

COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL ACERO DE CONSTRUCCIÓN DE OLEODUCTOS EN AGUAS ACOMPAÑANTES DE PETRÓLEO

ELECTROCHEMICAL BEHAVIOUR OF PIPELINE CONSTRUCTION STEEL IN OIL-BEARING WATERS

Yosmari Adames^{1,2}, Alexander Cueli¹, Zuleika Marquetti¹, Yichsy Rivera¹, Nelson Llovet¹, Rosa Contreras¹

(1) Centro de Investigación de Petróleo (CEINPET), Churruca # 481, Cerro, CP 62000 La Habana - Cuba

(2) Facultad de Química de la Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, La Habana - Cuba
(e-mail: yosmari@ceinpet.cupet.cu)

Recibido: 21/04/2020 - Evaluado: 30/05/2020 - Aceptado: 24/06/2020

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa el comportamiento electroquímico del acero de construcción de un oleoducto en presencia de dos aguas de diferentes orígenes. Se emplearon las técnicas electroquímicas de resistencia de polarización lineal y curvas de polarización para estimar la resistencia del acero a la corrosión cuando se puso en contacto el acero con los medios corrosivos. Por la composición fisicoquímica y microbiológica de los medios se apreció la diferencia entre sus agresividades corrosivas, en correspondencia con las determinaciones de velocidades de corrosión determinadas por el método de Resistencia de polarización lineal (LPR). Se denotó disminución de la resistencia de la corrosión del material evaluado al aumentar la temperatura, en los dos medios acuosos. Las curvas de polarización del acero evidenciaron procesos de transferencia de carga y difusión de oxígeno en las pruebas realizadas.

ABSTRACT

The present work evaluates the electrochemical behavior of the construction steel of an oil pipeline in the presence of two waters of different origins. The electrochemical techniques of linear polarization resistance and polarization curves were used to estimate the resistance of the steel to corrosion when the steel was in contact with the corrosive media. By the physicochemical and microbiological composition of the media, the difference between their corrosive aggressiveness was appreciated, in correspondence with the corrosion speed measurements determined by the Linear Polarization Resistance (LPR) method. The corrosion resistance of the evaluated material was noted to decrease with increasing temperature, in both aqueous media. The polarization curves of the steel showed processes of load transfer and oxygen diffusion in the tests carried out.

Palabras clave: agua, corrosión, oleoducto, petróleo

Keywords: water, corrosion, pipeline, oil

INTRODUCCIÓN

Las fallas que más se presentan en la industria petrolera mundial tienen su origen en el fenómeno de corrosión con un 33 % de incidencia. El petróleo y sus derivados no son electrolitos y no son corrosivos. La corrosión electroquímica en la industria del petróleo se origina por la interacción entre el medio corrosivo y el acero de construcción de las instalaciones. La misma se clasifica del tipo localizada, lo que proporciona un riesgo mayor al fenómeno. Este tipo de corrosión ocurre con mayor intensidad y su detección se considera difícil (Domínguez & Castro, 1987; Schweitzer, 2010; Santos & Marrero, 2014; Salazar, 2015).

En la etapa de transportación del petróleo, los efectos del agua de formación, de capa o acompañante de petróleo resultan negativos al acero de construcción de las instalaciones, por acumularse en las partes bajas de su recorrido. El derrame de hidrocarburos constituye una de las consecuencias y por lo general, se origina por una falla mecánica del material metálico que es precedida por la corrosión (causa primaria) (Santos, & Marrero, 2014; Groysman, 2014; Ramos *et al.*, 2019).

La composición fisicoquímica del agua desempeña un rol determinante en su agresividad frente a los metales de uso frecuente y común. Una posible indicación del grado de contaminación de un agua de mar se establece por su velocidad de corrosión (Páez, 2008; Schweitzer, 2007). La misma se considera tóxica por la composición que presenta. Dentro de los contaminantes se mencionan a los gases: CO₂ (dióxido de carbono) y H₂S (sulfuro de hidrógeno), que al ponerse en contacto con la fase acuosa se hidrolizan y forman disoluciones ácidas, causando gran corrosión en todo el sistema de conducción (Quispe, 2017).

