



CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN DE ACEROS AL CARBONO EN EL CLIMA TROPICAL MARINO DE SHERMAN (PROVINCIA DE COLÓN, PANAMÁ)

Juan A. Jaén¹ y Lilibeth de Araque²

¹ Depto. de Química Física, CITEN, Lab. N° 105, Edificio de Laboratorios Científicos-VIP, Universidad de Panamá, jjjaen@ancon.up.ac.pa

² Laboratorio de Química y Física Aplicada, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

RESUMEN

Se estudian los productos de corrosión de un acero al carbono expuesto a la intemperie en el ambiente tropical marino de Fuerte Sherman, en la costa Caribe de Panamá, y se comparan con aquellos obtenidos en un sitio urbano en ciudad de Panamá. La espectroscopia de infrarrojo de transformada de Fourier, la difracción de rayos-X y la espectroscopia Mössbauer de transmisión mostraron que la herrumbre obtenida en Sherman consistía de akaganeita (β -FeOOH), goethita (α -FeOOH), lepidocrocita (γ -FeOOH), magnetita no estequiométrica ($\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$) y maghemita (γ -Fe₂O₃). Todas estas fases, excepto akaganeita, también se detectan en Panamá. Las cantidades importantes de magnetita/maghemita y akaganeita en Sherman se deben a la alta contaminación de cloruros, y se pueden relacionar a altas tasas de corrosión. Hay importantes diferencias entre las dos caras de paneles de acero expuestos en Sherman. La cara que mira al cielo tiene partículas de mayor tamaño, en la que la goethita magnética es una fase predominante, hay una importante contribución de maghemita. También se observa la presencia de lepidocrocita, goethita en nanopartículas y la akaganeita. La cara que mira al suelo tiene menor tamaño de partículas, y contiene magnetita, lepidocrocita y akaganeita. El producto oscuro en las capas internas (partes centrales de los paneles) consistió, principalmente, de magnetita no estequiométrica, akaganeita y goethita en una amplia distribución de tamaños de partículas.

PALABRAS CLAVES

Corrosión atmosférica, ambiente tropical marino, acero al carbono, productos de corrosión, akaganeita, magnetita, maghemita.

ABSTRACT

The corrosion products formed on carbon steel exposed to the open atmosphere in the tropical marine environment of Fort Sherman, Caribbean coast of Panama, were studied and compared to those obtained in an urban test site in Panama City. X-ray powder diffraction, Fourier Transform Infrared spectroscopy and transmission Mössbauer spectroscopy showed that Sherman rust was akaganeite (β -FeOOH), goethite (α -FeOOH), lepidocrocite (γ -FeOOH), non-stoichiometric magnetite ($\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$) and maghemite (γ - Fe_2O_3). All of them, but akaganeite were detected in Panama. The important amounts of magnetite/maghemite and akaganeite in Sherman are due to the high chloride contamination and could be related to high corrosion rates. There are important differences between both sides of Sherman corroded steel panels. The skyward face has larger particle sizes, with magnetic goethite as a predominant phase, with an important contribution from maghemite. Lepidocrocite, nanoparticles of goethite and akaganeite were also present. The particle size was smaller for the earthward face, which also contained magnetite, lepidocrocite and akaganeite. The dark corrosion product in the inner layer (central parts of the panels) consisted, mainly, of non-stoichiometric magnetite, akaganeite and goethite in large particle size distribution.

KEYWORDS

Atmospheric corrosion, tropical marine environment, carbon steel, corrosion products, akaganeite, magnetite, maghemite.

INTRODUCCIÓN

El estudio sistemático de los productos de corrosión es de enorme interés toda vez que nos permite detectar los mecanismos de transformación y evaluar su efectividad protectora. Es ampliamente conocido que en el caso de la corrosión atmosférica de los aceros se forma una de las fases polimórficas de los oxihidróxidos férricos, α -, β -, γ -, δ -FeOOH, óxidos como Fe_3O_4 y γ - Fe_2O_3 , así como también herrumbres amorfas. Todas estas fases, con excepción del compuesto β -FeOOH (akaganeita), han sido observadas en la herrumbre de aceros al carbono expuestos a la intemperie en distintos lugares de Panamá (Morcillo et al., 1999; Sánchez de Villalaz, Foti de Bósquez & Jaén, 2000; Jaén & Fernández, 1989; Jaén et al., 1997; Jaén et al. 2001; González et al., 1993; Jaén & Garibaldi 2004).

