

# Soldadura disímil por rotación continua entre una plancha de acero inoxidable y una barra de AISI 1045

**Ricardo Quevedo Mejías**

[rquevedo@ismm.edu.cu](mailto:rquevedo@ismm.edu.cu)

**Tomás Fernández Columbié**

[tfernandez@ismm.edu.cu](mailto:tfernandez@ismm.edu.cu)

**Ledennis Torres Suárez**

[lstorres@ismm.edu.cu](mailto:lstorres@ismm.edu.cu)

**Neury Durán Batista**

[nduranbatista19@gmail.com](mailto:nduranbatista19@gmail.com)

Universidad de Moa (Cuba)

**Resumen:** Se estableció el comportamiento microestructural y la dureza del proceso de soldadura por fricción radial de la unión disímil entre una plancha de acero AISI 316 y una barra de acero AISI 1045. Se cortó plancha de 50x50x12 de AISI 316 y barra de 20 mm de diámetro de AISI 1045, rotando la plancha en un torno C 11 MT, con número de revoluciones de 1400 r/min, presión de 75 MPa y una fuerza axial de 23550 N; se logró la unión metalúrgica entre ellas en un tiempo de catorce segundos. Se analizó la zona termomecánicamente afectada y la térmica afectada, donde la estructura está compuesta por las fases martensita-ferrita-perlita, microconstituyentes del AISI 1045 y la austenita-ferrita del AISI 316L. La perlita ocupó un 65,42 % del área sobre la superficie, mientras que la austenita fue de 67,95 %. Existe un incremento de la dureza desde 180 HV y 217 HV, respectivamente hasta 306 HV en la ZTMA, generada por efecto de la fricción.

**Palabras clave:** Microestructura; soldadura por fricción radial; acero inoxidable.

## Dissimilar welding by continuous rotation between a stainless steel plate and an AISI 1045 bar

**Abstract:** The microstructural behavior and hardness of the radial friction welding process of the dissimilar junction between an AISI 316 steel plate and an AISI 1045 steel bar was established. A 50 mm 50x50x12 AISI 316 plate and a 20 mm bar were cut diameter of AISI 1045, rotating the plate on a lathe C 11 MT, with speed of 1400 r / min, pressure of 75 MPa and an axial force of 23550 N; the metallurgical union between them was achieved in a time of fourteen seconds. The thermomechanically affected area and the thermally affected area were analyzed, where the structure is composed of the martensite-ferrite-perlite, microconstituent phases of the AISI 1045 and the austenite-ferrite of the AISI 316L. The perlite occupied 65.42% of the area on the surface, while the austenite was 67.95%. There is an increase in hardness from 180 HV and 217 HV, respectively up to 306 HV in the ZTMA, generated by friction.

**Keywords:** Microstructure; radial friction welding; stainless steel.

## Introducción

En el proceso de soldadura ocurren diferentes fenómenos físicos como consecuencia del campo de temperatura, campo de esfuerzos y deformaciones y campo de estado microestructural. Los esfuerzos residuales en las soldaduras tienen un efecto muy significativo en la integridad de las estructuras, componentes y piezas metálicas, debido a que disminuyen la resistencia a la fatiga y resistencia mecánica de los materiales. En ocasiones los cordones de soldadura son mecanizados por condiciones de diseño, induciendo posiblemente aún más esfuerzos residuales al material.

Sin embargo, otros autores (Llewellyn y Hudd, 1998; Badeshia y Honeycombe, 2006) son del criterio que, durante la soldadura de los aceros, el calor aportado también difunde hacia las zonas adyacentes que no alcanzan el punto fusión y, por lo tanto, experimentan un ciclo de calentamiento y enfriamiento, cuya severidad depende de la distancia de la zona de fusión. La temperatura pico y el rango de calentamiento disminuye en función de la distancia. La velocidad de enfriamiento es menos sensible a la distancia y puede ser relacionado con el tiempo de enfriamiento en el rango de 800-500 °C, en el cual la austenita sufre transformaciones en estado sólido.

Según Cabot (2003) y Shafer (2014), la soldadura por fricción tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos que no pueden soldarse de forma convencional. Conocido como el proceso de unión de dos piezas en un estado sólido, la soldadura por fricción rotativa (*Rotary Friction Welding*, RFW) es un proceso utilizado en áreas de la industria manufacturera, como la naval, marina, aeroespacial y el transporte terrestre y, en menor escala, la industria de motorización eléctrica, en electrodomésticos, tanques de gas y en la industria química y agrícola.