Además, dicha agua contiene un alto contenido de sales, que aumentan su conductividad, y propicia el funcionamiento de las "pilas de corrosión" (Adames *et al.*, 2010). Algunas también contienen metales pesados y fracciones de crudo en emulsión o disolución. Las pérdidas de espesores del metal constituyen una medida de la corrosión que manifiesta el acero al ponerse en contacto con el medio acuoso (Fuentes & Peña, 2007; Cueli *et al.*, 2013a; Adames *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2019).

La corrosión interior en tuberías muestra características muy bien definidas y depende de: características fisicoquímicas del medio que transportan, velocidad del fluido, viscosidad, régimen de flujo, temperatura, sólidos en suspensión, fases (líquido, gas o multifásico), la presencia de bacterias anaerobias y el perfil del ducto a lo largo de su recorrido, entre los más importantes (Cueli *et al.*, 2013b). Las propiedades químicas del agua pueden favorecer más la presencia de esta flora bacteriana que acelerará el fenómeno. El contenido de sales disueltas modifica la estructura de las posibles incrustaciones existentes, volviéndolas porosas y heterogéneas (Páez, 2008).

En las baterías de tratamiento de petróleo, el proceso de separación del agua resulta ineficiente, y el acero de construcción de oleoductos interactúa con el agua retenida, de ahí que se considera necesario plantear como objetivo de la investigación evaluar la resistencia a la corrosión del material metálico cuando se pone en contacto con dos medios corrosivos a tres temperaturas mediante técnicas electroquímicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Composición química del acero

La composición química elemental del acero se determinó mediante la técnica de espectrometría de emisión por arco eléctrico. El espectrómetro multicanal digital, modelo Spectrolab N°6536 se utilizó para el estudio. En cada caso se reporta el valor promedio de tres mediciones.

Caracterización fisicoquímica de los medios corrosivos

Los medios de ensayos provienen de dos baterías de tratamiento, ubicadas en la Franja Norte de Petróleos Cubanos. Para la caracterización fisicoquímica, se midieron los parámetros que se presentan a continuación:

Índices	Métodos de análisis
Calcio	ISO 9297-1989 (2010)
Magnesio	ISO 9297-1989 (2010)
Cloruros	APHA-AWWA-WEF (2017)
Sulfato	APHA-AWWA-WEF (2017)
Hierro	ISO 9297-1989 (2010)
Sodio	ISO 9297-1989 (2010)
Potasio	ISO 9297-1989 (2010)
Sulfuros	APHA-AWWA-WEF (2017)
Sólidos totales	APHA-AWWA-WEF (2017)
Alcalinidad	ISO 9297-1989 (2010)
Densidad	APHA-AWWA-WEF (2017)
pH	ISO 9297-1989 (2010)
Conductividad eléctrica	APHA-AWWA-WEF (2017)
DQO	APHA-AWWA-WEF (2017), ISO 9297-1989 (2010)
DBO ₅	APHA-AWWA-WEF (2017)

Las mediciones de conductividad se realizaron para el primer medio corrosivo a 24,5 °C y a 24,1 °C para el segundo y las de pH a 25 °C.

Determinación del comportamiento electroquímico de los aceros en los medios corrosivos

Las técnicas que se utilizaron en la investigación se describen a continuación;

Resistencia de polarización lineal (LPR)

Los ensayos electroquímicos se ejecutaron en condiciones estáticas, en una celda de vidrio que presenta 3 bocas: la central para el puente salino con electrodo plata/cloruro de plata (ER), otra para el electrodo auxiliar de grafito (EA) y la correspondiente al sensor de trabajo, el acero (ET1). Al equipo GILL AC, serial No1704 Sequencer, versión 5.1.4 de la firma ACM Instruments de Inglaterra, se conectó mediante cables recubiertos, donde un terminal corresponde a la celda y el otro al equipo, que recibe las señales de los procesos de corrosión y las expresa en valores gráficos y numéricos (Figura 1a). El diagrama de conexión para el equipo se presenta en la figura 1b.

La superficie del electrodo de trabajo se preparó con papel para desbaste de superficies metálicas (# 80, 200, 400 hasta 600 respectivamente), eliminando los gránulos restantes con agua. El electrodo se sumergió posteriormente en alcohol y se preservó en una desecadora hasta su utilización en los ensayos (ASTM G1-03, 2011).