La akaganeita es típica de áreas costeras (Singh et al., 1985; Rincón et al., 1997; Santana Rodríguez et al., 2002; Cook et al., 1998) que tienen altas concentraciones de cloruros por influencia de los aerosoles

marinos. Se conoce que la formación de β -FeOOH requiere la presencia de iones cloruros, que pueden incorporarse a la estructura en solución sólida en cantidades importantes. Se presume que la akaganeita se forma en lugar de la goethita α -FeOOH y su presencia se puede conectar con la formación de Fe_3O_4 en la herrumbre (Ishikawa et al., 1998), resultando en altas velocidades de corrosión.

En este estudio se utilizó espectroscopia de infrarrojo de transformada de Fourier (FT-IR), la difracción de rayos-X (DRX) en conjunto con la espectroscopia Mössbauer de transmisión (EM) para caracterizar los productos de corrosión formados sobre acero al carbono luego de una exposición de un año a la atmósfera en una estación localizada en Sherman (Fuerte Sherman) en la provincia de Colón, República de Panamá. El interés en estudiar la corrosión del acero en esta localidad en particular se debe a que en esta estación se registran los niveles más altos de cloruros en todo el país. De esta manera, al comparar los resultados con los obtenidos en una estación urbana localizada en la ciudad de Panamá, se puede concluir sobre la influencia de los cloruros y otros factores críticos que afectan el desempeño de los aceros en los ambientes marinos del trópico panameño.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la realización de este trabajo se usó un sitio de exposición localizado en la base del rompeolas que separa la Bahía de Limón del Mar Caribe en Punta Toro en el Fuerte Sherman, que se conoce como Estación Rompeolas en el Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá. Las coordenadas geográficas son $9^\circ 22' 21''$ de latitud norte y $79^\circ 56' 48''$ de longitud oeste. 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 velocidad de deposición natural de cloruros, durante el periodo de exposición (año 2002), varía entre $197 \text{ mg/m}^2\text{día}$ a $8350 \text{ mg/m}^2\text{día}$; siendo los periodos más lluviosos los de menor deposición de cloruros. La deposición de dióxido de azufre también era muy variable a lo largo del año, con valores extremos que variaban entre $11 \text{ mg/m}^2\text{día}$ y $132 \text{ mg/m}^2\text{día}$. Según los promedios anuales, la contaminación en esta estación se puede clasificar como P_1S_3 (ISO 9223, 2001), aunque en la época de seca se supera con creces el valor límite de $1500 \text{ mg/m}^2\text{día}$ dado por la norma.

Para efectos de comparación, se expusieron al ambiente probetas de ensayo en una estación de menor contaminación salina, situada en el campus central de la Universidad de Panamá. Se encuentra a 29 metros sobre el nivel del mar, latitud 8° 58' 57'' norte y longitud 79° 31' 52'' oeste. Esta estación tiene reportados unos niveles contaminación P_1S_1 (Morcillo et al., 1999; Sánchez de Villalaz, Foti de Bósquez & Jaén 2000), aunque durante el periodo de exposición la contaminación bajó a niveles P_0S_0 (Jaén & Garibaldi 2004).

Se usó probetas de acero negro, ASTM A-36, de bajo contenido de carbono (0.17 % de C). Las muestras metálicas, de dimensiones 4" x 12" x 1/16" se prepararon según la norma ASTM G1-90 y se colocaron a un ángulo de exposición de 30° en la Estación Rompeolas y 45° en la Estación de Panamá, atendiendo las normas ISO/DIS 8565 y ISO 2810. Los productos de corrosión se separaron mecánicamente al cabo de un año de exposición. La herrumbre no adherente se obtuvo mediante golpes a las probetas, en tanto que la herrumbre adherente se separó con una espátula de acero inoxidable. Los óxidos se trituraron en un mortero de ágata y se mezclaron hasta homogenizar. Se caracterizaron mediante difracción de rayos-X para muestras en polvo, análisis infrarrojo de transformada de Fourier y espectroscopia Mössbauer. Los ensayos de difracción de rayos-X se realizaron en un difractómetro Rigaku, modelo RTP 300 RC, en la Dirección General de Recursos Minerales del Ministerio de Comercio e Industrias. Se usó un ánodo de Cu, 40 kV, 80 mA y velocidad de barrido de 2 °/min. Algunas muestras se mezclaron con vidrio por la poca cantidad de espécimen proporcionado. El análisis de fases se realizó usando las tarjetas del Joint Committee on Powder Pattern Standards (JCPDS). Los espectros IR se obtuvieron de pastillas en KBr usando un espectrómetro de transformada de Fourier Perkin Elmer modelo RXI. Se usó el programa proporcionado por los fabricantes y el programa KnowIt All (<http://www.bio-rad.com>) para procesar los espectros. Los espectros Mössbauer se obtuvieron con un espectrómetro convencional de aceleración constante, con una fuente de $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$ de 20 mCi. Los desplazamientos isoméricos se reportan respecto al centroide del $\alpha\text{-Fe}$. Las evaluaciones se realizaron con el programa Recoil de Lagarec y Rancourt (<http://www.physics.uottawa.ca/~recoil/>), utilizando líneas de Voigt para las distribuciones de parámetros hiperfinos (Rancourt & Ping 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al cabo de un año, las muestras expuestas en Sherman tenían gruesas capas de productos de corrosión de color chocolate oscuro que cubrían completamente el sustrato de acero; de hecho, el acero se había corroído totalmente y la probeta se partía con relativa facilidad. La cara que miraba al cielo tenía numerosas ampollas y secciones se desprendían fácilmente, dejando expuesta una herrumbre muy oscura y adherente en la parte central de la probeta. Los productos de corrosión en la cara que miraba al piso eran de aspecto más uniforme y muy adherentes. Por su parte, la corrosión en las probetas de Panamá fue uniforme, obteniéndose herrumbres bastante adherentes de color chocolate naranja.

