

The Materials Research Society (MRS)

XXII INTERNATIONAL MATERIALS

RESEARCH CONGRESS 2013

NACE International Congress-Mexican Section

Gabriela K. Pedraza-Basulto*

Centro de Investigación en Materiales Avanzados,
Departamento de Integridad Estructural y Materiales
Compuestos, Miguel de Cervantes 120, Complejo
Industrial Chihuahua, Chihuahua, México.

E-mail: *gabrielakarina.pedraza@gmail.com

José G. Chacón-Nava

Centro de Investigación en Materiales Avanzados,
Departamento de Integridad Estructural y Materiales
Compuestos, Miguel de Cervantes 120, Complejo
Industrial Chihuahua, Chihuahua, México.

JamnieY. Achem-Calahorra

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma
de Chihuahua (UACH-FCQ), Chihuahua, México

José A. Cabral-Miramontes

Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería
Aeronáutica (CIIA), Facultad de Ingeniería Mecánica y
Eléctrica (FIME), Universidad Autónoma de Nuevo León
(UANL). Aeropuerto Internacional del Norte. Carr.
Salinas Victoria Km. 2.3. Apodaca, Nuevo León,
México.

STRESS CORROSION CRACKING ASSESSMENT OF API STEEL IN ETHANOL-GASOLINE BLENDS

Abstract

The effect of water content (0.5%, 5%, and 10%V) in E85 blend and 0.5%V E10 blend on the stress corrosion cracking (SCC) susceptibility of X-52 carbon steel was investigated. Slow strain rate tests (SSRT) coupled with electrochemical noise measurements (EN) were carried out using a strain rate of $1 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$. In general, scanning electron microscopy (SEM) observations on fracture surfaces showed a ductile behavior. However, secondary cracking was only observed for specimens exposed to solution containing up to 5%V water. En show of a likely localized corrosion process occurring at low water concentrations, whereas for water content above 5%V, a uniform corrosion process seems more likely to occur.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, API Steel, ethanol, gasoline.

Introducción

El etanol como una de las fuentes alternas de energía representa una fuente renovable y amigable con el medio ambiente y con la población, debido a que puede reducir las emisiones contaminantes de CO₂, se ha cuestionado la relación, entre la energía que se obtiene de esta fuente y la de consumo para el proceso de obtención de la misma, cuya finalidad es su aprovechamiento como biocombustible, autores como Pimentel (2003), afirman que la producción de etanol requiere más energía que la que produce ^[1]. Sin embargo, hoy en día la producción del etanol, requiere menor uso de energía por unidad de producto. Los avances en las tecnologías de conversión de combustible, han mejorado considerablemente la eficiencia energética de la producción de etanol, en comparación con la década pasada ^[2-3].

El etanol siendo utilizado como oxigenante en mezclas etanol-gasolina y en sustitución del Metil-terbutil-eter (MTBE), además de incrementar el octanaje representa una opción ante la demanda en el consumo energético de la industria automotriz, que se ha visto acentuada en los últimos años ^[4]. Sin embargo, uno de los tipos de falla comúnmente encontrados para medios etanólicos en aceros al carbono, es la corrosión Asistida por Esfuerzo (CAE) ^[5-8]. De acuerdo a lo reportado por Sridhar ^[7], la forma más segura para hacer el transporte de estas mezclas es vía la infraestructura ya instalada de oleoductos.

Las especificaciones y los procedimientos para el manejo del etanol grado combustible, se describen en la norma ASTM D 4806 ^[9], donde el requerimiento del (% Vol) de Agua es máximo 1%. No obstante, de acuerdo a lo reportado en la literatura, la recomendación es que se investigue el comportamiento de la CAE más allá de los límites establecidos en la Norma ASTM D 4806, con el objeto de hacer el proceso comercialmente aceptable ^[10].

En México la Secretaria de Energía (SENER) a partir de febrero del 2008 expide la ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos que, entre otros rubros cubre: impulsar el desarrollo sustentable de la producción y comercialización de Insumos, así como de la producción, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos, así como el desarrollo y la generación de la investigación científica que permita comprender la forma apropiada para toda la infraestructura en relación. De acuerdo a lo anterior, el objetivo de este trabajo es evaluar la susceptibilidad a la CAE del acero grado API 5L-X52 en mezclas de etanol-gasolina al 85% y 10% (%V) de etanol con la adición de agua en diferentes concentraciones (0.5%, 5% y 10%), así como en un medio blanco mediante la técnica de velocidad de extensión constante (máquina CERT) en conjunto con las técnica de Ruido Electroquímico.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Material

Se utilizaron muestras de una tubería de acero grado API 5L-X52, la cual se caracterizó mediante la técnica de chispa de arco para determinar su composición química, tal como se muestra en la Tabla 1. También se observó la microestructura del acero, Figura 1.

Tabla 1. Composición Química en porcentaje en peso

API 5L-X52	C	Mn	P	Fe
NORMA API	0.39 MAX	1.25 MA X	0.04 MA X	Balance
ANÁLISIS QUÍMICO	0.13	1.26	0.01 7	Balance

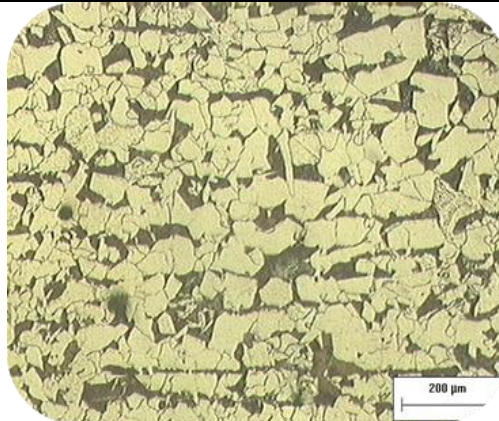


Figura 1. Metalografía Típica del Acero API 5L-X52, revelando dos fases: perlita (fase oscura) y ferrita (fase blanca)

Preparación de muestras

Las probetas para el ensayo en la máquina CERT se maquinaron de acuerdo a la norma NACE TM0177- 05 ^[11] Al término del maquinado y con el fin de eliminar las marcas ocasionadas por el mismo, las probetas se prepararon superficialmente hasta una lija 800 para obtener una superficie homogénea. Antes del montaje se desengrasaron con acetona para evitar contaminación en la solución, Figura 2.