La técnica electroquímica de resistencia de polarización lineal se empleó según la norma ASTM G59-97 (2014). El barrido de potencial se realizó de ± 10 mV del potencial de reposo y los datos experimentales que se obtuvieron se procesaron estadísticamente mediante el método de Dixon para el rechazo de valores erráticos. El cálculo de la incertidumbre expandida se determinó con un factor de cobertura $K= 2$ correspondiente a 95 % de nivel de confiabilidad (Dixon & Massey, 1974; ASTM G16-13, 2013)

Los ensayos se realizaron en tres condiciones de temperatura: ambiente (34 °C), 70 °C y 90 °C.

Curvas de polarización (cyclic sweep)

Los ensayos de curvas de polarización se realizaron en correspondencia con la norma ASTM G5-14 (2014). El trazado de las curvas anódicas y catódicas se realizó en el intervalo de ± 250 mV. La técnica ofreció valores de velocidad de corrosión para corroborar los resultados de LPR.

Valoración de la resistencia del acero en los medios corrosivos

La valoración de la resistencia a la corrosión del acero objeto de investigación se realizó a partir de la determinación de velocidad de corrosión por el método de LPR.

El equipo que se utilizó en las mediciones electroquímicas se presenta en la Figura 1a con la conexión correspondiente de la celda de ensayo a dicho equipo.

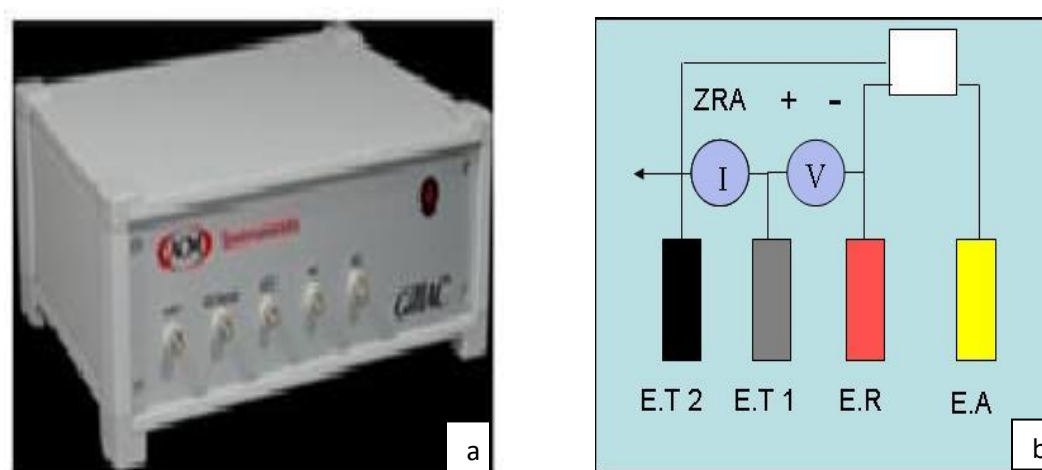


Fig. 1: Equipo GILL AC (a) y circuito de conexión de la celda de ensayo (b).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la composición química del acero

La composición química elemental del material de construcción del oleoducto se expone en la Tabla 1. La misma se corresponde con el acero estructural similar a la designación Acero 20 según la norma GOST de Rusia. La clasificación de los aceros varía según el país en que se producen, por lo que este acero se considera como bajo aleado ya que contiene elementos, cuya concentración supera la establecida para los aceros al carbono, sin que sobrepase el 2 % en peso (Guliaev, 1978; Kuzmin & Samojotski, 1986).

Tabla 1: Composición química elemental del material (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Material
0,18	0,25	0,42	0,01	0,01	0,03	0,007	0,003	0,02	Acero 20

Como resultado del análisis anterior se concluyó que el acero se emplea como material de construcción en instalaciones metálicas tales como: puentes, gasoductos, oleoductos, calderas, etc. Este tipo de acero que generalmente se expone a medios corrosivos que presentan H_2S y CO_2 , en altas concentraciones queda susceptible al deterioro y causa fallas o averías del material metálico (Quispe, 2017).

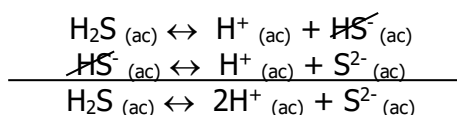
La adición de pequeñas cantidades de cromo a los aceros al carbono no afecta significativamente su resistencia a la corrosión. El molibdeno en contenidos que no sobrepasen el 1 % no influye en la corrosión por oxígeno, pero pueden variar las propiedades protectoras de las capas superficiales de los productos de corrosión, lo que reviste mucha importancia en la corrosión atmosférica (Kuzmin & Samojotski, 1986).