Los análisis de fases por difracción de rayos-X indican que los compuestos cristalinos mayoritarios en las herrumbres provenientes de los aceros expuestos en la estación de Panamá son la goethita y la lepidocrocita. Aparecen además reflexiones de menor intensidad atribuibles a la magnetita o a la maghemita. Todos estos productos se han obtenido en estudios previos en paneles de acero SAE 1010 y 1020 (Jaén et al., 1997) y en aceros A-36 (Jaén et al., 2001); pero en este caso, se observan diferencias en la composición de la herrumbre no adherente y la adherente, tal como se aprecia en la Figura 1. Se verifica que las cantidades de lepidocrocita son mayores en la herrumbre no adherente, con picos más afilados. La goethita, por su parte, tiene reflexiones más afiladas y de mayor intensidad relativa en la herrumbre no adherente. Podemos inferir que en efecto las primeras herrumbres son más ricas en lepidocrocita, que mediante conocidos mecanismos de disolución-precipitación se transforma en goethita (Haces et al., 1981). Se estima, por la anchura de los picos, que ambas fases tienen menor tamaño de grano en la herrumbre adherente. También se observan reflexiones de menor intensidad atribuibles a la magnetita (y/o maghemita), en mayor proporción en la herrumbre adherente. No se observan las reflexiones de la akaganeita.

En los difractogramas de muestras expuestas en atmósfera marina de Sherman, que se muestran en la Figura 2, claramente se detectan las reflexiones de la akaganeita en la herrumbre obtenida de la cara que mira al cielo y en las capas internas (parte central de la probeta).

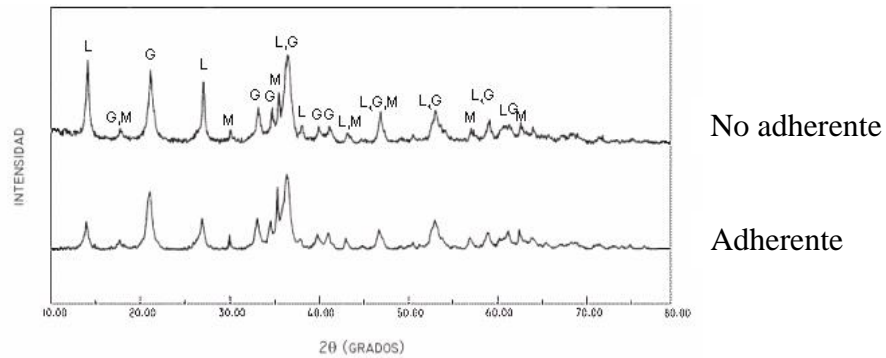


Fig. 1. Difractogramas de rayos-X obtenidos de las herrumbres de las probetas de acero expuestas en Panamá. (A=akaganeita, G=goethita, L=lepidocrocita, M=magnetita/maghemita).

