



## **UN COMPENDIO DE ESTUDIOS DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL ACERO EN PANAMÁ**

**Juan A. Jaén<sup>1</sup>, Josefina Iglesias<sup>2</sup>, Cecilio Hernández<sup>2</sup>, Alcides Muñoz<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Química Física, CITEN, Lab. No. 105, Edificio de Laboratorios Científicos-VIP, Universidad de Panamá. [juan.jaen@up.ac.pa](mailto:juan.jaen@up.ac.pa)

<sup>2</sup>Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Panamá. [josefina.iglesias2@utp.ac.pa](mailto:josefina.iglesias2@utp.ac.pa) [cecilio.hernandez@utp.ac.pa](mailto:cecilio.hernandez@utp.ac.pa)

<sup>3</sup> Departamento de Física, Lab. No. 216, Edificio de Laboratorios Científicos-VIP, Universidad de Panamá. [alcides\\_up@yahoo.com](mailto:alcides_up@yahoo.com)

### **RESUMEN**

La corrosión atmosférica de aceros al carbono y aceros patinables en atmósferas marinas es un tema que ha sido estudiado por varios autores en diferentes regiones del mundo. En este trabajo, se compilan varios estudios en aceros al carbono y patinables expuestos a la intemperie en el ambiente tropical marino de Fuerte Sherman, en la costa Caribe de Panamá, y en sitios urbanos de Panamá. Se presta especial atención a la cinética del proceso de corrosión atmosférica a corto plazo y los productos de corrosión.

### **PALABRAS CLAVES**

Corrosión atmosférica, acero al carbono, acero patinable, cinética y productos de corrosión.

## **A COMPENDIUM OF STUDIES OF THE ATMOSPHERIC CORROSION OF STEEL IN PANAMA**

### **ABSTRACT**

Atmospheric corrosion of carbon and weathering steels in marine environments has been widely studied by several authors in different regions of the world. In this paper, we report a compilation of several studies on carbon and weathering steels exposed to the tropical marine environment of Fort Sherman, Panama Caribbean

coast and in urban sites of Panama. Special attention is paid to short term kinetics corrosion and the products formed.

## **KEYWORDS**

Atmospheric corrosion, carbon steel, weathering steel, kinetics of corrosion, corrosion products.

## **INTRODUCCIÓN**

En la literatura se encuentran abundantes reportes sobre los productos de corrosión formados en aceros en diferentes regiones marinas. En Panamá, que posee condiciones ambientales propicias para provocar ataques severos a las estructuras metálicas, se han realizado algunos estudios sistemáticos de la corrosión atmosférica de los aceros. Destacan los estudios de Southwell (y sus colaboradores) (Alexander *et al.*, 1957; Southwell *et al.*, 1957), quienes realizaron una investigación de dieciséis años de duración. El estudio tuvo como objetivo conocer el comportamiento de los diferentes metales utilizados en las operaciones del Canal de Panamá a fin de seleccionar los más adecuados para la construcción del tercer juego de esclusas, con el fin de mejorar las facilidades del Canal. Se estudiaron quince diferentes metales y aleaciones incluyendo acero al carbono, aceros estructurales de baja aleación, aceros inoxidable y algunos metales no ferrosos, por períodos de uno, dos, cuatro, ocho y dieciséis años.

Uno de los esfuerzos más importantes en el estudio de la corrosión atmosférica de los aceros al carbono y de otros materiales en Panamá lo constituyó el proyecto de investigación Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica (MICAT) (Morcillo *et al.*, 1998; Morcillo *et al.*, 1995; Jaén *et al.*, 1997), que investigó especímenes de acero al carbono, zinc, cobre y aluminio expuestos durante cuatro años en diferentes ambientes rurales, urbanos y marinos en la región Iberoamericana. El proyecto incluyó la pérdida de metal (penetración de la corrosión), el examen microscópico, las pruebas electroquímicas y los análisis de productos de corrosión en muestras de una red de 72 sitios de ensayo de exposición atmosférica en toda la región iberoamericana. El objetivo era doble: establecer la influencia del medio ambiente sobre la tasa de corrosión y para evaluar el efecto del medio ambiente sobre la formación y la naturaleza de los productos de

corrosión. En prácticamente todos los otros estudios realizados en Panamá, se sigue una metodología similar a la usada en MICAT.

En este trabajo, se examinan retrospectivamente varios otros estudios (Jaén *et al.*, 1997; Jaén *et al.*, 2003; Jaén & Garibaldi, 2004; Jaén & de Araque, 2006; Jaén *et al.*, 2009, Jaén *et al.*, 2012) en aceros al carbono y patinables expuestos a la intemperie en el ambiente tropical marino de Panamá, y se comparan con aquellos obtenidos en los estudios del MICAT. Los aceros patinables, "low alloy steels" o "weathering steels" como se les denomina en la literatura inglesa, describen una clase de aceros estructurales de baja aleación y alto límite elástico, que experimentan en atmósferas de baja agresividad (rural, urbana e industrial ligera) menor corrosión que el acero al carbono y además poseen superiores propiedades mecánicas y apariencia atractiva (Morcillo *et al.*, 2013). Son aceros suaves, con un contenido en carbono inferior al 0.2 % en peso, a los que se han adicionado principalmente Cu, Cr, P y Ni como elementos aleantes en una cantidad global no superior al 3-5 % en peso. Se establece la cinética del proceso de corrosión atmosférica a corto plazo y la relación con el tiempo de exposición y las características ambientales de cada sitio. Se discute sobre las correlaciones con las propiedades de los productos de corrosión.

