de VOC, durante los recubrimientos y de secado de la pintura, además se puede recuperar y reutilizar de forma sencilla el pulverizado sobrante, con lo que se genera menor cantidad de fango de pintura, y por lo tanto se reducen los costos de la gestión de los residuos peligrosos, riesgo de inflamabilidad y combustibilidad [2-3]. El término “en base agua” se refiere a los sistemas de recubrimientos que utilizan agua como disolvente para dispersar la resina. Se propone aplicar una técnica basada en la implementación de la metodología de un diseño experimental para formular un recubrimiento para mantenimiento industrial y marino. Este diseño requiere del uso de herramientas estadísticas, con las cuales se espera obtener un rendimiento y un costo de fabricación óptimos. A su vez, se ofrece una tecnología avanzada para el desarrollo del recubrimiento epóxico reducible con agua que ayuden a minimizar el grado de emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera.

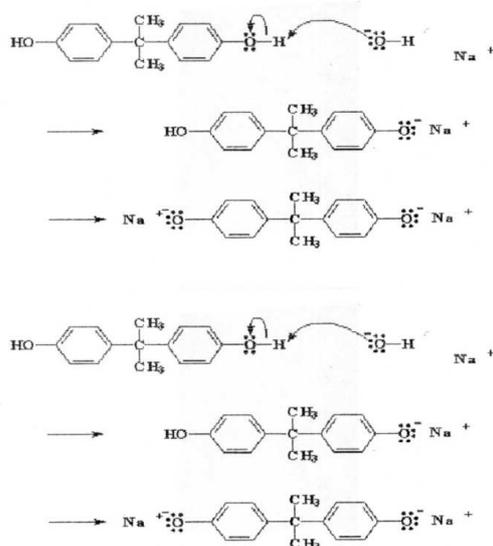
La selección y el uso correctos de estos recubrimientos es ahora reconocida a través de la industria como un requisito clave para prevenir costosos programas de mantenimiento debido a la falla temprana del sistema de recubrimientos o al colapso prematuro de la vida de servicio pronosticada. Las resinas epóxicas son ampliamente usadas en muchas aplicaciones industriales debido a su excelente resistencia térmica y química así como, a su buen comportamiento mecánico y eléctrico. Por ejemplo, las resinas epóxicas son usadas como recubrimientos anticorrosivos y adhesivos para metales. Entonces, el conocimiento de los factores que afectan la adhesión entre superficies metálicas y resinas epóxicas es de fundamental importancia. Entre los diversos agentes de curado empleados para formular las resinas epóxicas, las aminas son indudablemente las de mayor uso. Una fuerte interacción entre los grupos amina y los óxidos

y/o hidróxidos metálicos fue hallada cuando las mezclas epoxi amina son aplicadas y curadas sobre substratos metálicos [4].

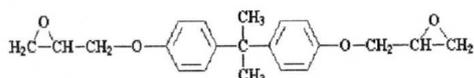
Reacción:



El mecanismo que se propone normalmente es el siguiente [11].



La estructura resultante, se denomina Diglicidil Éter del Bisfenol A (DGEBA):



Roche y Colaboradores [5–10] han estudiado el sistema (diglycidyl ether de bisfenol A)-IPDA (3-aminomethyl-3,5,5-trimethylcyclohexylamine) aluminio DGEBA y determinaron que las propiedades químicas, físicas y mecánicas del recubrimiento difieren de aquellas del material en volumen y esa diferencia cambia con el espesor. Las resinas epóxicas se constituyen a partir de unidades monoméricas de éteres cíclicos, como la epiclorigrina (1-cloro-2.3-epoxipropano) y el bisfenildifenilolpropano. La polimerización esta condicionada por la iniciación, por lo que la selección del activador es clave en el proceso de síntesis. Por su parte, la etapa de propagación se realiza con rapidez debido a la inestabilidad

de los éteres cíclicos. La resina obtenida forma una red polimérica entrecruzada muy estable y, debido a la presencia de los enlaces éter, ligeramente hidrofílica. El mantenimiento y reparación de estructuras marinas ha sido siempre una preocupación, especialmente con respecto al funcionamiento a largo plazo de los sistemas de pintura anticorrosivos. Por lo tanto, ha llegado a ser crítico que las pruebas de desempeño para la evaluación de los recubrimientos (aptitud en el propósito de uso) estén realizadas con los ambientes que serán encontrados en la práctica.

### 1.1. Usos de las pinturas epoxi

Por su resistencia al agua, a la intemperie y a los contaminantes químicos, se usan como sistemas de protección de larga duración sobre acero estructural, y hormigón. De gran uso como pintura de barcos y superficies sumergidas, aunque debe ser protegida cuando va ser expuesta al sol como en caso de las embarcaciones.

