

USO DE LA INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS, PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN Y MECÁNICAS EN LA ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE

R. García⁽¹⁾, V. H. López⁽¹⁾, F. F. Curiel⁽²⁾ y S. Estrella⁽³⁾

(1) Investigadores del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, de la Universidad Michoacana, MÉXICO

(2) Estudiante de doctorado, en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.

(3) Estudiante de maestría, en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas

E-mail (autor de contacto): rgarcia@umich.mx.

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el uso de la interacción electromagnética durante la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, con la cual se ha mejorado la resistencia a la corrosión intergranular, así como incrementar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable austeníticos, en la zona afectada térmicamente (ZAT), mediante el proceso de soldadura MIG. La interacción electromagnética se ha definido como la interacción del campo magnético generado por la corriente de soldadura y el campo magnético aplicado axialmente a la columna del arco eléctrico, generado por una bobina externa. Para evaluar el mejoramiento de la resistencia a la corrosión se utilizaron dos técnicas electroquímicas, la primera fue el trazado de las curvas potenciodinámicas de polarización en agua de mar sintética y la segunda fue la medición de las curvas potenciodinámicas de doble ciclo en la solución de (0.5M H₂SO₄ + 0.01 KSCN), y los resultados obtenidos en la zona afectada térmicamente (ZAT) en una soldadura realizada en el acero inoxidable austenítico 304, con un espesor de 6 mm, demuestran que una interacción electromagnética de baja intensidad del orden de las militeslas (mT), aplicada durante la soldadura, propician un mejoramiento tanto en la microdureza como en su resistencia a la corrosión, comparada con la soldadura realizada sin la aplicación de la interacción electromagnética. Esto es atribuido a una homogenización del porcentaje de carbono en la matriz y límites de los granos debido a la vibración ocasionada por la resultante de la interacción electromagnética.

Tópico 2: Materiales Metálicos

Palabras clave: Soldadura MIG, Interacción Electromagnética, Corrosión intergranular, Aceros inoxidable austeníticos.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable austeníticos, a pesar de tener excelente ductilidad y una resistencia a la corrosión general, son particularmente susceptibles a la corrosión localizada, como son: corrosión en rendijas, corrosión por picado, corrosión intergranular y corrosión bajo esfuerzos. Las cuales se presentan cuando los aceros están en contacto con medios que contengan iones cloruros. La corrosión intergranular se presenta en diferentes industrias químicas, donde se maneja el ácido nítrico, ácido sulfúrico entre otros. El fenómeno de la sensitización es la principal causa de la corrosión intergranular de los aceros inoxidable austeníticos, soldados por cualquier proceso de soldadura que implique fusión y solidificación en la zona afectada térmicamente (ZAT). Lo cual se debe a la precipitación del carburo de cromo (Cr₂₃C₆) en los límites de grano. Esta precipitación del carburo de cromo ocasiona una disminución de cromo alrededor del carburo, lo que se ha denominado sensitización y

genera una zona anódica, respecto a la matriz del grano, siendo preferencialmente atacada en medios corrosivos [1]. Este fenómeno de sensitización ha sido y sigue siendo el problema fundamental de los aceros inoxidable austeníticos, cuando son unidos por soldadura, de tal forma que siempre se ha buscado una solución al respecto, tal como, últimamente R. Kaul et al, han propuesto el método de pre-fusión parcial superficial por medio de la soldadura Laser, lateralmente al cordón de soldadura, como una alternativa de incrementar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable austeníticos soldados, concluyendo que: las zonas adyacentes al cordón de soldadura previamente fundidas superficialmente, por medio del proceso de soldadura Laser y posteriormente unidas por el proceso de soldadura GTAW, ocasiona en la zona parcialmente fundida una transformación de fase en estado sólido de una estructura de fusión y solidificación, a una transformación en estado sólido de límites de grano y sub-granos, con lo que se incrementa la resistencia a la corrosión intergranular y disminuye el fenómeno de sensitización superficialmente[2].

