

**EFFECTO DE LA CORROSIÓN BAJO TENSIÓN EN UN ACERO AL CARBONO
AISI-SAE 1020 UTILIZADO EN DUCTOS O TANQUES DE ALMACENAMIENTO
DE SOLUCIÓN DE ETANOL.**



KAREN DENISSA GUTIERRÉZ RUIZ
SILVIA JULIANA SALAZAR ZAMBRANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA

2014

**EFFECTO DE LA CORROSIÓN BAJO TENSIÓN EN UN ACERO AL CARBONO
AISI-SAE 1020 UTILIZADO EN DUCTOS O TANQUES DE ALMACENAMIENTO
DE SOLUCIÓN DE ETANOL.**

KAREN DENISSA GUTIERRÉZ RUIZ

SILVIA JULIANA SALAZAR ZAMBRANO

Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniero metalúrgico

Director

PROFESOR IVÁN URIBE PÉREZ

Ingeniero metalúrgico

Magister en Ingeniería Metalúrgica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA

A Dios por brindarnos la oportunidad de vivir y disfrutar cada momento de nuestras vidas dotándonos de sabiduría, paciencia, entendimiento y la capacidad para desarrollar este proyecto por el camino que ha trazado para nosotras.

A nuestros padres por darnos la vida y apoyarnos en todo lo que nos hemos propuesto.

A nuestros hermanos por animarnos a seguir cada día a pesar de las dificultades que la vida nos presenta.

A nuestros amigos por ser parte de nuestras vidas, de los momentos tristes y alegres y por su apoyo incondicional.

A mi compañera de proyecto por su entrega, dedicación, compromiso y empeño que puso para sacar adelante este proyecto, sin ello no había sido posible.

A nuestros maestros por su tiempo, dedicación y compromiso con nosotras, por compartir sus conocimientos para convertirnos en una profesional. Gracias a su pasión por la docencia.

Para todos. "Muchas gracias y que Dios los bendiga"

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirnos realizar este proyecto con dedicación, entrega y responsabilidad.

A nuestros Padres por su infinito amor, fortaleza, consejos, esmero, dedicación y apoyo.

Al Grupo de Investigación en Corrosión y a sus integrantes por su colaboración, dedicación y apoyo durante todo el proceso de ejecución del proyecto en especial a los estudiantes Jhon Torres y Anderson Sandoval por su orientación y ayuda.

A nuestro directo de proyecto Iván Uribe Pérez por el acompañamiento en esta investigación.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica por permitirnos hacer parte de esta familia, a los profesores por su enseñanza y dedicación.

A campo Escuela Colorado por su apoyo y seguimiento en esta investigación.

A los técnicos de la escuela por toda su colaboración, en especial a Juan Domingo Carreño y Ambrosio Carillo.

A nuestros amigos por cada voz de aliento, por animarnos hasta último momento y por creer en este sueño de todos.

Gracias a todos por su colaboración y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	20
ESTADO DEL ARTE	21
MARCO TEÓRICO	25
2.1. CORROSIÓN BAJO TENSIÓN	25
2.2. INICIACIÓN DE LA CORROSIÓN BAJO TENSIÓN	28
2.3. PROPAGACIÓN DE LA CORROSIÓN BAJO TENSIÓN	28
2.4. CORROSIÓN BAJOTENSIÓN EN AMBIENTES ETANÓLICOS	28
2.5. ENSAYO DE VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN LENTA	29
2.6. ENSAYO DE TRACCIÓN CON ENTALLA	31
2.7. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA	33
3. OBJETIVOS	35
3.1. GENERAL	35
3.2. ESPECÍFICOS	35
4. METODOLOGÍA	36
4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	36
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL ACERO	36
4.3. MECANIZADO DE LAS PROBETAS	39

4.4. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN	41
4.5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	42
4.6. ADECUACIÓN DEL EQUIPO	43
4.7. PRUEBAS EXPERIMENTALES	44
4.7.1. Velocidad de deformación lenta	44
4.7.2. Resistencia a la polarización	45
4.7.3. Espectroscopía de impedancia electroquímica	45
4.7.4. Fractografía	46
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
6. CONCLUSIONES	65
7. RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS	68
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	77

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Morfología de la CBT	25
Figura 2. CBT de tipo intergranular	26
Figura 3. CBT de tipo Transgranular	27
Figura 4. Máquina utilizada en el ensayo de velocidad de deformación lenta	30
Figura 5. Probetas de tensión sin entalla y con entalla respectivamente	32
Figura 6. Micrografía de las Inclusiones no metálicas presentes en el acero AISI SAE 1020 tomada a 100X	38
Figura 7a. Micrografía tomada a 100X del tamaño de grano	39
Figura 7b. Micrografía tomada a 500X donde se muestran las fases presentes en el acero AISI SAE 1020	39
Figura 8. Probeta entallada usada para el ensayo de velocidad de deformación lenta	40
Figura 9. Dimensiones de la probeta entallada usada en el ensayo de velocidad de deformación lenta	40
Figura 10. Montaje para las pruebas en blanco al aire	44

Figura 11. Potenciostato /Galvanostato GAMRY 750	45
Figura 12. Montaje experimental para las pruebas electroquímicas	45
Figura 13. Probetas fracturadas. Vista lateral (a) aire, (b) 1%agua, (c) 4%agua, (d) 5%agua.	49
Figura 14. Probetas fracturadas. Vista superior tomada a 100X (a) aire, (b) 1%agua, (c) 4%agua, (d) 5%agua.	50
Figura 15. Micrografía de SEM tomada a 2000X de la superficie de fractura (a) Probeta en blanco, (b) Probeta 1%agua, (c) Probeta 4%agua, (d) Probeta 5%agua	51
Figura 16. Micrografías obtenidas mediante el microscopio óptico para cada una de las soluciones en la superficie de fractura (a) Probeta en blanco,(b) Probeta 1% de agua, (c) Probeta 4% de agua, (d) Probeta 5% de agua.	52
Figura 17. Circuito eléctrico equivalente correspondiente a las soluciones del 5% y 4% de agua antes y después de SSRT	61
Figura 18. Circuito eléctrico equivalente correspondiente a las solución del 1%de agua antes y después de SSRT	61
Figura 19. Diagrama de Pourbaix para el hierro	65
Figura 20. Diagrama de Nyquist para la solución de 4% de agua después de 7 horas del ensayo de SSRT	78

Figura 21. Diagramas de Bode para las 3 soluciones estáticas (a) 1%de agua, (b) 4% de agua, (c) 5% de agua después de 3 horas del ensayo de SSRT	79
Figura 22. Diagramas de Bode para las 3 soluciones dinámicas (a) 1%de agua, (b) 4% de agua, (c) 5% de agua después de 5 horas del ensayo de SSRT	80
Figura 23. Diagramas de Bode para las 3 soluciones dinámicas (a) 1%de agua, (b) 4% de agua, (c) 5% de agua después de 5 horas del ensayo de SSRT	80
Figura 24. Diagramas de Bode para las 3 soluciones dinámicas (a) 1%de agua, (b) 4% de agua, (c) 5% de agua después de 7 horas del ensayo de SSRT	81

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Factores que influyen la CBT	27
Tabla 2. Propiedades mecánicas Acero AISI SAE 1020	37
Tabla 3. Distribución de probetas para los respectivos ensayos	41
Tabla 4. Composición de la solución con 1% de agua	42
Tabla 5. Composición de la solución con 4% de agua	42
Tabla 6. Composición de la solución 3 con 5% de agua	42
Tabla 7. Variables utilizadas	43
Tabla 8. Variables empleadas en el diseño experimental	43
Tabla 9. Condiciones de trabajo para cada una de las pruebas experimentales	44
Tabla 10. Resultados del ensayo SSRT	48
Tabla 11. Valores de la resistencia a la polarización obtenidos antes y después de SSRT	57
Tabla 12. Valores de las resistencias y elementos de fase constante para las soluciones del 5%y 4% de agua	62

Tabla 13. Valores de las resistencias y elementos de fase constante para la solución del 1% de agua	63
Tabla 14. Composición correspondiente al acero AISI SAE 1020	77

LISTA DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 1. Carga versus elongación para cada una de las probetas empleadas	46
Gráfica 2. Potencial de circuito abierto para cada una de las soluciones antes y después de SSRT	54
Gráfica 3. Resistencia a la polarización para las 3 soluciones estáticas	55
Gráfica 4. Resistencia a la polarización durante la prueba de SSRT	56
Gráfica 5. Valores de Resistencia a la polarización para cada una de las soluciones antes y durante SSRT	57
Gráfica 6. Diagrama de Nyquist antes de la prueba SSRT	58
Gráfica 7. Diagrama de Nyquist para un tiempo de prueba de 3 horas	59
Gráfica 8. Diagrama de Nyquist para un tiempo de prueba de 5 horas	60
Gráfica 9. Diagrama de Nyquist para un tiempo de prueba de 7 horas	60

LISTA DE ANEXOS

	Página
ANEXO A. Composición del acero AISI -SAE 1020	77
ANEXO B. Diagrama de Nyquist para la solución del 4% de agua dinámico	78
ANEXO C. Diagramas de bode antes y después de la prueba de SSRT	79

RESUMEN

TITULO: “EFECTO DE LA CORROSIÓN BAJO TENSIÓN EN UN ACERO AL CARBONO AISI-SAE 1020 UTILIZADO EN DUCTOS O TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE SOLUCIÓN DE ETANOL”¹.

AUTORES: KAREN DENISSA GUTIERREZ RUIZ**

SILVIA JULIANA SALAZAR ZAMBRANO**

PALABRAS CLAVE: Corrosión bajo tensión (CBT), ensayo de velocidad de deformación lenta, soluciones etánolicas, ensayos electroquímicos.

Hoy en día el etanol ha adquirido una mayor popularidad debido a que es un importante biocombustible que reemplaza la gasolina convencional. El transporte y distribución del etanol se realiza mediante tuberías, en donde una de las principales preocupaciones la presencia de corrosión bajo tensión (CBT). El objetivo principal de esta investigación es comprender la influencia de una solución de etanol cuyas proporciones de agua son de 1, 4 y 5% V/V, en el mecanismo electroquímico y en las propiedades mecánicas de una probeta entallada fabricada en un acero al carbono AISI- SAE 1020, sometido a corrosión bajo tensión por medio del ensayo de velocidad de deformación lenta. Después de la fractura, la superficie de rotura se observó con el microscopio electrónico de barrido (SEM) y el microscopio óptico.

La probeta cuyo electrolito fue la solución de etanol en la cual había una cantidad de agua del 4% V/V, fue la única que presentó Corrosión Bajo Tensión, lo cual se evidencia por la presencia de grietas ramificadas perpendiculares a la dirección de aplicación del esfuerzo, así como el menor porcentaje de reducción de área en comparación con las otras probetas, lo cual indica una mayor pérdida de ductilidad, lo cual es una de las consecuencias de este tipo de corrosión.

¹ Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Iván Uribe Pérez.
Ingeniero Metalúrgico

ABSTRACT

TITLE: "EFFECT OF STRESS CORROSION CRACKING IN A CARBON STEEL AISI-SAE 1020 WHICH USED IN PIPELINES OR STORAGE TANKS OF ETHANOL SOLUTION²".

Authors: KAREN DENISSA GUTIERREZ RUIZ**

SILVIA JULIANA SALAZAR ZAMBRANO**i

Keywords: Stress Corrosion Cracking (SCC), slow strain rate test, ethanolic blends, electrochemical tests.

Nowadays the ethanol has gained more popularity because it is an important biofuel that replaces conventional gasoline. The transportation and distribution of ethanol is carried through pipes, where one of the major concern is the presence of stress corrosion cracking (SCC). The main objective of this research is to understand the influence of an ethanol blend whose water proportions are 1, 4 and 5% V/V in the electrochemical process and the mechanical properties of a notched specimen of an AISI-SAE carbon steel 1020, which is under Stress Corrosion Cracking by the slow strain rate test (SSRT). After failure, the fracture surfaces were observed in a scanning electron microscope (SEM) and optical microscope.

The specimen whose electrolyte was the ethanol blend with 4% V/V of water, was the only one which had evidence of Stress Corrosion Cracking, because on the fracture surface were branched cracks which orientation was perpendicular to the direction of load application and also this specimen showed minor reduction in area compared with the others samples which means that this specimen had the greatest loss of ductility which is one of the impact of this kind of corrosion.

² Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Iván Uribe Pérez.
Ingeniero Metalúrgico

INTRODUCCIÓN

La humanidad ha tenido siempre la necesidad de contar con fuentes de energía para satisfacer una serie de demandas de carácter vital; a medida que las civilizaciones han ido evolucionando se han creado nuevas necesidades energéticas, cada vez más imprescindibles.

El hallazgo del etanol desarrollado por fuentes naturales permite disminuir la dependencia del petróleo, lo que mejora la seguridad energética de los países y el grado de contaminación de agua, suelos y atmosfera [1].

En los últimos años, el etanol ha adquirido un gran interés en la comunidad de la corrosión. Una preocupación fundamental en la utilización de los gasoductos existentes para transportar etanol o mezclas de etanol es la susceptibilidad del acero al carbono a la corrosión bajo tensión en estos ambientes. En la mayoría de los sistemas, el rompimiento local de la película pasiva y la repasivación bajo ciertas condiciones de esfuerzos son fundamentales para la iniciación de la corrosión bajo tensión; por esta razón, es necesario evaluar el fenómeno de corrosión para determinar el daño en la sinergia entre el medio y las tensiones [10].

Con esta investigación se pretende ampliar el conocimiento acerca del comportamiento del acero frente al etanol en presencia de esfuerzos para posibles desarrollos futuros encaminados en esta temática.

1. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de la corrosión bajo tensión (CBT) puede ser históricamente dividido en tres periodos:

- Primer periodo entre los años 1930 y 1950, en el cual se hace la identificación de este tipo de corrosión.
- Segundo periodo comprendido entre los años 1960 y 1970, siendo este el más importante, debido a la explicación de los mecanismos de la CBT³.

Diversas aleaciones fueron evaluadas para la aplicación en los entornos seleccionados [2].

La Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, es una técnica, que se comenzó a utilizar en los años setenta para el estudio y caracterización de materiales que alcanzó gran aceptación por su característica de mostrar señales en función de la frecuencia, lo que permite analizar un sistema y sus componentes.[7].

- Tercer período ubicado en 1980 en el cual inicia el estudio de la Corrosión bajo tensión en ambientes etanólicos [2].

En 2001 Bosch et al. utilizaron la espectroscopia de impedancia electroquímica para determinar el inicio de la propagación de las grietas provenientes de la

³ CBT: Corrosión Bajo Tensión

corrosión bajo tensión de un acero inoxidable en tres soluciones diferentes y llegaron a la conclusión de que este método es capaz de establecer el inicio de la grieta durante el ensayo de velocidad de deformación lenta (SSRT) [8].

