

Uso de técnicas electroquímicas para determinar la resistencia a la corrosión localizada de un acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760

Use of electrochemical techniques to determine the resistance of a localized corrosion on a super duplex UNS S-32760

Ingrid Katherine Rodríguez Chavez¹, Shaney Lorena Pabón Calderón¹,
Mauricio Rincón Ortiz¹

¹ Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales, Universidad Industrial de Santander UIS: CP 680002 Cr 27 Calle 9, Bucaramanga, Santander, Colombia.
e-mail: kate.rchavez11@hotmail.com, shalopa_0415@hotmail.com, mrincono@saber.uis.edu.co

RESUMEN

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 como repercute la temperatura en los potenciales críticos de la aleación, a diversas temperaturas como 25°C, 60°C y 80°C en soluciones de NaCl al 3,5% P/P. Además, se realizó un estudio sobre las velocidades de corrosión de la presente aleación mediante técnicas electroquímicas como extrapolación de Tafel, Resistencia de la Polarización lineal y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica. De igual manera, se utilizaron técnicas complementarias no electroquímicas, como Microscopia Óptica y Microscopia Electrónica de Barrido, para observar la morfología y tamaño de las picaduras obtenidas.

Los resultados muestran que un incremento en la temperatura conlleva a una mayor susceptibilidad a la corrosión por picado y a un incremento en la velocidad de corrosión. Los potenciales críticos de la aleación se obtuvieron dentro de un rango de 0,85 hasta 0,94 mV vs ECS para el potencial de picado y de -0,13 hasta 0,88 mV vs ECS para el potencial de repasivación. Las velocidades de corrosión obtenidas a una temperatura de 80°C fueron menores a 22 µm/año a 24 horas.

Palabras clave: Acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760, corrosión por picado, potenciales críticos, CPP, PD-GS-PD.

ABSTRACT

Super duplex stainless steel UNS S-32760 is one of the most commonly used alloys in several industrial applications, due to its high corrosion resistance. 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) at 25°C, 60°C and 80°C in 3.5% w/w NaCl solutions. Moreover, Tafel extrapolation, linear resistance polarization and Electrochemical Impedance Spectroscopy were used to measure corrosion rates. Furthermore, non-electrochemical techniques such as Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy (SEM) were applied to observe pitting morphology and size.

The results show that an increase in temperature leads to a higher susceptibility to pitting corrosion and to an increased corrosion rate. Alloy critical Potential values were obtained within a range of 0.85 to 0.94 mV for pitting potential and -0.13 to 0.88 mV for repassivation potential. For temperatures around 80°C, the corrosion rates obtained were lower than 22 $\mu\text{m}/\text{year}$ at 24 hours.

Keywords: Super duplex stainless Steel UNS S-32760, pitting corrosion, critical potentials, CPP, PD-GS-PD.

1. INTRODUCCIÓN

La aleación UNS S-32760, pertenece al grupo de los aceros inoxidable súper 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 [1]. 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 α (ferrita) y γ (austenita) y la pasividad del acero [1-8].

El acero UNS S-32760 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 [1,3,4]. Sin embargo, algunas de las características ya mencionadas, son afectadas por ciertas condiciones de trabajo [9].

En las dos últimas décadas esta aleación es la más empleada en industrias como la del procesamiento de papel, transporte y procesamiento de agua, industria minera, química, marina, y en especial la industria petroquímica, esto debido a sus propiedades [4], en esta última el acero UNS S-32760 es utilizado principalmente en la elaboración de componentes estructurales de plataformas “*off-shore*” [10].

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 [10].

La corrosión localizada (corrosión por picado) ha sido ampliamente estudiada, arrojando como resultado que a temperaturas menores a 60°C la aleación presenta una baja susceptibilidad a la corrosión, cuando en esta no se encuentra una fase indeseable en su matriz.

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. En primera medida el 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 [11,12], algunos estudios también indican que es afectado por el pH, sin embargo otros no han encontrado relación alguna [12,13]. En segunda medida el 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 [13].

Con base en lo anteriormente mencionado, la presente investigación 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 Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP) y Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD). Así mismo, realizar un estudio de las velocidades de corrosión de la aleación, mediante técnicas electroquímicas como Extraprolación de Tafel, Resistencia a la Polarización Lineal y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización metalográfica

La caracterización microestructural del acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760 se llevó a cabo según lo estipulado en la norma ASTM E3-01 [14]. La probeta se sometió a un desbaste en papel grano de carburo de silicio, partiendo del número 80 hasta 600, una vez desbastada se llevó a pulir utilizando pasta de diamante en paño.

La microestructura del acero fue revelada mediante un ataque electroquímico bajo lo establecido en la norma ASTM E407-99 [15]. 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 la probeta fue analizada mediante microscopía óptica, utilizando un microscopio OLYMPUS GX41.

