

## **Effect of pore sealer in the behavior of thermal sprayed aluminum and zinc coatings in marine and coastal marine atmospheres**

**Orlando Salas, Álvaro Rincón, Oladis T. de Rincón, Miguel Sánchez y Luis Maldonado**

*Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. TeleFax: +58-261-7598175. E-mail: orlandosalasa@yahoo.com.mx*

### **Abstract**

The objective of this research is to study the effect that have pore sealers in the behavior of Thermal Sprayed Zinc y Aluminum, and Zn/Al coatings in marine and coastal marine atmospheres, during one year of exposition. To that effect, carbon steel sheets (10cm x 15cm x 3 mm) were sprayed by using two different processes (electric arch and flame spray), with and without the application of two additional layers of sealer. Three sealers were evaluated: two wash primers of different suppliers, and a phenolic sealer. The sheets were exposed in two atmospheric test sites, La Voz (coastal marine atmosphere), and the Towers of the crossing of the Lake of Maracaibo (marine atmosphere). The sheets were characterized by means of initial weight, thickness, metallographic, adhesion, roughness, being evaluated monthly by visual inspection and photographic. The results showed that in these aggressive atmospheres, where the wind effect is important, the thermal sprayed Zn/Al coating, offers an excellent behavior even without sealer, producing galvanic protection to the substrate. In the case of thermal sprayed of Zinc and Aluminum coatings, a phenolic based pore sealer should be used, for covering completely the irregularities owned by this type of coating.

**Key words:** Aluminum thermal sprayed, zinc thermal sprayed, atmospheric corrosion, marine atmospheres, accelerated tests.

## **Efecto del sellador de poros en el comportamiento de los recubrimientos por termorrociado de aluminio y cinc en atmósferas marinas y costero marinas**

### **Resumen**

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto que tiene un sellador de poros en el comportamiento de los recubrimientos por termorrociado de cinc, aluminio y Zn/Al en atmosferas marinas y costeras marinos, luego de 1 año de exposición. Para ello, se evaluaron láminas de acero al carbono (SAE 1010) de 10cm x 15cm, termorrociadas por dos procesos diferentes de aplicación (arco eléctrico y llama), con y sin la aplicación de dos capas adicionales de recubrimiento sellador orgánico. Se evaluaron tres selladores: dos "wash primer" de diferentes fabricantes, y un sellador fenólico. Las láminas fueron expuestas en dos estaciones de ensayo natural: La Voz (atmósfera costera marina), y Las Torres del cruce del Lago de Maracaibo (atmósfera marina). Las probetas se caracterizaron mediante masa inicial, espesor, metalografía, adherencia y rugosidad, evaluándose mensualmente por inspección visual y registro fotográfico. Estas probetas se retiraron a los 3, 6 y 12 meses de exposición para ser analizadas en el laboratorio. Los resultados mostraron que en los atmósferas agresivos estudiados, donde el efecto erosivo es importante, el recubrimiento termorrociado Zn/Al (doble capa), ofrece un excelente comportamiento aún sin sellador y produce

protección galvánica al sustrato. Para el caso de los recubrimientos de cinc y aluminio, es necesario utilizar un sellador de poros fenólico para que cubra completamente las irregularidades propias de este tipo de recubrimiento.

**Palabras clave:** Recubrimientos por termorrociados de aluminio, recubrimientos por termorrociados de cinc, corrosión atmosférica, atmósferas marinas, ensayos acelerados

## 1. Introducción

A nivel mundial, muchas organizaciones realizan estudios para determinar la eficiencia de nuevos esquemas de recubrimientos en sustratos metálicos que permitan controlar los problemas de corrosión en ambientes agresivos, tales como los marinos donde las operaciones de mantenimiento con los sistemas convencionales de recubrimientos son muy frecuentes y costosas, además de ocasionar interrupciones en las operaciones normales de las estructuras o equipos. En los últimos años, a nivel de Estados Unidos y Europa los recubrimientos termorrociados están recibiendo considerable atención por su prometedora resistencia a la corrosión, nuevos procesos de aplicación, e innumerables ventajas en relación a otros sistemas de recubrimientos [1]. Por solo mencionar algunas de estas, son tolerantes a daños mecánicos, dependiendo del material aplicado pueden ofrecer protección por sacrificio, se pueden alcanzar espesores mayores a los de galvanizado, se pueden aplicar en campo, no hay limitaciones en cuanto a la pieza a recubrir, se pueden restituir espesores, su superficie es lo suficientemente rugosa como para servir de anclaje a otro recubrimiento utilizado como acabado, no tienen problemas de incompatibilidades con otros recubrimientos, etc.

