

USO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA DETERMINAR LA  
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN LOCALIZADA DE UN ACERO INOXIDABLE  
SUPER DUPLEX UNS S-32760

INGRID KATHERINE RODRÍGUEZ CHAVEZ

SHANEY LORENA PABÓN CALDERON

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

BUCARAMANGA

2016

USO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA DETERMINAR LA  
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN LOCALIZADA DE UN ACERO INOXIDABLE  
SUPER DUPLEX UNS S-32760

INGRID KATHERINE RODRÍGUEZ CHAVEZ  
SHANEY LORENA PABÓN CALDERON

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico

Director

MAURICIO RINCÓN ORTIZ

Doctor en Ciencia y Tecnología de materiales

Co-Director

SANDRA JUDITH GARCÍA VERGARA

Doctora en Ingeniería de Materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA

2016

## *Dedicatoria*

*A Dios, por mostrarme el camino que debía seguir, por acompañarme en cada paso que doy,  
brindándome inteligencia, paciencia y fortaleza.*

*A mí todo, mi madre Carmen Vanegas, por ser mi apoyo incondicional, mi mayor ejemplo a  
seguir y por todos los años que me ha dedicado con tanto amor, llenos de alegrías,  
trasmochos, esfuerzos, lágrimas y sonrisas porque éste más que un logro mío es de ella.*

*A mis padres, Sandra y Yesid, por cada uno de sus consejos y por el apoyo que siempre me  
han brindado.*

*A mi familia y amigos, por su cariño y confianza, por acompañarme durante los momentos  
buenos y malos.*

*A mis profesores, en especial a Libardo Lozano y a la Hna Nancy Beleño, por brindarme  
su conocimiento y sobre todo por sus sabios consejos.*

*Shaney Lorena Pabón Calderón.*

## *Dedicatoria*

*A Dios, por guiar mis pasos durante mi vida, por brindarme fortaleza y sabiduría para poder alcanzar esta meta y por haber colocado en mi camino a aquellas personas que han sido un apoyo y compañía en esta etapa de mi vida.*

*A mis padres, por brindarme un amor incondicional y un apoyo en todo momento, por ser un pilar fundamental en mi vida, pero más que nada por infundirme el valor para salir adelante porque más que un triunfo mío es de ellos.*

*A mi hermana, por ser un ejemplo de una buena hermana e hija y brindarme su cariño y apoyo.*

*A mis amigos, por su compañía y permitirme disfrutar de buenos momentos, por su apoyo y las enseñanzas vividas.*

*A mis profesores, por guiarme y ayudarme en mi camino universitario.*

*A todos los que de una u otra manera hicieron parte de esta etapa y me ayudaron a finalizarla.*

*Ingrid Katherine Rodríguez Chávez*

## *Agradecimientos*

*A nuestro director de proyecto profesor Mauricio Rincón Ortiz y profesora Sandra Judith García Vergara, por su apoyo y dedicación constante en el presente trabajo.*

*Al Laboratorio de Microscopia de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico Guatiguará y su personal, al Laboratorio Instrumental de Análisis Químico y a los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por toda la ayuda y servicios prestados para la realización de nuestro proyecto de grado.*

## CONTENIDO

	Página
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>18</b>
1.1. GENERALIDADES Y APLICACIONES DEL ACERO.....	18
1.2. PASIVIDAD Y RUPTURA DE LA CAPA PASIVA.....	19
1.3 CORROSIÓN POR PICADO.....	20
1.3.1 Mecanismos de la corrosión por picado.....	20
1.4. CURVAS DE POLARIZACIÓN.....	22
1.4.1 Curva de polarización anódica.....	22
1.5. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS.....	24
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>29</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	29
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>30</b>
3.1. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.....	30
3.2. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS.....	30
3.3. ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL PICADO.....	31
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>33</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA DE LA ALEACIÓN.....	33
4.2. MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES CRÍTICOS DE LA ALEACIÓN .....	35

4.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA.....	39
4.4. POTENCIALES DE PICADO ( $E_p$ ).....	42
4.5. POTENCIALES DE REPASIVACIÓN ( $E_{RP}$ ).....	45
4.6. VELOCIDADES DE CORROSIÓN.....	48
4.6. ANÁLISIS MICROSCOPICO DEL PICADO.....	50
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>6. CITAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>60</b>

## LISTAS DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Curva de polarización anódica y sus diferentes comportamientos.....	23
<b>Figura 2.</b> Curva representativa de la técnica electroquímica Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP).....	25
<b>Figura 3.</b> Curva representativa de la técnica electroquímica Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD).....	26
<b>Figura 4.</b> Curva representativa obtenida por medio de la técnica de Extrapolación de Tafel.....	27
<b>Figura 5.</b> Curva representativa obtenida por medio de la técnica de Resistencia de la polarización lineal.....	28
<b>Figura 6.</b> Micrografía óptica del acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760: a) 100x, b) 200x, c) 1000x y d) 1200x.....	34
<b>Figura 7.</b> Curvas CPP de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a temperaturas de 25, 60 y 80°C.....	37
<b>Figura 8.</b> Curvas PD-GS-PD a 30 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a temperaturas de 25, 60 y 80°C.....	38
<b>Figura 9.</b> Curvas PD-GS-PD a 300 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a temperaturas de 25, 60 y 80°C.....	38
<b>Figura 10.</b> Curvas CPP, PD-GS-PD 30 $\mu$ A y PD-GS-PD 300 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25°C.....	40
<b>Figura 11.</b> Curvas CPP, PD-GS-PD 30 $\mu$ A y PD-GS-PD 300 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 60°C.....	41
<b>Figura 12.</b> Curvas CPP, PD-GS-PD 30 $\mu$ A y PD-GS-PD 300 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 80°C.....	42

<b>Figura 13.</b> Potenciales de picado de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica CPP en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.....	43
<b>Figura 14.</b> Potenciales de picado de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a 30μA en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.....	43
<b>Figura 15.</b> Potenciales de picado de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a 300μA en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.....	44
<b>Figura 16.</b> Potenciales de repasivación de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica CPP en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.....	46
<b>Figura 17.</b> Potenciales de repasivación de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a 30μA en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.....	46
<b>Figura 18.</b> Potenciales de repasivación de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a 300 μA en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.....	47
<b>Figura 19.</b> Micrográficas ópticas de la aleación UNS S-32760 sin ataque. Probeta estudiada por la técnica CPP vista a: a) 50X,c) 200X y e) 1000X. Probeta estudiada por la técnica PD-GS-PD vista a: b) 50X,d) 200X y f) 1000X.....	51
<b>Figura 20.</b> Análisis MEB-EDS la aleación UNSS 32760 a) Probeta estudiada por la técnica CPP vista a 2500x. b) Análisis EDS del punto indicado en la Figura 20 (a). c) Probeta estudiada por la técnica PD-GS-PS vista a 20000x. d) Análisis EDS del punto indicado en la Figura 20 (c).....	53

## LISTA DE TABLAS

	<b>Página</b>
<b>Tabla 1.</b> Concentración elemental de especies presentes en la aleación en estudio y en la aleación comercial.....	35
<b>Tabla 2.</b> Datos obtenidos por la técnica de extrapolación de Tafel.....	48
<b>Tabla 3.</b> Datos obtenidos por la técnica de Resistencia de la polarización lineal.....	49

## RESUMEN

**TÍTULO:** USO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN LOCALIZADA DE UN ACERO INOXIDABLE SUPER DUPLEX UNS S-32760\*.

**AUTORES:** Rodríguez Chavez, Ingrid Katherine. Pabón Calderón, Shaney Lorena\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760, temperatura, corrosión por picado, potenciales críticos, CPP, PD-GS-PD.

El acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760 hoy en día es una de las aleaciones más utilizadas en diversas industrias debido a su alta resistencia a la corrosión, sin embargo esta propiedad se ve afectada cuando la aleación es expuesta a medios agresivos. Razón por la cual, el presente trabajo busca por medio de la implementación de técnicas electroquímicas, tales como Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP) y Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD), determinar la manera cómo repercute la temperatura en los potenciales críticos de la aleación; las pruebas fueron realizadas en soluciones de NaCl al 3,5%P/P y a diversas temperaturas: 25°C, 60°C y 80°C, para establecer la susceptibilidad de la aleación a la corrosión por picado ante dichas condiciones. Resultados muestran que a temperaturas de 60 y 80°C existe presencia de corrosión por picado. De igual manera, se realizó un estudio sobre las velocidades de corrosión de la presente aleación mediante técnicas electroquímicas como extrapolación de Tafel y Resistencia de la Polarización lineal, donde se observó que al aumentar la temperatura existe un incremento en la velocidad de corrosión de la aleación, pero por otro lado, a un mayor tiempo de exposición a una misma temperatura la velocidad de corrosión disminuye.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Mauricio Rincón Ortiz, Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales. Codirectora: Sandra Judith García Vergara, Doctora en Ingeniería de Materiales.

## ABSTRACT

**TITLE:** USE OF ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES TO DETERMINE THE RESISTANCE OF A LOCALIZED CORROSION ON A SUPER DUPLEX UNS S-32760\* STAINLESS STEEL.

**AUTHORS:** Rodríguez Chavez, Ingrid Katherine. Pabón Calderón, Shaney Lorena\*\*.

**KEY WORDS:** Super duplex stainless Steel UNS S-32760, temperature, pitting corrosion, critical potentials, CPP, PD-GS-PD.

Due to its high corrosion resistance, super duplex stainless steel UNS S-32760 is one of the most commonly used alloys in several industrial applications. However, this characteristic is affected when the alloy is exposed to aggressive environments. In this work, the effect of temperature on the critical potential of super duplex stainless steel was studied through the implementation of electrochemical techniques such as Cyclic Potentiodynamic Polarization (CPP), and Potentiodynamic-Galvanostatic-Potentiodynamic Polarization (PD-GS-PD). The tests were carried out in 3.5 %wt NaCl solutions at different temperatures (25, 60, and 80°C) in order to evaluate the susceptibility to pitting corrosion of the alloy under these conditions. The results showed the presence of pitting corrosion at temperatures of 60 and 80°C. Moreover, Tafel extrapolation and linear resistance polarization were used to measure corrosion rates. Furthermore, although an increase in temperature resulted in higher corrosion rates, greater exposure times led to a decrease in the corrosion rates, when working at the same temperature.

---

\*Bachelor Thesis.

\*\*Faculty Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Mauricio Rincón Ortiz, PhD of Science and Technology of Materials. Codirector: Sandra Judith García Vergara, PhD of Engineering of Materials.

## INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable gracias a las propiedades físicas que los caracterizan son las aleaciones predilectas en diversas industrias, dentro de su clasificación se encuentran los aceros inoxidable dúplex los cuales han tomado cierta relevancia en las últimas décadas y se han convertido en las aleaciones más utilizadas en la industria química, del papel y principalmente la petroquímica, puesto que presentan propiedades mecánicas superiores que los aceros convencionales [1]. Poseen mayor resistencia mecánica que los aceros inoxidable austeníticos, mayor tenacidad que los aceros inoxidable ferríticos; además de su alta resistencia a la corrosión tanto general como localizada, teniendo en cuenta un PREN (Pitting Resistant Equivalent Number) por encima de 35 [2]. Dichas propiedades son consecuencia de su microestructura bifásica (ferrita-austenita), su contenido de Cr superior al 12%P/P y a la presencia de otros elementos aleantes como el Ni y Mo [3].

Dentro de este grupo de aceros se encuentra la aleación UNS S-32760, destacada por su alta resistencia mecánica y soldabilidad, utilizada principalmente en la elaboración de componentes estructurales de plataformas “*off-shore*” [3].

Aunque dichas aleaciones poseen buenas propiedades de servicio, cuando son empleadas en ambientes salinos y/o a elevadas temperaturas su resistencia a la corrosión se ve afectada. Así mismo, en ocasiones los aceros inoxidable súper dúplex pueden llegar a presentar fases indeseables en su matriz durante su vida útil, también sufren transformaciones micro-estructurales a temperaturas entre 350 y 1000°C, que conllevan a la formación de nuevas fases que repercuten directamente en su potencial de picado ( $E_p$ ), haciendo al acero susceptible a la corrosión localizada, especialmente a la corrosión por picado y en rendijas [3].

Debido a que la corrosión se hace presente en las imperfecciones superficiales y lugares expuestos a daños mecánicos, afectando de manera significativa la película

protectora propia de la aleación, es de vital importancia prestar atención a su presencia en los aceros inoxidables súper dúplex.

Para lograr establecer mecanismos de protección que mitiguen los procesos corrosivos a los cuales son susceptibles los aceros inoxidables súper dúplex, es indispensable realizar una caracterización minuciosa de dichos aceros. Además del potencial de picado ( $E_P$ ), existen otros potenciales críticos fundamentales tales como el potencial de repasivación ( $E_{RP}$ ), el cual se da cuando el metal es capaz de regenerar la capa pasiva una vez iniciado el ataque por corrosión y, el potencial de corrosión ( $E_{CORR}$ ) que se genera cuando las dos reacciones anódicas y catódicas ocurren a la misma velocidad, sin necesidad de que se llegue al equilibrio. Ambos potenciales se logran medir realizando curvas de polarización que son las representaciones de potencial del electrodo y la densidad de corriente [4].

Estudios previos demuestran que la técnica de Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP), utiliza curvas de polarización anódicas, logrando determinar los potenciales críticos en corrosión por picado y en rendijas para diferentes aceros inoxidables [5], de igual manera recientemente ha incursionado una nueva técnica denominada Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD), para la determinación de potenciales de repasivación de una manera rápida y eficiente, pero solo ha sido evaluado en corrosión por rendijas [6].

Con base en lo anteriormente mencionado, el presente trabajo tiene como objetivo lograr evaluar el efecto de la temperatura sobre los potenciales críticos ( $E_{RP}$  y  $E_P$ ) en un acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760 en soluciones de 3,5%P/P de NaCl por medio de las técnicas electroquímicas CPP y PD-GS-PD.

