

Caracterización de productos de corrosión del acero de construcción de oleoductos mediante el empleo de diferentes técnicas analíticas.

Yosmari Adames-Montero, Gresi Carolina Colt-Vela, * Blas Alexander Delgado-Guedez, * Alexander Cueli-Corugedo, Silio Lopez-Guerra

Centro de Investigación del Petróleo, Churrucá #481 e/ Vía Blanca y Washington, Cerro. La Habana, Cuba, Código Postal: 62000, yosmari@ceinpet.cupet.cu.

*Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo, Urb. Santa Rosa, Sector El Tambor. Los Teques. Edo. Bolivariano de Miranda, Venezuela, Apdo. 76343.

Recibido: 03 de mayo de 2016.

Aceptado: 19 de diciembre de 2016.

Palabras clave: acero, corrosión, oleoductos, productos de corrosión.

Key words: steel, corrosion, pipelines, corrosion products

RESUMEN. El acero de construcción de instalaciones petroleras manifiesta diferentes afectaciones por el fenómeno de la corrosión. Una de las principales causas lo constituye la presencia del agua acompañante del petróleo. El citado medio corrosivo es conductor de la corriente eléctrica y por su composición variada: dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y cloruros en disolución, genera corrosión interior. Como resultado del proceso, se forman productos de corrosión de los ductos y tanques tales como: sulfuro de hierro (II) y carbonato de hierro (II) en dependencia de las condiciones de operación: temperatura, concentración del agente corrosivo y presión. En el presente artículo el objetivo fundamental fue establecer a escala de laboratorio la composición química y morfológica de los productos de corrosión que se formaron durante la corrosión del acero de construcción de oleoductos, al ponerse en contacto con un medio salino a 70°C , presencia de los contaminantes CO_2 y H_2S , según condiciones de operación. La técnica de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X, permitió la obtención de la composición elemental de los compuestos químicos y mediante la difracción de rayos X se detectó la presencia de lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$) y goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) como oxihidróxidos de hierro. La microscopía electrónica de barrido identificó diferentes morfologías: cubos alargados, astillas, estructura floral, lodosa o sedimentaria agrietada y arenosa, las que se componen principalmente por hierro y oxígeno.

ABSTRACT. Construction steel of oil facilities manifests different affectations for corrosion phenomenon. One of the main causes constitutes for corrosion is the presence of the accompanying water of the petroleum. The one mentioned corrosive medium it is conductive of the electric current and for their varied composition: carbon dioxide (CO_2), hydrogen sulphide (H_2S) and chlorides in dissolution, they generate inside corrosion. As a result of this process, they corrosion products are formed such as: iron sulphide (II) and iron carbonate (II) in dependence of the operation conditions: temperature, the corrosive agent's concentration and pressure. In the present paper the fundamental objective was to establish at laboratory scale the chemical and morphology composition of the corrosion products that are formed during the construction pipelines steel corrosion, in a saline polluted medium with carbon dioxide and hydrogen sulphide to 70°C , according to operation conditions. The spectroscopy dispersive of rays X energy technique allowed the obtaining the elementary composition of the chemical compounds and by rays X diffraction were detected iron oxihydroxides: lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) and goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$). The Scanning Electron Microscopy identified different morphologies: lengthened cubes, splinter, floral structure, muddy or cracked sedimentary and sandy, those that are composed mainly by iron and oxygen.

INTRODUCCIÓN

Los daños que ocasiona el fenómeno de la corrosión en la industria del petróleo son amplios. Un ejemplo lo constituye la reparación de la falla de un oleoducto, resultante de problemas de corrosión interna o externa. Además del costo inherente a la sustitución del tramo de tubería dañado, se tiene en cuenta el que se origina por el aceite derramado al terreno, muchas veces irreversible. Lo anterior trae como consecuencias el posible paro de producción y problemas de desabastecimiento.

El acero bajo aleado es el material de construcción que en la citada industria exhibe diferentes tipos de corrosión según sean las condiciones para que se desarrolle tal fenómeno.^{1,2}

La presencia de cloruros, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno en los fluidos que se transportan generalmente catalizan la corrosión del acero bajo aleado.^{3,4}

Los iones cloruros interactúan con tuberías de acero bajo aleado, según el estado de la superficie. Al inicio la superficie es hierro puro, en estado de oxidación 0. Como el potencial del hierro es negativo, presenta una actividad como donante de electrones, el hidronio toma los electrones y se generan los oxihidróxidos de hierro. Los cloruros actúan en los sitios donde están las densidades positivas de la superficie, originándose problemas de corrosión localizada y con el tiempo corrosión generalizada. Dichos iones modifican la porosidad y heterogeneidad de las posibles capas de productos de corrosión existentes.^{5,6}