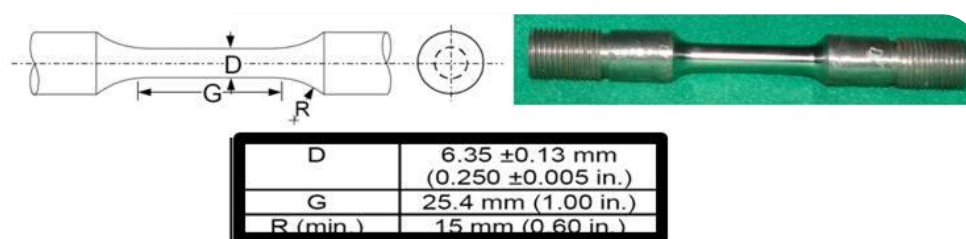


Figura 2. Dimensiones para Probeta en el ensayo de la máquina CERT

La preparación del electrolito se hizo a temperatura ambiente (25 °C) y se regularon 2 variables: concentración de agua presente y oxígeno. En el primer caso el % de agua efectuando el análisis de %V de agua antes y después del ensayo, y en el segundo caso, el oxígeno llenando en su totalidad las celda de picado y la celda CERT.

La matriz de experimentación con los medios de ensayo se muestra en la Tabla 2, donde E significa mezcla con Etanol, los dígitos que le anteceden significan el %V de agua en cada mezcla y los dígitos siguientes el porcentaje en volumen del contenido de etanol, basados en la Norma ASTM D 4806 como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2. Matriz de Experimentación

Nomenclatura	Agua %V	Etanol %V	Ácido acético mg/L	NaCl mg/L	Metanol %V
0.5E85	0.5	85	5.6	32	0.5
5E85	5	85	5.6	32	0.5
10E85	10	85	5.6	32	0.5
0.5E10	0.5	9	5.6	32	0.5
BLANCO	GLICERINA				

Tabla 3. Especificaciones para etanol como combustible de acuerdo a ASTM D 4806

Requerimiento	Mínimo	Máximo	Método de medición
Etanol (vol%)	92.1	—	ASTM D 5501
Metanol (vol%)	—	0.55	
Gomas Disueltas (mg/100 mL)	—	5.0	ASTM D 381
Agua (vol%)	—	1.0	ASTM D 6304
Contenido de denaturante (vol %)	1.96	4.76	
Cloruros inorganicos (mg/L)	—	32	ASTM D 512
Cobre (mg/kg)	—	0.1	ASTM D 1688
Acidificación como ácido acético (mg/L)	—	5.6	ASTM D 1613
pH	6.5	9.0	ASTM D 6423

Parámetros de operación

Los ensayos para evaluar la susceptibilidad a CAE se llevaron a cabo en una celda de Nylon Nylacero, tal como se muestra en la Figura 3. La celda se sella una vez agregado el electrolito. El arreglo de tres electrodos, utilizado para la prueba de ruido electroquímico, se compone de un electrodo de referencia Ag/AgCl/EtOH/LiCl, estabilizado a 100 mV con respecto a un electrodo de Calomel, como electrodo de trabajo uno y dos, acero API 5L-X52, monitoreado durante todo el ensayo a velocidad de extensión constante, adquiriendo un dato por segundo. El equipo para el ensayo es una maquina CERT, por sus siglas en Ingles: Constant Extention Rate Test y se utilizó una velocidad nominal de deformación de $10^{-6} s^{-1}$.

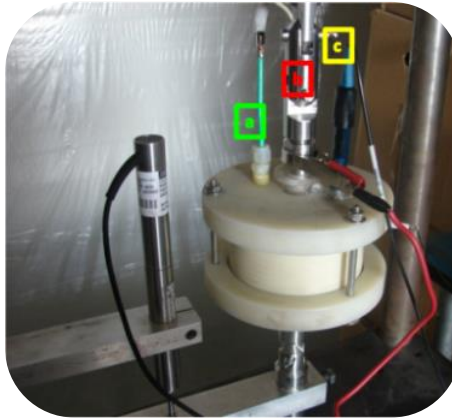


Figura 3. Celda CERT con arreglo electroquímico de tres electrodos. (a) Electrodo de trabajo 2 de acero API 5L X52, (b) Electrodo de trabajo 1 de acero API 5L-X52 y (c) Electrodo de Referencia Ag/AgCl/EtOH/LiCl.

Análisis de agua y conductividad

El contenido de agua se verificó en el equipo Karl Fisher, Figura 4 bajo las siguientes consideraciones al inicio y término del ensayo CERT se tomó una muestra del electrolito, y se midió el % de agua, así como el pH y la conductividad. La celda se preparó con el electrolito, se selló evitando de esta forma que existan variaciones significativas en el oxígeno y/o % de agua, recordando el carácter higroscópico del etanol.



Figura 4. Esquema del equipo Karl Fisher para determinar el %de Agua en el electrolito

Microscopía Electrónica de Barrido

Al término del ensayo en la máquina CERT, las probetas se analizaron mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), en un equipo JSM5800LV.

Las probetas se cortaron y se examinaron con y sin productos de corrosión, limpiándolas posteriormente mediante ultrasonido en etanol, Figura 5 y se secaron a 60°C en una mufla. En el MEB, se observó la morfología de la superficie de fractura y en sentido longitudinal en la zona del cuello de estrangulación.

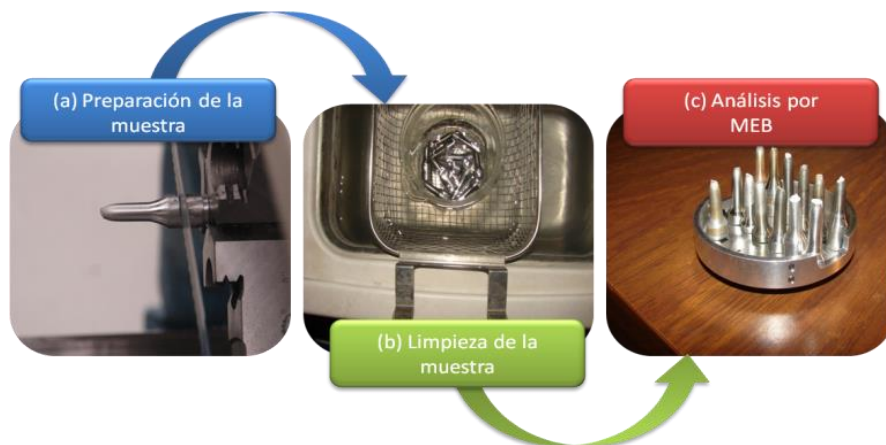


Figura 5. (a) Corte de probetas para análisis en el MEB (b) Limpieza de las probetas mediante ultrasonido (c) Análisis en MEB en la zona de fractura.

