



## Efecto del mantequillado en las propiedades mecánicas de uniones soldadas disímiles en barras de refuerzo para estructuras de concreto.

J. C. I. Ramírez-Soto<sup>1</sup>, J. M. Salgado-López<sup>2</sup>, J. T. Pérez-Quiroz<sup>3</sup>, T. Pérez-López<sup>4</sup>, J. Terán-Guillén<sup>3</sup>, M. Martínez-Madrid<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Querétaro; Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo Col. Centro Querétaro, México.

<sup>2</sup> Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial Av. Playa pie de la Cuesta No. 702 Col. Desarrollo San Pablo Querétaro, México.

<sup>3</sup> Instituto Mexicano del transporte Km 12+000, Carretera Estatal No. 431 "El Colorado Galindo"/ Parque Tecnológico San Fandila, Querétaro, México.

<sup>4</sup> Centro de Investigaciones en corrosión, Av. Agustín Melgar S/N entre calle 20 y Juan de la barrera Col. Buenavista, Campeche, México.

### Información del artículo

#### DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i3.151>

Artículo recibido el 03 de Mayo de 2016, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 17 de Agosto de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

## RESUMEN

En este trabajo se ha investigado la influencia de utilizar Inconel 182 como material de “mantequillado” en las propiedades mecánicas de uniones disímiles acero al carbono-inoxidable manufacturadas por soldadura con electrodo recubierto. Para ello se han empleado las siguientes técnicas: análisis microestructural, ensayos de microdureza Vickers y ensayos mecánicos de tensión. Se ha empleado el proceso de soldadura con electrodo recubierto por que es el más común en la soldadura de campo para la construcción. Los resultados demuestran que aun cuando las uniones disímiles sin “mantequillado” presentan defectos, sus propiedades mecánicas son superiores a las de las uniones soldadas con “mantequillado”. Esta metodología es propuesta para la rehabilitación de estructuras de concreto para ambiente marino con barras de acero como refuerzos.

**Palabras clave:** mantequillado; uniones soldadas con materiales disímiles; propiedades mecánicas; microestructura; defectos.

## ABSTRACT

In this work, the influence of Inconel 182 as buttering material in the mechanical properties of dissimilar metal welds between plain carbon steel and stainless steel bars welded using SMAW has been investigated using microstructural analysis, Vickers microhardness testing, and tensile tests. Welding with SMAW process is commonly applied in field welding of concrete structures; therefore this process was selected for this work. The results indicated that even if the joints contain defects generated by the welder, the mechanical properties of dissimilar welded joint without buttering are higher than the properties of joints with buttering. This methodology is proposed for the rehabilitation of concrete structures with steel bars as reinforcements, which are located in marine environments.

**Keywords:** buttering, dissimilar metal weld joints; mechanical properties; microstructure; defects.

## RESUMO

Este artigo investiga a influência da utilização de Inconel 182 como um terceiro material, nas propriedades mecánicas de diferentes aços inoxidáveis soldados a aços carbono com uso de eletrodo revestido. Para tanto foram usados os seguintes métodos: análise microestrutural, ensaios de microdureza Vickers e ensaios mecânicos de tensão. Tem sido empregado o processo de solda com eletrodo revestido, porque é o mais comum no campo de solda para a construção. Os resultados mostram que quando as uniões são realizadas sem esse terceiro material, as propriedades mecánicas são superiores às das juntas soldadas com auxílio do Inconel 182. Esta metodologia, ora criticada, tem sido proposta para a reabilitação de estruturas de concreto em ambiente marinho, com uso de barras de aço inox como reforços.

**Palavras-chave:** juntas soldadas com materiais diferentes; propriedades mecánicas; microestrutura; defeitos.

© 2016 ALCONPAT Internacional

### Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 3, Septiembre – Diciembre 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, [alconpat\\_int@gmail.com](mailto:alconpat_int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org).

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Autor de contacto: Trinidad Pérez ([jtperez@imt.mx](mailto:jtperez@imt.mx))

## 1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto reforzadas con acero al carbono, localizadas en ambientes marinos se deterioran con el tiempo debido a la degradación de las barras de refuerzo; lo cual ha sido reportado previamente por Hernández y Mendoza (2006). En el mismo contexto, Tabatabai y colaboradores reportaron que existen dos causas para ese deterioro: carbonatación causada por la reducción de la alcalinidad del concreto y la desestabilización de la película de óxido de hierro debido a los iones cloruro (2009). Por tanto, el mayor problema de las barras de acero de las estructuras de concreto es la corrosión.

Perez-Quiroz y colaboradores reportaron que los productos de corrosión generados durante la corrosión del acero al carbono, provocan esfuerzos de tensión dentro del concreto, con lo cual se generan grietas internas y pérdida de adherencia entre el acero y el concreto (2008).

Como ejemplo de la importancia de la resistencia a la corrosión de las barras de refuerzo de estructuras de concreto, se puede mencionar un muelle en Yucatán, México, el cual fue construido entre 1937 y 1941, cuyas estructuras de concreto fueron hechas con barras de refuerzo de acero inoxidable AISI 304. El resultado es que dicho muelle no ha requerido ninguna rehabilitación debida al fenómeno de corrosión.

En contraste, Klueh y King reportaron que otro muelle en el mismo sitio, cuyas estructuras de concreto fueron reforzadas con barras de acero al carbono, se encontraba completamente dañado por corrosión de las barras de refuerzo (1982). De igual forma, Istrati ha reportado que el acero inoxidable AISI 304 es un buen candidato para la fabricación de barras de refuerzo en concreto.



Figura1. Comparación entre el muelle hecho con acero inoxidable (derecha) y muelle hecho con acero al carbono (izquierda) (Klueh, R. L., & King, J. F. 1982).

Como se mencionó anteriormente, el estudio de diferentes materiales para sustituir el acero al carbono del concreto reforzado es un tema muy importante, ya que con mayor resistencia a la corrosión se incrementa la vida útil de las estructuras de concreto. Sin embargo, los materiales propuestos tienen que ser unidos a barras de acero al carbono para reducir el costo e incrementar la vida útil de la estructura de concreto. Para lograr este objetivo, se deben investigar temas tales como la soldadura de metales disímiles y la preservación de las propiedades mecánicas de las uniones soldadas.

