

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES EN LAS CIUDADES DE LA PAZ, COCHABAMBA Y SANTA CRUZ – CARACTERIZACIÓN DE CORROSIVIDAD DE ATMÓSFERAS (10 meses de exposición)

Jaime A. Rocha¹, Javier Velarde², Rosse Mary Terán³ y Cristian Caballero³

¹ Universidad Mayor de San Andrés – Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, jrocha@umsa.bo, La Paz, Bolivia

² Fabrica de Pinturas MONOPOL Ltda., jvelarde@pinturasmonopol.com, La Paz, Bolivia.

³ Universidad Mayor de San Simón – Departamento de Química, rossemary24@gmail.com, Cochabamba, Bolivia

RESUMEN

En el presente trabajo, se persiguieron dos premisas importantes: La primera dirigida a la caracterización de atmósferas en cuanto a su agresividad corrosiva y la segunda a probar recubrimientos anticorrosivos para acero de elección en nuestro país.

En Bolivia al estar geográficamente dividida en tres grandes regiones de diferentes características climáticas, era necesario llevar adelante estudios para caracterizar al menos una de las atmósferas de cada región. Gracias al presente proyecto, se logró completar la caracterización en tres ciudades de las tres diferentes regiones, mostrando una atmósfera muy cálida y húmeda en Santa Cruz, frente a dos con humedad muy similar en La Paz y Cochabamba, pero con la diferencia de mayores registros de temperatura en la última. En cuanto a los niveles de corrosión de acero desnudo, el orden de velocidades de corrosión de mayor a menor siguió la lógica siendo el registro más alto en Santa Cruz, luego Cochabamba y finalmente La Paz, a pesar de tener mayores índices de contaminación.

En cuanto a los recubrimientos, al igual que en el acero desnudo los mayores deterioros se registraron en Santa Cruz, frente a Cochabamba y La Paz. Las probetas de acero galvanizadas, mostraron blanqueo superficial característico de la oxidación del zinc de recubrimiento, pero no otros defectos y menos corrosión del acero de base. En cuanto a las pinturas, si bien todos los esquemas mostraron buena protección anticorrosiva, los esquemas con resina epóxica perdieron color y brillo y presentaron entizado en mayor grado que los otros esquemas, siendo las de mejor respuesta en este aspecto las de resina acrílica.

INTRODUCCION

La Corrosión Atmosférica ha sido objeto de varios estudios a nivel mundial, contándose a la fecha con la clasificación de varias atmósferas en relación a su agresividad corrosiva, además de resultados de

ensayos de desempeño de recubrimientos metálicos y/o orgánicos en esas atmósferas. Por lo tanto, a nivel mundial éste problema es y ha sido estudiado, habiéndose demostrado la necesidad de caracterizar y probar materiales y recubrimientos expuestos a la intemperie como paso previo a su uso en aplicaciones prácticas.

De la misma forma, a nivel nacional el problema de la Corrosión Atmosférica ya fue abordado anteriormente, con la realización de los Proyectos PATINA⁽⁷⁾ concluido el año 2001 y el Proyecto MONOPOL-IIMETMAT⁽⁶⁾ concluido en Octubre del 2004. En estos proyectos, se participó evaluando recubrimientos metálicos (Zn, Al y sus aleaciones) y orgánicos (esquemas de pinturas de categorías C2, C3, C4, C5M y C5I).

En base a los resultados obtenidos en éstos proyectos, (que merecieron la aprobación y el respaldo para una nueva iniciativa por parte de la Gerencia de MONOPOL Ltda. en Noviembre del 2004), y con el objeto de precisar aún mejor los recubrimientos de acero que pueden ser de elección en Bolivia, es que se decidió continuar con el trabajo para la validación de la caracterización de atmósferas antes realizada (La Paz y Santa Cruz), y la caracterización de la atmósfera de la ciudad de Cochabamba.