Caracterización fisicoquímica de los medios corrosivos

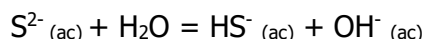
Los resultados de la caracterización fisicoquímica de los medios corrosivos se presentan en la Tabla 2. En la misma se observa que el medio corrosivo 1 proveniente de un tanque de una empresa de producción y extracción evidenció mayor contenido de los iones Na^+ , K^+ , cloruros y sólidos totales que el agua proveniente de una batería

de tratamiento de petróleo (medio corrosivo 2). Este último medio manifestó contenidos superiores de: calcio, hierro, sulfuros, carbonatos, hidrogenocarbonatos que el primer medio corrosivo, lo que denotó mayor agresividad en cuanto a la composición fisicoquímica. Además, se indica que ambos presentaron igual valor de pH comportamiento semejante a lo que se obtuvo en estudios de protección catódica para un tanque de almacenamiento de crudo, donde el pH también resultó básico (Adames *et al.*, 2010; Cueli *et al.*, 2013a).

Todas las sales que provienen de un ácido débil (H₂S), experimentan hidrólisis en medio acuoso y provocan la alteración del pH del medio. En el caso que se investiga se generan iones hidroxilo que denotan el carácter básico de los medios de ensayo. Lo anterior se representa en las siguientes ecuaciones (Adames *et al.*, 2010; Cueli *et al.*, 2016):



Además de que la presencia de iones (HS⁻) indica la relativa alta concentración de sulfuro (S²⁻), que ratifica la naturaleza de crudo pesado del petróleo cubano.



Esta última ecuación justifica la basicidad de los medios corrosivos.

Por otra parte, las conductividades eléctricas resultaron similares, dadas por la presencia de sales. De forma general, tales valores se corresponden, con investigaciones precedentes (Shreir *et al.*, 2000; Cueli *et al.*, 2013a; Adames *et al.*, 2014).

Tabla 2: Resultados de la caracterización fisicoquímica de los medios corrosivos

Índices	Medio corrosivo 1	Medio corrosivo 2
Na ⁺ (mg.L ⁻¹)	16297,60	15036,0
K ⁺ (mg.L ⁻¹)	512,88	443,65
Ca ²⁺ (mg.L ⁻¹)	142,60	792,0
Mg ²⁺ (mg.L ⁻¹)	63,47	< 5
Fe ²⁺ (mg.L ⁻¹)	< 0,01	0,062
Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	24274,80	18519,08
SO ₄ ²⁻ (mg.L ⁻¹)	21,40	93,84
S ²⁻ (mg.L ⁻¹)	32,5±1,5	581,7±26,8
CO ₃ ²⁻ (mg.L ⁻¹)	321,60	403,97
HCO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	392,35	4851,4
Densidad (g.cm ⁻³)	1,025	1,032
pH	8,40	8,40
Conductividad eléctrica (mS/cm)	57,96	57,19
Sólidos Totales (mg.L ⁻¹)	55748	10300

A los medios corrosivos de ambas instalaciones industriales también se les realizó la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅). Los resultados se presentan en la Tabla 3, donde el medio corrosivo 1 manifestó mayor DQO que el 2, mientras que en este último se determinó la mayor DBO₅. Ambos parámetros determinados se relacionan con la contaminación orgánica, que con las conductividades de los medios dadas por los contenidos de sales disueltas facilitaron la existencia de deposiciones del tipo localizada en los materiales metálicos que se evaluaron (Adames *et al.*, 2014).

Tabla 3: Valores de DQO y DBO₅ de los medios corrosivos

Índices	Medio corrosivo 1	Medio corrosivo 2
DQO (mg/L)	5818±310	593±5
DBO ₅ (mg/L)	< 3,0	537±29

El análisis microbiológico que se obtuvo de las muestras de los medios corrosivos se presenta en la Tabla 4. Los resultados manifiestan que existe actividad microbiana, más acentuada en el medio 2, lo que también incide en el proceso de afectación que experimentó el acero que se evaluó.

