

SUCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN LOCALIZADA DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 321 SOLDADO

Rafael García Hernández¹, Paulina López Eligio²,
Víctor Hugo López Morelos³

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Recibido: 20/06/2019 Aceptado: 24/09/2019 Publicado: 03/12/2019

Resumen.- En el presente trabajo se realizó el tratamiento térmico de envejecimiento del acero inoxidable austenítico 321, a una temperatura de 650°C, a 40 y 80 h de permanencia a dicha temperatura, posteriormente se caracterizó mecanográficamente tanto el material base de llegada y los tratamientos térmicos del acero a dos tiempos de permanencia a 650°C. Posteriormente se prepararon las piezas del acero tanto del material de llegada y las tratadas térmicamente para ser soldadas, por el proceso de soldadura MIG, a las cuales se les maquinó un bisel en simple "V", con un ángulo de 30° y un talón de 2 y 4 mm y la separación entre las placas fue de 2.5mm, utilizando un gas de protección de 98% de Ar + 2% O₂, con un voltaje de 23.5 voltios, 257 amperes y una velocidad de avance de 3.6mm/s, y las dimensiones de las placas fueron de 6.2x150x150 mm, utilizando un electrodo ER310 y un diámetro de 1.2mm, una vez realizadas las soldaduras se procedió a caracterizarlas tanto por medio de los ensayos electroquímicos, del material base de llegada, material base tratado térmicamente y en la zona afectada térmicamente (ZAT) de las soldaduras realizadas, y posteriormente se realizó la caracterización electroquímica mediante la técnica de reactivación potenciodinámica de doble ciclo (RPDC), en una solución de 1M H₂SO₄ + 0.5M HCl + H₂O destilada, y para determinar la temperatura crítica de picado se utilizó el trazado de las curvas potenciodinámicas en una solución de 3.5% NaCl + H₂O destilada. Los resultados obtenidos demuestran que el acero 321 es susceptible al fenómeno de sensibilización o corrosión intergranular en presencia de la solución utilizada y que el acero envejecido a medida que incrementa el tiempo de envejecimiento es más susceptible a la sensibilización. Por otra parte, al ser soldados utilizando interacción electromagnética se ha podido comprobar que la ZAT de las soldaduras tiende a disminuir el grado de sensibilización debido a la interacción electromagnética aplicada durante la soldadura.

Palabras clave: Corrosión Localizada; Acero Inoxidable, AISI 321

SUCEPTIBILITY TO THE LOCALIZED CORROSION OF THE AISI 321 AUTENTIC STAINLESS STEEL WELDED

Abstract.- In this work the heat treatment of aging of the austenitic stainless steel 321 was carried out, at a temperature of 650 ° C, at 40 and 80 h of permanence at said temperature, subsequently the base material of arrival and the heat treatments were typified typically of the two-stroke steel at 650 ° C. Subsequently, the steel parts of both the arrival material and the heat treated ones were prepared to be welded, by the MIG welding process, to which a simple "V" bevel was machined, with an angle of 30 ° and a heel of 2 and 4 mm and the separation between the plates was 2.5mm, using a 98% Ar + 2% O₂ protection gas, with a voltage of 23.5 volts, 257 amps and a feed rate of 3.6mm / s, and the dimensions of the plates were 6.2x150x150 mm, using an ER310 electrode and a diameter of 1.2mm, once the welds were made, they were characterized both by means of electrochemical tests, of the arrival base material, treated base material thermally and in the thermally affected area (ZAT) of the welds performed, and subsequently electrochemical characterization was performed using the double cycle potentiodynamic reactivation technique (DPRK), in a solution of 1M H₂SO₄ + 0.5M HCl + H₂O distilled, and to determine the critical temperature of chopped the plot of the potentiodynamic curves in a solution of 3.5% NaCl + distilled H₂O was used. The results obtained show that steel 321 is susceptible to the phenomenon of sensitization or intergranular corrosion in the presence of the solution used and that aged steel as the aging time increases is more susceptible to sensitization. On the other hand, being welded using electromagnetic interaction it has been found that the ZAT of the welding tends to decrease the degree of sensitization due to the electromagnetic interaction applied during welding.

Keywords: Localized Corrosion; Stainless Steel; AISI 321

¹ Rafael García Hernández. Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

² Paulina López Eligio. Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. pauadl@hotmail.com (Autor correspondiente)

³ Víctor Hugo Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Introducción

Los aceros inoxidable austeníticos estabilizados son dos de acuerdo a la norma AISI 321 y 347, la característica de estos aceros consiste en adicionarle elementos de aleación como el Ti y Nb, elementos que se caracterizan por la formación de carburos de TiC y NbC a elevadas temperaturas, las cuales son 1200 y 1050°C respectivamente. Esta característica es importante porque la función de estos elementos formadores de carburos consiste en minimizar la cantidad de carbono a elevadas temperaturas durante el enfriamiento, para que cuando la temperatura llegue al rango de 900 a 450° el cromo ya no tenga carbono suficiente con el cual pueda formar carburos de cromo (Cr₂₃C₆) o carburos del tipo M₇C₃, los cuales al formarse y precipitar en el acero propician un empobrecimiento de cromo alrededor de los carburos precipitados, lo que ocasiona el fenómeno de sensibilización o corrosión localizada alrededor de los carburos de cromo por presentar un decaimiento de este elemento de aleación fundamental en la protección de estos aceros en presencia de medios agresivos que contengan iones cloruros o en medios ácidos.

Así mismo, estos aceros han sido caracterizados de diferentes formas, tal es el caso de R. C. de Sousa y colaboradores [1], quienes realizaron un estudio del acero AISI 321, tomando en cuenta el efecto de la temperatura del tratamiento térmico de solubilizado en el crecimiento de grano y el grado de sensibilización, utilizando el ensayo electroquímico potenciodinámico de reactivación de doble ciclo, concluyendo que el grado de corrosión intergranular depende fuertemente de la temperatura de solubilidad, ya que a 1075°C presenta mayor grado de corrosión intergranular y a 600°C temperatura de envejecimiento, con respecto a las temperaturas de solubilizado de 800 y 900°C seguida de un envejecimiento a 600°C por un tiempo de duración de 105 h.