## 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 1.1. GENERALIDADES Y APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable debido a las propiedades físicas que los caracterizan son las aleaciones predilectas en diversas industrias, dentro de su clasificación se encuentran los aceros inoxidable súper dúplex los cuales han tomado cierta relevancia en las últimas décadas y se han convertido en las aleaciones más utilizadas en diferentes ámbitos industriales, puesto que presentan propiedades mecánicas superiores que los aceros convencionales [1].

En este grupo de aceros se encuentra la aleación UNS S-32760 [3], al pertenecer al grupo de los aceros inoxidable dúplex, naturalmente cumplen con sus principales características, como son un elevado contenido de Cr, microestructura bifásica (ferrita-austenita; 50:50), y por supuesto, alta resistencia a la corrosión, tolerando ambientes muy agresivos con altas concentraciones de cloruro [7]. Se denomina “súper” debido a que presenta mejores propiedades mecánicas, y su resistencia a la corrosión es mucho más elevada, siendo consecuencia de su composición química [8]. Los aceros súper dúplex tienen mayores porcentajes Cr, Ni, Mo, dichos elementos aumentan su resistencia a la corrosión, mejoran la resistencia al desgaste, garantizan la estabilidad de las fases  $\alpha$  (ferrita) y  $\gamma$  (austenita) y la pasividad del acero [7, 8, 9,10].

El acero UNS S-32760, hace parte de los aceros inoxidable súper dúplex, su composición química suele ser 0,020%P/P C, 25%P/P Cr, 7%P/P Ni, 0.25%P/P N, 0,7%P/P Cu y 0,7%P/P W [9]. Se caracteriza por su excelente resistencia mecánica, buena soldabilidad, temperatura de servicio hasta de 325°C y en especial por su alta resistencia a la corrosión en medios ácidos, con un PREN superior a 40 [7, 8,11]. Sin embargo, algunas de las características ya mencionadas, son afectadas por ciertas condiciones de trabajo [11].

En las dos últimas décadas esta aleación es la más implementada en industrias como la del procesamiento de papel, transporte y procesamiento de agua, minera, química, marina, y en especial para la industria petroquímica, esto debido a sus propiedades [9]. Utilizada principalmente para la fabricación de intercambiadores, calentadores de agua, intercambiadores de calor, plataformas, bombas de inyección, tuberías, ejes, rotores, entre otros [12].

Los primeros estudios para el uso de piezas fabricadas con este tipo de aleación, en el sector petroquímico, tuvo inicio en el año 1980 en elementos de plantas “*off-shore*” [7]. En el año 1986 Shell implantó la primera bomba de inyección de acero súper dúplex, respondiendo de manera favorable a las condiciones hostiles presentes en el mar del norte [7,13]. Como las estructuras presentaron buenas condiciones de servicio ante ambientes agresivos, posteriormente se empleó la aleación para la fabricación de tuberías [14]. Hoy en día la totalidad de las bombas de inyección, utilizadas en plataformas “*off-shore*”, ubicadas en el Golfo Pérsico, el Mar Rojo y el Océano Ártico, son fabricadas con aceros súper dúplex, así como gran porcentaje de la tubería que las conforman [15].

## **1.2. PASIVIDAD Y RUPTURA DE LA CAPA PASIVA**

La pasividad es una característica que hace relativamente inmune al acero por pequeños lapsos de tiempo, haciendo que no reaccione ante diferentes ambientes en los que debería comportarse de manera activa; el proceso corrosivo es moderado, puesto que el metal no experimenta ninguna diferencia de corriente [16,17,18].

Se considera la pasividad de una aleación, a la película de óxido o hidróxido formada en su superficie, cuyo espesor está en el rango de 1-10  $\eta\text{m}$ , creando una barrera electroquímica que impide la interacción con el ambiente en el que se encuentre, se polariza la aleación, disminuyendo la velocidad a la cual la aleación se corroe [19].

En los aceros inoxidable la formación de dicha película es consecuencia de la presencia de Cr, en proporciones superiores del 12%P/P [20,21].

Al experimentar cambios bruscos en las condiciones de trabajo, puede ocurrir la pérdida total o parcial en zonas específicas de la capa, quedando la aleación expuesta a cualquier ataque del entorno. Normalmente la pérdida de la capa se presenta en áreas irregulares o en defectos estructurales. Los aceros inoxidable pierden su pasividad por incrementos en la temperatura y ante la presencia de iones agresivos, en especial iones cloruros. La ruptura de la película se puede originar por mecanismos químicos, electroquímicos y mecánicos [18].

### **1.3. CORROSIÓN POR PICADO**

La corrosión por picado se presenta como un ataque preciso a una pequeña área de la superficie del metal cuyo orden es de mm<sup>2</sup>, mientras el resto de la superficie se mantiene en un estado pasivo [22, 23]. Para cualquier acero es peligroso presentar picaduras, debido a que esta forma de corrosión es de los ataques más agresivos, dado que pueden llegar a penetrar una parte localizada del metal, así como también un agrietamiento en su superficie. Estos daños se complican aún más debido a la difícil identificación de las picaduras que en su mayoría a medida que crecen son cubiertas por productos de corrosión [19].

La corrosión por picado ocurre en todos los metales pasivos, se han realizado estudios en su mayoría para aceros inoxidable [15]. Cuando estos aceros se encuentran en contacto con considerables concentraciones de Cl<sup>-</sup>, los iones agresivos de esta especie empiezan a generar la corrosión en determinadas zonas del metal. Las picaduras también se dan en presencia de otros iones, como lo son Br<sup>-</sup> y I<sup>-</sup> [15, 18].

#### **1.3.1 Mecanismos de la corrosión por picado**

En el mecanismo de corrosión por picado se tienen tres etapas, la iniciación, la propagación y la repasivación [24].

❖ *Mecanismo de iniciación de la corrosión por picado*

Esta etapa se suele dividir en tres mecanismos principales:

- i. Mecanismo de penetración.
- ii. Mecanismo de adelgazamiento de la película.
- iii. Mecanismo de ruptura de la película [23].

❖ *Mecanismo de propagación de la corrosión por picado*

Esta etapa solo consiste en la propagación de la picadura, debido a la formación de un electrolito interno altamente corrosivo y de características ácidas, con una significativa concentración de iones cloruros y cationes disueltos del metal o la aleación. Cuando el electrolito está completamente formado, se considera que este fenómeno es un proceso auto catalítico [25].

❖ *Mecanismo de repasivación de la corrosión por picado*

Esta etapa da por finalizada la propagación de la picadura, debido a la formación nuevamente de una capa protectora.

Para realizar la evaluación del comportamiento de un acero súper dúplex frente a la corrosión por picado es fundamental tener los siguientes potenciales en cuenta.

- Potencial de picado ( $E_P$ ) o potencial de ruptura, se denomina así al potencial en el que el metal pierde o rompe su capa pasiva, este depende del tipo de aleación, el ion al cual se esté exponiendo y la temperatura [17,26]. Algunos estudios también indican que es afectado por el pH, sin embargo otros no han encontrado relación alguna [19,26].

- Potencial de repasivación ( $E_{RP}$ ), es aquel en el cual la aleación retoma su pasividad, una vez este aparezca, no se inicia ni se propaga ninguna picadura, depende de los mismos parámetros que el  $E_P$  [19]. Existen diversas técnicas electroquímicas, que permiten establecer los potenciales de manera correcta [27].

#### **1.4. CURVAS DE POLARIZACIÓN**

La expresión gráfica de la función densidad de corriente vs potencial, se conoce como curva de polarización. Estas curvas nos arrojan información de importancia sobre las zonas de pasivación y activación y de igual manera sobre la formación y destrucción de películas protectoras sobre metales, cuando se encuentran en presencia de diferentes electrolitos de poder oxidante variable [28].

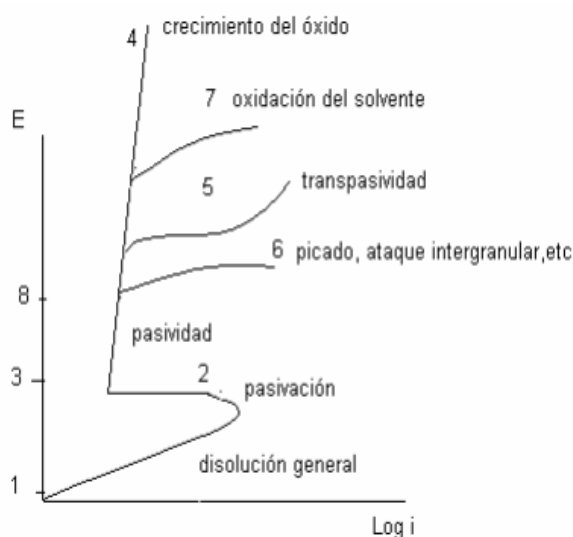
Existen dos tipos de curvas de polarización:

- a) Curva de polarización anódica
- b) Curva de polarización catódica [28].

##### **1.4.1 Curva de polarización anódica**

En general, una *curva de polarización anódica* debe sus cambios de pendientes a la presencia de fenómenos de pasivación, es decir, que cuando ocurre un aumento de la densidad de corriente sin la existencia de pasivación, se llega a un momento en que el proceso anódico se restringe por la máxima velocidad de difusión que deja a los cationes abandonar la superficie anódica [29]. Las curvas de polarización anódica se pueden presentar de varias formas como se indica en la Figura 1.

**Figura 1.** Curva de polarización anódica y sus diferentes comportamientos [29].



Cada zona tiene un comportamiento notorio y diferente de las otras, los cuales se muestran en seguida.

- En la zona 1-2 se dice que el metal se disuelve de manera activa.
- En la zona 2-3 aparece una zona de pasividad.
- En la zona 3-4 si la película pasivante es aisladora, al aumentar el potencial el óxido pasivante irá aumentando su espesor sin que se note un aumento importante de la corriente (por ejemplo: Al, Zr, Te, etc) [29].

Las curvas 5,6 y 7 permiten observar otros fenómenos que ocurren dentro de las curvas de polarización anódica.

- En la curva 5 se presenta el fenómeno de transpasividad, el cual se presenta cuando la película pasiva está formada por elementos que pueden oxidarse a una valencia mayor y generar productos solubles, allí también se percibe un aumento de la corriente acompañado por disolución del metal. Este fenómeno se presenta generalmente en elementos tales como el Cr, Mn o aleaciones de las cuales formen parte.

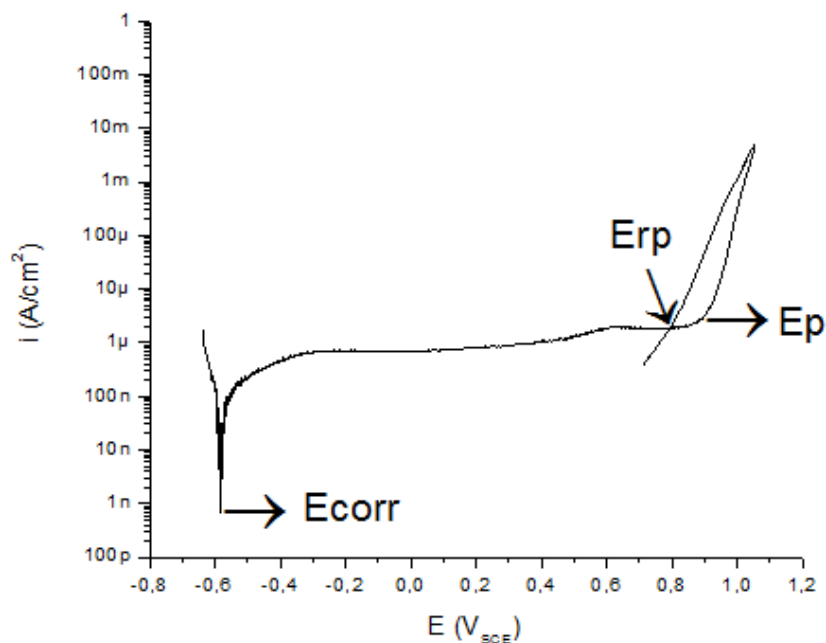
- En la curva 6 se presentan algunos tipos de corrosión, en los que se encuentran la corrosión por picado, en este punto se está por encima de cierto potencial en presencia de iones agresivos  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ , etc., a causa de ello la película pasiva existente allí puede perder estabilidad.
- En la curva 7 se da la oxidación del solvente, la cual se genera cuando el óxido pasivo es buen conductor de electrones una vez este alcance el potencial de desprendimiento del oxígeno, la solución empezara a descomponerse y se observara un aumento en la corriente de corrosión [29].

## 1.5. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

Para que sea posible evaluar el comportamiento de un acero súper dúplex frente a la corrosión por picado se deben determinar su potencial de picado ( $E_P$ ) y su potencial de repasivación ( $E_{RP}$ ) [17, 19, 26, 27], dichos potenciales se logran establecer aplicando técnicas electroquímicas como Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP) y Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD) [9,21,30,31,32].