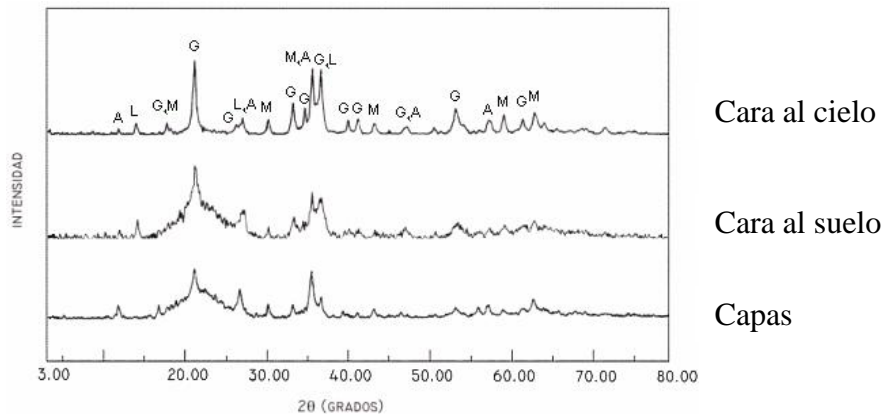


Fig. 2. Difractogramas de rayos-X obtenidos de las herrumbres de las probetas de acero expuestas en Sherman. (A=akaganeita, G=goethita, L=lepidocrocita, M=magnetita/maghemita).

Este resultado no sorprende toda vez que en esta estación se superan los niveles críticos de 14 -16 mg/cm² de concentración de cloruro para la formación de akaganeita (Cook et al., 1998, 2000; Santana Rodríguez et al., 2002). Llama la atención la ocurrencia de cantidades importantes de magnetita/maghemita en estas muestras, siendo una fase predominante en herrumbre de las partes centrales de las probetas, donde la difusión de oxígeno estaba limitada y eran más favorables las condiciones reductoras. En muestras de herrumbre provenientes del ambiente marino de Sherman se logra identificar goethita y pocas cantidades de lepidocrocita. Estas herrumbres contienen más magnetita que aquellas de Panamá, presumiblemente favorecida por la akaganeita formada en presencia de Cl⁻ y por la transformación de lepidocrocita y otras especies férricas de FeOOH (Ishikawa 1998). Estas fases de magnetita en herrumbres son más reactivas que la magnetita ordinaria (Singh et al., 1985) y son más abundantes en herrumbre de capas gruesas. Se describen mejor como magnetita no estequiométrica, Fe_{3-x}O₄.

Los resultados de las mediciones FT-IR se resumen en las Figuras 3 y 4. En los espectros de FT-IR de la herrumbre obtenida en la estación de Panamá se encontraron las bandas características de la goethita a 884 y 796 cm⁻¹, y de la lepidocrocita a 1020 y 744 cm⁻¹. Se encuentra la misma tendencia observada en los difractogramas de Difracción de Rayos-X, por ejemplo, la banda de flexión fuera de plano del OH es de mayor intensidad en la herrumbre menos adherente.

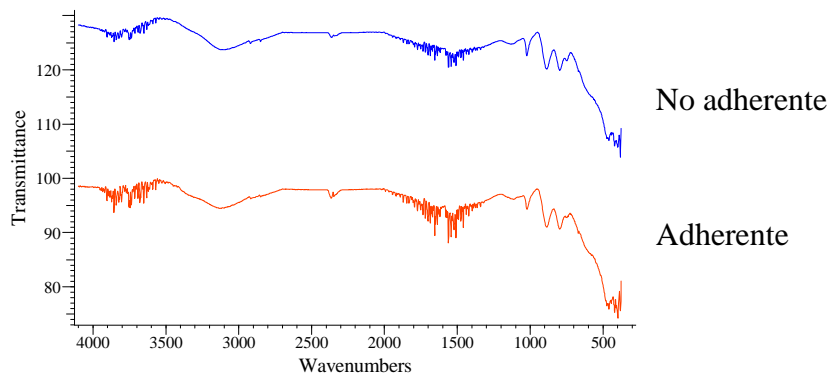


Fig. 3. Espectros Infrarrojo de las herrumbres de las probetas de acero expuestas en Panamá.

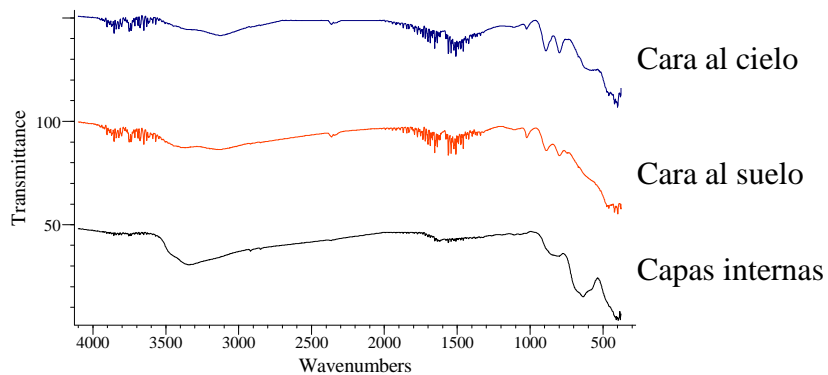


Fig. 4. Espectros Infrarrojo de las herrumbres de las probetas de acero expuestas en Sherman.