Su desempeño en los países anteriormente mencionados ha sido bien documentado:

La "American Welding Society" [2], reportó un estudio de la durabilidad de estos recubrimientos, donde el termorrociado con cinc y aluminio, con y sin sellador, aplicados por el proceso

de llama, sobre paneles de acero expuestos en ambientes de agua de mar, industrial y marino, dieron protección contra la corrosión durante 19 años. Por otra parte, la norma Británica British Standard (BS5493, 1977) [3], reporta que: "recubrimientos termorrociados de aluminio sellados proveen 20 años o mas de protección al acero contra la corrosión sin mantenimiento en ambientes de salpique de agua de mar". En 1984 Morrow H. [4], reporta antecedentes de estudios económicos en términos de costo/vida útil de los recubrimientos termorrociados de Cinc y 2 sistemas de pintura recomendados por la Federal Highway Administration. Las especificaciones de los recubrimientos fueron las siguientes: 200  $\mu\text{m}$  de termorrociado de cinc sellado con vinílico; Sistema de pintura 1 (tres capas): 75  $\mu\text{m}$  de fondo rico en cinc inorgánico, una capa intermedia de epoxy poliamida, y 50  $\mu\text{m}$  de capa de poliuretano; Sistema de pintura 2 (dos capas): 75  $\mu\text{m}$  de fondo rico en cinc, una capa de "wash primer" de butirato de vinílico, y 75  $\mu\text{m}$  de vinílico "high build" como acabado. Los costos iniciales y de largo plazo son presentados en la Tabla 1.

Las estimaciones de vida son basadas en la información del grupo de termorrociados, y están de acuerdo con el manual de pintura de estructuras de acero (Steel Structures Painting Manual) y los presentados por A.H. Roebuc en numerosos papers [4]. Las diferencias apreciadas en los recubrimientos, indican que los recubrimientos termorrociados a pesar de ser más costosos inicialmente, al considerar sobre la base de costo-ciclo de vida estos resultan ser mucho más efectivos económicamente, y esto sin considerar

Tabla 1  
Costos recubrimientos comparativos reportados por "Zinc Metalizer Task Group Survey"

Sistema de Recubrimiento	Vida Promedio (años)	Costos \$/m <sup>2</sup>	Costos \$/m <sup>2</sup> .año
Termorrociado	27,5	46,39	1,69
Sistema de Pintura 1	8,9	30,14	3,37
Sistema de Pintura 2	6,8	26,80	3,94

las operaciones de mantenimiento, y gastos indirectos e inflación que acarrear las reparaciones, en el caso de pinturas, si se llevara a la misma base de 27 años de vida útil de los recubrimientos termorrociados.

En climas tropicales como el de Venezuela se conoce poco de la aplicación y rendimiento de esta tecnología de recubrimientos. En la red PATINA [5] se evaluó el comportamiento frente a la corrosión de una amplia variedad de recubrimientos convencionales y de nueva generación en atmósferas de la región de Iberoamericana; evaluándose el desempeño de recubrimientos de sacrificio a base de aluminio, cinc y sus aleaciones dentro de los cuales se encontraban los recubrimientos termorrociados de aluminio y Zn/15Al. Este último con sellador obtuvo el mejor desempeño en la atmósfera de La Voz. Actualmente a nivel comercial, muchos aplicadores de esta tecnología en recubrimientos recomiendan el uso de éstos, sin ningún tipo de capa adicional de sellador de poros, incluso en los ambientes más agresivos. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es conocer el efecto del sellador de poros en el comportamiento de estos sistemas de recubrimientos en ambientes muy severos, marinos y costeros marinos, con la finalidad de determinar la necesidad en el uso de un sellador de poros, además de conocer la mejor opción en cuanto al tipo de termorrociado.

## 2. Parte Experimental

### 2.1. Preparación de las probetas

**2.1.1 Sustrato y dimensiones:** Se utilizaron láminas de acero SAE 1010 de dimensiones (10x15) cm en la preparación de las probetas para la evaluación de los recubrimientos termorrociados. El espesor de las láminas varió de acuerdo al proceso de aplicación (arco eléctrico y llama), ya que estas fueron seleccionadas arbitrariamente por sus aplicadores. El espesor de las láminas utilizadas en el proceso de arco eléc-

trico fue de 3 mm, mientras que las del proceso de llama fueron de 2 mm.