Debido a su resistencia a los ataques químicos, se usa para la conservación de instalaciones industriales. Su excelente resistencia al desgaste hace que sea utilizada en estacionamientos, garajes, suelos industriales etc.

Por su resistencia al agua y los detergentes, se usa para lavaderos industriales y otras naves o instalaciones que están sometidas a frecuentes limpiezas agresivas y desinfecciones. [12]

### 1.2. Diseño de experimentos

Criterios del diseño de experimentos: Dar medidas no sesgadas y buena estimación de la variabilidad de los efectos principales, identificar interacciones entre los mismos y minimizar errores experimentales. El diseño de experimento se hace necesario debido a, competencia global, costo de desarrollos elevados, mejores características de productos y procesos, menor tiempo de ciclo, para comercialización de productos, minimizar costos de experimentación y producción, mejorar toma de decisiones en incertidumbre, obtener información con mínimo de experimentos. [13]

## 2. METODOLOGÍA

Los pasos llevado a cabo para la realización de la pintura, fueron los siguientes, se identifican las variables que intervienen en el proceso de desarrollo de la formulación; se parte de una etapa de selección de materias primas a través de la técnica de ensayo y error; se escoge la formulación que cumpla con las exigencias de calidad; punto de partida para la aplicación del Método de Diseños de experimentos, aplicando la técnica Taguchi y finalmente obtener la formulación óptima con el mejor comportamiento en pruebas de calidad y desempeño.

### 2.1. Selección de la resina y agente curante

Los productos termoestables generalmente se caracterizan por tener dos partes que deben mezclarse juntas para dar inicio a la reacción química. Se seleccionó la resina y el agente curante que cumpliera con los requisitos exigidos para la formulación de esta pintura.

### 2.2. Características físicas y químicas de la resina

Peso equivalente epóxico: 950 -1120. Contenido activo: 56 % Peso equivalente epóxico (en sólidos): 540-560. Densidad relativa 1,11g/cm<sup>3</sup>. Aspecto: Ligeramente viscoso, líquido lechoso. Viscosidad (Brookfield, 25°C): 1.000-3.500mPa.S. Peso por galón (kg/gal): 4,20. Solvente: 37 % agua; 7 % ethoxypropanol.

### 2.3. Características físicas y químicas del agente curante

Peso H<sub>2</sub> equivalente: 225. Valor de la Amina: (en sólido) mgKOH/g. 290-320. Índice de Amina: 174-192 mgKOH/g. Contenido activo: 58,5-61,5 %. Aspecto: Líquido claro, la solución puede ser ligeramente turbia, sin influir negativamente en la disolución ni en las propiedades. Viscosidad (Brookfield) a 25°C: 8.000-15.000 mPa.S. Color (Gardner): 8 máximo.

### 2.4. Determinación de la relación de llenado y la cantidad de resina epóxica

A través de cálculos estequiométricos se determinó que se requieren 21.74 partes de agente curante para 100 partes de resina epóxica. Cantidad de Agente Curante (A.C.)= (Peso equivalente del agente curante / Peso equivalente epóxico)x100 A.C.= (225/1035) × 100 = 21.74 Se fijó un valor de P.V.C(concentración volumétrica del pigmento) de 20 y porcentaje de no volátiles (%NV) de 60 %.

$$\begin{aligned} 100\text{Kg Base} &\rightarrow 100\text{Kg}/4,20\text{Kg/gal} \\ 21,74 &\rightarrow \frac{21,74\text{Kg}/4,16\text{Kg/gal}}{29,04\text{gal}} \end{aligned}$$

Galones de pigmentos =(PCV × % NV)/100 = (20 × 60 %)/100= 12 gal Galones de resina = % NV – Galones de pigmentos =60-12=48 galones de resina

### 2.5. Se calculó el porcentaje de Base y Agente Curante en volumen:

$$\% \text{Base} = (23,81\text{gal})/(29,04\text{gal}) \times 100 = 80,49 \%$$

$$\% \text{Agente curante}=(5,23 \text{ gal})/(29,04 \text{ gal})\times 100 = 19,51 \%$$

$$\text{Base} = (48 \text{ galones} \times 80,49)/100 = 38,64 \text{ gal base sólida}$$

$$\text{Agente curante} = (48 \text{ galones} \times 19,51)/100 = 9,36 \text{ gal base sólida}$$

$$38,64 \text{ gal Base Sólida} \times 4,20 \text{ Kg/gal} = 162,288 \text{ Kg Base Sólida}$$

$$9,36 \text{ gal del A.C} \times 4,16 \text{ Kg/gal} = 38,938 \text{ Kg A.C resina sólida.}$$

$$(162,288 \text{ Kg Base Sólida}/56 \%) \times 100 = 289,8 \text{ Kg en Solución para la Base.}$$

$$(289,8 \text{ Kg en solución}/4,20 \text{ Kg/gal}) = 69 \text{ galones en solución para la Base}$$

$$(38,938 \text{ Kg}/60 \%) \times 100 = 64,90 \text{ Kg en solución de resina para el A.C}$$

$$(64,90 \text{ Kg}/4,16 \text{ Kg/gal}) \times 100 = 15,60 \text{ galones en solución para el agente curante.}$$