Tabla 4: Análisis microbiológico de los medios corrosivos

Medio corrosivo	Bacterias	Hongos	Microrganismos totales
1	$5,0 \times 10^4$	$6,0 \times 10^4$	$1,1 \times 10^5$
2	$2,5 \times 10^6$	$5,0 \times 10^3$	$2,5 \times 10^6$

Evaluación del comportamiento electroquímico de los aceros en los medios corrosivos

Resistencia de Polarización Lineal (LPR)

El acero en contacto con el medio corrosivo 1 evaluado por la técnica de LPR (Tabla 5) mostró que el material metálico alcanzó mayor velocidad de corrosión en todas las condiciones evaluadas, manifestándose como menos resistente a la corrosión en dicho medio corrosivo. El aumento del factor térmico también se apreció en los efectos de corrosión del acero.

En los dos medios corrosivos, se indica además que el acero mostró un aumento de velocidad de corrosión cuando se incrementó la temperatura, según lo definido por Arrhenius (Navarro *et al.*, 2017), lo que evidenció que su resistencia al fenómeno disminuyó.

De forma general, las velocidades de corrosión que se alcanzaron expresaron que los mayores valores se obtuvieron en el medio corrosivo 2, lo que se correspondió con las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, DQO y DBO₅ donde este medio se consideró de superior agresividad al ponerse en contacto con el acero en las condiciones de ensayo (Adames *et al.*, 2014).

El hierro en agua de mar, según se conoce, exhibe una velocidad de corrosión de 0,1 mm/año (Tomashov, 1971; Uhlig, 1970) y otros autores plantean valores entre 0,13 - 0,17 (mm/año) (Fontana & Greene, 1977; González, 1989). En la investigación, las velocidades de corrosión que se obtuvieron superan a las que se reportaron en la literatura. Por lo anterior se clasificaron todos los valores como altos. La resistencia del material se cataloga como pobre en todos los casos excepto en el medio corrosivo 2 a la temperatura de 90 °C que es inaceptable.

Con el estudio se demostró que las aguas analizadas resultaron agresivas al material de construcción del oleoducto. El mismo presentó afectaciones desde el punto de vista de corrosión al ponerse en contacto con dichos medios corrosivos (Cueli *et al.*, 2013b; Adames *et al.*, 2014) La resistencia del acero al fenómeno de corrosión varió según las condiciones de ensayo, lo que se estudió en trabajos precedentes de aceros evaluados por técnicas electroquímicas (Cueli *et al.*, 2016). De forma general, la resistencia al fenómeno de corrosión disminuyó con el aumento de la temperatura en los medios evaluados en la investigación.

Otra forma de presentar los resultados es la que se observa en la Figura 2 donde se evidencia que la velocidad de corrosión del acero evaluado en los dos medios corrosivos aumentó con el crecimiento del factor térmico en todas las condiciones ensayos que se realizaron, estando en correspondencia con lo que se plantea en la literatura. Así mismo se demuestra que las afectaciones del material denotaron que la resistencia al fenómeno de corrosión disminuyó con el aumento de la temperatura para cada uno de los medios ensayados.

Tabla 5: Comportamiento electroquímico de aceros en los medios corrosivos por la técnica de LPR

Ensayos	LPR (Ωcm^2)	Vc (mm/año)
Temperatura de ensayo 34 °C		
Acero + medio corrosivo 1	155,9789	1,9309 ± 0,0900
Acero + medio corrosivo 2	130,136	2,3161 ± 0,1739
Temperatura de ensayo 70 °C		
Acero + medio corrosivo 1	109,7625	2,7498 ± 0,3031
Acero + medio corrosivo 2	72,2722	4,1678 ± 0,2165
Temperatura de ensayo 90 °C		
Acero + medio corrosivo 1	65,0864	4,6384 ± 0,5306
Acero + medio corrosivo 2	41,1728	7,3325 ± 0,8339