La presencia de magnetita, encontrada por Difracción de Rayos-X, no puede ser distinguida con facilidad por espectroscopia IR debido a la superposición de sus bandas con los de la lepidocrocita en la zona entre 350 cm^{-1} y 650 cm^{-1} . La Figura 4 muestra los espectros FT-IR de herrumbres obtenidas en la estación marina de Sherman. En las herrumbres de las caras que miran al cielo y al suelo se observan las bandas de deformación de la goethita a 890 cm^{-1} y a 798 cm^{-1} , sugiriendo una mejor cristalinidad de esta fase en las muestras marinas (Schwertman & Cornell 1996). También es visible una banda débil a 1022 cm^{-1} que corresponde a lepidocrocita. El hombro que se observa cerca de 600 cm^{-1} , en particular en la muestra que mira al cielo, se atribuye a magnetita. El espectro de muestras de la parte central de las probetas corroídas poseen bandas de absorción muy anchas a 824 , 680 y 636 cm^{-1} , que se asignan a akaganeita de aparente baja cristalinidad. La absorción centrada en 3340 cm^{-1} se puede relacionar con las vibraciones de alargamiento de OH de la akaganeita. En esta muestra es bastante clara la contribución de la magnetita, como lo indican las fuertes bandas de absorción a 580 y 408 cm^{-1} .