Cuando la corrosión electroquímica del acero al carbono se origina por la presencia del dióxido de carbono (CO_2), forma la disolución de $\text{CO}_2(\text{ac})$, el cual disminuye el valor del pH resultando agresivo al metal. El mismo causa en los ductos zonas de pérdida rápida de metal debido a que las tuberías se corroen. El CO_2 en fase gaseosa en contacto con cualquier agua, se disuelve en una concentración proporcional a la presión parcial del CO_2 disuelto en el gas.^{7,8}

El ácido sulfhídrico ($\text{H}_2\text{S}_{\text{ac}}$) se adhiere generalmente como una película en la superficie del acero. Si la misma no es uniforme ocasiona corrosión localizada ya que el FeS (sulfuro de hierro II) es catódico frente al acero. Su formación depende de las condiciones de operación: temperatura, pH, concentración y presión.⁹⁻¹¹ El acero en dependencia de su composición química genera en algunas zonas de la superficie modificaciones electroquímicas notablemente diversa en la estructura metálica.

La morfología de las capas de productos de corrosión del acero al carbono es compleja. Durante el proceso de oxidación del metal ocurren diferentes transformaciones químico físicas. Como resultado se obtienen óxidos y oxihidróxidos de hierro y otros compuestos del hierro en función de las condiciones de ensayo, temperatura y estabilidad.^{4,12}

En la industria del petróleo los productos de corrosión del acero que se generan presentan funciones protectoras o no según los parámetros de operación que rigen el funcionamiento de las diferentes instalaciones.

Existen investigaciones de evaluación de velocidad de corrosión del acero en agua acompañante de petróleo que pertenecen a la Franja Norte Costera de crudo pesados de Cuba. En la más reciente se realizó un estudio de la corrosión del acero bajo aleado API 5LX-52 según composiciones de gases de H_2S a 500 ppm y CO_2 a saturación en el medio corrosivo y diferentes temperaturas de operación, en una celda de vidrio. Como condición crítica se obtuvo la que se relaciona con la coexistencia de ambos contaminantes y la mayor temperatura alrededor de 70 °C en la que se alcanzó la mayor velocidad de corrosión.^{4,5} Se utilizó la microscopía óptica para la visualización de los efectos corrosivos.

En la presente investigación se establecieron diferentes condiciones de ensayo según la relación $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ de la industria en medio salino (NaCl al 3, 5%) para la determinación de su influencia sobre la velocidad de corrosión del acero API 5LX-52 en autoclaves que controlan las presiones de los gases contaminantes y la temperatura además de la hermeticidad del sistema, aspecto que no se alcanzó en la anterior investigación.

Resulta de interés el dominio de las propiedades de los depósitos que se generaron en la superficie del acero de un oleoducto mediante el empleo de técnicas de microscopía óptica y analíticas según la corrosividad del medio, por lo que la investigación plantea como objetivos establecer la composición química y morfológica de los productos de corrosión que se generaron durante la corrosión del acero API 5LX-52 en medio salino (NaCl 3,5 %, CO_2 y H_2S) a escala de laboratorio, valorar las fases cristalinas presentes en los productos de corrosión mediante la Espectroscopia de Energía Dispersiva de rayos X (EDX) y la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó la inspección visual, análisis de composición química y certificación de las muestras pertenecientes al acero de construcción API 5LX-52. Se utilizó un espectrómetro multicanal digital alemán, modelo Spectrolab N°6536 y se reporta el valor promedio de tres mediciones. Para la investigación se ejecutaron tres ensayos gravimétricos a escala de laboratorio, mediante autoclaves de 2 litros de capacidad, que se acoplaron a un sistema de agitación (350 r/min) al medio de ensayo (NaCl 3,5 % p/v) y a una manta térmica que se conectó a un controlador de temperatura para establecer 70 °C. Las tres placas de acero API 5LX-52 (material de construcción de oleoductos) para cada una de las condiciones se expusieron al medio corrosivo durante 120 h. Los productos de corrosión se generaron según las condiciones de operación de un oleoducto de la Franja Norte costera cubana, donde la relación $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ que se estableció fue de 300 ppm/ 833 ppm respectivamente.^{13,14} Los ensayos se corresponden con los que se reportan a la temperatura de 90 °C.¹⁵ (Fig.1).

El análisis de las capas de depósitos del acero API 5LX-52 se realizó mediante un microscopio óptico de luz reflejada, modelo Axiovert 25 de la Zeiss, con cámara digital de fabricación alemana.

La evaluación de la morfología de los productos de corrosión y la determinación de su composición química se realizó a nivel elemental. También se emplearon las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDX), mediante un microscopio electrónico de alta resolución marca FEI, modelo Quanta FEG 250, que se acopló a un detector de energía dispersiva de rayos X marca EDAX de Holanda.¹⁶



Fig. 1. Autoclave para ensayos de corrosión.