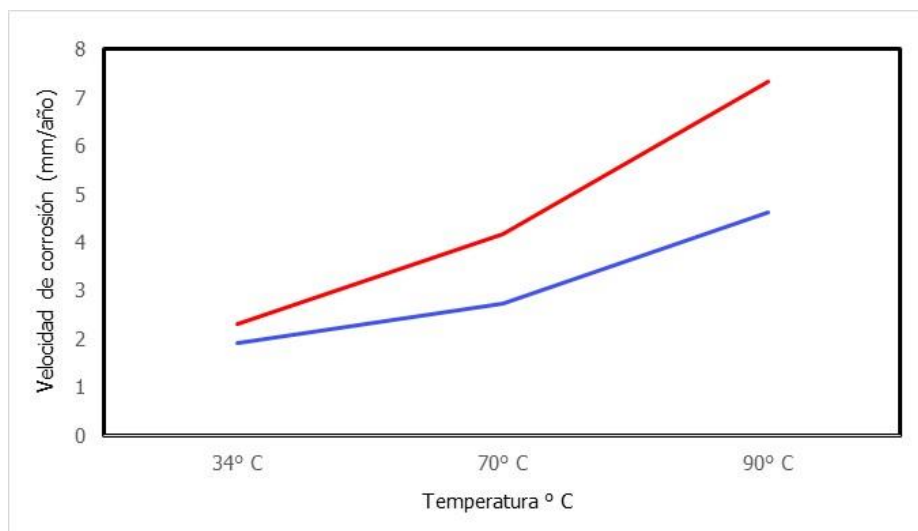


Fig. 2: Comportamiento de la velocidad de corrosión del acero en los dos medios corrosivos en función de la temperatura del ensayo: medio corrosivo 1 (curva azul), medio corrosivo 2 (curva roja).

Curvas de polarización

En la Figura 3 se presenta el comportamiento electroquímico mediante curvas de polarización del acero en el medio corrosivo 1. A las temperaturas de 70 °C y 90 °C se observaron desplazamientos de potenciales hacia valores más positivos (curva anódica) en el primer caso y hacia valores más negativos (curva catódica) en el segundo caso. Las ramas anódicas y catódicas en las tres temperaturas mostraron comportamientos similares, observándose procesos de difusión y transferencia de carga, propios del fenómeno de corrosión del acero en medio acuoso.

La evaluación electroquímica del acero en el medio corrosivo 2 se presenta en la figura 4 mediante curvas de polarización. A 70 °C y 90 °C se obtuvieron desplazamientos de potenciales hacia valores más negativos con respecto a la temperatura ambiente, que se corresponden a comportamientos diferentes con relación a lo obtenido para el medio corrosivo 1. En ambas temperaturas, las ramas catódicas indicaron procesos de transferencia de cargas, y las anódicas de difusión, debido a la disminución de las pendientes. A temperatura ambiente (34 °C), en la curva catódica se evidenció proceso de difusión y en la anódica transferencia de carga. Resultados similares se obtuvieron en investigaciones precedentes (Cueli *et al.*, 2016).

Para atenuar las afectaciones de corrosión del acero de construcción de oleoducto se deberán aplicar métodos de protección para alargar la vida útil de la instalación, a partir de las valoraciones realizadas en el presente artículo.

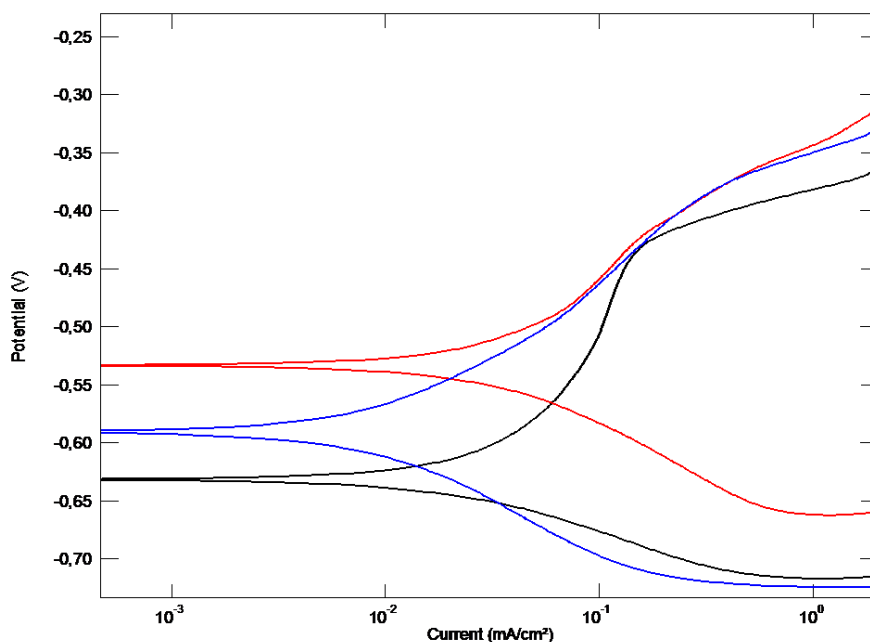


Fig. 3: Curvas de polarización del acero en medio corrosivo 1, temperatura 34 °C (curva azul), 70 °C (curva roja) y 90 °C (curva negra)