De acuerdo a los cálculos efectuados se estableció una relación de llenado 85:15 y se fija 69 galones para la Base y 15 galones para el agente curante. Si se tienen 69 galones de resina en la base, se necesitan 16 galones para completar los 85 galones, pero de los 16 galones que restan,

Tabla 1: Características de la Materia Prima a seleccionar.

Material / Tipo	Características
Resina epóxica Reducible con / Resina agua	Es una resina epóxica sólida emulsionada en agua derivada de la epiclohidrina bisfenolada "A" Solubilidad ilimitada buena resistencia química, excelente humectación. Protege contra la corrosión endurecimiento muy rápido, libre de amina.
Catalizador	Es un adyuvante de amina aislado, disuelto en agua, que se utiliza para el endurecimiento de las emulsiones de resina epóxicas actúa como un emulsionante de las resinas epóxicas, creando emulsiones homogéneas y estables.
Antiespumante / aditivo	Para sistemas acuosos facilita un control de espuma eficaz durante la fabricación de pinturas a base de dispersión se puede añadir en cualquier fase de la producción. Las dosificaciones varían normalmente entre 0,1 y 0,4 %. Altamente eficaz para epóxicos reducibles con agua.
Inhibidor de la corrosión / aditivo	Inhibidor de la corrosión altamente eficaz acentúa principalmente el efecto anticorrosivo de los pigmentos, mejora la estabilidad de las pinturas, además de excelentes propiedades de dispersión propia, posee el producto una extraordinaria estabilidad de sedimentación.
Desgasificante / aditivo	Específicamente diseñado para sistemas acuosos, previene la formación de la microespuma y de la macroespuma, minimiza los hoyos que ocasionan defectos en la superficie. Altamente capaz para ser usado en sistemas aplicados a pistola. La adición de los niveles recomendados en la formulación total es de 0,1 a 0,5 %.
Dióxido de titanio / pigmento	Pigmento sólido blanco.
Silicato de magnesio / extender	Sólido blanco mineral, suave, de moderada absorción de aceite. Es inerte, de bajo costo. Se usa en sistemas anticorrosivos, actúa igual que la mica. No hay dosis recomendada.
Barita/extender	No hay dosis recomendada, pero dada su baja absorción de aceite, se utiliza en mayor proporción que los demás extendedores.
Mica/extender	No hay dosis recomendada, reduce tanto la permeabilidad al agua como la tendencia al cuarteamiento, también favorece la resistencia a la intemperie, a su vez se obtiene baja viscosidad y altos sólidos.

12 galones son de pigmentos y lo que sobra está distribuido en aditivos.

Una vez conocidos los tipos de materiales que han de emplearse en la formulación se seleccionaron las materias primas tomando en cuenta las características señaladas a continuación en la Tabla 1.

## 2.6. Aplicación del método de diseño de experimentos (DOE), para obtener la formulación óptima del producto

Para llevar a cabo el diseño de experimento se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. A través de la prueba ensayo y error, se elaboraron 10 fórmulas tomándose como base la octava fórmula, la cual logró incorporar todas las materias primas involucradas y cumpliendo con parámetros exigidos por control de calidad.
2. Sin embargo el recubrimiento presentó problemas de nivelación, mucha espuma, alta viscosidad y corrosión, DOE debe estar dirigido hacia la menor variabilidad de estas características y una mayor robustez para obtener así, un mejor recubrimiento de mayor calidad y menor costo.

Tabla 2: Fórmulas correspondientes a las nueve corridas del Diseño de Experimento.