En 2003, J.P. Souza, O.R Mattos, L.Sathler y H.Takenouti, realizaron estudios de Espectroscopia de impedancia electroquímica sobre un acero al carbono en bioetanol combustible de un automóvil con y sin inhibidor utilizando una celda de dos y tres electrodos, los resultados indicaron que se obtenían mejores diagramas de impedancia con la celda de tres electrodos, para disminuir la caída óhmica producto de un medio electrolítico de alta resistencia como el etanol [20].

La corrosión bajo tensión en un acero al carbono se puede dar en soluciones etanólicas como se evidencia en el estudio realizado por KANE, R.D y MALDONADO, J.G (2004), en el cual analizaban las características superficiales luego de efectuar el ensayo de velocidad de deformación lenta (SSRT⁴) en muestras expuestas a este medio con adición de LiCl y H₂SO₄. El agrietamiento debido al etanol resulto ser cualitativamente menos severo que el metanol, pero no se presentaron datos de pérdida de ductilidad (alargamiento o reducción de la superficie en comparación con las propiedades del aire) [15].

Algunas impurezas químicas como cloruros, agua, metanol y el oxígeno disuelto son los factores más influyentes en la CBT en presencia de etanol de grado combustible. Estudios de laboratorio efectuados por KANE et al. (2005), mostraron que el metanol y los cloruros son importantes para determinar la morfología de la grieta (transgranular o intergranular), los aceros de tuberías generalmente exhiben un tipo de fractura mixta [4].

⁴ SSRT: Slow Strain Rate Test.

SRIDHAR, N et al. (2006) demostraron que la CBT es el principal modo de fallo de las tuberías de acero expuesto al etanol combustible [3].

MALDONADO y SRIDHAR (2007) llegaron a la conclusión que una cantidad de agua entre el 1.0 - 4.5 % hace que la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión aumenta, mientras que para valores mayores a 4.5% se inhibe completamente la corrosión bajo tensión [6].

La degradación del etanol ya sea por las reacciones químicas o electroquímicas se considera como una de las razones por medio de las cuales se pueden generar impurezas que pueden afectar la corrosión bajo tensión en aceros al carbono (2008) [5].

En 2008, A. AlbisturGoñi, C. Berlanga Labari, J. Fernández Carrasquilla realizaron un estudio sobre la corrosión bajo tensión de un acero al carbono en mezclas de etanol y gasolina utilizando la técnica de velocidad de deformación lenta. Asimismo se realizó un análisis fractográfico de las muestras expuestas para comprobar los mecanismos de fractura. Se observó en general, una disminución del alargamiento y del tiempo hasta la fractura respecto a los valores obtenidos en un ambiente inerte [16].

En 2009 SRIDHAR, N. Lou et. Al. Demostraron que al 1%V/V de agua la velocidad de la grieta está en su punto más alto ($4.5 \cdot 10^{-7}$ mm/s), esto implica que el acero al carbono presenta mayor susceptibilidad a la CBT [24].

Muchos investigadores en el 2009 encontraron que el oxígeno juega un papel importante en la relación del etanol con la corrosión bajo tensión. Las muestras expuestas a soluciones de etanol desaireadas exhibieron una alta ductilidad y nada de agrietamiento, incluso en la presencia de especies agresivas como los cloruros [25].

En 2010 un estudio realizado por Lou et al. Mostró que un pH alcalino reduce la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión de un acero al carbono en un medio etanólico. Las medidas electroquímicas mostraron que la iniciación de grietas tuvo lugar poco después del punto de fluencia, lo que indica que la deformación plástica juega un papel importante. Un proceso de disolución anódica relacionado con la película se consideró como el factor dominante en el agrietamiento durante la prueba de velocidad de deformación lenta (SSRT) [18].

FENG et al. (2010) encontró que el uso de inhibidores es un método prometedor para evitar la corrosión bajo tensión. Se ha demostrado que en general que si el potencial de corrosión de acero al carbono en presencia del etanol de grado combustible es superior a 100mV frente al electrodo de referencia de a Ag / AgCl este material es susceptible a la CBT [19].

En el 2013 Fortunate Moyo estudio el comportamiento de un acero al carbono en soluciones de etanol, modificando la cantidad de agua presente en la misma (0,1, 2.5 y 5 % agua), y determinó que la presencia de agua en etanol activa el inicio de diversos grados de corrosión. El contenido de agua de hasta 5 %V/V no presenta ningún efecto en la susceptibilidad de la CBT del acero al carbono, mientras que para el 2.5 % de agua se evidencia una mayor susceptibilidad a la CBT.

En general, muchos son los materiales que se han visto afectados por las altas concentraciones del etanol en mezclas con gasolina son el aluminio, acero al carbono, cobre, polímeros elastómeros entre otros [17].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Corrosión bajo tensión

Es un tipo de agrietamiento donde el material experimenta una falla por fractura debido a la combinación de un ambiente corrosivo y esfuerzos de tracción. El daño no es evidente con inspección visual. La corrosión bajo tensión de forma abreviada se conoce como CBT.

Se deben presentar tres condiciones simultáneas para que ocurra la fractura:

- Material susceptible
- Ambiente corrosivo
- Esfuerzo a tracción local

Se reconoce por la presencia de fisuras de forma ramificada, la cantidad de ramificaciones es proporcional con la concentración del medio corrosivo y el nivel de tensiones al que está sometido el material. [9].

Figura 1. Morfología de la CBT



Fuente: Corrosión bajo tensión. [online]. Disponible en Internet <<http://www.angelfire.com/ok/ensayoscorrosion/MND02.html>>

La composición del material y la microestructura juegan un papel importante en el control de la susceptibilidad a la CBT. Elementos como el manganeso, carbono, cromo y titanio modifican la microestructura, lo que conlleva a un cambio en la resistencia mecánica así como a un incremento en la susceptibilidad a este tipo de corrosión.

El esfuerzo de tracción que conduce a la corrosión bajo tensión puede estar por encima o por debajo del límite elástico del material. En muchos casos la existencia de esfuerzos residuales debido a procesos de fabricación o procesos de soldadura, pueden ser suficientes para superar el umbral de esfuerzo necesario para la iniciación de CBT [9].

La corrosión bajo tensión puede ser de tipo intergranular donde las grietas se propagan a lo largo de los límites de grano (Figura 2) o transgranular (Figura 3) donde las grietas se propagan a través de los granos [10].

Figura 2. CBT de tipo Intergranular



Fuente: LOU, X. Stress corrosion cracking and corrosion of carbon steel in simulated fuel-grade ethanol. Trabajo de Grado. Georgia Institute of Technology December 2010

Figura 3. CBT de tipo Transgranular



Fuente: LOU, X. Stress corrosion cracking and corrosion of carbon steel in simulated fuel-grade ethanol. Trabajo de Grado. Georgia Institute of Technology December 2010

En la tabla 1 se presenta algunos factores que pueden afectar en la corrosión bajo tensión.

Tabla 1. Factores que influyen la CBT

FACTOR	CBT
Esfuerzo	Tracción (Estático)
Medio corrosivo acuoso	Específico para la aleación
Incremento de la temperatura	Acelera
Metal puro	Más resistente
Morfología de la fisura	Transgranular o Intergranular. Fisura ramificada con extremos agudos
Polarización Catódica	Usualmente suprime

Fuente: JONES, Denny. Principles and prevention of corrosion. Second Edition Página 249

2.2. Iniciación de la corrosión bajo tensión

Las grietas normalmente se inician en ciertos defectos presentes en la superficie: rayas, picaduras e inclusiones. Algunos defectos, sobre todo en los aceros inoxidable pueden generar agotamiento de cromo en una región lo que cambia la pasividad local.

La ruptura de la película en la superficie que tiene una duración de menos de 1 segundo, es generalmente considerada como el paso que da inicio a la grieta. Los deslizamientos producidos por la deformación plástica local en la superficie pueden debilitar la estabilidad de la película superficial y promover la descomposición de la capa [9].

2.3. Propagación de la corrosión bajo tensión

Después de la iniciación de CBT, el crecimiento de la grieta es controlado por el efecto combinado de la química y la electroquímica que afectan la pasividad, el esfuerzo y la deformación local así como la microestructura; esta última junto con los defectos normalmente determina la dirección de la grieta.

El extremo de la grieta por lo general experimenta una reacción anódica rápida con el fin de apoyar a la propagación de la grieta. La oxidación, descomposición de la película pasiva y repasivación son reacciones comunes en el extremo de la grieta [10].

2.4. Corrosión bajo tensión en ambientes etanólicos

En un ambiente etanólico, uno de los estudios mecánicos publicado es la revisión teórica por parte de Newman et al. [5], quienes señalan que la disolución anódica es uno de los factores más relevantes en el control de la corrosión bajo tensión en un ambiente etanólico. También sugirió que los productos de oxidación del etanol

podrían conducir a la corrosión en el extremo de la grieta y posiblemente, a la corrosión bajo tensión intergranular [10].

El etanol puro no conduce a la CBT en aceros al carbono durante la prueba SSRT mientras que el etanol de grado combustible, es un componente que puede incluir ácidos, agua, oxígeno disuelto, desnaturalizantes y por lo tanto puede contener especies corrosivas. La presencia de impurezas puede deberse a una degradación causada por una reacción con el material metálico [23].

La corrosión bajo tensión en un acero al carbono en presencia de etanol y mezclas del mismo no es bien entendido, el hecho de que ocurra implica que el acero al carbono tiene alguna tendencia a pasivarse en estas soluciones.

Al ser el etanol altamente higroscópico absorbe con mayor facilidad cantidades de agua. La presencia de esta sustancia aumenta la acidez de la solución y el riesgo de corrosión [24].

2.5. Ensayo de velocidad de deformación lenta (SSRT)

La SSRT ha emergido como un método simple y rápido que puede ser usado para la evaluación de la resistencia de una variedad de ambientes a fenómenos de agrietamiento como la Corrosión bajo tensión en metales y aleaciones [11].

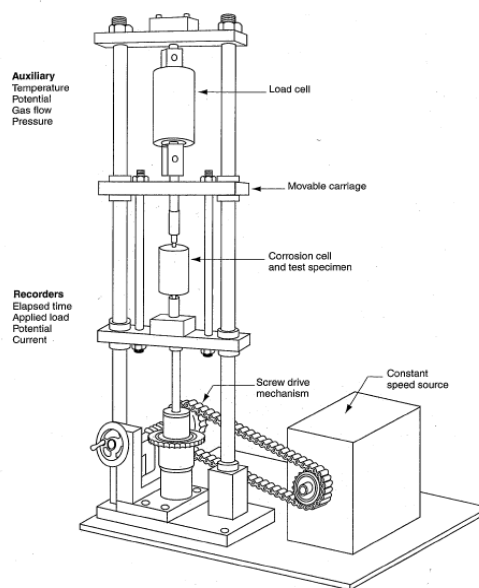
Este ensayo se utiliza para la detección rápida o evaluación comparativa de un ambiente corrosivo, variables metalúrgicas o ambos, que pueden afectar el comportamiento mecánico de un material.

El ensayo consiste en aplicar velocidad de deformación lenta por un medio externo en la sección de estudio o entalla de una probeta que se encuentra sometida a tensión uniaxial. La velocidad de deformación de la muestra está dada en unidades de extensión dividida por la longitud de la sección de estudio por unidad

de tiempo, la cual según la Norma ASTM G129, deben encontrarse en un rango de 10^{-4} y 10^{-7} mm/s, esta última debe ser lo suficientemente lenta para dar tiempo a que ciertos procesos de corrosión tengan lugar, pero lo suficientemente rápida para producir la falla o el agrietamiento de la muestra en un período de tiempo razonable para fines de evaluación [12].

Los resultados de la prueba se evalúan en términos del tiempo necesario para que se produzca la falla, la velocidad de extensión en la rotura o la apariencia de la superficie de fractura [13].

Figura 4. Máquina utilizada en el ensayo de velocidad de deformación lenta



Fuente: NORMA ASTM G129 – 00. Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking1

2.6. Ensayo de tracción con entalla

Las medidas de ductilidad en una probeta sin entalla no siempre revelan cambios en las propiedades mecánicas que conducen a una reducción local de la ductilidad. La tendencia en la disminución de la ductilidad en presencia de esfuerzos triaxiales y grandes gradientes de esfuerzos (como ocurre en un entalla) es llamado *sensibilidad a la entalla*, una manera de evaluarla es mediante la prueba de tensión usando una probeta entalla [22].

La sensibilidad a la entalla es definida como la máxima carga dividida entre el área de sección transversal original en la entalla. La forma más común de determinar la fragilidad en la entalla (o alta sensibilidad a la entalla) es calcular la relación de la resistencia a la entalla (NSR):

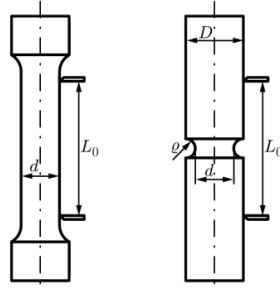
$$(1) \quad \text{NSR} = \frac{P_{\text{net}}(\text{máxima carga de la probeta entallada})}{P_u(\text{Resistencia a la tensión de la probeta sin entalla})}$$

$$(2) \quad \% \text{NSR} = \frac{P_{D(\text{AIRE})} - P_{d(\text{MEDIO})}}{P_{D(\text{AIRE})}}$$

Si NSR⁵ es menor que la unidad, el material tiene una entalla frágil y es susceptible a la corrosión bajo tensión. La otra propiedad que se puede medir en este tipo de prueba es la reducción de área en la entalla [21].

⁵ NSR: Notch sensibility resistance

Figura 5. Probetas de tensión sin entalla y con entalla respectivamente



En la probeta entallada, la parte más larga de la zona donde se encuentra ubicada la entalla tiene un área de sección transversal representada en la Ecuación 3, mientras que la probeta lisa se usa la Ecuación 4. En la figura 5 se muestra el diseño para cada una de las probetas.

$$(3) \quad A_{\text{PROBETA ENTALLA}} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$(4) \quad A_{\text{PROBETA LISA}} = \frac{\pi d^2}{4} \quad [22].$$

La susceptibilidad a la corrosión bajo tensión se puede expresar en términos del porcentaje de reducción de área (%RA) calculado mediante la ecuación 5 de acuerdo con la norma NACE TM-0198:

$$(5) \quad \text{RA}(\%) = \frac{(D_i^2 - D_f^2) * 100}{D_i^2}$$

Donde:

D_i^2 : Diámetro inicial de la entalla

D_f^2 : Diámetro final de la entalla

$$(6) \quad \text{RRA} = \frac{\text{RA}_e}{\text{RA}_c}$$

RA_e : %Reducción del área en el medio

RA_c : : %Reducción del área en el aire

La relación de reducción de área (RRA) se expresa mediante la ecuación 6. Cuando el valor de RRA se encuentra entre de 0.8-1.0 normalmente denota una alta resistencia a la CBT mientras que valores menores a 0.5 indica una alta susceptibilidad a este tipo de corrosión [25].