Para la identificación de los productos de corrosión se utilizó la difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro marca PANalytical, modelo X'Pert PRO de procedencia holandesa. La radiación $K\alpha$ monocromática de cobre se empleó en el estudio. Se aplicó el voltaje de 32 kV y la corriente de 12 mA. El tiempo de medición fue de 3 s en cada posición angular. Se impuso un paso angular de $0,005^\circ$ desde 6° hasta 70° .

RESULTADOS Y DISCUSION

Composición química del acero API 5LX-52

La composición química del material metálico objeto de estudio arrojó como resultado un acero estructural, 10 GT según la norma GOST de Rusia. (Tabla 1)

Tabla 1. Composición química del acero API 5 LX-52

C	Si	Mn	Cu	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Ti
0,10	0,02	0,81	0,18	0,016	0,0017	0,02	0,01	0,02	0,05	0,02

La composición química del acero influye poco en la velocidad de corrosión cuando el oxígeno se presenta, ya que la difusión del oxígeno es el paso más lento en el mecanismo de la corrosión. Se considera como bajo aleado al contener elementos, cuyas concentraciones superan a la que se establece para los aceros al carbono, sin que sobrepase el 2 % en peso.¹⁷

El acero API 5LX-52, bajo aleado con 0,1 % de carbono contiene los elementos de aleación manganeso y titanio se emplea en elementos constructivos de poca, media y alta responsabilidad. Se utiliza en la construcción de puentes, gasoductos, oleoductos, armaduras, calderas, etc.¹⁸

Determinación de velocidad de corrosión del acero API 5LX-52 a escala de laboratorio por el método gravimétrico.

El promedio de las velocidades de corrosión para el acero API 5LX-52 a la temperatura de 70°C se clasificaron en todos los casos como severo, en correspondencia con lo que reporta la literatura ($> 0,254\text{ mm/año}$)¹⁴. (Tabla 2)

En la extracción de petróleo, el entorno de temperaturas en las instalaciones oscila entre 45° y 70°C aproximadamente. Se realizaron experimentos a nivel de laboratorio con cada uno de los productos: CO_2 y H_2S de modo independiente. En los yacimientos de petróleo la mezcla de estos dos gases se presenta con frecuencia en diversas proporciones, pero el efecto corrosivo por separado demostró que el H_2S genera afectaciones superiores a las del CO_2 en condiciones similares.

Tabla 2. Velocidades de corrosión del acero API 5LX-52 en medio salino a diferentes relaciones de CO₂ y H₂S. (Temp. 70 °C).

Ensayos	Relación H ₂ S/CO ₂	Velocidad de corrosión (mm/año)
CO ₂	0/833	0,3353
H ₂ S	300/0	0,4064
Mezcla H ₂ S y CO ₂	300/833	0,3632

La mezcla de CO₂ y H₂S en las proporciones que se realizaron en la investigación si se compara con la de CO₂ se aprecia que toma un valor intermedio (0,3632 mm/año). Esto significa que la corrosión se presenta con un valor superior a la del CO₂ (0,3353 mm/año) e inferior a la del H₂S (0,4064 mm/año). Nótese que la cuantía del H₂S es inferior a la que se ensayó de CO₂ y su afectación es notable. Lo anterior se atribuye a que ambos gases tienen limitaciones para acceder a la superficie metálica porque a la temperatura que se encuentra el sistema los dos gases están por encima de la temperatura crítica, por lo que sus moléculas entran y salen a una velocidad mayor propia de su peso molecular. Sus disoluciones en el medio salino son tan rápidas como su salida.

Se indica además que en la comparación de las dos sustancias binarias CO₂ y H₂S en disoluciones acuosas de los elementos carbono y azufre en estado puro presentan electronegatividades 3,79 y 4,11 respectivamente¹⁹. El CO₂ es un óxido ácido mientras que el H₂S_(ac) es un ácido que en disolución acuosa presenta dos constantes de ionización. Esto significa que al ser un ácido en disolución acuosa muestra una agresividad mayor a la del CO_{2(ac)} disuelto. La fortaleza ácida del CO_{2(ac)} es inferior a la acidez que genera el H₂S_{ac}²⁰

Caracterización de los productos de corrosión del acero API 5LX-52

La reacción electroquímica entre el metal y las sustancias agresivas que componen el medio, genera sobre la superficie metálica productos de corrosión. Los factores que influyen en la función protectora dependen de diferentes propiedades. El espesor, porosidad, uniformidad, solubilidad, fragilidad y adherencia influyen de forma acentuada en la velocidad de corrosión y en la morfología del metal subyacente.²¹⁻²⁴