MATERIA PRIMA (Kg)	Corrida								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Resina	289,8	289,8	289,8	289,8	289,8	289,8	289,8	289,8	289,8
Antiespumante	2,271	2,271	2,271	2,359	2,359	2,359	2,460	2,460	2,460
TiO2	129,855	110,18	81,80	112,98	104,80	102,47	108,89	113,17	97,24
Mica	24,87	29,94	39,96	24,87	29,94	39,96	24,87	29,94	39,96
NaNO2	2,814	2,814	2,814	2,814	2,814	2,814	2,814	2,814	2,814
Solvente	13,96	15,95	17,99	15,99	17,99	13,96	17,99	13,96	15,99
Desgasificante	1,86	2,65	3,78	3,78	1,86	2,65	3,78	3,78	1,86
% H2O	31,53	32,64	34,04	33,67	32,05	32,49	33,03	33,54	31,74
Catalizador	62,4	62,4	62,4	62,4	62,4	62,4	62,4	62,4	62,4
Brillo	58	64	70	57	67	60	68	62	63
Masa Kg/Gal	527,83	516,05	500,82	514,99	511,96	516,41	511,87	518,32	512,52
Densidad g/mol	1,3945	1,3624	1,3232	1,3606	1,3526	1,3644	1,3524	1,3624	1,3541
Pigmento	10,68	9,93	9,11	9,61	9,59	10,42	9,35	10,12	10,09
Resina	41,99	41,99	41,99	41,99	41,99	41,99	41,99	41,99	41,99
% NV	52,67	51,92	51,10	51,60	51,68	52,41	51,34	52,11	52,08
Solvente	47,33	48,08	48,9	48,4	48,32	47,59	41,34	47,89	47,92
PVC	20,28	19,13	17,82	18,63	18,56	19,88	18,22	19,42	19,37
VOC	3,26	3,15	2,97	3,06	3,23	3,08	3,18	3,02	3,19

- Los recubrimientos con moderado o alto nivel de absorción de aceite influyen en la viscosidad, por lo que es uno de los fuertes a atacar.
- La materia prima utilizada para ajustar el volumen de la base epóxica a 85 galones, es el dióxido de titanio por ser uno de los componentes que menos afecta el desempeño de estos tipos de pinturas, así mismo el volumen de la resina, el agente curante y el inhibidor de la corrosión (NaNO<sub>2</sub>) permanecen invariables en las corridas experimentales. Tal como se evidencia en la Tabla 2.

### 3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 3: Corridas Experimentales correspondientes al Arreglo Ortogonal L9

Corrida/Factor	Antiespumante	Mica	Solvente	Desgasificante
A	1	1	1	1
B	1	2	2	2
C	1	3	3	3
D	2	1	2	3
E	2	2	3	1
F	2	3	1	2
G	3	1	3	2
H	3	2	1	3
I	1	3	2	1

Se seleccionan los factores de control, con sus niveles respectivos y con ello el arreglo ortogonal [14]. Haciendo uso del software Minitab, se introdujo el número de factores y niveles del

diseño y se obtuvo un arreglo L9(3) 4; L9, el cual consta de nueve corridas experimentales, tal como se observa en la Tabla 3, y a partir de éste modelo se prepararon nueve fórmulas ajustando cada una de ellas a un volumen igual a cien galones.

Tabla 4: Niveles asignados a cada factor del diseño de experimentos.

Factor	Bajo (Kg.)	Medio (Kg.)	Alto (Kg.)
A	2,271	2,359	2,46
B	24,87	29,94	39,96
C	13,96	25,99	17,99
D	1,86	2,65	3,78

Se asume como factores de control: Antiespumante (A), Mica (B), Solvente (C), Desgasificante (D). Porque son parámetros o variables que impactan el rendimiento del producto o proceso y en la calidad de la pintura. Se escogen tres niveles, nivel bajo (1), nivel medio (2) y nivel alto (3), para cada factor de control, los cuales se visualizan en la Tabla 4, con el objetivo de representar mayor cantidad de puntos sobre el espacio experimental, de manera que se obtenga una información más detallada acerca de las posibles interacciones de estos factores con respecto a las variables de respuesta [15].

#### 3.1. Selección de las variables de respuesta y de las características de la calidad de diseño de experimentos

Una vez obtenidas las nueve muestras de pintura resultantes del diseño de experimentos ver Tabla 2,

Tabla 5: Pruebas de calidad y desempeño de las corridas experimentales.

Ensayo/corrida	Especificación	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Secado tacto (h)	1h	44s'	50'	60'	48'	58'	43'	57'	44'	52'
Secado huella (h)	8h	5	6	8	6	7	5	7	5	6
Secado duro (h)	24h	0k	0k	0k	0k	0k	0k	0k	0k	0k
Descuelgue	Aprobado	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Tiempote vida útil (h)	8	8	9	10	8	8	9	9	10	11
Dureza	48	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Adhesión	Excelente(E)	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Resistencia impacto(lb/kg)	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Resistencia humedad	Aprobado(A)	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Resistencia Química	Alcalis	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	Ácidos no aprobado									
Cámara salina	Aprobado	*	*	*	*	*	*	*	*	**
Aplicabilidad (hierro, fibra de cemento)	Aprobado	A	A	A	A	A	A	A	A	A

se les determinó el %NV, brillo, secado y tiempo de vida útil, a su vez se realizaron otros ensayos de calidad y desempeño, debido a que se trata de nuevas formulaciones, estos resultados se muestran en la Tabla 5