2.2 Ensayos electroquímicos

Los ensayos electroquímicos se realizaron con probetas de geometría circular, las cuales poseían un área de exposición igual a 1 cm², para dichas probetas en estudio se llevó a cabo un acabado superficial mediante un desbaste con papel lija de carburo de silicio desde el papel número 80 hasta el número 600; la limpieza de la superficie de las probetas se realizó con agua desionizada y acetona. Las pruebas se realizaron para temperaturas de 25°C, 60°C y 80°C.

Las mediciones electroquímicas se realizaron mediante el montaje de una celda de corrosión de vidrio 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) ($V_{ECS}=V_{ENH}+0,244V$), el cual fue conectado a la solución mediante un capilar de Luggin, por último como contra electrodo una malla 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.

Se determinaron los potenciales críticos de corrosión por picado mediante la realización de curvas de polarización por técnicas electroquímicas como Polarización Potenciodinámica Cíclica (CPP), la cual se llevó a cabo bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM G61-86 [16], mientras que las pruebas Potenciodinámica-Galvanostática-Potenciodinámica (PD-GS-PD) debido a que no se encuentra estandarizadas se llevaron a cabo bajo la información reportada en la literatura [17, 18, 19]. Ambas técnicas utilizaron una velocidad de barrido de 0,167mV/s y fueron llevadas a cabo por triplicado. Una vez finalizados los ensayos electroquímicos por las técnicas CPP y PD-GS-PD, se observaron en el microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido las probetas sometidas a una temperatura de trabajo de 80°C.

Por otro lado las técnicas de extrapolación de Tafel [20], Resistencia de la Polarización lineal [21] y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) [22] se emplearon para la determinación de las velocidades de corrosión. Para dicha determinación se utilizó una solución aireada, la cual se dejó a un tiempo de exposición de 1h y 24h. 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. Por último para la EIS se utilizó una señal sinusoidal de potencial, realizándose un barrido de frecuencias entre 10kHz y 1mHz. Para determinar la velocidad de corrosión se trabajó la siguiente expresión:

$$V_{CORR} = \frac{KBPE}{\rho} \frac{1}{R_p} \text{ (mm/año)} \quad (1)$$

En donde K es la constante de conversión faradaica ($K=3,27 \times 10^{-3}$ mm g/ μ A cm año), B es la constante de Stern y Geary, PE es el peso equivalente ($PE=24,81$ g/eq), ρ es la densidad ($\rho=7,8$ g/cm³) y R_p es la resistencia a la polarización.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización metalográfica

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 inoxidables súper dúplex.

La Figura 1 evidencia que la aleación posee una microestructura bifásica, conformada por las fases ferrita α (zonas oscuras) y austenita γ (zonas clara) las cuales se presentan en una matriz uniforme 50:50 como se puede apreciar con mayor facilidad en las Fig 1.c)-d), sin embargo debido a la luz proyectada por el microscopio es posible que las fases no sean identificadas por su tonalidad, por ello la mejor manera de diferenciarlas es analizando su morfología, siendo granos de austenita aquellos cuyos bordes son rectangulares y granos de ferrita aquellos que tienen bordes de grano suaves.

Como era de esperarse debido al bajo contenido de carbono de la aleación no se evidenció ningún tipo de precipitado de carburos, a su vez implementado la norma ASTM E 112-12 [23] 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.