## **PARTE EXPERIMENTAL**

Los estudios compilados consistieron básicamente en medir la tasa de corrosión de diferentes aceros a través de la pérdida de peso de láminas expuestas a la intemperie durante períodos de tiempo establecidos. La ubicación de las estaciones utilizadas en el periodo 1989 a 1998, las programaciones de exposición y las composiciones de los aceros han sido descritas en trabajos previos (Morcillo *et al.*, 1995; Jaén *et al.*, 1997; Jaén *et al.*, 2003) y se indican como MICAT 1 y MICAT 2. En el Cuadro 1 se resume los programas de exposición. Otras muestras de aceros al carbono, GG, se expusieron en periodos cortos en el 2002 (Jaén & Garibaldi, 2004) y las más recientes de un acero al carbono y dos aceros patinables convencionales (Jaén *et al.*, 2009; Jaén *et al.*, 2012), en el periodo 2007-2013 y se identifican como PWS. En todos los casos se llevó un control de datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, precipitación) a fin de poder clasificar los diferentes climas desde el punto de vista de agresividad. También se llevó el

registro de la tasa de deposición del dióxido de azufre y de cloruros.

Los productos de corrosión se caracterizaron por medio de espectroscopia Mössbauer, difracción de rayos X y espectroscopia infrarroja. La espectroscopia Mössbauer es especialmente adecuada para el estudio de la corrosión del acero debido a la capacidad de identificar y cuantificar las fases amorfas o no cristalinas de óxidos que frecuentemente se encuentran en la herrumbre. En algunos aceros se estudió la morfología de productos de corrosión en la superficie de los aceros por microscopía electrónica de barrido (SEM), técnica poco utilizada en estudios de corrosión atmosférica (Cindra *et al.*, 2007).

Cuadro 1. Programa de la exposición a sitios de corrosión atmosférica (Morcillo *et al.*, 1995; Jaén *et al.*, 1997; Jaén *et al.*, 2003; Jaén *et al.*, 2009; Jaén *et al.*, 2012).

<b>Código</b>	<b>Ubicación de la estación</b>	<b>Tipo de acero</b>	<b>Periodo de exposición</b>
MICAT 1-C	Colón		
MICAT 1-Ch	Chiriquí (UTP)		
MICAT 1-UP	Panamá (Campus Central UP)	SAE-1010	1989 - 1993
MICAT 1-V	Veraguas (UTP)		
MICAT 2A-UP	Panamá (Campus Central UP)	SAE-1020	1992 - 1996
MICAT 2B-UP	Panamá (Campus Central UP)	A-36	1996 - 1998
MICAT 2B-C	Colón		
GG	Panamá (Campus Central UP)	A-36	2002
PWS-T	Panamá (UTP-Tocumen)	A-36	
PWS-TA	Sherman Tierra Adentro	A-588	2007 - 2013
PWS-C	Sherman Costera	COR 420	
PWS-R	Sherman Rompeolas		

## **1 Tasas de corrosión**

### **1.1 Aceros al carbono**

Según la definición de la norma ISO 9223 (ISO, 1991), una forma de evaluar las categorías de corrosividad de las atmósferas consiste en la determinación de las tasas de corrosión para el conjunto de los metales después de la exposición de 1 año. Esta norma establece cinco categorías de corrosividad según el tiempo de humectación y la concentración de dióxido de azufre y cloruros. Las categorías C1, C2, C3, C4 y C5 se corresponden con las tasas de corrosión de muy bajo, bajo, medios, altos y muy altos, respectivamente. La estimación de la categoría de corrosividad de una atmósfera puede realizarse a partir de los datos de corrosión en el primer año de exposición o bien a partir de los datos ambientales de la propia atmósfera. Las características de los distintos sitios utilizados se resumen en el cuadro 2.

En la Figura 1 se muestra la variación en el tiempo de la tasa de corrosión de los aceros al carbono expuestos en las distintas estaciones a excepción de Sherman Rompeolas que se discute separadamente. Se observa que a medida que se eleva la corrosividad de la atmósfera, aumenta, por lo general, la tasa de corrosión de los aceros. La mayoría de atmósferas con relativamente bajos niveles de cloruro son de categoría de corrosividad C2, independientemente del tipo de acero. Es interesante observar que el cambio del microclima en la estación del Campus Central de la Universidad de Panamá, al ir de moderada contaminación por cloruros y sulfatos ( $S_1P_1$ ) a baja ( $S_0P_0$ ), resulta en una disminución de las tasas de corrosión para el periodo. Llama la atención los registros ligeramente altos que se obtienen para las tasas de corrosión en las muestras MICAT 2B-UP, que corresponden a un acero A-36.

