

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA POR ELECTROPUNTO EN LÁMINAS DE ACERO AISI 1015 GALVANIZADO

J. Andrade^{a*}, Y. Rico^b

^a Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO. Núcleo Carora, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Casco Colonial. Carora, Venezuela

^b Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO, Vice rectorado Barquisimeto, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Avenida Corpahuaico. Barquisimeto, Venezuela.

*Autor de correspondencia, email: joseagustinandrade@gmail.com

Recibido: Noviembre 2016. Aprobado: Mayo 2018.

Publicado: Junio 2018.

RESUMEN

Láminas de acero galvanizadas son ampliamente utilizadas en la industria, siendo el proceso de soldadura por electropunto un método empleado frecuentemente para su ensamblaje. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar microestructuralmente soldaduras de electropunto en láminas de acero galvanizadas con diferentes espesores de recubrimiento. La caracterización microestructural se realizó mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Se realizaron ensayos de desabotonado y perfiles de dureza en las soldaduras. Los ensayos de desabotonado mostraron que todas las soldaduras tienen un tamaño del núcleo, superior al mínimo requerido, garantizando fusión en el proceso de soldadura. Las soldaduras presentan tres zonas definidas, la zona de fusión (ZF), la zona afectada por el calor (ZAC), compuesta por una zona de grano grueso (ZGG) y la zona intercrítica (ZIC); y el material base (MB). Al comparar las microestructuras de las láminas soldadas con diferentes recubrimientos se encontró que la ZAC aumentan de tamaño, con el aumento del espesor de recubrimiento, esto se atribuye a que el recubrimiento disminuye la transferencia de calor, lo que hace que la velocidad de enfriamiento disminuya y aumente en tamaño la ZAC. En los perfiles de dureza se observa, que las mayores durezas se encontraron en las soldaduras de láminas con recubrimiento G35. Se concluye que el espesor del recubrimiento de las láminas galvanizadas con soldaduras por electropunto, influye en la microestructura de las soldaduras, afectando el tamaño y morfología de las distintas zonas.

Palabras claves: Soldadura por electropunto, zona intercrítica, acero galvanizado.

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION SPOT WELDING ON SHEETS STEEL AISI 1015 GALVANIZED

ABSTRACT

Galvanized steel sheets are widely in used in industrial and spot welding process is a method frequently used for assembly. This work aims to characterize microstructural spot welds in galvanized steel sheets with different coating thicknesses. Microstructural characterization was done using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Peel testing and hardness profiles welds were made. The peel testing assays showed that all welds have a core size, above the minimum required, ensuring fusion welding process. Welds have three distinct areas, the fusion zone (ZF), the heat affected zone (HAZ), consisting of a coarse grain zone (CGZ) and the intercritical region (ICZ); and base material (BM). By comparing the microstructures of welded sheets with different coatings it was found that the HAZ increase in size with increasing coating thickness, this is attributed to the coating decreases heat transfer, which makes the cooling rate decreases and increase in size of the HAZ. Hardness profiles observed that higher hardnesses were found in the sheets coated G35. It is concluded that the coating thickness of the sheets with spot welds galvanized influences the microstructure of the welds, affecting the size and morphology of the different areas.

Keywords: Spot welding, intercritical zone, steel galvanized.

INTRODUCCIÓN

El galvanizado es un recubrimiento de gran utilidad y efectividad contra la corrosión ambiental del acero, existen diversos procesos para realizar el galvanizado, destacándose el método de inmersión en caliente [1]. Las láminas de acero galvanizadas son ampliamente utilizadas en múltiples áreas, entre estas se pueden mencionar la industria automotriz y la de construcción, en muchas ocasiones es necesario emplear procesos de soldadura para el ensamblaje de partes de acero galvanizado y es común observar láminas de acero galvanizadas, soldadas por electropunto. [2]