**2.1.2. Preparación de la superficie:** Las dos empresas aplicadoras de los recubrimientos termorrociados (arco eléctrico y llama) utilizaron sus propias probetas de acero y sus criterios de preparación de superficie, esta última información no fue suministrada. Debido a esto, se realizaron medidas indirectas del perfil de anclaje dejado en el sustrato, mediante microscopía óptica a magnificación de 200 X, en cortes transversales en algunas probetas de ambos aplicadores; haciendo un barrido y midiendo la distancia entre los picos y valles dejados en el sustrato, reportándose un valor promedio de las mediciones.

**2.1.3. Recubrimientos y métodos de aplicación:** Se evaluaron 12 sistemas de recubrimientos: Cinc puro, y Aluminio puro aplicados por el proceso de arco eléctrico, y Cinc puro y un sistema doble (Zn/Al), formado por una primera capa de termorrociado de Cinc como fondo y una segunda capa de termorrociado de aluminio como acabado, aplicados por la técnica de llama. Además, se evaluaron tres tipos de selladores: dos "wash primer" de diferentes fabricantes, y un sellador fenólico.

**2.1.4. Codificación de las probetas:** Las probetas fueron previa y adecuadamente identificadas con marcador metálico en la parte posterior de la probeta\*.

### 2.2. Caracterización de los recubrimientos

Antes de la colocación de las probetas en las estaciones de ensayo, éstas fueron sometidas a limpieza con acetona para remoción de aceites y grasas, limpiándose luego con agua destilada e inmediatamente se secaron con pistola de aire. Luego del proceso de limpieza las probetas fueron caracterizadas en cuanto a: espesor, aspecto superficial, rugosidad, microestructura, y adherencia.

\* Las probetas del aplicador de termorrociado 2 (técnica de termorrociado por llama) están diferenciadas del aplicador 1 porque en su esquina superior derecha están perforadas. Y en el caso de las probetas selladas con sellador fenólico se le asignó la letra F en lugar de S, al igual que WA en el caso de "Wash primer" del fabricante 2.

**2.2.1. Espesor.** Esta medición fue realizada de acuerdo a la norma ASTM D 1186 [6], utilizando un instrumento no destructivo ("constant pressure probe DFT", "gauge (type II)") que mide espesor de película seca de recubrimientos no magnéticos sobre sustrato metálicos ferrosos. Debido a la variabilidad de espesores (espesores no uniformes) en este tipo de recubrimiento incluso en una misma probeta, se decidió utilizar una plantilla de la misma dimensión (10x15) cm con 10 orificios distribuidos en toda la probeta alejado 2 cm de los bordes de tal forma de efectuar las mediciones siempre en el mismo sitio.

**2.2.2 Aspecto superficial y rugosidad.** El aspecto superficial de las probetas fue analizado con la ayuda de una lupa estereoscópica de magnificación de 45 X, con su correspondiente registro fotográfico con cámara digital marca MAVICA. Para tener una medida de la rugosidad de los recubrimientos, se midió el perfil de anclaje utilizando para ello la técnica de "Replical Tape" y un medidor de espesor calibrado.

**2.2.3. Análisis microscópico y observaciones principales.** En el análisis de la microestructura, porosidad y la verificación del espesor de estos recubrimientos, se utilizó un microscopio óptico metalográfico marca Olympus CK 40M a magnificaciones de 200 X y 400 X. Se prepararon muestras mediante cortes de 2,5 cm x 2,5 cm, seguido de encapsulado en baquelita mediante una embutidora (Marca LECO modelo PR25). Posteriormente se desbastó con lija, y pulido con alúmina, hasta acabado especular.

**2.2.4. Adherencia.** Los ensayos de adherencia, fueron realizados por el método de resistencia a la tracción de "Pull-off test" según norma ISO 4624 [7]/ASTM 4541 [8], utilizando como instrumento para medir la fuerza de ruptura un "Adhesion Tester" marca elcometer modelo F 106.