En las instalaciones petroleras, las velocidades de corrosión que se presentan muestran valores superiores en condiciones ácidas (H₂S_(ac)) que en las dulces (CO_{2(ac)}). La disolución del H₂S presenta una mayor acidez que el CO_{2(ac)}. La solubilidad del H₂S supera tres veces a la del CO₂, por lo que en el contexto de la corrosión se le adjudica mayor importancia al H₂S en la formación de productos de corrosión y en las propiedades protectoras o no que los mismos exhiben.²⁵

Análisis de las micrografías del acero mediante microscopía óptica

El estudio de la morfología de las capas de depósitos que se generaron en la superficie del acero API 5LX-52 en presencia de CO₂ y H₂S, denotó irregularidad y poca protección, con una tendencia en las dos condiciones debido a la presencia de eventos localizados. En el caso del H₂S se observaron oquedades profundas que influyen en el carácter poco protector de las mismas y su pobre adherencia. (Fig. 2a y 2b).

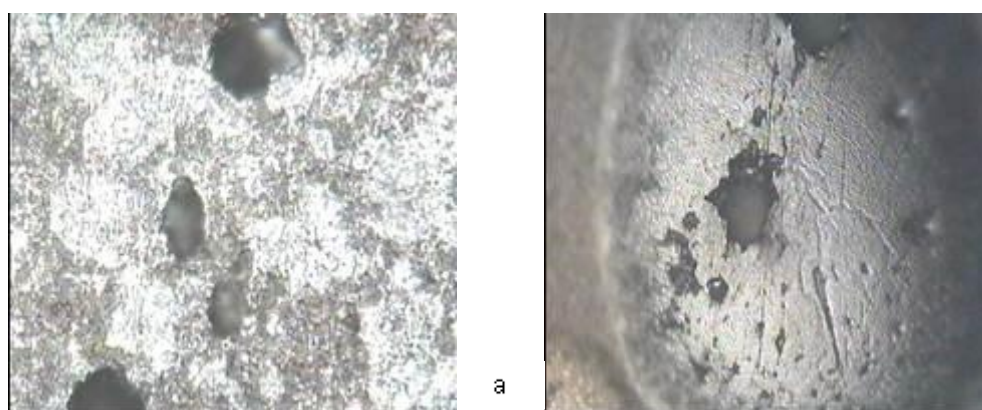


Fig. 2. Micrografías del acero API 5LX-52 a 70 °C 50X a) medio salino + CO₂, b) medio salino + H₂S

La existencia de zonas no cubiertas expuestas al medio corrosivo crea una diferencia de potencial entre el hierro (Fe) y el depósito de corrosión desarrollándose la corrosión localizada. Los resultados son similares a los obtuvieron otros autores.^{5, 6}

Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDX) y microscopía electrónica de barrido (MEB)

Las técnicas de análisis microestructural como EDX y MEB que se utilizaron presentan sensibilidad apreciable en el estudio de los productos de corrosión del hierro: óxidos de hierro, oxihidróxidos, sulfuro de hierro II, carbonato de hierro II. También revelan muchos de los aspectos que permanecen ocultos en otras determinaciones analíticas. Los compuestos de hierro se establecen al presentarse por encima del 0,5% del contenido de hierro presente en la muestra total, así como las fases del metal que se generaron durante el fenómeno de corrosión del acero API 5LX-52. Tales compuestos de hierro manifestaron propiedades eléctricas y magnéticas que posibilitaron su identificación.²⁶

Los productos de corrosión durante la evaluación a 70 °C en presencia de H₂S y CO₂, conformaron una capa irregular de apariencia heterogénea. Se distinguieron diferentes morfologías: cubos alargados (Fig 3), astillas (Fig. 4), estructura floral (Fig 5), lodosa o sedimentaria agrietada (Fig. 6). Del análisis que se realizó por energía dispersiva, se evidenció que los productos de corrosión que se obtuvieron en presencia de H₂S y CO₂, se componen principalmente por los elementos oxígeno y hierro (Figs 3-6). El patrón de las bandas que se observaron en el espectro identificó oxihidróxidos de hierro.