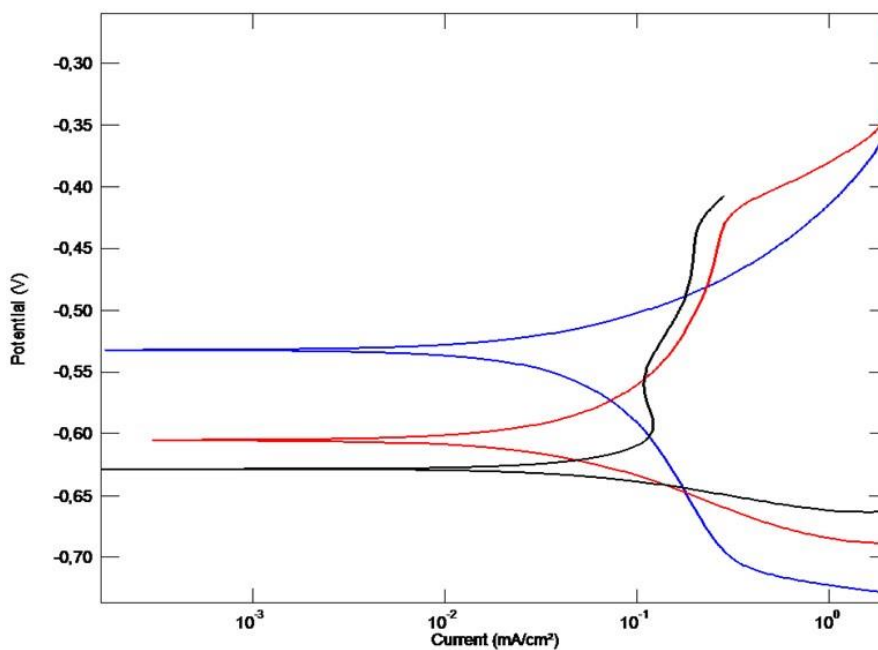


Fig. 4: Curvas de polarización del acero a temperatura 34 °C (curva azul), 70 °C (curva roja) y 90 °C (curva negra) en medio corrosivo 2.

CONCLUSIONES

Los medios corrosivos mostraron diferencias en cuanto a la composición fisicoquímica y microbiológica. El medio corrosivo 1 resultó ser menos agresivo que el 2.

Del comportamiento electroquímico del acero en los medios corrosivos, se obtuvo que el mismo disminuyó la resistencia a la corrosión con el aumento de la temperatura de ensayo.

Las curvas de polarización del acero en los medios corrosivos evidenciaron procesos de transferencia de carga y difusión.