Una vez realizados los parámetros de calidad y pruebas de desempeño. Se seleccionaron variables de respuestas que se deben controlar. Debido a que se busca un recubrimiento epóxico reducible con agua con excelente curado, con % NV moderado, con un tiempo de vida útil adecuado, buen brillo y excelente secado, estas quedaron designadas como variables de respuestas. En cada fórmula se acumuló gran cantidad de espuma en la superficie del sustrato, interfiriendo en la nivelación, brillo y secado. La espuma está íntimamente ligado a la cantidad de solvente, desgasificante y desespumante del recubrimiento. Durante la producción y aplicación de la pintura la aparición de espuma es un efecto indeseable que provoca el aumento del tiempo de producción, dificulta el llenado de los envases con la cantidad correcta de producto y provoca defectos de superficie como los cráteres y zonas de fractura en la película seca. La espuma se formó al quedar atrapadas burbujas de aire producidas durante las diversas fases de la fabricación y el uso de una pintura como el bombeo, la agitación, la dispersión y la aplicación. La interfase aire-líquido de estas burbujas esta rodeada por los agentes tensoactivos presentes en la pintura que debido a su baja densidad emigran a la superficie. Durante este proceso, las burbujas pequeñas se pueden combinar para formar otras más grandes que suben mas rápidamente. Las burbujas se acumulan en la superficie deformándose a sí misma y a la

superficie de la pintura. El aire queda atrapado por la formación de una lamela estabilizada por la presencia de los agentes tensoactivos. Para eliminar las espumas se deben evitar los efectos estabilizadores de las burbujas haciendo uso de un antiespumante, el cual debe ser capaz de destruir la espuma para eliminar la ya existente, impedir su formación y liberar el aire para facilitar que la espuma llegue a la superficie. La acción de los antiespumantes ocurre principalmente en la lamela estabilizada [16-17]. Por lo tanto los antiespumantes deben ser insolubles en la pintura y poseer la movilidad suficiente que le permita penetrar en la lamela y desplazar el agente tensoactivo presente en su interfase. Es por ello que se ensayo con diferentes antiespumante consiguiendo las propiedades descritas anteriormente. Debido a la lentitud que tiene las burbujas de aire en el recubrimiento fue necesario emplear un desgasificante que funciona durante y después de la aplicación de la película, su función es hacer subir las microespumas rápidamente a la superficie y destruirlas. Para las 9 fórmulas se logró el efecto deseado, destruir las espumas.

Para garantizar el adecuado comportamiento del cubrimiento seleccionado según su formulación y fabricación, es decir, que alcance y mantenga sus propiedades establecidas para un tiempo determinado, es necesario preparar la superficie satisfactoriamente y aplicar la pintura en forma correcta. Ningún cubrimiento desarrollará buenas propiedades de adherencia sobre una superficie contaminada con grasas, aceites, polvo, oxido o cualquier otro tipo de productos extraños; la grasa por ejemplo, no sólo afecta la adherencia sino que es absorbida por el cubrimiento perjudicando el

desarrollo de la dureza, resistencia a la abrasión o resistencia a ataques químicos.

Para realizar las aplicaciones se hizo en láminas de acero. Sin embargo fue necesario realizarle un tratamiento previo una limpieza por chorro de arena (sandblasting).

Este método de limpieza se basó en el bombardeo de partículas duras de material abrasivo a gran velocidad impulsada por aire comprimido, que elimina de la superficie, oxidación, cáscaras de corrosión, pinturas viejas, etc.

El material abrasivo utilizado fue arena fina tamaño de tamiz entre n<sup>o</sup> 10 y 80, produciendo superficies con anclaje. Y se utilizó ácido fosfórico que reduce la tensión superficial, dejando un pequeño depósito en la superficie metálica de fosfato, la cual proporciona una adherencia inicial satisfactoria y puede decirse que desempeña tres funciones principales que se requieren para una buena adherencia, limpieza de superficie, formación de rugosidad, y cambio de la composición química del sustrato que favorece a la inhibición de corrosión. Se utilizó el sistema airless spray, sin aire o hidráulico, es el método de pintado que no usa aire comprimido, es altamente productivo en área industrial, y trabaja tan rápido como el operador pueda mover la pistola, aunque no produce películas sofisticadas, es más rápido y económico que el sistema convencional.