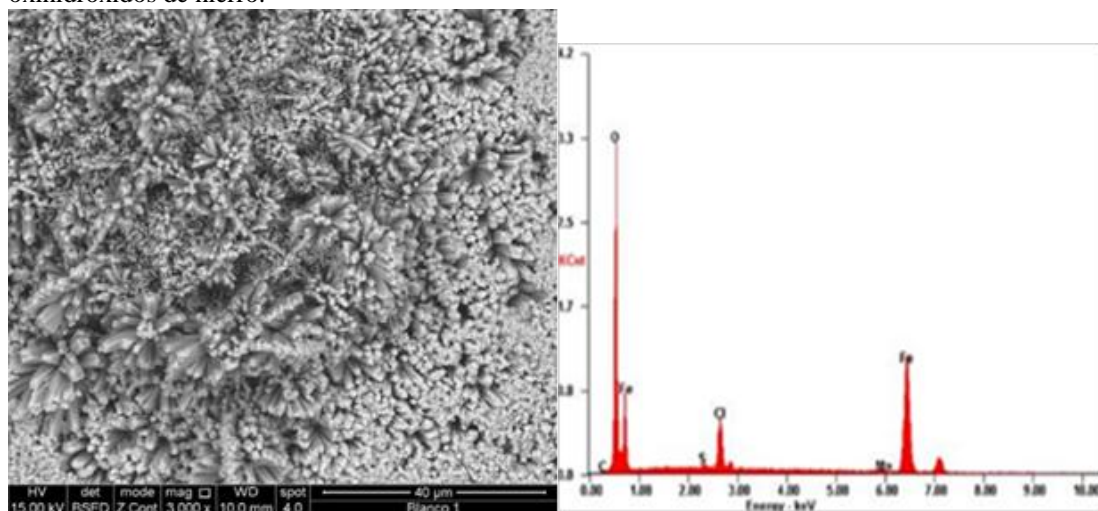


Fig. 3. Espectro de energía dispersiva obtenido del análisis de los productos de corrosión (cubos alargados).

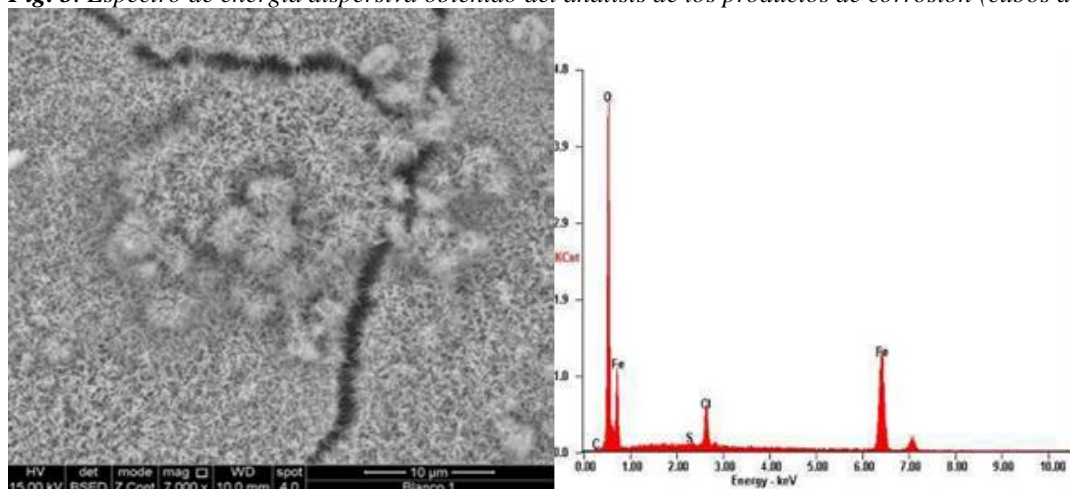


Fig. 4. Espectro de energía dispersiva obtenido del análisis de los productos de corrosión (astillas).

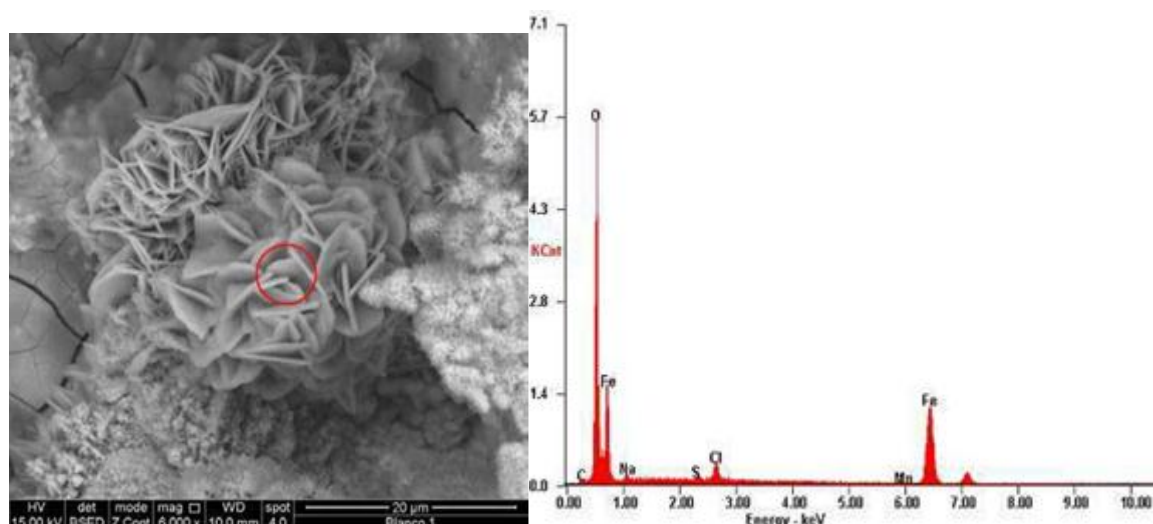


Fig. 5. Espectro de energía dispersiva obtenido del análisis de los productos de corrosión (estructura floral).