### 2.3. Estaciones de ensayo

Se seleccionaron para la evaluación dos atmósferas marinas tropicales muy agresivas con alta influencia del viento. Una vez colocadas las probetas, se efectuaron inspecciones mensuales y registro fotográfico. El tiempo de evaluación de este proyecto abarca 5 años, pero los resultados presentados corresponden al primer año de ex-

posición. Después de retiradas las probetas de las atmósferas de estudio (3, 6 meses y 1 año), fueron llevadas al laboratorio para análisis de productos de corrosión (probetas con incisión) en lupa estereoscópica 45 X, y para determinar la velocidad de corrosión por pérdida de masa (probetas sin incisión).

**2.3.1. Las Torres.** Esta estación se encuentra ubicada en el cruce con el lago de Maracaibo a 117 m del nivel del lago. Esta atmósfera a parte de ser marina se caracteriza por fuertes vientos, así como condiciones cambiantes de alta humedad y altas temperaturas. Además está rodeada por complejos industriales como El Tablazo, y el Terminal marítimo de carbones del Guausare que incorporan a la atmósfera dióxido de azufre a partir de los procesos de combustión de combustibles fósiles.

**2.3.2. La Voz.** Esta estación se encuentra ubicada en la Península de Paraguaná del Estado Falcón, a 12 millas náuticas, en la dirección de los vientos preferenciales, de la refinera de Aruba y a 300 m del mar Caribe. Esta atmósfera es clasificada de acuerdo al proyecto MICAT (Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica) [9] como una atmósfera especial, por la elevada agresividad y fuertes vientos predominantes, alcanzando velocidades de corrosión para el acero de 921  $\mu\text{m/año}$ , 9  $\mu\text{m/año}$  para el cobre y 27  $\mu\text{m/año}$  para el cinc.

**2.3.3. Mediciones de agentes meteoroquímicos en las atmósferas.** Los niveles de agentes aeroquímicos fueron medidos de acuerdo a la norma ISO 9225 [10]. Para la medición de las variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura, tiempo de humectación, velocidad de viento, precipitaciones) dado que no se disponen de una estación de monitoreo continuo en las atmósferas de evaluación, se utilizaron los datos pertenecientes a las estaciones meteorológicas más cercanas las cuales son bastante representativas de las atmósferas de estudio [11].

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Caracterización del ambiente

Los resultados de la caracterización de los atmósferas de estudios se muestran en las Tablas 2 y 3 donde se obtiene la clasificación de co-

Tabla 2  
Niveles promedios de variables meteorológicas en las Estaciones las Torres y la Voz durante el año de exposición

Estación	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	Vientos (Km/h)	Precipitación (mm)
Las Torres	75,2	27,8	24,4	48,4
La Voz	74,1	27,8	11,3	34,7

Tabla 3  
Niveles promedios de agentes aeroquímicos durante el año de exposición, clasificación de corrosividad atmosférica según ISO 9223 [10] de las atmósferas de estudios y velocidad de corrosión del acero al carbono (blanco)

Estación	Deposición de Cloruros (mg.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	Deposición de SO <sub>2</sub> (mg.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	Tiempo de humectación (%)	Corrosividad del acero según ISO 9223 [10]	Vcorr del acero (µm/año)	Corrosividad según ISO 9223[10]
Las Torres	159,92	19,69	38*	S <sub>2</sub> P <sub>1</sub> τ <sub>4</sub> - C4	124,7	C4
La Voz	352,53	28,40	63	S <sub>3</sub> P <sub>1</sub> τ <sub>5</sub> - C5	670,18	>C5

\* Este valor debe ser mayor en la estación Las Torres por encontrarse en el Lago de Maracaibo.

rosividad atmosférica muy alta según las normas ISO 9223 [12].

En las tablas anteriores se puede apreciar la alta agresividad de estas atmósferas, donde se muestra que la estación La Voz supera en agresividad a la estación Las Torres, con una velocidad de corrosión del acero que supera altamente el límite establecido por la norma ISO (categoría C5: máx. 200 µm/año).

### 3.2. Comportamiento del termorrociado doble capa (cinc/aluminio)

Los resultados obtenidos en cuanto al orden en desempeño de los sistemas fueron muy similares en ambas estaciones. El mejor comportamiento lo obtuvo el sistema (cinc/aluminio) de doble capa, manteniéndose prácticamente intacto en ambas atmósferas evaluadas, luego de 1 año de exposición (Figuras 1-4). Los sistemas sin sellador de poros, solo presentaron ligero ensuciamiento debido a la alta rugosidad natural (Figuras 2 y 4), la cual facilita la acumulación de todo tipo de polvo y sales sobre su superficie, pero también se notó que en los meses de lluvia, estos eran lavados y la probeta volvía a recobrar su apariencia original. Sobre este sistema, sólo

fue evaluado el sellador "wash primer" del fabricante 1, el cual había obtenido un buen desempeño en el Proyecto Iberoamericano PATINA [5] sobre recubrimientos termorrociados de Zn 85-Al 15.