La corrosión atmosférica de las muestras de aceros expuestos a la intemperie sigue un comportamiento parabólico. Las diferencias en la corrosividad de los aceros, y también la naturaleza de los productos de corrosión, se deben principalmente a las condiciones prevalentes al inicio de la exposición, al tipo de acero y las condiciones de exposición; particularmente el tiempo de humectación, la deposición de cloruros y el efecto de lavado de los contaminantes en la superficie metálica por las lluvias. Los aceros al carbono SAE-1010 dan lugar a corrosividades más bajas en las condiciones más benignas en ambientes  $S_0P_0 \tau_4$  y  $S_1P_0 \tau_4$ .

Cuadro 2. Resumen del comportamiento de los aceros al carbono en los diferentes tipos de atmósferas según la norma ISO 9223 (ISO, 1991).

Código	Clasificación ambiental	Corrosividad atmosférica
MICAT 1-C	S <sub>1</sub> P <sub>2</sub> τ <sub>5</sub>	C5
MICAT 1-Ch	S <sub>1</sub> P <sub>0</sub> τ <sub>4</sub>	C2
MICAT 1-UP	S <sub>1</sub> P <sub>1</sub> τ <sub>4</sub>	C3
MICAT 1-V	S <sub>1</sub> P <sub>1</sub> τ <sub>4</sub>	C2
MICAT 2A-UP	S <sub>1</sub> P <sub>1</sub> τ <sub>4</sub>	C2
MICAT 2B-UP	S <sub>1</sub> P <sub>1</sub> τ <sub>4</sub>	C2
MICAT 2B-C	S <sub>1</sub> P <sub>2</sub> τ <sub>5</sub>	C5
GG	S <sub>0</sub> P <sub>0</sub> τ <sub>4</sub>	C2
PWS-T	S <sub>1</sub> P <sub>0</sub> τ <sub>4</sub>	C3
PWS-TA	S <sub>1</sub> P <sub>0</sub> τ <sub>5</sub>	C4
PWS-C	S <sub>1</sub> P <sub>0</sub> τ <sub>5</sub>	C4
PWS-R	S <sub>3</sub> P <sub>0</sub> τ <sub>5</sub>	>C5

\*Para mayor detalle consultar las referencias originales (Morcillo *et al.*, 1995; Jaén *et al.*, 1997; Jaén *et al.*, 2003; Jaén *et al.*, 2009; Jaén *et al.*, 2012).

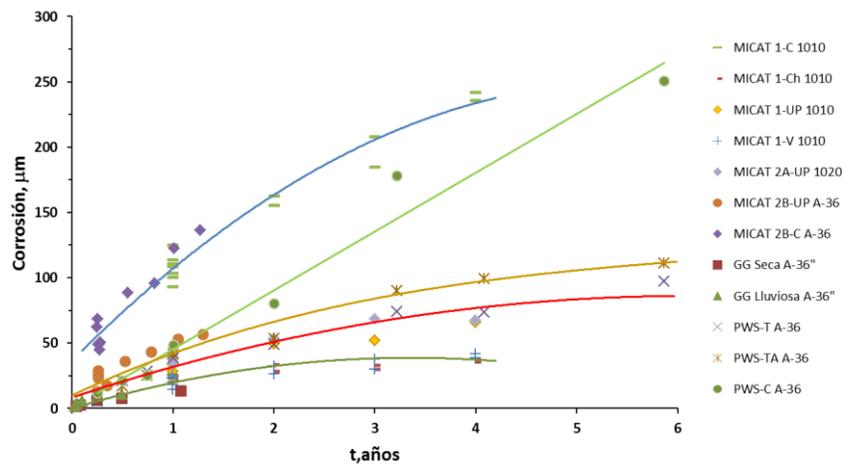


Fig. 1. Variación de la tasa de corrosión atmosférica para aceros al carbono como función del tiempo de exposición, construida a partir de los datos recopilados según la programación del Cuadro 1.

En la estación Sherman Costera se observa un comportamiento lineal para la evolución en el tiempo de la tasa de corrosión del acero A-36 (también se observa para otros tipos de aceros (Jaén *et al.*, 2012), desviándose del esperado comportamiento parabólico. A veces es difícil diferenciar entre los comportamientos parabólicos y lineales con exposiciones cortas de tiempo. En cualquier caso, la corrosividad observada C4 es consistente con la agresividad de la atmósfera en esta estación.

La estación Colón, utilizada para las muestras MICAT 1-C y MICAT 2B-C, se encontraba muy cerca de una planta termoeléctrica y una refinería. Presenta un ambiente marino y es una zona industrial, con niveles de contaminación por sulfatos que va de moderada a alta. Los aceros exhiben altas tasas de corrosión como resultado del efecto sinérgico de ambos contaminantes.