Adicionalmente, es necesario mencionar, que a pesar de no contar con información a nivel nacional y apelando a la información internacional, los costos por problemas de corrosión atmosférica son elevados y mucho más en países como el nuestro, donde el problema de la corrosión no es tomado en cuenta, hecho que se refleja en las estadísticas ya que en estas no se consignan los costos debidos a la corrosión.

Como un inicio para tomar conciencia del problema de la corrosión atmosférica, es necesario contar con la mayor información, en primer lugar sobre la agresividad atmosférica y luego la respuesta a ésta

de los recubrimientos de elección por costo, disponibilidad y experiencia.

OBJETIVO

El objetivo del proyecto aún en desarrollo es:

Efectuar la caracterización de la atmósfera de la ciudad de Cochabamba y evaluar el desempeño de recubrimientos metálicos y orgánicos (pinturas) en las ciudades de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz.

PROCEDIMIENTO REALIZADO

Para la caracterización realizada en Cochabamba y la validación en Santa Cruz y La Paz, se siguieron los procedimientos de las 5 normas ISO que se indican en las referencias ^(1,2,3,4,5).

En las Fotografías 1, 2, 3 y 4, se muestran los detalles de los dispositivos instalados.

La información meteorológica para la determinación de parámetros climáticos y cálculo del TDH (Tiempo De Humectación), fue proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

En cuanto a los recubrimientos, las probetas de acero y galvanizadas pintadas con resinas de base acrílica, epóxica, alquídica y de pigmentos de aluminio fueron proporcionadas por MONOPOL Ltda. Las probetas de acero galvanizadas fueron proporcionadas por ENABOLCO.

Las probetas instaladas en los paneles, fueron objeto de evaluaciones visuales periódicas, habiendo sido la última la realizada a los 10 meses de exposición. En ambos casos, se incluyeron probetas con incisión vertical u horizontal para estudios de protección catódica.



Fotografía 1. Vista general de la Estación Cochabamba, con el panel de exposición y la caseta

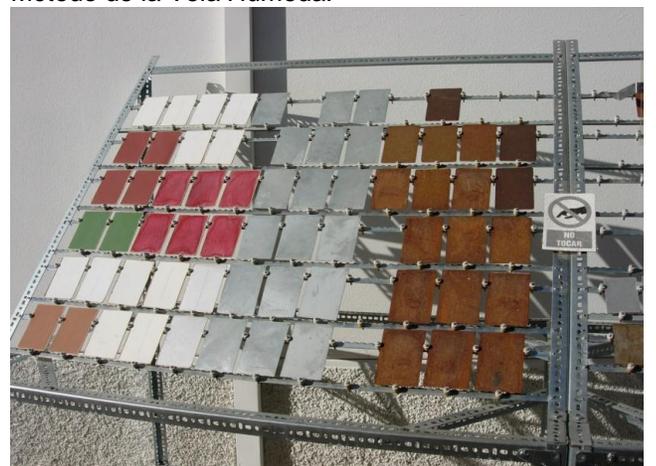
para instalación de dispositivos para determinación de contaminantes.



Fotografía 2. Placas alcalinas instaladas en la caseta para la determinación de deposición de SO_2



Fotografía 3. Colector de cloruros, denominado Método de la Vela Humeda.



Fotografía 4. Panel de exposición de estación Cochabamba. Vista de izquierda a derecha de: planchas de acero pintadas, planchas de acero galvanizadas y planchas de acero desnudo para

validación y caracterización (la coloración anaranjada-café se debe a la formación de óxidos.).