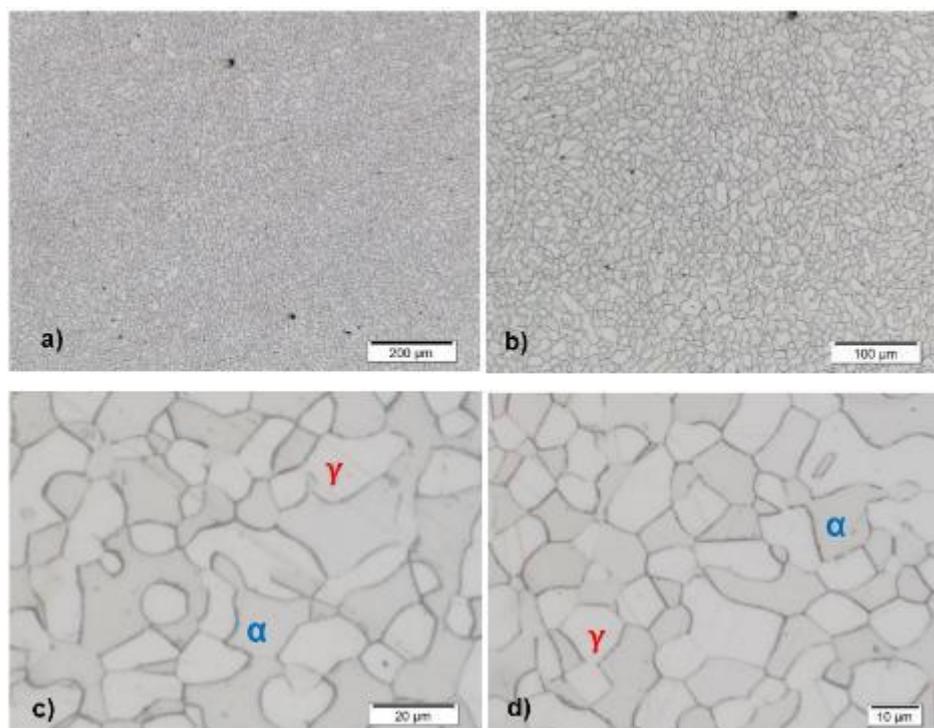


Figura 1: Micrografía óptica de la microestructura del acero inoxidable súper dúplex UNS S-32760: a) 100x, b) 200x, c) 1000x y d) 1200x.

3.2 Mediciones electroquímicas para la determinación de los potenciales críticos de la aleación

En la Figura 2 se muestran las curvas CPP y PD-GS-PD obtenidas del acero UNS S-32760 para corrosión por picado, en una solución de 3,5%P/P a diferentes temperaturas de 25°C, 60°C y 80°C. Se observó que en todos los casos las curvas presentan en su comienzo una zona catódica a potenciales entre -0,6 y -0,3V hasta llegar al potencial de corrosión (E_{CORR}). Es probable que las diferencias que se perciben en los potenciales de corrosión (E_{CORR}), se deban principalmente a que la aleación necesita un tiempo mayor a una hora para estabilizar su potencial de corrosión, sin embargo en muchas de las mediciones realizadas, como se observa en la figura 2b) se obtuvieron E_{corr} muy similares.

Luego de pasar por E_{CORR} , la curva pasa a una corriente anódica donde el potencial se incrementa a una velocidad constante e inicia su zona de pasividad donde la densidad de corriente se mantuvo alrededor de $1\mu A/cm^2$ 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, durante esta última etapa se genera la propagación de los pozos de picado debido a la pérdida de la capa protectora. En el punto donde se alcanza la densidad de corriente límite para las curvas PD-GS-PD comienza una etapa galvanostática, la cual confiere una zona de propagación más estable y lenta de las picaduras. Finalizada la zona de propagación 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 de vuelta (barrido catódico) cruza la zona de pasividad las picaduras dejan de crecer y además se regenera la capa pasiva, en dicho punto se considera que se llega al potencial de repasivación (E_{RP}) de la aleación.

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. Se observó que para las curvas obtenidas por las técnicas CPP y PD-GS-PD, sus trayectorias son muy semejantes excepto en su intensidad de corriente máxima, la histéresis que se presenta aumenta su tamaño a medida que se realiza un incremento en la temperatura, por ende la distancia entre los potenciales críticos de la aleación (E_P y E_{RP}) también presentan un aumento. Lo anterior, significa que a medida que aumenta la temperatura la película pasiva del material va perdiendo estabilidad debido a que los iones agresivos 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, 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.

Para una temperatura de 25°C la aleación posee una baja susceptibilidad a la corrosión por 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 microscopia 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. Aunque para una temperatura de 60°C la distancia entre los potenciales críticos de la aleación y por ende la histéresis que se presenta, no muestra una gran diferencia con la temperatura de 25°C, sí indica la presencia de pozos de picado con poco crecimiento generados por el proceso de corrosión. En la investigación realizada por R. Francis *et al.* [1] 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 fue corroborado en la presente investigación.

A la temperatura de 80°C 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. Sin embargo investigaciones como las de Lacoviello *et al.* [6] 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 σ , 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. Finalmente, se infiere que a 80°C y a temperaturas superiores la susceptibilidad a la corrosión por picado de la aleación aumenta de manera considerable.