Según Singh-Sidhu y Singh-Chatha (2012), esta soldadura se puede utilizar para unir una amplia variedad de materiales, siempre y cuando uno de los componentes tenga alguna simetría rotacional. Mediante este método es posible unir las partes sólidas o tubulares con una buena resistencia en la unión. Así se han unido con éxito barras sólidas de acero de hasta 100 mm de diámetro y tubos de hasta 250 mm de diámetro exterior.

Plantean algunos investigadores (Schneider y Nunes, 2004; Cabibbo *et al.*, 2007) que la velocidad del miembro rotatorio puede ser hasta de unos 15 m/s. Debido al calor y la presión combinados, la interfaz en la FRW desarrolla una rebaba mediante deformación plástica de la zona calentada. Esta rebaba, de ser necesario, se puede retirar con facilidad por medio de maquinado o rectificado. Las máquinas para soldadura por fricción

son totalmente automáticas y la habilidad requerida del operador es mínima, una vez que se han ajustado en forma apropiada los ciclos individuales de tiempo para la operación completa.

La soldadura por fricción es un proceso que requiere aproximadamente la mitad de la temperatura absoluta con relación a la soldadura autógena. El efecto del ciclo térmico de este tipo de soldadura tiende a ser menos energético en el comportamiento de la microestructura. El movimiento giratorio genera calor rápidamente, pero las máximas temperaturas en la interfase en la soldadura de los aceros inoxidable van desde 976 °C hasta 1 226 °C (Maalekian *et al.*, 2008); en comparación con la soldadura autógena que se genera desde 1 726 °C hasta 2 526 °C.

La soldadura disímil entre aceros al carbono con aceros inoxidable es usada en muchas aplicaciones, pero la soldadura por fusión puede conducir a diferentes modos de actuación debido a la segregación de los elementos aleantes durante la solidificación (Davis, 1993), embridamientos, formación de fase quebradiza (Lundin, 1982), formación de hidrógeno, agrietamiento en la interfase, corrosión por picaduras por el ion cloruro (Reddy *et al.*, 2008) y la corrosión bajo tensión por agrietamiento (Correa, 2010).

Los aceros al carbono y los aceros inoxidable presentan diferentes características en la soldadura por fusión, siendo el carbono en el primero y el cromo en el segundo los que limitan la calidad de la unión soldada y la microestructura. La soldadura por fricción radial o rotativa es un método de soldadura en estado sólido donde se logran uniones con bajo costo y alta calidad sin necesidad de material de aporte y con buenas características metalúrgicas, tanto en materiales similares como disímiles.

El presente trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural y la dureza de la unión metalúrgica entre el acero austenítico AISI 316 y el acero AISI 1045 luego de ser aplicados los parámetros del proceso de soldadura por fricción radial o rotativa.

## **Materiales y métodos**

### **Preparación y máquina empleada para la unión**

Se utilizó una barra de AISI 1045 de 20 mm de diámetro y una plancha de AISI 316 de 50 x 50 mm. En el proceso, la plancha de AISI 316 fue la que se sometió a proceso de rotación. La máquina empleada fue un torno C 11 MT; se tuvo en cuenta su rigidez, que fuera capaz de resistir momentos de gran magnitud, eliminar las vibraciones y fugas,

especialmente, aquellas durante el proceso de soldadura. En la Tabla 1 se muestran los parámetros utilizados en el proceso de unión.

Tabla 1. Parámetros de soldadura empleados

Muestras	Variables				Salida
	Velocidad de rotación (r/min)	Presión fricción (MPa)	Presión de forja (MPa)	Tiempo de soldadura (s)	Dureza (HV)
1	1 400	75 MPa	X	X	X
2	1 400	75 MPa	X	X	X
3	1 400	75 MPa	X	X	X

Las probetas, luego de sometida a la soldadura por fricción, se determinó la presión de fricción, la temperatura de forja y la dureza, el comportamiento microestructural de la unión en la zona afectada térmicamente y la termomecánicamente afectada. Para la preparación metalográfica de la probeta, las muestras se seleccionaron de la sección transversal. Durante la preparación metalográfica se realizaron las siguientes operaciones: corte, desbaste, pulido, desengrasado y lavado. En la Figura 1 se señala la unión luego de haber realizado la soldadura y de dónde se obtendrán las muestras.



Figura 1. Probetas obtenidas luego del proceso de soldadura.