Sin embargo, en el proceso de soldadura por electropunto de acero galvanizado se pueden presentar una serie de dificultades, ya que el recubrimiento de cinc modifica la resistencia de contacto en las intercaras de trabajo, ver Figura 1, requiriendo un mayor aporte de corriente de soldadura para formar una junta que cumpla con los requerimientos de calidad. Este aumento en la corriente de soldadura trae consigo, un aumento de la temperatura en las intercaras de contacto, generando la posible vaporización del cinc del recubrimiento y por lo tanto la posible formación de fases Zn/Cu (Cobre proveniente de los electrodos de trabajo); cambios en la microestructura y en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas, si estas son comparadas con láminas de acero sin recubrimiento de cinc. [2 y 3]

En vista de lo anteriormente expuesto, este trabajo tiene como objetivo la caracterización microestructural de soldaduras por electropunto de láminas de acero AISI 1015, con recubrimientos de cinc de diferentes espesores, galvanizadas por inmersión en caliente.

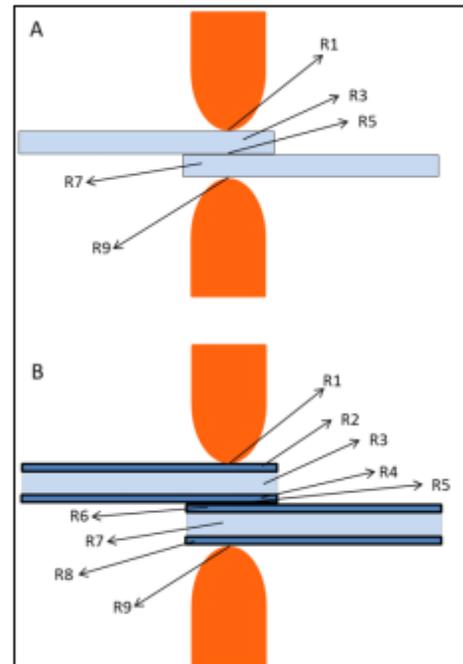


Fig. 1. Esquema de puntos de resistencia en el área de trabajo de la soldadura por electropunto. A) Láminas de acero sin recubrimiento, B) Láminas de acero con recubrimiento. [3]

Soldadura por electropunto en láminas de acero galvanizadas

La soldadura por electropunto es un tipo de soldadura por resistencia, donde el calor se genera por medio de una corriente eléctrica de elevada intensidad que se hace circular con ayuda de dos electrodos durante un corto espacio de tiempo, a través de la unión que se desea soldar. Los metales que constituyen la unión ofrecerán una resistencia al paso de la corriente, y por tanto, se generará un calor, que será máximo en la intercara de las piezas (zona de unión), ya que la resistencia al paso de la corriente también es máxima en esa zona [4].

En este proceso de soldeo, aparte de requerirse el paso de corriente eléctrica, es necesario aplicar una presión durante y después del paso de la corriente para conseguir la unión de los metales. Las principales variables que intervienen en el proceso de soldadura por electropunto son la corriente eléctrica aplicada, el tiempo de soldeo y

la presión de soldeo que se ejerce a través de los electrodos de trabajo.

El calor generado, Q en el proceso de soldadura por electropunto se puede describir según la ecuación 1, donde k es una constante de calibración, R es la resistencia eléctrica total del circuito, I es la corriente de soldadura y t el tiempo de soldeo.

$$Q = kI^2Rt \quad (1)$$

La corriente eléctrica y el tiempo de soldeo se pueden variar al ajustar los parámetros de soldadura, mientras que resistencia depende de los materiales a soldar. Hay dos tipos de resistencia presente en los procesos de soldadura por electropunto, una es la resistividad del material y la otra es la resistencia que se genera en las intercaras de contacto o resistencia de contacto. La resistividad del material depende básicamente de la composición del material y varía con la temperatura, mientras que la resistencia de contacto depende de la presión de los electrodos de trabajo, rugosidad o características de la superficie y temperatura. [4]