La soldadura de metales disímiles ha sido estudiada desde 1935, pero tales trabajos están basados en reportes de fallas, investigaciones, entrevistas con diferentes fabricantes y usuarios de este tipo de uniones, con el fin de reunir información acerca de tales uniones soldadas. En la literatura se ha mencionado que el tipo de bisel de la unión soldada debe ser tomada en cuenta con el fin de obtener soldaduras disímiles con buenas propiedades mecánicas (Lundin, 1982).

En este mismo contexto, Doddy en 1992, Ospina y colaboradores in 2007 reportaron que en uniones soldadas disímiles entre acero al carbono y acero inoxidable ocurre la difusión del carbono desde el acero al carbono hacia el acero inoxidable; además, el calor aportado por la soldadura promueve la

precipitación de carburos de cromo o de fase sigma en los límites de grano del acero inoxidable. Estos fenómenos deben ser evitados con el fin de obtener buenas propiedades mecánicas en uniones soldadas de metales disímiles; y se han hecho esfuerzos con el fin de proponer metodologías para obtener las mejores propiedades en este tipo de uniones soldadas.

Por ejemplo, Fuentes y colaboradores reportaron las propiedades de uniones soldadas disímiles entre acero ASTM A537 e inoxidable austenítico AISI 304L utilizando electrodos ER-308L como metales de aporte sin enmantequillado. En este caso, la soldadura fue llevada a cabo usando el proceso de soldadura con electrodo protegido con gas inerte (GMAW). En este trabajo, reportaron altos valores de dureza en la línea de fusión entre la soldadura y el acero inoxidable (2011). No obstante, debe considerarse que el proceso GMAW no es comúnmente utilizado para soldar en campo.

Por otro lado, Murugan y Parmar han reportado que placas de acero ferrítico soldadas con placas de acero inoxidable, usando Inconel 625 y 725 como metal de aporte sin aplicar enmantequillado. Los resultados no presentaron evidencias de difusión de carbono hacia el acero inoxidable pero las uniones soldadas con tratamiento térmico sí mostraron evidencias de esto (2003).

Con el objetivo de evitar la difusión de carbono hacia el acero inoxidable, el proceso de enmantequillado ha sido propuesto como una solución para minimizar los problemas mecánicos y metalúrgicos en este tipo de uniones. Winarto y colaboradores reportaron estudios en especímenes con 10 mm de espesor con proceso de enmantequillado, obteniendo propiedades mecánicas superiores que en especímenes con 20 mm de espesor sin enmantequillado. Por otro parte, el análisis por macroataque mostró que la zona afectada térmicamente (ZAT) fue mayor en especímenes con enmantequillado que en el caso de especímenes sin enmantequillado (2014). En este caso ellos soldaron los especímenes utilizando el proceso GMAW en placas con bisel en “V” y con electrodos E7016 como metal de aporte. Lo descrito anteriormente señala que no existe mucha información acerca de soldadura de metales disímiles usando el proceso de soldadura con electrodo recubierto (SMAW) y de los efectos del enmantequillado usando Inconel 182 como metal de aporte en acero inoxidable. En este trabajo se estudia la influencia del enmantequillado con Inconel 182 en las propiedades mecánicas de uniones soldadas disímiles, entre acero al carbono y acero inoxidable utilizando el proceso SMAW. Considerando que el proceso SMAW es comúnmente utilizado en la soldadura de campo, esta metodología se propone para la rehabilitación de estructuras de concreto con barras de refuerzo de acero al carbono.

## **2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Como primer paso se menciona que en este trabajo todos los materiales, electrodos, y procesos de soldadura fueron seleccionados por dos criterios económicos y aplicación en campo. Entonces, el proceso SMAW fue seleccionado por ser común en soldadura de barras de refuerzo en campo; también se utilizó la preparación de junta de bisel simple. Los metales base fueron barras de acero ASTM A615 y acero inoxidable austenítico AISI 304.

El metal de aporte fue acero inoxidable AISI 309L y el enmantequillado, se realizó aplicando una capa de 2 mm, sobre el acero inoxidable usando Inconel 182. El electrodo de acero inoxidable AISI 309L fue seleccionado como metal de aporte, porque se aplica comúnmente para unir acero inoxidable, debido a su composición química similar a los metales base (AISI 304). Una ventaja es que los electrodos AISI 309L e Inconel 182 pueden encontrarse comercialmente en electrodos para el proceso de soldadura con electrodo recubierto (SMAW) con un diámetro de 3,2 mm para cada material. Estos electrodos se utilizan a veces como enmantequillado en los procesos GMAW y GTAW para realizar uniones soldadas entre el acero inoxidable y acero al carbono.

Además, el Inconel 182 fue seleccionado para el enmantequillado por el contenido de níquel que es alto y tiene un precio relativamente bajo. El enmantequillado se realizó en barras de acero inoxidable con Inconel 182 para determinar el efecto de este material en el acero inoxidable y al mismo tiempo

observar el efecto del AISI 309L soldado con acero al carbono. El proceso de soldadura empleado fue: soldadura con electrodo recubierto (SMAW) y se utilizó como metal de aporte AISI 309L en forma de electrodos. La composición química del electrodo de Inconel utilizado se reporta en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química de electrodo Inconel 182 (2003).

NiCrFe7 (182)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Fe
Composición química (%)	<0.1	<1	5-9.5	<0.03	<0.015	13-17	>59	1-2.5	<1	<10

La preparación de los especímenes se llevó a cabo de acuerdo con el siguiente procedimiento: se cortaron 10 barras de acero inoxidable AISI 304 y 10 barras de A615 con dimensiones de 19 mm de diámetro y 100 mm de longitud como metal base para las uniones soldadas. Las barras de acero inoxidable fueron maquinadas a 45° en uno de los extremos haciendo bisel sencillo para preparar las juntas.

Las 10 uniones soldadas fueron preparadas de acuerdo con la norma NMX-H-121-1988 y ANSI/AWS D1.4-M 2005. El enmantequillado fue aplicado en 5 especímenes de acero inoxidable sobre el bisel de 45°. Este proceso fue llevado a cabo para evitar la precipitación de los carburos metálicos y de la fase sigma en la región de enmantequillado. Se debe tener presente que el Inconel 182 contiene cromo, el cual puede combinarse con el carbono que difunde desde el acero al carbono. La máquina de soldar empleada en el proceso fue una Castolin Eutectic, Master NT2000 AC/DC y los parámetros aplicados se muestran en la Tabla 2.