Por otra parte, M. B. Levan and R.Tisu [2], quienes estudiaron el efecto de las inclusiones de TiN y la martensita inducida por deformación sobre las propiedades a la corrosión del acero inoxidable austenítico AISI 321, observando que la presencia de los TiN de titanio actúan como cátodos en la matriz austenítica provocando la disolución anódica de la austenita a su alrededor, así como también, provoca la formación de la martensita durante el proceso de deformado en frío del acero para darle la forma y las propiedades mecánicas finales del acero 321, lo cual da como resultado la susceptibilidad a la corrosión por picado alrededor de los TiN y la corrosión bajo esfuerzos en dirección de la formación de la martensita, producto de la deformación en frío final del acero. Como se podrá observar el estudio de la susceptibilidad a la corrosión localizada de los aceros inoxidable austeníticos, se ha tratado por diferentes técnicas de corrosión buscando las causas principales que las originan, pero en realidad propuestas de minimizar el problema sin tener que cambiar la composición química en el desarrollo de nuevos materiales o sugiriendo algún tipo de mezcla de gases para propiciar una buena fluidez del metal líquido durante el proceso de soldadura, sin tener en cuenta que el problema fundamental radica en la zona afectada térmicamente debido al ciclo térmico del proceso de soldadura utilizado durante la fabricación del producto correspondiente, y que pocas veces el problema se localiza en el cordón de soldadura [3-5]. Así mismo siempre que se oferta un nuevo material la mayoría de los estudios se centran en la caracterización de dicho material en propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión del nuevo material, para determinar que dicho material es mejor que sus antecesores y justificar el elevado costo. Esto corresponde a la empresa fabricante del nuevo material incluido a la vez el grado de soldabilidad y los posibles problemas que se pueden presentar en la fabricación de diferentes productos a utilizarse en las diferentes industrias.

El objetivo fundamental del presente trabajo de investigación es determinar bajo qué condiciones de tratamiento térmico de envejecimiento y tiempo de permanencia el acero AISI 321, puede presentar el fenómeno de sensibilización y como minimizarlo sin cambiar su composición química, usando un método o técnica simple de interacción electromagnética de baja intensidad que no afecte el proceso de soldadura utilizado durante la unión del producto correspondiente.

Metodología: materiales y métodos

En el presente trabajo se utilizó un acero inoxidable austenítico AISI 321 en placa de espesor de 6.2 mm cuya composición química se ilustra en la tabla I, el cual fue soldado utilizando un electrodo ER310, con un diámetro de 1.2 mm y su composición química también se ilustra en la tabla I. El proceso de soldadura utilizado fue el proceso con gas de protección y arco metálico consumible GMAW (MIG) con una mezcla de gas de protección de 98% de Ar y 2% de O₂, con un flujo de 24 L/min.

La soldadura se efectuó con interacción electromagnética de baja intensidad y tratamiento térmico de envejecimiento del acero previo a la soldadura.

Tabla 1. Composición química del acero inoxidable 321y el electrodo ER310(% en peso)

Material	C	Mn	Si	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti	P	S
AISI 321	0.01	1.5	0.4	0.4	17.1	9.0	0.34	0.7	0.03	0.001
ER310	0.04	2.3	0.5	-	26.5	21.0	-	-	-	-

Para la preparación del acero se cortaron 10 pares de placas de las dimensiones siguientes: 75x150x6.2 mm, para aplicación de la soldadura, y de las cuales 8 pares cuentan con un tratamiento térmico de envejecimiento en un horno tipo Nabertherm modelo L08/14 con una temperatura de operación máxima de 1400°C en donde se sometieron a las condiciones siguientes:

1. Tratamiento térmico de solubilizado. Las probetas fueron calentadas a una temperatura de 1050°C con una permanencia de 30 minutos y un enfriamiento rápido en agua a temperatura ambiente.
2. Después del tratamiento térmico de solubilizado se les practicó el tratamiento térmico de envejecimiento, sometiéndose las probetas a una temperatura de 650°C de calentamiento, con una permanencia de 40 y 80 horas y un enfriamiento rápido usando agua a temperatura ambiente como medio enfriamiento. En la figura 1, se ilustra el ciclo térmico de este tratamiento.

Se obtuvieron dos condiciones de soldadura por el proceso GMAW:

- Soldadura convencional. Es decir sin interacción electromagnética, las placas soldadas por esta condición fueron 2 pares con tratamiento térmico de 40 h, 2 pares de 80 h, y 2 pares de metal base. Dentro de cada condición para cada par cuenta con un tipo de junta en simple "V" con talón de 2 y 4 mm respectivamente.
- Soldadura con interacción electromagnética utilizando las siguientes intensidades del campo magnético aplicado en forma externa (1 y 2 mT). Se soldaron 2 pares de placas con tratamiento térmico de envejecimiento previo de 40 h y cada par con un tipo de junta de 2 y 4 mm de talón, de la misma manera se soldaron 2 pares de placas con tratamiento térmico de envejecimiento de 80 h.

El proceso de soldadura es semiautomático, y se utilizó una fuente de poder marca Miller modelo platino con una eficiencia del 60%, una corriente máxima de 650 Amperios, con un potencial a circuito abierto de 60 V y un rango de potencial de trabajo de 0-60 V. La preparación de las placas fue en simple "V" con talón de 2 y 4 mm, el espesor de las placas fue de 6.2 mm, tal como se muestra en las figuras 2 y 3. Para el proceso de soldadura con interacción electromagnética se aplicó un campo magnético de 1mT para dos pares de placas con tratamiento térmico de 40 horas, y 2 mT fueron aplicados a dos pares de placas con tratamiento térmico de 80 horas, el arreglo del campo magnético fue perpendicular al arco eléctrico como se ilustra en la figura 4, el equipo utilizado fue el mencionado anteriormente en la soldadura convencional. El tipo de preparación de junta que se utilizó para cada tratamiento térmico fue en simple "V" con talón de 2 y 4 mm, tal como se puede apreciar en las figuras 2 y 3, y los parámetros de soldadura se muestran en la tabla II.