Para aceros galvanizados existen varios puntos de resistencia en el área de trabajo de la soldadura por electropunto, (Ver la Figura 1) R1: En el punto de contacto entre el electrodo y el recubrimiento de cinc de la lámina superior, R2: En el recubrimiento de cinc de la lámina superior, R3: En la lámina de acero superior, R4: En el recubrimiento de cinc de la lámina superior, R5: En la intercara entre los recubrimientos de cinc de la lámina superior e inferior, R6: En el recubrimiento de cinc de la lámina inferior, R7: En la lámina de acero inferior, R8: En el recubrimiento de cinc de la lámina inferior, R9: En el punto de contacto entre el recubrimiento de cinc de la lámina inferior y el electrodo. Las resistencias están en serie, y cada punto de resistencia retardará el flujo de la corriente. La resistencia en el punto R5, genera el calor necesario para la fusión en las intercaras de contacto y la unión posterior de los materiales. En esta parte del circuito se forma el punto o botón de soldadura.

La presencia del recubrimiento de cinc en las superficies de los aceros disminuye la resistencia de contacto R1, R5 y R9; y en consecuencia se genera una disminución de las temperaturas en estos puntos, requiriendo un mayor aporte de corriente de soldadura para formar satisfactoriamente el botón de soldadura, ver la Figura 2. [5].

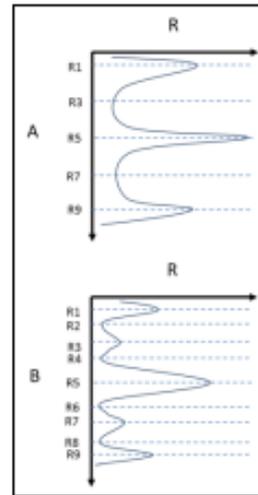


Fig. 2. Puntos de resistencia en la soldadura por electropunto. A) Láminas sin recubrimiento, B) Láminas con recubrimiento. [3]

MATERIALES Y MÉTODOS

Los recubrimientos galvanizados fueron obtenidos por inmersión en caliente y realizados en la empresa Techoduro C.A, ubicada en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela. Los recubrimientos se fabricaron siguiendo los estándares de la empresa en cuanto a la preparación superficial de las láminas de acero AISI 1015 de 0,9 mm de espesor. Las láminas de acero se desengrasaron, para el decapado se sumergieron en una solución de ácido clorhídrico, se realizó un fluxado con cloruro de amonio y se secaron con aire a temperatura ambiente. La temperatura del baño líquido de cinc puro fue de 450°C, los recubrimientos fabricados fueron clasificados según la norma ASTM A-123 [6] en recubrimientos tipo G35, G50 y G100, los cuales tienen un espesor de 35 μm (en promedio 17,5 μm en cada lado), 50 μm (en promedio de

25 μm en cada lado) y 100 μm respectivamente (en promedio de 50 μm en cada lado).

El procedimiento de soldadura por electropunto para las láminas de acero con los diferentes espesores de galvanizado, se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma AWS C1.1, [7 y 8] utilizando una máquina marca British Federal, Welder& Machine CO. Los parámetros del proceso de soldadura por electropunto, se determinaron realizando pruebas piloto, donde se aumentaba gradualmente la corriente, para posteriormente determinar, mediante ensayo de desabotonado, la existencia de núcleo de fusión o punto y el diámetro de ésta; el cual debe adecuarse con los requerimientos de la norma UNE-EN ISO 14329,[9] la cual indica que el núcleo debe poseer como mínimo 4 mm de diámetro para láminas con espesor menor a 1,5 mm; los parámetros determinados luego de las pruebas piloto se pueden observar en la Tabla 1.

Para la caracterización microestructural se cortaron transversalmente las láminas soldadas y se realizó una preparación metalográfica mediante el procedimiento convencional, las muestras fueron analizadas mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Los ensayos de desabotonado aplicados a las soldaduras por electropunto se realizaron bajo las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 14329, cómo se indicó anteriormente. Los perfiles de dureza en las muestras soldadas se realizaron con un microdurómetro Vickers aplicando una carga de 100 g, tomando mediciones de microdureza desde el centro de la soldadura en la zona de fusión, pasando por la zona afectada por el calor hasta el material base, con una separación en cada medición de 100 μm .