Este sistema es un recubrimiento de dos componentes, un componente A formado por un resina de polivinil butiral con pigmento de cromato de cinc y un componente B formado por un solución alcohólica de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, que a nivel comercial no es usado como acabado sino como promotor de adherencia sobre superficies lisas como aluminio y galvanizado. Este al ser aplicado sobre cinc (galvanizado) o aluminio, reacciona con los mismos y forma una fina película de cristales de fosfatos de cinc o aluminio, los cuales son rugosos y sirven de anclaje o adherencia para otras capas posteriores de recubrimientos orgánicos que sean resistentes a atmósfera agresivas. Para el caso de los recubrimientos termorrociados, la idea es que reaccione con el mismo y selle los poros dejados por el mismo proceso de aplicación. Pero fue demostrado a nivel micro en lupa estereoscópica, que por su bajo espesor no logra cubrir los picos naturales de la rugosidad de estos recubrimientos. En el caso de los sistemas de doble capa Zn/Al, este efecto no fue notado por la ya

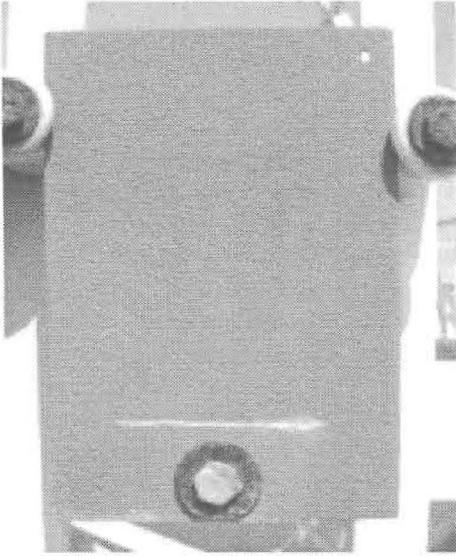


Figura 1. Comportamiento del termorrociado doble capa (Zn/Al) sellado con wash primer 1 luego de 1 año de exposición en la estación Las Torres. Espesor: 380  $\mu\text{m}$ .



Figura 2. Comportamiento del termorrociado doble capa (Zn/Al) luego de 1 año de exposición en la estación Las Torres. Espesor: 242,5  $\mu\text{m}$ .

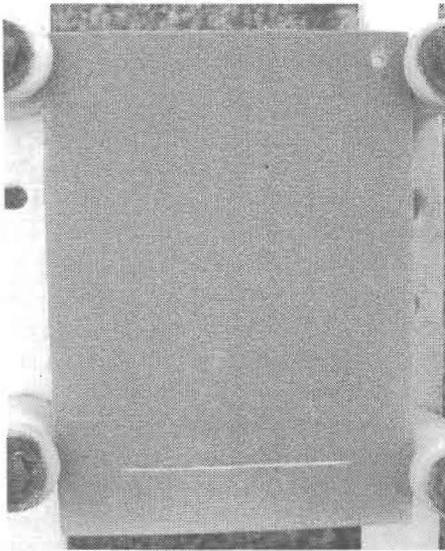


Figura 3. Comportamiento del termorrociado doble capa (Zn/Al) sellado con wash primer 1 luego de 1 año de exposición en la estación La Voz. Espesor: 437,5  $\mu\text{m}$ .

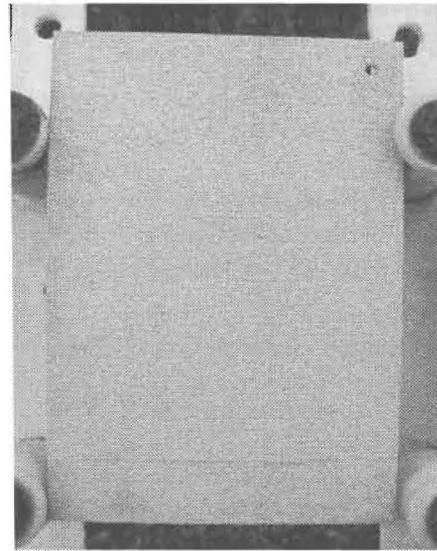


Figura 4. Comportamiento del termorrociado doble capa (Zn/Al) luego de 1 año de exposición en la estación La Voz. Espesor: 397,5  $\mu\text{m}$ .