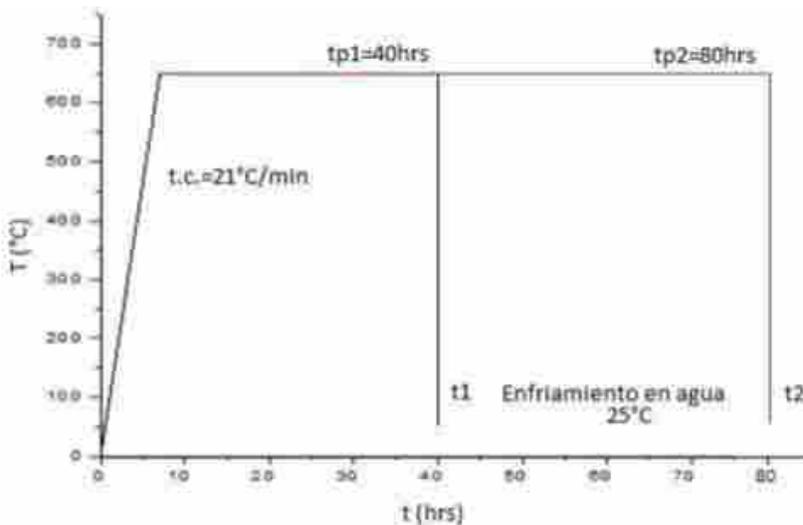


Figura 1. Ilustra el tratamiento térmico de envejecimiento a) t1 (40 h) y b) t2 (80h).

Una vez realizadas las soldaduras se procedió a realizar los cortes transversales a la soldadura para su caracterización metalográfica y para la caracterización electroquímica, se enfocó en la ZAT para la obtención de las probetas soldadas, el corte se realizó paralelo a la línea de fusión a 3 mm de esta, en ambos lados del cordón de soldadura, debido a que la cara de la probeta que corresponde a este corte (ZAT) figura 5, es la que posteriormente se sometió a la caracterización electroquímica, cabe mencionar que se obtuvieron dos probetas de cada condición de soldadura para obtener una buena reproducibilidad, en cuanto al metal base, y el metal base tratado térmicamente con 40 y 80 horas de permanencia, las dimensiones de las probeta fueron de 1x1 cm. En la tabla III se presenta la designación y las características de las condiciones a analizar en la figura 5.

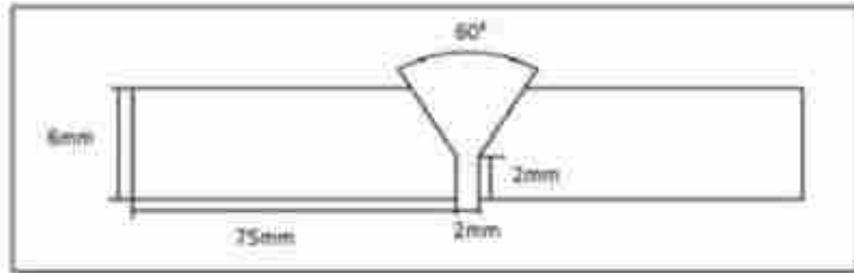


Figura 2. Representación de la forma de la preparación de la junta en V simple con talón de 2 mm.

La caracterización se realizó por microscopía óptica (MO) y por microscopía electrónica de barrido (MEB), después de realizarse un desbaste estándar a cada probeta con lijas de carburo de silicio de diferentes granulometrías: 180, 320, 400, 600, 1000 y 1500; posteriormente se realizó el pulido de las probetas con pasta de diamante de 6 y 3 μm para terminar con un pulido de 1 μm y obtener un acabado a espejo, enseguida se llevó a cabo un ataque químico por inmersión en una solución de 8.43 mL de HCl, 2.8 mL de HNO₃ y 3.75 mL de etanol por 2 minutos. Posterior al ataque para revelar la microestructura se utilizó el microscopio óptico marca NIKON y el microscopio electrónico de barrido modelo Jeol 6400.

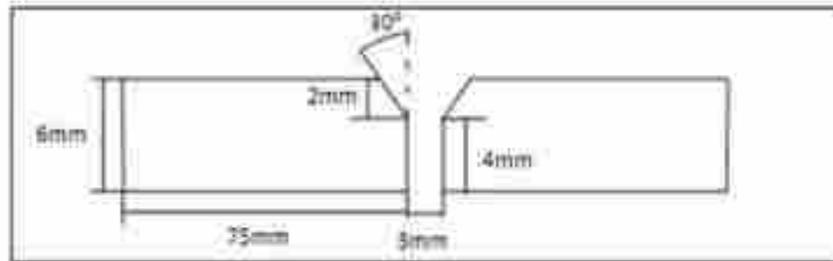


Figura 3. Representación de la forma de la preparación de la junta en simple "V" con talón de junta de 4mm.

En la caracterización electroquímica fue necesario encapsular cada probeta en resina epóxica, como se ilustra en la figura 6, se utilizó una mezcla de resina EPOXI CURE y del endurecedor EPOXI HARDER, con una relación de 5:1 y se dejó secar por un tiempo de seis horas a temperatura ambiente. Para aplicar la técnica, las probetas fueron lijadas con papel de carburo de silicio de granulometría 400, 800, 1000 y 1500 antes de cada prueba.

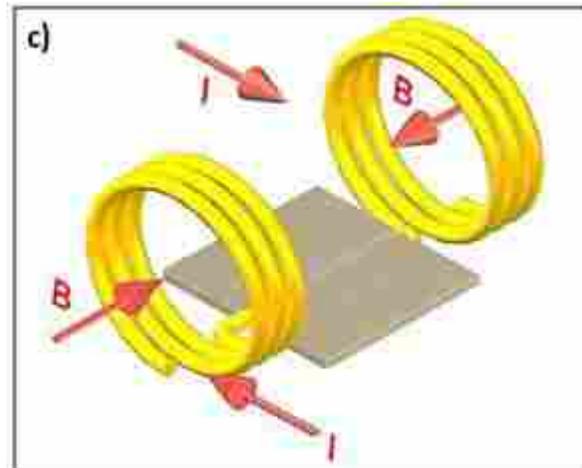


Figura 4. Dirección perpendicular del campo magnético aplicado durante el proceso de soldadura.