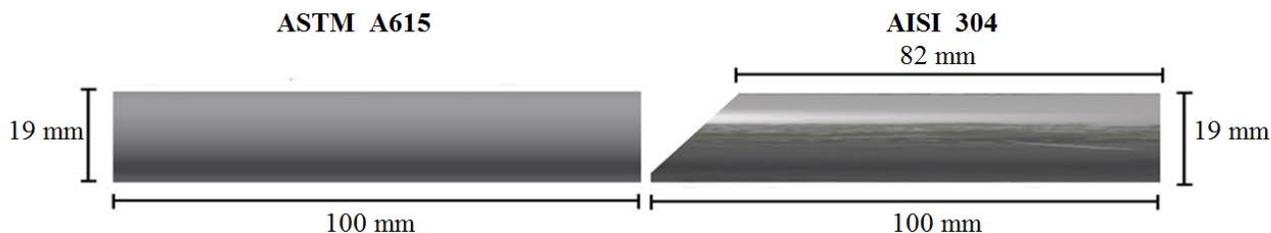


Figura 2. Diagrama esquemático del bisel simple de las uniones soldadas de metales disímiles. La barra de la izquierda consiste de acero ASTM A615 y la barra de la derecha es acero inoxidable AISI 304.

Tabla 2. Parámetros para el proceso de soldadura.

Diámetro de la barra (mm)	19
Diámetro del electrodo (mm)	3.2
Potencial eléctrico (V)	22
Corriente (A) DC-PI	90-95
Velocidad de desplazamiento (mm / min)	45
Calor aportado (kJ / mm)	2.5

Para determinar la variación de dureza entre el metal base, metal depositado y la zona afectada térmicamente, se midieron los perfiles de microdureza en la dirección longitudinal de cada espécimen. Las mediciones fueron promediadas y verificadas, de acuerdo con la norma ASTM E384. La medición de las microdurezas se llevaron a cabo usando un microdureómetro High Quality modelo MMT-1. La carga empleada fue de 300 kgf; y la indentación observada y medida a 400X.

Los ensayos mecánicos de tensión fueron realizados de acuerdo con la norma ASTM E8-M en una máquina universal Instron FAST TRACK modelo 8801. Los especímenes fueron ensayados a una velocidad de 3 MPa/s y la deformación fue medida usando un extensómetro. Finalmente, las uniones soldadas disímiles fueron caracterizadas microestructuralmente por medio de microscopía óptica; los especímenes fueron preparados de acuerdo con la norma ASTM E3, la microestructura se reveló

usando reactivo Berahas para el acero inoxidable y NITAL 2 para el acero al carbono. Las microestructuras se observaron en un microscopio metalúrgico NIKON 440. Las macroestructuras de los especímenes fueron reveladas de acuerdo con la norma ASTM E340 y analizadas usando un microscopio estereográfico LEICA.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La composición química del acero ASTM A615 fue determinada por medio de la técnica de espectrometría de emisión óptica y los resultados fueron aplicados para calcular el carbono equivalente (Ceq) para las barras de este mismo acero. El cálculo del Ceq fue 0.3683, el cual indica una buena soldabilidad del acero al carbono porque es menor al valor de 0.55, el cual está estipulado por la norma ASTM A706/A706M.

Además fue necesario calcular el cromo equivalente para el acero inoxidable (Creq), con el fin de determinar la susceptibilidad del acero inoxidable a la precipitación de la fase sigma. En este caso el valor para el Creq es mayor a 17 %; entonces este acero es susceptible a la precipitación de la fase sigma en la zona afectada térmicamente. Este hecho indicó que este material no debe ser tratado térmicamente y que el calor de aporte en el proceso de soldadura debe ser tan bajo como sea posible. La tabla 3 muestra los valores del Creq para el metal base y el metal de aporte.

Tabla 3. Resultados de cromo equivalente.

Material	Creq (%)
Acero inoxidable AISI 304	19.22
Metal de aporte AISI 309L	24.5

Las macroestructuras de los especímenes soldados fueron observadas usando el microscopio estereográfico. Los resultados de los especímenes con enmantequillado mostraron evidencia de grietas, pero estas tenían su origen en la capa de enmantequillado. Un ejemplo de los especímenes agrietados se muestra en la figura 3B; mientras que en la figura 3A se puede ver la macroestructura de los especímenes soldados sin enmantequillado y en ella no se observa evidencia de agrietamiento. Este hecho es indicativo de que la dilución entre el Inconel 182 con el AISI 309L del metal de aporte propicia la formación de grietas. Este resultado coincide con los reportados por Evans, quien reportó que las aleaciones de níquel unidas con acero inoxidable son susceptibles al agrietamiento en caliente (1962).

En este mismo sentido, la composición química del Inconel 182 y del AISI 309L, presentan un alto contenido de níquel en ambas aleaciones; así que es factible que el níquel equivalente en la unión soldada se incremente con la dilución entre el Inconel 182 y el acero inoxidable. En la literatura se ha reportado previamente por autores tales como: Jang, Ospina, y Fuentes que un porcentaje de ferrita entre 7 y 12 % es recomendable para evitar agrietamiento en caliente en soldadura de acero inoxidable austenítico (Jang, C., Lee, J. H., Jung, S. Y., Kim, J. S., & Jin, T. E. 2006; Ospina, R., Aguirre, H., & Parra, H. 2007; Fuentes, A. L. G., Centeno, L., García, R. D. S., & Del Rosario, A. V. 2011).

Las macrografías mostraron evidencia de faltas de fusión localizadas cerca del acero al carbono en la unión de bisel simple (figura 3A). Este es un defecto serio, porque en servicio esta discontinuidad funciona como concentrador de esfuerzos y esto a su vez lleva a la falla del componente soldado. Sin embargo, este defecto comúnmente se origina por la falta de habilidad del soldador; así que aunque el proceso de soldadura se efectuó con un soldador muy hábil, este tenderá a generar este defecto después de cierto tiempo de estar trabajando. Otro origen de las faltas de fusión es una baja corriente del proceso de soldadura. En este caso la corriente fue seleccionada dentro del intervalo recomendado para soldadura de estos materiales (entre 75A y 110A); por lo que puede descartarse esta causa para la aparición de este defecto. En cualquier caso, es importante mencionar que aunque las uniones soldadas

presentan faltas de fusión, estas presentaron buena resistencia a la tensión; lo cual es muy importante para el desempeño de la estructura de concreto. Este hecho se discute con mayor detalle más adelante.