Se observa macroscópicamente en las muestras obtenidas que el acortamiento se produjo en el acero AISI 1045; en la superficie del acero inoxidable AISI 316 existe poca variación de deformación, independientemente de que la temperatura de fusión de este último es menor que la del primero. El corte se realizó en una fresadora vertical 6 M 13 L, con 125 r/min y un avance transversal de 25 mm/r; se empleó abundante refrigeración para evitar que, debido a la fricción entre la fresa y la pieza, existieran posibles transformaciones en la estructura por cambios de fase.

El desbaste y pulido se realizó con la variación de la granulometría de los papeles abrasivos al ser aplicadas en la superficie de la pieza, desde 400, 600 y 800. Las lijas fueron colocadas sobre una placa de vidrio; se cambió el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro. Para el acabado se utilizó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva el óxido de cromo. Una vez pulida las muestras se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro; se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl4C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pasta de pulir.

Para el ataque químico de ambos materiales con contenido en cromo-níquel y carbono se ha elegido para el primero; el reactivo agua regia y para el segundo nital. En la Tabla 2 se indica el modo de preparación de los reactivos químicos empleados.

Tabla 2. Reactivos químicos empleados

Reactivo	Composición/uso
AISI 316	Mezcla de 10mL de ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> ) y 30 mL de ácido clorhídrico a temperatura ambiente y durante 5 min
Agua regia al 10 %	
AISI 1045	Mezcla de 5 mL de ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> ) y 100 mL de alcohol etanol de 3 s a 5 s
Nital al 4 %	

Preparado el reactivo, se vertió en una cápsula en la que se introdujo la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detuvo el ataque con agua y se observó la superficie. La operación se repitió hasta que la superficie a examinar estuvo bien atacada. En este caso se realizó el ataque de los materiales por separado, ya que la unión soldada es de acero disímil. Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente, se secó con alcohol absoluto y al aire.

### Microestructura patrón de las aleaciones

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada, el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe, que refleja la micrografía en el computador. Las muestras de la Figura 2 (a) y (b) se corresponden con la estructura metalográfica de la muestra patrón de las aleaciones AISI 1045 y AISI 316.

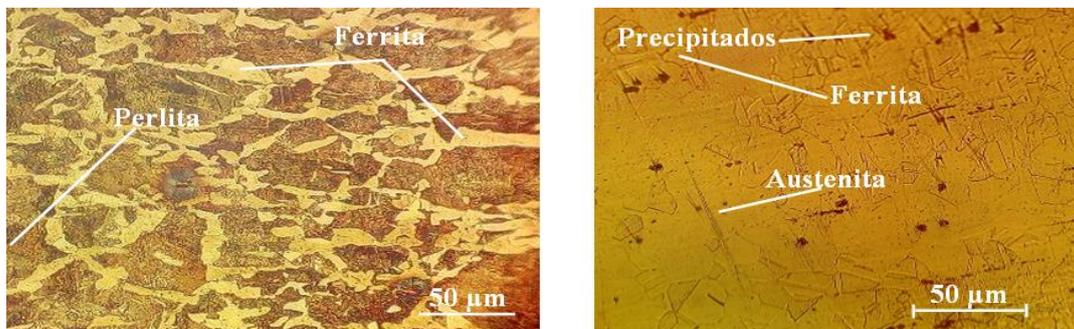


Figura 2. (a) Microestructura del AISI 1045. (b) Microestructura del AISI 316.

La muestra de la Figura 2(a) se corresponde con la del acero AISI 1045, en estado de entrega laminado, con enfriamiento al aire. Se trata de un acero hipoeutectoide, que por tratarse de un acero con un contenido menor de 0,8 % C, tiene como constituyente matriz la ferrita y como constituyente disperso la perlita. La microestructura de la Figura 2(b) se corresponde con la aleación AISI 316, está compuesta por una estructura austenítica. El contorno de los granos es rectilíneo. Es estable por encima de la temperatura crítica Ac<sub>1</sub>. Está formada por cristales cúbicos centrados en las caras (FCC).

El objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que permitiera determinar luego de la soldadura, posibles cambios ocurridos en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA).

### Ensayo de dureza en las diferentes zonas

En la medición de la microdureza se consideraron las diferentes zonas de la unión soldada, teniendo en cuenta que es una soldadura disímil; esta se realizó de forma transversal, midiendo desde el material base (AISI 1045) hasta la zona termomecánicamente afectada; igual procedimiento se realizó desde el AISI 316 hasta la misma zona. Las superficies de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, desbaste y el pulido. Se efectuaron tres mediciones a las muestras en diferentes lugares, las que se promediaron; la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de 136° según la ASTM E 92-82.