Relación de las técnicas de DRX y MEB con la Cristalografía y Cristaloquímica en la caracterización de los productos de corrosión del acero API 5LX-52.

La aplicación de la DRX y la MEB en las investigaciones del estado sólido permitieron la determinación de la composición química elemental de las fases cristalinas que se formaron. Las disciplinas de Cristalografía y Cristaloquímica utilizan tales resultados para la realización de valoraciones cristalográficas y cristaloquímicas de las especies cristalinas que se detectaron como productos de corrosión del hierro. Por otra parte, posibilitaron el conocimiento de: parámetros de celda, sistema cristalino al que pertenece cada compuesto, densidad, número de átomos por celda y el tipo de grupo espacial para cada fase, entre otros.²⁷⁻²⁹

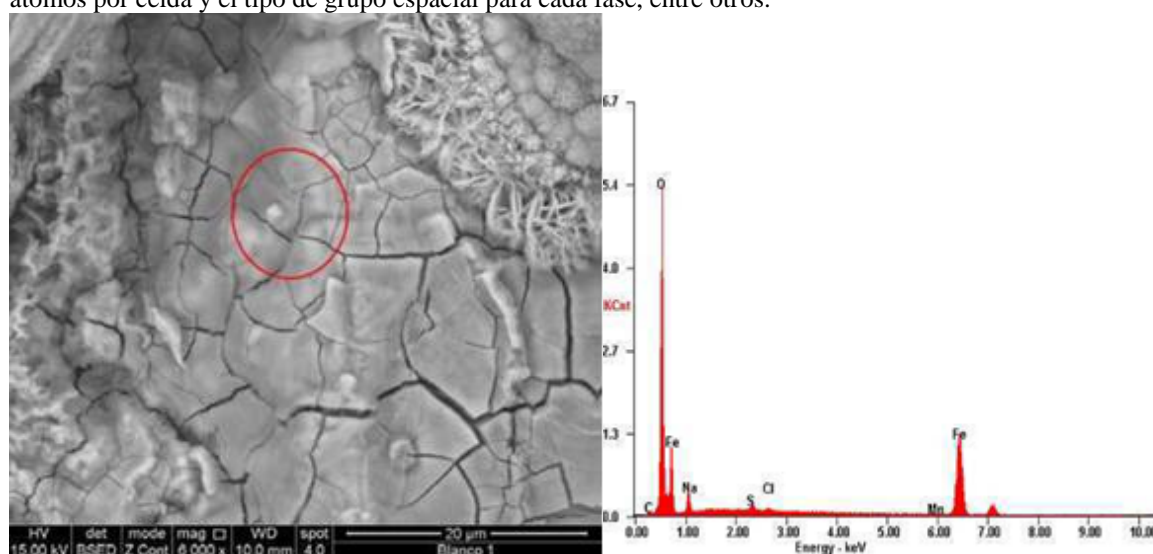


Fig. 6. Espectro de energía dispersiva obtenido del análisis de los productos de corrosión (lodosa o sedimentaria).

Mediante la aplicación de valoraciones termodinámicas según reporta la literatura se indica que primero se generó la lepidocrocita (γ -FeOOH) ya que en su formación desprendió una cantidad de energía que garantizó su identificación por DRX. Con un cambio en su estructura cristalina se formó la goethita (α -FeOOH) como segunda fase. Lo anterior se relaciona porque la goethita liberó una cantidad de energía superior a la primera fase, lo que le brindó una estabilidad mayor como sólido cristalino. (Fig. 7)³⁰

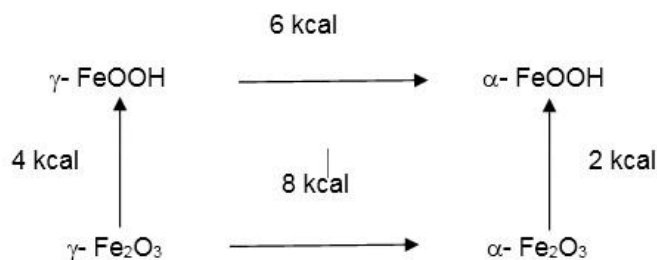


Fig. 7. Diagrama de estabilidad de óxidos y oxihidróxidos de hierro

Se reportan las distancias interplanares y sus intensidades de difracción. Se compararon los parámetros experimentales con los que reporta la base de datos PDF. (Tablas 2 y 3)

Tabla 3. Parámetros determinados mediante DRX para γ -FeOOH

Distancia interplanar (Å)	Intensidad (%)	hkl
6,27	61	200
3,29	100	210
2,47	76	301
2,36	36	111
1,94	53	501
1,93	72	020
1,534	33	002
1,524	30	321