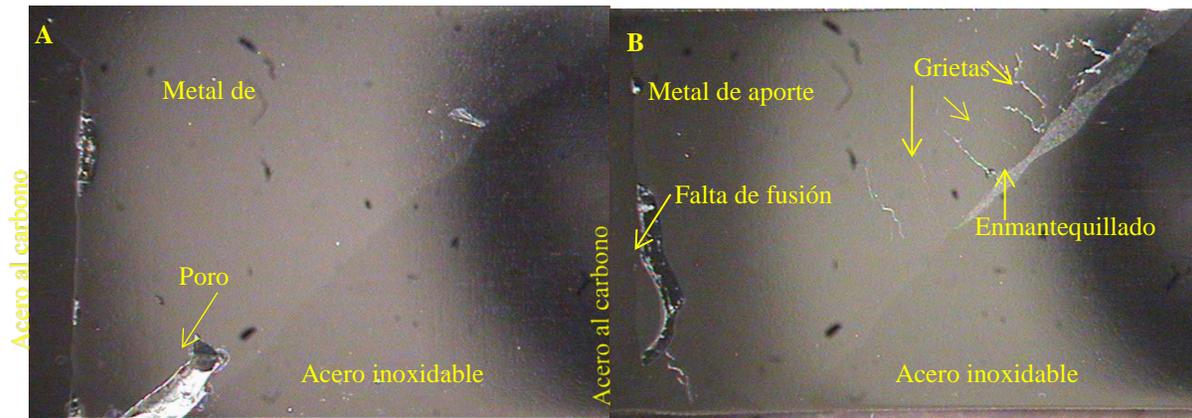


Figura 3A. Bisel Sencillo sin enmantequillado. Figure 3B. Bisel sencillo con enmantequillado.

### 3.1 Microestructuras de las uniones soldadas

La Figura 4 muestra la microestructura del acero al carbono como metal base, pueden verse bandas de granos de ferrita equiaxial y bandas de perlita. En el caso de la figura 5, esta muestra la microestructura del acero inoxidable como metal base. Pueden verse maclado de granos y no existe evidencia de precipitación de carburos metálicos o de fase sigma.

En la figura 6, se muestra la zona afectada térmicamente (ZAT) en la interfaz entre acero al carbono / metal de aporte. En el acero al carbono no se observa evidencia de crecimiento anormal de grano ferrítico o grietas.

Además, no fue encontrada evidencia de difusión de carbono desde el acero al carbono hacia el acero inoxidable AISI 309L. Este hecho es muy importante porque concuerda con los resultados publicados por Murugan y Parmar y esto indica que no existe sensibilización en el metal de aporte. Por ello se puede decir que es factible soldar acero al carbono con acero inoxidable utilizando como metal de aporte electrodos de AISI 309L, sin requerir del proceso de enmantequillado como metal de aporte así mismo no hay evidencia de sensibilización del acero inoxidable.



Figura 4. Microestructura del acero al carbono a100X.



Figura 5. Microestructura del acero inoxidable AISI 304 a 100X.

En la figura 7 se muestra la microestructura de la interfaz entre el acero al carbono / acero inoxidable AISI 309L; puede verse que no hay evidencia de sensibilización en los límites de grano del metal de aporte AISI 309L, a pesar de haberse utilizado el proceso de soldadura SMAW. Esto es muy relevante si se considera que el proceso SMAW normalmente induce calor de aporte más alto que los generados por los procesos GTAW o GMAW.

Por otro lado, la microestructura del acero al carbono consiste de martensita, la cual es la típica microestructura de la zona afectada térmicamente en uniones soldadas, utilizando el proceso de soldadura SMAW. Es notable que no hay evidencia de agrietamiento en la interfaz acero al carbono / acero inoxidable AISI 309L en cualquiera de los especímenes analizados. Esto refuerza la hipótesis de que es posible soldar acero al carbono con acero inoxidable por el proceso SMAW utilizando electrodos AISI 309L como metal de aporte.

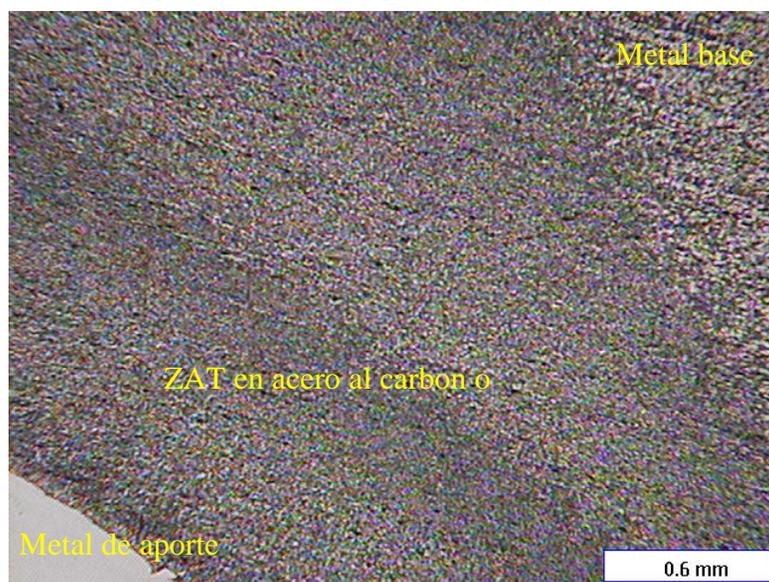


Figura 6. Microestructura a 50X de la soldadura entre el acero al carbono y el metal de aporte. No hay evidencia de grietas o crecimiento anormal del grano.

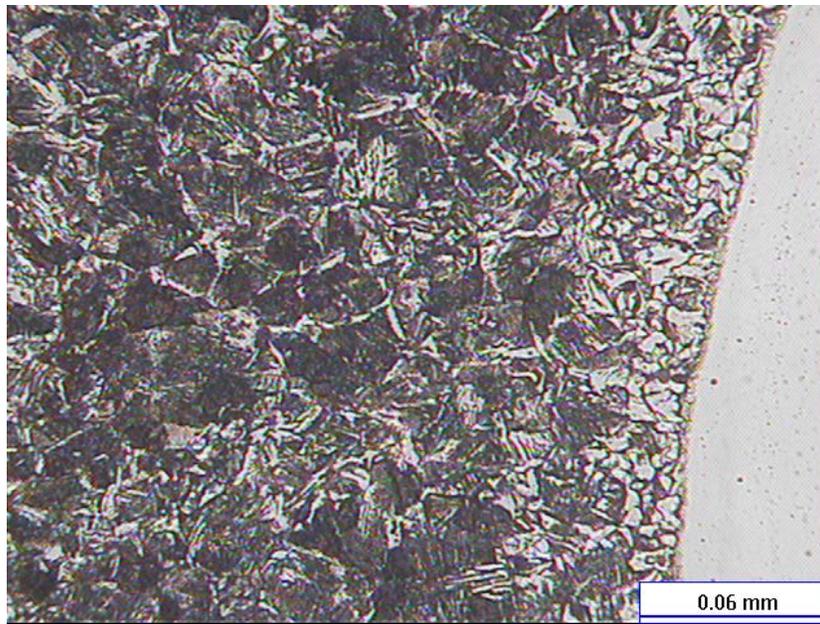


Figura 7. Microestructura a 500X de la unión soldada entre acero al carbono y metal de aporte. No se aprecia ninguna evidencia de precipitación de carburos en los límites de grano de AISI 309L.