### 1.2 Aceros patinables

Las tasas de corrosión obtenidas en las diferentes estaciones de Sherman para los aceros patinables, en pruebas de cinco años de exposición, se presentan en la Figura 2. Se incluye, para efectos comparativos, los resultados obtenidos con el acero A-36 expuesto en el mismo periodo. Se comprueba que las tasas de corrosión son moderadas en las estaciones de Tocumen, Sherman Tierra Adentro y Sherman Costera. Las tasas de corrosión más altas registradas en la estación Sherman Rompeolas se correlaciona con la categoría más alta de cloruro transmitida por el aire. La deposición de SO<sub>2</sub> no es un parámetro importante en la agresividad de estos sitios de prueba, por tanto, la corrosión se vincula sólo a la tasa de deposición de cloruros.

La cantidad de Cl<sup>-</sup> depositado cambia ligeramente entre las estaciones de Sherman Tierra Adentro y Sherman Costera, con una tendencia a disminuir, junto con la disminución de la distancia de la costa, como se esperaba. En los aceros A-36 y A-588 hay una tendencia que muestra aumento de la tasa de corrosión que va desde el sitio de Tocumen, a los sitios de Sherman Tierra Adentro y Sherman Costera. Los sitios Sherman tienen niveles similares de tasas de deposición de cloruro (unos pocos mg Cl<sup>-</sup> m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>). En el caso de Sherman Rompeolas, la incidencia de cloruros es sustancial. Este es un sitio de exposición localizado en la base del rompeolas que separa la Bahía de Limón del

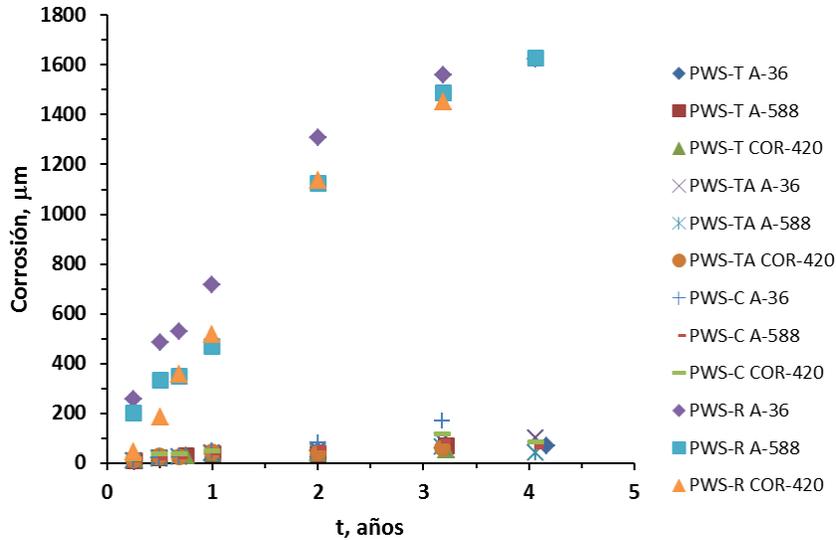


Fig. 2. Variación de la tasa de corrosión atmosférica para aceros patinables como función del tiempo de exposición, construida a partir de los datos recopilados según la programación del Cuadro 1. Se incluye los resultados de un acero A-36 para efectos de comparación.

Mar Caribe en Punta Toro en el Fuerte Sherman. En el lugar hay vientos que mantienen las olas chocando continuamente contra las piedras que sirven de rompeolas, lo que produce abundante sal en forma de rocío y una atmósfera altamente salina. La elevada agresividad de este sitio de exposición explica los elevados valores de las tasas de corrosión que se observa para todos los aceros.

Los datos cinéticos se pueden examinar usando la relación exponencial de Passano ( $P = A \cdot t^n$ ) (Passano, 1934) en los sitios de la exposición, donde P representa la cantidad corroída expresada como la penetración corroída ( $\mu\text{m}$ ) o como la pérdida de peso, t es el tiempo en años, A y n representan constantes empíricas. El valor de la constante de n está estrechamente correlacionado con el avance de la corrosión en los años siguientes. Los resultados se presentan en el Cuadro 3 para los distintos aceros en estas últimas pruebas.

Es interesante observar que en un gráfico bilogarítmico los valores de las intersecciones son muy similares entre la estación de Tocumen y la

estación de Sherman Tierra Adentro, con pocas diferencias significativas, si se considera el error estándar en la medición. El valor de  $n$ , determinado como la pendiente de la relación bilogarítmica, indica que la herrumbre en las muestras de los aceros A-36 no es protectora; más aún, en la estación Sherman Costera se observa una aceleración de la velocidad de corrosión con el tiempo. Por otra parte, los aceros patinables producen óxidos más protectores, aunque no lo suficiente como para constituirse en una barrera al paso de agentes agresivos. Por ello, las tasas de corrosión son sistemáticamente algo más bajas en estos aceros después de cinco años. Las tasas más altas de la corrosión que se registran en la estación de Sherman Rompeolas se correlacionan con la alta tasa de deposición de cloruros. En Sherman Rompeolas se observa una aceleración del proceso de difusión como resultado del desprendimiento de herrumbre por la erosión, descamación, formación de grietas, etc.