Tabla 1. Parámetros del proceso de soldadura por electropunto.

Parámetros	
Diámetro del electrodo	7 mm
Forma del electrodo	Tipo E Truncada
Presión de los electrodos	190,6 N
Tiempo total de soldadura	60 ciclos
Corriente de soldadura	10 kA

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos de desabotonado mostraron que todas las muestras soldadas tienen un tamaño del núcleo superior al mínimo requerido por la norma, ver Tabla 2 (4mm de diámetro para láminas con espesor menor a 1,5 mm), por lo cual se da garantía de que existe fusión en el proceso de soldadura. También se observa que a mayor espesor de recubrimiento hay menor tamaño del núcleo, lo que indica que un aumento del espesor del recubrimiento de cinc, ocasiona un decrecimiento de la resistencia de la soldadura en diversos puntos de la zona de trabajo, ver Figura 2. Esta disminución de la resistencia trae consigo un menor aporte de calor en la soldadura. Si se requiere un mayor aporte de calor se debe aumentar la corriente de soldadura.

Tabla 2. Diámetro del punto o botón para los diferentes tipos de recubrimientos.

Tipo de recubrimiento	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D ₃ (mm)	Diámetro promedio (mm)
G35	5,85	6,1	6,2	6,05
G50	5,75	5,9	5,8	5,82
G100	5,65	5,65	5,6	5,63

En la Figura 3 se puede observar una micrografía óptica de la soldadura por electropunto realizada a la lámina de acero con recubrimiento G35, todas las soldaduras presentan 3 zonas definidas, la zona de fusión (ZF) o el punto, la zona afectada por el calor (ZAC) y el material

base (MB). Dentro de la ZAC se observan dos áreas con diferentes microestructuras; el área del anillo o de grano grueso (ZGG) con microestructura ferrítica, ubicada luego de la zona de fusión; y posterior a esta una zona con dos morfologías diferentes de ferrita la cual se identificará como zona intercrítica (ZIC). [10]

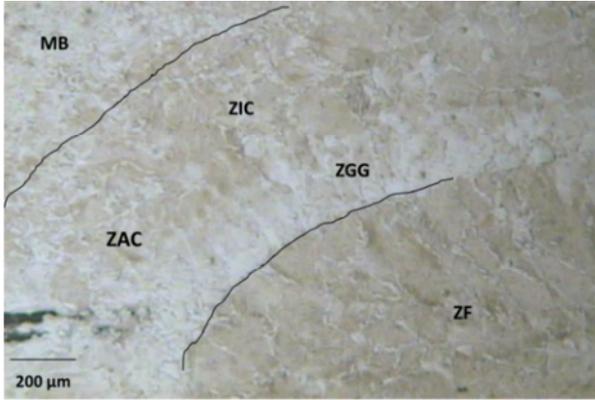


Fig. 3. Micrografía óptica de la soldadura por electropunto con recubrimiento G35, se muestran la zona de fusión (ZF), las zona afectada por el calor (ZAC): Zona de grano grueso (ZGG) y la zona intercrítica (ZIC); y el material base (MB).

La ZF se caracteriza por poseer una microestructura básicamente de ferrita con morfología acicular (Ver la Figura 4), debido a la rápida velocidad de solidificación que se presenta en la zona del punto. En este proceso de soldadura, una vez fundida la zona del punto o núcleo, el enfriamiento interno con agua de los electrodos actúa como un gran disipador de calor y las láminas de acero también transfieren el calor hacia los lados, ocasionando altas velocidades de enfriamiento.