La Figura 8 muestra la microestructura de la interfaz entre el metal de aporte, enmantequillado y acero inoxidable AISI 304. Se observan grietas entre el enmantequillado y el metal de aporte. En la misma micrografía se puede ver que el origen de las grietas, está situado en la interfaz enmantequillado/ metal de aporte; este hecho apoya el posible origen de éstas. Además, en la micrografía de la figura 8 también se observa evidencia de contracción de las dendritas en la interfaz enmantequillado / metal de aporte. Por otra parte, es claro que la contracción continúa creciendo en la zona de dilución entre el material de enmantequillado y el metal de aporte. Este hecho coincide con los resultados de Evans.

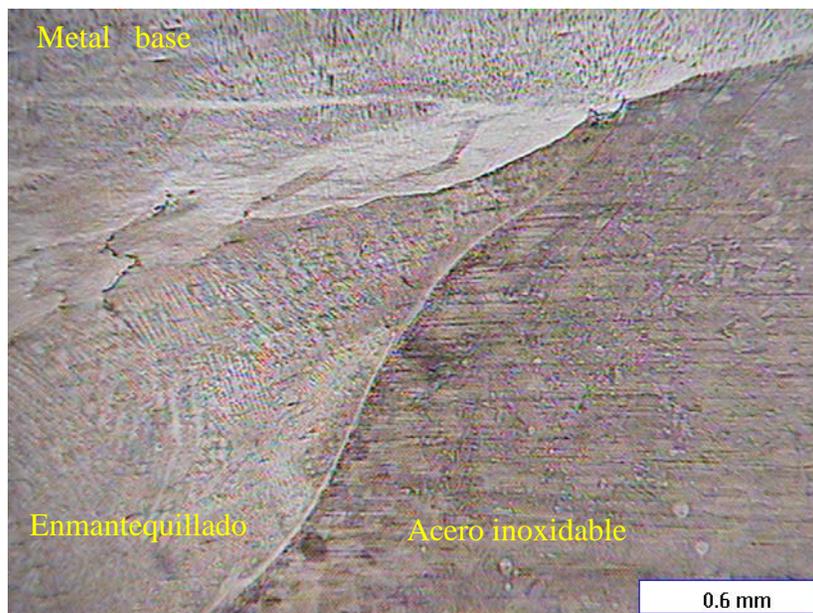
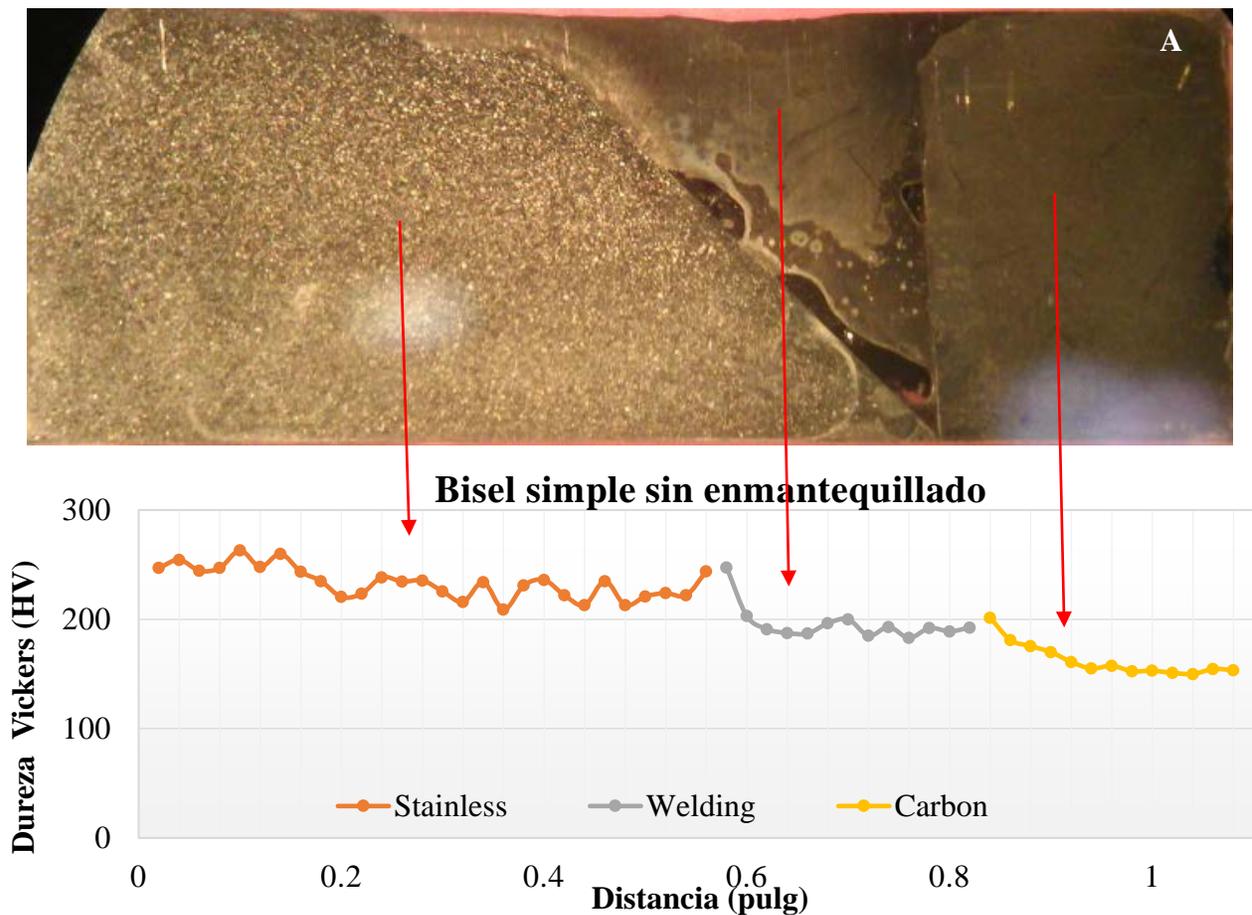


Figura 8. Microestructura de la unión soldada entre el enmantequillado y acero inoxidable. Se pueden ver las grietas en la región de dilución metal de aporte / enmantequillado.