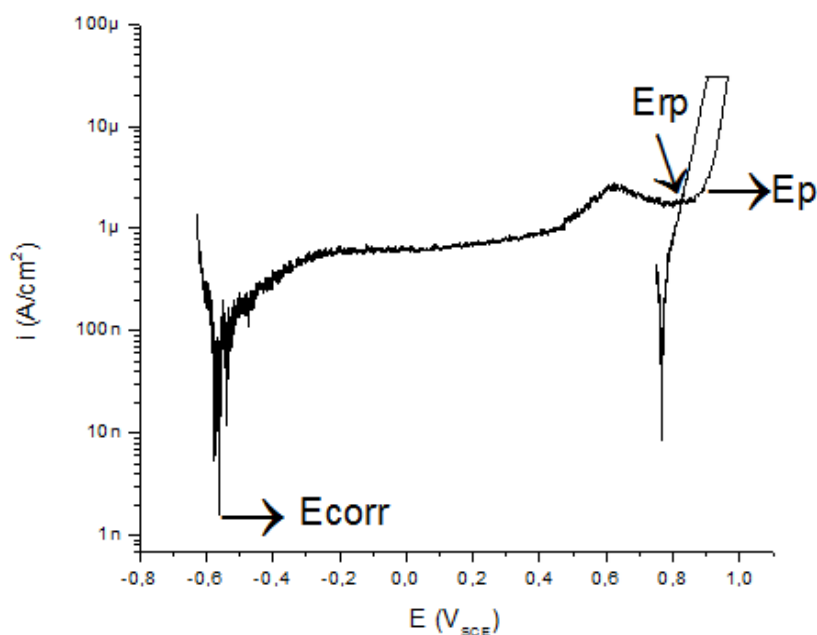
La técnica de Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP) consiste en un barrido al potencial del electrodo de trabajo, en dirección anódica, la variación de dicho potencial se realiza a velocidad constante, paralelamente se obtiene la densidad de corriente generada por la aleación que se está evaluando, una vez se alcance una densidad de corriente específica, el barrido se direcciona hacia valores catódicos, razón por la cual se denomina cíclica. A lo largo de la prueba se debe tener un electrodo de referencia, el cual será la base para la medición del potencial [5]. En la Figura 2 se observa un comportamiento típico de esta técnica.

**Figura 2.** Curva representativa de la técnica electroquímica Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP).



Por otra parte la técnica Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD) es una variación de la técnica electroquímica THE (Tsuji-kawa-Hisamatsu electrochemical method) [16], aunque no está estandarizada, ha tenido una gran acogida en el ámbito investigativo, puesto que logra determinar potenciales de repasivación, de manera rápida y eficiente. Se desarrolla en tres etapas: (1) consiste en someter la aleación a una polarización potenciodinámica, a una velocidad de barrido de  $0,167 \text{ mV/s}$ , en dirección anódica, hasta llegar a una corriente de  $30 \mu\text{A}$ , (2) enseguida realizar la aplicación de una corriente anódica constante de  $\text{IGS} = 30 \mu\text{A}$  ( $i_{\text{GS}} = 2 \mu\text{A/cm}^2$  aproximadamente) por 2 horas y (3) por último una polarización potenciodinámica, con la misma velocidad de barrido de la etapa 1, pero en dirección catódica, desde el potencial anterior hasta que la aleación se repasive [27,31,32,33]. Aunque por el momento ningún estudio relacionado con aceros inoxidables ha implementado esta técnica, existen estudios de resistencia a la corrosión en rendijas en aleaciones de Ni-Cr-Mo usando la técnica PD-GS-PD. La Figura 3 muestra un esquema representativo de esta técnica.

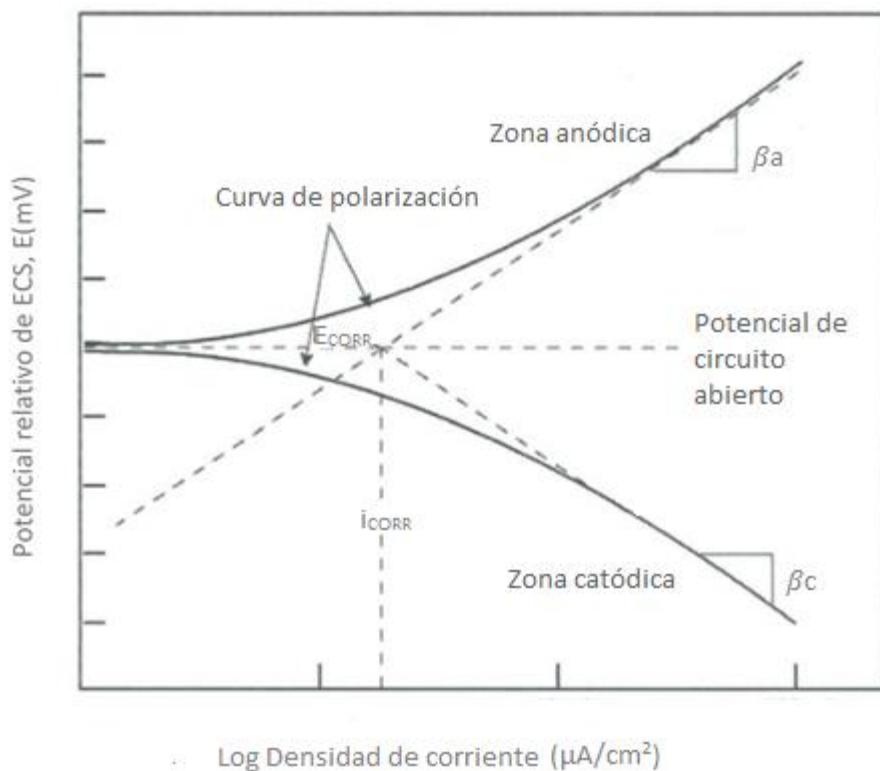
**Figura 3.** Curva representativa obtenida de la técnica electroquímica Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD).



Otra aplicación de las técnicas electroquímicas es determinar la velocidad de corrosión, para este caso se trabajan con técnicas tales como la extrapolación de Tafel y Resistencia de la Polarización lineal ( $R_p$ ).

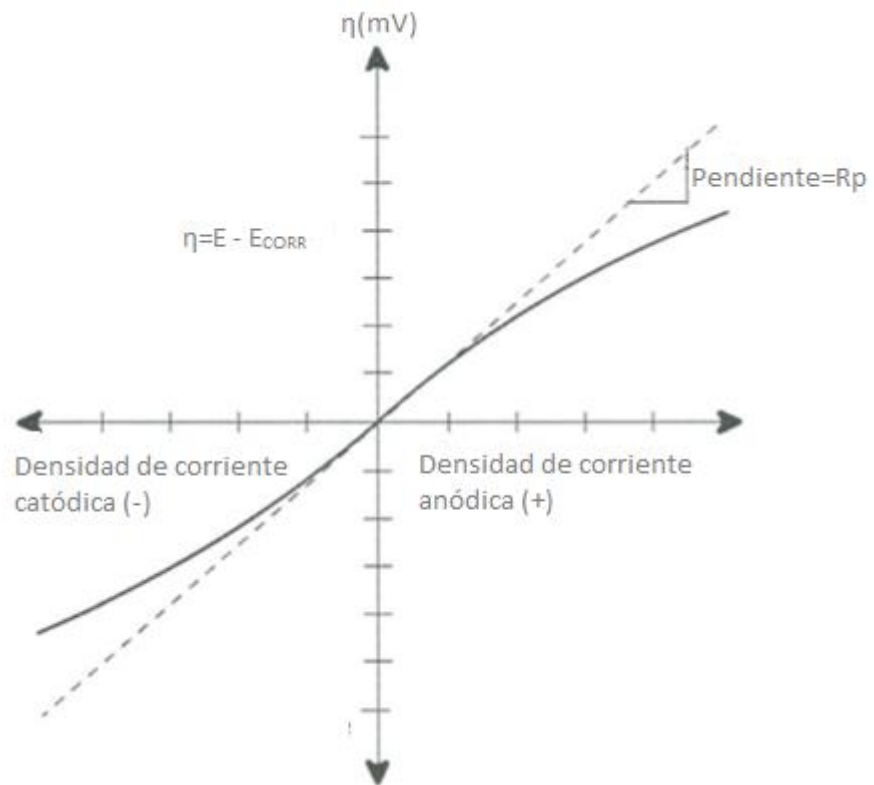
La extrapolación de Tafel se emplea para medir el potencial de corrosión ( $E_{CORR}$ ) y la corriente de corrosión ( $i_{CORR}$ ), sabiendo esta última es posible determinar la velocidad de corrosión [34]. Las pendientes de Tafel anódica ( $\beta_a$ ) y catódica ( $\beta_c$ ) son empleadas para determinar el  $i_{CORR}$ , esto se logra con la intersección de dichas pendientes en el  $E_{CORR}$ . En esta técnica, los potenciales se aplican dentro del rango de 250mV alrededor del  $E_{CORR}$  generando las curvas de polarización. Las técnicas modernas existentes para medir la velocidad de corrosión, se basan en los trabajos de Stern and Geary [35]. Debido a que esta técnica ha tenido una gran aplicación, se tiene como referencia la norma ASTM G3-74 [34], la cual enseña una descripción más completa sobre la técnica mencionada [35]. La Figura 4 permite observar una curva representativa de dicha técnica.

**Figura 4.** Curva representativa obtenida por medio de la técnica de Extrapolación de Tafel [35].



Por otro lado la Resistencia de la Polarización lineal ( $R_p$ ) es una técnica basada en la relación que existe entre la medida del potencial y la densidad de corriente, mediante señales de corriente continua que hacen que el sistema entre en un estado de excitación. La velocidad de corrosión se determina una vez obtenida la resistencia a la polarización ( $R_p$ ) ya que se encuentran directamente relacionadas [36]. Para este tipo de técnica se obtiene los datos variando el potencial dentro de un rango de 20 mV alrededor del  $E_{\text{CORR}}$ . Generalmente el barrido para esta técnica comienza desde -20 mV Vs  $E_{\text{CORR}}$  y finaliza a +20 mV Vs  $E_{\text{CORR}}$ . A partir de esta técnica se han realizado una gran cantidad de estudios, por lo que se han creado estándares internacionales con el fin de facilitar su aplicación, como es el caso de la norma estándar ASTM G3-89 [37]. La Figura 5 permite observar una curva representativa de dicha técnica.

**Figura 5.** Curva representativa obtenida por medio de la técnica de Resistencia de la Polarización lineal [35].



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

- ✓ Evaluar el comportamiento frente a la corrosión general y localizada (picado) de un acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760, en soluciones de 3,5%P/P de NaCl a diferentes temperaturas empleando técnicas electroquímicas y de caracterización microestructural.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Definir los potenciales críticos confiables para evitar la corrosión por picado del acero UNS S-32760 en soluciones de cloruro puro, aplicando las técnicas de Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP) y Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD).
- ✓ Analizar el efecto de la temperatura sobre los potenciales de picado y repasivación del acero UNS S-32760 en soluciones de cloruro.
- ✓ Determinar las velocidades de corrosión generalizadas en soluciones de cloruro de 3,5%P/P por medio de las técnicas de extrapolación de Tafel y Resistencia de la Polarización lineal.

### **3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

#### **3.1. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL**

Para realizar la caracterización microestructural del acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760 se utilizaron 3 probetas cuya preparación metalográfica se llevó a cabo según lo estipulado en la norma ASTM E3-01[38]. Para la preparación de dichas muestras, las probetas se sometieron a un desbaste en papel lija partiendo del número 80 hasta 600, una vez desbastadas se llevaron a pulir utilizando pasta de diamante en paño, para generar un acabado tipo espejo.

Para lograr revelar la microestructura del acero se efectuó un ataque electroquímico bajo lo establecido en la norma ASTM E407-99[39]. Se trabajó con una solución al 10% V/V de ácido oxálico, aplicando un voltaje de 3 V durante 2 minutos y con una distancia de separación de los electrodos de 1.5 cm. Por último las probetas fueron analizadas mediante microscopía óptica, utilizando un microscopio OLYMPUS GX41.

#### **3.2. ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS**

Los ensayos electroquímicos se realizaron con probetas de geometría circular, las cuales poseían un área de exposición igual a 1 cm<sup>2</sup>, dichas probetas en estudio fueron llevadas en primera medida a un desbaste mediante papel lija desde el papel número 80 hasta el número 600, una vez terminado esto se prosiguió a la limpieza de la superficie de las probetas con agua desionizada y acetona para lograr su adecuada preparación. Las pruebas se realizaron para temperaturas de 25,60 y 80°C.

Posteriormente se realizó el montaje de la celda de corrosión que consistía en 3 electrodos convencionales. El electrodo de trabajo fue la muestra del acero súper dúplex UNS S-32760, se utilizó un electrodo de referencia de Calomel Saturado (ECS) y como contra electrodo una rejilla de platino (Pt), los electrodos fueron

sumergidos dentro de una solución a 3,5%P/P de NaCl a un volumen de 500 ml. La solución de la celda de corrosión se purgó durante 1 hora utilizando nitrógeno gaseoso de alta pureza y continuo hasta la terminación de cada prueba. Finalmente para la realización de las pruebas electroquímicas se utilizó un potenciostato/galvanostato GAMRY Interface 1000 que se conectó a los respectivos electrodos de la celda de corrosión y a una computadora que permitió la adquisición adecuada de los datos. Todas las pruebas para las técnicas electroquímicas fueron llevadas a cabo por triplicado.

Las pruebas de Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP) se realizaron bajo la norma ASTM G61-86, mientras que las pruebas de Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD) debido a que no se encuentra estandarizadas se llevaron a cabo bajo la información reportada en la literatura [31,32, 33]. Estas dos técnicas se utilizaron para la determinación de potenciales críticos de corrosión por picado.

Por otro lado las técnicas de extrapolación de Tafel y Resistencia de la Polarización lineal se emplearon para la determinación de las velocidades de corrosión. Para dicha determinación se utilizaron soluciones aireadas. Las pruebas de extrapolación de Tafel se emplearon con un potencial inicial de -250 mV y final de +250 mV. Mientras que para la Resistencia de la Polarización lineal se trabajó con un potencial inicial de -20 mV y final de +20 mV, en base al potencial de corrosión.

### **3.3. ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL PICADO**

Para lograr la caracterización y estudio de los pozos de picado, se trabajó con una probeta para cada técnica, las cuales se trabajaron bajo el respectivo procedimiento de desbaste desde el papel de lija número 80 hasta la número 600, una vez hecho esto se prosiguió a realizar las correspondientes pruebas electroquímicas tales como CPP y PD-GS-PD a 30  $\mu$ A que se llevaron a cabo a una temperatura de 80°C. Las probetas fueron analizadas mediante microscopía óptica y posteriormente a través de microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar la morfología

en los pozos de picado. A su vez fueron realizados análisis EDS con el objetivo de determinar la concentración de los iones en el interior de la picadura.