Cuadro 3. Resumen de los resultados del gráfico log-log de la corrosión en función del tiempo para las muestras PWS.

Parámetro log-log	Tocumen			Sherman Tierra Adentro			Sherman Costera			Sherman Rompeolas		
	A36	A588	COR420	A36	A588	COR420	A36	A588	COR420	A36	A588	COR420
<b>A</b>	28.2	27.6	33.0	31.2	28.7	34.2	44.4	33.2	44.4	697.6	545.6	427.0
<b>n</b>	0.79	0.64	0.46	0.83	0.59	0.62	1.02	0.59	0.68	0.64	0.78	1.36

## 2 Productos de corrosión

Los productos de corrosión se identificaron utilizando principalmente la espectroscopia Mössbauer a temperatura ambiente y baja temperatura (80 K) medidas de, difracción de rayos X en polvo y FTIR. En la mayor parte de las muestras,  $\gamma$ -FeOOH y  $\alpha$ -FeOOH fueron los principales constituyentes. También se identificaron magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), maghemita ( $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y akaganeita ( $\beta$ -FeOOH).

La dispersión que se observa en la naturaleza y cantidades de los productos de corrosión es muy grande, y es algo difícil correlacionar con el tipo de acero y la corrosividad. No obstante, algunas tendencias generales son claras. Hay una fuerte correlación entre composiciones

de óxido formadas en dependencia de las condiciones de exposición atmosférica, en particular el tiempo de humectación, la deposición de cloruro y el efecto de lavado de los contaminantes sobre la superficie del metal por la lluvia.

Las fases predominantes después de una exposición de periodos muy cortos, de hasta unos pocos meses, son oxihidróxidos férricos amorfos e hidratados y una mezcla de lepidocrocita y goethita. Además, los espectros de FTIR muestran una banda fuerte y ancha que se puede atribuir a la flexión Fe-OH en un amorfo del compuesto feroxihita ( $\delta$ -FeOOH) (Jaén *et al.*, 2004; Jaén *et al.*, 2012). En periodos cortos se obtiene lepidocrocita, goethita y magnetita. Lepidocrocita es un compuesto semiconductor, electroquímicamente activo y conocido por no tener propiedades protectoras. La goethita es un compuesto termodinámicamente estable que muestra buenas propiedades de protección, especialmente si es en una forma de partículas muy finas (Kamimura *et al.*, 2006). En general, la resistencia a la corrosión se incrementa con la cantidad de goethita siguiendo una conducta de saturación (Jaén *et al.*, 1997). Se observa que la lepidocrocita se transforma en goethita al transcurrir el tiempo y las cantidades de goethita crecen con el tiempo de exposición. La presencia de estas partículas finas de goethita se identifica con relativa facilidad usando espectroscopía Mössbauer a baja temperatura y la denominamos goethita superparamagnética por sus propiedades. Este constituyente es el principal responsable de la formación de una capa compacta de productos de corrosión que disminuye en gran medida la corrosión en los aceros patinables. La magnetita es un buen conductor eléctrico la magnetita, se forma dentro de las capas de óxido si se logra una alternancia regular de ciclos atmosféricos húmedo-secos. Puede observarse luego de exposiciones cortas a la atmósfera como magnetita no estequiométrica ( $\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ) y/o como el compuesto aislante maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), a las que nos referimos frecuentemente como fases de espinela. Estas fases se transforman en el tiempo en otros productos de corrosión. El papel de la magnetita y las fases de espinela es variado. La magnetita es un buen conductor eléctrico que participa en las reacciones de reducción catódica del oxígeno, incrementando las tasas de corrosión del metal base [15]. Por otra parte, su estabilidad termodinámica [16], su alta compacidad y pequeño volumen molar le pueden conferir propiedades de protección.

La akaganeita ( $\beta$ -FeOOH) y la magnetita se identifican como componentes prominentes obtenidos en las condiciones muy agresivas de la estación Sherman Rompeolas. La formación de akaganeita y magnetita presumiblemente se favorece en presencia de  $\text{Cl}^-$ , por la transformación de lepidocrocita y otras especies férricas de FeOOH. Es un producto de la corrosión típico de las zonas costeras que tienen altas concentraciones de cloruro debido a los aerosoles marinos. Se observa la formación de akaganeita cuando los cloruros se ocluyen en la herrumbre, en las partes internas exfoliadas de los aceros. La formación de akaganeita no se observa cuando por lavado no se alcanza los niveles críticos de cloruros para su formación. En estas muestras, la magnetita se forma por las condiciones reductoras que prevalecen en el interior del acero exfoliado, en donde la difusión del oxígeno está limitada.