Las evidencias microestructurales discutidas anteriormente indicaron que los aceros inoxidables austeníticos soldados con enmantequillado usando Inconel 182 son propensos a la formación de grietas. Este hecho indica que las barras de refuerzo de estructuras de concreto no deben soldarse con enmantequillado, siempre y cuando el metal de aporte se elija correctamente, este tema ha sido discutido previamente en la literatura (Jang, C., Lee, J., Kim, JS, y Jin, TE 2008, Olden, V., Kvaale, PE, Simensen, PA, Aaldstedt, S., y Solberg, JK 2003, Shinozaki, K., Ke, L., y Norte, TH 1992. Murugan, N., y Parmar, RS 1997). Estas evidencias indican que el porcentaje de níquel juega un papel muy importante en la selección del metal de aporte y en el material de enmantequillado.

### 3.2 Resultados de microdureza Vickers

Figuras 9A y 9B muestran el perfil de microdureza obtenido en la unión bisel simple. Se hallaron diferencias entre el espécimen con enmantequillado y el espécimen sin enmantequillado. Por ejemplo, la dureza media del metal de aporte es más alta en el espécimen sin enmantequillado respecto del espécimen con enmantequillado. En el caso de los aceros al carbono, la microdureza promedio en el espécimen sin enmantequillado es mayor que en el espécimen con enmantequillado. Este hecho está relacionado con la martensita en la interfaz acero al carbono / acero AISI 309L. De la misma manera, se puede mencionar que la microdureza promedio más baja en el metal de aporte en el espécimen con enmantequillado es una evidencia de la falta de difusión del carbono. Sin embargo, en el caso del acero inoxidable, la microdureza promedio es mayor que en el mismo material del espécimen sin enmantequillado. Este hecho puede explicarse por la dilución de níquel en el acero inoxidable, lo que provoca el endurecimiento de solución sólida (Cunat, 2005).



La figura 9A. Perfil de microdureza del espécimen con bisel simple, unión soldada sin enmantequillado.

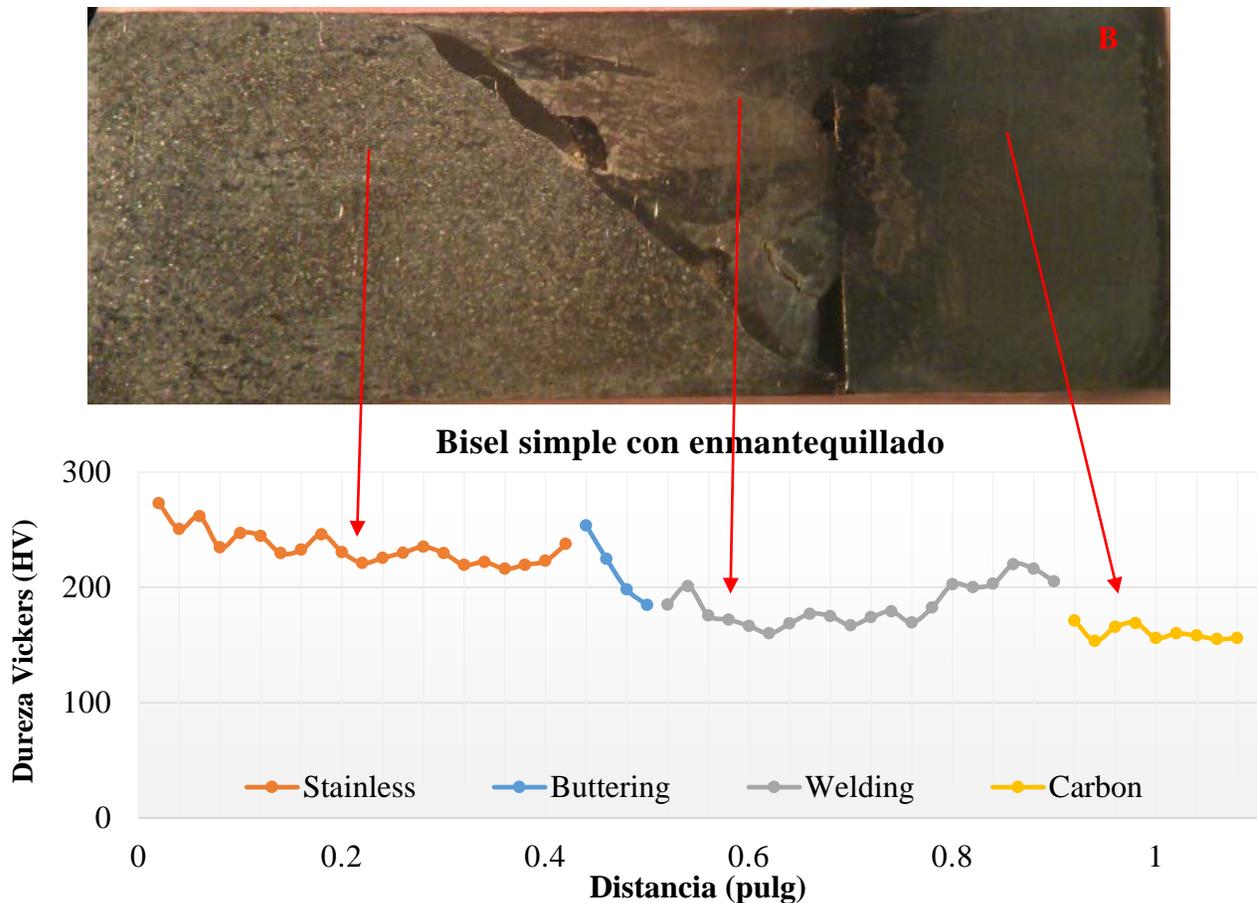


Figura 9B. Perfil de microdureza del espécimen con bisel simple, unión soldada con enmantequillado.