RESULTADOS

Caracterización

A partir de la información obtenida en el presente proyecto y los proyectos PATINA⁽⁷⁾ y MONOPOLIIMETMAT⁽⁶⁾ y el aporte de otras fuentes locales^(8,9), se pudo determinar la clasificación de Köppen⁽⁸⁾ para las ciudades de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz. Se estableció en primer lugar una gran diferencia entre La Paz y Cochabamba frente a Santa Cruz al estar clasificados los climas de acuerdo a Köppen

como templado húmedo con invierno seco y verano suave para las ciudades de La Paz y Cochabamba y como sabana tropical en el caso de Santa Cruz^(6,7). Adicionalmente, la velocidad de viento preferencial resulta ser más alta en la ciudad de Santa Cruz, siendo más susceptible a originar corrosión con erosión.

La información importante para efectos de corrosión, ha sido resumida en las tablas 1 y 2, donde se muestran los valores de los parámetros ambientales y de corrosión, incluyendo las clasificaciones de acuerdo a la norma ISO 9223⁽³⁾.

Tabla No. 1. **Parámetros medioambientales para las ciudades de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz, incluyendo clasificaciones según la norma ISO 9223⁽³⁾**

PARÁMETRO	LA PAZ		COCHABAMBA		SANTA CRUZ	
	VALOR	CLASIF.	VALOR	CLASIF.	VALOR	CLASIF.
TDH	0.194	τ3	0.180	τ3	0.380	τ4
TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	12.9		17.6		24.2	
HUMEDAD REL. MEDIA ANUAL (%)	50.5		46.0		66.6	
PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL (mm)	472.6		509.7		1580.0	
RADIACIÓN SOLAR TOTAL (KJ/cm ²)	697.7		733.2		480.9	
HELIOFANIA (Horas sol día)	2472.17		2804.4 2		2120.80	
VELOCIDAD DE DEPOSITO DE SO ₂ (mg/m ² .d)	2.32	P0	0.45	P0	1.20	P0
VELOCIDAD DE DEPOSITO DE CLORUROS (mg/m ² .d)	6.60	S1	1.88	S0	1.93	S0

La información para La Paz y Santa Cruz, fue extraída de las referencias 6 y 7. Para Cochabamba se determinaron en el presente proyecto.

Tabla No. 2. **Valores de velocidad de corrosión obtenidas a los 10 meses de exposición (µm/año), para acero desnudo en las ciudades de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz, incluyendo las clasificaciones según la norma ISO 9223⁽³⁾**

LA PAZ		COCHABAMBA		SANTA CRUZ	
VALOR	CLASIF.	VALOR	CLASIF.	VALOR	CLASIF.
1.67	C2	3.37	C2	5.58	C2

Recubrimientos

La Paz

En cuanto a las probetas galvanizadas, las incisiones no mostraban productos de corrosión y la presencia de óxido (blanqueo superficial) no se incrementó en forma apreciable en relación a evaluaciones anteriores.

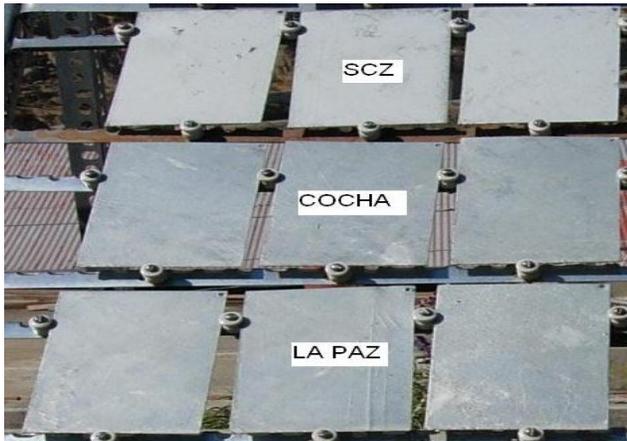
En la Fotografía 5, se muestra la parte del panel de exposición donde se encuentran las probetas galvanizadas traídas a los seis meses de exposición desde Cochabamba y Santa Cruz, junto a las expuestas en La Paz, siendo posible diferenciar que el blanqueo superficial debido a oxidación, es mayor en

la ciudad de Santa Cruz, luego en La Paz y finalmente las expuestas en Cochabamba. No se detectaron mayores signos de deterioro como descascaramiento y corrosión del acero base.