En las etapas iniciales de la corrosión atmosférica, la formación de  $\gamma$ -FeOOH es predominante, pero se convierte en goethita. Puede haber condiciones favorables para la formación de otros productos de la corrosión, tales como maghemita. La tasa de corrosión de un acero en cualquier entorno depende, entre otros factores, de la composición de la capa de óxido, que puede contener  $\alpha$ -FeOOH,  $\beta$ -FeOOH,  $\gamma$ -FeOOH, magnetita y óxidos amorfos. Una composición favorable de los productos de corrosión se puede expresar por el índice de su capacidad de protección. Se ha demostrado experimentalmente (Kamimura *et al.*, 2006) que una capa de productos de corrosión formados sobre acero en diferentes lugares muestra una alta protección contra la corrosión, si por ejemplo el índice ( $\alpha_m/\gamma^*$ ), en donde  $\alpha_m$  y  $\gamma^*$  son las cantidades de  $\alpha$ -FeOOH cristalino, y el total de  $\gamma$ -FeOOH,  $\beta$ -FeOOH y los óxidos tipo espinela, respectivamente. Básicamente lo que hace este índice de habilidad protectora de las herrumbres es comparar las proporciones de los óxidos activos electroquímicamente, con aquellos inactivos.

Tal cual lo indica Cook (2005), el componente que se puede identificar en los patrones de XRD, en los que se basa el índice de protección, es la goethita magnética; es decir, goethita de tamaño de partículas  $> 15$  nm. Dado que en nuestros experimentos las fracciones de los componentes se obtienen de los resultados Mössbauer, que es capaz de diferenciar estas fases, se utiliza un valor de dos (Cook, 2005) para que

el óxido sea protector a la relación ( $\alpha_m/\gamma^*$ ), donde  $\alpha_m$  y  $\gamma^*$  son  $\gamma$ -FeOOH,  $\beta$ -FeOOH y óxido de hierro de tipo espinela, respectivamente. Por lo tanto, el producto de corrosión obtenido para los aceros al carbón y patinables, después de exposiciones cortas a la atmósfera en condiciones suaves a moderadas, no debe ser protector; mientras que el óxido obtenido en Sherman-Rompeolas es activo, por lo que se exhiben altas tasas de corrosión.

## 2 Morfología de los productos de corrosión

En los diversos trabajos la información sobre la naturaleza de los productos de corrosión que se obtiene con Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia Mössbauer y la difracción de rayos X, se complementa con el examen de la morfología de la capa productos de corrosión formados sobre aceros al carbono y aceros patinables expuestos a la intemperie. Las fases que se encuentran con mayor frecuencia lepidocrocita  $\gamma$ -FeOOH, goethita  $\alpha$ -FeOOH y magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  muestran estructuras típicas. Por ejemplo, la lepidocrocita aparece como pequeños glóbulos cristalinos (cristales arenosos) o como finas láminas (estructuras floridas), como se muestra en las Figuras 3, 4 y 5. La goethita se muestra en estructuras globulares asemejando bolas de algodón (Figura 3), o como finas agujas interconectadas por formaciones como nidos o como estructuras aciculares para la goethita cristalina (Figuras 4 y 5). La magnetita se ve como regiones planas y oscuras o como microestructuras cúbicas (Figura 6). También se observan otras fases como la akaganeita  $\beta$ -FeOOH como cristales de forma tubular formando estructuras con apariencia de bolas de algodón, que se presenta en la Figura 6. Es interesante que en algunas probetas expuestas en Sherman Rompeolas se puede observar incrustaciones de cristales de sal marina (Figura 7) lo que resulta en altos niveles de cloruros y tasas de corrosión extremas.

## CONCLUSIONES

El comportamiento a la corrosión atmosférica de muestras de acero al carbono A-36 y aceros patinables A-588 y COR 420 expuestas al clima tropical húmedo en diferentes sitios en Panamá se puede explicar

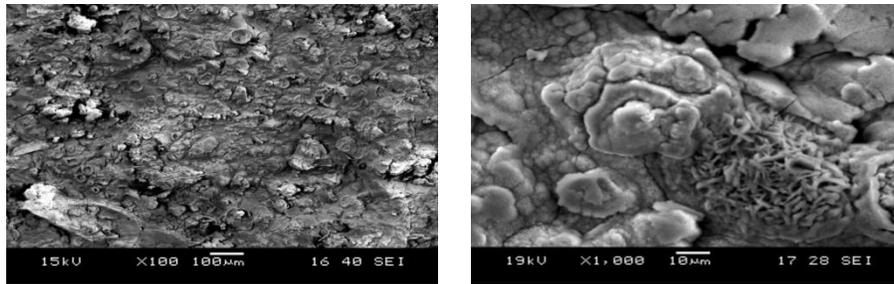


Fig. 3. Fotomicrografías SEM de los productos de corrosión de un acero A-588 expuesto en la estación de Tocumen por 3 meses. Se logra distinguir la estructura florida de lepidocrocita y la estructura globular (“bolas de algodón”) de la goethita.