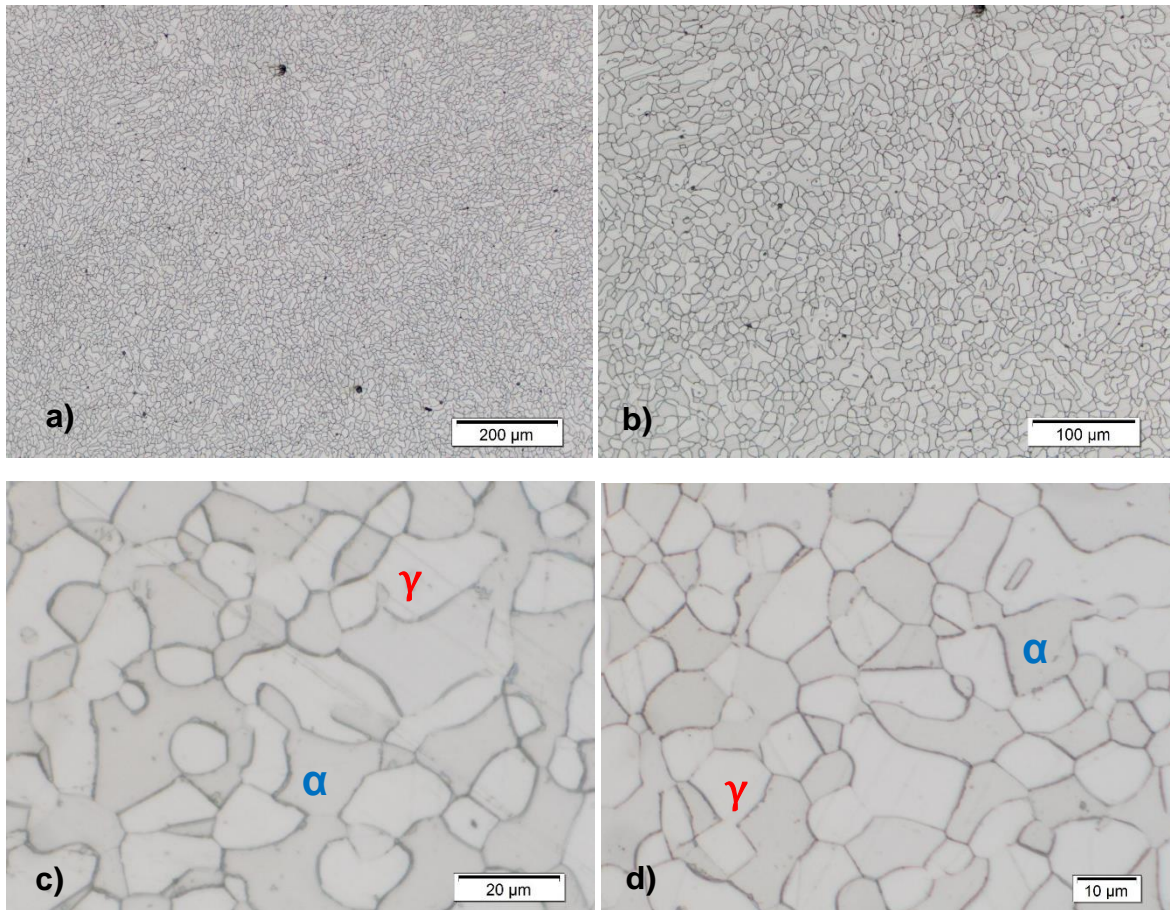
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DE LA ALEACIÓN

La caracterización realizada a la aleación fue enfocada en su microestructura con el fin de garantizar que cumple con las características establecidas en la literatura de los aceros inoxidable súper dúplex.

La Figura 6 evidencia que la aleación posee una microestructura bifásica, conformada por las fases ferrita  $\alpha$  (zonas oscuras) y austenita  $\gamma$  (zonas claras) las cuales se presentan en una matriz uniforme 50:50 (Figura 6(c-d)). Como era de esperarse debido al bajo contenido de carbono de la aleación no se evidencio ningún tipo de precipitado de carburos. A su vez implementado la norma ASTM E 112-12 [40] se determinó que la aleación tiene un tamaño de grano 8, lo cual corrobora la estructura característica de los aceros inoxidable súper dúplex y garantiza que la aleación en estudio posee las propiedades físicas y químicas típicas de dichos aceros.

**Figura 6.** Micrografía óptica del acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760: a) 100x, b) 200x, c) 1000x y d) 1200x.



Por otra parte, en la Tabla 1 se presenta la composición química que posee el acero UNS S-32760 en estudio, la cual se utilizó para evidenciar la presencia de elementos aleantes fundamentales en la aleación y verificar mediante estos las propiedades físicas y químicas que deben poseer generalmente dicho acero. La Tabla 1 muestra una diferencia un poco significativa en la composición elemental de especies tales como Si, Mn, S y W. Sin embargo, esto no representa un cambio relevante ni en la microestructura de la aleación, ni en sus características, dado que se tiene rangos de porcentajes mínimos y máximos en los cuales se puede fabricar la aleación.

Como se puede observar hay una importante presencia de elementos como el Cr y Mo que ayudan a obtener una buena resistencia al ataque de los cloruros, en

general estos elementos colaboran a que el acero presente en la mayoría de los casos un buen comportamiento en presencia de ambientes oxidantes.

**Tabla 1.** Composición elemental de especies presentes en la aleación en estudio y en la aleación comercial [9].

	Elemento (%:Porcentaje en peso)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	W
<b>Acero UNS S-32760 en estudio</b>	0,02	0,40	0,62	0,02	0,001	25,75	3,57	7,30	0,55	0,25	0,55
<b>Acero UNS S-32760 comercial</b>	0,03	1,00	1,00	0,03	0,01	26,00	4,00	7,00	0,70	0,25	0,70

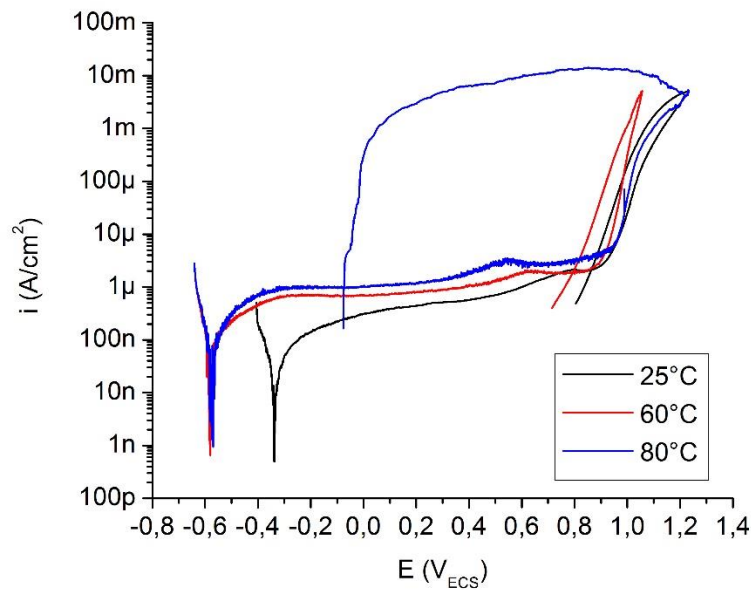
#### 4.2. MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES CRÍTICOS DE LA ALEACIÓN

En la Figura 7 se presenta los resultados obtenidos del acero UNS S-32760 al aplicar la técnica electroquímica de Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP) a temperaturas de 25,60 y 80°C en solución de 3,5%P/P de NaCl. De esta manera se puede observar que las tres curvas presentan en su comienzo una zona catódica hasta llegar al potencial de corrosión ( $E_{CORR}$ ), a partir de este potencial la curva pasa a una corriente anódica donde el potencial se incrementa a una velocidad constante e inicia su zona de pasividad hasta llegar al potencial de picado ( $E_P$ ). Una vez alcanzado el potencial de picado, se da la ruptura de la capa pasiva y la curva incrementa su densidad de corriente abruptamente hasta lograr alcanzar la densidad de corriente límite 5 mA/cm<sup>2</sup> la cual se establece por la norma ASTM G-61 [5]. Durante esta última etapa se da la propagación de los pozos de picado debido a la pérdida de la capa protectora. Cuando se alcanza la densidad de corriente límite la curva comienza un barrido en dirección catódica, etapa en que los pozos de picado disminuyen su velocidad de crecimiento. Luego, una vez la curva cruza la

zona de pasividad las picaduras dejan de crecer y además se forma nuevamente la capa pasiva, en dicho punto se considera que se llega al potencial de repasivación ( $E_{RP}$ ) de la aleación.

Aunque las tres curvas describen el mismo recorrido se observan variaciones en sus  $i_{CORR}$ , para la curva realizada a 25°C, hecho que se le atribuye principalmente a las condiciones de las pruebas, al estado de interfase y el proceso de preparación de las probetas, lo cual es corroborado en la investigación de J.Bearvers y col. [41] en la que denotan que se pueden presentar variaciones en las curvas de una misma aleación debido al montaje de las probetas.

**Figura 7.** Curvas CPP de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a temperaturas de 25, 60 y 80°C.

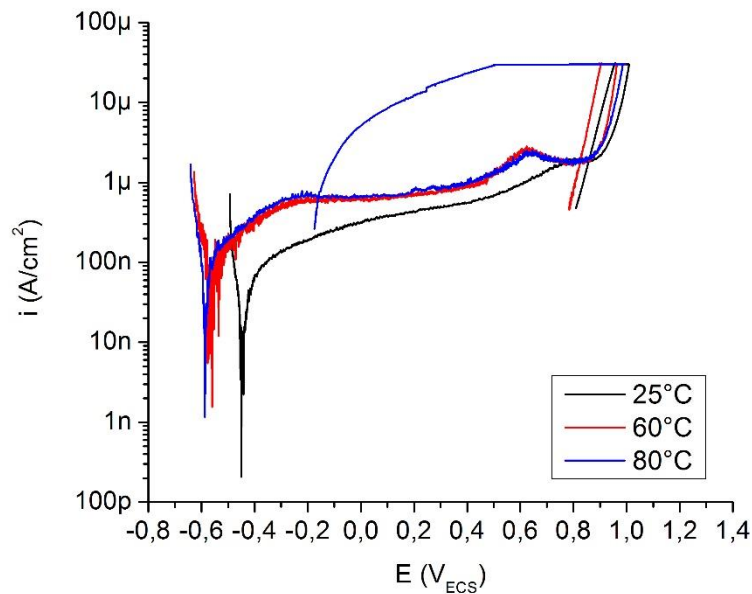


En comparación con la técnica electroquímica anteriormente mencionada, en la Figura 8 y 9 se muestran las curvas obtenidas por la técnica PD-GS-PD. Para esta técnica se trabajó con corrientes de 30  $\mu$ A y 300  $\mu$ A, esto se hizo con el fin de observar si existía algún tipo de cambio en los potenciales críticos de las curvas, debido a las diferentes corrientes de propagación. Ambas técnicas tienen un

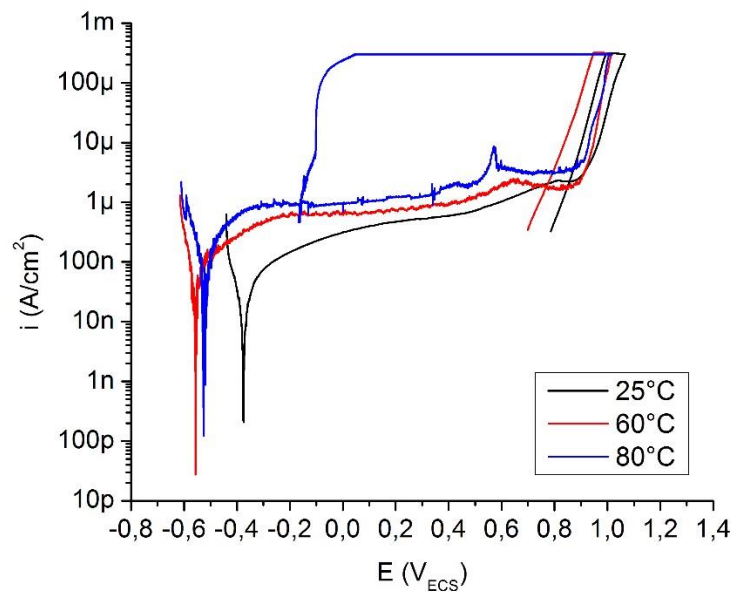
comportamiento similar hasta el punto en el que llegan a su corriente límite establecida, allí a diferencia de la técnica CPP la PD-GS-PD mantiene su corriente constante mientras varía su potencial durante un lapso de tiempo de 2 horas, lo cual le permite que el mecanismo de propagación del picado sea más estable. Una vez terminada esta etapa la curva realiza un barrido en dirección catódica hasta llegar al respectivo potencial de repasivación.

Se puede apreciar que no existe una gran diferencia entre los valores de potenciales críticos obtenidos en la técnica electroquímica PD-GS-PD ya sea a una corriente de  $30 \mu\text{A}$  ó  $300 \mu\text{A}$ , esto quiere decir que la diferencia entre estas dos corrientes no es un factor fundamental para este tipo de técnica. Por otro lado, realizando una comparación entre las dos técnicas estudiadas, se puede observar que para la técnica CPP el trabajar a una densidad de corriente mucho mayor, podría significar una mayor cantidad de pozos de picado y una mayor profundidad de ellos, también se pudo apreciar que respecto al hecho de no poseer una etapa que haga que su zona de propagación sea más estable y lenta, hace que se obtengan potenciales críticos un poco mayores a los obtenidos por la técnica PD-GS-PD. Sin embargo la diferencia entre estas dos técnicas al obtener los potenciales críticos no es muy grande, lo que indica que ambas técnicas son de buen uso y confiabilidad para este tipo de investigación.