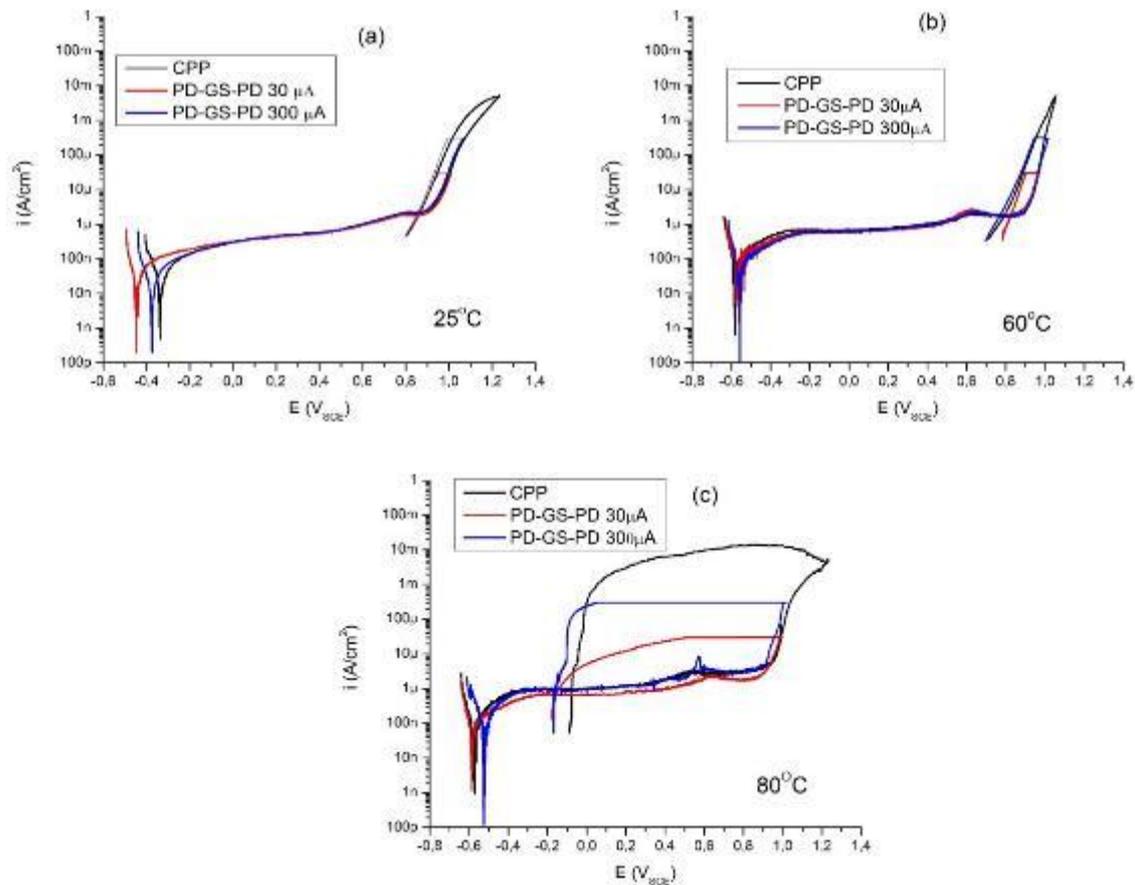


Figura 2: Curvas CPP, PD-GS-PD 30 μ A y PD-GS-PD 300 μ A de la aleación UNS S-32760 en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25°C, 60°C y 80°C.

3.3 Potenciales de picado

En la Figura 3 se presenta el resultado obtenido del promedio de los potenciales de picado (E_p) de las pruebas realizadas y la desviación estándar calculada entre ellas.

Se observó que para las temperaturas de 25°C y 60°C existe 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. Sin embargo, para una temperatura de 80°C el fenómeno anteriormente mencionado no se evidenció, ya que a esta temperatura se registraron los E_p más positivos, hecho contrario al esperado, donde los E_p obtenidos a 80°C debieron ser valores menores a los presentados a 25°C y 60°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 de Beavers *et al.* [24]. Además para la temperatura crítica de 80°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.