### Resultados y discusión

#### Análisis de las microestructuras en la ZTMA

Para realizar el análisis microestructural de las muestras se tuvieron en cuenta las diferentes condiciones de soldadura a las que fueron sometidas. Las microestructuras analizadas en la Figura 3 (a), (b) y (c) se refleja la zona termomecánicamente afectada de la unión disímil acero al carbono-inoxidable.

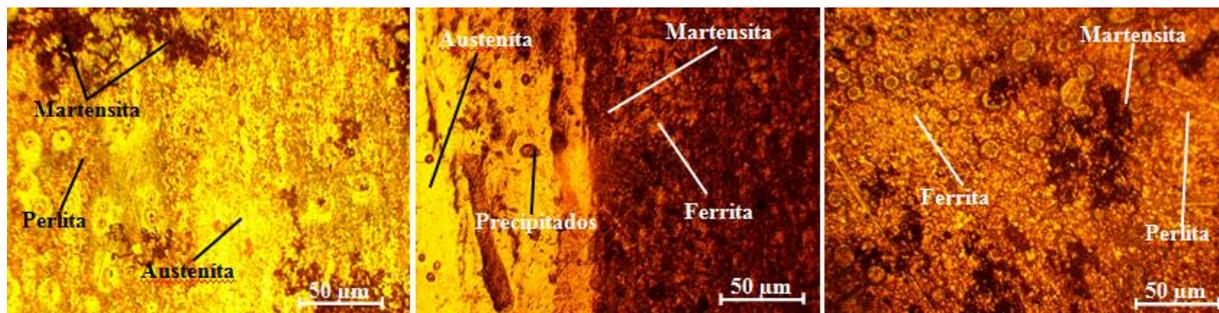


Figura 3. (a) Muestra 1. (b) Muestra 2. (c) Muestra 3.

La ZTMA, formada únicamente por el material solidificado, sufre durante la unión, un cierto número de transformaciones que son de tipo químico, físico o estructural diferenciándose del material base por su composición química, su estructura y sus propiedades. La ZTMA indica una distribución en los granos de su estructura del tipo austeno-ferrita-martensita, con la presencia de algunos precipitados en la matriz, lo cual permite establecer que durante el proceso de soldadura de torque continuo de estas dos

aleaciones, la temperatura de fricción está por encima de 727 °C, ya que ha existido transformación de fase en el acero AISI 1045, en el cual el contenido de carbono presente en la composición química tiende a formar estructuras de más dureza como la martensita.

Estas uniones soldadas presentan una transición desde el material base, a través de una ZTMA, en la que se aprecia una deformación de los granos, sin observarse crecimiento considerable de estos, hasta una zona de forja, en el centro de la soldadura, con granos más pequeños, con configuración equiaxial, ocasionado probablemente por la recristalización del material deformado. En las microestructuras se observa la presencia de ferrita, lo cual favorece la resistencia de la unión soldada en los aceros austeníticos, planteado por Chander *et al.* (2013).

### Análisis de las microestructuras en la ZTA del AISI 1045

La Figura 4 (a), (b) y (c) se corresponden con ZTA de la soldadura entre el acero AISI 1045-AISI 316.

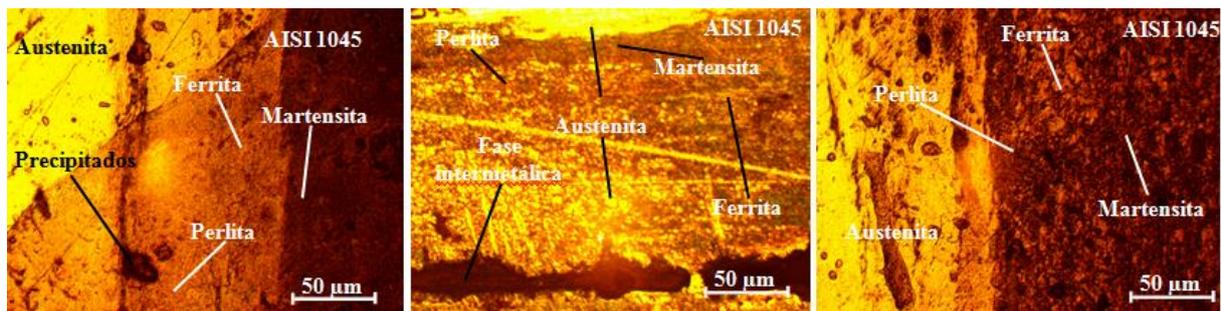


Figura 4. (a) Muestra 1. (b) Muestra 2. (c) Muestra 3.