Resultados y análisis

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas se presentan en la Figura 6, donde se observa que la curva correspondiente al medio 0.5E85, presenta la menor deformación alcanzada en todos los ensayos, lo cual tiene correspondencia con el %E, que de igual manera es el menor de todas muestras ensayadas, con un valor de 7% mientras que el %E para el medio inerte es del 8%.

Sin embargo, las diferencias entre las diferentes mezclas comparadas entre sí no es un factor discriminante, así mismo el ensayo con el menor esfuerzo máximo alcanzado es para la muestra 10E85. La diferencia entre los resultados de las diferentes mezclas de electrolitos como se observa, es de acuerdo al criterio de McIntyre^[12], que establece el grado de susceptibilidad en cinco categorías, a través del Índice de Susceptibilidad de Reducción de área (I_{RA}), siendo la categoría I aquella que no es susceptible a la CAE, mientras que la categoría V es indicativa de una alta susceptibilidad a la CAE.

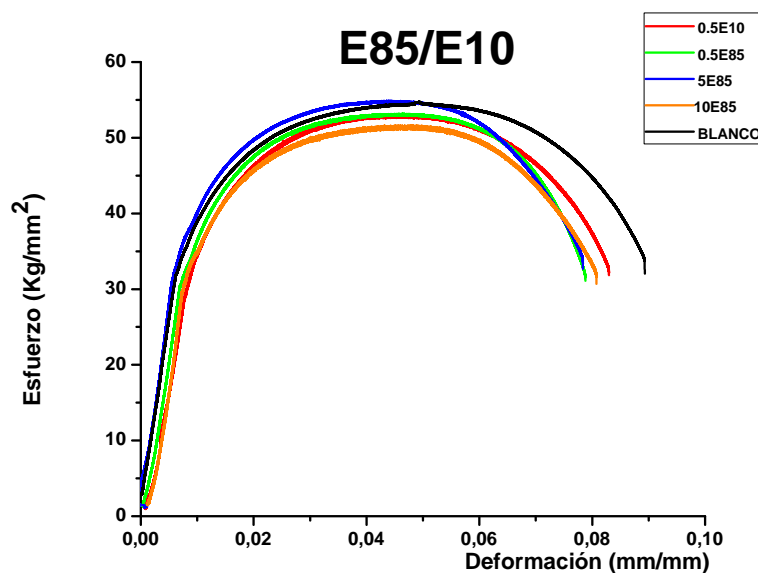


Figura 6. Curva Esfuerzo-Deformación del acero API5L-X52 en mezclas Etanol-Gasolina al 95% y 85% en volumen de etanol, variando el contenido (%V) de agua

Los resultados en los parámetros mecánicos de los ensayos en la máquina CERT, se muestran en la Tabla 4. Los parámetros de ductilidad son el porcentaje de elongación (%E) y el porcentaje de reducción de área (%RA)^[13]. Se aprecia que solo las muestras con 0.5% en Volumen de agua para la mezcla E85 presenta la categoría III, la cual establece que el material es moderadamente susceptible a la CAE, mientras que para el resto de los medios no hay tendencia a susceptibilidad de daño por CAE.

Este comportamiento tiene soporte en la literatura, donde muestras con un %V de agua de 5% a 10% no muestran evidencia de ser susceptibles a la CAE; sin embargo muestran tendencia a la corrosión localizada y a corrosión generalizada ^[14].

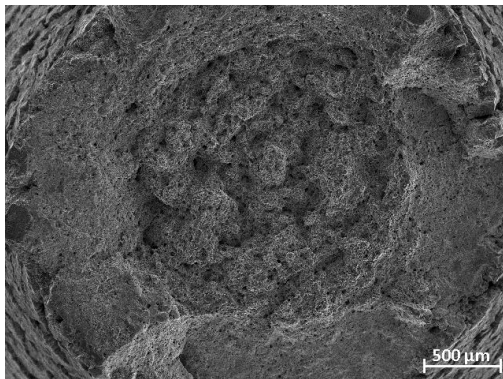
Tabla 4. Resultados del ensayo a velocidad de deformación constante.

ENSAYO	%E	%RA	I _{RA}	MEB
0.5E85	7.30	69.24	0.98	Morfología Dúctil / Medianamente Susceptible a CAE
5E85	7.66	70.98	1.00	Morfología Dúctil / No Susceptible a CAE
10E85	7.79	79.33	1.12	Morfología Dúctil / No Susceptible a CAE
0.5E10	7.55	71.25	1.002	Morfología Dúctil / No Susceptible a CAE
BLANCO	8.09	70.61	1	Morfología Dúctil / No Susceptible a CAE

La Figura 7 muestra las micrografías obtenidas del MEB de las muestras después del ensayo CERT, observándose solo un agrietamiento secundario en la mezclas 0.5E85, misma que de acuerdo al criterio de McIntyre presenta moderada susceptibilidad a la CAE, es importante hacer mención que este valor se encuentra por debajo del valor establecido por la norma ASTM D 4806, misma que de acuerdo a las recomendaciones del Reporte Técnico API D939, debe de ser reconsiderada en relación a los valores máximos permisibles de agua, lo cual con los resultados obtenidos en este trabajo queda como precedente, del mismo modo de acuerdo a lo reportado por Shidar y considerando lo expuesto anteriormente el agua en este caso no es promotora de CAE.