2.7. Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

Es un método electroquímico no destructivo utilizado en estudios de corrosión que permite deducir el comportamiento de la interfaz metal-solución, ofreciendo una visión completa de los fenómenos corrosivos que se generan, se basa en el uso señal de corriente alterna que es aplicada a un electrodo de trabajo (metal en corrosión), determinando la respuesta correspondiente [9].

EIS⁶ ha sido ampliamente usado como una poderosa técnica de corriente alterna para investigar los mecanismos de las reacciones electroquímicas, este tipo de corriente tiene como característica ser función del tiempo y de la frecuencia [7].

Esta técnica se destaca por dar buenos resultados en medios de baja conductividad eléctrica. En el caso de los estudios de corrosión que utilizan este ensayo, los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante la simulación de circuitos eléctricos compuestos por componentes tales como: Resistencia (R), Capacitancia (C), Inductancia (L), entre otros, combinados de tal manera que reproduzcan los espectros de impedancia medidos [9].

⁶ EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy

Las pruebas de velocidad de deformación lenta junto con EIS se emplean para estudiar el comportamiento electroquímico de los aceros al carbono en un medio como el etanol [14].

3. OBJETIVOS

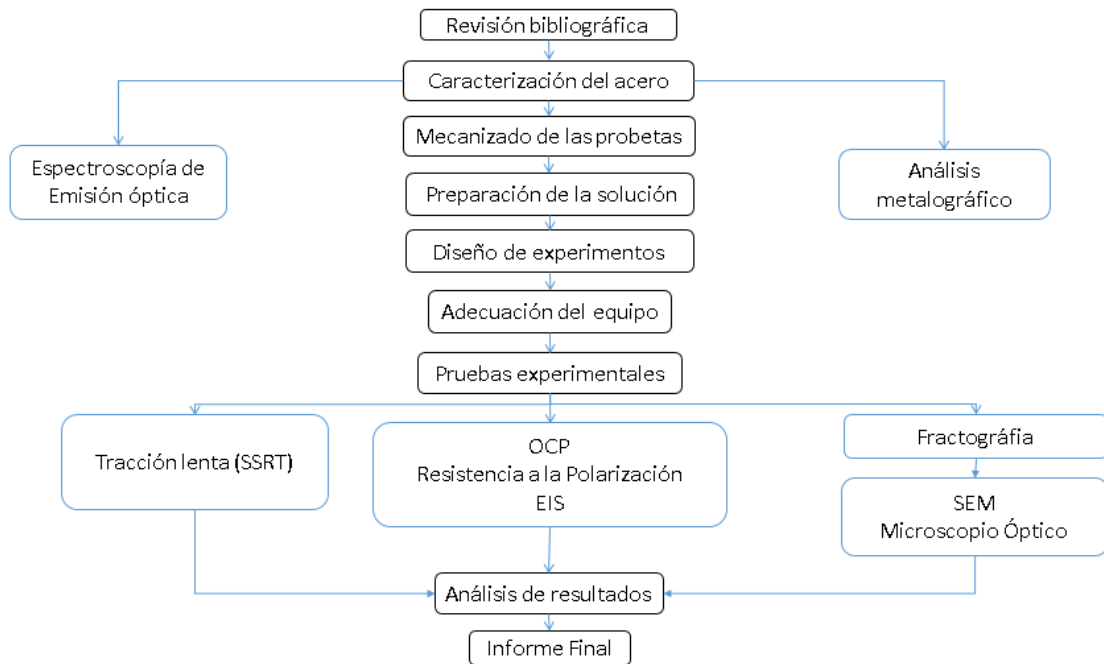
3.1 GENERAL

- Comprender la influencia de una solución etanólica en las propiedades mecánicas y en el mecanismo electroquímico de una probeta entallada fabricada en un acero al carbono AISI- SAE 1020 sometido a corrosión bajo tensión por medio del ensayo de velocidad de deformación lenta.

3.2 ESPECÍFICOS

- Conocer el comportamiento del acero AISI- SAE 1020 durante el ensayo de velocidad de deformación lenta (SSRT), cuando se emplea una velocidad de deformación constante de $2.5 * 10^{-6}$ mm/segundo en presencia de 3 tipos de soluciones etanólicas.
- Analizar mediante las pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica y resistencia a la polarización las características corrosivas del medio y la resistencia del material a la solución respectivamente.
- Caracterizar el tipo de fractura obtenida para la probeta entallada del acero AISI – SAE 1020 mediante las técnicas de microscopia electrónica de barrido así como microscopia óptica para cada una de las soluciones empleadas.

4. METODOLOGÍA



4.1 Revisión bibliográfica

Durante esta primera etapa se hace la recopilación de la información con el fin de facilitar la comprensión y entendimiento del fenómeno de corrosión bajo tensión en un acero al carbono para la ejecución del proyecto. Sustentados en temáticas como: corrosión bajo tensión (CBT), ensayo de tracción lenta (SSRT), espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

4.2 Caracterización del acero

Para conocer la composición química del material en este caso un acero al carbono AISI SAE 1020 se emplea la técnica de **Espectroscopía de Emisión Óptica**, la cual permite obtener resultados cuantitativos y cualitativos (ver anexo A). Comparando estos resultados con los mostrados en la Tabla 12 del anexo A, se evidencia que los porcentajes de cada uno de los elementos presentes en este

material, es decir, carbono, azufre, manganeso, silicio y fósforo se encuentran dentro de los rangos correspondientes al acero AISI SAE 1020.

Algunas propiedades mecánicas correspondientes al material empleado se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas Acero AISI SAE 1020

Resistencia a la tracción [Kg/mm ²]	Límite elástico [Kg/mm ²]	%Alargamiento	%Reducción de área	Módulo de elasticidad [Gpa]
40	31	25	41	250

Fuente: <http://54.84.219.185/~prom1266/wpcontent/uploads/2013/06/SAE1020.pdf>

En esta etapa se busca identificar las condiciones a las cuales está sometido el material como por ejemplo su microestructura, usando el análisis metalográfico, basado en las **Normas ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys** y **ASTM E45-13 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel**. Se pulió la muestra hasta la lija 600 y se pasó tanto por el paño grueso como el fino. En la figura 6 se observan las inclusiones no metálicas presentes en el material, en su mayoría óxidos cuyo diámetro es de aproximadamente 1.2 mm (0.5 in), tipo D y grado de severidad 2, además de esto también se evidencian algunos silicatos, los cuales tienen un espesor aproximado de 0.5 mm (0.02in), tipo C y grado de severidad 1, en este caso se realizó un corte longitudinal al acero. Lo mencionado anteriormente se realiza con el fin de conocer el estado inicial del acero y se evidencia que la cantidad de inclusiones no metálicas presentes están dentro del nivel 2, lo cual indica que no van a actuar como concentradores de esfuerzos durante el ensayo de velocidad de deformación lenta.

Se realizó un corte transversal al material, se pulió y se atacó con Nital al 2%. Empleando el Microscopio OLYMPUS GX7, se observó la superficie del acero para identificar el tamaño y diámetro promedio del grano, así como las fases presentes.

En la figura 7a, se aprecian las fases correspondientes a un acero hipoeutectoide, las cuales son colonias de perlita (café) rodeadas de una matriz ferrítica (blanca). En la figura 7b, se muestra la micrografía con ataque al acero AISI SAE 1020. El tamaño y el diámetro promedio de grano estimado son mayor a 8 y 0.010 mm respectivamente.

Figura 6. Micrografía de las Inclusiones no metálicas presentes en el acero AISI SAE 1020 tomada a 100X

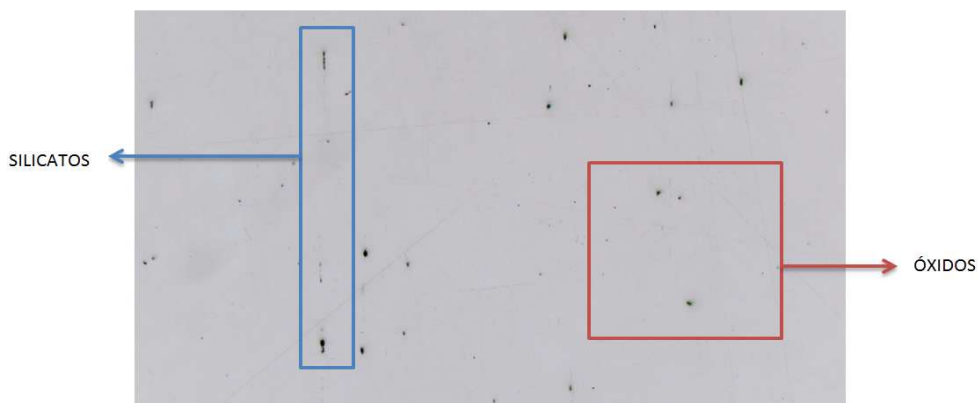
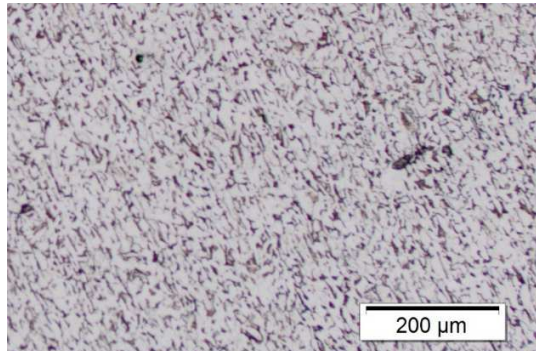
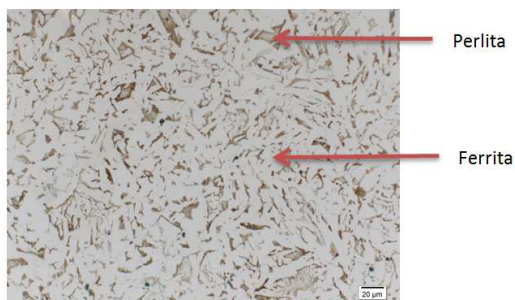


Figura 7a. Micrografía tomada a 100X del tamaño de grano



Fuente: Microscopio óptico OLYMPUS GX71

Figura 7b. Micrografía tomada a 500X donde se muestran las fases presentes en el acero AISI SAE 1020



Fuente: Microscopio óptico OLYMPUS GX71

4.3 Mecanizado de las probetas

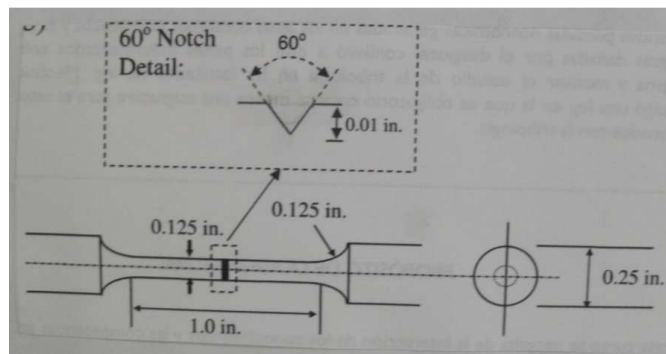
El mecanizado de las probetas debe realizarse cuidadosamente para evitar posibles sobrecalentamientos y trabajo en frío innecesario en la sección en la cual se realizara el análisis.

Esta etapa de la metodología así como la adquisición de la materia prima se llevó a cabo por la empresa MECANIZADOS Y MANTENIMIENTO S.A.S.

Figura 8. Probeta entallada usada para el ensayo velocidad de deformación lenta



Figura 9. Dimensiones de la probeta entallada usada en el ensayo de velocidad de deformation lenta



Fuente: LOU, X. Stress corrosion cracking and corrosion of carbon steel in simulated fuel-grade ethanol. Trabajo de Grado. Georgia Institute of Technology December 2010.

Tabla 3. Distribución de probetas para los respectivos ensayos

	Pruebas	Solución 1 (98.5% Etanol -1% agua)	Solución 2 (95.5% Etanol -4% agua)	Solución 3 (94.5% Etanol -5% agua)
Distribución de las probetas	OCP	2	1	2
	Rp			
	EIS			
	SEM			
	Microscopio óptico			

4.4 Preparación de la solución

La preparación de la solución se fundamenta en la **Norma ASTM D 4806. Standard Specification for Denatured Fuel Ethanol for Blending with Gasolines for Use as Automotive Spark-Ignition Engine Fuel¹**, la cual especifica las cantidades máximas de los componentes para un total de 700ml. En las tablas 4, 5 y 6 se presentan las composiciones correspondientes a los 3 tipos de soluciones que se van a emplear en cada una de las pruebas.

Tabla 4. Composición de la solución con 1% de agua

etanol (%volumen)	metanol (%volumen)	agua (%volumen)	Nacl (mg/l)	ácido acético (mg/l)
98.5	0.5	1.0	53	56
689.5 ml	3.5 ml	7 ml	0.0371 g	0.053 ml

Tabla 5. Composición de la solución con 4% de agua

etanol (%volumen)	metanol (%volumen)	agua (%volumen)	Nacl (mg/l)	ácido acético (mg/l)
95.5	0.5	4.0	53	56
668.5 ml	3.5 ml	28 ml	0.0371 g	0.053 ml

Tabla 6. Composición de la solución 3 con 5% de agua

etanol (%volumen)	metanol (%volumen)	agua (%volumen)	Nacl (mg/l)	ácido acético (mg/l)
94.5	0.5	5.0	53	56
661.5 ml	3,5 ml	35 ml	0.0371 g	0.053 ml

Fuente: NORMA ASTM D4806-14. Standard Specification for Denatured Fuel Ethanol for Blending with Gasolines for Use as Automotive Spark-Ignition Engine Fuel

4.5 Diseño de experimentos

Tabla 7. Variables utilizadas

VARIABLE	
Concentración de la solución	Variable
Velocidad de aplicación de la carga	Constante
Material	Constante
Tiempo	Constante

Tabla 8. Variables empleadas en el diseño experimental

VARIABLE	PRUEBAS		
	[A]	[B]	[C]
Concentración de la solución	1	1	1
Repetición	1	-----	1

Este es un sistema del tipo 1^3 es decir una variable con 3 condiciones. En total el número de pruebas son cinco.