Es un equipo sencillo que consiste en una bomba de alta presión, con presión y capacidad propia, una línea de aire comprimido para succionar la bomba, manguera de alta presión y pistola sin aire.

La boquilla utilizada determina el volumen que puede ser aplicado y el ancho del patrón de aplicación, así como el espesor de película y el flujo de pintura por minuto. Se aplicó este método ya que el producto es de mediana viscosidad y de consistencia pastosa, obteniéndose altos espesores de película.

Una vez hecha las aplicaciones algunas se introdujeron a la cámara salina evidenciándose ampollamiento a las 700h y corrosión. Debido al incremento de la viscosidad de la pintura durante el proceso de secamiento los menuditos canales no son cerrados y se fijan en el secado de la película, esos microporos reducen severamente

las características de protección del recubrimiento que la humedad y las sales pueden entrar en el recubrimiento causando corrosión.

El brillo del recubrimiento disminuye debido a la poca absorción de aceites de pigmentos y/o extender, la película del recubrimiento es mate.

Por lo que hubo que sustituir el extender silicato de magnesio por la mica, esto es debido a las ventajas de la mica que se superpone en láminas impidiendo la penetración del agua al sustrato el cual le proporcionó mejores propiedades a la película. A sí mismo el brillo que se obtuvo fue excelente.

### 3.2. Optimización del diseño de experimentos

Tabla 6: Respuesta S/R para la variable de respuesta brillo.

N/F	A	B	C	D
1	36,0758	35,6585	35,5395	35,9055
2	35,7317	36,1622	35,7403	36,0110
3	36,1595	36,1485	36,4681	35,9535

Característica de la calidad: Mayor es mejor.  
Fórmula óptima: A<sub>3</sub> B<sub>2</sub> C<sub>3</sub> D<sub>2</sub>

Tabla 7: Respuesta S/R para la variable de respuesta tiempo de vida útil

Nivel/Factor	A	B	C	D
1	19,2677	18,5202	18,9767	19,8817
2	19,8817	20,6292	20,6601	19,2677
3	18,5202	18,5202	18,0332	18,5202

Característica de la calidad: Mayor es mejor.  
Fórmula Óptima: A<sub>2</sub> B<sub>2</sub> C<sub>2</sub> D<sub>1</sub>

Tabla 8: Respuesta S/R para la variable de respuesta %NV

Nivel/ Factor	A	B	C	D
1	34,3021	34,2978	34,3860	34,3437
2	34,3026	34,3039	34,2977	34,3014
3	34,2936	34,2967	34,2147	34,2533

Característica de la calidad: Normal es mejor.  
Fórmula Óptima: A<sub>2</sub> B<sub>2</sub> C<sub>1</sub> D<sub>1</sub>

Tabla 9: Respuesta S/R para la variable de respuesta secado

N/F	A	B	C	D
1	-35,6831	-35,7872	-34,3888	-35,9306
2	-35,8849	-35,3799	-36,2584	-35,7071
3	-35,8947	-36,2956	-36,8155	-35,8076

Característica de la calidad: Menor es mejor.  
 Fórmula Óptima: A1 B2 C1 D2

Con la ayuda del Minitab se calculó la relación promedio Señal/Ruido (S/R) para cada variable de respuesta ver Tablas 6, 7, 8 y 9 respectivamente, lo que permitió obtener la formulación óptima. La combinación óptima se obtuvo a través de la mayor señal de ruido lo que genera una menor variabilidad y mayor robustez del recubrimiento. Para obtener tales valores se utilizaron los modelos matemáticos que se muestran a continuación de señal de ruido, mayor es mejor, nominal es mejor y menor es mejor.

Los valores óptimos de cada curva son aquellos en los cuales la señal es mayor (punto máximo), debido a que en dicho punto cada factor presenta un mejor desempeño.

Modelos Matemáticos utilizados para calcular la Relación Señal/Ruido[13]:

Mayor es Mejor:

$$S/R = -10 \log \left[ 1/n * \sum_{i=1}^n 1/y_i^2 \right] \quad (1)$$

Menor es mejor

$$S/R = -10 \log \left[ 1/n * \sum_{i=1}^n 1/y_i^2 \right] \quad (2)$$

Nominal es mejor

$$S/R = (10 * \log(Ybar * *2/s * *2)) \quad (3)$$

Al comparar la octava formulación de la Tabla 5 con la fórmula óptima obtenida a través de la señal de ruido conjuntamente con sus características de calidad se determina la fórmula más idónea como A1,B1,C1,D2, el cual cumple con todas las características de calidad con un alto desempeño y rendimiento.