En relación a los esquemas de pintura, se detectaron cambios de coloración y brillo en la superficie, con valores de pérdida de color hasta casi 20 % y pérdidas de brillo hasta el orden de 98% en las probetas con recubrimiento a base de resinas epóxicas. En las Fotografía 6, se observa la superficie de una probeta con recubrimiento de resinas epóxicas.

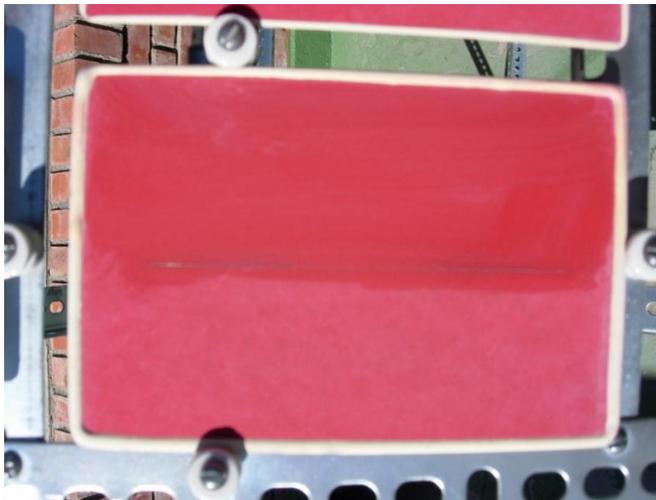
No se llegó a detectar signos de ampollamiento, corrosión, fisuración y presencia de hongos. En cuanto al entizado, este se presentó principalmente en los

esquemas con pintura epóxica. El exfoliado también fue esporádico y se presentó solo en los bordes de incisión.



Fotografía 5. Aspecto superficial de probetas galvanizadas en la Estación MONOPOL LP.

En cuanto al análisis de las incisiones, aparentemente todos los esquemas están en proceso de activación de sus mecanismos de protección, debido a las coloraciones presentadas en las incisiones.



Fotografía 6. Superficie de una probeta con resina epóxica, que mostró una gran pérdida de color y brillo.

Cochabamba

En cuanto a las probetas galvanizadas, las incisiones no mostraban productos de corrosión solo algo de polvo retenido, en cuanto a la superficie de las probetas, la coloración era ligeramente blanquesina muy similar a la mostrada en la Fotografía 5.

En relación a los esquemas de pintura, se detectaron cambios de coloración y brillo en la superficie, con

valores de pérdida de color de aproximadamente 20 % y de brillo hasta el orden de 96% o mayores en las probetas con resina epóxica.

En la Fotografía 7, se puede observar la superficie de la probeta con esquema epóxico (alta pérdida de color y brillo), mostrando irregularidad en la coloración.

En relación a ampollamiento, corrosión, exfoliación, fisuración y presentación de hongos, no se tuvieron novedades. En cuanto al entizado, este se presentó principalmente en los esquemas con pintura epóxica.



Fotografía 7. Superficie de una probeta con resina epóxica, con alta pérdida de color y brillo e irregularidades de coloración en la superficie.

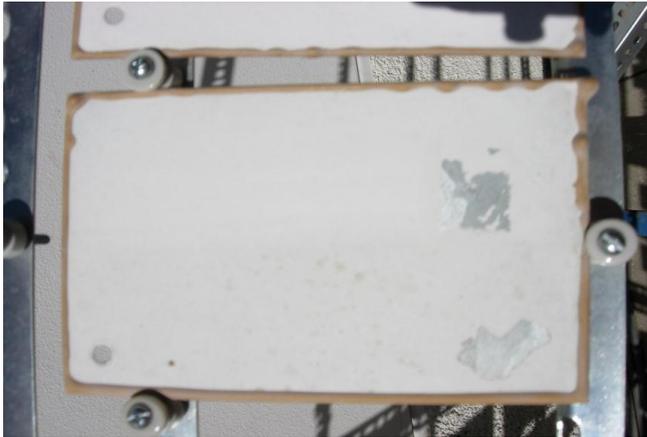
En cuanto al análisis de las incisiones, todos los esquemas mostraron estar en proceso de activación de sus mecanismos de protección con coloraciones oscuras y principalmente con fondo negro.