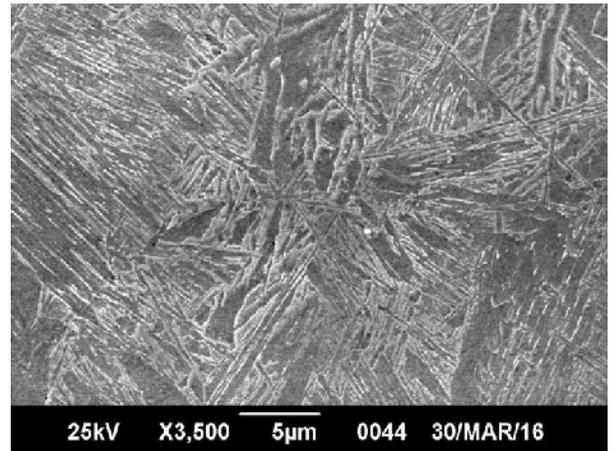


Fig. 4. Micrografía por MEB de la soldadura por electropunto con recubrimiento G50, se muestra la formación de ferrita acicular en la zona de fusión (ZF).

La ZAC está conformada por la ZGG o anillo y la ZIC. La ZAC en espesores de recubrimiento G35 es aproximadamente 1200μm, para recubrimientos G50 aproximadamente 1500μm y para recubrimiento G100 aproximadamente 1800μm. La ZGG se ubica alrededor del punto o zona fundida, presenta una estructura básicamente de ferrita equiaxial de gran tamaño con respecto al material base (MB), ver la Figura 5.A. La temperatura en esta zona supera la temperatura de austenización para este tipo de acero, temperatura crítica superior AC3, ya que el calor que se genera en el punto se transfiere hacia esta zona y se produce un crecimiento de grano austenítico con posterior formación de ferrita equiaxial de gran tamaño. [8 y 10]

La ZIC, la cual se encuentra dentro de la zona afectada por el calor, presenta una estructura conformada por ferrita equiaxial y ferrita alotriomórfica, como se puede observar en la Figura 5.B. Esta microestructura con diferentes morfologías de la ferrita se origina debido a que esta zona (ZIC) alcanza temperaturas que se encuentra entre la temperatura crítica superior (AC3) y la temperatura crítica inferior (AC1), con posterior enfriamiento rápido, originándose una transformación parcial en la morfología de la ferrita. Finalmente, el MB muestra la microestructura típica de un acero de bajo

carbono con ferrita y perlita con deformación plástica producto del proceso de laminación, ver Figura 6. [10]

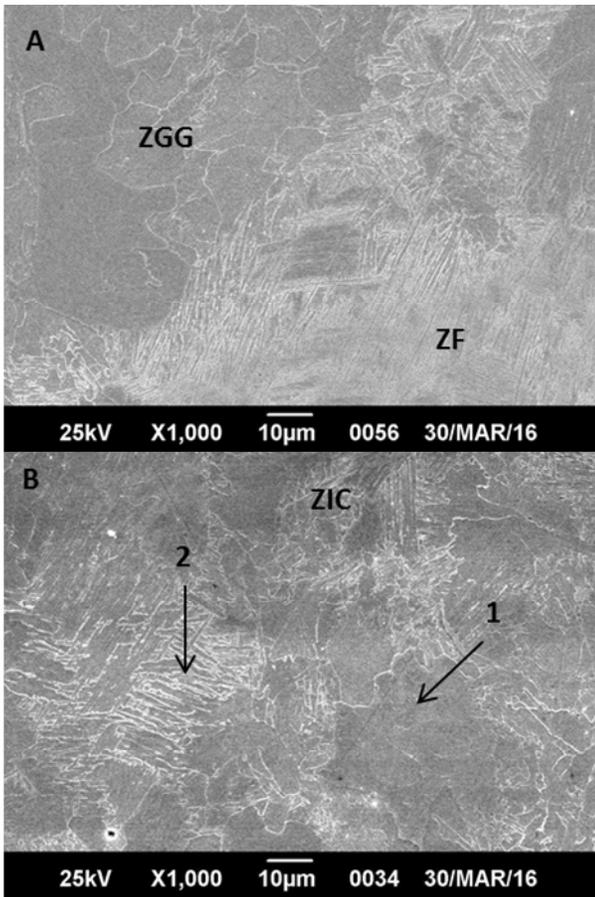


Fig. 5. Micrografía por MEB de la soldadura por electropunto con recubrimiento G100, A) Se muestra la ZGG con ferrita equiaxial de gran tamaño, con respecto al MB, y adyacente a la ZF; B) Se observa la ZIC conformada por ferrita equiaxial (1) y ferrita alotriomórfica. (2)