En la Figura 1. El %NV está influenciado por dos factores mica y solvente. Se observa su mayor influencia en el nivel más alto de la mica debido a que a mayor pigmento el %NV, aumenta concordando con la característica de calidad mayor es mejor y para el solvente la mayor señal de ruido se tiene en el nivel más bajo, es decir a menor dilución del recubrimiento mayor cantidad de sólidos no volátiles se obtiene.

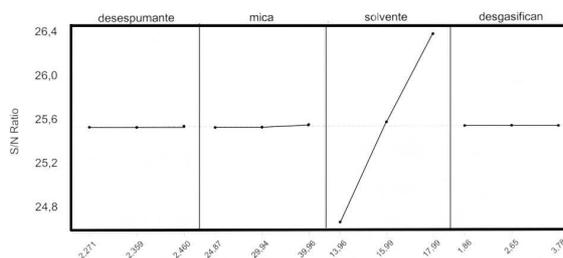


Figura 1: Promedio de la relación S/R para cada nivel de los factores cuando la respuesta es %NV para la característica de calidad nominal es mejor

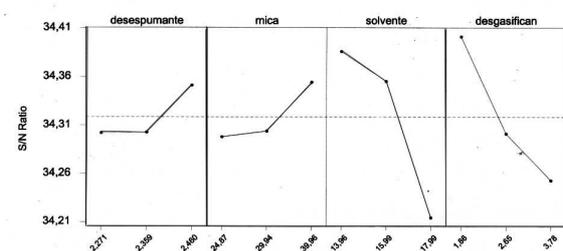


Figura 2: Promedio de la relación S/R para cada nivel de los factores respuesta tiempo de vida útil para la característica de calidad mayor es mejor.

El tiempo de vida útil de la pintura está influenciado directamente con el solvente en la Figura 2 se observa que a mayor cantidad de solvente se obtiene la mayor señal de ruido y por ende mayor robustez y menor variabilidad, no obstante si se tiene mayor solvente puede crear limitaciones en otras características de calidad entre las cuales se tienen el secado, el brillo, el porcentaje de sólidos no volátiles, la adherencia, la corrosión entre otros.

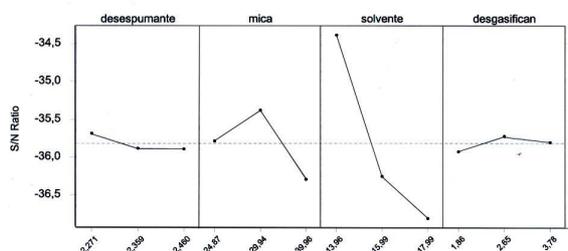


Figura 3: Promedio de la relación S/R para cada nivel de los factores respuesta secado para la característica de calidad menor es mejor.

En la Figura 3 se observa que el secado está influenciado directamente con el solvente, es

decir a mayor solvente el secado es pobre y en la Figura 4, el brillo disminuye con el solvente.

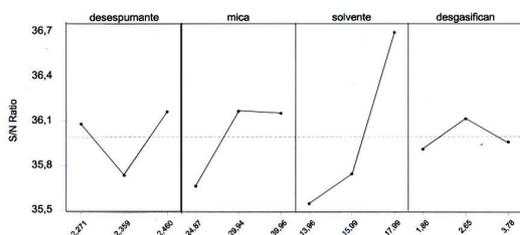


Figura 4: Promedio de la relación S/R para cada nivel de los factores respuesta brillo para la características de calidad mayor es mejor.

En cuanto a la resistencia al impacto, se observó que las nueve corridas sobrepasaban las 48 libras de presión, generando el mismo comportamiento en los epóxicos a base de solvente, a su vez la resistencia química presenta similitud con los recubrimientos tradicionales en donde pasa completamente para los álcalis, pero para los ácidos falla.

A través de la predicción de Taguchi se obtuvieron dos fórmulas óptimas, las cuales se llevaron a la práctica mostrando excelentes resultados y ajustándose a los parámetros de calidad. Sin embargo se eligió la fórmula A1,B1,C1,D2, como la más óptima ya que se compararon los costos y esta resultó más viable[18]. La metodología Taguchi resultó apropiada porque permitió el ahorro de tiempo y dinero en la realización de los experimentos. Además es una herramienta sencilla que permite obtener buenos resultados con experimentos de pequeña escala.

#### 4. CONCLUSIONES

La preparación y aplicación de las pinturas epóxicas debe realizarse según las especificaciones, teniendo cuidado de no exceder los tiempos de aplicación establecidos ya que sus componentes una vez aireados y mezclados tienen un periodo útil limitado, que varía según los tipos y las temperaturas.