**Figura 8.** Curvas PD-GS-PD a 30  $\mu\text{A}$  de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a temperaturas de 25, 60 y 80°C.



**Figura 9.** Curvas PD-GS-PD a 300  $\mu\text{A}$  de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a temperaturas de 25, 60 y 80°C.

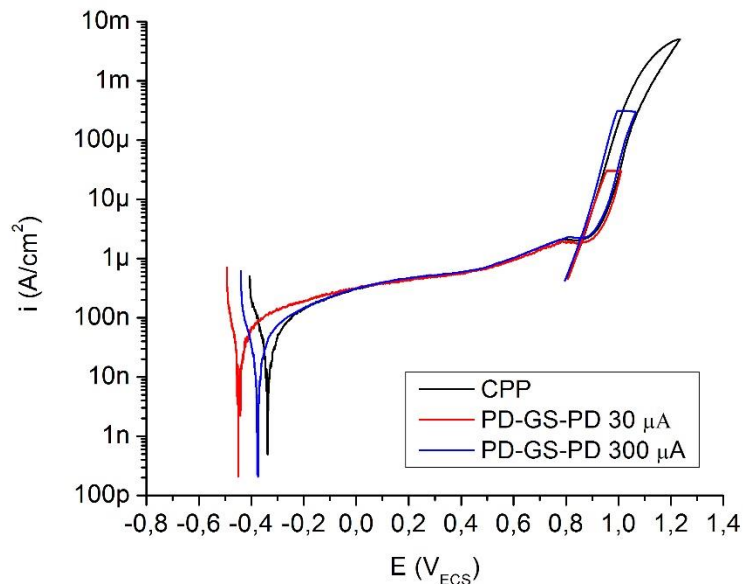


### 4.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA

En las Figuras 10, 11 y 12 se presenta el comportamiento de la aleación respecto a las temperaturas ya mencionadas. Es posible observar la manera en que la temperatura incide en los potenciales críticos de la aleación, tales como potenciales de picado ( $E_P$ ) y potenciales de repasivación ( $E_{RP}$ ). De esta manera se pueden diferenciar las gráficas por el tipo de histéresis que se presentan en ellas.

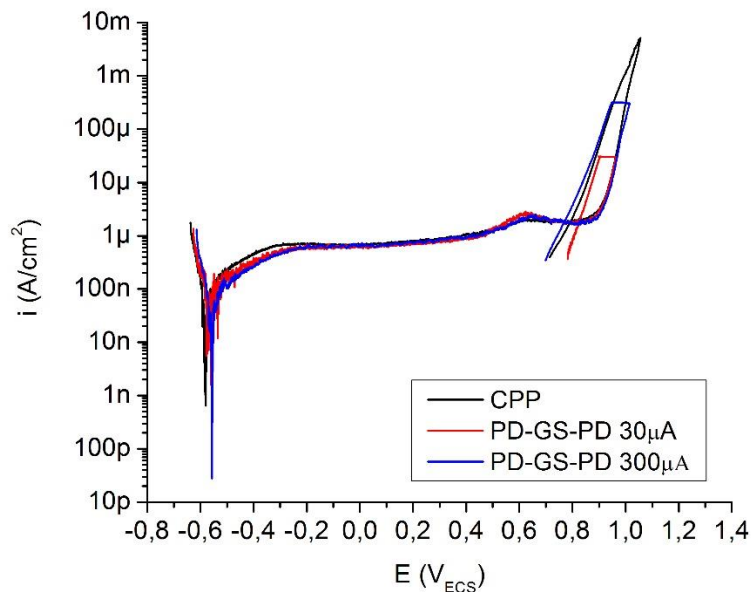
En la presente investigación se trabajó a una temperatura inicial de 25°C con el fin de percibir la no existencia de corrosión por picado. En la Figura 10 se observa las tres curvas obtenidas por las técnicas CPP Y PD-GS-PD a 25°C, sus trayectorias son muy semejantes excepto en su intensidad de corriente máxima, sus potenciales críticos  $E_P$  y  $E_{RP}$  son semejantes y no existe una distancia considerable entre los mismos. También se puede apreciar que la gráfica presenta una curva con poca histéresis, independientemente de cual técnica haya sido aplicada, lo que permite inferir que la aleación a los 25°C posee una alta susceptibilidad al picado, esto significa que la aleación presenta pequeñas rupturas en su película pasiva, lo que conlleva a que se genere el aumento en su densidad de corriente. Lo anterior, indica que posiblemente se generaron picaduras en una baja cantidad y de pequeño tamaño, las cuales no se pueden observar mediante microscopía óptica. Sin embargo, la presencia de picaduras a esta temperatura necesita de una investigación más exhaustiva, debido a que la interacción entre los iones de cloruro y la superficie del metal no genera una disolución masiva en la interfase de metal-óxido y el adelgazamiento de la película pasiva es mínimo.

**Figura 10.** Curvas CPP, PD-GS-PD 30 $\mu$ A y PD-GS-PD 300 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25°C.



En la investigación realizada por R. Francis y col. [7] se menciona que para un acero súper dúplex la temperatura de iniciación de la corrosión por picado se encuentra entre rangos de 60 a 65°C, lo cual se corrobora en la presente investigación. En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos al someter la aleación a una temperatura de 60°C, se observa un comportamiento donde existe una corta distancia entre el potencial de repasivación ( $E_{\text{RP}}$ ) y el potencial de picado ( $E_{\text{P}}$ ), además las curvas presentan poca histéresis y potenciales de repasivación ( $E_{\text{RP}}$ ) menores a los obtenidos a una temperatura de 25°C, lo cual indica la presencia de pozos de picado con poco crecimiento generados por el proceso de corrosión, esto significa que la película pasiva del material ha perdido estabilidad debido a que los iones agresivos de cloruro se adsorben a la superficie de óxido del metal y esto conlleva a una disolución localizada y pérdida de espesor de la película pasiva que más adelante se convertirá en un ruptura de dicha película.

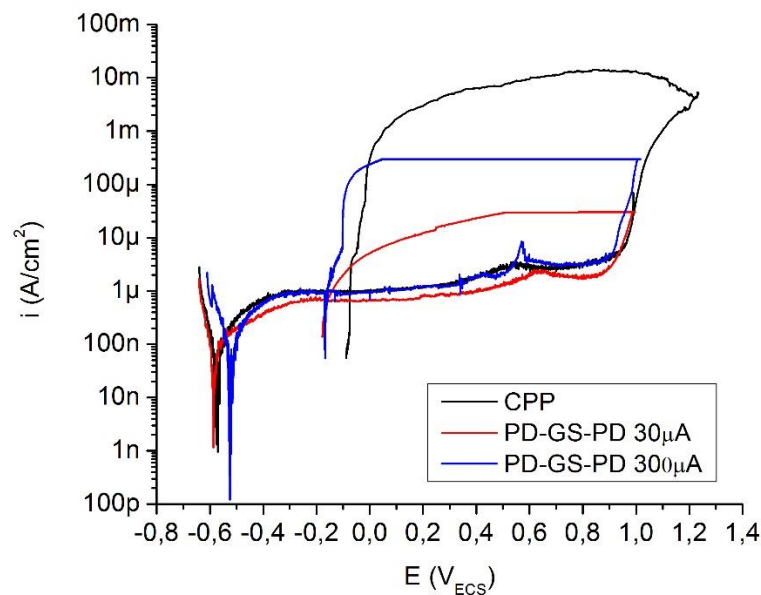
**Figura 11.** Curvas CPP, PD-GS-PD 30 $\mu$ A y PD-GS-PD 300 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 60°C.



Por otra parte, en la Figura 12 se presentan las curvas obtenidas a los 80°C, a esta temperatura se evidencia el caso más crítico de corrosión por picado, allí la curva de histéresis es bastante significativa lo que se puede observar por la gran distancia que existe entre los potenciales críticos de la aleación, esto hace que para dicha temperatura se obtenga la mayor cantidad y el más grande crecimiento de los pozos de picado. Lo anterior, se debe a una disolución uniforme y masiva del metal que conlleva a que los pozos de picado se repasiven a potenciales más pequeños que a las temperaturas realizadas anteriormente. También se llega a observar que las trayectorias de las curvas no se asemejan entre sí como en las figuras anteriores, sin embargo las tres presentan un  $E_P$  similar. De igual manera es claro que para las tres curvas el  $E_{RP}$  es cercano al  $E_{CORR}$  lo que implica que el crecimiento de los pozos es mucho más crítico respecto a las anteriores temperaturas, puesto que los iones de cloruro en el interior de la picadura son mucho más estables, lo que acelera el proceso corrosivo e inhibe la repasivación de la aleación. En base a lo anterior se infiere que a 80°C y a temperaturas superiores la resistencia al picado de la aleación

se reduce de manera considerable. Sin embargo investigaciones como las de K. Wang y col. [11] estipulan que los aceros súper dúplex son afectados de manera severa por el picado a partir de los 50°C debido a la precipitación en la matriz de la fase  $\sigma$ , la cual es consecuencia de tratamientos térmicos a los cuales son sometidos los aceros ó al exceso de elementos aleantes como Cr, Si o Mo. En el caso de la aleación en estudio, la cual no fue sometida a ningún tratamiento térmico, no se evidenció la presencia de dicho precipitado, lo cual podría explicar el hecho de que la temperatura crítica sea superior.

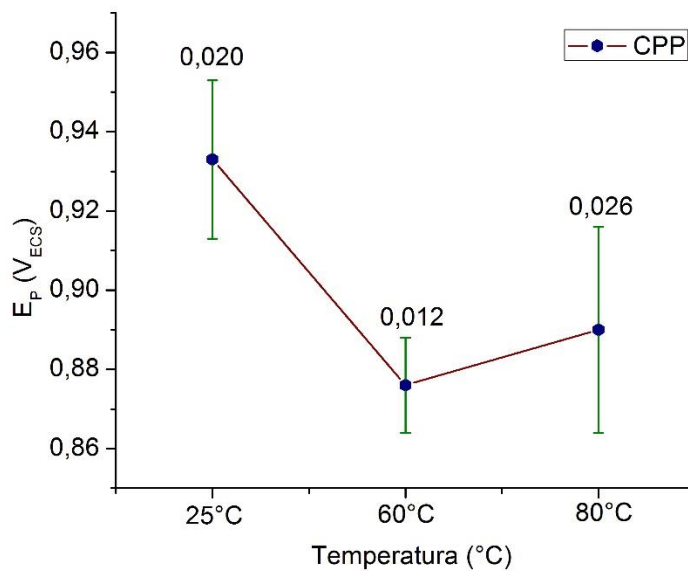
**Figura 12.** Curvas CPP, PD-GS-PD 30 $\mu$ A y PD-GS-PD 300 $\mu$ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 80°C.



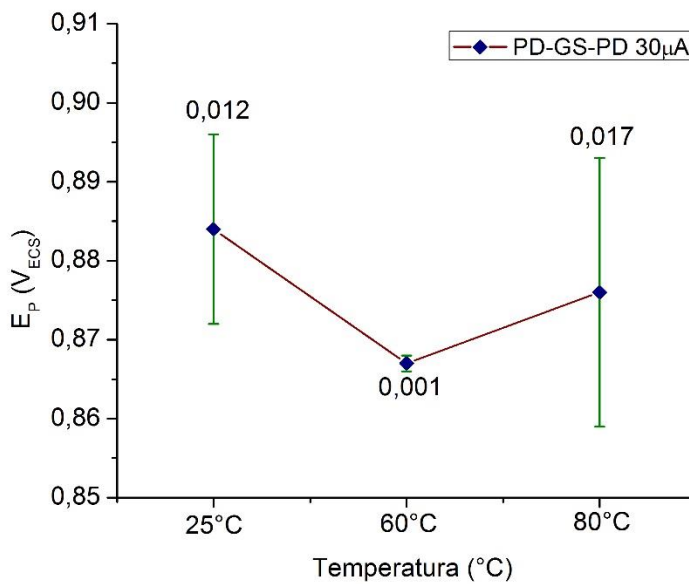
#### 4.4. POTENCIALES DE PICADO ( $E_P$ )

Dado que para las técnicas electroquímicas aplicadas se realizaron pruebas por triplicado, en las Figuras 13, 14 y 15 se presentan el resultado obtenido del promedio de los potenciales de picado ( $E_P$ ) de dichas pruebas y la desviación estándar calculada entre ellas.

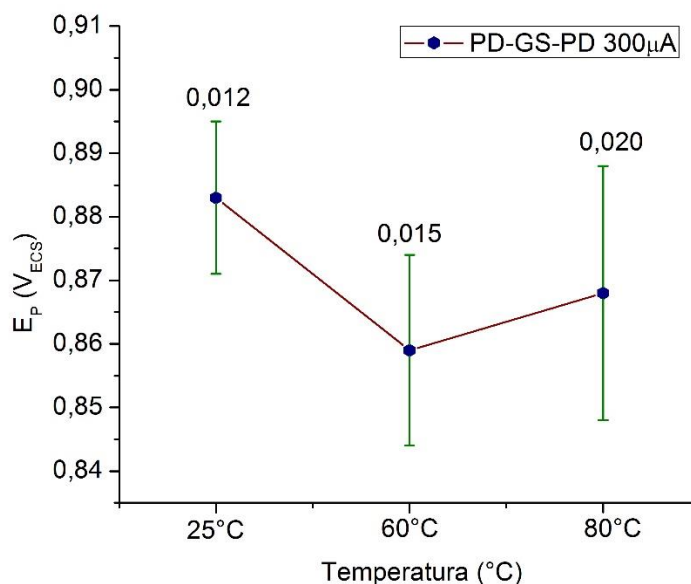
**Figura 13.** Potenciales de picado de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica CPP en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.