Por otra parte H. Kokawa et al, proponen el método de ingeniería de límite de grano, para mejorar la resistencia a la corrosión intergranular después de la soldadura en la zona afectada térmicamente, el cual consiste en darle un tratamiento termomecánico al acero inoxidable austenítico 304, mediante tratamientos de solubilidad y enfriamiento en agua, seguidos de una deformación en frío que va de 0 hasta el 60 % de deformación antes de la soldadura, con lo cual concluyen que: los límites de grano coincidentes presentan una mejor resistencia a la corrosión intergranular en la ZAT, después de la soldadura[3].

El efecto térmico es el causante de la sensitización de los aceros inoxidable austeníticos y por consiguiente de la corrosión intercrystalina, debido a la precipitación de una mezcla de carburos ricos en cromo en los límites de grano. A pesar de los diferentes puntos de vista sobre el mecanismo de la corrosión intercrystalina, es posible probar el decaimiento del contenido de cromo entre el carburo de cromo y el sitio de la corrosión intergranular, alrededor del mismo, Durante la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, particularmente con alto contenido de carbono, la zona afectada térmicamente del cordón de soldadura se sensitiza, con lo cual afecta su resistencia a la corrosión intergranular (deteriorándola) durante el servicio en medios que contengan iones cloruros o en presencia de ácido nítrico entre otros [4].

Existen trabajos reportados en donde se ha utilizado la agitación electromagnética para refinar la microestructura del cordón de soldadura, sin haber reportado el beneficio que produce la interacción electromagnética en la zona afectada térmicamente, en lo referente al mejoramiento de las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión en la ZAT de los aceros inoxidable austenítico [5- 8]. Esto ha sido debido a las altas intensidades de campo magnético utilizadas.

El objetivo principal del presente trabajo, es mostrar los beneficios de la interacción electromagnética de baja intensidad en la ZAT de los aceros inoxidable austeníticos, en lo referente a incremento de propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión generalizada y localizada en dos medios agresivos, donde estos aceros tienen problemas en la ZAT.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este estudio experimental se realizó en un acero inoxidable austenítico 304, tipo comercial con un espesor de 6mm cuya composición química se muestra en la tabla 1, al igual que la composición química del electrodo utilizado, el cual fue un ER309 con un diámetro de 1.2mm, el proceso de soldadura utilizado fue el proceso de soldadura MIG, con una mezcla de gas de protección de 98% de Ar + 2% de O₂, la fuente utilizada fue una fuente de potencial constante con una capacidad de 350 amperios, un potencial a circuito abierto de 40 voltios y un rango de potencial de trabajo de 0-40 voltios. Los cordones de soldadura se realizaron en una sola pasada y las variables operativas utilizadas se ilustran en la tabla 2, se utilizó una preparación en simple "V", la cual se muestra en la figura 1, se realizaron tres cordones de soldadura, sin la aplicación de campo magnético externo y con la aplicación de campo magnético externo con 3.2 y 14.7 mT, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 1. Composición química del material base y electrodo utilizado

Material	C(% w)	Si(% w)	Mn(% w)	S(% w)	P(% w)	Cr(% w)	Ni(% w)	Cu(5w)	Mo(% w)
304	0.049	0.391	1.358	0.007	0.023	18.54	8.08	-	-
ER309	0.03	0.95	1.5	0.03	0.04	23.3	12.5	0.75	0.75

Tabla2. Variables operativas de soldadura

Cordones	A (amperios)	V Voltios	v(avance) (mm/s)	G Protección (L/min)	v (alimentación) (Mm/s)	Separación Antorcha (mm)	Campo Magnético (mT)
1	190	27	3.6	30	180	10	0
2	190	27	3.6	30	180	10	3.2
3	190	27	3.6	30	180	10	14.7