Al comparar las microestructuras de las láminas soldadas con diferentes espesores de recubrimientos se encontró que la ZIC y la ZGG aumentan de tamaño, aproximadamente 400 μm en ZGG y 800 μm en ZIC para G35, 500 μm en ZGG y 1000 μm en ZIC para G50 y 600 μm en ZGG y 1200 μm en ZIC para G100, a medida que aumenta el espesor, esto se atribuye a que el recubrimiento disminuye la transferencia de calor, una vez soldadas las láminas, lo que hace que la velocidad de enfriamiento disminuya y aumente el tamaño de la ZAC. [8]

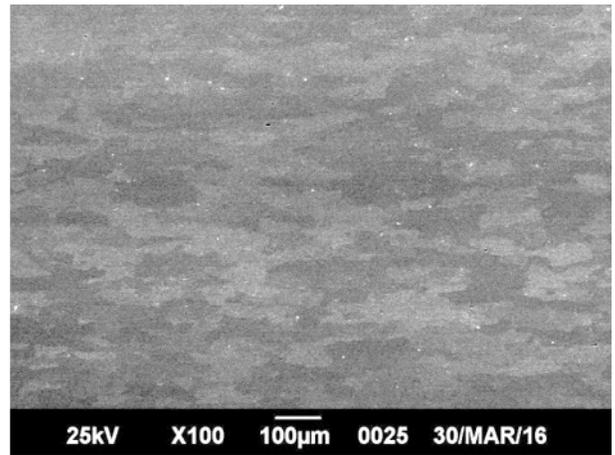


Fig. 6. Micrografía por MEB de la soldadura por electropunto con recubrimiento G35, se muestra el material base (MB).

Cabe destacar que en el proceso de soldadura para las láminas de acero con recubrimiento tipo G35, se observó la pérdida del cinc luego de la soldadura, quedando el acero descubierto; para las láminas de acero con recubrimientos G50 y G100, se observó que se mantenían los recubrimientos luego de la soldadura.

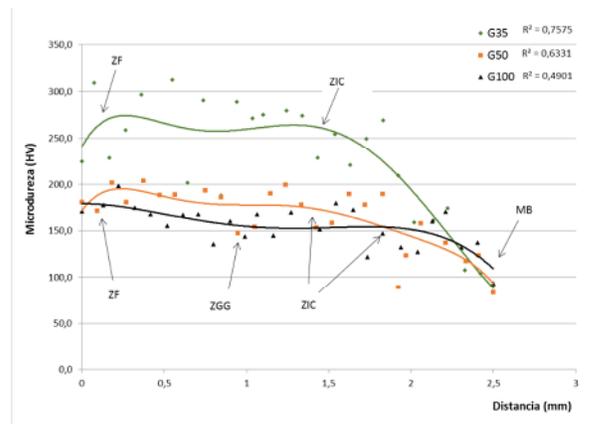


Fig. 7. Perfiles de microdureza de las láminas de acero galvanizadas, soldadas por electropunto.