Al realizarse la prueba de entizado en los esquemas de pintura sobre galvanizado, al igual que en la evaluación a 6 meses, se pudo observar un desprendimiento de las dos capas de recubrimiento en el esquema GAL-WP-E (Wash primer, esmalte industrial), mostrando una falla denominada adhesiva. En la Fotografía 8, se muestra el aspecto de la probeta luego del desprendimiento de pintura, dejando expuesta la superficie galvanizada.

Santa Cruz

En cuanto a las probetas galvanizadas, las incisiones mostraron un fondo negro sin productos de color marrón, y la superficie presentó mayor blanqueo. Para observar la coloración y aspecto de la incisión, se muestra a continuación la Fotografía 9, de una probeta galvanizada con incisión.

En relación a los esquemas de pintura, a ocho meses y medio de exposición, se detectaron cambios de coloración y brillo en la superficie, con valores de pérdida de color hasta más de 70 % en las probetas AAL (Anticorrosivo aluminio extra intemperie) y pérdidas de brillo mayores a 96% en las probetas de base epóxica y AAL



Fotografía 8. Superficie del esquema GAL-WP-E, mostrando el desprendimiento de las dos capas de pintura.



Fotografía 9. Aspecto superficial de una probeta de acero galvanizado, mostrando blanqueo superficial y coloración negra en la incisión.

En la Fotografía 10, se puede observar la superficie de la probeta con el esquema AAL (alta pérdida de color y brillo). Por otra parte, es posible observar una aureola oscura alrededor de la incisión, que se presentó prácticamente en todos los esquemas de pintura.

En relación a ampollamiento, corrosión, fisuración y presentación de hongos, no se tuvieron novedades como se muestra en la planilla de evaluación adjunta. En cuanto al entizado, este se presentó principalmente en los esquemas con pintura epóxica. La exfoliación, solo se presentó en el borde de la incisión de esquemas con resinas alquídicas. En cuanto al

análisis de las incisiones, todos los esquemas mostraron estar en proceso de activación de sus mecanismos de protección con coloraciones oscuras y en muchos de ellos con fondo negro. Se constató nuevamente la presentación de aureolas alrededor de las incisiones y chorreado. Al igual que a los 6 meses, al realizarse la prueba de entizado en los esquemas de pintura sobre galvanizado, se pudo observar un desprendimiento de las dos capas de recubrimiento en el esquema GAL-WP-E (Wash primer, esmalte industrial), mostrando una falla denominada adhesiva al igual que en Cochabamba (Fotografía 8).



Fotografía 10. Superficie del esquema AAL, con gran pérdida de color y brillo. Mostrando una aureola oscura alrededor de la incisión.

CONCLUSIONES

Producto de las evaluaciones realizadas hasta los 10 meses de exposición, podemos emitir las siguientes conclusiones:

Caracterización

- La ciudad de Santa Cruz presenta un ambiente más húmedo y cálido, esperándose inicialmente mayor efecto de la corrosión. Adicionalmente, se establece que los niveles de humectación entre La Paz y Cochabamba son muy similares, con la diferencia de que el ambiente en la ciudad de Cochabamba es mucho más cálido.
- La ciudad de La Paz muestra contenidos de contaminantes mas elevados en su atmósfera y que podrían influir en la presentación de una mayor velocidad de corrosión en metales sensibles a estos.
- En relación a la corrosión de acero, a pesar de tener las tres atmósferas una clasificación C2 (Baja a mediana), la velocidad de corrosión más alta se registra en la ciudad de Santa Cruz comparada con las obtenidas en La Paz y Cochabamba. En consecuencia, la Estación

Santa Cruz, es la que muestra una formación de productos de corrosión más estable y uniforme sobre planchas de acero.