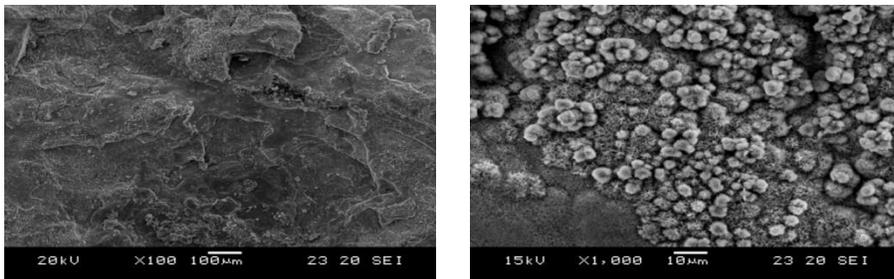


Fig. 4. Fotomicrografías SEM de los productos de corrosión de un acero COR-420 expuesto en la estación de Sherman Rompeolas por 3 meses. Se observan finas láminas de lepidocrocita y una estructura acicular fina de goethita.

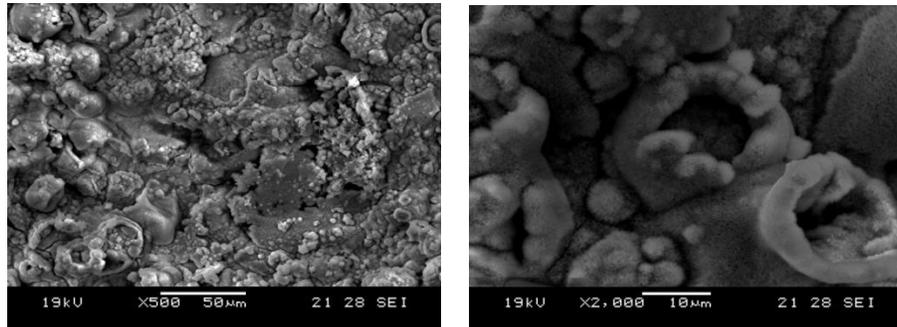


Fig. 5. Fotomicrografías SEM de los productos de corrosión de un acero A-36 expuesto en la estación de Tocumen por 3 meses. Se observan cristales arenosos de lepidocrocita y goethita.

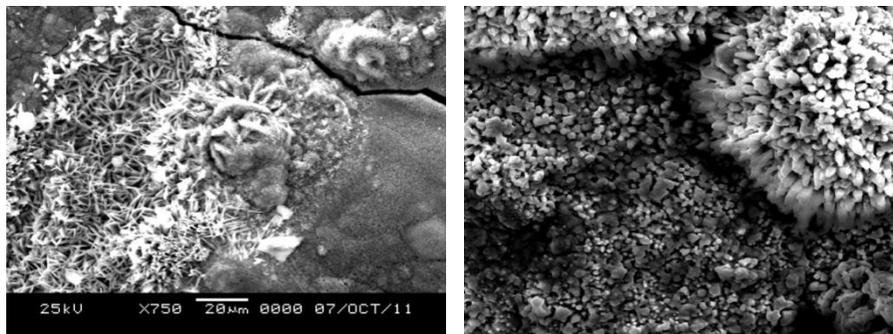


Fig. 6. Fotomicrografías SEM de los productos de corrosión de un acero A-588 expuesto (a) en la estación de Sherman Tierra Adentro por 3 años, finas láminas de lepidocrocita y goethita globular; y (b) en la estación de Sherman Rompeolas por 3 años, en donde se ven bolas de algodón de akaganeita y cristales con morfología típica de magnetita.

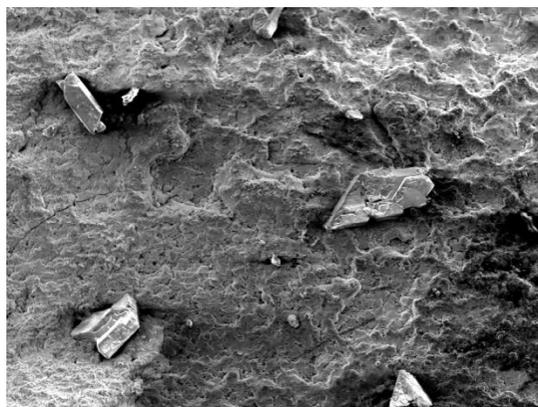


Fig. 7. Fotomicrografía SEM del producto de corrosión de un acero A-588 expuesto en la estación de Sherman Rompeolas por 3 años mostrando con claridad incrustaciones de cristales de sal marina.

por la influencia que ejercen los contaminantes atmosféricos y los parámetros meteorológicos.