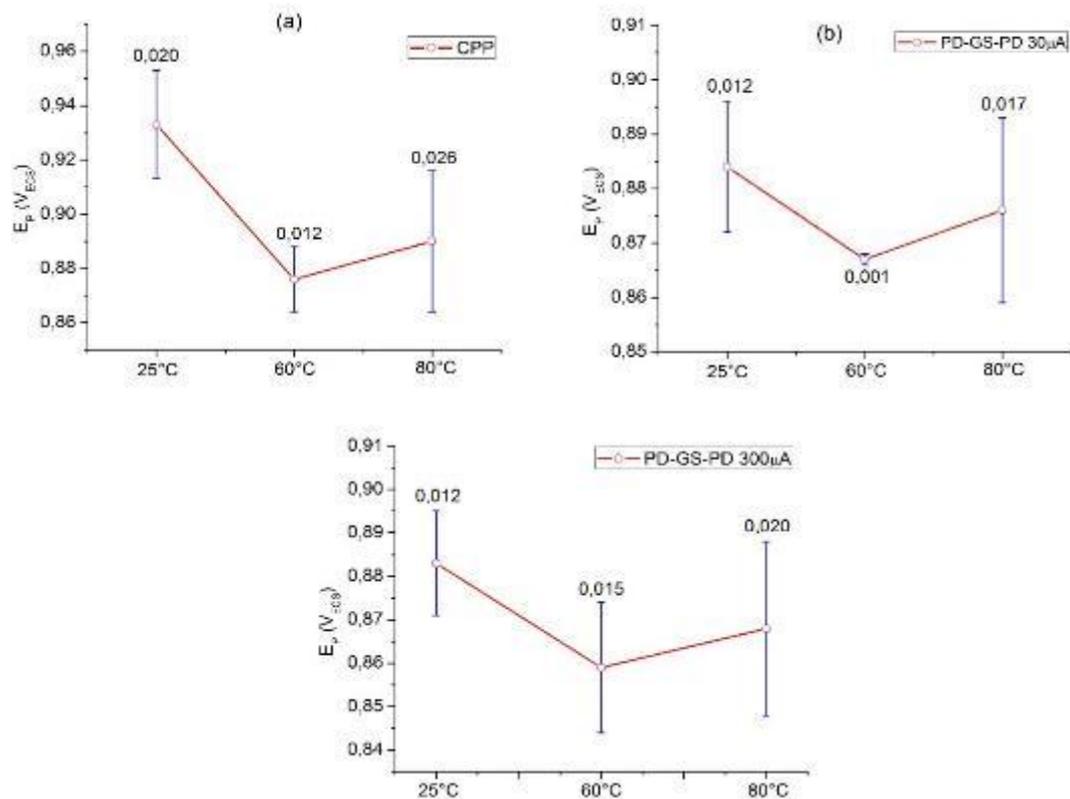


Figura 3: Potenciales de picado de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica CPP, PD-GS-PD 30µA y PD-GS-PD 300µA en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.

3.4 Potenciales de repasivación

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos de los potenciales de repasivación (E_{RP}), estos se obtuvieron de igual manera que los E_p . 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} menor será la susceptibilidad a la corrosión por picado.

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 300µA es la que presentan las menores desviaciones estándar, seguida de la técnica PD-GS-PD a 30µA 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, esto se le atribuye a las etapas de propagación con las que cuenta cada técnica, por un lado la técnica 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 técnica PD-GS-PD a la que se le atribuye su estabilidad por tener una etapa galvanostática que permite que los pozos de picado existentes se propaguen de una manera más constante.

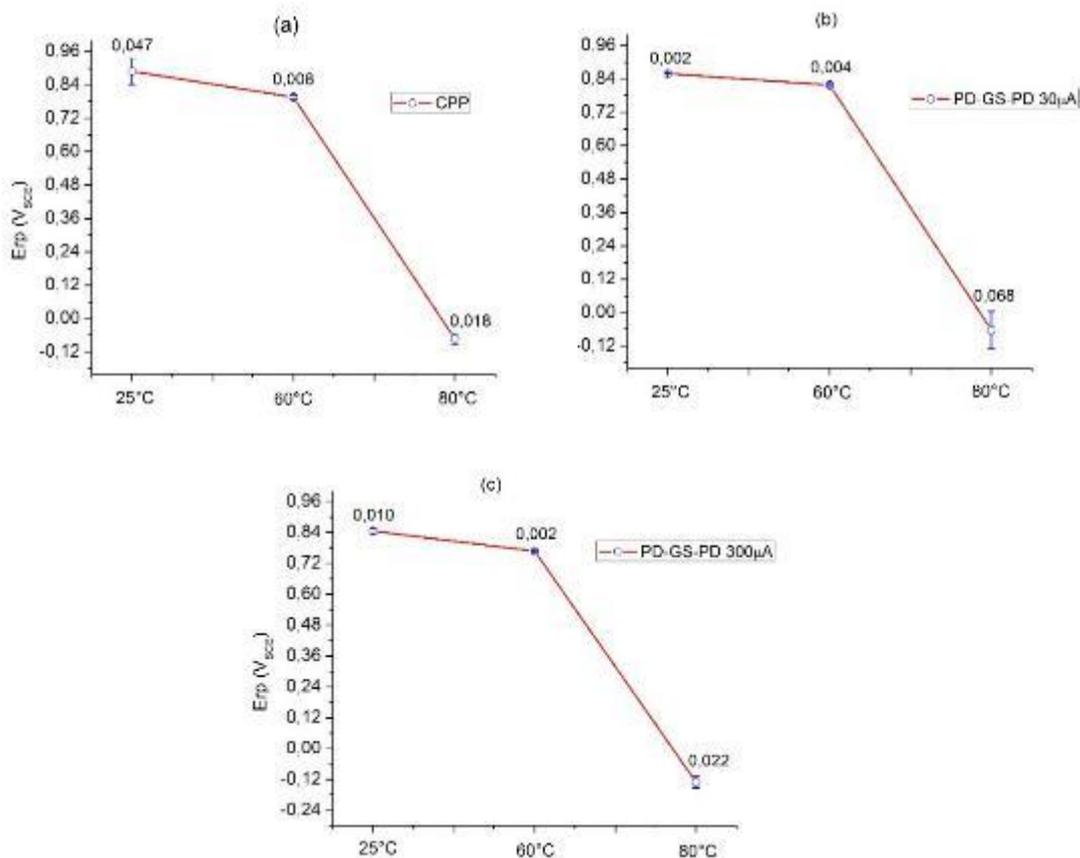


Figura 4: Potenciales de repasivación de la aleación UNS S-32760 determinados por la técnica electroquímica CPP, PD-GS-PD 30µA y PD-GS-PD 300µA en solución acuosa desaireada de 3,5%P/P de NaCl a 25, 60 y 80°C.