Se indica que la γ -FeOOH pertenece al sistema cristalino ortorrómbico, cuya ecuación es:

$$d^2 = a^2/h^2 + b^2/k^2 + c^2/l^2,$$

donde $a = 12,520 \text{ Å}$, $b = 3,873 \text{ Å}$ y $c = 3,071 \text{ Å}$ son los parámetros fundamentales de la celda cristalina y h, k, l son los índices de Miller de las familias de planos. El número de moléculas por celda es 4, volumen de la celda es $148,91 \text{ Å}^3$ y la densidad $3,96 \text{ g/cm}^3$. El grupo puntual se identificó como mm2. Se señala que el grupo espacial es Bbmm, lo que significa que le corresponde una red de Bravais centrada en el cuerpo y que contiene 2 espejos y un eje 2 de simetría. Ellos se distinguieron por la perpendicularidad que existe entre uno y otros elementos de simetría con ángulo de 90° .

Tabla 4. Parámetros determinados por DRX para α -FeOOH

Distancia interplanar (d) Å	Intensidad (I)%	hkl
4,98	12	020
4,18	100	110
2,69	35	130
2,50	12	021
2,45	50	111
2,25	14	121
2,19	18	140
1,719	20	221

Se señala que la α -FeOOH pertenece al sistema cristalino ortorrómbico y se corresponde con la ecuación descrita para la fase γ -FeOOH. Para este caso $a = 4,608 \text{ Å}$, $b = 9,956 \text{ Å}$ y $c = 3,021 \text{ Å}$ como parámetros fundamentales de la celda cristalina y h, k, l son los índices de Miller de las familias de planos. El número de moléculas por celda es 4, volumen de la celda es $138,60 \text{ Å}^3$ y la densidad $4,26 \text{ g/cm}^3$. Se señala que el grupo puntual es mm2, igual que la fase γ -FeOOH. El grupo espacial es Pbnm, que se corresponde con una red primitiva.

Los oxihidróxidos de hierro que se generaron mostraron deficiencias en la protección del acero porque exhibieron una calidad no acentuada de sus propiedades protectoras, por lo que se propone la aplicación de métodos de protección para que se atenúen los daños que provocan los componentes del medio corrosivo.^{4,7}

CONCLUSIONES

Se obtuvo una correlación de las morfologías y de los espectros de EDX que demostraron la presencia de oxihidróxidos de hierro como principales constituyentes.

Mediante la técnica de DRX se comprobó la presencia de las fases γ -FeOOH y α -FeOOH. Ambas pertenecen al sistema cristalino ortorrómbico y grupo puntual mm2. A la γ -FeOOH le corresponde una red de Bravais centrada en el cuerpo que contiene dos espejos y un eje dos de simetría y a la α -FeOOH una red primitiva.