REFERENCIAS

- Adames, Y., Casas, M.E., Davis, J. & Rizo, I. (2010). Soluciones alternativas para la protección interior de tanques. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 41, 1-11. Disponible en: <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=181620500050>
- Adames, Y., Casas, M.E., Cueli, A. & Rizo, I. (2014). Comportamiento del agua de formación del petróleo y de las aguas residuales en instalaciones petroleras desde el punto de vista de la corrosión. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 45, 81-89
- APHA-AWWA-WEF (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Ed. R.B. Baird, A.N.D. Eaton & E.W. Rice. ISSN 55-1979 Washington DC. 2017.
- ISO 9297-1989 (2010). *Examination of water for chemical substances. ISO Technical Specification (TS)*, App., ICS 13.060.50, Geneva. Switzerland, Stage: 90.93.
- ASTM G1-03 (2011). *Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM G5-14 (2014). *Standard Reference Test Method for making potentiodynamic anodic polarization measurements*. ASTM International, United States
- ASTM G 16-13 (2013). *Applying statistic to analysis of corrosion data*. ASTM International, United States.
- ASTM G 59-97 (2014). *Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance in corrosion testing*. ASTM International, United States.
- Cueli, A., Adames, Y., Davis, J., Rivera, Y. (2013a). Efecto corrosivo del agua acompañante del petróleo, contaminada con H₂S, sobre el acero API 5L X₅₂. *Revista Cubana de Química*, 25(2), 154-164.
- Cueli, A., Adames, Y., Davis, J. Rivera, Y. (2013b). Efecto corrosivo del agua acompañante del petróleo contaminada con CO₂ sobre el acero de los ductos. *Revista Cubana de Ingeniería*, IV(3), 47-52.
- Cueli, A., Adames, Y. & Davis, J. (2016). Evaluación electroquímica de dos aceros para la reparación de tanques. *Revista Industria Química*. Instrumentación y control de procesos, España, 70-73.
- Dixon, W.J. & Massey, F.J. (1974). *Introducción al análisis estadístico*. Edi. R., Inst. Cubano del Libro, p. 408.
- Domínguez, J. & Castro, D.M. (1987). *Corrosión y protección de metales*. Ediciones ENPES. La Habana.
- Fontana, M.G. & Greene, N. (1977). *Corrosion Engineering*. 2da edición. Mc.Graw-Hill International Book Company. p.372
- Fuentes, C. & Peña, D. (2007). Predicción de la corrosión por CO₂ + H₂S en tuberías de acero al carbono. *Scientia et Technica*, XIII (36), 881-886. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5147/2325>
- González, J.A. (1989). *Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas*. España. ISBN: 84-00-6990-0, p. 104.
- <http://www.executivebs.org/publishing.cl/>

- Groysman, A. (2014). *Corrosion in systems for storage and transportation of petroleum products and biofuels*. Ed. Springer. ISBN 978-94-007-7883-2 (eBook)
- Guliaev, A.P. (1978). *Metalografía*. Tomo II, Editorial Mir Moscú, p. 34-47.
- Kuzmin, B.A. & Samojtski, A.I. (1986). *Metalurgia, metalografía y materiales de construcción*. Editorial Mir Moscú, p. 170-172.
- Navarro, J., Cuartas, B., Ortega, E., Fuentes, P. & Abad, A. (2017). *Cinética Química y Catálisis. Vol 1: Modelos cinéticos en sistemas homogéneos*. Editorial Universitat Politècnica de València. España, p. 37-42
- Páez, H.V. (2008). *Evaluación de la calidad del agua de proceso, en un ingenio azucarero*. Trabajo de graduación para optar por el título de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Consultado: 26 de septiembre 2013. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1088_Q.pdf
- Quispe, J.M. (2017). *Aplicación de la técnica de impedancia electroquímica para el estudio y la evaluación de la corrosión en aceros HSLA X65 en medio simulado de SOUR GÁS H₂S*. Tesis presentada para optar al título profesional de Ingeniera de Materiales. Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ingeniería de Procesos, Escuela Profesional de Ingeniería de Materiales. Disponible en <http://bibliotecas.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2410>
- Ramos-Gómez, F., Adames-Montero, Yosmari & Marrero-Águila, R. (2019). Diseño de un Sistema de Protección Catódica para el Interior de un tanque de almacenamiento de petróleo. *Revista Tecnología Química*, 39 (2), 318-333. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852019000200318
- Salazar, J.A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Tecnología en Marcha*, 28 (3), 127-136. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- Santos, K. & Marrero R. (2014). *La problemática de la corrosión en la industria del petróleo. Ejemplos de casos en Cuba*. Monografía Facultad de Ingeniería Química. Cujae. ISBN 978-959-261-524-3
- Schweitzer, P (2007). *Fundamentals of metallic corrosion. Atmosphere and media corrosion*. United States of America: Taylor and Francis Group, p.45-46.
- Schweitzer, P. (2010). *Fundamentals of Corrosion. Mechanism, causes, and preventative methods*. United States of America: Taylor and Francis Group. ISBN 978-959-7107-33-9, p. 83.
- Shreir, L.L., Jarman, R.A. & Burstein, G.T. (2000). *Corrosion Metal/ Environment reactions*, Vol. 1, 3rd Edition. p. 88, 393, 398, 401.
- Tomashov, N.D. (1971). *Theory of corrosion and protection of metals*. Edición Revolucionaria, Cuba, p. 170.
- Uhlig, H.N. (1970). *Corrosión y control de la corrosión*. España: Ediciones URMO, p. 160.