Tabla 3. Parámetros de soldadura utilizados

Condición	Campo Magnético (mT)	Vel. de Aliment. (mm/s)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Velocidad de avance (mm/s)	Talón de la unión (mm)	Calor de Aporte (Kj/mm)
MB	0	52	23.4	255	3.6	2	1.06
MB	0	52	23.4	257	3.6	4	1.07
TT 40 h	0	52	23.4	262	3.6	2	1.02
TT 40 h	0	52	23.4	267	3.6	4	1.04
TT 80 h	0	52	23.4	255	3.6	2	1.00
TT 80 h	0	52	23.4	262	3.6	4	1.02
TT 40 h CM	1	52	23.9	256	3.6	2	1.06
TT 40 h CM	1	52	23.9	259	3.6	4	1.07
TT 80 h CM	2	52	23.9	261	3.6	2	1.08
TT 80 h CM	2	52	23.9	269	3.6	4	1.07

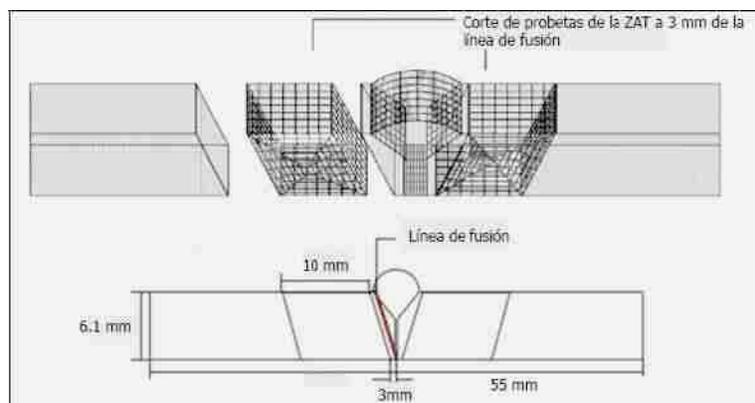


Figura 5. Representación del corte de probetas de la ZAT a 3 mm de la línea de fusión de los cordones de soldadura.

Se realizaron tres técnicas electroquímicas: la primera REPDC con el fin de determinar el grado de sensibilización. Inicialmente se realizó un seguimiento del potencial vs tiempo durante 5 minutos, antes de cada prueba con el fin de estabilizar el E_{corr} y obtener una buena reproducibilidad. Después se comenzó con la prueba de REPDC, la técnica inicia con un barrido catódico hasta que llega al potencial de corrosión después de pasar este potencial continua la curva anódica hasta formar una capa pasiva posteriormente comienza la corriente de reactivación en donde se corroe

el material hasta llegar al potencial de corrosión. Las pruebas se realizaron con una velocidad de 1 mV/s, desde un sobrepotencial catódico de $\eta_c = -200$ mV vs potencial de circuito abierto (OCP), hasta un sobrepotencial anódico de $\eta_a = 600$ mV vs OCP en una solución de 0.5M HCl + 1M H₂SO₄.



Figura 6. Probeta encapsulada con resina epóxica.

Con los datos arrojados por las curvas de doble ciclo se obtuvo el grado de sensibilización mediante la relación I_r/I_a , donde I_r es la máxima densidad de corriente de reactivación y " I_a " la máxima densidad de corriente de activación. Para la evaluación del límite entre un material sensibilizado y un material no sensibilizado es $I_r/I_a > 0.001$ [6]. Las pruebas fueron realizadas tres veces cada una para verificar la reproducibilidad de los resultados.

La técnica se llevó a cabo en una celda electroquímica de vidrio con tres electrodos; electrodo de trabajo (probeta), electrodo de referencia de calomel saturado y un electrodo auxiliar de grafito mostrados en la figura 7.

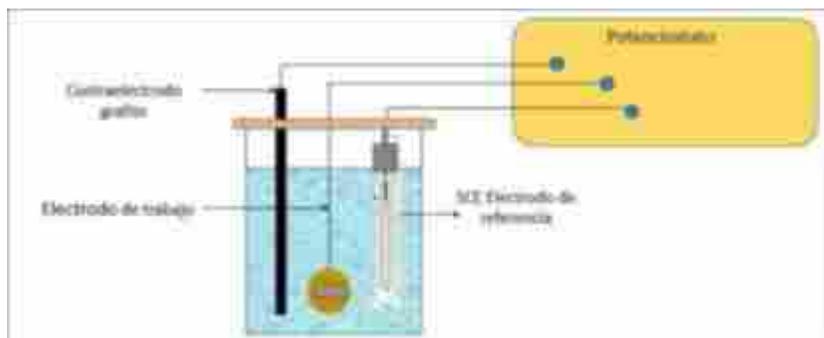


Figura 7. Esquema de la celda electroquímica para la técnica DL-EPR y EPR.

Se utilizó un potenciostato marca SOLARTRON modelo SI1280B, y para el análisis de datos se ocupó el software CorrView2. Después de cada prueba se observó y analizó por microscopia electrónica de barrido las probetas ensayadas, en un equipo marca JEOL JSM6400.

La segunda técnica fue la de resistencia a la polarización REP la cual se utilizó para determinar el potencial de picado y el rango de pasivación de cada condición. En esta técnica también se realizó un seguimiento de potencial vs tiempo, antes de cada prueba con el fin de estabilizar el E_{corr} . Las pruebas se corrieron con un sobrepotencial catódico $\eta_c = -500$ mV vs PCA (potencial de circuito abierto) y un sobrepotencial anódico $\eta_a = 800$ mV vs PCA en una solución con 3.5M de NaCl a una velocidad de 1mV/s. El arreglo de la celda fue similar al de la técnica DL-EPR.

La tercera técnica utilizada fue la de polarización potenciostática la cual determina la temperatura crítica de picado, se usa un potencial del rango de pasivación y a determinado tiempo-temperatura se ocasiona la picadura, se configuró con un incremento gradual de temperatura a una velocidad constante de 1°C/min en una solución salina con 3.5M de NaCl para analizar la resistencia a la corrosión por picadura. La prueba se corrió con un $\eta_a = 50$ mV vs ECS a una velocidad de calentamiento de 1°C/min, iniciando con una temperatura de 12°C hasta alcanzar un valor igual o mayor a 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y se mantuvo en esos valores durante 60 s o más. Las condiciones se siguieron tomando en cuenta la norma ASTM-G150-99. Se implementó el arreglo de la celda electroquímica dentro de un baño maría y para controlar

la velocidad de calentamiento se utilizó una placa calentadora la cual incluye un agitador magnético para distribuir uniformemente la temperatura como se ilustra en la figura 8.