alta resistencia de estos recubrimientos. Lo que si fue notado en el uso de sellador "wash primer" sobre este sistema es que disminuye la rugosidad, por lo que el ensuciamiento y la acumulación de sales sobre su superficie es mucho menor. Adicionalmente, se notó que en los sistemas con Zn/Al doble capa aplicados por el proceso de

llama con y sin sellador, producen una excelente protección galvánica en la incisión realizada en las probetas hasta el acero base (Figura 5).

El comportamiento de estos recubrimientos fue muy superior al presentado por los termorrociado con solo Cinc y Aluminio sin sellador, al

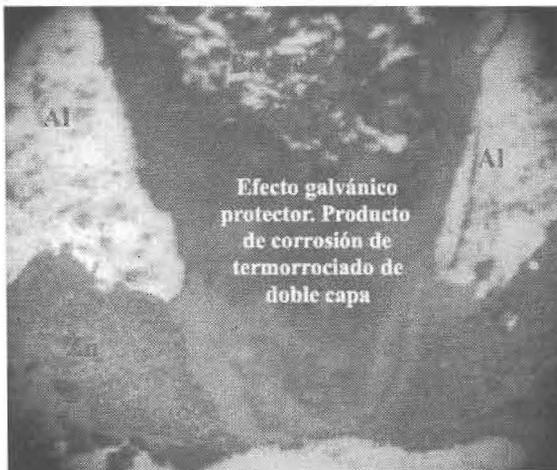


Figura 5. Corte transversal del recubrimiento termorrociado en la incisión de la probeta de termorrociado de doble capa luego de 1 año de exposición en la estación Las Torres. Nótese el excelente efecto galvanico de este recubrimiento, la incisión tapada por los productos de corrosión del recubrimiento, sin evidencia de corrosión del sustrato.

presentar estos últimos productos de corrosión en tan solo 3 meses de exposición.

### 3.2. Comportamiento de los recubrimientos termorrociados con cinc con y sin sellador

Los recubrimientos con cinc evaluados por los procesos de aplicación arco eléctrico y llama, presentaron corrosión generalizada en el caso de la Estación La Voz; cubriéndose las probetas por completo de productos blancos típicos de corrosión de cinc en atmósferas marinas. Particularmente en esta estación se notó gran diferencia en el comportamiento de estos sistemas en cuanto al proceso de aplicación: Aluminio compararse probetas de espesores similares (arco eléctrico 140  $\mu\text{m}$  y llama 142,5  $\mu\text{m}$ ), se notó que las probetas recubiertas con cinc por llama presentaban corrosión del sustrato en la parte inferior en tan solo 3 meses de exposición, mientras las probetas termorrociadas por el proceso de arco eléctrico no presentaban este problema. La razón de este comportamiento se debe al menor tamaño de los vacíos o poros en el recubrimiento aplicado por arco eléctrico, presentando además una mejor consistencia en la cohesión de las partículas.

Para el caso de las probetas aplicadas por llama los vacíos son más grandes y se observan las capas de separación cuando el metal fundido es enfriado lo cual pueden interconectar iónicamente al sustrato. El aspecto de una mejor cohesión entre las partículas para el proceso por arco eléctrico fue demostrado con el ensayo de adherencia realizado según norma ASTM 4541 [8], el cual arrojó valores de adherencia de 600 psi para los recubrimientos termorrociados con cinc por arco eléctrico, y de 400 psi para los recubrimientos por llama, ambas fallas de naturaleza cohesiva. El comportamiento en cuanto a corrosión de los recubrimientos de cinc en la estación Las Torres, fue en menor grado que en la estación La Voz al presentar un 32 % de área corroida; siendo la mayor parte en el borde derecho de la probeta, lo cual se debe a la ubicación en cuanto a la dirección de incidencia de los vientos en el borde derecho de la probeta, mientras que en la estación La Voz la incidencia de los vientos si es frontal hacia las probetas. Esto revela la poca resistencia de los recubrimientos de cinc ante el efecto erosivo en estas atmósferas.