En las microestructuras de la zona térmicamente afectada del lado del acero AISI 1045 se han obtenidos estructuras de ferrita con austenita en los límites de granos, así como la presencia de algunos precipitados. Se puede plantear que el tipo de solidificación que ocurre durante la soldadura disímil es del tipo ferrita.

La ferrita que se forma en el límite de grano es relativamente estable y resiste la transformación de la austenita durante el enfriamiento de la soldadura, puesto que se enriquecen de los elementos formadores de ferrita. Se aprecia que debido a esta existe solidificación de austenita primaria, aunque la subestructura de solidificación es realmente aparente. Una relación alta Cr equivalente/Ni equivalente formará más fácilmente ferrita, de igual manera la presencia del carbono tiende a la formación de ferrita. En la ZTA la formación de ferrita a lo largo de la frontera del grano restringirá el

crecimiento y minimizará la susceptibilidad a las fisuras, según el criterio de Arivazhagan y demás colaboradores (2011).

### Análisis de la microestructura en la ZTA del AISI 316

La Figura 5 (a), (b) y (c) se corresponde con el comportamiento microestructural de la zona térmica afectada del lado del acero inoxidable AISI 316.

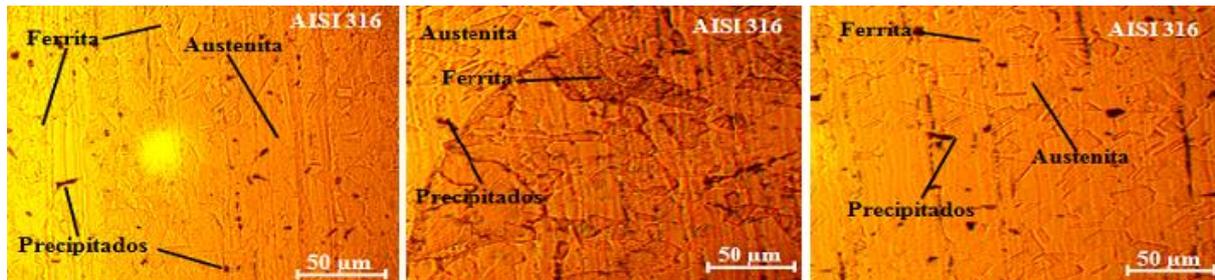


Figura 5. (a) Muestra 1. (b) Muestra 2. (c) Muestra 3.

Las microestructuras obtenidas en la zona afectada térmicamente del lado del acero AISI 316 están compuestas por granos de ferrita en una matriz austenítica, así como la presencia de algunos precipitados. En este lado del acero AISI 316 se presenta una solidificación del tipo austenítico (A). La estructura de solidificación está determinada por la morfología de los cristales sólidos, la cual es resultado de la estabilidad de la interfaz sólido-líquido. La estabilidad de la interfaz depende de la velocidad de la interfaz (sólido-líquido) y del gradiente de temperatura.

Los aceros inoxidables austeníticos usualmente formarán ferrita  $\delta$  cuando son calentados a temperaturas justo debajo de la temperatura del solidus. El grado de formación de ferrita  $\delta$  es normalmente bajo, ya que la transformación de austenita a ferrita es relativamente lenta; esto asociado a que el ciclo térmico en la ZTA es normalmente bastante rápido según consideraciones de Lippold y Kotecki (2005). La presencia de una mayor cantidad de ferrita  $\delta$  puede deberse a que esta fase crece por un proceso de difusión del cromo, reportado por Briones y otros investigadores (2014).

La obtención de un menor tamaño de grano en el lado del acero inoxidable AISI 316 está asociado a la forma geométrica de la pieza; al ser una plancha, ofrece mayor resistencia a ser deformada en la sección donde se produce el calentamiento por fricción, y va a existir una disipación de la temperatura con una menor tendencia a la deformación.

### Comportamiento de la dureza

En la Tabla 3 se reflejan los resultados obtenidos de la dureza en las diferentes muestras según los parámetros empleados en el proceso de soldadura por fricción radial entre el AISI 1045 y el AISI 316.