- Finalmente debemos concluir que cualquier material sometido a estas atmósferas, sufrirá un ataque dependiendo de su sensibilidad a la humedad y temperatura por una parte o a la presencia de contaminantes (SO₂ y cloruros) por otra.

Recubrimientos

- El proceso corrosivo del zinc de recubrimiento en probetas galvanizadas se ha ido pronunciando como era de esperarse, principalmente en Santa Cruz, producto de mayores precipitaciones, temperatura y posible contaminación industrial, aunque debido a la pasivación por los productos de corrosión (blanqueo superficial), la velocidad de corrosión disminuyó en relación a anteriores evaluaciones.
- En cuanto a las incisiones en probetas galvanizadas, las expuestas en Santa Cruz, son las únicas que presentan productos de corrosión.
- En los esquemas de pintura, se pudo verificar que la pérdida de color y brillo y presentación de entizado principalmente en esquemas con resina epóxica fue muy pronunciado. También se pudo comprobar la existencia de falla adhesiva en Cochabamba y Santa Cruz del esquema de pintura GAL-WP-E (Wash primer, esmalte industrial), utilizado sobre superficies galvanizadas. Adicionalmente, en las tres ciudades, las incisiones mostraron diferentes grados de corrosión, que muestran en la mayoría de los casos la activación del mecanismo de protección.
- En general los recubrimientos tanto metálicos como orgánicos (pinturas), hasta los 10 meses de exposición presentaron un buen desempeño protector contra la corrosión del acero de base. Adicionalmente, es necesario hacer notar que los esquemas de pintura con resina acrílica a diferencia de los con resina epóxica, mostraron un menor deterioro en cuanto a color, brillo y entizado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Estado Boliviano por el financiamiento del proyecto a

través del IDH canalizado en la UMSA por el Departamento de Investigación, Postgrado e Interacción Social (DIPGIS). Así mismo agradecer a las tres instituciones a las que pertenecen los investigadores a cargo del Proyecto:

- Universidad Mayor de San Andrés – Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales.
- Fábrica de Pinturas MONOPOL Ltda.
- Universidad Mayor de San Simón – Departamento de Química.

Por el soporte durante las distintas fases del proyecto.

REFERENCIAS

1. **ISO 4542/81**, Revêtements métalliques et autres revêtements non organiques Directives Generales pour pour les essais de corrosion statique en milieu extérieur.
2. **ISO 8407**, Metals and alloys - Procedures for removal of corrosion products from corrosion test specimens.
3. **ISO 9223**, Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres. Classification.
4. **ISO/DIS 9225**, Corrosion des métaux et alliages - Corrosivité des atmosphères -Methodes de mesurage de la pollution.
5. **ISO 9226**, Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
6. Rocha J., Velarde J., Rozovic I., “**Informe Final: Evaluación de la agresividad corrosiva de las atmósferas de las ciudades de La Paz y Santa Cruz y evaluación de esquemas de recubrimientos orgánicos (pinturas) en estas atmósferas**”, Proyecto IIMETMAT – MONOPOL, Agosto 2004.
7. Rocha J., **Estación PATINA para la evaluación de la corrosión atmosférica**, Informe Final Proyecto de Investigación, IIMETMAT - UMSA, Abril 2000.
8. Segaline y Cabre, **EL CLIMA DE LA PAZ**, Datos del Observatorio de San Calixto, Offset Color S.R.L., La Paz, 1988.
9. SENAMHI, **Información Meteorológica de las Ciudades de Santa Cruz, Cochabamba y La Paz - Datos Históricos y Específicos.**