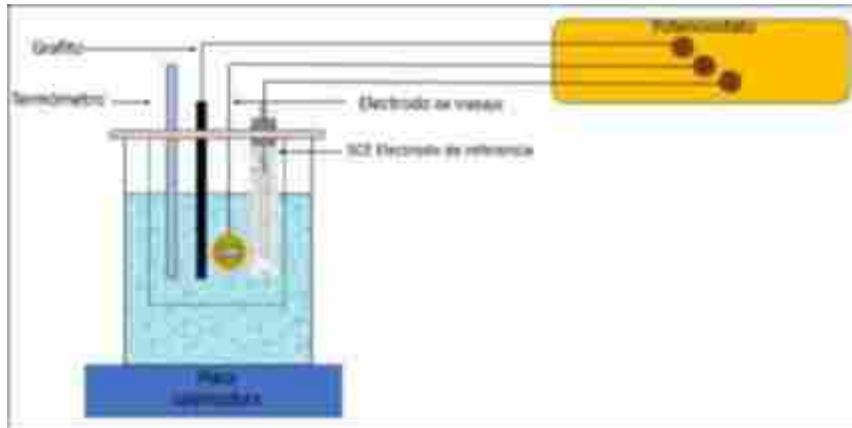


Figura 8. - Arreglo de la celda electroquímica para la técnica TCP

Discusión y contexto

En la figura 9, se muestra la microestructura del acero inoxidable austenítico AISI 321 tal como se recibió del fabricante, donde se puede observar la única fase presente que es la austenita, así como la presencia de maclas mC, ferrita delta δ y algún nitruro de titanio TiN, en la probeta tratada térmicamente y 80 h de permanencia.

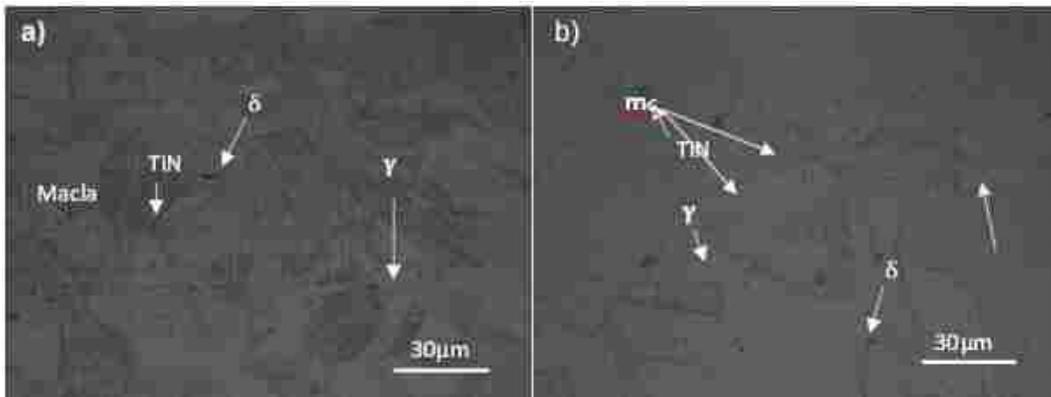


Figura 9. muestra la microestructura del acero inoxidable austenítico AISI 321, a) metal base y b) metal Base tratado térmicamente y 80 h de permanencia.

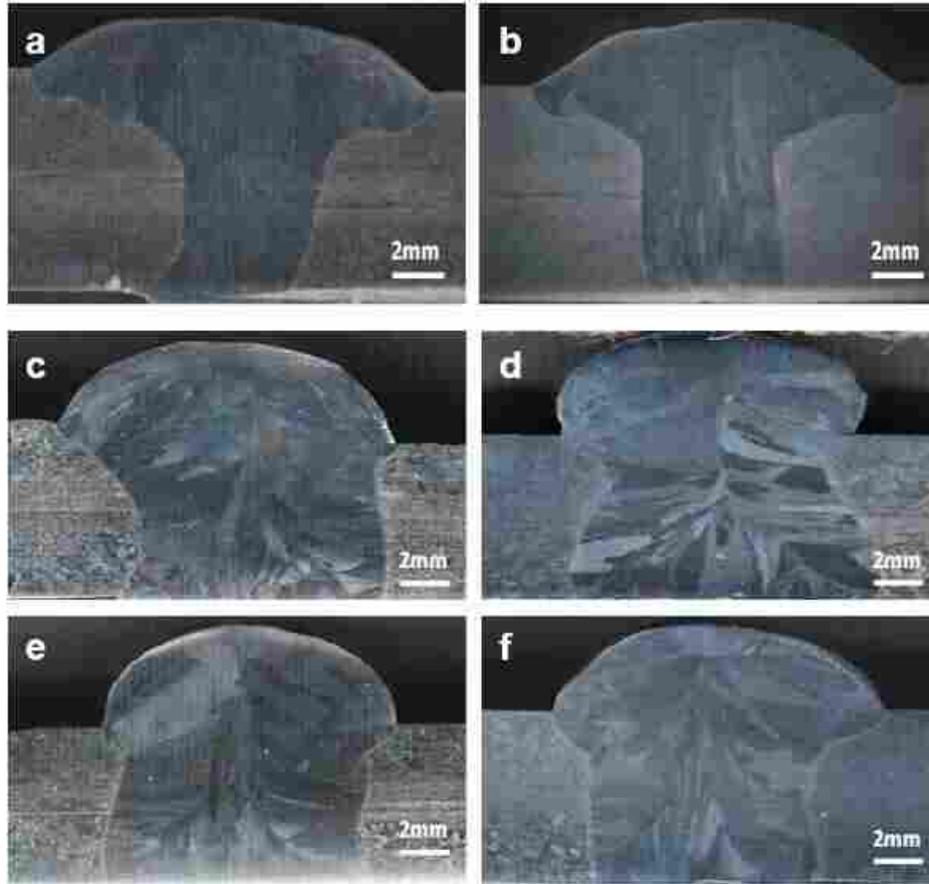


Figura 10. Ilustra los perfiles de soldadura para las tres condiciones diferentes a) soldadura normal 2 mm de talón, b) soldadura normal 4 mm de talón, c) soldadura con 1 mT, y 2 mm de talón y 40 h de permanencia a 650°C, d) soldadura con 2mT, y con 4 mm de talón y 40 h de permanencia a 650°C, e) soldadura con 2mT, 2 mm de talón y 80 h de permanencia a 650°C y f) soldadura con 2mT y 4 mm de talón y 80 h de permanencia a 650°C.