4.6 Adecuación del equipo

Se realizó con el fin de verificar el buen funcionamiento del equipo, por lo tanto se llevaron a cabo dos pruebas en blanco (Figura 12), las cuales permiten estimar las

condiciones del ensayo tales como el tiempo de ruptura de las probetas y el manejo del software *SIMATIC WinCC* encargado de registrar los datos.

Figura 10. Montaje para las pruebas en blanco al aire



4.7 Pruebas experimentales

Tabla 9. Condiciones de trabajo para cada una de las pruebas experimentales

Pruebas	Condiciones	
SSRT	Velocidad de deformación	$2.5 \cdot 10^{-6} [\text{mm/s}^2]$
OCP	Tiempo= 50 minutos (3000 segundos) Periodo de prueba= 0.5 segundos	Electrodo de referencia: Ag/AgCl Contra electrodo: Grafito
Rp	$E_{\text{inicial}} = -0.01\text{V}$ $E_{\text{final}} = 0.01\text{V}$ Velocidad de barrido=0.125mV/s Periodo de prueba =0.5 segundos	
EIS	Frecuencia inicial = 80000Hz Frecuencia final = 0.1 Hz	

4.7.1 La prueba de velocidad de deformación lenta se basa en las normas **ASTM G129. Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking.**

Las pruebas electroquímicas se realizaron empleando el potencióstato/Galvanostato GAMRY 750 ubicado en el Grupo de Investigación en Corrosión (Figura 11).

En la figura 12 se presenta el montaje experimental para llevar a cabo las pruebas.

Figura 11. Potencióstato /Galvanostato GAMRY 750



Fuente: Grupo de Investigación en corrosión

Figura 12. Montaje experimental para las pruebas electroquímicas



4.7.2 Prueba de resistencia a la polarización se realiza con el fin de determinar qué tanta resistencia opone el material al medio al que va a estar expuesto antes y después de llevar a cabo la prueba de velocidad de deformación lenta.

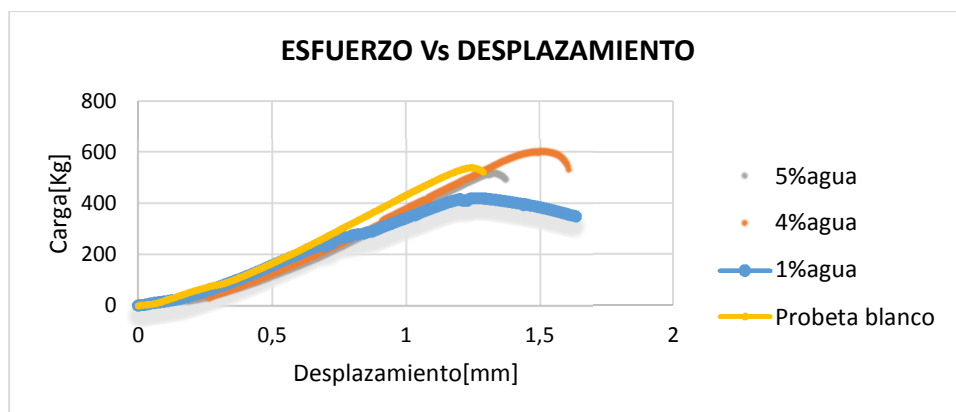
4.7.3 El ensayo de EIS se efectúa para conocer los mecanismos de corrosión del material. Se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en diferentes frecuencias.

4.7.4 La fractografía permite estudiar la morfología de la grieta una vez finalizados las pruebas de tracción lenta y medidas electroquímicas. Lo anterior se efectúa con la ayuda del microscopio electrónico de barrido y el microscopio óptico.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. PRUEBA DE VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN LENTA PARA CADA UNA DE LAS SOLUCIONES EMPLEADAS

En la gráfica 1 se evidencia la transición de la propagación de la grieta con un comportamiento que va de afuera hacia adentro del material, debido a la presencia de la entalla.



Gráfica 1. Carga versus elongación para cada una de las probetas empleadas

De acuerdo a los datos obtenidos de NSR⁷ que indican que tan sensible es la entalla a la propagación de la grieta, las probetas del 1 y 4% de agua obtuvieron el menor (0.3675) y mayor valor (0.5321) respectivamente, lo que indica que la primera permite que se propague la grieta con mayor facilidad mientras que la segunda opone mayor resistencia, lo cual se corrobora en la gráfica 1, debido a que a la probeta del 1% de agua no fue necesaria la aplicación de una carga tan grande como para la probeta del 4% de agua.

En cuanto al porcentaje de reducción de área las probetas del 1 y 4% de agua presentan el menor valor frente a las demás probetas, lo que indica una mayor pérdida de ductilidad, como lo indicaron Lou et al. (2009) lo mencionado anteriormente está relacionado con la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión.

El valor de RRA⁸ está directamente ligado con la resistencia o susceptibilidad a este tipo de corrosión, en este caso la segunda probeta, es decir la del 4% de agua (0.4589), presenta un valor que se encuentra en el rango de alta susceptibilidad (valores menores a 0.5) a este tipo de corrosión, mientras que la del 5% agua es más resistente a la CBT (valores entre 0.8 y 1), según el valor obtenido.

En la tabla 10, se presentan los resultados del % de reducción de área, RRA así como los valores de NSR y % NSR⁹.

⁷ NSR: : Notch sensibility resistance

⁸ RRA: Relación de reducción de área

⁹ %NSR:

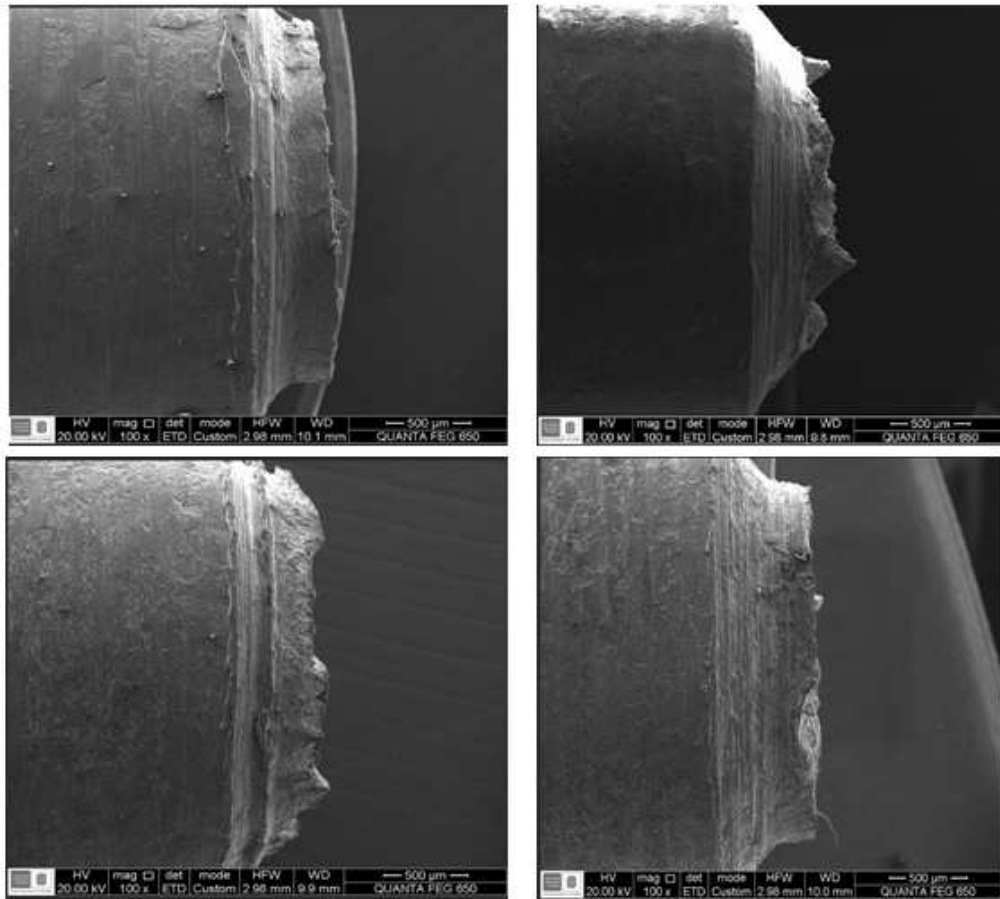
Tabla 10. Resultados del ensayo SSRT

Ambiente	Carga [Kg]	%RA	RRA	%NSR	NSR
Aire	539	48,431	N/A	N/A	0,476
1% de agua	415,7	37,999	0,784	22,875	0,367
4% de agua	601,8	22,227	0,458	11,651	0,532
5% de agua	517,2	44,983	0,928	4,044	0,457

5.2. FRACTOGRAFÍA MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y MICROSOPIA ÓPTICA

Las probetas falladas fueron examinadas bajo microscopia electrónica de barrido, en todos los casos, las fracturas en la vista lateral (Figura 13) son de tipo frágil, debido a que no presentan encuellamiento debido a la presencia de la entalla, en donde se facilita la propagación de las grietas.

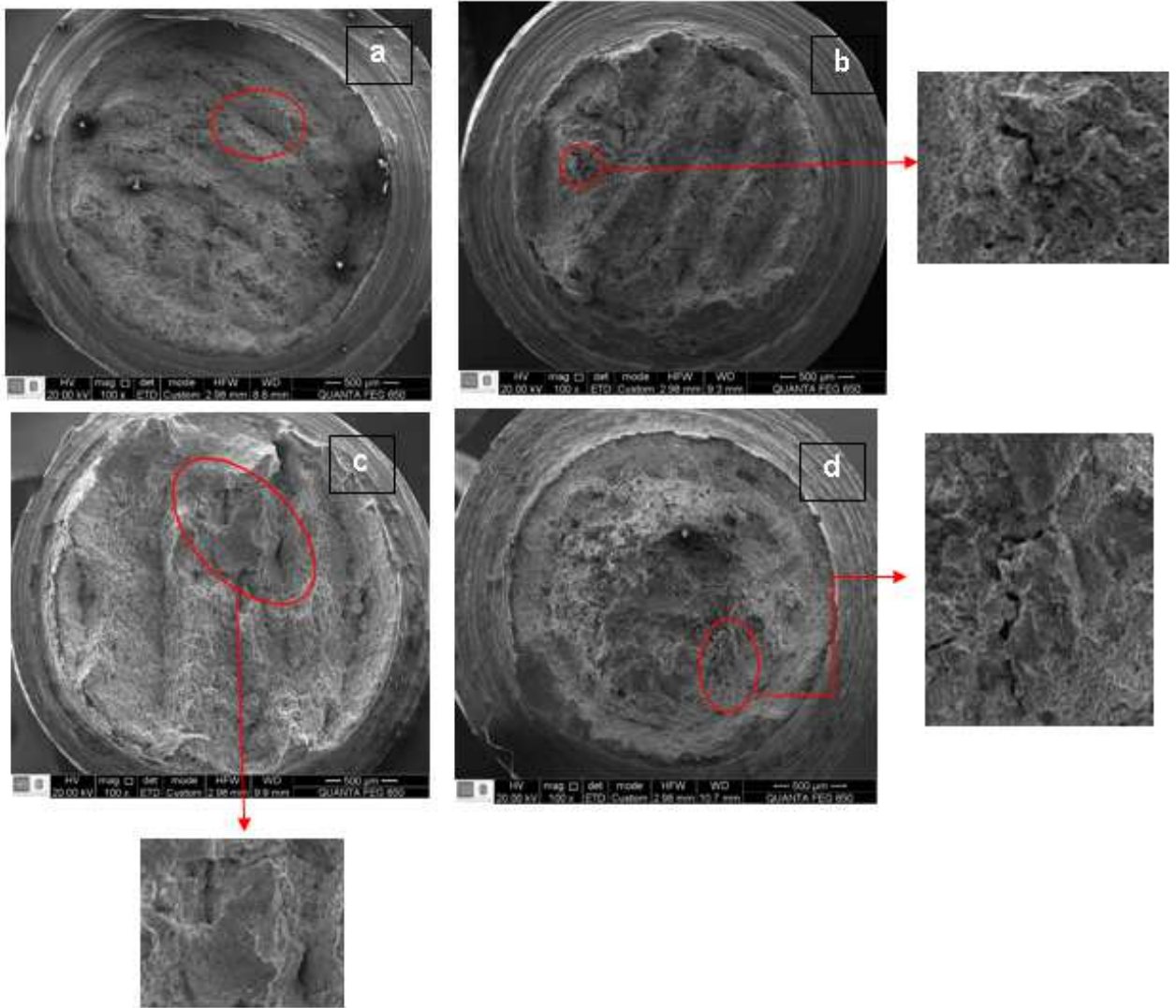
Figura 13. Probetas fracturadas. Vista lateral (a) aire, (b) 1%agua, (c) 4%agua, (d) 5%agua.