Las fases predominantes después de exposiciones de corta duración son oxihidróxidos amorfos o cristalinos tales como lepidocrocita ( $\gamma$ -FeOOH) y goethita ( $\alpha$ -FeOOH). También se encuentra maghemita ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). La Akaganeita ( $\beta$ -FeOOH) se identificó como componente prominente en las condiciones más agresivas, con cantidades elevadas de cloruro, y ocluido dentro de la herrumbre.

Se puede correlacionar las composiciones de las capas de herrumbre formadas en dependencia de las condiciones de exposición atmosférica, en particular el tiempo de humectación, la deposición de cloruro y el efecto de lavado de los contaminantes sobre la superficie del metal.

El óxido obtenido después de exposiciones cortas de hasta cinco años no es protector, en las condiciones meteorológicas y de contaminación suaves a moderadas, pero activo en sitio Sherman-Rompeolas por sus condiciones agresivas. Esto implica que la pátina protectora en los aceros patinables todavía no se ha consolidado.

## REFERENCIAS

Alexander, A.L., B.W. Forgeson, H.W. Mumdt, C.R. Southwell & S.J. Thompson, S.J. 1957. NRL Report 4929 Corrosion of Metals in Tropical Environments; Part-1 Test Methods Used and Result Obtained for Pure Metals and a Structural Steel; Naval Research Laboratory, Washington. D.C.

Cindra-Fonseca, M.P., I.N. Bastos, A. Caytuero & E.M. Baggio-Saitovitch. 2007. Rust formed on cannons of XVIII century under two environment conditions, Corros. Sci. 49: 1949-1962.

Cook D. 2005. Spectroscopic identification of protective and non-protective corrosion coatings on steel structures in marine environments. Corros. Sci. 47: 2550-2570.

Hoerle, S., F. Mazaudier, Ph. Dillmann & G. Santarini. 2004. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. II. Mechanistic modelling of wet-dry cycles, Corros. Sci. 46: 1431-1465.

ISO 9223. 1991. Corrosion of Metals and Alloys. Clasiffication of Corrosivity of Atmospheres, International Standard Organization, Geneve, Switzerland.

Jaén, J.A. & L. de Araque. 2006. Caracterización de los Productos de Corrosión de Aceros al Carbono en el Clima Tropical Marino de Sherman (Provincia de Colón, Panamá), *Tecnociencia* 8(1), 49-63.

Jaén, J.A. & G. Garibaldi. 2004. Estudio del Efecto Estacional sobre la Corrosión Atmosférica Inicial de Aceros de Bajo Carbono en la Ciudad de Panamá, *Tecnociencia* 6(2): 137-152.

Jaén, J.A., A. Muñoz, J. Justavino & C. Hernández. 2009. Characterization of initial atmospheric corrosion of conventional weathering steels and a mild steel in a tropical atmosphere, *Hyperfine Interac.* 192(1): 51-59.

Jaén, J.A., J. Iglesias & C. Hernández. 2012. Analysis of Short-Term Steel Corrosion Products Formed in Tropical Marine Environments of Panama, *International Journal of Corrosion* Vol. 2012, Article ID 162729, 11 pages. doi:10.1155/2012/162729.

Jaén, J.A., M.S. de Villalaz, L. de Araque & A. de Bósquez, 1997. Kinetics and Structural Studies of the Atmospheric Corrosion of Carbon Steels in Panama, *Hyperfine Interact.* 110: 93-99.

Jaén, J.A., M.S. de Villalaz, L. de Araque, C. Hernández, C & A. Bósquez. 2003. Study of the Corrosion Products Formed on Carbon Steels in the Tropical Atmosphere of Panamá, *Rev. Metal. Madrid* 39: 32-37.

Kamimura, T., S. Hara, H. Miyuki, M. Yamashita & H. Uchida. 2006. Composition and protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed to various environments, *Corros. Sci.* 48: 2799-2812.

Morcillo, M., B. Chico, I. Díaz, H. Cano & D. de la Fuente. 2013. Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review. *Corros. Sci.* 77: 6-24.

Morcillo, M., E. Almeida, B. Rosales, J., Uruchurtu & M. Marrocos. 1998. Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica. Parte I—Mapas de Iberoamérica de Corrosividad Atmosférica (Proyecto MICAT, XV.1/CYTED), CYTED, Madrid, Spain.

Morcillo, M. 1995. "Atmospheric corrosion in Ibero-america: the MICAT project," en *Atmospheric Corrosion*, W. W. Kirk and H. H. Lawson, Eds., pp. 257–275, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa, USA, ASTM STP 1239.

Passano, RF. 1934. The Harmony of Outdoors Weathering Steels Proc. of the Symp. on the Outdoor Weathering of Metals and Metallic Coatings. Philadelphia. Washington Regional Meeting of ASTM, Philadelphia.

Southwell, C.R., B.W. Forgeson & A.L. Alexander; A.L. 1957. NRL Report 5002, Corrosion of Metals in Tropical Environments. Part-2 Atmospheric Corrosion of ten Structural Steels; Naval Research Laboratory, Washington D.C.

*Recibido mayo de 2015, aceptado noviembre de 2015.*