### 3.3. Ensayo de tracción

Las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes con bisel simple, se observa que los especímenes sin enmantequillado, muestran mayor resistencia última de tensión (RTU) que los especímenes con enmantequillado (figura 10). Este hecho concuerda con los resultados de las mediciones de microdureza, donde se observó que los especímenes mostraron valores más elevados de microdureza en la interfase del metal de aporte / acero al carbono.

Los límites de elasticidad de los especímenes con enmantequillado son 50 MPa mayor que el límite de elasticidad de los especímenes sin enmantequillado, pero la elongación de los especímenes con enmantequillado es mayor que en el caso de los especímenes sin enmantequillado. Estos hechos pueden explicarse por las macroestructuras, lo que indica que los especímenes con enmantequillado son más propensos a tener defectos tales como falta de fusión o grietas que actúan como concentradores de esfuerzos, y que influyeron en el comportamiento mecánico durante el ensayo de tensión. Sin embargo, es importante mencionar que a pesar de la presencia de defectos tales como falta de fusión y porosidad, los especímenes mostraron resistencia última de tensión mayor a 200 MPa. La principal influencia de defectos está en el alargamiento de los especímenes.

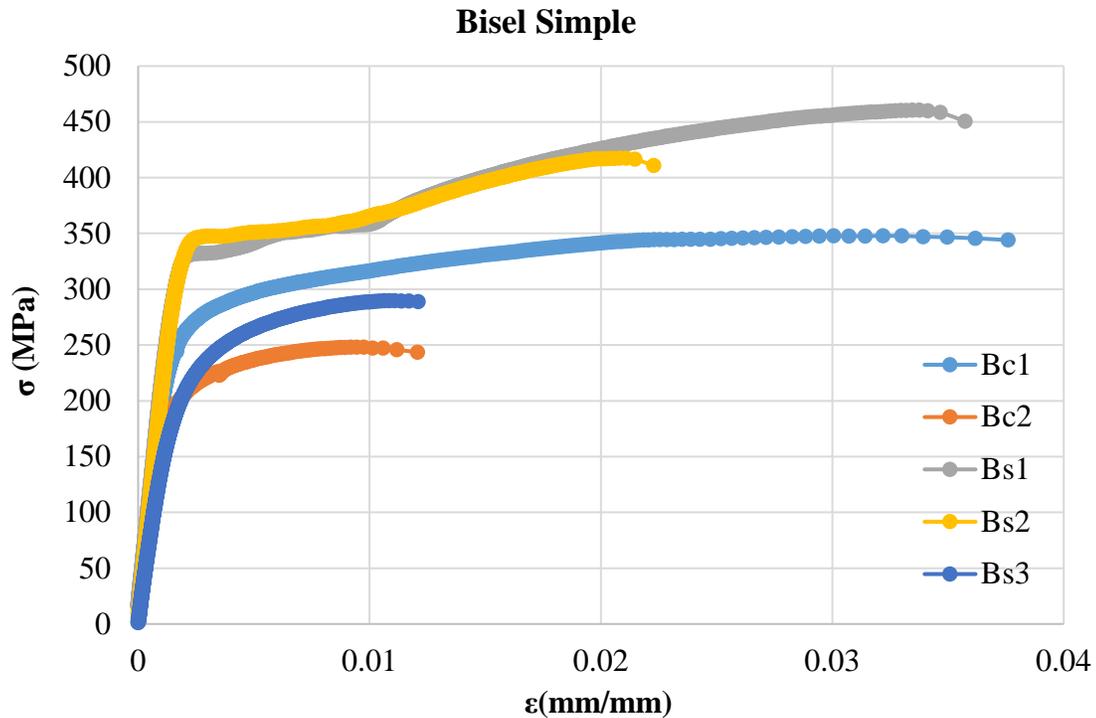


Figura 10. Curva esfuerzo-deformación de los especímenes bisel simple. Bc1, Bc2 especímenes soldados con enmantequillado; Bs1, Bs2 y Bs3 especímenes soldados sin enmantequillado.

En cuanto a la fractura de los especímenes, con excepción de los especímenes que mostraron defectos de soldadura como falta de fusión y cavidades; la fractura se encontró en el lado del acero al carbono. La figura 11A y figura 11B muestran la superficie de la fractura de los especímenes que fallaron bajo menor esfuerzo de tensión que los otros especímenes con la misma preparación. La influencia de estos defectos en el comportamiento mecánico de estos especímenes, se evidencia por los defectos de la soldadura que se observan en la superficie de fractura de los especímenes. Por ejemplo, la figura 11A muestra la superficie de fractura del espécimen con bisel simple y enmantequillado. Donde se muestra el origen de la fractura, debido a la falta de fusión, apareciendo en forma de canales, indicados con flechas negras. Estos resultados coinciden con el trabajo de Jang et al. Donde demuestran que la fractura de diferentes uniones soldadas utilizando Inconel como metal de aporte, depende en gran medida del proceso de soldadura (Jang, C., Lee, J., Kim, J. S., y Jin, T. E. 2008).

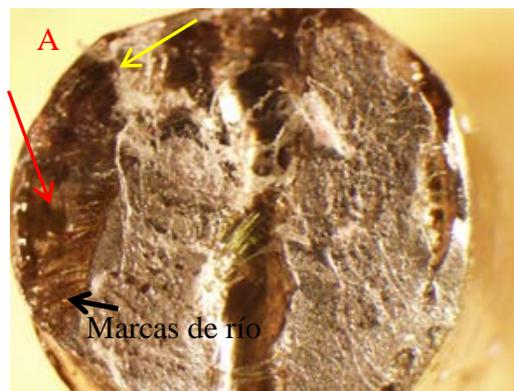


Figura 11A. Fractura del espécimen con bisel simple con enmantequillado. Se observa falta de fusión (flecha roja) y cavidades (flecha amarilla) en la fractura.

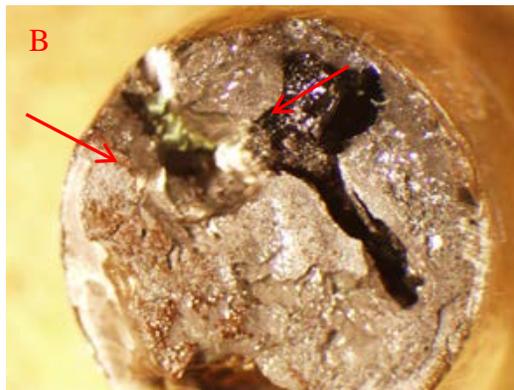


Figura 11B. Fractura de la superficie del espécimen con bisel simple sin enmantequillado. Se observa la ausencia de fusión en la fractura (flechas rojas).