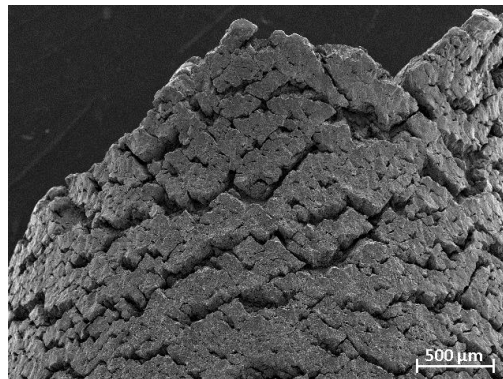
SUPERFICIE DE FRACTURA

0.5E85

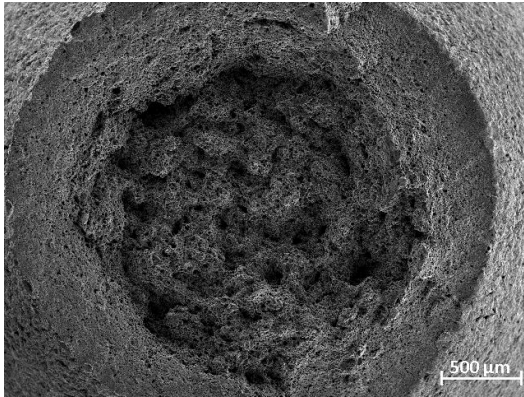


VISTA LATERAL

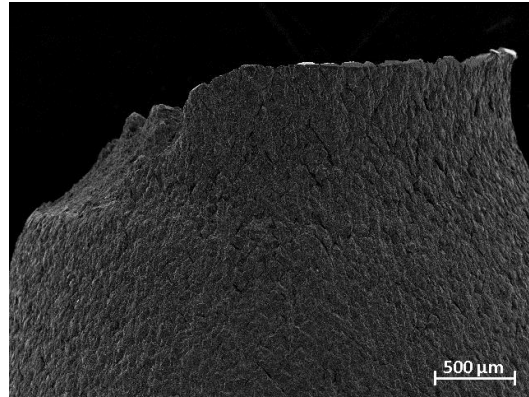
0.5E85



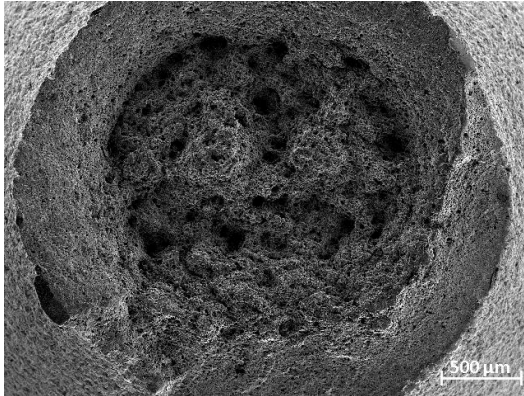
5E85



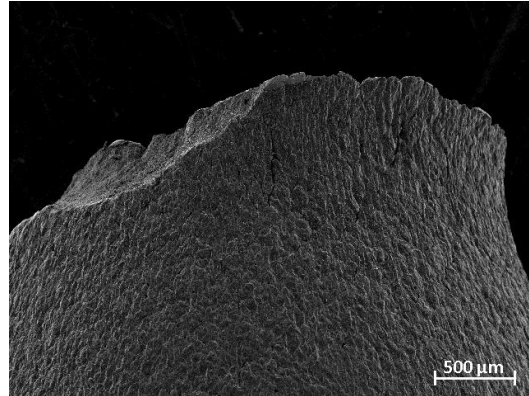
5E85



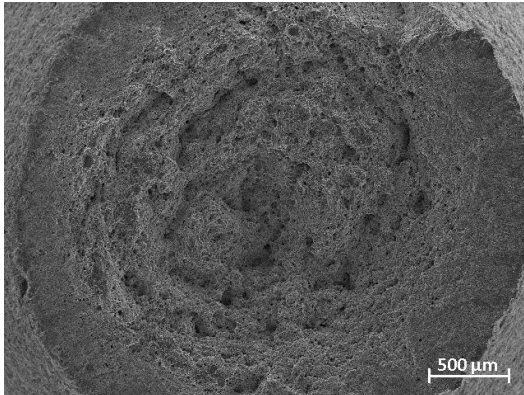
0E85



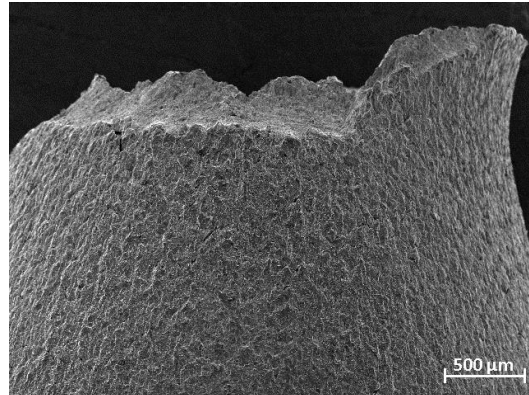
10E85



0.5E10



0.5E10



BLANCO

BLANCO

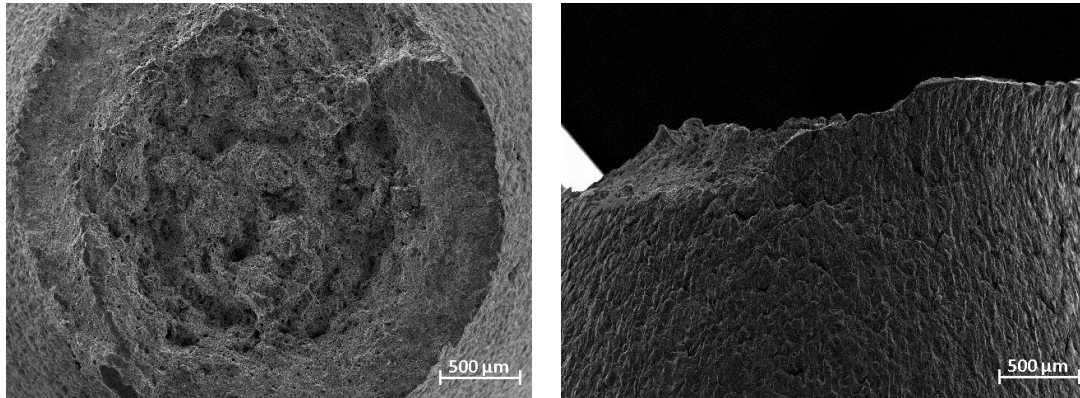


Figura 7. Micrografías obtenidas de MEB a 40X, en todos los casos la fractura es de tipo Dúctil, solo en la muestra con contenido de agua de 0.5E85% se presenta agrietamiento secundario

Las pruebas de ruido electroquímico, desde un punto de vista cualitativo ha sido reportado que los valores de los parámetros estadísticos tales como la desviación estándar del potencial (σ_v) y la corriente (σ_i), así como la raíz cuadrática media (rms), pueden representar el estado de corrosión del metal y permitir conocer la naturaleza del ataque ^[15].