3.5 Análisis microscópico del picado

En la Figura 5 se presentan las micrografías de la probeta analizada mediante microscopia óptica (MO) y microscopia electrónica de barrido (SEM), donde se puede apreciar la forma de ataque de la corrosión por picado que sufre la aleación.

En la Figura 5 (a y b) se observa que para la técnica CPP existe una mayor cantidad de picaduras y un mayor tamaño de estas, dichas picaduras presentan a su alrededor zonas con diferentes coloraciones las cuales se pueden llegar a relacionar con la alta densidad de corriente de trabajo suministrada, por otro lado para la técnica PD-GS-PD Figura 5 (c y d) se aprecia una menor cantidad de picaduras y un menor tamaño de estas, de igual manera no se observa zonas coloreadas alrededor de las picaduras debido a que estas no desarrollaron un proceso corrosivo tan severo. En la Figura 5 (b), 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. El picado obtenido bajo la técnica PD-GS-PD (Figura 5 (d)), posee un tamaño y una morfología diferente, se observa una picadura con bordes ovalados y un tamaño inferior a los 4 µm. En el interior de la picadura no se observa una pérdida de material considerable.

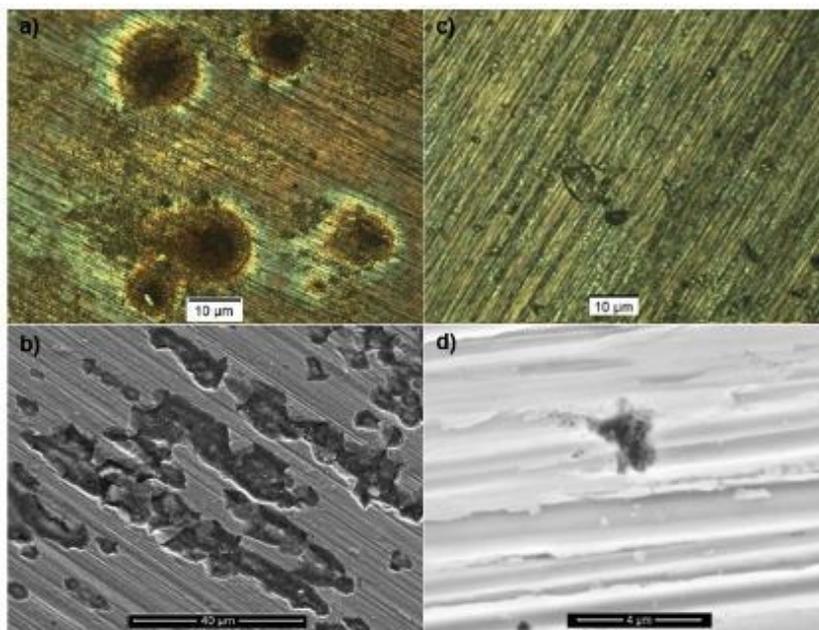


Figura 5: Probeta estudiada por la técnica CPP vista a: a) 200X por MO y b) 2500X por SEM. Probeta estudiada por la técnica PD-GS-PD vista a: c) 200X por MO y d) 20000X por SEM.

3.6 Velocidades de corrosión

En la Figura 6 se observa los diagramas de nyquist obtenidos para las temperaturas de 25,60 y 80°C a un tiempo de exposición de 1 y 24h. Se obtuvieron diagrama totalmente capacitivos para un circuito equivalente $R\Omega-(R_p//CPE)$ el cual se ajustó correctamente los resultados obtenidos.

En la Figura 7 para cada técnica empleada se puede observar que al aumentar la temperatura la velocidad de corrosión también presenta un incremento, 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. También se observa que al aumentar el tiempo de exposición la velocidad de corrosión disminuye, esto se debe a que se está en presencia de una capa protectora de mayor espesor y estabilidad. Se puede apreciar que los resultados obtenidos para las velocidades de corrosión para cada temperatura y tiempo de exposición es muy similar entre cada técnica.