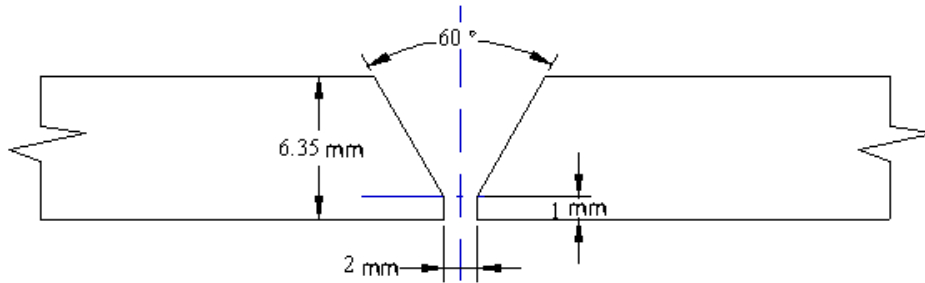


Fig.1.- Preparación de la unión utilizada en la realización de los cordones de soldadura

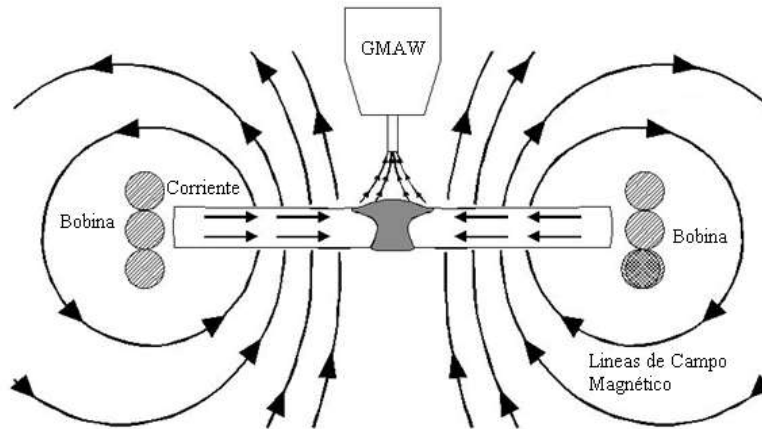


Fig.2.- Ilustra la forma de aplicar el campo magnético externo durante la soldadura y la interacción con el campo magnético generado por la corriente de soldadura.

La figura 2, ilustra la forma de interacción de los dos campos magnéticos en la soldadura, el generado por la corriente de soldadura y el generado por la bobina inductora en forma externa.

Una vez realizados los cordones de soldadura se caracterizaron mediante ensayos mecánicos de micridureza, utilizando un microdurometro Vickers, con una carga de 100 grs., así como de tensión e impacto, utilizando una maquina de ensayos universal, con capacidad de 10 toneladas y un equipo de impacto tipo Charpy respectivamente. La caracterización electroquímica se realizó mediante el trazado de curvas de polarización potenciodinámicas en agua de mar sintética, cuya composición se ilustra en la tabla 3, así como también se utilizaron las curvas de polarización potenciodinámicas de doble ciclo (activación y reactivación) en una solución de 0.5M H₂SO₄ y 0.01 KSCN, utilizándose un electrodo de referencia de calomel saturado de KCl y un electrodo auxiliar de grafito, a una distancia de 8mm del centro del cordón de soldadura, como se ilustra en la figura 3.

Tabla 3. Composición química del agua de mar sintética

Compuesto	Cantidad en grs./L
NaCl	24.5
MgCl ₂	5.2
Na ₂ SO ₄	4.09
CaCl ₂	1.16
KCl	0.695
NaHCO ₃	0.201