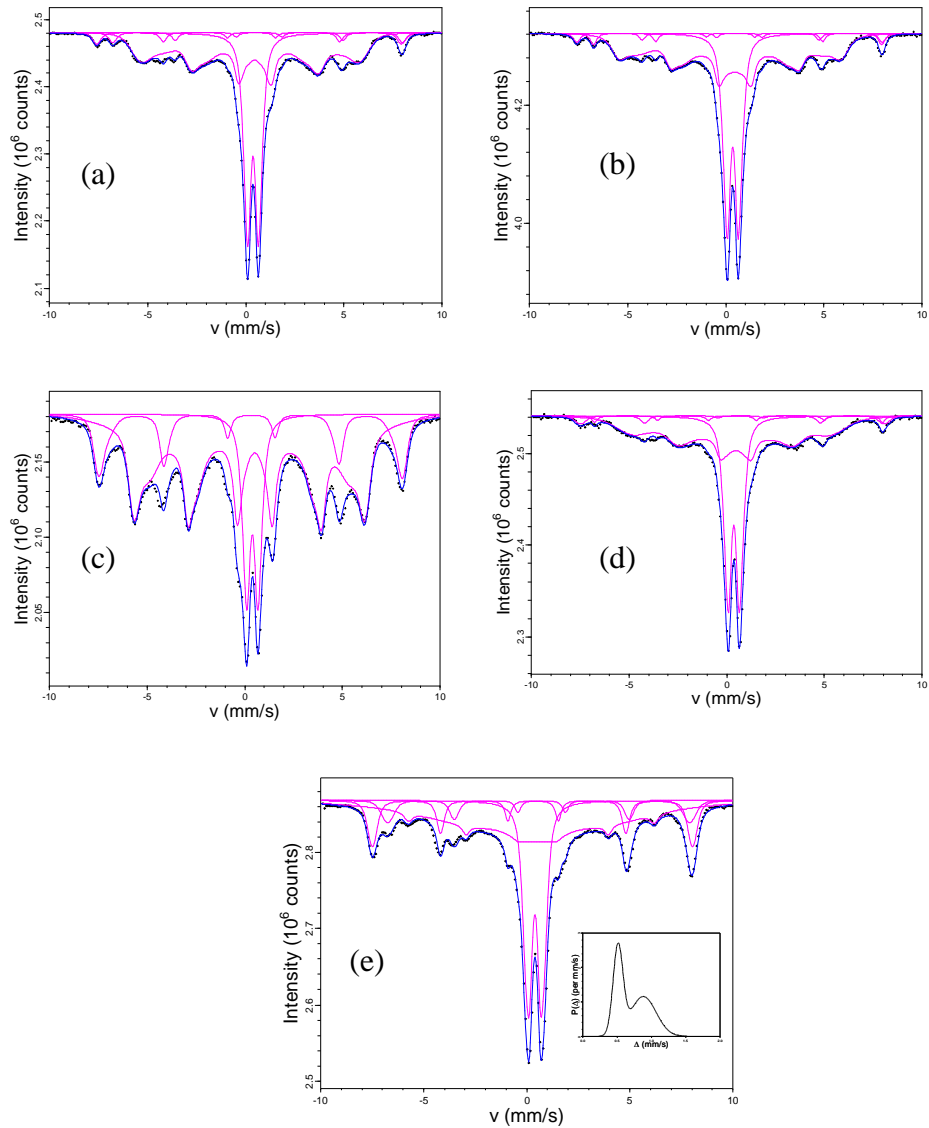


Fig. 5. Espectros Mössbauer a temperatura ambiente de muestras de Panamá (a) herrumbre no adherente, (b) herrumbre adherente, y de Sherman (c) cara al cielo, (d) cara al suelo y (e) capas internas de la probeta (el inserto corresponde a la distribución de cuádrupolos del doblete central en esta muestra).

Cuadro 1. Resultados Mössbauer a temperatura ambiente de las herrumbres estudiadas.

Muestra	Sitio	$\langle CS \rangle$ mm/s	$\langle H \rangle$ T	$\sigma_{ H }$ T	$\langle \varepsilon \rangle$ mm/s	$\langle \Delta \rangle$ mm/s	$\sigma_{ \Delta }$ mm/s	A %	χ^2_{red}
Panamá no adherente	QSD1	0.372	-	-	-	0.600	0.201	36.0	1.56
	HFD1	0.647	45.8	0.7	-0.039	-	-	3.9	
	HFD2	0.231	48.1	0.8	-0.065	-	-	4.7	
	HFD3	0.346	25.6	10.3	-0.121	-	-	55.4	
Panamá adherente	QSD1	0.359	-	-	-	0.634	0.225	35.9	1.14
	HFD1	0.647	45.5	0.5	-0.042	-	-	4.0	
	HFD2	0.221	48.3	0.6	-0.028	-	-	3.4	
	HFD3	0.345	24.2	11.2	-0.123	-	-	56.7	
Sherman cara al cielo	QSD1	0.390	-	-	-	0.624	0.191	17.0	2.43
	HFD2	0.325	47.5	1.8	-0.016	-	-	16.6	
	HFD3	0.379	31.6	10.2	-0.136	-	-	66.4	
Sherman cara al suelo	QSD1	0.367	-	-	-	0.641	0.221	38.6	0.97
	HFD1	0.666	45.7	0.5	-0.059	-	-	2.3	
	HFD2	0.295	48.2	1.3	-0.005	-	-	4.8	
	HFD3	0.355	23.2	11.4	-0.120	-	-	54.3	
Sherman parte central	QSD1	0.397	-	-	-	0.711	0.235	30.3	2.60
	HFD1	0.651	45.4	1.5	-0.073	-	-	9.0	
	HFD2	0.295	48.1	0.9	-0.017	-	-	14.3	
	HFD3	0.363	29.6	18.7	-0.140	-	-	46.4	

$\langle CS \rangle$: corrimiento isomérico con respecto al α -Fe.

$\langle |H| \rangle$: valor promedio del campo hiperfino magnético del sitio.

$\langle \varepsilon \rangle$: valor promedio del corrimiento cuadrupolar del sitio magnético.

$\langle |\Delta| \rangle$: valor promedio del desdoblamiento cuadrupolar del sitio cuadrupolar.

σ : anchura gaussiana (desviación estándar) del sitio magnético o cuadrupolar.

A : Contribución del sitio al área del espectro.

Las herrumbres también fueron caracterizadas usando espectroscopia Mössbauer. Discutiremos los resultados específicos de temperatura ambiente (Fig. 5 y Cuadro 1). Se hicieron mediciones a temperatura del nitrógeno líquido, que fueron bastante consistentes con nuestras interpretaciones, no obstante por su baja calidad estadística no se incluyen en esta discusión. Los espectros de las herrumbres separadas de aceros expuestos en Panamá estaban compuestos por un doblete cuadrupolar de lepidocrocita y goethita en nanopartículas, una distribución de campos hiperfinos correspondiente a goethita (H_m cerca de 35.0 T) y una contribución menor de dos sextetos magnéticos que atribuimos a magnetita no estequiométrica, $Fe_{3-x}O_4$. El hecho de que los espectros Mössbauer de la herrumbre adherente y no adherente sean, dentro del error experimental, prácticamente iguales, nos sugiere una importante cantidad de componentes amorfos en la muestra adherente que contribuye al doblete cuadrupolar, pero no a los difractogramas de Rayos-X.