En relación al efecto de los selladores de poros evaluados sobre estos sistemas, el mejor desempeño lo obtuvo el sellador fenólico, el cual incrementó en un 100 % la resistencia a la corrosión y mostró una agradable apariencia desde el punto de vista estético en comparación a los sistemas sin sellador, y con sellador "wash primer". El recubrimiento fenólico mejora indiscutiblemente la resistencia a la erosión dada sus excelentes propiedades como resina (resistencia a químicos, a elevadas temperatura, a medios marinos, etc.), además de disminuir grandemente la rugosidad de estos sistemas por su mayor espesor por capa (25  $\mu\text{m}$ ), al observarse la probeta en forma general prácticamente intacta y limpia. En particular, en el caso de la Estación La Voz se notó leves productos blancos de corrosión del cinc en la parte inferior de la probeta que emergen entre los poros no cubiertos por el sellador (picos de rugosidad) a los 4 meses de exposición. En relación a la incisión de este sistema con sellador, en ambas atmósferas evaluadas fue notado el efecto protector galvanico del recubrimiento de cinc al observarse en la incisión productos blancos típicos de corrosión del mismo. En contraste, el comportamiento obtenido con sellador "wash primer" sobre este sistema de termorrocia-

do de cinc, no fue satisfactorio, tal como fue explicado anteriormente por su bajo espesor por capa impidiendo el cubrimiento de la rugosidad de estos sistemas (120  $\mu\text{m}$ ) los cuales quedan expuestos a estos ambientes tan agresivos. En el caso de la estación Las Torres, independiente de tener o no el sellador, se notaron productos blancos de corrosión en el borde derecho de la probeta (incidencia de los vientos preferenciales) con un alcance de aproximadamente de 2 cm en 6 meses de evaluación. En la estación La Voz, el daño fue generalizado con un porcentaje de 70 % de área corroída. El sellador "wash primer" del fabricante 2 obtuvo un ligero mejor comportamiento en comparación al del fabricante 1.

### 3.3. Comportamiento de los recubrimientos termorrociados con aluminio por el proceso de arco eléctrico con y sin sellador

En relación al comportamiento de los recubrimientos termorrociados con aluminio por el proceso de arco eléctrico sin sellador, a pesar que éstos recubrimientos ofrecen una mayor resistencia a la erosión que los recubrimientos con cinc, se notaron ciertas diferencias en las dos atmósferas evaluadas. En la estación Las Torres, se notó corrosión del sustrato en la incisión, mientras algunas probetas presentaban además corrosión localizada del acero base en los poros del recubrimiento de aluminio en zonas central y borde superior de la probeta. Esto fue corroborado con la lupa estereoscópica a 7 X y 45 X. En la Estación La Voz la mayoría de las probetas presentaron excelente resistencia ante este ambiente mas agresivo, y además en la incisión no se notó corrosión del sustrato y se observaron productos blancos de corrosión del aluminio, excepto algunas probetas con bajo espesor donde se notó, a nivel de la lupa estereoscópica, puntos de corrosión del sustrato, mientras que en las torres la corrosión del sustrato en la incisión se apreciaba a simple vista y era generalizada. La diferencia está relacionada con los agentes contaminantes de estas atmósferas. El contenido de cloruro en la estación La Voz es mucho mayor que en la estación Las Torres, por lo que el aluminio a pesar de ser mas activo que el acero en la serie galvánica, se mantiene pasivo en la estación Las Torres y no es capaz de proteger al sustrato acero, mientras

en la estación La Voz dado el mayor contenido de cloruros, el aluminio se activa y se corroe actuando de sacrificio para proteger al acero base en la incisión.

De igual manera que en los recubrimientos con cinc, la mejora en la resistencia de estos sistemas, fue dada por el tipo de sellador, y se obtuvieron de manera análoga los mismos resultados en cuanto al orden en desempeño, el mejor comportamiento lo obtiene el sellador fenólico, seguido del sellador "wash primer" del fabricante 2 y luego el fabricante 1.