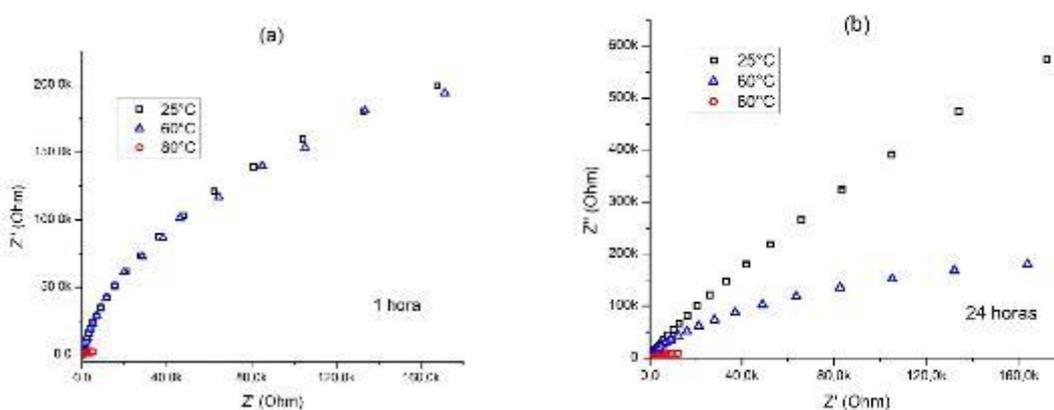


Figura 6: Diagrama de Nyquist obtenido de la aleación UNS S-32760 en una solución acuosa aireada de 3,5% P/P de NaCl a una temperatura de 60°C y con un tiempo de exposición de 24h.

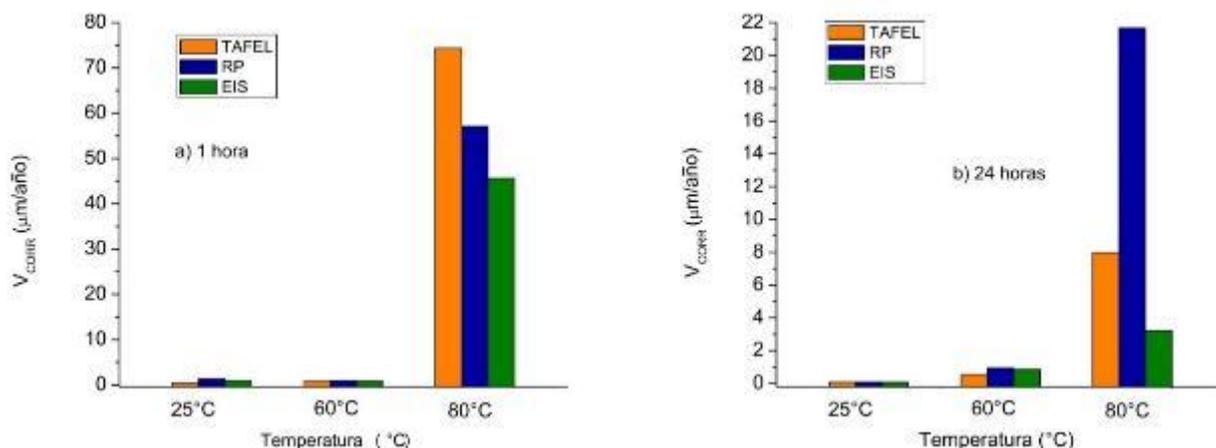


Figura 7: Velocidades de corrosión obtenidas por las técnicas de Extrapolación de Tafel, Resistencia a la polarización lineal y EIS a un tiempo de exposición de A) hora:1 y B) hora:24 en una solución acuosa aireada de 3,5% P/P de NaCl.

4. CONCLUSIONES

- Mayores temperaturas conllevan a una disminución a la resistencia a la corrosión por picado y a un aumento en las velocidades de corrosión de la aleación en estudio.
- La técnica electroquímica PD-GS-PD 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 más conservadores.
- Empleando técnicas electroquímicas como CPP y PD-GS-PD se definieron potenciales críticos de la aleación para temperaturas de 25°C, 60°C y 80°C dentro de un rango de 0,85 hasta 0,94V para el potencial de picado (E_p) y -0,13 hasta 0,88V para el potencial de repasivación (E_{RP}). Ambos potenciales críticos fueron afectados por el cambio de temperatura.
- Se observa una disminución de la velocidad de corrosión a un tiempo de exposición de 24h.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FRANCIS, R., BYRNE, G., “Experiences with super duplex stainless steel in seawater”, In: *NACE International Corrosion 2003*, 03255, San Diego, California, USA, 16-20 March, 2003.
- [2] UDAYAKUMAR, T., RAJA, K., AFSAL HUSAIN, T.M., *et al.*, “Prediction and optimization of friction welding parameters for super duplex stainless steel (UNS S32760) joints”, *Materials and Design*, v.53, pp. 226-235, Jan. 2014.
- [3] BOWDEN, P.L, WARD, J.L., “Experiences in welding 25Cr super duplex stainless steel for topsides hydrocarbon piping”, In: *Offshore Technology Conference*, OTC-7316-MS, Houston, Texas, USA, 3-6 May 1993.
- [4] FRANCIS, R., BYRNE, G., WARBURTON, G. R., *et al.*, “The selection of superduplex stainless steel for oilfield applications”, In: *NACE International Corrosion 2004*, 04123, New Orleans, Louisiana, USA, 28 March-1 April, 2004.
- [5] BAXTER, C.F.G., STEVENSON, A.W., WARBURTON, G.R., “Welding of Zeron 100 Super Duplex Stainless Steel”, In: *International Society of Offshore and Polar Engineers*, pp. 408-416, Singapore, Jun.1993.
- [6] LACOVIELLO, F., DI COCCO, V., D’AGOSINO L., “Intergranular corrosion susceptibility analysis in austeno – ferritic (duplex) stainless steels”, In: *XXIV Italian Group of Fracture Conference-Procedia Structural Integrity*, pp. 276-282, Urbino, Mar. 2017.