**Figura 14.** Potenciales de picado de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a 30μA en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.



**Figura 15.** Potenciales de picado de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a  $300\mu\text{A}$  en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y  $80^\circ\text{C}$ .



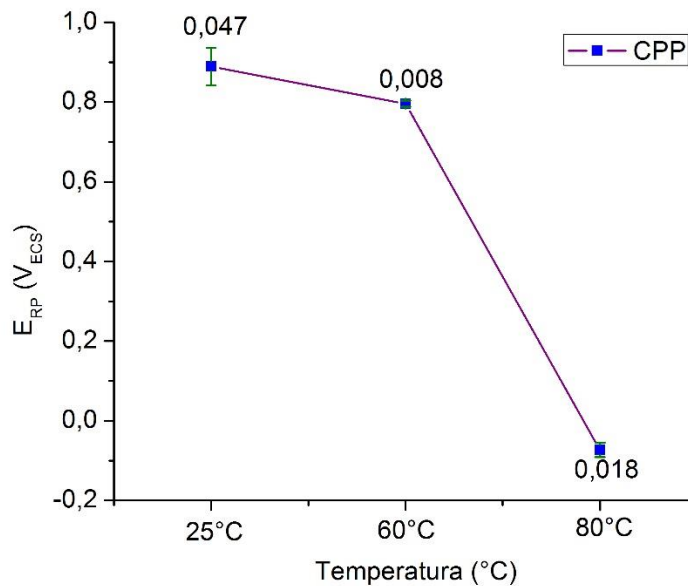
Para las temperaturas de 25 y  $60^\circ\text{C}$  se observa un comportamiento que era de esperarse en los potenciales de picado ( $E_P$ ), dado que a medida que aumenta la temperatura dichos potenciales presentaron una disminución. Este fenómeno es atribuido a la pérdida de resistencia a la corrosión de la aleación a una mayor temperatura es decir, que el inicio del proceso de generación y crecimiento de picaduras se ve seriamente afectado por la temperatura a la cual trabaja, lo que crea una disminución en los  $E_P$  que convierte la aleación más susceptible a sufrir una corrosión por picadura. Sin embargo, para una temperatura de  $80^\circ\text{C}$  el fenómeno anteriormente mencionado no se dio, ya que a esta temperatura se registraron los  $E_P$  más positivos, hecho contrario al esperado, donde los  $E_P$  obtenidos a  $80^\circ\text{C}$  debieron ser valores menores a los presentados a 25 y  $60^\circ\text{C}$ . Lo anterior, indica que el  $E_P$  es un parámetro no tan confiable para lograr una evaluación precisa del inicio de picaduras como bien se menciona en la investigación Thompson y col [41]. Además para la temperatura crítica de  $80^\circ\text{C}$  en

todos los casos de técnicas electroquímicas aplicadas se obtuvieron las mayores desviaciones estándar, esto se le atribuye principalmente a la inestabilidad que experimenta la aleación la cual es generada por las condiciones de trabajo, en especial por la densidad de corriente.

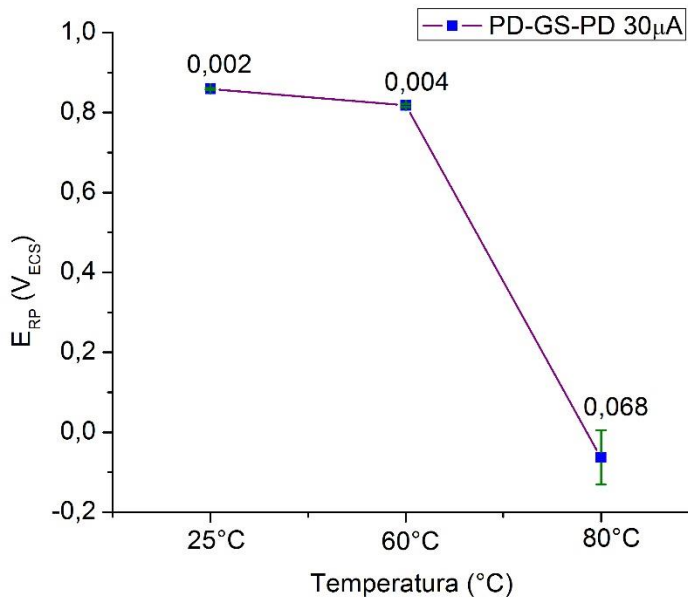
#### **4.5. POTENCIALES DE REPASIVACIÓN ( $E_{RP}$ )**

Para lograr estudiar otro de los potenciales críticos de la aleación, en las Figuras 16, 17 y 18 se presentan los resultados obtenidos de los potenciales de repasivación ( $E_{RP}$ ), dichos resultados se presentan como un promedio de los  $E_{RP}$  arrojados en las pruebas por triplicado y la desviación estándar calculada entre ellas. Inicialmente para la temperatura de 25°C se registraron los  $E_{RP}$  más positivos, sin embargo a medida que se aumenta la temperatura estos potenciales disminuyen de una manera relativamente pequeña a 60°C pero considerable a una temperatura crítica de 80°C, mostrando así que a mayores  $E_{RP}$  mayor será la resistencia a la corrosión por picado. Esto tiene sentido dado las condiciones experimentales que se presentan, es decir que a mayores temperaturas existe una mayor cantidad de productos de corrosión, concentración de iones de cloruro en los pozos e hidrolisis ácida contaminante, tal como reportaron en su investigación Wilde y Williams [42]. Por lo tanto, se puede determinar que la diferencia de resultados entre los  $E_{RP}$  a las diferentes temperaturas se debe a la capacidad que tiene la aleación de lograr que el crecimiento de pozos activos sea reducido o posiblemente detenido.

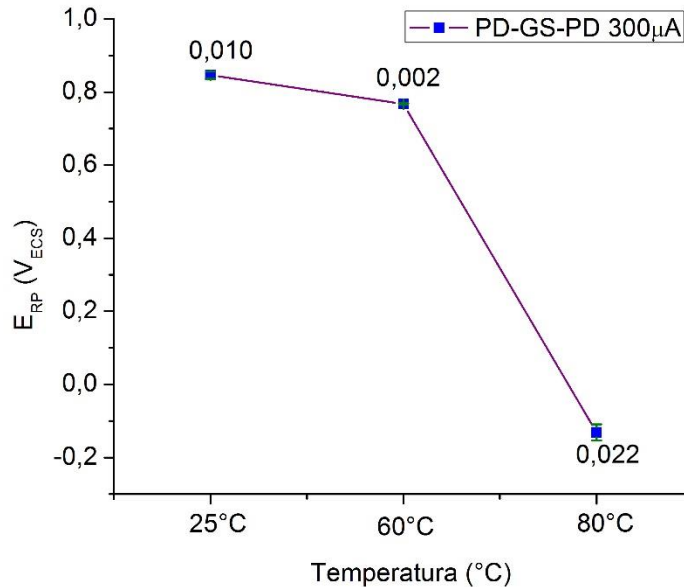
**Figura 16.** Potenciales de repasivación de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica CPP en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.



**Figura 17.** Potenciales de repasivación de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a 30 $\mu$ A en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.



**Figura 18.** Potenciales de repasivación de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica PD-GS-PD a 300  $\mu$ A en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.



Dado que el potencial de repasivación se considera un parámetro más confiable y conservador que el potencial de picado, se realizó una comparación respecto a dicho potencial ( $E_{RP}$ ) de cual técnica posee una mayor confiabilidad para dichas pruebas, de este modo se puede observar que para cada técnica y temperatura aplicada, no existe grandes diferencias en las desviaciones estándar, es decir que los resultados son reproducibles. Comparando las técnicas implementadas se puede determinar que la técnica PD-GS-PD a 300 $\mu$ A es la que presentan las menores desviaciones estándar, seguida de la técnica PD-GS-PD a 30 $\mu$ A y por último la técnica CPP. De tal manera que se puede deducir que la técnica PD-GS-PD posee un mayor grado de confiabilidad respecto a la técnica CPP, esto se le atribuye a las etapas de propagación con las que cuenta cada técnica, por un lado la CPP no tiene una zona de propagación definida lo que hace que no exista una zona de estabilidad como la que se presenta en la PD-GS-PD a las que se les atribuye su estabilidad por tener

una etapa galvanostática que permite que los pozos de picado existentes se propaguen de una manera más constante.

#### 4.6. VELOCIDADES DE CORROSIÓN

Para determinar las velocidades de corrosión tanto para la técnica de extrapolación de Tafel como para la Resistencia a la polarización, se utilizó la siguiente ecuación basada en la norma ASTM G59-97 [43].

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \frac{i_{corr} EW}{\rho}$$

Donde:

$i_{corr}$ : Densidad de corriente [ $\mu A/cm^2$ ], EW: Peso equivalente [ $g/eq$ ],  $\rho$ : Densidad [ $g/cm^3$ ]

Los  $i_{CORR}$  para cada prueba se determinaron a partir de las curvas obtenidas por cada técnica, temperatura y tiempo. En las Tablas 2 y 3 se presenta la información que se obtuvo de las diferentes técnicas utilizadas para la determinación de la velocidad de corrosión de la aleación en la solución en estudio.

**Tabla 2.** Datos obtenidos por la técnica de Extrapolación de Tafel.

Prueba	$E_{CORR}$ (mV)	$i_{CORR}$ ( $\mu A$ )	$\beta_a$ (mV)	$\beta_c$ (mV)	$V_{CORR}$ (mm/año)
25°C Hora:1	-114,13	0,043	264,8	171,6	0,000447
25°C Hora:24	-75,16	0,008	234,1	102,1	0,000083
60°C Hora:1	-182,14	0,089	433,5	116,5	0,000925
60°C Hora:24	-96,96	0,053	253,2	120,6	0,000551
80°C Hora:1	-375,56	7,148	598,3	182,6	0,074351
80°C Hora:24	-531,77	0,767	256,5	178,5	0,007978

**Tabla 3.** Datos obtenidos por la técnica de Resistencia a la Polarización.

Prueba	R <sub>p</sub> (ohm.cm <sup>2</sup> )	E <sub>CORR</sub> (mV)	i <sub>CORR</sub> (μA)	β <sub>a</sub> (mV)	β <sub>c</sub> (mv)	V <sub>CORR</sub> (mm/año)
25°C Hora:1	324000	-124,4	0,135	264,8	171,6	0,000140
25°C Hora:24	2662000	-36,95	0,008	234,1	102,1	0,000087
60°C Hora:1	231400	-101,8	0,094	253,2	120,6	0,000982
60°C Hora:24	446100	-175,7	0,090	433,5	116,5	0,000944
80°C Hora:1	13910	-329,5	5,489	598,3	182,6	0,057124
80°C Hora:24	19870	-473,1	2,084	256,5	178,5	0,021683

En ambas técnicas se puede observar que para cada temperatura la velocidad de corrosión disminuye a medida que aumenta el tiempo de exposición de la muestra, este fenómeno se debe a que existe un aumento en la resistencia a la corrosión de los productos que se están formando, ya que se encuentran en presencia de una capa protectora de mayor espesor y estabilidad. En el caso de la temperatura de 80°C por ambas técnicas y la temperatura de 60°C por Resistencia de la polarización lineal, se obtuvieron potenciales de corrosión (E<sub>CORR</sub>) más negativos conforme avanza el tiempo de exposición de la muestra, hecho que puede ser originado por la inestabilidad de las especies agresivas presentes, las cuales no proporcionan las condiciones de equilibrio ideales en el sistema.

Como era de esperar, se observó que al aumentar la temperatura la velocidad de corrosión también presenta un incremento, lo cual indica que la película pasiva en la superficie del metal se va debilitando al aumentar la temperatura. Este hecho se atribuye al aumento en la movilidad de los iones cloruro presentes en solución, los cuales generan una mayor cantidad de sitios localizados donde se puede generar el proceso corrosivo. Para la temperatura de 80°C el aumento de la velocidad de

corrosión fue considerable en comparación a las otras temperaturas estudiadas, lo que explica la relación existente entre la temperatura y la cinética de corrosión.