Fuente: Laboratorio de microscopía electrónica de barrido

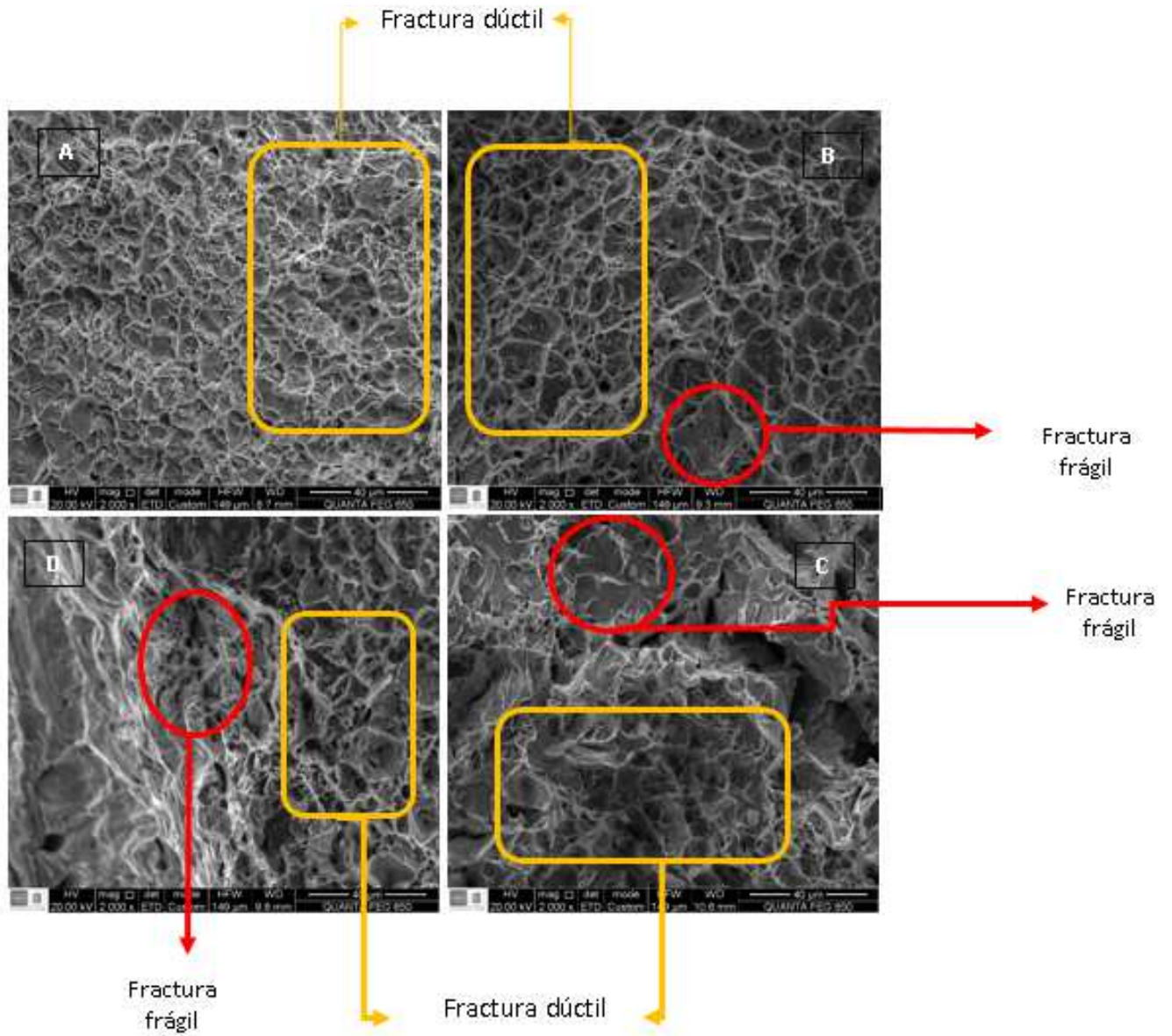
En la figura 14, se presenta la vista superficial de zona fractura a 100X, en la cual se evidencia la presencia de grietas abiertas a la superficie para las probetas al aire, 1%agua, 4%agua y 5% de agua que son perpendiculares al sentido de aplicación de la carga de tracción.

Figura 14. Probetas fracturadas. Vista superior tomada a 100X (a) aire, (b) 1%agua, (c) 4%agua, (d) 5%agua.



Fuente: Laboratorio de microscopia electrónica de barrido

Figura 15. Micrografía de SEM tomada a 2000X de la superficie de fractura (a) Probeta en blanco, (b) Probeta 1%agua, (c) Probeta 4%agua, (d) Probeta 5%agua



Fuente: Laboratorio de microscopia electrónica de barrido

En la figura 15, se presenta la micrografía tomada mediante SEM a 2000X sobre la superficie de rotura, en donde se muestra en su mayoría una fractura de tipo dúctil, la cual se caracteriza por tener una apariencia fibrosa además de la presencia de microhuecos en todas las probetas ensayadas, lo que se atribuye al material con el que fueron mecanizadas, el cual por su bajo contenido de carbono presenta una alta ductilidad, por lo que es de esperarse este comportamiento, además se ven algunas zonas en la cuales se evidencia la presencia de fractura frágil, la cual es de tipo plano. Según los resultados obtenidos por KANE et al. (2005) [4]. los aceros usados en tuberías presentan un tipo de fractura mixta, lo cual ocurrió en este caso con el Acero AISI SAE 1020.

Figura 16. Micrografías obtenidas mediante el microscopio óptico para cada una de las soluciones en la superficie de fractura (a) Probeta en blanco, (b) Probeta 1% de agua, (c) Probeta 4% de agua, (d) Probeta 5% de agua.



Fuente: Microscopio Óptico

En la figura 16 se muestra la sección transversal de las probetas atacadas con Nital al 2% después del ensayo de SSRT para cada una de las soluciones (1, 4 y 5% de agua).

Para la probeta en blanco y 1% de agua no se evidencia ningún tipo de grieta debido a que la profundidad de estas no es considerable por lo que al desbastar el material para posteriormente atacar y observar la microestructura mediante el microscopio óptico se desaparecen.

En cuanto a la probeta del 4% de agua, se observa la presencia de una grieta de abertura considerable, cuya morfología es de tipo transgranular (es decir que se propaga atravesando los granos) y es perpendicular a la dirección de aplicación de la carga, lo cual es característico de la corrosión bajo tensión.

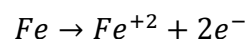
En la figura 16 d1 se evidencia una abertura en la cual no hay ramificaciones lo cual indica que no fue producto de la CBT si no de una ligera deformación plástica que sufrió el material durante la prueba de SSRT.

Se confirmó la hipótesis de Fortunato, Moyo (2013) [24], el cual concluyó que para la solución de etanol con 5% de agua no presentó CBT, además se observó que para porcentajes de agua mayores al 1% presentes en el etanol se evidencia la aparición de este tipo de corrosión.

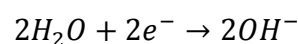
5.3. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS EFECTUADAS ANTES Y DESPUÉS DE LA PRUEBA DE SSRT

5.3.1 REACCIONES DE CORROSIÓN

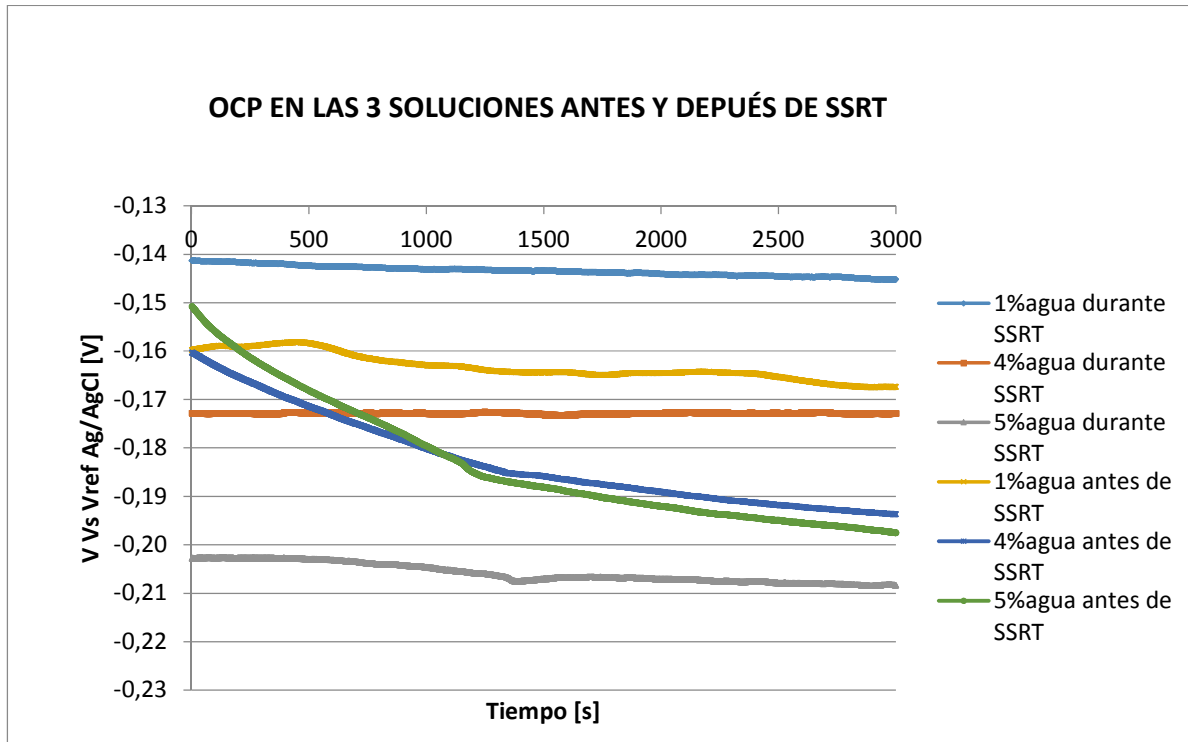
Reacción de Oxidación



Reacción de reducción



5.3.2. POTENCIAL DE CIRCUITO ABIERTO PARA LAS TRES SOLUCIONES ANTES Y DESPUÉS DE SSRT

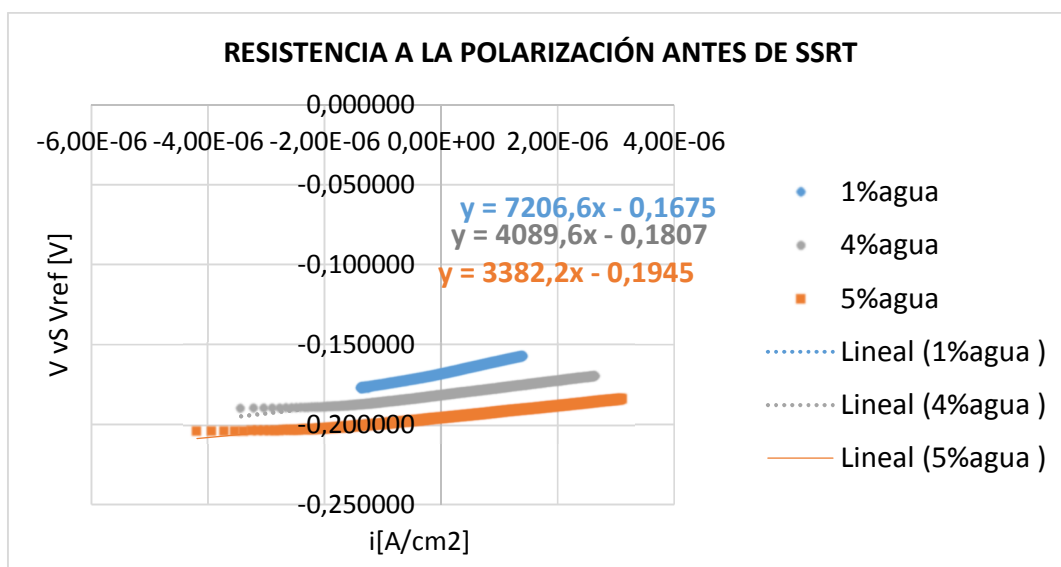


Gráfica 2. Potencial de circuito abierto para cada una de las soluciones antes y después de SSRT

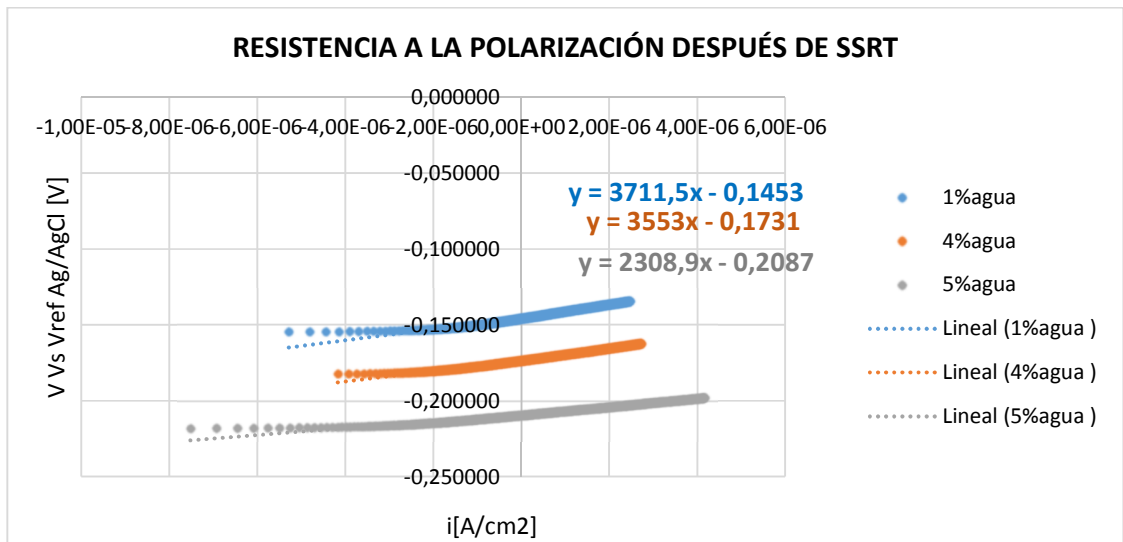
Los valores de OCP para las soluciones antes y después de SSRT mostraron potenciales negativos. En las pruebas efectuadas antes de SSRT los potenciales para el 4 y 5 % de agua tuvieron un comportamiento similar, es decir una caída constante dentro de un rango aproximado de -0,15V -0,18V, luego se estabilizaron en un rango aproximado de -0,19V a -0,20V mientras que para el 1% de agua los valores del potencial fueron relativamente constantes a lo largo del tiempo, estabilizándose en más o menos -0,167 V.

Los registros de OCP para las curvas después de SSRT se tomaron a las 3 horas de haber iniciado la prueba, estas presentan un comportamiento constante a lo largo del tiempo. Para las probetas del 1 y 4 % de agua los potenciales tienden a valores menos negativos lo cual podría indicar una inestabilidad de la capa debido a que se encuentran más lejos del potencial del metal puro (-0.44 V) lo que no ocurre con la del 5% de agua.

5.3.3. RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN PARA LAS TRES SOLUCIONES ANTES Y DESPUÉS DE SSRT



Gráfica 3. Resistencia a la polarización para las 3 soluciones estáticas



Gráfica 4. Resistencia a la polarización durante la prueba de SSRT

Las gráficas 3 y 4, muestran el comportamiento de la resistencia a la polarización para cada uno de los tipos de solución empleada en los ensayos, se evidencia una disminución del valor de R_p con el aumento del porcentaje de agua, lo cual indica un incremento en la velocidad de corrosión del medio.