Los productos de corrosión manifestaron diversas morfologías: cubos alargados, astillas, estructura floral, lodosa o sedimentaria y agrietada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Roberge Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill: 1999: p. 736. ISBN 0070765162.
2. Schweitzer P. Fundamentals of Corrosion. Mechanism, causes, and preventative methods. United States of America: Taylor and Francis Group: 2010: p. 83. ISBN 978-959-7107-33-9.
3. Adames Y, Rizo I, Davis J, Balmayor M, Alonso J, Cabrales M. Corrosión del acero al carbono en una zona cubana muy contaminada por iones cloruro y compuestos de azufre. Revista CENIC Ciencias Químicas. 2013; Vol. 44: p. 200-207.
4. Rizo I, Adames Y, Rivera Y. Estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono en zonas petrolíferas de la costa Norte Occidental de Cuba. Revista CNIC Ciencias Químicas. 2013; Vol 44: p. 216-228.
5. Cueli A, Adames Y, Rivera Y, Davis J. Efecto corrosivo del agua acompañante del petróleo contaminada con CO₂ sobre el acero de los ductos. Revista Cubana de Ingeniería. 2013; Vol. IV: No. 3: p. 47 - 52, ISSN 2223 -1781.
6. Cueli A, Adames Y, Rivera Y, Davis J. Efecto corrosivo del agua acompañante del petróleo, contaminada con H₂S, sobre el acero API 5L X-52. Revista Cubana de Química. 2013; Vol.25: No. 2. ISSN 2224-542.
7. Biomorgi J, Hernández S *et al.* Evaluación de los mecanismos de corrosión presentes en la línea de producción de crudo y gas ubicada en el Noreste de Venezuela. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2012; Vol. 32: No. 1: 96- 106. ISSN 0255- 6952 Disponible en Web: <http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0255-69522012000100012&script=sciarttext> [consultado junio 2014].
8. Muñoz HL, González LÁ, Peña DY. Evaluación de la velocidad de corrosión erosión en un acero API 5L grado 65 en un sistema salmuera-CO₂ SiO₂-aceite mineral, por medio de técnicas electroquímicas. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 13 (1): 27-44, enero-junio de 2009. ISSN 0123-2126.
9. Zamudio LS, Estrada A, Benavides A, Estrada A, Benítez JL. Control de la corrosión de acero al carbono en ambientes de ácido sulfhídrico por 1_ (2_Hidroxietil)_2_Alquil_Imidazolin y sus correspondientes precursores amídicos. Revista de la Sociedad Química de México. 2002; 4(46): 335_ 340: ISSN 1665_9686.
10. Vargas A, Aperador W, Ortiz C, Betancur, JD, Chaur-Jeng W. Estudio de la corrosión en ambiente marino de aleaciones del sistema Fermanal mediante técnicas electroquímicas. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales.2009;S1(1):[251_257].Disponible en http://www.rlmm.org/archives.php?f=/archivos/S01/N1/RLMMArt09S01N1_p251.pdf [consultado Septiembre 2014]
11. Adames Y, Casas ME, Cueli A, Rizo I. Comportamiento del agua de formación del petróleo y aguas residuales en instalaciones petroleras desde el punto de vista de la corrosión. Revista CENIC Ciencias Químicas. 2014; Vol. 45: 81-89.
12. Morcillo M, Almeida E, Rosales B, Uruchurtu J, Marrocos M. Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica. Programa CYTED. 1999: p. 14
13. ASTM G1- 90: 2003: Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, Annual Book of ASTM Standards.
14. NACE RP0775: 2005: Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations. NACE International the Corrosion Society.
15. Adames Y, Colt G, Delgado A, Cueli Alexander, López S. Productos de corrosión del acero API 5LX-52 en medio salino en presencia de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Revista CNIC Ciencias Químicas. 2015; Vol 46, número especial: p. 119-125.
16. Conley R. Espectroscopia infrarroja. Alhambra: S. A. 1979: 2da ed, España.
17. Paumier M. Estudio de la corrosión en fondos de tanques de hidrocarburos. [Tesis presentada en opción al título académico de Master]. ISPJAE. La Habana, Julio 2015.
18. Guliaev AP. Metalografía. Tomo II. Rusia. Editorial Mir Moscú, 1978: p. 73.
19. Sanderson RT. Inorganic Chemistry, United States of America, Reinhold publishing Corporation, 1967: p. 8, 74, 97.
20. Nesic S, Lee KLJ. A mechanistic model of iron carbonates film growth and the effect on CO₂ corrosion of mild steel. Corrosion. 2002; Vol. 02: Paper No. 237.

21. Antunes RA, Costa I, De Faria D. Characterization of corrosion products formed on steels in the first months of atmospheric exposure. *Matéria*. 2003; Vol. 8: No 1: 27-34.
22. Vite P, Demedices L. Investigación del efecto de productos de películas de corrosión en el comportamiento electroquímico del acero API-X52 para tubería en medios ácidos. *Revista Avances en Ciencias e Ingeniería*. México. 2010; ACI: Vol. 1(1), 45-57. ISSN: 0718-8706.
23. Jaen JJ, Adames O, Iglesias J, Hernández C. Caracterización de la pátina protectora del acero patinable ASTM A709 HPS 70W del puente Centenario. *Tecnociencias*. 2011; 13: 2:81-98.
24. Evaluación de la corrosión del acero AISI-SAE 1020 en un ambiente multifásico de salmuera CO₂-H₂S. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, No 27 Universidad del Norte Barranquilla, Colombia. 2010 ISSN: 0122-3461.
25. Nava N, Sosa E, Espinosa MA, Llanos ME. Identificación de productos de corrosión por espectroscopia Mossbauer. XLI Congreso Mexicano de Química. Instituto Mexicano del Petróleo. Setiembre 2006.
26. Raman A, Kuban B, Razvan A. The application of Infrared Spectroscopy to the study of Atmospheric rust system. *Corrosion Science*. 1991; 32: 12 p. 1295-1306.
27. Culity BD. *Elements of X-ray Diffraction*. United States of America: Editorial Pueblo y Educación, 2da edición. 1980: p. 31, 32, 38, 111, 459, 460.
28. Evans RC. *An introduction to Crystal Chemistry*. Cambridge University Press, 2da edición, London 1976: p. 277, 278.
29. George EA. Influencia de la interacción roca-fluido en la inestabilidad de formaciones arcillosas en la franja norte de crudos pesados de Cuba. [Tesis doctoral en Ciencias Químicas] La Habana, abril de 2014.
30. Remi H. *Treatise on Inorganic Chemistry*. Edición Revolucionaria Instituto Cubano del Libro. Vol II. 1956: p.273.