#### 4. CONCLUSIONES

Las evidencias discutidas anteriormente conducen a las siguientes conclusiones:

- 1.-Los especímenes con enmantequillado son propensos a mostrar grietas en la interfaz enmantequillado / metal de aporte.
- 2.-Las soldadura entre AISI 309L y acero al carbono, no presentan evidencia de formación de grietas.
- 3.-Los especímenes sin enmantequillado mostraron microdureza promedio más alto en el metal de aporte.
- 4.-Los especímenes sin enmantequillado mostraron mejores propiedades mecánicas.
- 5.-La composición química de los materiales para el enmantequillado y el metal de aporte son muy importantes para la integridad de la soldadura.

#### 5. REFERENCIAS

- ASTM A615 / A615M – (2016) “Especificación Normalizada para Barras de Acero al Carbono Lisas y Corrugadas para Refuerzo de Concreto”. (In english).
- ASTM A706/A706M (2016) “Especificación Normalizada para Barras de Acero de Baja Aleación Lisas y Corrugadas para Refuerzo de Concreto”. (In english).
- ASTM E384 (2016) “Método de prueba estándar para dureza de materiales por microindentación”. (In english).
- ASTM E8 / E8M (2015) “Método de prueba estándar para ensayos de tensión en materiales metálicos”. (In english).
- ASTM E3 (2011) “Guía estandarizada para preparación de muestras metalográficas”. (In english).
- ASTM E340 (2015) “Practica estandarizada para macroataque de metales y sus aleaciones”. (In english).
- AWS, H. (2005). D1. 4/D1. 4M- “Código para soldadura en refuerzo de estructuras”. (In english) Sociedad Americana de Soldadura.
- Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Reddy, G. M., & Sivakumar, K. (2011). “Efecto del enmantequillado y recubrimiento duro en el desempeño balístico de la unión soldada de armaduras de acero”. (In english). *Materials & Design*; 32(2), pp. 469-479.
- Cunat J. P. (2004). “Elementos aleantes en acero inoxidable y otras aleaciones que contienen Cromo”. (In english). Euroinox, p7.
- Doddy, T. (1992). “Zonas de mezclas intermedias en soldaduras de metales disímiles para servicio amargo”. (In english). *Welding Journal*, 71, pp. 55-60.

- Evans R.M. (1962). “*Uniendo aleaciones base Níquel*”. (In english) DMIC report 181, battelle memorial institute, Columbus 1, Ohio.
- Fuentes, A. L. G., Centeno, L., García, R. D. S., & Del Rosario, A. V. (2011). “*Metalurgia de uniones soldadas de aceros disímiles (ASTM A240–A537) y comportamiento mecánico bajo cargas cíclicas y monotónicas*”. (In english). Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, pp.36-48.
- Hernández-Castañeda O; Mendoza-Escobedo C.J; (2006), “*Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico*”, Ingeniería Investigación y Tecnología, VII.1 pp. 58.
- Istrati, G. (1961). “*Manual de los aceros inoxidable*”. Librería Editorial Alsina
- Jang, C., Lee, J. H., Jung, S. Y., Kim, J. S., & Jin, T. E. (2006). “*Evaluación de la propiedad de tensión de metales disímiles soldados con la aleación 82/182 en muestras miniatura*”. (In english). In Proc. of KNS Spring Meeting, Chunchon, Korea. Small Sub-size Sp (Vol. 1) pp.1-23.
- Jang, C., Lee, J., Kim, J. S., & Jin, T. E. (2008). “*Variación de las propiedades mecánicas con Inconel 82/182 dentro de la unión soldada entre un acero de baja aleación y acero inoxidable 316*”. (In english). International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85(9), pp. 635-646.
- Klueh, R. L., & King, J. F. (1982). “*Defectos en la soldadura de unión entre acero inoxidable austenítico y acero ferrítico*”. (In english). WELDING J., 61(9), pp. 302.
- Lundin, C. D. (1982). “*Revisión del estado del arte de la unión soldada de metales disímiles*”. (In english). Welding Journal, 61(2), pp.58-63.
- Murugan, N., & Parmar, R. S. (1997). “*Revestimiento de acero inoxidable depositado con proceso automático de soldadura por arco bajo gas protector*”. (In english). Welding Journal-Including Welding Research Supplement, 76(10), pp.391-401.
- NMX-H-121-1988 “*Procedimiento de soldadura estructural acero de refuerzo*” p. 8.
- Olden, V., Kvaale, P. E., Simensen, P. A., Aaldstedt, S., & Solberg, J. K. (2003, January). “*El efecto del PWHT en las propiedades y microestructura de la unión de Inconel 625 con Inconel 725 mediante enmantequillado*”. (In english). In ASME 2003 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, pp. 109-115.
- Ospina, R., Aguirre, H., & Parra, H. (2007). “*Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disímiles*”. Scientia et Technica, pp.13- 34.
- Pérez-Quiroz, J. T., Terán, J., Herrera, M. J., Martínez, M., & Genescá, J. (2008). “*Evaluación del acero inoxidable de refuerzo para la rehabilitación de estructuras de concreto*”. (In english). Journal of Constructional Steel Research, 64(11), pp.1317-1324.
- Shinozaki, K., Ke, L., & North, T. H. (1992). “*Agrietamiento por hidrógeno en soldadura de aceros inoxidables dúplex*”. (In english). WELDING JOURNAL-NEW YORK-, pp. 371-387.
- Tabatabai, H., Ghorbanpoor, A; & Pritzl, M. D. (2009). “*Evaluación de métodos de prevención y control de la corrosión, en reparación de puentes de concreto reforzado*”. (In english). (No. WHRP 09-04), p.p. 7.
- Tušek, J., Bajcer, B., Taljat, B., & Hrženjak, M. (2007). “*Análisis de la falta de fusión de la soldadura en calentadores de agua*”. (In english). Metalurgija, 46(2), pp.111-116.
- Washko S.D. and Aggen G (2005). ASM Handbook Volume 1, “*Propiedades y selección: Hierros, Aceros y Aleaciones de alto desempeño*”. (In english). 10th edition, pp.2145-2248.
- Winarto, G. D., Wardhani, R., & Syarif, I. (2014). “*Método de análisis del enmantequillado de las propiedades en materiales de acero de bajo carbono soldados*”. (In english). IPTEK Journal of Proceedings Series, 1(1) pp.109-113.