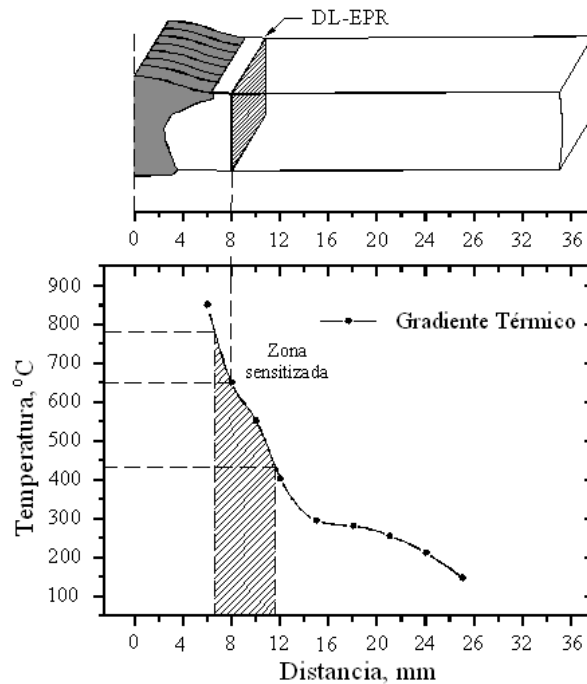


Fig.3 Ilustra la distancia a la cual se tomaron las muestras para la caracterización electroquímica y la temperatura medida a dicha distancia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 4 muestra la microestructura del acero inoxidable austenítico 304 tal como se recibió, en donde se puede observar la presencia de martensita α' , la cual es formada debido a la deformación en frío sufrida por el acero durante el conformado. Este tipo de microestructura precipita en el mismo plano de deslizamiento que la formación de maclado y que tiende a transformar el acero o hacerlo susceptible a la magnetización, por tal razón existen algunos reportados sobre el uso de la magnetización en la determinación de la presencia de martensita en los aceros austeníticos después de un proceso de deformado en frío [9,10].

Por otra parte la figura 5 muestra el perfil de la soldadura obtenido con y sin la interacción electromagnética, donde se puede observar una buena configuración del cordón de soldadura en cuanto a penetración, ancho y sobre monta, características fundamentales cuando se efectúa la soldadura en una sola pasada con material de aporte, como es la característica del proceso de soldadura MIG y las variables operativas utilizadas en la obtención de las soldaduras con este tipo de perfil mostrado, con una configuración adecuada.

Las variables operativas de soldadura especificadas en la tabla 2, producen un campo magnético perpendicular al arco eléctrico de una intensidad de 1.7 mT, que al actuar con el campo magnético generado por una bobina

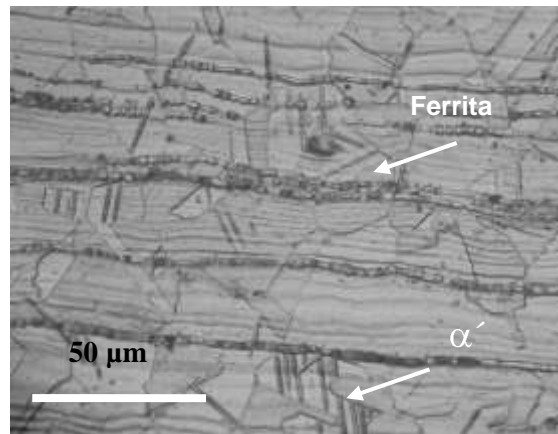


Fig. 4.- Muestra la estructura típica del acero inoxidable austenítico 304. Con la matriz austenítica y la presencia de martensita y ferrita.



Fig. 5 Perfil del cordón de soldadura depositado con y sin la interacción electromagnética

externa, tal como se ilustra en la figura 2, son los que producen la interacción electromagnética de baja intensidad en el material, el cual está clasificado como material paramagnético. Debido a esto tiene la característica de orientar los dipolos magnéticos de electrones, spin de los electrones y átomos de los granos o cristales, en diferentes sentidos al aplicarles un campo magnético cualquiera sobre el material.