Uno de los principales factores causantes del deterioro en la industria es la corrosión; un proceso

completamente natural que se acelera por la acción agresiva del medio ambiente, la presencia de agentes químicos y el desgaste operacional de cada condición, entre otros. Es por ello que se desarrolla y se tratan de incursionar en nuevas tecnologías que satisfagan las necesidades del consumidor y medio ambiente en reemplazar recubrimientos tradicionales base solvente por base agua, logrando minimizar el impacto ambiental y la contaminación de interiores.

La fórmula óptima obtenida fue A1,B1,C1,D2. Mostrando una señal de ruido de 26.75 de acuerdo a la predicción de Taguchi a mayor señal de ruido menor variabilidad, mayor robustez.

La ventaja más importante de los sistemas de base agua es que emiten relativamente pequeñas cantidades de VOC.

El método Taguchi, permitió obtener la formulación óptima del recubrimiento de manera eficaz cumpliendo con las características de calidad y de desempeño siendo la combinación mediante las predicciones de Taguchi A1,B1,C1,D2. Sin embargo la técnica Taguchi presenta desventaja ya que él enfoca el problema desde el punto de vista de gráficos intuitivos y no de manera estadística.

El arreglo ortogonal que se seleccionó fue un L9, el cual consta de cuatro factores a tres niveles cada uno.

A causa de las desventajas técnicas y ambientales asociadas con las diferentes tecnologías de recubrimiento, es necesario que la investigación y el desarrollo se centren no solamente en tecnologías alternativas, sino también en el mejoramiento del desempeño ambiental y técnico de los recubrimientos base solvente.

#### Referencias

- [1] Carlos A. Giudice y Andrea M. (2009). Tecnologías de pinturas, recubrimientos, componente, formulación manufactura y control de calidad pp-22
- [2] FrersC. (2006). Aspectos de la salud ambiental. Rev. Ecol. Medio Amb. Citado: 24 marzo 2006. Disponible en URL <http://astro-labio.net7revistas/articulos/EEuEuEyluANlKpCqre.php>.
- [3] Canter L.(1999).Manual de evaluación de impacto ambiental TIMUN MAS 2a edición. Mc Graw Hill, Madrid.

- [4] S. N. Goyanes, F. Saavedra, A. J. Roncaglia y G. H. Rubiolo. (2003). Jornadas Sam–Conamet/Simposio Materia Acerca de la formación de una Interfase en el sistema Epoxi–Diamina/Aluminio pp. 11–14.
- [5] J. Mash, L. Minel, M:G: Barthers–Labrouse, D. Gorse. (1998). *Appl. Surf. Sci.*, 133, pp. 270–289.
- [6] A. A. Roche, J. Guillemenet. (1999). *thin solid films*, 342, pp.52-60.
- [7] J. Bouchet, A. A. Roche, P. Hamelin. (1999). *Thin solid Films*, 355–356, pp. 270–276.
- [8] S. Bentagjine, R. Peiaud, A.A. Roche, V. Massrdier. (2001). *Polimer.* 42, pp 6271–6282.
- [9] J. Bouche, A. A. Roche, E. J. Jaquelin. (2001). *Adhesion Sci. Technol*, 15, pp. 321–343.
- [10] A.A. Roche, J. Bochet, S. Bentagjine. (2002). *Inte. J. Adhes Adhes*, 22, pp 431–441.
- [11] Síntesis de Resinas Epóxicas. (1994) “Making Epoxy Resins”. Disponible. [http:// www.epoxyresins. TPC. USA](http://www.epoxyresins.TPC.USA).
- [12] Fleming Payne, H. (1978) tecnología de pinturas tomo II. Editorial Blume, España pp 527–627.
- [13] Ishikawa, K.(1991).¿Qué es control total de la calidad?. La modalidad japonesa. Colombia editorial Prentice Hall. Traducción David Lu.
- [14] Ross, Phillip. (1998) “Taguchi techniques for quality engineering” loss funtion, orthogonal experiments, parameter and tolerance desing Mc Graw Hill.
- [15] Statistica for Windows [Programa de computación en DC] (1997). Disponible: <http://www.statsoft.com>.
- [16] Twite R. Zhu J. Y Bierwagen G. P. (1994). “Estabilidad y fraccionamiento de espuma en sistemas de polímeros acrílicos reducibles en agua”. *Journal of coatings Technology (JTC) GG (830) 57*.
- [17] Weimann D.J., (2001) “Formulating waterborne epoxy coating”, 44th annual technical symposium; waterborne coatings; Cleveland, OH, May 17–18.
- [18] Paricaguán Belén (2007) Desarrollo de un recubrimiento epóxico reducible con agua *Ingeniería y sociedad UC*. Vol 2, pp 103–111.