#### **4.6. ANÁLISIS MICROSCÓPICO DEL PICADO**

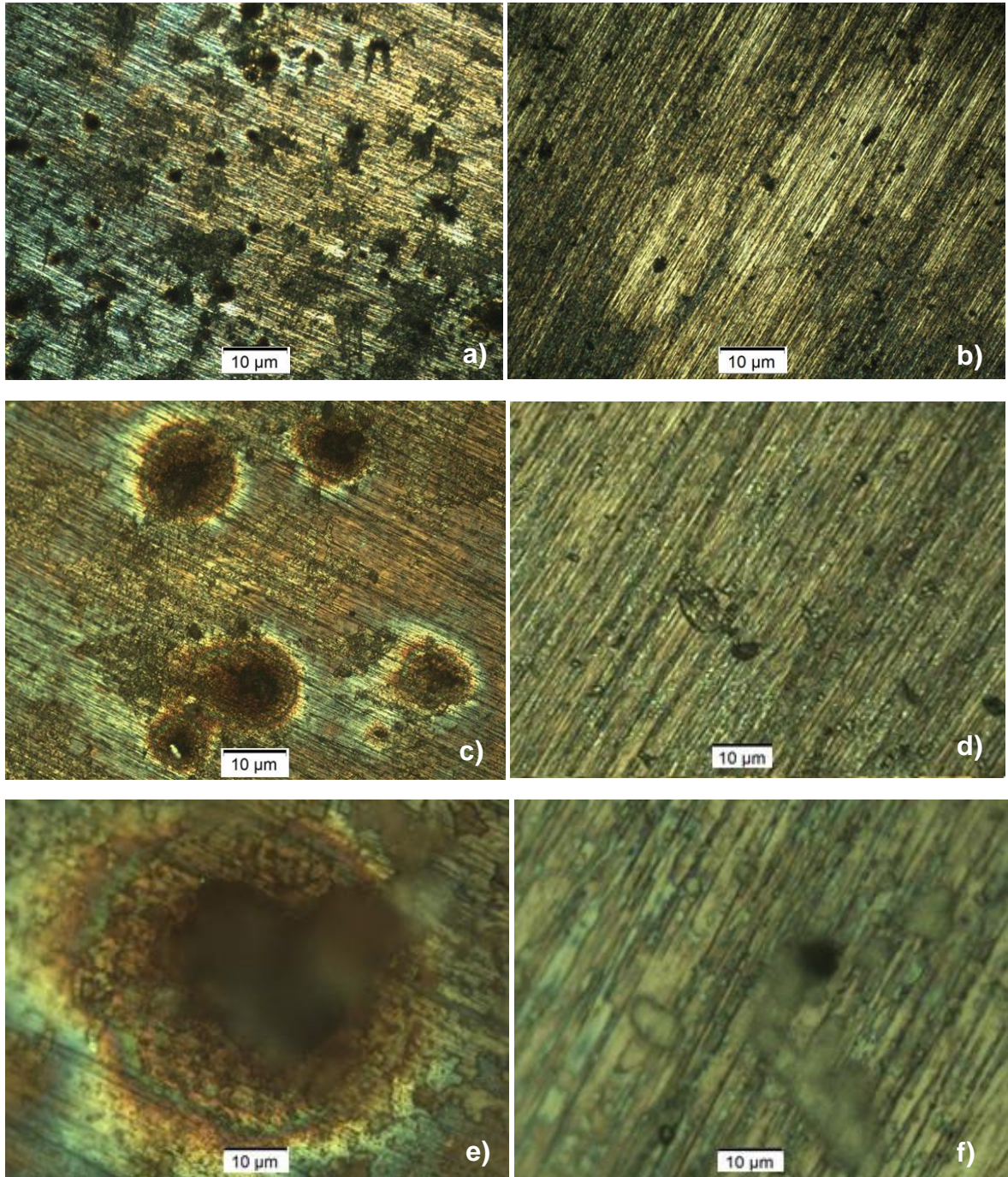
Este análisis tiene como objetivo establecer las diferencias cualitativas referentes al ataque por picado entre las técnicas electroquímicas CPP y PD-GS-PD y su relación con sus mecanismos de evaluación, así como fue descrito en la sección 3.3.

En la Figura 19 se presentan las micrografías obtenidas a diferentes aumentos de las probetas analizadas, en las cuales se evidencia que las picaduras presentes en ellas no son semejantes del todo, su cantidad y tamaño se relacionan con la técnica electroquímica aplicada y sus respectivos mecanismos de evaluación.

En las Figuras 19(a y b) se observa la distribución de las picaduras en el centro de las probetas. La Figura 19 (a) correspondiente a la técnica CPP evidencia una cantidad considerable de picaduras las cuales se pueden apreciar como las zonas más oscuras. Por otra parte, la Figura 19 (b), correspondiente a la probeta evaluada con la técnica PD-GS-PD, presenta una menor cantidad de picaduras en relación a las encontradas en la Figura 19 (a).

En la Figura 19 (c) aparecen zonas con diferentes coloraciones alrededor de las picaduras las cuales puedan estar relacionadas con las altas densidades de corriente de trabajo suministradas por la técnica CPP. En la Figura 19 (d) no se aprecian zonas coloreadas, debido a que las picaduras presentes en esta probeta no desarrollaron un proceso corrosivo tan severo. En la Figura 19 (f) se observa que la picadura tiene una morfología circular bien definida y un tamaño cercano a los 10  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, la Figura 19 (e), correspondiente a la probeta sometida a la técnica CPP, muestra un tamaño 3 veces mayor, comparado a la picadura encontrada utilizando la técnica PD-GS-PD, su morfología no es del todo circular y a su alrededor se aprecian áreas de diferentes tonalidades que son consecuencia de la agresividad del proceso corrosivo que se desarrolló.

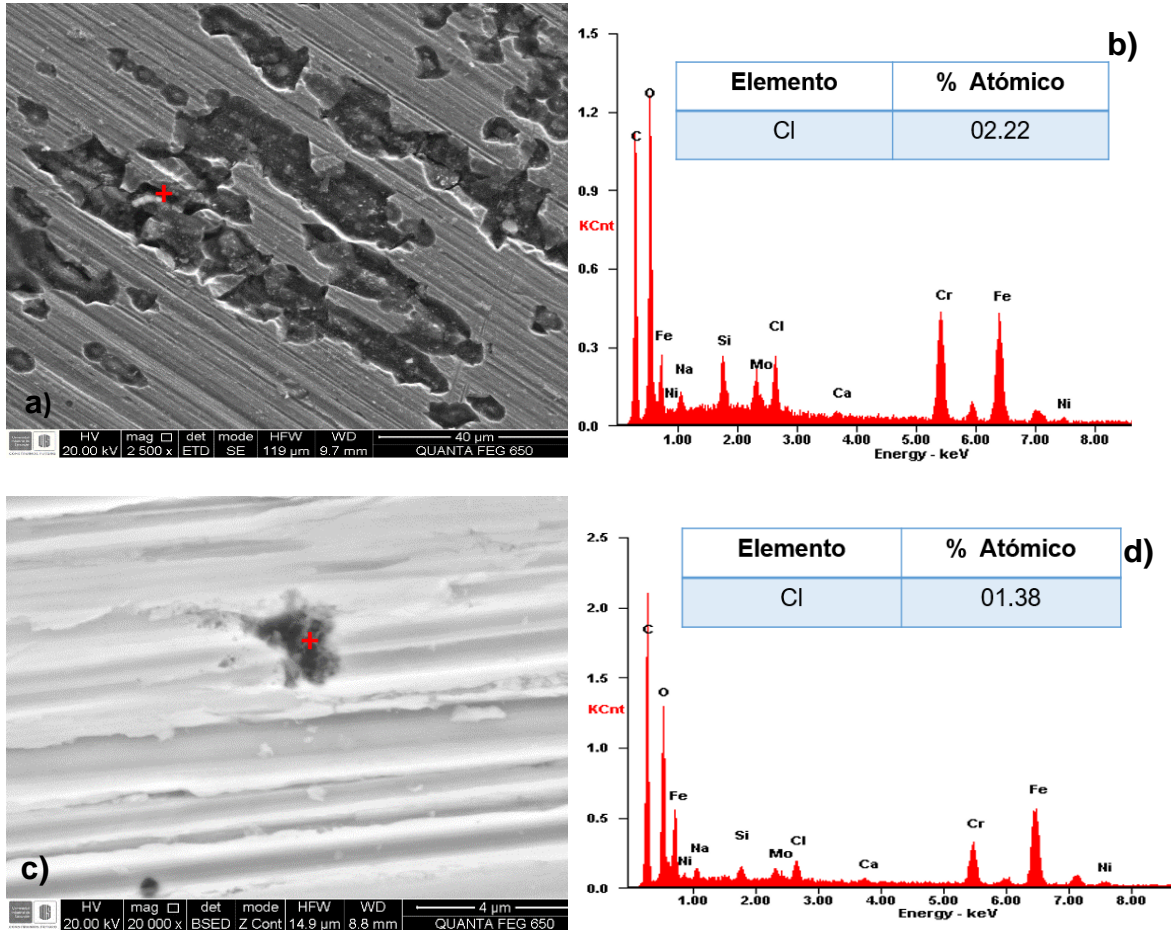
**Figura 19.** Micrografías ópticas de la aleación UNS S-32760. Probeta estudiada por la técnica CPP vista a: a) 50X,c) 200X y e) 1000X. Probeta estudiada por la técnica PD-GS-PD vista a: b) 50X,d) 200X y f) 1000X.



En la Figura 20 se presentan los resultados obtenidos del análisis MEB-EDS realizado a las probetas. En la Figura 20 (a), probeta de la técnica CPP, las picaduras son alargadas y se encuentran unidas, aunque su morfología no es circular sus bordes son redondeados. En el interior de las picaduras se puede observar zonas rugosas que son consecuencia de la pérdida de material que genera el proceso corrosivo, a su vez se aprecian zonas oscuras las cuales corresponden al fondo del pozo, en estas zonas se encuentra la mayor concentración de iones cloruro, hecho que fue corroborado con el análisis EDS (Figura 20 (b)).

El picado obtenido bajo la técnica PD-GS-PD (Figura 20 (c)), posee un tamaño y una morfología diferente al picado descrito en la Figura 20 (a). Se observa una picadura con bordes ovalados y un tamaño inferior a los 4  $\mu\text{m}$ . En el interior de la picadura no se observa una pérdida de material considerable, pero igual que en el caso anterior existe presencia de iones cloruro, la cual corroborado en el ensayo EDS (Figura 20 (d)).

**Figura 20.** Análisis MEB-EDS la aleación UNS S-32760 a) Probeta estudiada por la técnica CPP vista a 2500x. b) Análisis EDS del punto indicado en la Figura 20 (a). c) Probeta estudiada por la técnica PD-GS-PD vista a 20000x. d) Análisis EDS del punto indicado en la Figura 20 (c).



Con base en los anteriores resultados, se puede decir que el picado inducido por la técnica electroquímica CPP es más agresivo que el inducido por la técnica PD-GS-PD, debido principalmente a los rangos de densidad de corriente que cada técnica aplica. Entre mayor sea la densidad de corriente aplicada a la probeta se espera una mayor nucleación y crecimiento de las picaduras, lo cual es propiciado por la concentración de los iones cloruro que se encuentran en solución.

## 5. CONCLUSIONES

Mayores temperaturas conllevan a una menor resistencia a la corrosión por picado y a un aumento en las velocidades de corrosión de la aleación en estudio. Ya que se genera una ruptura inminente de su película pasiva lo que implica una mayor concentración y estabilidad de los iones cloruro presentes en los pozos de picado, facilitando y acelerando el proceso de propagación de los mismos.

La técnica electroquímica PD-GS-PD aunque no se encuentra estandarizada ofrece mayores ventajas en comparación con la técnica electroquímica CPP. Entre ellas resalta que otorga una mayor confiabilidad debido a que se obtuvieron potenciales críticos con una menor desviación estándar, ya que presenta una zona de propagación más estable, lo cual implica que es posible implementarla en el estudio de aceros inoxidable.

Empleando técnicas electroquímicas como CPP y PD-GS-PD se definieron potenciales críticos de la aleación para temperaturas de 25,60 y 80°C dentro de un rango de 0,85 hasta 0,94 V para el potencial de picado ( $E_P$ ) y -0,13 hasta 0,88 V para el potencial de repasivación ( $E_{RP}$ ). Ambos potenciales críticos fueron afectados por el cambio de temperatura, obteniéndose una mayor confiabilidad al momento de evaluar la susceptibilidad a la corrosión por picado para el potencial de repasivación.

Mayores tiempos de exposición de la muestra beneficia la resistencia a la corrosión en la aleación, disminuyendo la velocidad de corrosión y favoreciendo la capa protectora.

La presencia de pozos de picado más profundos y de mayor tamaño se evidenció mediante la aplicación de la técnica electroquímica CPP, debido a que se emplea una intensidad de corriente superior en comparación con la técnica electroquímica PD-GS-PD.

## 6. CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] UDAYAKUMAR, T.; RAJA, K.; AFSAL HUSAIN, T.M.; SATHIYA, P. Prediction and optimization of friction welding parameters for super duplex stainless steel (UNS S32760) joints. *Materials and Design*. 2013. *Materials and Design* 53, 2014.
- [2] BAUTISTA, A.; BLANCO, G.; VELASCO, F.; GUTIÉRREZ, A.; PALACÍN, S.; SORIANO, L.; TAKENOUTI, H. Pasivación de aceros inoxidable dúplex en disoluciones que simulan el hormigón contaminado con cloruros. *Materiales de Construcción*, Octubre-Diciembre 2007.
- [3] KIOSHY S.A.; ROCHA A.C.; C.P I.; MATTOS M.; F.A.S. S.; MATTOS R.O. Practical aspects on the use of on-site Double Loop Electrochemical Potentiodynamic Reactivation Technique (DL-EPR) for Duplex Stainless Steel. *Corrosion Science*. 2013.
- [4] JONES, D.A. Principles and Prevention of Corrosion. Segunda Edición. New Jersey. Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster / A Viacom Company Upper Saddle River, NJ 07458, 1992; 15.
- [5] ASTM International. Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements for localized corrosion susceptibility of iron-, nickel-, or cobalt-based alloys. Estados Unidos: ASTM Standards, 2014. G61-86.
- [6] MISHRA, A. K., FRANKEL, G. S. *Corrosion*, 2008. Vol. 64, Nº 1; 836.
- [7] FRANCIS, R.; BYRNE, G. Experiences with Super Duplex Stainless Steel in Seawater. San Diego, California. NACE International, 2003.
- [8] BOWDEN, P.L.; WARD, J.L. Experiences In Welding 25Cr Super Duplex Stainless Steel For Topsides Hydrocarbon Piping. Houston, Texas. Offshore Technology Conference, 1993.