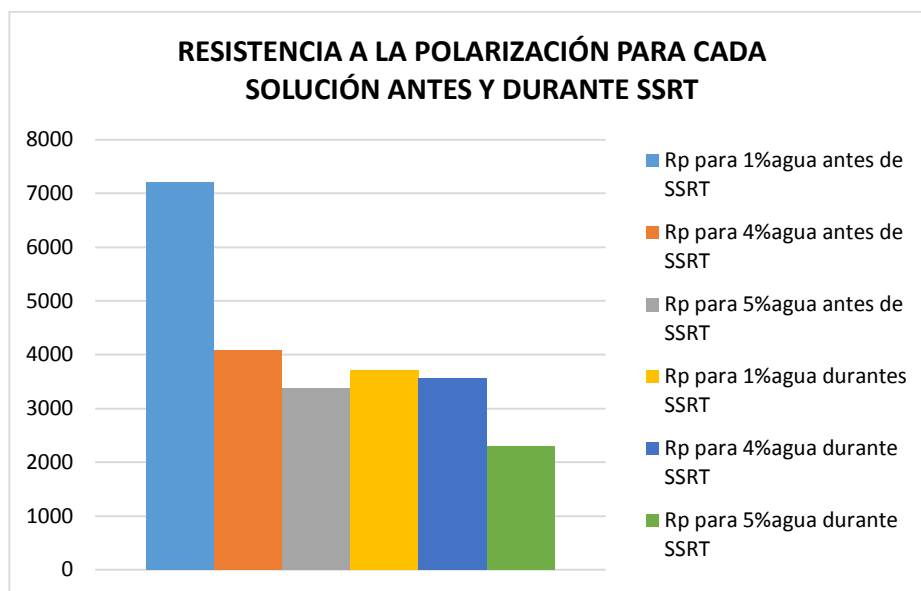
Los valores de resistencia a la polarización para la medición antes de SSRT presentan valores mayores en comparación a los medidos después de esta prueba, esto se debe a que el tiempo de exposición de las probetas antes de SSRT fue de aproximadamente 30 minutos mientras que en el segundo caso fue de 3 horas.

Los valores de la resistencia a la polarización se obtuvieron mediante la linealización de cada una de las curvas de las gráficas 3 y 4, la pendiente de cada una de las ecuaciones de estas rectas corresponden a los valores de R_p^{10} , los cuales se presentan en la tabla 11 y en la gráfica 5.

¹⁰ R_p : Resistencia a la polarización

Tabla 11. Valores de la resistencia a la polarización obtenidos antes y después de SSRT

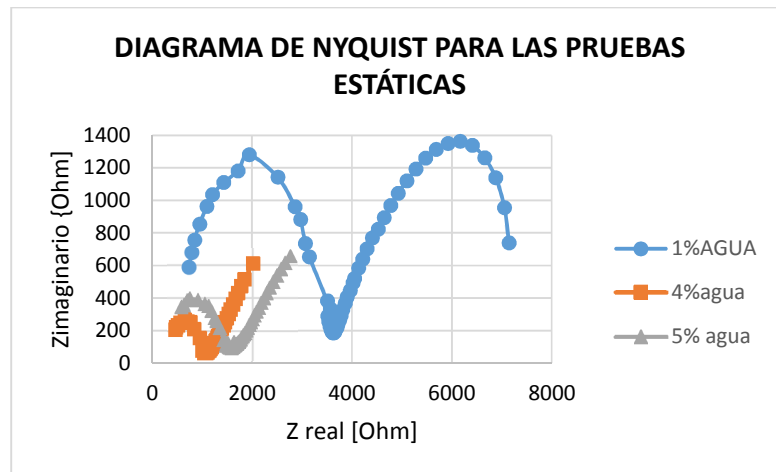
Resistencia a la Polarización		
Soluciones empleadas	Antes de SSRT	Durante SSRT
Solución 1% agua	7206.6	3711.5
Solución 4% agua	4089.6	3553
Solución 5% agua	3382.2	2308.9



Gráfica 5. Valores de Resistencia a la polarización para cada una de las soluciones antes y durante SSRT

5.3.4 PRUEBAS DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

5.3.4.1 DIAGRAMAS DE NYQUIST



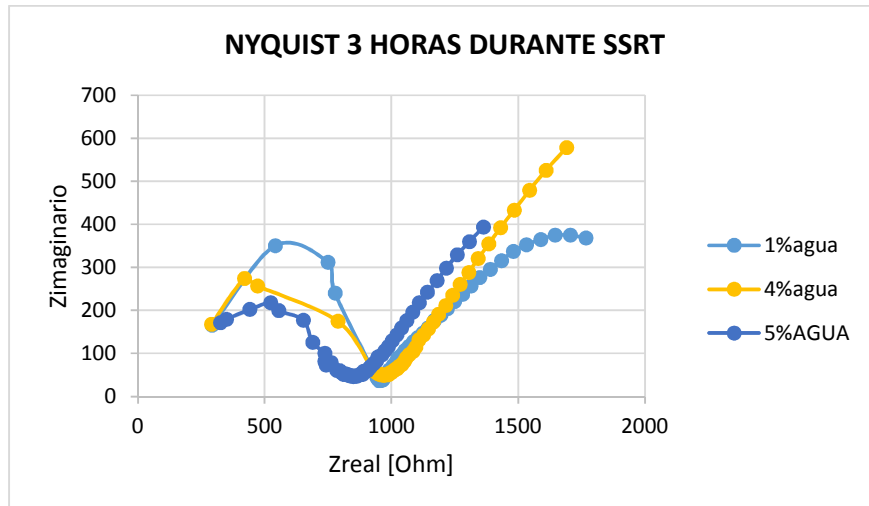
Gráfica 6. Diagrama de Nyquist antes de la prueba SSRT

En la gráfica 6 se presenta el comportamiento del diagrama de Nyquist antes de aplicar la prueba de SSRT. Para las probetas expuestas a las soluciones del 4 y 5% de agua se evidencia la formación de un semicírculo a altas frecuencias y una línea recta a bajas frecuencias, su comportamiento fue muy similar.

La probeta del 1% de agua presenta un comportamiento muy diferente comparado con los otros tipos de solución, a causa de la pintura empleada para aislar la probeta del medio, es decir que solo la entalla estuviera en contacto con las soluciones. Durante la ejecución de esta prueba la pintura se sopló, dejando parte del material desnudo, lo que hizo que los datos obtenidos fueran diferentes.

Por otro lado la probeta correspondiente al 1% de agua presenta la formación de dos semicírculos, el primero asociado a la formación de la capa de óxido en el material base, la cual es menos corrosiva debido a que el valor de la Resistencia a

la polarización es mayor que para las otras soluciones, por lo que el diámetro y la amplitud del primer domo del diagrama de Nyquist son más grandes, el segundo semicírculo hace referencia a un control por transferencia de carga.

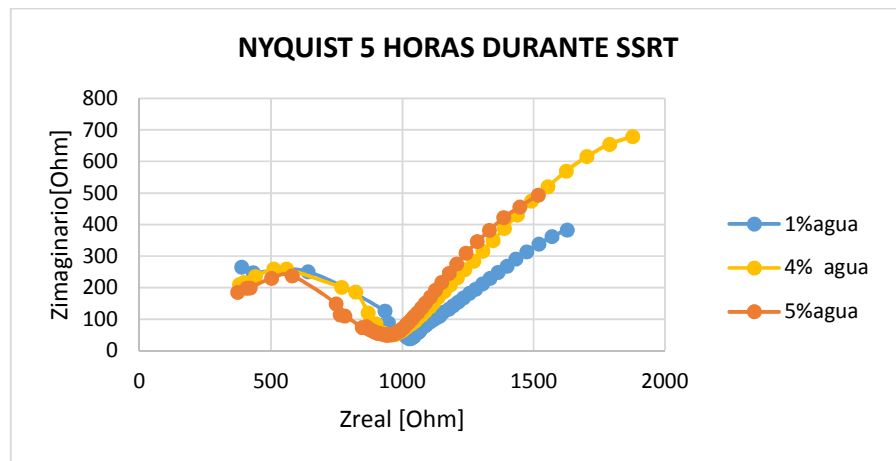


Gráfica 7. Diagrama de Nyquist para un tiempo de prueba de 3 horas

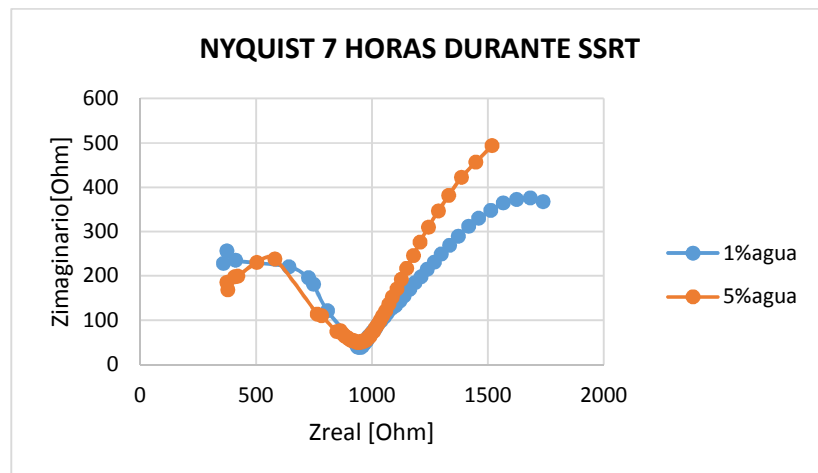
En la gráfica 7 se muestra la formación de un primer domo para las 3 soluciones (1, 4 y 5% de agua), el cual se asocia al inicio de la a formación de la capa de óxido, esta última es más corrosiva para las soluciones del 4 y 5 % de agua, debido a que el aporte de oxígeno es mayor en estas dos soluciones, por el incremento en la cantidad de agua en comparación con la del 1% de agua dando como resultado un mayor deterioro del acero para la del 4% de agua. En este caso el primer domo está relacionado con un elemento de fase constante (CPE1).

La probeta del 1% de agua forma un segundo domo que tiende a cerrarse a diferencia de las probetas correspondientes al 4 y 5% de agua, donde se forma una línea recta. En el primer caso se trata de un proceso controlado por la transferencia de carga mientras que el segundo caso se trata de un control de tipo mixto, es decir: por transferencia de carga y difusión. En este caso la

concentración del Fe disminuye en la interfaz del material comparada con la cantidad presente en la solución, lo que da como resultado un gradiente de concentración que conlleva a un proceso de difusión.



Gráfica 8. Diagrama de Nyquist para un tiempo de prueba de 5 horas



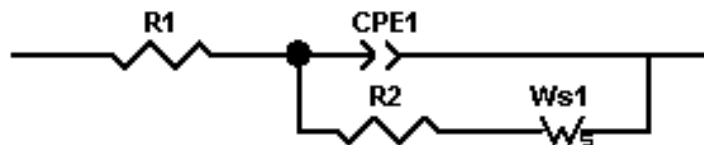
Gráfica 9. Diagrama de Nyquist para un tiempo de prueba de 7 horas

A medida que transcurre el tiempo se observa en las gráficas 8 y 9 que la corrosión del material es mayor, debido a la reducción del diámetro y amplitud de los domos formados. El comportamiento de las curvas es similar a lo que ocurre a

las 3 horas de la prueba de SSRT. En cuanto a la gráfica 8, cabe mencionar que el diagrama de Nyquist correspondiente a la solución del 4% de agua no se encuentra debido a una gran dispersión que se presentó a altas frecuencias durante la medición de EIS en la prueba SSRT, tanto para la prueba inicial como su repetición (ver anexo B).

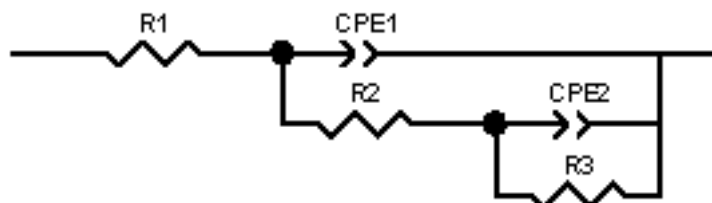
5.3.4.2 SIMULACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE NYQUIST Y BODE PARA LOS TRES TIPOS DE SOLUCIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA PRUEBA DE VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN LENTA

Figura 17. Circuito eléctrico equivalente correspondiente a las soluciones del 5% y 4% de agua antes y después de SSRT



Fuente: Programa Zview

Figura 18. Circuito eléctrico equivalente correspondiente a la solución del 1% de agua antes y después de SSRT



Fuente: Programa Zview

Tabla 12. Valores de las resistencias, elementos de fase constante y Warburg para las soluciones del 5% y 4% de agua

valores de resistencia, elementos de fase constantes y Warburg	4% AGUA				valores de resistencia, elementos de fase constantes y Warburg	5% AGUA			
	Estáticos	Dinámicos				Estáticos	Dinámicos		
		3 horas	5 horas	7 horas			3 horas	5 horas	7 horas
R1	253,6	140,1	179,2	-----	R1	185,6	81,71	100,6	103,1
CPE1-T	1,44E-07	2,21E-06	1,62E-07	-----	CPE1-T	1,55E-07	7,23E-07	1,14E-06	1,15E-06
CPE1-P	0,755	0,736	0,748	-----	CPE1-P	0,6965	0,6185	0,5828	0,582
R2	752,4	800,1	745,1	-----	R2	1274	738	821,2	818,7
Ws1-R	3219	2279	2723	-----	Ws1-R	3913	1515	1577	1577
Ws1-T	43,16	17,54	14,74	-----	Ws1-T	57,71	17,25	10,34	10,35
Ws1-P	0,3415	0,4189	0,4197	-----	Ws1-P	0,3029	0,3995	0,458	0,457

Fuente: Programa Zview

Tabla 13. Valores de las resistencias y elementos de fase constante para la solución del 1% de agua

valores de resistencia y elementos constantes de fase	1% AGUA			
	Estáticos	Dinámicos		
		3 horas	5 horas	7 horas
R1[ohm*cm ²]	370,9	164,3	167,3	152,6
CPE1-T	3,70E-08	4,25E-07	1,26E-07	9,01E-08
CPE1-P	0,8049	0,715	0,7541	0,8087
R2[ohm*cm ²]	3226	802	826,4	757
CPE2-T	0,00014	0,0000899	0,0009879	0,00101
CPE2-P	0,61277	0,538	0,4294	0,4321
R3 [ohm*cm ²]	4854	1643	3071	2515

Fuente: Programa Zview

El comportamiento electroquímico que presentaron las soluciones del 4 y 5 % de agua describen el circuito de la Figura 17, el cual consta de una resistencia R1 que representa la resistencia de la solución, seguida de un CPE1 que es el primer elemento de fase constante que hace referencia a la doble capa, seguida de una resistencia en paralelo R2, que corresponde a la resistencia de transferencia de carga que opone la capa de óxido, y finalmente un elemento de Warburg, el cual está relacionado con la difusión. Como se mencionó anteriormente en estas soluciones el mecanismo de la corrosión es debido a un control mixto.