Las herrumbres obtenidas en Sherman exhiben espectros Mössbauer muy diferentes a los de Panamá, aunque se caracterizan también con un solo doblete y componentes magnéticos. Nuevamente, el doblete cuadrupolar fue ajustado como una distribución con dos componentes de igual desplazamiento isomérico. En las herrumbres de Sherman el doblete cuadrupolar se puede asociar con lepidocrocita, goethita en nanopartículas y akaganeita. El perfil de la distribución de cuadrupolos en herrumbres removidas de la parte central de estas probetas de Sherman tiene un desdoblamiento cuadrupolar promedio de $\langle\Delta\rangle = \langle 2\varepsilon\rangle = 0.71$ mm/s, resultado de la contribución de dos componentes gaussianas con $\Delta_1 = 0.51$ mm/s y $\Delta_2 = 0.88$ mm/s, y desviaciones estándares de $\sigma_{\Delta,1} = 0.07$ mm/s y $\sigma_{\Delta,2} = 0.186$ mm/s, respectivamente. El hecho de que el primer componente sea tan estrecho y que se observan cantidades altas del segundo (área relativa de 54%), nos sugiere que en esta muestra la fase que contribuye predominantemente al doblete cuadrupolar es la akaganeita. Este resultado, que confirma las observaciones con DRX y FT-IR, son de particular importancia toda vez que la akaganeita es electroquímicamente activa y se puede reducir fácilmente promoviendo la corrosión en ambientes con cloruros (Asami & Kikuchi 2003). La akaganeita puede actuar como un reservorio de iones cloruro, que se pueden disolver haciendo la capa de herrumbre porosa, lo que permite la introducción de más cloruros del ambiente.

Es interesante destacar que la goethita de la herrumbre separada de la cara que mira al cielo es muy abundante y bastante cristalina (máximo en el componente gaussiano de la distribución de campos magnéticos $H_m = 36.7$ T), de tamaño de partícula entre 100 nm y 20 nm (Barrero et al., 1995). Oh et al. (1999) observaron que la goethita y la maghemita magnética se obtenían como partículas grandes como resultado del aumento de la tasa de corrosión en aceros al carbono expuestos en sitios marinos. Asami & Kikudi (2003) reportan que la influencia de aerosoles salinos sobre la estructura de la herrumbre resulta en un incremento en el contenido de akaganeita y el incremento del tamaño de partículas.

Todas las muestras de Sherman contenían magnetita no estequiométrica, en cantidades más importantes en la cara al cielo y en la parte central de las probetas. La magnetita en la cara al cielo está totalmente oxidada a maghemita, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, indicativo de un gran número de ciclos húmedo-seco y de altas tasas de corrosión. Estas muestras, de alguna manera, guardan parecido con las "herrumbres viejas" formadas en la corrosión del hierro en ambientes naturales y costeros. (Leidheiser Jr., 1982; Asami & Kikuchi 2003).

CONCLUSIONES

En este estudio se confirma que la composición de fases de las herrumbres obtenidas de aceros al carbono expuestos a ambientes tropicales en Panamá depende de los niveles de contaminación registrados en el sitio de exposición. Los compuestos observados en las herrumbres provenientes de los aceros expuestos en la estación de Panamá son la goethita, lepidocrocita y en menor proporción la magnetita no estequiométrica. En la estación marina de Sherman se obtienen akaganeita, goethita, lepidocrocita, magnetita no estequiométrica y maghemita. Las cantidades relativas de magnetita/maghemita y goethita son importantes en Sherman, se vinculan con los niveles de cloruros en esta estación y con las altas tasas de corrosión. En estas condiciones se obtienen partículas más grandes de goethita y de otros óxidos.

REFERENCIAS

Asami, K., & M. Kikuchi. 2003. In-depth distribution of rusts on a plain carbon steel and weathering steels exposed to coastal-industrial atmosphere for 17 years, *Corr. Sci.* 45: 2671-2688.

ASTM G1-90. 2000. "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens", American Society for Testing and Materials, PA .

Barrero, C., R. Vanderberghe, E. De Grave & G. Pérez. 1995. Un estudio Mössbauer sobre Goethitas Sintéticas. Primeros resultados, *Rev. Col. de Física*, 27(2): 387-390.