Por otra parte los dos campos magnéticos perpendiculares entre sí, al interactuar produce una resultante con diferente orientación entre un cristal y crista, generando una vibración de la red cristalina con lo cual tiende a homogenizar la distribución del carbono y cromo, tanto en la matriz del grano, así como en los límites de grano y a fomentar la formación de martensita y carburos del tipo M_7C_3 comprobados por F. F. Curiel et al [11], quienes han encontrado que el carburo M_7C_3 al estar presente en la soldadura del acero inoxidable austenítico 304, presenta un enriquecimiento de cromo dentro del carburo y un empobrecimiento en la interface carburo austenita, lo cual no ocurre al aplicar la interacción electromagnética. Esto lo han encontrado realizando caracterizaciones por microscopia electrónica de transmisión, basados en lo anterior podemos deducir que el primer beneficio palpable en la ZAT del acero inoxidable austenítico 304, es el incremento de microdureza tanto cerca de la línea de fusión como en el rango de temperatura de 850-450 °C, rango de temperatura ya por demás comprobado que es donde se genera el fenómeno de sensitización, lo cual es ilustrado con el perfil de microdureza de la figura 6, en donde se aprecia una diferencia promedio de 100-80 unidades en la escala Vickers, para 3.2 y 14.7 mT de aplicación externa de campo magnético mediante una bobina inductora respectivamente. Este rango de campo magnético aplicado en forma externa, es el rango donde también F.F. Curiel et al [11], han establecido como el rango donde se presentan los beneficios de la interacción electromagnética de baja intensidad, para el mejoramiento de propiedades mecánicas de la ZAT en el acero inoxidable austenítico 304 y a partir de la aplicación de 15 mT en adelante, el efecto decae, razón por lo cual, los autores del uso de la agitación electromagnética en el refinamiento de la microestructura del cordón de soldadura no lo encontraron y por consiguiente no lo reportan [5-8], ya que ellos utilizan campos magnéticos externos mayores a 15 mT, con los cual ya no se puede denominar interacción electromagnética, puesto que la resultante se alinea hacia la magnitud de mayor intensidad, minimizando el campo magnético generado por la corriente de soldadura, teniendo una sola dirección cada uno de los dipolos magnéticos de los cristales del acero, con lo cual no se produce la vibración correspondiente que se genera cuando entre los dos campos magnéticos

interactúan entre sí, generando una interacción con una resultante que hace vibrar la red cristalina de los granos en diferente orientación entre granos vecinos. Esto también como ya se expuso anteriormente produce una homogeneidad en la composición química, la cual da como resultante un mejor comportamiento de la ZAT en presencia de medios agresivos como el agua de mar sintética, como se muestra en la figura 7, mediante el

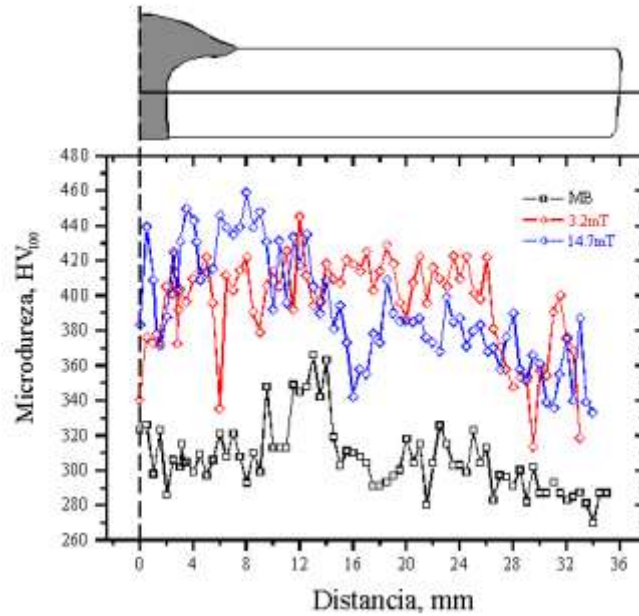


Fig.6.- Ilustra los perfiles de microdureza, para la soldadura tradicional del acero inoxidable austenítico 304, así como para la aplicación de campo magnético externo de 3.2 y 14.7 mT, respectivamente.

trazado de las curvas potenciodinámicas de polarización, mostrando un mejor comportamiento en la zona anódica en lo referente al potencial de corrosión y su comportamiento a la corrosión generalizada, al aplicarse las intensidades de campo magnético externo de 3.2 y 14.7 mT durante la soldadura.