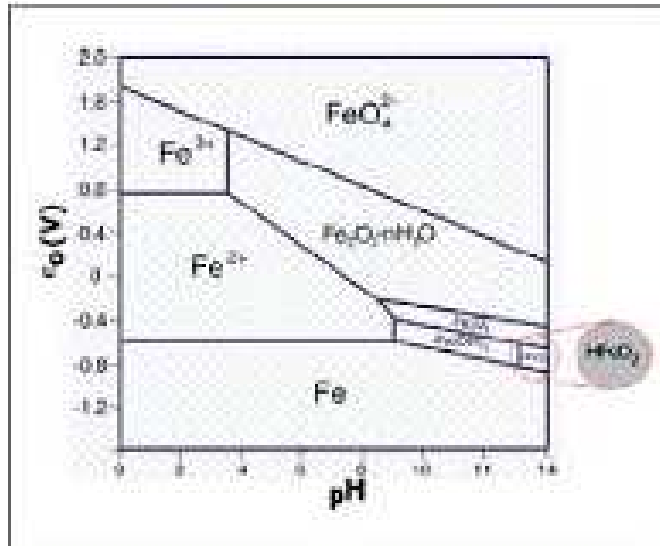
Para la solución del 1% de agua el comportamiento electroquímico fue diferente y se evidencia en su circuito eléctrico (Figura 18), el cual consta de una resistencia R1 que representa la resistencia de la solución, seguida de un CPE1 que es el primer elemento de fase constante que hace referencia a la doble capa formada, seguida de una resistencia en paralelo R2, que es la resistencia de transferencia de carga que opone la capa de óxido y que finaliza con un CPE2 que indica el segundo elemento de fase constante atribuido a la capa de óxido presente y a su vez esta es en paralelo con una resistencia R3, la cual está relacionada con la resistencia que ofrece el sistema a la transferencia de carga.

Los circuitos se simularon con el fin de comprender un poco más los mecanismos de corrosión que se estaban llevando a cabo, facilitando la explicación de los diagramas de Nyquist.

Por medio del programa de Zview se simularon los circuitos eléctricos equivalentes de las Figuras 17 y 18, en los cuales se obtuvieron porcentajes de error cuyo valor no excedía el 25%, que es el valor máximo permitido y un chi-cuadrado del orden de 10^{-3} (0.001).

Según los valores de estabilización del potencial de circuito abierto y tomando como valor de referencia un *pH* aproximado de 6 en base a lo estudiado por FORTUNATE MOYO quien asegura que el aumento en la cantidad de agua no parece afectar significativamente a la acidez de las mezclas de etanol-agua. El *pH* del etanol anhidro (antes de mezclarlo con agua) se encontró que era de aproximadamente 5,80, el aumento de contenido de agua hasta un 5% en volumen aumentó el *pH* ligeramente a 5.99 [24]. Tomando en cuenta el diagrama de Pourbaix para el Hierro (Figura 19), la zona en la que se encuentra cada solución es la de Fe^{+2} por lo tanto se puede estimar que la capa de óxido que se forma en el material es Fe_2O_3 , la cual es propia de los aceros al carbono.

Figura 19. Diagrama de Pourbaix para el hierro



Fuente: <http://www.imcyc.com/revistacyt/oct11/artingenieria.html>

6. CONCLUSIONES

- La probeta ensayada mediante SSRT cuyo electrolito es la solución de etanol con del 4%V/V de agua presenta la mayor susceptibilidad a la corrosión bajo tensión, lo cual se comprueba con el valor obtenido de RRA, el cual es menor a 0.5 donde se presenta el fenómeno mencionado anteriormente. Así mismo esta probeta tuvo la mayor pérdida de área, que es una de las consecuencias de este tipo de corrosión. El material expuesto a este medio opuso más resistencia a la propagación de la grieta debido a que fue necesaria la aplicación de una carga mayor que provocara lo mencionado anteriormente para finalmente fracturar del acero.
- Por medio de las técnicas electroquímicas se estimó el comportamiento corrosivo para cada solución (1, 4 y 5% de agua), el cual está directamente influenciado por la cantidad de agua presente en el electrolito y el tiempo de inmersión. Los factores mencionados anteriormente junto con la prueba de SSRT, hacen que el valor de Resistencia a la polarización disminuya, lo cual indica un continuo rompimiento de la capa de óxido a lo largo de las pruebas. Se evidencio un mecanismo de corrosión controlado por transferencia de carga para la solución del 1 % de agua, mientras que para las del 4 y 5% de agua el mecanismo de corrosión es debido a un control mixto.
- Los tipos de fractura encontrados en las probetas ensayadas mediante SSRT son frágiles debido a la presencia de la entalla, aunque en la parte superior de la zona de rotura se evidencia un comportamiento en su mayoría dúctil, el cual es característico del acero AISI SAE 1020, sin embargo también se prestan pequeñas zonas de fragilidad, lo que indica que se trata de una fractura mixta. La probeta del 4% de agua reveló grietas ramificadas perpendiculares a la dirección

de aplicación de la carga, de tipo transgranular, lo que determina que la falla fue debida a la corrosión bajo tensión, mientras que las otras probetas (1 y 5% de agua) no mostraron ninguna característica que indicara que hubo de CBT.

7. RECOMENDACIONES

- Modificar el software del equipo de SSRT de manera que se pueda cambiar la velocidad de deformación y permita realizar pruebas a diferentes valores de la misma. En este mismo aspecto es indispensable que la obtención de los datos del tiempo se haga de manera que al iniciar una prueba nueva se reinicie el sistema. También se recomienda hacer un cambio en el sistema de reversa, es decir que sea automático, de manera que al finalizar la prueba vuelva al punto de inicio para que la celda de carga quede ajustada y no permita que se suelte la probeta.
- Rediseñar tanto la celda como el sistema mecánico del equipo de SSRT para evitar posibles fuentes de error debido a la gran distancia que hay entre los electrodos y que se puedan realizar medidas de EIS de manera simultánea con tracción lenta evitando que la vibración del motor altere los resultados obtenidos.
- Para estudios futuros se recomienda tener en cuenta variables independientes como el pH , temperatura y la presencia de cloruros en la solución de etanol, para estimar que condiciones son las que más afectan la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión de los aceros empleados en tuberías. Así mismo se aconseja realizar pruebas de inmersión previas a la ensayo de SSRT, para evaluar la CBT y determinar la estabilidad de la película formada.

REFERENCIAS

- [1]OLMEDO, FERNANDO. Etanol como Fuente de energía [online].Noviembre de 2009 [Citado 07 Marzo de 2014]. Disponible en Internet :< URL: <http://www.biodisol.com/biocombustibles/cuales-son-las-ventajas-y-las-desventajas-de-usar-etanol-en-lugar-de-gasolina-o-nafta-biocombustibles-bioetanol/>>
- [2] ZAKI, A .Principles of corrosion engineering and Corrosion Control. September 2006. PAGINAS 202-203
- [3] SRIDHAR, N; PRICE, K; BUCKINGHAM, J. and DANTE, J. “Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel In Ethanol,” Corrosion, 62(8), 687- 702, (2006).
- [4]. KANE, R.D; SRIDHAR, N; BRONGERS, M.P.; BEAVERS, J.A.; AGRAWAL, A.K. And KLEIN, L.J. Mater. Perform. Stress corrosion cracking of carbon steel in ethanol–gasoline blends.44 (2005) (12), 50.
- [5] NEWMAN, R. C. Stress Corrosion Mechanism of Carbon Steel in Alcohols64 (2008) 819
- [6] MALDONADO, J. G; SRIDHAR, N .SCC Of Carbon Steel in Fuel Ethanol Service: Effect Of Corrosion Potential and Ethanol Processing Source, Paper 07574, Houston, TX: NACE International (2007).
- [7]CERDÁN, C. Caracterización de la pasividad del acero inoxidable UNS N08031 en ácido fosfórico contaminado mediante técnicas electroquímicas. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia .Marzo 2013.

[8] BOSCH, R.W; MOONS, F; ZHENG, J.H; BOGAERTS, W.F Corrosion 57 (2001) 532.

[9] Pabón G, Dora Lucía, Rodríguez P, Henry Aland. Evaluación de la corrosión de un acero AISI 1020 en mezclas de gasolina-bioetanol del 5, 10, 15, 20 y 100% por medio de técnicas gravimétricas y electroquímicas. 2011

[10] LOU, X. Stress corrosion cracking and corrosion of carbon steel in simulated fuel-grade ethanol. Trabajo de Grado. Georgia Institute of Technology December 2010.

[11] NACE STANDARD TM 0198-2004. Slow strain rate test method for screening corrosion-resistant alloys for stress corrosion cracking in sour oilfield service.

[12] NORMA ASTM G129 – 00. Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking1.

[13] Guides to Good Practice. STRESS CORROSION CRACKING.

[14] LOU, Xiaoyuan; PREET M. Singh Phase angle analysis for stress corrosion cracking of carbon steel in fuel-grade ethanol: Experiments and simulation. May 2010.

[15] KANE, R.D; MALDONADO, J.G. Stress corrosion cracking in fuel ethanol: a newly recognized phenomenon. 2004.

[16] ALBISTURGOÑI, A; BERLANGA, C; Labari, J; Fernández Carrasquilla. Corrosión bajo tensión de un acero al carbono en mezclas de Bioetanol y Gasolina. Marzo de 2008.

[17] SABOGAL, Liliana Rocio. Evaluación de la corrosión del acero inoxidable AISI 304 en mezclas de Gasolina- Etanol del 5 al 20% mediante técnicas de gravimetría y electroquímicas. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenieras Fisicoquímicas.2011

[18] XIAOYUAN Lou, LINDSEY R. GOODMAN and PREET M. Singh School of Materials Science and Engineering Georgia Institute of Technology. Understanding the stress corrosion cracking of x-65 pipeline steel in fuel-grade ethanol. NACE International (2010).

[19] FENG Gui, SRIDHAR Narasi, BEAVERS John. Effect of Ethanol Composition on the SCC Susceptibility of Carbon Steel. NACE International (2010).

[20] J.P. Souza, O.R.Mattos, L.Sathler y H.Takenouti. Impedance measurements of corroding mild Steel in an automotive fuel etanol with and without inhibitor in a two and three electrode cell. Mayo, 2003, Vol. 27, p 351-364.

[21] Tensile testing.2ND EDITION [online].[Citado 15 Octubre de 2014]. Disponible enInternet:<URL:http://books.google.com.co/books?id=5uRIb3emLY8C&pg=PA28&lpg=PA28&dq=notch+tensile+strength&source=bl&ots=OsY6-lbl4G&sig=0Vke9XusV3PXn4AeyFS6wX9Cwh8&hl=es&sa=X&ei=Lwk_VK7IE8OQNsmbgcgB&ved=0CDwQ6AEwAw#v=onepage&q=notch%20tensile%20strength&f=false

[22] Mechanical behavior of engineering materials. Roesler, J. Harders, H. Baeker, M. Tensile testing on notched specimens. [Online]. [Citado 15 Octubre de 2014]. Disponible

en Internet: <URL: http://books.google.com.co/books?id=pZL44wHzswsC&pg=PA125&dq=notch+tensile+test&hl=es&sa=X&ei=cAs_VPn1FZfFggSum4DIBg&ved=0CDsQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false>

[23] LINDSEY, R. Goodman. Stress corrosion cracking of x65 pipeline steel in fuel grade ethanol environments. December 2012

[24] MOYO, F. Effects of water on the stress corrosion cracking of carbon steel in ethanolic media

[25] Contreras, A., Albiter, A., Salazar, M., Pérez, R. Slow strain rate corrosion and fracture characteristics of X-52 and X-70 pipeline steels. Instituto Mexicano del Petróleo, Programa de Investigación y Desarrollo de Ductos, Eje Central Lázaro Cárdenas #152, San Bartolo Atepehuacan, C.P. 07730, México, D.F., Mexico. Received in revised form 17 June 2005; accepted 15 July 2005

[26] Lou, X., Yang, D. and Singh, P.M., 2009, 'Effects of ethanol chemistry on stress corrosion cracking of carbon steel in fuel-grade ethanol', *Corrosion*, vol. 65, no.12, pp. 785-796.

BIBLIOGRFÍA

ALBISTURGOÑI, A; BERLANGA, C; Labari, J; Fernández Carrasquilla. Corrosión bajo tensión de un acero al carbono en mezclas de Bioetanol y Gasolina. Marzo de 2008.

BOSCH, R.W; MOONS, F; ZHENG, J.H; BOGAERTS, W.F Corrosion 57 (2001) 532.

CERDÁN, C. Caracterización de la pasividad del acero inoxidable UNS N08031 en ácido fosfórico contaminado mediante técnicas electroquímicas. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia .Marzo 2013.

CONTRERAS, A., Albiter, A., Salazar, M., Pérez, R. Slow strain rate corrosion and fracture characteristics of X-52 and X-70 pipeline steels. Instituto Mexicano del Petróleo, Programa de Investigación y Desarrollo de Ductos, Eje Central Lázaro Cárdenas #152, San Bartolo Atepehuacan, C.P. 07730, México, D.F., Mexico. Received in revised form 17 June 2005; accepted 15 July 2005

FENG Gui, SRIDHAR Narasi, BEAVERS John. Effect of Ethanol Composition on the SCC Susceptibility of Carbon Steel. NACE International (2010).

Guides to Good Practice. STRESS CORROSION CRACKING.

J.P. Souza, O.R. Mattos, L. Sathler y H. Takenouti. Impedance measurements of corroding mild Steel in an automotive fuel ethanol with and without inhibitor in a two and three electrode cell. Mayo, 2003, Vol. 27, p 351-364.

KANE, R.D; MALDONADO, J.G. Stress corrosion cracking in fuel ethanol: a newly recognized phenomenon. 2004.

KANE, R.D; SRIDHAR, N; BRONGERS, M.P.; BEAVERS, J.A.; AGRAWAL, A.K. And KLEIN, L.J. Mater. Perform. Stress corrosion cracking of carbon steel in ethanol–gasoline blends.44 (2005) (12), 50.

LINDSEY.R.Goodman.STRESSCORROSIONCRACKINGOFX65PIPELINESTEELI
NFUELGRADEETHANOL ENVIRONMENTS. December2012

LOU, X. Stress corrosion cracking and corrosion of carbon steel in simulated fuel-grade ethanol. Trabajo de Grado. Georgia Institute of Technology December2010.

LOU, X., Yang, D. and Singh, P.M., 2009, 'Effects of ethanol chemistry on stress corrosion cracking of carbon steel in fuel-grade ethanol', *Corrosion*, vol. 65, no.12, pp. 785-796

LOU,Xiaoyuan; PREET M. Singh Phase angle analysis for stress corrosion cracking of carbon steel in fuel-grade ethanol: Experiments and simulation. May 2010.

MALDONADO, J. G; SRIDHAR, N .SCC Of Carbon Steel in Fuel Ethanol Service: Effect Of Corrosion Potential and Ethanol Processing Source, Paper 07574, Houston, TX: NACE International (2007).

Mechanical behavior of engineering materials.Roesler, J. Harders, H. Baeker, M.Tensiletestingonnotchedspecimens. [Online].[Citado 15 Octubre de 2014].