Por otra parte, la figura 10, muestra los perfiles de las diferentes soldaduras obtenidas en el presente trabajo de investigación donde las figuras 10 a y b, corresponden a las soldaduras del material base con 2 y 4 mm de talo del diseño de la unión respectiva mente, donde se puede apreciar la diferencia de una mejor uniformidad en la figura 10b correspondiente al diseño de unión de 4 mm de talón, con respecto al diseño de unión para un talón de 2 mm. Así mismo en los perfiles correspondientes para las soldadura con tratamiento previo de envejecimiento a 650°C y 40 h con 2 y 4 mm de talo, por otra parte en las figura 10 c y d, se observa un mayor ancho y sobre monta en la figura 10 d correspondiente al diseño con 4 mm de talón respecto de la figura 10 c correspondiente al diseño de 2 mm de taló, de forma similar para los perfiles de las soldaduras correspondientes al tratamiento térmico con 80h de permanencia tienen un comportamiento similar en función del talón de 2 y 4 mm, lo cual se atribuye a que como estuvieron sujetas a tratamiento térmico a la temperatura de 650°C, lo que hace que sea más fácil fundir el material respecto a las soldaduras correspondientes al material base sin el tratamiento térmico antes de la soldadura. Por otra parte, en las macrografías de las soldaduras con tratamiento térmico previo a la soldadura se puede observar la macro estructura de los granos columnares, los cuales parten del material base hacia el centro del cordón de soldadura, como se observa en las figuras 10 c, d, e y f.

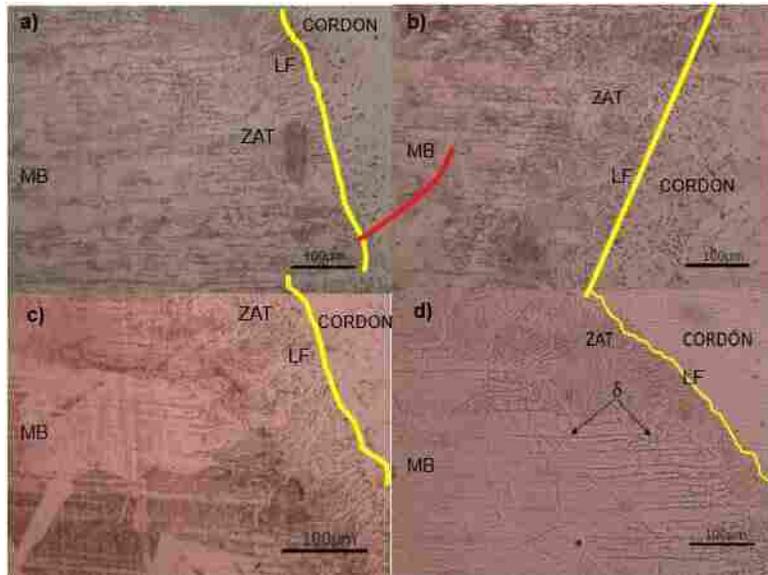


Figura 11. Ilustra las interfaces de los cordones de soldadura, a) metal base como se recibió y 2 mm de talón, b) metal base y 4 mm de talón, metal tratado térmicamente con 80 h de permanencia previo a la soldadura y 2 mm de talón y 2 mT y d) metal tratado térmicamente con 80 h de permanencia previo a la soldadura y 4 mm de talón y 2 mT.

De forma similar la figura 11, muestra la interfase de las soldaduras del material base como se recibió en sus dos diseños de unión con 2 y 4 mm de talón respectivamente, y las dos soldadura tratadas térmicamente a 650°C previamente y un tiempo de permanencia a 80 h, también en sus dos diseños de unión con 2 y 4 mm respectivamente y campo magnético de 2 mT, en donde se puede apreciar que la microestructura de la zona afectada térmicamente va cambiando a medida que va incrementando el tiempo de permanencia del tratamiento y la aplicación de la interacción electromagnética durante la soldadura, pero lo más importante es la precipitación de los carburos de cromo que no se pueden apreciar fácilmente con estos aumentos, pero que el ensayo electroquímico mediante la técnica del ensayo potencio dinámico si se podrá observar la gran diferencia que se presenta en cuanto al material base tal como se recibió y el tratado térmicamente, así como al ser soldados con y sin interacción electromagnética de baja intensidad.

En la figura 12, se muestran las curvas potencio-dinámicas de doble ciclo, las cuales fueron trazadas en un potencioestado el cual cuenta con un software donde se programa a partir del potencial catódico de -0.6 voltios y hasta el potencial de pasivación anódico de 0.2 voltios se realizó el barrido de un mV/s el trazado de las curvas de doble ciclo y mediante la relación $I_r/I_a = GDS$, se determina el grado de sensibilidad a la corrosión intergranular si el factor es mayor a 0.02, de donde se puede deducir que el material base tiene buen grado de resistencia a este tipo de corrosión intergranular, ya que tiene un factor de GDS de 0.000989, en el medio especificado en el desarrollo experimental, mientras que ya tratado térmicamente el grado de susceptibilidad es grande con valores de 0.0633 y 0.081 respectivamente para 40 y 80 h de permanencia a la temperatura de 650°C.

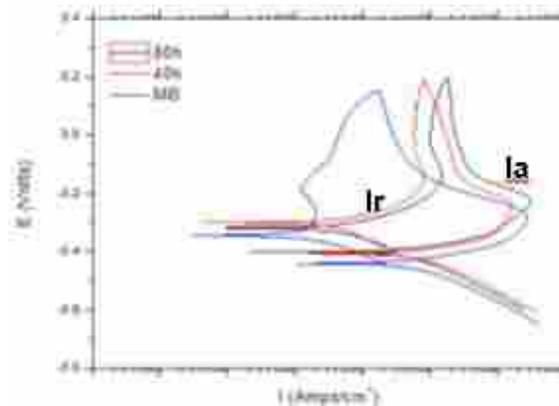


Figura 12. Muestra las curvas potencio-dinámicas de doble ciclo del material base y del tratamiento térmico con tiempos de permanencia de 40 y 80 h, a 650°C.