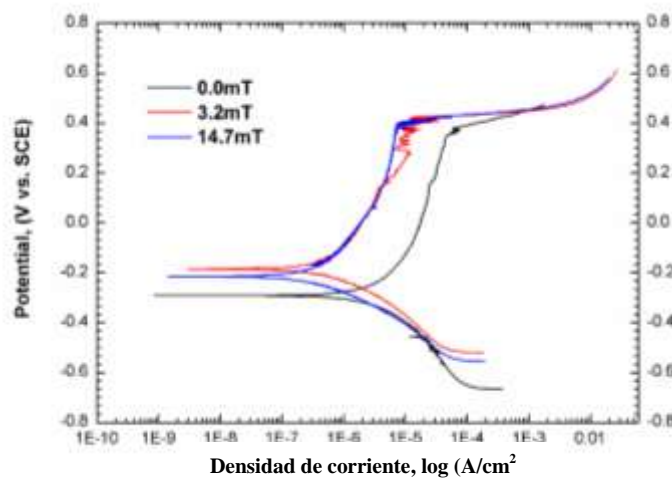


Fig.7.- Muestra el comportamiento anódico y catódico de la ZAT, para la soldadura sin campo magnético externo y para la aplicación de campo magnético externo de 3.2 y 14.7 mT.

El comportamiento de la ZAT en presencia de agua de mar sintética es reafirmado con el comportamiento obtenido con el trazado de las curvas potenciodinámicas de doble ciclo de activación y reactivación, realizadas en la solución de 0.5 M de H_2SO_4 + 0.1 M de KSCN y la fig.8. muestra la tendencia del comportamiento de las ZAT obtenidas sin la aplicación de campo magnético y con la aplicación de 3.2 y 14.7 mT durante la soldadura.

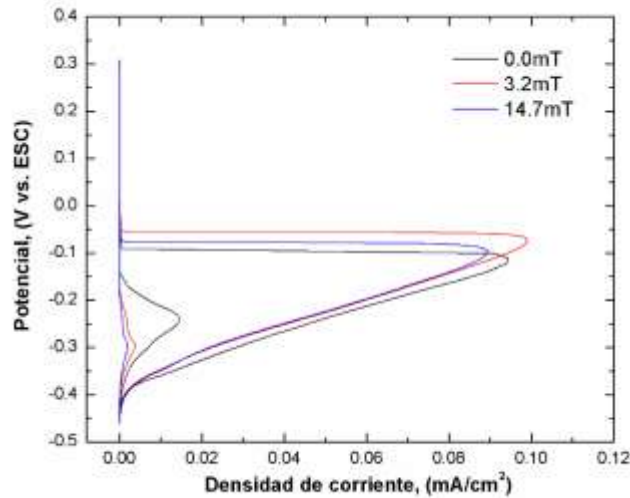


Fig. 8.- Ilustra las curvas potenciodinámicas de doble ciclo, para la determinación de la susceptibilidad de la ZAT a la corrosión intergranular en la solución de de 0.5 M de H_2SO_4 + 0.1 M de KSCN (Thicyanato de potasio).

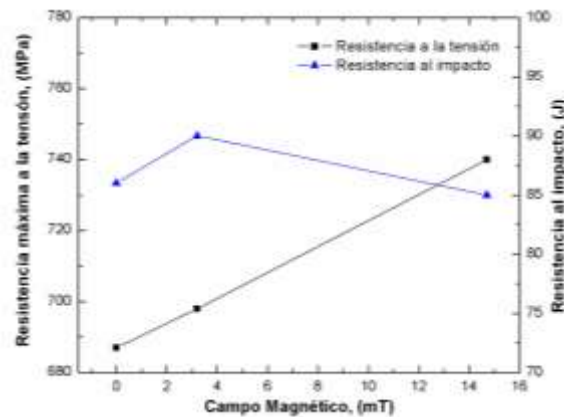


Fig.9.- Ilustra los resultados de los ensayos de tensión e impacto en la ZAT, de las soldaduras sin interacción electromagnética y con interacción electromagnética de baja intensidad.