Disponible en Internet: <URL: http://books.google.com.co/books?id=pZL44wHzsWsC&pg=PA125&dq=notch+tensile+test&hl=es&sa=X&ei=cAs_VPn1FZfFggSum4DIBg&ved=0CDsQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false>

MOYO, F. EFFECTS OF WATER ON THE STRESS CORROSION CRACKING OF CARBON STEEL IN ETHANOLIC MEDIA

NACE STANDARD TM 0198-2004. Slow strain rate test method for screening corrosion-resistant alloys for stress corrosion cracking in sour oilfield service.

NEWMAN, R. C. Stress Corrosion Mechanism of Carbon Steel in Alcohols 64 (2008) 819

NORMA ASTM G129 – 00. Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking 1.

OLMEDO, FERNANDO. Etanol como Fuente de energía [online]. Noviembre de 2009 [Citado 07 Marzo de 2014]. Disponible en Internet :< URL: <http://www.biodisol.com/biocombustibles/cuales-son-las-ventajas-y-las-desventajas-de-usar-etanol-en-lugar-de-gasolina-o-nafta-biocombustibles-bioetanol/>>

PABÓN G, Dora Lucía, Rodríguez P, Henry Aland. Evaluación de la corrosión de un acero AISI 1020 en mezclas de gasolina-bioetanol del 5, 10, 15, 20 y 100% por medio de técnicas gravimétricas y electroquímicas. 2011

SABOGAL, Liliana Rocio. Evaluación de la corrosión del acero inoxidable AISI 304 en mezclas de Gasolina- Etanol del 5 al 20% mediante técnicas de gravimetría y

electroquímicas. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenieras Fisicoquímicas.2011

SRIDHAR, N; PRICE, K; BUCKINGHAM, J. and DANTE, J. "Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel In Ethanol," Corrosion, 62(8), 687- 702, (2006).

Tensile testing.2ND EDITION [online].[Citado 15 Octubre de 2014]. Disponible enInternet:<URL:http://books.google.com.co/books?id=5uRlb3emLY8C&pg=PA28&lpg=PA28&dq=notch+tensile+strength&source=bl&ots=OsY6-lbl4G&sig=0Vke9XusV3PXn4AeyFS6wX9Cwh8&hl=es&sa=X&ei=Lwk_VK7IE8OQNsmbgcgB&ved=0CDwQ6AEwAw#v=onepage&q=notch%20tensile%20strength&f=false

XIAOYUAN Lou, LINDSEY R. GOODMAN and PREET M. Singh School of Materials Science and Engineering Georgia Institute of Technology. Understanding the stress corrosion cracking of x-65 pipeline steel in fuel-grade ethanol. NACE International (2010).

ZAKI, A .Principles of corrosion engineering and Corrosion Control. September 2006. PAGINAS 202-203

ANEXOS

ANEXO A. COMPOSICIÓN DEL ACERO AISI SAE 1020

Acero AISI SAE 1020

La composición del acero según la designación AISI SAE puede encontrarse entre los siguientes rangos:

Tabla 14. Composición correspondiente al acero AISI SAE 1020

Carbono	Manganeso	Azufre	Fosforo	Silicio
0.18-0.23 %	0.3-0.6%	0.050 máximo	0.040 máximo	0.15-0.30%

Fuente: http://www.enracor.com.ar/enracor/info_05.htm

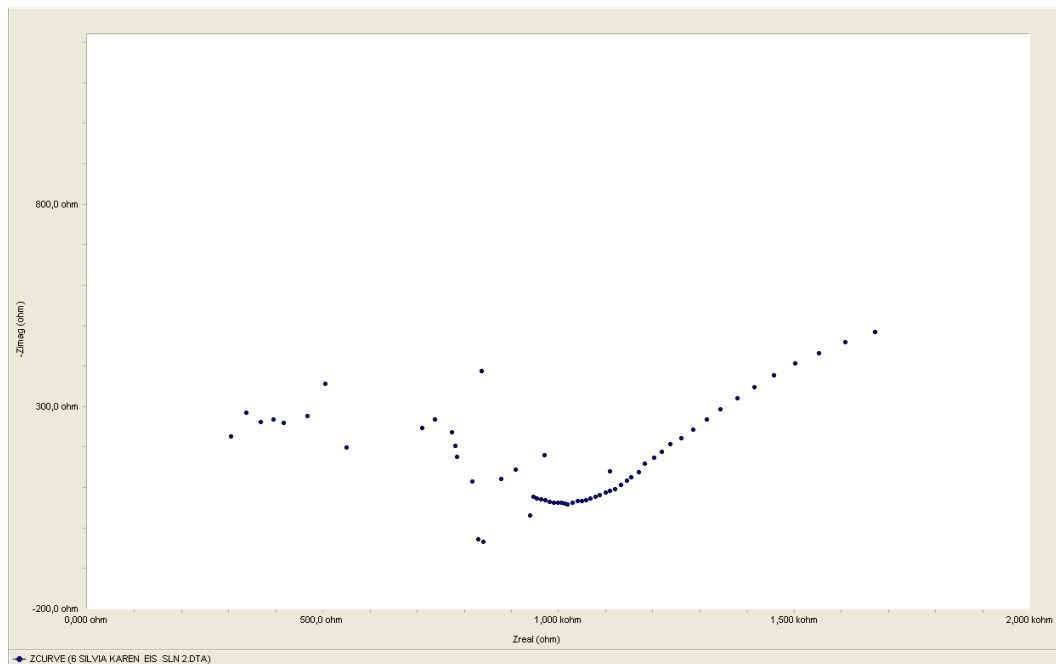
10/7/2014 10:16:33 AM

RESULTADOS DE ANÁLISIS

Sample Identification										
Sample No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.194	0.243	0.646	0.014	<0.150	0.070	<0.010	0.042	0.057	<0.0050
2.	0.190	0.236	0.644	0.014	<0.150	0.068	<0.010	0.040	0.055	<0.0050
3.	0.187	0.230	0.626	0.013	<0.150	0.067	<0.010	0.038	0.051	<0.0050
∅	0.190	0.236	0.639	0.014	<0.150	0.068	<0.010	0.040	0.054	<0.0050
σ	0.0035	0.0065	0.011	0.00071		0.0016		0.0020	0.0031	
u	1.842	2.754	1.721	5.071		2.353		5.000	5.741	
	As	B	Bi	Ca	Co	Mg	N	Nb	Pb	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0040	<0.0010	0.018	<0.0	0.0051	0.0063	0.031	<0.0010	0.011	<0.010
2.	0.0040	<0.0010	0.015	<0.0	0.0051	0.0062	0.033	<0.0010	0.010	<0.010
3.	0.0034	<0.0010	0.010	<0.0	<0.0050	0.0071	0.040	<0.0010	<0.010	<0.010
∅	0.0038	<0.0010	0.014	0.0	0.0051	0.0065	0.035	<0.0010	<0.010	<0.010
σ	0.00035		0.0041		0.00007	0.00049	0.0047		0.00071	
u	9.211		29.29		1.373	7.538	13.43		7.100	
	Sn	Ta	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	<0.0050	<0.030	0.0013	<0.0050	0.015	0.0038	0.0030	<0.0050	98.43	
2.	<0.0050	<0.030	0.0014	<0.0050	0.016	0.0037	0.0026	<0.0050	98.45	
3.	<0.0050	<0.030	0.0012	<0.0050	0.015	0.0035	0.0020	<0.0050	98.49	
∅	<0.0050	<0.030	0.0013	<0.0050	0.015	0.0037	0.0025	<0.0050	98.46	
σ			0.00010		0.00071	0.00016	0.00050		0.031	
u			7.692		4.733	4.324	20.00		0.031	

ANEXO B. DIAGRAMA DE NYQUIST PARA LA SOLUCIÓN DEL 4% DE AGUA DINÁMICO

Figura 20. Diagrama de Nyquist para la solución de 4% de agua después de 7 horas del ensayo de SSRT

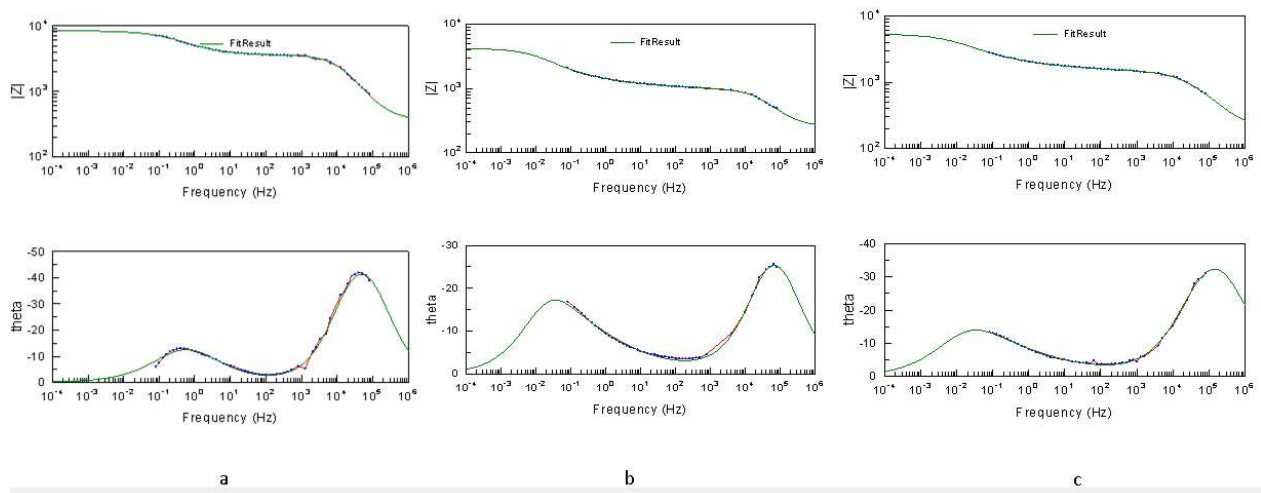


Fuente: Potenciostato/Galvanostato GAMRY 750

ANEXO C. DIAGRAMAS DE BODE ANTES Y DESPUÉS DE LA PRUEBA DE SSRT

DIAGRAMAS DE BODE DE LAS SOLUCIONES DE 1, 4 Y 5% DE AGUA ANTES DE LA PRUEBA SSRT

Figura 21. Diagramas de Bode para las 3 soluciones estáticas (a) 1%de agua, (b) 4% de agua, (c) 5% de agua después de 3 horas del ensayo de SSRT

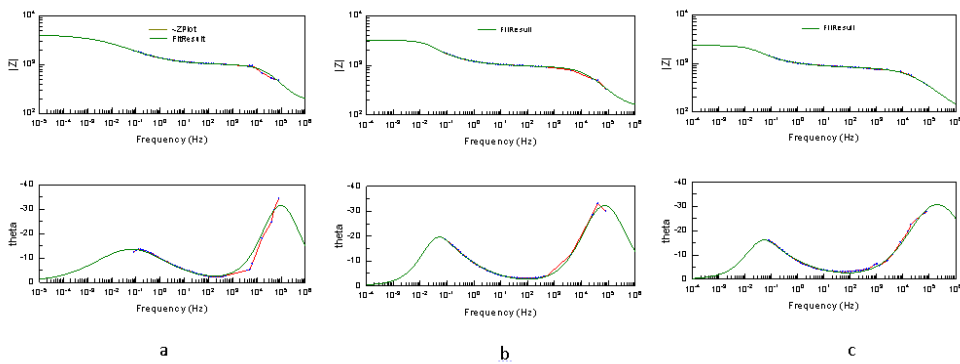


Fuente: Programa Zview

DIAGRAMAS DE BODE DE LAS SOLUCIONES DE 1, 4 Y 5% DE AGUA DESPUÉS DE LA PRUEBA SSRT

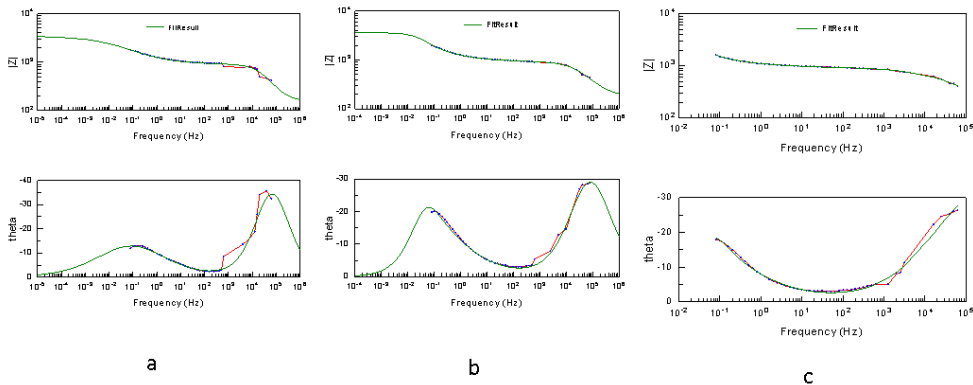
- 3 horas de SSRT

Figura 22. Diagramas de Bode para las 3 soluciones dinámicas (a) 1%de agua, (b) 4% de agua, (c) 5% de agua después de 5 horas del ensayo de SSRT



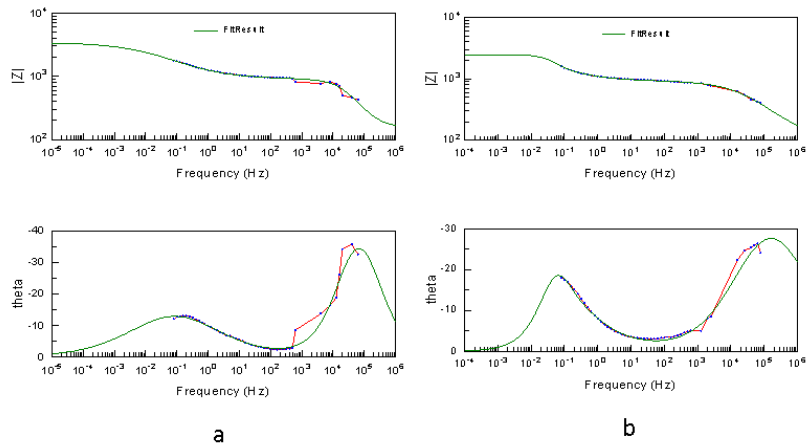
- 5 horas de SSRT

Figura 23. Diagramas de Bode para las 3 soluciones dinámicas (a) 1%de agua, (b) 4% de agua, (c) 5% de agua después de 5 horas del ensayo de SSRT



- 7 horas de SSRT

Figura 24. Diagramas de Bode para las 3 soluciones dinámicas (a) 1%de agua, (b) 5% de agua después de 7 horas del ensayo de SSRT



Fuente: Programa Zview