Por otra parte la figura 13 a, muestra el concentrado del trazado de las curvas potenco-dinámicas de doble ciclo desde el material base tal como se recibió hasta las soldaduras sin interacción electromagnética y con interacción electromagnética de baja intensidad, en sus dos alternativas de diseño de la unión con talón de 2 y 4 mm respectivamente, y la figura 13b muestra el valor de la relación de I_r/I_a para cada caso, observándose el valor correspondiente de dicha relación, donde se puede apreciar que el material base tal como se recibió tiene el mejor comportamiento respecto a todas las condiciones, lo que quiere decir que es el que tiene la mayor resistencia a la corrosión, así como también la ZAT del metal base soldado sin campo magnético con talón de 2 mm, la cual se equipara con la ZAT de la soldadura del material soldado con campo magnético de 2mT, tratado térmicamente a 650°C y un tiempo de permanencia a 80h y talón de 4 mm, seguido del diseño con talón de 2mm, respectivamente. Por otra parte, el metal base tratado térmicamente a 650°C y 80 h de permanencia es el que presenta la susceptibilidad a la corrosión intergranular mayor, seguido de la ZAT con 40 y 80 h de permanencia previo a la soldadura sin campo magnético con talón de 2 y 4 mm, respectivamente.

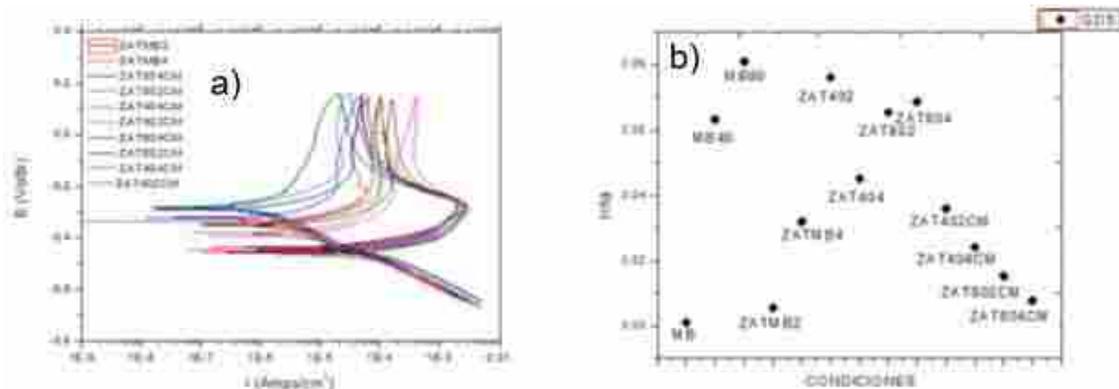


Figura 13. Muestra las curvas potenco-dinámicas de todas las condiciones usadas en este proyecto de investigación a), b) ilustra los valores de las relaciones I_r/I_a de cada una de las condiciones correspondientes.

La figura 14 muestra la superficie del acero 321 tratado térmicamente a 650°C previo a la soldadura y 80 h de permanencia y soldado sin campo magnético figura 14a, donde se observa la gran afectación de la corrosión localizada, mientras que la figura 14b, muestra la superficie del mismo acero con el mismo tratamiento y el mismo tiempo de permanencia, pero soldado aplicándole 2mT durante la soldadura, pudiéndose observar que la susceptibilidad a la corrosión localizada disminuye bastante. Esto es debido al efecto que causa la interacción electromagnética de baja intensidad, en restablecer las zonas empobrecidas de cromo alrededor de la precipitación de los carburos de cromo debido al tratamiento térmico de envejecimiento y al ciclo térmico de soldadura. de manera similar la figura 15 ilustra el espectrograma del carburo señalado con el numero 1 en la figura. 14a, comprobando que es un carburo de $Cr_{23}C_6$ la presencia del cromo y carbono en el análisis químico realizado en forma puntual corresponde a dicho carburo.

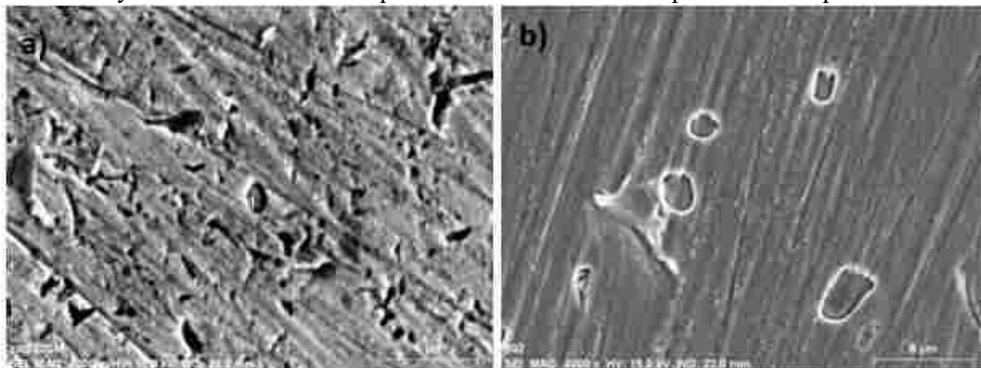


Figura 14. Ilustra la superficie del acero 321 tratado térmicamente a 650°C antes de la soldadura, y tiempo de permanencia a 80h a) soldado sin campo magnético y b) soldado con 2mT.

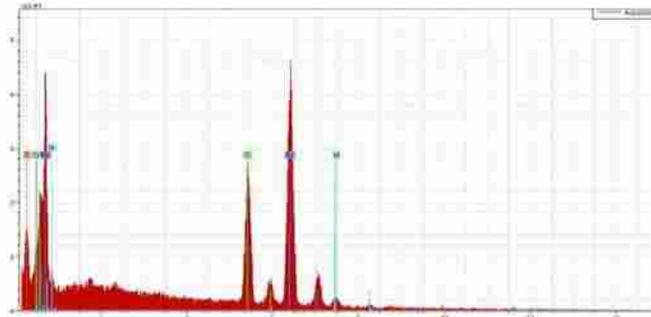


Figura 15. Muestra el espectrograma del carburo de cromo de la figura 14a.

Por otra parte los resultados obtenidos de la evaluación de la resistencia a la corrosión por picaduras se ilustra en las figuras 16 a y b, correspondientes a la técnica de resistencia electroquímica a la polarización (REP) en donde podemos ver las curvas potenciodinámica del MB de llegada y el tratado térmicamente a 650°C y 40 y 80 h de permanencia figura 16a, donde se puede observar claramente que el MB de llegada tiene un potencial de corrosión más negativo que los tratados térmicamente a 40 y 80 h de permanencia a la temperatura de tratamiento térmico de envejecimiento, mientras que la figura 16b, muestra este tipo de comportamiento de todas las condiciones del acero soldado en las ZAT con y sin tratamiento térmico, así como con y sin la aplicación de campo magnético durante la soldadura.