Los cálculos de dichos parámetros estadísticos, así como el ajuste lineal se realizaron mediante el programa tendencia grado 1 ^[16], se determinaron parámetros tales como desviación estándar del potencial y de la corriente, mismos que se relacionan a través de su cociente con resistencia al ruido ^[17- 20] mediante la siguiente expresión:

$$Rn = \frac{\sigma_v}{\sigma_i} \quad (1)$$

Donde:

Rn: Resistencia al ruido

σ_v =Desviación estándar del potencial mV

σ_i = Desviación estándar de la corriente mA

Los resultados de Ruido Electroquímico, cuyo ensayo se realizó de forma simultánea con el ensayo CERT, se analizó de manera visual las series de tiempo en potencial y corriente, para el medio 0.5E85 y para el medio 0.5E10, siendo el primero el cual se presentó el menor %E en el ensayo CERT. El 0.5E85 presenta transitorios catódicos y anódicos para la serie de tiempo en corriente de una amplitud promedio de $\pm 6 \times 10^{-5}$ mA (Figura 8). Para el medio 0.5E10 la amplitud promedio es de $\pm 5 \times 10^{-5}$ mA (Figura 9), lo cual se atribuye a que en el medio 0.5E85 la formación del agrietamiento avanza por el paso secuencial y

sucesivo de la formación y rompimiento de la película pasiva por la disolución del material.

Esfuerzo Máximo 0.5E85

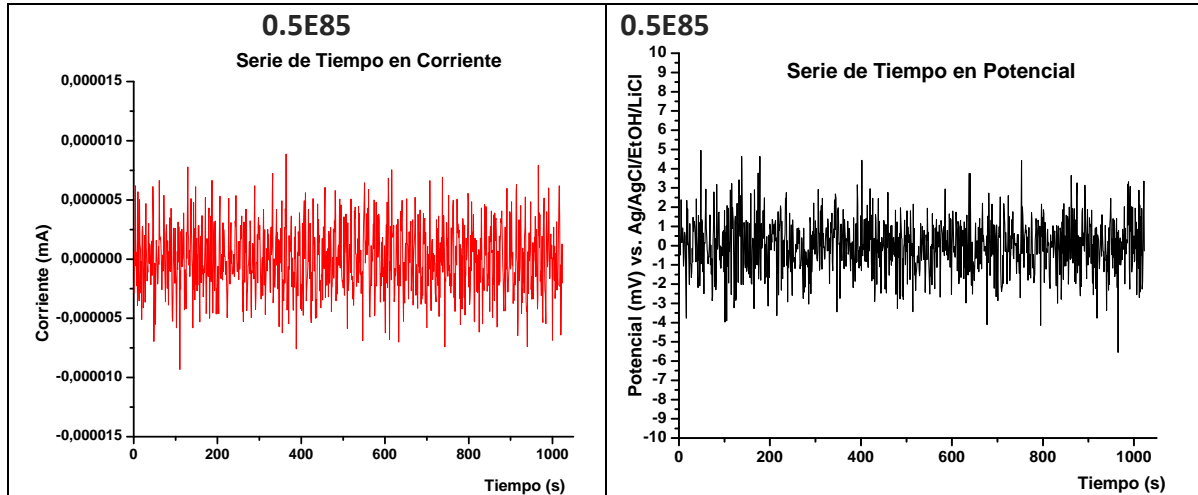


Figura 8. Series de Tiempo en Potencial y Corriente de la curva Esfuerzo-Deformación, en el Esfuerzo Máximo, en la solución 0.5E85.

Esfuerzo Máximo 0.5E10

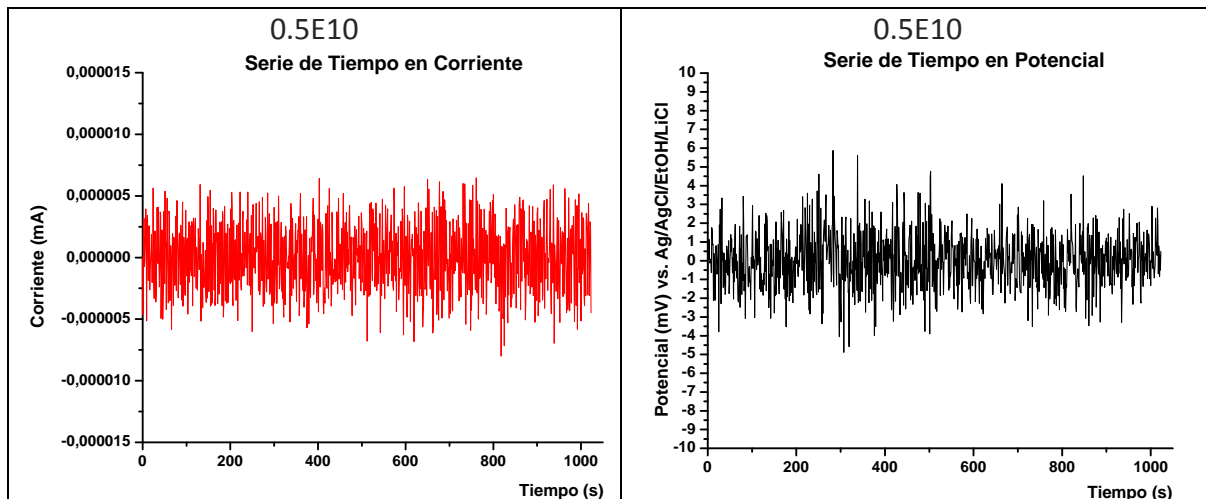


Figura 9. Series de Tiempo en Potencial y Corriente de la curva Esfuerzo-Deformación, en el Esfuerzo Máximo, en la solución 0.5E10.

Sin embargo, para poder determinar el tipo de corrosión es necesario hacer un ventaneo, que permita hacer el análisis de forma más clara, esto es debido a que existe un rompimiento de enlaces ocasionados por efecto mecánico del propio ensayo, esto permite que exista la posibilidad de un enmascaramiento de la señal de Ruido Electroquímico ^[21].

Se observa en la Figura 10, un ventaneo para el medio 0.5E85 se observa que las flechas indican la correspondencia que existe en la serie de tiempo de potencial y corriente, en donde para un cambio de dirección en la corriente existe un cambio en sentido contrario para el potencial y viceversa. Este comportamiento obedece a un daño por corrosión localizada.