En donde se puede observa que las muestras con interacción electromagnética presentan el mejor comportamiento que la muestra sin esta interacción. Este comportamiento se debe a que la interacción electromagnética produce una vibración en la red cristalina, con la cual se homogeniza la composición química tanto en la matriz de los granos como en los límites de grano, mejorando así, la resistencia a la corrosión tanto en forma generalizada como localizada (intergranular), en presencia de medios agresivos en donde los acero inoxidable austeníticos después de haber sido soldados, por el procedimiento convencional no tiene buen comportamiento sobre todo a la corrosión localizada en la ZAT, por el fenómeno de sensitización ocurrido durante la soldadura, Por lo que se puede afirmar que el método plateado en este trabajo de investigación

produce resultados excelentes, similares a los reportados en la literatura y sin ningún tratamiento pre y post-soldadura, como los encontrados en la literatura reportada[2,3].

Por otra parte, los resultados de los ensayos mecánicos de tensión e impacto obtenidos de la ZAT, en donde se indujo la fractura, con la finalidad de evaluar la ZAT a tensión e impacto, demuestran que están por encima de los obtenidos en las probetas de la soldadura realizada en forma tradicional sin interacción electromagnética, ver figura 9.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que la interacción de baja intensidad entre el campo magnético generado por la corriente de soldadura y el aplicado en forma externa en el rango de 3.2 a 14.7 mT, durante la soldadura del acero inoxidable austenítico 304, producen un zona afectada térmicamente con características mecánicas de micro dureza, tensión e impacto, mejores que las obtenidas hasta ahora con la soldadura tradicional sin la interacción electromagnética, así como también un mejor comportamiento a la corrosión generalizada en agua de mar sintética, como a la corrosión localizada o intergranular en la solución 0.5 M de H_2SO_4 +0.1M de KSCN.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores desean agradecer al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, por haber permitido realizar la presente investigación, así como también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haber otorgado las becas a los estudiantes, en la realización del presente proyecto.

REFERENCIAS

1. J. C. Lippold and D. J. Kotecki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", 2005, John Wiley and Sons, Inc.
2. R. Haul, N. Parvathavarthini, P. Ganesh, S. V. Mulkin, I. Samajdar, R. K. Dayal, and L. M. Kukreja, "A novel preweld Laser surface treatment for enhanced intergranular corrosion resistance of austenitic stainless steel weldments"; *Welding journal*, Vol. 88 (2009), p233s-242s.
3. H. Kokawa, "Weld decay –resistant austenitic stainless steel by grain boundary engineering", *Journal of Materials Science*, Vol. 40, (2005), p. 927-932
4. V. Cihal and I. Kasová, "Relation between carbide precipitation and intercrystalline corrosion of stainless steels", *Corrosion Science*, Vol. 10 (1970), p. 875-881.
5. J. C. Villafuerte and H. W. Kerr, "Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds", *Welding Journal*, vol.1(1990), p. 1s-13s.
6. F. Matsuda, K. Nakata and N. Sano, "Effect of electromagnetic stirring on weld solidification structure of austenitic stainless steels", *Welding Research International*, Vol. 15 (1986), p. 155-166.
7. T. Watanabe, H. Nakamura and K. Ei, "Grain refinement by TIG welding with electromagnetic stirring a study of solidification control of austenitic stainless steel weld metal", *Welding International*, Vol. 3 (1989), p. 312-317.
8. M. O. H Amuda and S. Mridha, "Grain refinement in ferritic steel welds", *Advanced Materials Research*, vol. 83-86 (2010), p. 1165-1172.
9. I. Mészáros and J. Prohászka, "Magnetic investigation of effect of α' -martensite on the properties of austenitic stainless steels", *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 16 (2005), p. 162-168.
10. K. Mumtza, S. Takahashi, J. Echigoya, L.F. Zhang, Y. Kamada and M. Sato, "Detection of martensite transformation in high temperature compressively deformed austenitic stainless steel by magnetic NDE technique" *Journal of Materials Science*, Vol. 38 (2003), p. 3037-3050.
11. F. F. Curiel, R. García and V. L. Morelos, "Study of the mechanism that produce the improve of the mechanical properties and corrosion resistance in the HAZ, of the austenitic stainless steels welded by MIG welding process with low electromagnetic interaction", unreported.