En la Figura 7 se pueden observar los perfiles de microdureza de las soldaduras de láminas galvanizadas con los diferentes tipos de recubrimiento, las mediciones de microdureza se realizaron desde el centro de la soldadura en la ZF, pasando por la ZAC hasta el MB. Los perfiles de microdureza muestran un comportamiento

similar en las soldaduras, donde las durezas en la zona de fusión son mayores en un 29,03%, en la ZAC disminuyen ligeramente en un 26,23%, y aumentan nuevamente en la ZIC en un 26,60%, disminuyendo hasta el metal base en un 18,11%. Las durezas de las soldaduras de las láminas con recubrimiento G35 son mayores, en un 41,83%, al compararse con los otros recubrimientos. Como se comentó anteriormente en el proceso de soldadura de las láminas con recubrimiento G35, se presentaron pérdida del cinc, dejando el acero descubierto, esto aumenta la transferencia de calor hacia el exterior de las láminas, aumentando la velocidad de enfriamiento en las mismas. Por otra parte, este tipo de recubrimiento es el que ofrece la mayor resistencia de los tres tipos. Por lo tanto, el calor generado y las temperaturas son mayores que para los recubrimientos G50 y G100, generando un mayor gradiente de temperatura, entre la zona de fusión y el metal base, lo que podría ocasionar un aumento de la dureza.

CONCLUSIONES

Se concluye que las soldaduras presentan 3 zonas definidas, la zona de fusión (ZF) o el punto, la zona afectada por el calor (ZAC) y el material base (MB), en la ZAC se observan el área del anillo o de grano grueso, con respecto al material base (ZGG) y una zona con dos morfologías de ferrita: equiaxial y alotriomórfica, identificada como zona intercrítica (ZIC).

El espesor del recubrimiento de las láminas galvanizadas con soldaduras por electropunto, influye en la microestructura de las soldaduras, afectando el tamaño de la zona afectada por el calor (ZAC).

El tamaño del núcleo o punto de las soldaduras disminuye a medida que aumenta el espesor del recubrimiento, debido a que se disminuye la resistencia y por ende el calor en el proceso de soldadura.

Se observa un incremento de la dureza para las láminas de acero con recubrimiento del tipo G35, debido a la

pérdida del recubrimiento de cinc en el proceso de soldadura.

REFERENCIAS

- [1] Rico, Yraima. (2012). “Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros”. *Revista Redip, Unexpo VRB*, Vol 2, N° 5.
- [2] Peinado, Niurka. (2010). “Calificación del proceso de soldadura por resistencia eléctrica de una línea de ensamblaje de la planta Toyota Venezuela” *Universidad de Oriente*. Pág 24-32.
- [3] Miguel Delgado (2014). “Soldabilidad de aceros IF y HSLA galvanizados para aplicación automotrices” *Universidad Autónoma de Nueva León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*.
- [4] Hongyan Zhang, Jacek Senkara. (2006). “Resistance Welding. Fundamentals and Applications”. *Taylor & Francis Group*. Florida, pp.1-17.
- [5] Kevin Randall Chan (2005). “Weldability and Degradation Study of Coated Electrodes for Resistance Spot Welding”. *University of Waterloo*.
- [6] American Society for Testing and Materials, (2002). “Norma ASTM A-123: “Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products”, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 01.06
- [7] American Welding Society, (2012). “AWS C1.1: Recommended practices for resistance welding” *International Standard Book Number: 978-0-87171-803-7*.
- [8] H.C. Lin et al (2018). “Effects of zinc layer thickness on resistance spot welding of galvanized mild Steel”. *Journal of Materials Processing Tech.* 250. 205-2013.
- [9] International Organization for Standardization (2015). “UNE-EN ISO 14329: Resistance welding.

Testing of welds. Peel and chisel testing of resistance spot and projection welds”.

- [10] ASM Metal handbook. (2006) “Welding, Brazing, And Soldering” ASM International. U.S.A, pp. 177-229.
- [11] M. Tumuluru (2007). “The Effect of Coatings on the Resistance Spot Welding Behavior of 780 MPa Dual-Phase Steel”. *Welding Journal*, Vol. 86: 161-169.
- [12] M. I. Khan, M. L. Kuntz, E. Biro and Y. Zhou (2008). “Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels” *Materials Transactions*, Vol. 49: 1629 -1637.
- [13] P. Marashi et al (2008). “Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels”. *Materials Science and Engineering, A* 480: 175–180.