Ventaneo en el Esfuerzo Máximo 0.5E85

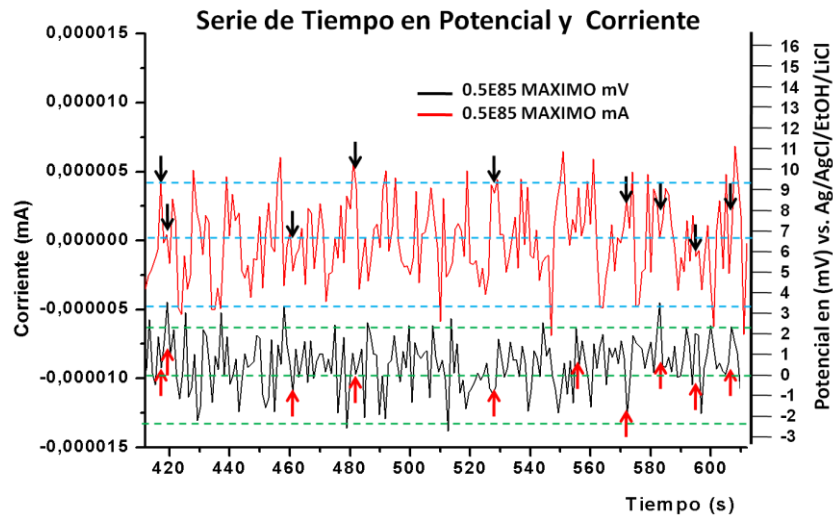


Figura 10. Ventaneo en las Series de Tiempo en Potencial y Corriente en el Esfuerzo Máximo, para el medio 0.5E85.

La Figura 11 que presenta el medio 10E85, siendo la misma mezcla pero con diferente concentración de agua, se hace evidente que la correspondencia en transitorios anódicos y catódicos para la serie de tiempo en potencial y corriente en este caso es menor que la que se presenta en el medio con menor contenido de agua (Figura 10), motivo por el cual el tipo de corrosión presente para la mezcla con mayor contenido de agua es del tipo generalizada.

La Figura 12, presenta pocos transitorios en comparación con el medio 0.5E85, sin embargo, es de esperarse que exista daño por corrosión localizada en menor densidad de picadura que en el medio antes citado. Las mezclas con menor contenido de agua presentan daño por corrosión localizada mientras que las mezclas con mayor contenido de agua presentan daño por corrosión generalizada.

Ventaneo en el Esfuerzo Máximo 10E85

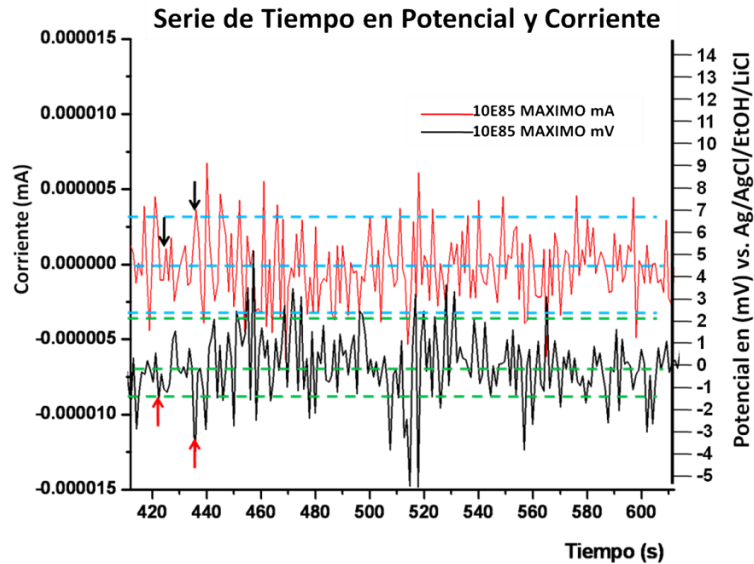


Figura 11. Ventaneo en las Series de Tiempo en Potencial y Corriente en el Esfuerzo Máximo, para el medio 10E85.

Ventaneo en el Esfuerzo Máximo 0.5E10

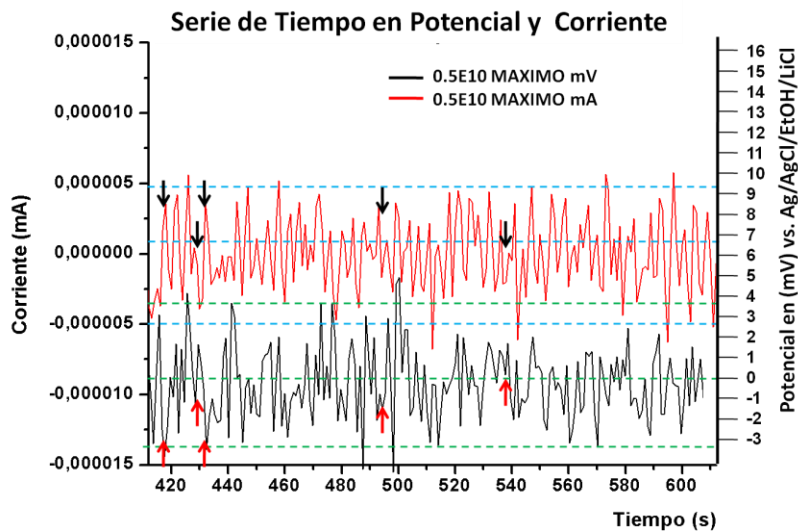


Figura 12. Ventaneo en las Series de Tiempo en Potencial y Corriente en el Esfuerzo Máximo, para el medio 0.5E10.

En la Figura 13 se presentan los resultados obtenidos para la R_n , en la cual se aprecia que para los tres puntos de interés, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de fractura el orden de magnitud para las muestras ensayadas es el mismo.

El comportamiento de los medios ensayados a través de la técnica Ruido Electroquímico, analizados mediante la Resistencia al Ruido (R_n), presentan en las mezclas con menor contenido de agua, una tendencia a disminuir su valor de R_n mientras que, los medios con mayor contenido de agua presentan la tendencia de aumentar su R_n .

Además, se presenta formación de productos de corrosión en el cuello de estricción de la probeta ensayada, mientras que para las mezclas con 0.5%V de agua no se presenta este efecto.

Esto se atribuye a que existe un continuo rompimiento y formación de daño por corrosión localizada, para las mezclas con menor contenido de agua mientras que para las mezclas con mayor contenido de agua una vez que se formaron los productos de corrosión, solo se presenta corrosión generalizada.