- [9] FRANCIS, Roger ;BYRNE, Glenn ;WARBURTON, Geoff R. ; MALIGAS, Manuel N. The Selection Of Superduplex Stainless Steel For Oilfield Applications. New Orleans, Louisiana. NACE International, 2004.
- [10] BAXTER, C.F.G.; STEVENSON, A.W.; WARBURTON, G.R. . Welding of Zeron 100 Super Duplex Stainless Steel. Singapore.International Society of Offshore and Polar Engineers, 1993.
- [11] WANG CHAN, K.; SIE CHING, T. Effect of Secondary Phase Precipitation on the Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steels. Materials, 2014.
- [12] GARIN, J.L.; MANNHEIM, R. L.; CAMUS, M.A. Formación de fase sigma en uniones soldadas de acero inoxidable súper dúplex fundido. Revista de Metalurgia, 2011.
- [13] GÖRANSSON, K.; NYMAN, M.L.; HOLMQUIST, M. Extending the application range of super-duplex stainless steels. Nashville, Tennessee. NACE International, 2007.
- [14] YAKUWA, H.; MIYASAKA, M.; SUGIYAMA, K.; MITSUHASHI, K. Evaluation Of Crevice Corrosion Resistance Of Duplex And Super Duplex Stainless Steels For Seawater Pumps. Atlanta, Georgia. NACE International, 2009.
- [15] BAXTER, C.F.G.; STEVENSON, A.W.; WARBURTON, G.R. Welding of Zeron 100 Super Duplex Stainless Steel. Manchester, United Kingdom. The International Society of Offshore and Polar Engmeers, 1993.
- [16] UHLIG, H.H. Corrosión y control de corrosión. Traducido por Eduardo Aguilar. España. Ediciones Urmo, 1970; 13-14: 69-70.

- [17] CASANOVA CIRAC. O.; BELÍO ARANGÓN. F. Corrosión y su control en sistemas de refrigeración. Zaragoza. Academia de Ciencias Exactas, físicas, químicas y naturales de Zaragoza, 1997; 24.
- [18] SHREIR, L.L. Corrosión. Metal/Environment Reactions. London, GB. Newnes Butterworths, 1976. Vol 1; 114:124-127.
- [19] CUMARE OCARIZ, R.A. Resistencia a la corrosión localizada de aceros inoxidables austeníticos coloreados. Proyecto de grado ingeniería de materiales. Sartenejas. Universidad Simón Bolívar decanato de estudios profesionales coordinación de Ingeniería de Materiales, 2011.
- [20] GALVELE, J.R. Corrosión. Washington, DC. Secretaria general de la OEA. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, 1979; 3-5:37-38:47-48.
- [21] HØYDAL, A. B.; SKAVÅS, E.; HEMMINGSEN, T. Crevice corrosion on super duplex stainless steel – effect of potential on critical crevice corrosion temperature. Orlando, Florida. NACE International, 2003.
- [22] GALVELE, J.R.; DUFFÓ, G.S. Degradación de materiales - I corrosión. Jorge Baudino Editores, Buenos Aires. Argentina, 2006.
- [23] McCAFFERTY, E. Introduction to Corrosion Science. USA. Springer Science+Business Media, 2010; 277-278: 283-288:296-297.
- [24] PARKINS, R.N. Corrosion Process. London, GB. APPLIED SCIENCE PUBLISHERS, 1982; 180-196.
- [25] FINSÅS WIKÅ, S. Pitting and Crevice Corrosion of Stainless Steel under Offshore Conditions. Tesis de maestria. Norwegian University of Science and Technology NTNU. Julio 2012.

- [26] SAITHALA, J.R.; UBHI, H.S.; ATKINSON, J.D. ; PATIL, A.K.P. Pitting Corrosion Mechanisms Of Lean Duplex, Duplex And Super Duplex Stainless Steels In Chloride Solutions. Houston, Texas. NACE International, 2011.
- [27] CARRANZA, R.M. ; GIORDANO, C.M.; RODRÍGUEZ, M.A.; REBAK, R.B. Electrochemical methods for repassivation potential measurements. Atlanta, Georgia. NACE International, 2009.
- [28] BILURBINA ALTER, L.; LIESA MAESTRES, F.; IRIBARREN LACO, J.I. Corrosión y protección. España. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2003; 77-78.
- [29] GALVELE, J.R. Corrosion. Washington, USA. The General Secretariat of the Organization of American States Washington,D.C, 1979; 22-24
- [30] MALIK, A.U.; AHMAD, S. Electrochemical Studies on the Corrosion Behavior<sup>1</sup> of Conventional and High Alloy Steels in Gulf Seawater. Kingdom of Saudi Arabia, 2009.
- [31] RINCÓN ORTÍZ, M.; RODRÍGUEZ, M.; CARRANZA, R.M. ; REBAK, R.B. Crevice corrosion repassivation of alloy 22 in chloride solutions. San Antonio, Texas. NACE International, 2010.
- [32] ZADOROZNE, N.S.; RODRÍGUEZ, M.A.; CARRANZA, R.M.; MECK, N.S.; REBAK, R.B. Corrosion resistance of Ni-Cr-Mo and Ni-Mo-Cr alloys in different metallurgical conditions. San Antonio, Texas. NACE International, 2010.
- [33] RINCÓN ORTÍZ, M.; RODRÍGUEZ, M.A.; CARRANZA, R.M.; REBAK, R.B. Efficiency of inhibitors of chloride-induced crevice corrosion of a Ni-Cr-Mo alloy. Houston, Texas. NACE International, 2011.
- [34] ASTM International. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. Estados Unidos: ASTM Standards, 2010. G3-74.

- [35] ZAKI, A. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. Washington, USA. Butterworth-Heinemann, 2006; 90-91.
- [36] B. Poulson, Electrochemical measurements in flowing solutions, Corrosion Science, 1983. Pag 391-430.
- [37] ASTM International. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. Estados Unidos: ASTM Standards, 2010. G3-89.
- [38] ASTM International. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. Estados Unidos: ASTM Standards, 2001. E3-01.
- [39] ASTM International. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. Estados Unidos: ASTM Standards, 1999. E407-99.
- [40] ASTM International. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Practice. Estados Unidos: ASTM Standards, 2013. E112-12.
- [41] BEAVERS, John A.; THOMPSON, Neil G. ; DURR, Carolyn L. . Unique Interpretations of Potentiodynamic Polarization Technique, San Diego, California. NACE International, 1998.
- [42] B. E. Wilde and E. Williams, Electrochim. Acta., 16, 1971 (1971).
- [43] ASTM International. Standard test method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. Estados Unidos: ASTM Standards, 2014. G59-97.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ASTM International. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. Estados Unidos: ASTM Standards, 2001. E3-01.

ASTM International. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. Estados Unidos: ASTM Standards, 1999. E407-99.

ASTM International. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. Estados Unidos: ASTM Standards, 2010. G3-74.

ASTM International. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. Estados Unidos: ASTM Standards, 2010. G3-89.

ASTM International. Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements for localized corrosion susceptibility of iron-, nickel-, or cobalt-based alloys. Estados Unidos: ASTM Standards, 2014. G61-86.

ASTM International. Standard test method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. Estados Unidos: ASTM Standards, 2014. G59-97.

ASTM International. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Practice. Estados Unidos: ASTM Standards, 2013. E112-12.

B. E. Wilde and E. Williams, *Electrochim. Acta.*, 16, 1971 (1971).

B. Poulson, Electrochemical measurements in flowing solutions, *Corrosion Science*, 1983. Pag 391-430.

BAUTISTA, A.; BLANCO, G.; VELASCO, F.; GUTIÉRREZ, A.; PALACÍN, S.; SORIANO, L.; TAKENOUTI, H. Pasivación de aceros inoxidable dúplex en

disoluciones que simulan el hormigón contaminado con cloruros. *Materiales de Construcción*, Octubre-Diciembre 2007.

BAXTER, C.F.G.; STEVENSON, A.W.; WARBURTON, G.R. *Welding of Zeron 100 Super Duplex Stainless Steel*. Manchester, United Kingdom. The International Society of Offshore and Polar Engineers, 1993.

BAXTER, C.F.G.; STEVENSON, A.W.; WARBURTON, G.R. . *Welding of Zeron 100 Super Duplex Stainless Steel*. Singapore. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1993.

BEAVERS, JOHN A.; THOMPSON, NEIL G. ; DURR, CAROLYN L. . *Unique Interpretations of Potentiodynamic Polarization Technique*, San Diego, California. NACE International, 1998.

BILURBINA ALTER, L.; LIESA MAESTRES, F.; IRIBARREN LACO, J.I. *Corrosión y protección*. España. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2003; 77-78.

BOWDEN, P.L.; WARD, J.L. *Experiences In Welding 25Cr Super Duplex Stainless Steel For Topsides Hydrocarbon Piping*. Houston, Texas. Offshore Technology Conference, 1993.

CARRANZA, R.M. ; GIORDANO, C.M.; RODRÍGUEZ, M.A.; REBAK, R.B. *Electrochemical methods for repassivation potential measurements*. Atlanta, Georgia. NACE International, 2009.

CASANOVA CIRAC. O.; BELÍO ARANGÓN. F. *Corrosión y su control en sistemas de refrigeración*. Zaragoza. Academia de Ciencias Exactas, físicas, químicas y naturales de Zaragoza, 1997; 24.

CUMARE OCARIZ, R.A. *Resistencia a la corrosión localizada de aceros inoxidables austeníticos coloreados*. Proyecto de grado ingeniería de materiales. Sartenejas.

Universidad Simón Bolívar decanato de estudios profesionales coordinación de Ingeniería de Materiales, 2011.

FINSÅS WIKÅ, S. Pitting and Crevice Corrosion of Stainless Steel under Offshore Conditions. Tesis de maestría. Norwegian University of Science and Technology NTNU. Julio 2012.

FRANCIS, R.; BYRNE, G. Experiences with Super Duplex Stainless Steel in Seawater. San Diego, California. NACE International, 2003.

FRANCIS, ROGER; BYRNE, GLENN; WARBURTON, GEOFF R.; MALIGAS, MANUEL N. The Selection Of Superduplex Stainless Steel For Oilfield Applications. New Orleans, Louisiana. NACE International, 2004.

GALVELE, J.R. Corrosion. Washington, USA. The General Secretariat of the Organization of American States Washington, D.C, 1979; 22-24.

GALVELE, J.R. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico Corrosión. Washington, DC. Secretaria general de la OEA., 1979; 3-5:37-38:47-48.

GALVELE, J.R.; DUFFÓ, G.S. Degradación de materiales - I corrosión. Jorge Baudino Editores, Buenos Aires. Argentina, 2006.

GARIN, J.L.; MANNHEIM, R. L.; CAMUS, M.A. Formación de fase sigma en uniones soldadas de acero inoxidable súper dúplex fundido. Revista de Metalurgia, 2011.

GÖRANSSON, K.; NYMAN, M.L.; HOLMQUIST, M. Extending the application range of super-duplex stainless steels. Nashville, Tennessee. NACE International, 2007.

HØYDAL, A. B.; SKAVÅS, E.; HEMMINGSEN, T. Crevice corrosion on super duplex stainless steel – effect of potential on critical crevice corrosion temperature. Orlando, Florida. NACE International, 2003.

JONES, D.A. Principles and Prevention of Corrosion. Segunda Edición. New Jersey. Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster / A Viacom Company Upper Saddle River, NJ 07458, 1992; 15.

KIOSHY S.A.; ROCHA A.C.; C.P.I.; MATTOS M.; F.A.S. S.; MATTOS R.O. Practical aspects on the use of on-site Double Loop Electrochemical Potentiodynamic Reactivation Technique (DL-EPR) for Duplex Stainless Steel. Corrosion Science. 2013. Corrosion Science 74, 2013.

MALIK, A.U.; AHMAD, S. Electrochemical Studies on the Corrosion Behavior<sup>1</sup> of Conventional and High Alloy Steels in Gulf Seawater. Kingdom of Saudi Arabia, 2009.

McCAFFERTY, E. Introduction to Corrosion Science. USA. Springer Science+Business Media, 2010; 277-278: 283-288:296-297.

MISHRA, A. K., FRANKEL, G. S. Corrosion, 2008. Vol. 64, N° 1; 836.

PARKINS, R.N. Corrosion Process. London, GB. APPLIED SCIENCE PUBLISHERS, 1982; 180-196.

RINCÓN ORTÍZ, M.; RODRÍGUEZ, M.; CARRANZA, R.M. ; REBAK, R.B. Crevice corrosion repassivation of alloy 22 in chloride solutions. San Antonio, Texas. NACE International, 2010.

RINCÓN ORTÍZ, M.; RODRÍGUEZ, M.A.; CARRANZA, R.M.; REBAK, R.B. Efficiency of inhibitors of chloride-induced crevice corrosion of a Ni-Cr-Mo alloy. Houston, Texas. NACE International, 2011.

SAITHALA, J.R.; UBHI, H.S.; ATKINSON, J.D. ; PATIL, A.K.P. Pitting Corrosion Mechanisms Of Lean Duplex, Duplex And Super Duplex Stainless Steels In Chloride Solutions. Houston, Texas. NACE International, 2011.

SHREIR, L.L. Corrosión. Metal/Environment Reactions. London, GB. Newnes Butterworths, 1976. Vol 1; 114:124-127.

UDAYAKUMAR, T.; RAJA, K.; AFSAL HUSAIN, T.M.; SATHIYA, P. Prediction and optimization of friction welding parameters for super duplex stainless steel (UNS S32760) joints. *Materials and Design*.2013. *Materials and Design* 53, 2014.

UHLIG, H.H. *Corrosión y control de corrosión*. Traducido por Eduardo Aguilar. España. Ediciones Urmo, 1970; 13-14: 69-70.

WANG CHAN, K.; SIE CHING, T. Effect of Secondary Phase Precipitation on the Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steels. *Materials*, 2014.

YAKUWA, H.; MIYASAKA, M.; SUGIYAMA, K.; MITSUHASHI, K. Evaluation Of Crevice Corrosion Resistance Of Duplex And Super Duplex Stainless Steels For Seawater Pumps. Atlanta, Georgia. NACE International, 2009.

ZADOROZNE, N.S.; RODRÍGUEZ, M.A.; CARRANZA, R.M.; MECK, N.S.; REBAK, R.B. Corrosion resistance of Ni-Cr-Mo and Ni-Mo-Cr alloys in different metallurgical conditions. San Antonio, Texas. NACE International, 2010.

ZAKI, A. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Washington, USA. Butterworth-Heinemann, 2006; 90-91