Cook, D. C., A. C. Van Orden, J. Reyes, S. J. Oh, R. Balasubramanian, J. J. Carpio, & H. E. Townsend. 2000. "Atmospheric corrosion in marine environments along the Gulf of México", *Marine corrosion in tropical environments*, ASTM STP 1399, S. W. Dean, G. Hernandez-Duque Delgadillo, & J. B. Bushman, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Cook, D.C., A.C. Van Orden, J.J. Carpio & S.J. Oh. 1998. Atmospheric corrosion in the Gulf of México, *Hyperfine Int.* 113: 319-329.

González, A.E., R. Lloyd, L. de Araque, C. Hernández, N. Acosta & J. A. Jaén. 1993. Los productos de corrosión atmosférica del acero A-36 formados en el clima de Panamá, *Revista COPAQUI* 13: 51-55.

Haces, C., F. Corvo & A. Pérez Reyes. 1981. Estudio de los productos de corrosión formados sobre aceros al carbono, en clima tropical húmedo (Parte I), *Revista Ciencias Químicas (Cuba)*, 12: 55-65.

Ishikawa T., Y. Kondo, A. Yasukawa & K. Kandori. 1998. Formation of magnetite in the presence of ferric oxyhydroxides, *Corr. Sci.* 40(7): 1239-1251.

International Standards Organizations, Geneve. 1991. ISO 2810, Paints and varnishes-Notes for guidance on the conduct of natural weathering test.

International Standards Organizations, Geneva. 1991. ISO 9223, Corrosion of metals and Alloys. Classification of corrosivity of atmospheres.

International Standards Organization, Ginebra. 1990. ISO/DIS 8565, Metals and Alloys – Atmospheric corrosion testing – general requirements for field tests.

Jaén J. A., M. Sánchez de Villalaz, L. de Araque, C., Hernández & A. de Bósquez. 2001. Study of the corrosion products formed on carbon steels in the tropical atmosphere of Panama, *Scientia* 16: 7-16.

Jaén, J. A. & B. Fernández. 1989. Mössbauer spectroscopy study of steel corrosion in a tropical marine atmosphere, *electrochem. Acta*, 34: 885-886.

Jaén, J. A., M. Sánchez de Villalaz, L. de Araque & A. de Bósquez. 1997. Kinetics and structural studies of the atmospheric corrosion of carbon steels in Panama, *Hyp. Int.* 110: 93-99.

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.

Leidheiser Jr., H. & S. Music. 1982. The atmospheric corrosion of iron as studied by Mössbauer spectroscopy, *Corros. Sci.* 22: 1089-1096.

Morcillo, M., E. Almeida, B. Rosales, J. Uruchurtu & M. Marrocos. 1999. Corrosión y protección de metales en las atmósferas de iberoamérica. Parte I: Mapas de Iberoamérica de corrosividad atmosférica (Red Temática MICAT, XV.1/CYTED). CYTED, Madrid.

Oh, S.J., D.C. Cook & H.E. Townsend. 1999. Atmospheric corrosion of different steels in marine rural and industrial environments, *Corros. Sci.* 41: 1687-1702.

Rancourt, D. G. & J. Y. Ping. 1991. Voigt-based methods for arbitrary-shape static hyperfine parameter distributions in Mössbauer Spectroscopy, *Nucl. Instr. Meth.*, B58: 85-97.

Rincón, A., O.T., de Rincón, C. Haces, N.R. Furet & F. Corvo. 1997. Evaluation of steel corrosion products in tropical climates, corrosion 53(11): 835-841.

Sánchez de Villalaz, M., A.F. de Bósquez & J.A. Jaén. (Eds.). 2000. Corrosividad atmosférica de Panamá. Proyecto MICAT-Panamá. Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

Santana Rodríguez, J.J., F.J. Santana Hernández, J.E. González González. 2002. XRD and SEM studies of the layer of corrosion products for carbon steel in various different environments in the province of Las Palmas (The Canary Islands, Spain), Corr. Sci. 44(11): 2425-2438.

Schwertman, U. & R.M. Cornell. 1996. Iron oxides in the laboratory: structure, properties, reactions, occurrence and uses. VCH Publishers, Inc. , New York, NY (USA). 131 pp.

Singh, A.K., T. Ericsson, L. Häggström & J. Gullman.. 1985. Mössbauer and x-ray diffraction phase analysis of rusts from atmospheric test sites with different environments in Sweden, Corros. Sci. 25(10): 931-945.

Recibido abril de 2005, aceptado noviembre de 2005