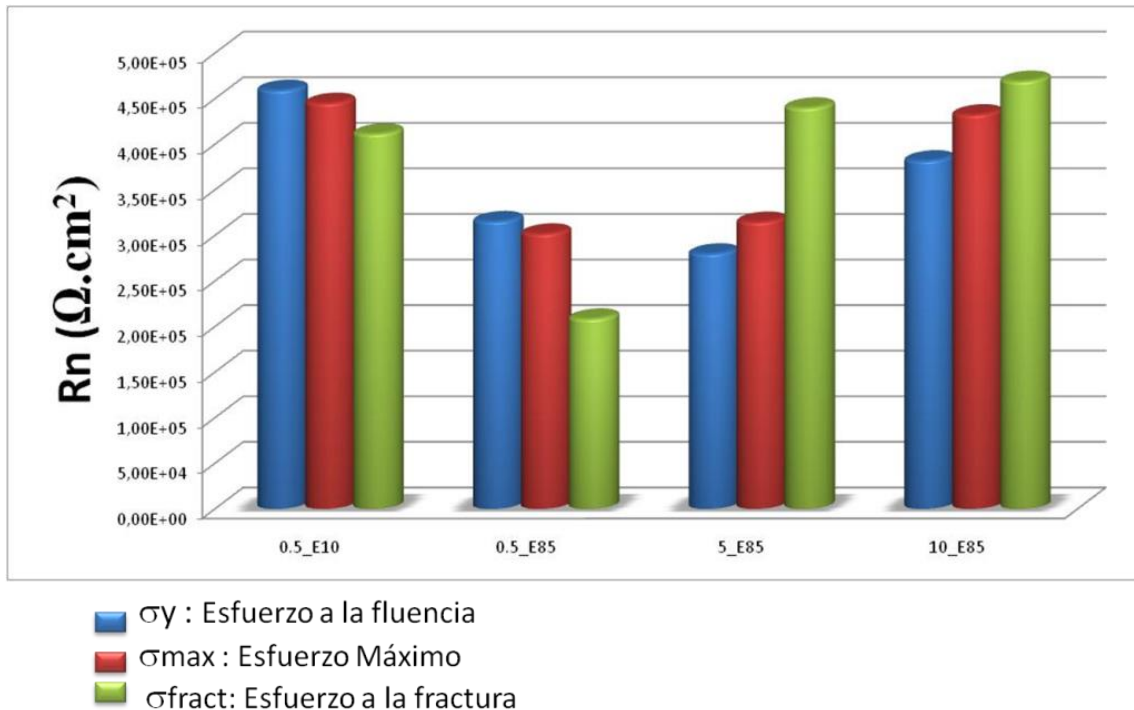


Figura 13. Resistencia al Ruido de los medios ensayados en los tres puntos de interés de la Curva Esfuerzo Deformación

Se puede observar en la Figura 14 los valores presentados de potencial, de acuerdo a Gui et al.,^[22] se establece un rango de -100 mV a 400 mV como una zona susceptible a CAE en condiciones aereadas o en condiciones de producción, es decir, el etanol que es suministrado por los proveedores directamente de los tanques de almacenamiento. Se observa que el medio 0.5E85 es el que resulta más cercano a ese rango de potenciales donde es susceptible el material a CAE de un acero de bajo contenido de carbono.

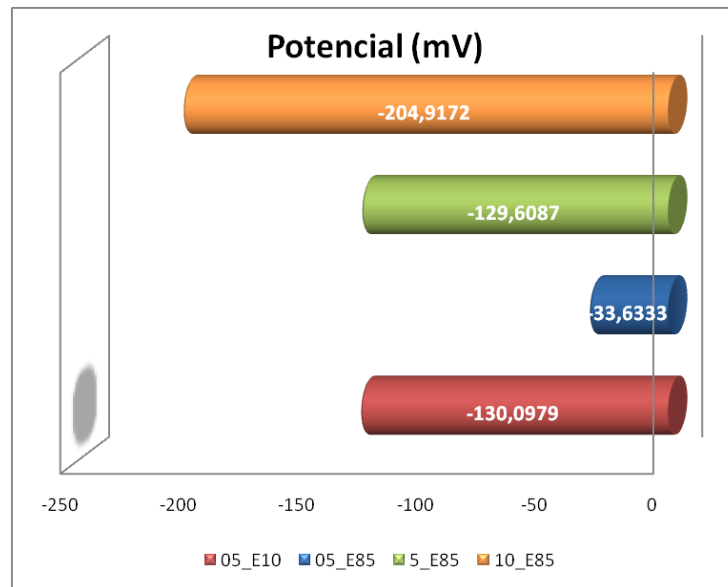


Figura 14. Potencial de Corrosión en mV vs. Ag/AgCl/EtOH/LiCl obtenido en el ensayo CERT.

Es importante señalar que en estos ensayos se presentó un cambio de conductividad del medio, ver Figura 15, lo cual es indicativo que muy posiblemente se esté presentando un proceso de disolución anódica. La mezcla 0.5E10 no presenta ningún cambio significativo en la conductividad, lo cual indica que el material que de acuerdo a los resultado de Ruido electroquímico no tiene un daño considerable de corrosión localizada en comparación con la mezcla 0.5E85 cuyo daño por corrosión localizada se ve reflejado en un cambio de conductividad casi al doble del valor inicial. En la mezcla 10E85 el cambio es 3.5 veces mayor que su valor inicial esto confirma el hecho de que el material forma sus productos de corrosión.

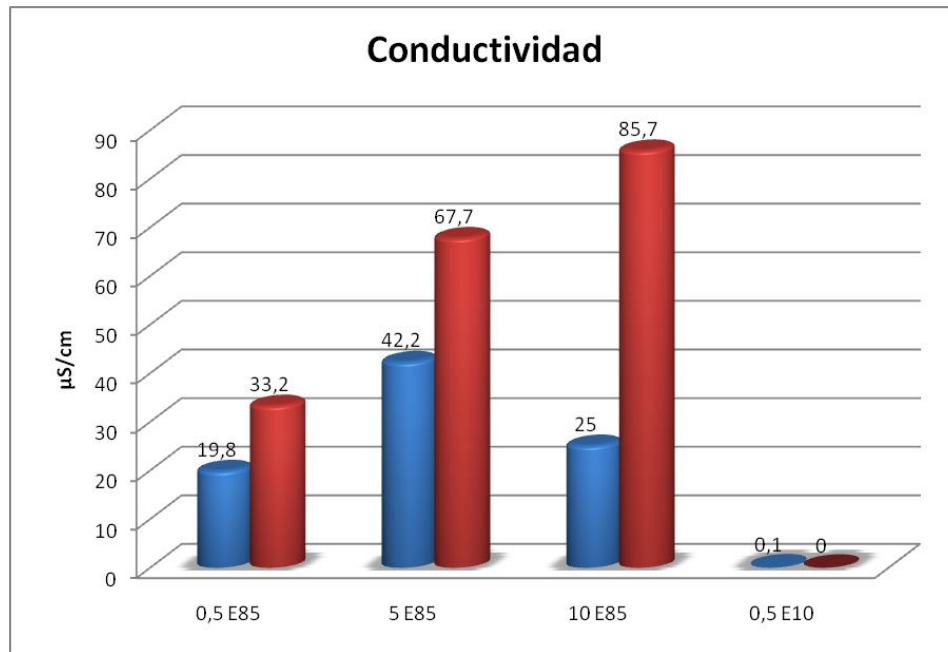


Figura 15. Potencial de Corrosión en mV vs. Ag/AgCl/EtOH/LiCl obtenido en el ensayo CERT.