## Conclusiones

1. La estación La Voz resultó ser más agresiva que la estación Las Torres.
2. No es aconsejable el uso del termorrociado con cinc sin sellador en atmósferas marinas y costeras, ya que es un material muy activo en estos medios y poco resistente ante el efecto erosivo.
3. Los recubrimientos termorrociados con aluminio, aun cuando ofrecen una mayor resistencia a la erosión (acción de los vientos) que los recubrimientos termorrociados con cinc, ambos requieren de un sellador en las atmósferas evaluadas.
4. El sellador de poros tal como el fenólico, con suficiente espesor debe utilizarse para que los recubrimientos termorrociados de cinc y aluminio aporten una protección adecuada en las atmósferas marinas y costeras erosivas evaluadas en este estudio.
5. Los recubrimientos por termorrociado con Zn/Al constituyen la mejor opción en cuanto a selección del tipo de recubrimiento termorrociado a utilizar en atmósferas marinas y costeras marinas.
6. El sistema mas eficiente de protección en las atmósferas agresivos evaluados, fue el recubrimiento termorrociado con Zn/Al (doble capa) y sellado con "wash primer", el cual ofrece una excelente protección galvánica al sustrato y una buena resistencia ante el efecto erosivo
7. La presencia de cinc como fondo fue esencial para mejorar el desempeño del sistema termorrociado con Zn/Al, pues el sistema sólo con aluminio presenta una buena resistencia ante el efecto erosivo pero no protege galvánicamente al sus-

trato, además de sufrir corrosión del sustrato en los poros expuestos del recubrimiento.

8. En atmósferas marinas y costeras marinas, la aplicación de 2 capas de sellador fenólico realizaron la apariencia y extendieron la vida del recubrimiento de Cinc en al menos 100 %.

9. El recubrimiento fenólico, como sellador de poros, tiene un mejor desempeño que los dos tipos de wash primer evaluados.

10. El recubrimiento "wash primer" utilizado como sellador de poros no es la mejor opción, debido a su bajo espesor no siendo capaz de cubrir los picos de la rugosidad natural de estos recubrimientos.

11. Los recubrimientos termorrociados por el proceso de arco eléctrico si se compara el mismo material y espesor, tienen un desempeño superior al de los recubrimientos termorrociados por el proceso de llama, dada la mayor porosidad de este último.

### Referencias Bibliográficas

1. Kogler, R., Brydi, D., y Highsmith, C (1999) Recent FHWA Experience with Metallized Coatings for Steel Bridges. *Material Performance*. 38 (7):43-45.
2. American Welding Society. (1997) Corrosion Tests of Flame-Sprayed Coated Steel 19 Year Report. Disponible en: [http://www.intmetl.com/19\\_year\\_report.htm](http://www.intmetl.com/19_year_report.htm).
3. Rosbrook, T., Swidzinski M., and Houghton C. (1999) "Thermal Spray Aluminum Past, Present and Future" Corrosion Paper No 616.
4. Morrow III, H., Zinc Institute, Inc. (1997) Economics of Thermal Spraying for the Long-Term Corrosion Protection of Steel Structures. [On-Line] Disponible en [www.intmetl.com/economics.htm](http://www.intmetl.com/economics.htm).
5. Morcillo, M., Almeida, E., Fragata, F., y Pannossian Z. (2002). Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica. Parte II. Protección Anticorrosiva de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica (Red Temática Patina, XV.D/CYTED) ISBN: 84-930448-2-2 Madrid, España.
6. ASTM D 1186 "Standard Test Method for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Nonmagnetic Coatings Applied to a Ferrous Base." (West Conshohocken, PA: ASTM International 2002 )
7. ISO 4624. "Paints and varnishes - Pull-off test for adhesion" (Geneva, Switzerland: ISO, 2002.)
8. ASTM D 4541 "Pull-off adhesion testing of paint, varnish and other coatings and films" (West Conshohocken, PA: ASTM International 2002)
9. Morcillo, M., Almeida, E., Rosales, B., Uru-churtu, J., Marrocos, M. (1998). Corrosión y Protección de los Metales en la Atmósfera de Iberoamérica. Parte I. Mapas de Iberoamérica de Corrosividad atmosférica (Proyecto MICAT, XV. 1 /CYTED). ISBN: 84-930448-1-4 Madrid, España.
10. ISO 9225 "Corrosion of metals, and alloys - Corrosivity of atmospheres - Measurement of pollution". (Geneva, Switzerland: ISO, 1992).
11. Salas, O. (2003) Comportamiento de los Recubrimientos por Termorrociado de Aluminio y Cinc en Atmosferas Marinas y Costeros Marinos. Trabajo Especial de Grado Magister Scientiarum. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
12. ISO 9223 "Corrosion of metals, and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification". (Geneva, Switzerland: ISO, 1992.).

Recibido el 27 de Julio de 2005

En forma revisada el 06 de Noviembre de 2006