Tabla 3. Resultados de dureza

Muestras	Variables							
	Velocidad de rotación (r/min)	Presión fricción (MPa)	Presión de forja (MPa)	Tiempo de solda. (s)	Dureza MB (HV)	ZTA 1045 (HV)	ZAT 316 (HV)	ZTMA (HV)
1	1 400	75 MPa	11,25	17	180/217	210	237	305
2	1 400	75 MPa	11,25	16	180/217	215	225	307
3	1 400	75 MPa	11,25	17	180/217	212	235	307

Se observa la variación de la dureza que experimentan las uniones soldadas para valor de rotación y presión constante. Desde el metal base, la dureza se reduce más en la ZTA con respecto a la ZTMA, donde presenta un incremento cerca de la periferia. Los perfiles de microdureza de las zonas soldadas (ZTMA), en todos los casos, mostraron una dureza más elevada como resultado del endurecimiento por precipitación que se produce en la aleación debido a la presencia del silicio. Esta zona presenta una estructura de grano más fina motivado por el rápido enfriamiento del pozo de soldadura.

## Conclusiones

En la unión disímil se determinó que en la ZTMA la estructura está compuesta por las fases martensita-ferrita-perlita, microconstituyentes del AISI 1045 y la austenita-ferrita del AISI 316.

En la ZTA en el AISI 1045 existe una distribución equiaxial de ferrita-perlita con austenita en los límites de granos y en el AISI 316 la presencia de granos de ferrita en una matriz austenítica, pero con la existencia de una menor deformación debido a la forma geométrica de la pieza.

La dureza en las diferentes zonas analizadas presenta variaciones: se incrementa desde 180 HV y 217 HV, respectivamente, hasta 306 HV en la ZTMA, generada por efecto de la fricción.

## Referencias bibliográficas

- ARIVAZHAGAN, N.; SINGH, S.; PRAKASH, S. Y REDDY, G. 2011. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding. *Mater. Des.* 32(5): 3036-3050.
- BADESHIA, H. Y HONEYCOMBE, R. 2006. *Steels*. Third edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- BRIONES, R.; RUÍZ, A.; RUBIO, C. Y CARREON, H. 2014. Caracterización microestructural y mecánica de una soldadura disímil de aceros inoxidables 316L/AL6XN. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.* 34(2): 306-315.
- CABIBBO, M.; MCQUEEN, H.; EVANGELISTA, E.; SPIGARELLI, S.; DI PAOLA M. Y FALCHERO A. 2007. Microstructure and mechanical property studies of AA6056 friction stir welded plate. *Materials Science and Engineering A.* (460-461): 86-94.
- CABOT, P. 2003. Soldadura por fricción agitación (FSW) De AA 6061 T6. *Matéria* 8(2): 187-195.
- CORREA, E. 2010. Influence of clad metal chemistry on stress corrosion cracking behaviour of stainless steels claddings in chloride solution. *Engineering* 2(5): 391-396.
- CHANDER, G.; REDDY, G. Y TAGORE, G. 2013. Influence of process parameters on impact toughness and hardness of dissimilar AISI 4140 and AISI 304 continuous drive friction welds. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 64(9-12): 1445-1457.
- DAVIS, J. 1993. Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining. In *ASM Handbook Vol. 6: Welding, Brazing, and Soldering* 6(2): 789-829.
- LIPPOLD, J. Y KOTECKI, D. 2005. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. John Wiley & Sons, Inc.
- LUNDIN, C. D. 1982. Dissimilar metal welds-transition joints literature review. *Welding Journal* 61(2): 58-63.
- LLEWELLYN, D. Y HUDD, R. 1998. *Steels: Metallurgy and Applications*. 3rd edition. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- MAALEKIAN, M. 2007. Friction welding-critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining* 12(3): 738-759.

REDDY, G.; RAO, K. Y SEKHAR, T. 2008. Microstructure and pitting corrosion of similar and dissimilar stainless steel welds. *Sci. Technol. Weld. Join* 13(4): 363-377.

SHAFER, J. 2014. Soldadura por fricción (Friction Stir Welding). 24 p. Disponible en: [http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro\\_ma/19.pdf](http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/19.pdf).

SINGH-SIDHU, M. Y SINGH-CHATHA, S. 2012. Friction Stir Welding-Process and its Variables: A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(12): 275.

SCHNEIDER, J. Y NUNES, A. JR. 2004. Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld. *Metall. Mater. Trans. B.* 35(14): 777-783.