- [7] BRYTAN, Z., NIAGAJ, J., REIMAN, L., “Corrosion studies using potentiodynamic and EIS electrochemical techniques of welded lean duplex stainless steel UNS S 88441”, *Applied Surface Science*, v.388, pp.160-168, Dec. 2016.
- [8] ASSIS, K.S., SOUSA, F.V.V., MIRANDA, M., *et al.*, “Assessment of Electrochemical methods used on corrosion superduplex stainless steel”, *Corrosion Science*, v.59, pp.71-80, Jun. 2012.
- [9] CHAN, K.W., TJONG, S.C. “Effect of secondary phase precipitation on the corrosion behavior of duplex stainless steels”, *Materials*, v.7, n.7, pp. 5268-5304, Jul. 2014.
- [10] ASSIS, K. S., ROCHA, A.C., MARGARIT-MATTOS, I.S.P., “Practical aspects on the use of on-site double loop electrochemical potentiodynamic reactivation technique (DL-EPR) for Duplex Stainless Steel”, *Corrosion Science*, v.74, pp. 250-255, Sep. 2013.
- [11] CASANOVA, C. O., ARANGÓN., F. B., *Corrosión y su control en sistemas de refrigeración*. Academia de Ciencias Exactas, físicas, químicas y naturales de Zaragoza, 1 ed., Belio Aragón Francisco Zaragoza, 1997.
- [12] SAITHALA, J.R., UBHI, H.S., ATKINSON, J.D., *et al.*, “Pitting corrosion mechanisms of lean duplex, duplex And Super Duplex Stainless Steels In Chloride Solutions”, In: *NACE International Corrosion 2011*, 11255, Houston, Texas, USA, 13-17 March, 2011.
- [13] CUMARE OCARIZ, R.A. *Resistencia a la corrosión localizada de aceros inoxidable austeníticos coloreados*, Tesis de ingeniería de materiales, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2011.
- [14] ASTM. Standard practice for preparation of metallographic specimens. ASTM E3-01. 2001.
- [15] ASTM. Standard practice for microetching Metals and Alloys. ASTM E407-99,1999.
- [16] ASTM. Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements for localized corrosion susceptibility of iron, nickel or cobalt-based alloys. ASTM G61-86, 2014.
- [17] RINCÓN ORTÍZ, M., RODRÍGUEZ, M., CARRANZA, R.M., *et al.*, “Crevice corrosion repassivation of alloy 22 in chloride solutions”, In: *NACE International Corrosion 2010*, 10237, San Antonio, Texas, USA, 14-18 March. 2010.
- [18] ZADOROZNE, N.S., RODRÍGUEZ, M.A., CARRANZA, R.M., *et al.*, “Corrosion resistance of Ni-Cr-Mo and Ni-Mo-Cr alloys in different metallurgical conditions”, In: *NACE International Corrosion 2010*, 10236, San Antonio, Texas, USA, 14-18 March, 2010.
- [19] RINCÓN ORTÍZ, M., RODRÍGUEZ, M.A., CARRANZA, R.M., *et al.*, “Efficiency of inhibitors of chloride-induced crevice corrosion of a Ni-Cr-Mo alloy”, In: *NACE International Corrosion 2011*, 11204, Houston, Texas, USA, 13-17 March, 2010.
- [20] ASTM. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM G3-74,2010.
- [21] ASTM. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM G3-8,2010.
- [22] ASTM. Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements. ASTM G106-89, 2010.
- [23] ASTM. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Practice.ASTM E112-12, 2013.
- [24] BEAVERS, J. A., THOMPSON, N. G., DURR, C. L., “Unique Interpretations of Potentiodynamic Polarization Technique”, In: *NACE International Corrosion 1998*, 98300, San Diego, California, USA, 22-27 March,1998.

ORCID

Shaney Lorena Pabon <https://orcid.org/0000-0003-4331-3341>
Ingrid Katherine Rodriguez <https://orcid.org/0000-0003-2373-2805>
Mauricio Rincón Ortiz <https://orcid.org/0000-0001-9977-1443>