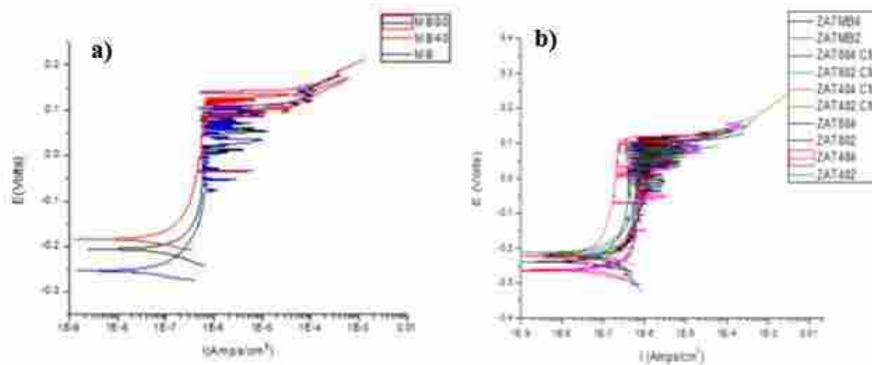


Figura 16. Muestra las curvas de polarización a) del MB TT con 40 y 80 h de permanencia y b) de todas las ZAT de las uniones realizadas en este trabajo realizado.

De forma similar se puede observar que lo ya reportado por M.B.Levan and R.Tisu [1], quienes han reportado que el nitruro de titanio actúa como un cerámico creando un par galvánico entre el y el material que lo rodea propiciando la corrosión por picadura, como se ilustra en la figura 17a, y la figura 17b, muestra el microanálisis químico del nitruro. En cuanto a los valores de la temperatura crítica de picado, la figura 18, ilustra que el material base y las ZAT con 40 y 80 h de permanencia a 650°C en el tratamiento previo a la soldadura y con campo magnético aplicado durante la soldadura son las probetas que tienen mayor temperatura crítica de picado.

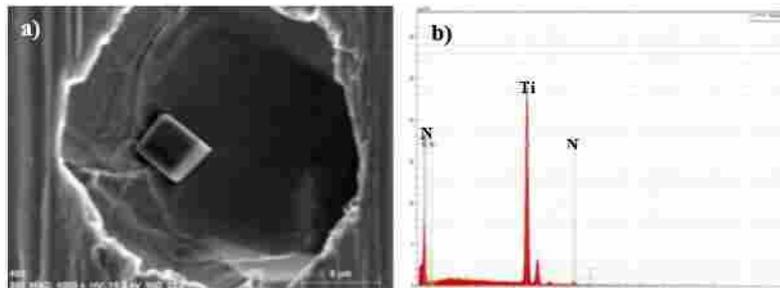


Figura 17. Muestra la picadura ocasionada por el TiN a) y b) el espectrograma de la composición química

Mientras que las probetas que menor temperatura crítica de picado son: el material base tratado térmicamente a 40 y 80 h, así como también las ZAT de estos mismos materiales sin aplicación de campo magnético, lo que significa que la aplicación del campo magnético de baja intensidad durante la soldadura, también ayuda a que la capa de óxido formada durante la pasividad sea más resistente y soporte una mayor temperatura crítica de picado o rompimiento en los ensayos potencio-dinámicos a temperatura.

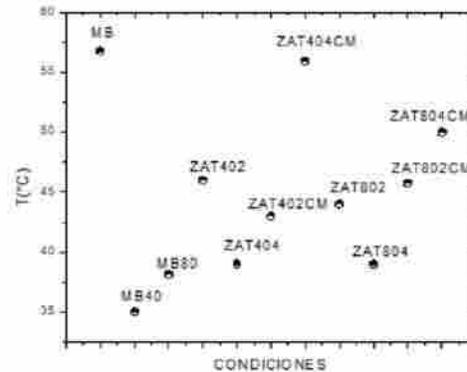


Figura 18. ilustra los valores de la temperatura crítica de picado de las diez condiciones realizadas en este proyecto.

Conclusiones

Una vez analizados y discutidos los resultados del presente trabajo podemos concluir lo siguiente: La aplicación de la interacción electromagnética de baja intensidad aplicada durante la soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 321, da como resultado una disminución importante en la susceptibilidad a la corrosión intergranular en la ZAT del acero sensibilizado por medio del restablecimiento de las zonas empobrecidas alrededor de los carburos precipitados por el tratamiento térmico de envejecimiento a la temperatura de 650°C, con tiempos de duración de 40 y 80 h de permanencia a dicha temperatura. De forma similar favorece el incremento de la temperatura crítica de picado debido al fortalecimiento de la película de óxido formada durante el estado pasivo del acero en la solución de 3.5 Molar de NaCl, disuelto en agua destilada, tal como se muestran los valores en la figura 18.

Bibliografía

- R. C. De Sousa, J. C. Cardoso Filho, A. A. Tanaka, A. C. S. De Oliveira, W. E. I. Ferreira. Effects of solution heat treatment on grain growth and degree of sensitization of AISI 321 austenitic stainless steel, *J Mater Sci* 41 (2006) 2381–2386.
- M.B.Levan and R.Tisu, The effect of TiN inclusions and deformation-induced martensite on the corrosion properties of AISI 321 stainless steel, *Engineering Failure Analysis* 33 (2013) 430–438.
- M. J. G. Silva, A. A. Souza, A. V. C. Sobral, P. de Lima-Neto, Microstructural and electrochemical characterization of the low temperature sensitization of AISI 321 stainless steel tube used in petroleum refining plants, *Journal of Materials Science* 38 (2003) 1007 – 1011.
- A. S. Lima, A. M. Nascimento, H. F. G. Abreu, P. de Lima-Neto, Sensitization evaluation of the austenitic stainless steel AISI 304L, 316L, 321 and 347.
- Y.Y. Chen, Y.M. Liou, H.C. Shih, Stress corrosion cracking of type 321 stainless steels in simulated petrochemical process environments containing hydrogen sulfide and chloride, *Materials Science and Engineering A* 407 (2005) 114–126.
- E. A. Martínez, Las técnicas electroquímicas aplicadas al estudio de la corrosión en la industria nuclear [en línea]. Disponible en: <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Sensibilizacion.pdf>. 2002.