Conclusiones

El Acero API 5L- X52 en la mezcla 0.5E85 presentó una moderada susceptibilidad a la CAE .

En el ensayo de Ruido Electroquímico se presentaron transitorios anódicos y catódicos con mayores fluctuaciones en los ensayos correspondientes a 0.5%V de agua, que presentan daño por corrosión localizada, mientras que las mezclas con mayor contenido de agua presentaron daño por corrosión generalizada.

Los resultados de MEB revelaron que las mezclas en general presentaron un tipo de morfología dúctil en todos los ensayos. Sin embargo en la mezcla 0.5E85 se presentó agrietamiento secundario.

Los resultados de conductividad revelan que el aumento de esta para las todas las mezclas obedece a un proceso de disolución anódica para la mezcla 0.5E85. En el caso de las mezclas con mayor contenido de agua este se atribuye a la formación de los productos de corrosión, mientras que para la mezcla 0.5E10 no hay cambio de conductividad.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt-Mexico) por el apoyo financiero para efectuar esta investigación, a la M. C. Karla Campos Venegas, al

M. C. Adán Borunda-Terrazas y al Ing. Gregorio Vázquez-Olvera por el apoyo técnico prestado.

Referencias

1. D. Pimentel, "Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts are Negative", *Natural Resources Research*, vol. 12 (2), 2003.

² S. Saxena, S. Schneider, S. Aceves, R. Dibble., 2012 "Wet Ethanol In HCCI Engines With Exhaust Heat Recovery To Improve The Energy Balance Of Ethanol Fuels" *Applied Energy*, vol. 98, pp. 448–457, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.007>

³ E. Anderson., "Energy In: Energy Out" *Alternatives Journal.*, vol. 35 (2) pp. 29-30, 2009

⁴ Xiaoyuan-L., Preet-M. S., 2011 "Phase angle analysis for stress corrosion cracking of carbon steel in fuel-grade ethanol: Experiments and simulation" *Electrochimica Acta* 56 , pp 1835–1847.

⁵ Kane-R., Srinivasan-S., Maldonado-J., Agarwal-A., Beavers-John, 2007 "Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel in Fuel Grade Ethanol: Review, Experience Survey, Field Monitoring, and Laboratory Testing", *API TECHNICAL REPORT 939-D.*, American Petroleum Institute, Washington, D.C.

⁶ Beavers-J., Sridhar-N., 2008 "Recent Advances in Understanding Ethanol SCC of Pipelines", *Managing Risk DNV, USA and Canada.*

⁷ Sridhar-N., Price-K, Buckingham-J., Dante-J., 2006, "Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel in Ethanol", *Corrosion*; 62 (8), pp 687-702.

⁸ Sridhar-N., 2008 "Transportation of Biofuel Through Pipeline", *Managing Risk DNV, USA and Canada.*

⁹ ASTM Designation: D 4806 – 07a. Standard Specification for Denatured Fuel Ethanol for Blending with Gasolines for Use as Automotive Spark-Ignition Engine Fuel.

¹⁰ API Publishing Service, 2007 "Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel in Fuel –Grade Ethanol: Review, Experience Survey, Field Monitoring, and Laboratory Testing", *API TECHNICAL REPORT 939=D, Second Edition.*

¹¹ NACE TM0177- 06. Laboratory testing of metals for resistance to sulfide Stress cracking and stress corrosion cracking in H₂S environments.

¹² MCintyre-D.R., Kane-R.D. and Wilhelm-S.M., 1988 *Corrosion*, 44 (12) pp. 920.

¹³Hibbeler R.C. (2006) "Meccanica de Materiales", PEARSON EDUCATION, Sexta Edición ISBN 970-26-0654-3.

¹⁴ Xiaoyuan-Lou., Lindsey-R. Goodman, Pret M. Singh, Di Yang, (2010)"Understanding The Stress Corrosion Cracking of X-65 pipeline Steel in Fuel Grade Ethanol" INTERNATIONAL NACE Conference&Expo.

¹⁵ G.-Guamano, G.-Montesperelli, S-Pacetti, D'Ámico,(1997), "Electrochemical Noise Resistance as Tool for Corrosion Rate Prediction" Corrosion Science 53,(11), pp 860.

¹⁶ Cabral-Miramontes J. A. (2010), "Estudios De Corrosión Y Desgaste De Acero Inoxidable 409nb Sinterizado Y Con Adiciones De Boro". Tesis Doctoral en Ciencia de Materiales, CIMAV.

¹⁷ K.-Hladky, J.L-Dawson, (1981) "The Measurement of Corrosion Using Electrochemical 1f noise" Corrosion Science, 22 (3),pp 231-237.

¹⁸ K.-Hladky, J.L.-Dawson (1981),"The Measurement of Localized Corrosion Using Electrochemical Noise" Corrosion Science, 21 (4), pp. 317-32.

¹⁹ Robert-Cottis, Stephen-Turgoose, (1999) "Electrochemical Impedance and Noise", Corrosion Testing Easy, NACE INTERNATIONAL, pp. 149.

²⁰ J.M.-Malo-Tamayo, J.-Uruchurtu-Chavarín, (2001) "La Técnica de Ruido Electroquímico para el Estudio de la Corrosión", Técnicas Electroquímicas para el Control y el Estudio de la Corrosión, ISBN UNAM 970-32-0540-2.

²¹ G. K. Pedraza-Basulto, DPh. Thesis, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. Chihuahua, Chihuahua (2013).

²² Feng-Gui, Narisi-Shidar, Jonh-Beavers, (2009) "Techniques for Monitoring Conditions Leading to SCC of Carbon Steel in Fuel Grade Ethanol", INTERNATIONAL NACE Conference&Expo.