

EVALUACIÓN DE UNA SOLDADURA POR ELECTROPUNTO EN LAMINAS DE ACERO AISI 1015 GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE

¹Andrade, José Agustina y ²Rico, Iraitab.

¹Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO. Núcleo Carora, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Casco Colonial. Carora, Venezuela

²Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” UNEXPO, Vice rectorado Barquisimeto, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Avenida Corpahuaico. Barquisimeto, Venezuela.

Recibido (18/01/18), aceptado (23/03/18)

Resumen: El acero galvanizado es ampliamente utilizado y el proceso de soldadura por electropunto es un método empleado para su ensamblaje. El objetivo central es evaluar una soldadura por electropunto en láminas de acero AISI 1015 galvanizado por inmersión en caliente. Las soldaduras presentan 3 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, la ZAC aumenta 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. La corrosión presente fue corrosión localizada. En el ensayo electroquímico, los iones de cinc forman productos de corrosión $Zn(OH)_2$ provenientes de la interacción con los iones de sulfato y cloruro. Se concluye que el espesor del recubrimiento influye en la microestructura de las soldaduras, afectando el tamaño y morfología de las zonas y el recubrimiento de cinc cuando está en contacto con la solución acidificada, en un tiempo corto, forma un efecto sinérgico de inhibición.

Palabras Clave: Acero galvanizado, corrosión localizada, soldadura por electropunto y zona intercrítica.

EVALUATION OF SPOT WELDING ON SHEETS STEEL AISI 1015 HOT DIP GALVANIZED

Abstract: Galvanized steel is widely used and the electropump welding process is a method used for its assembly. The main objective is to evaluate of spot welding on sheets steel AISI 1015 galvanized. 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. The corrosion present was localized corrosion. In the electrochemical test, the zinc ions form corrosion products $Zn(OH)_2$ from the interaction with the sulfate and chloride ions. It is concluded that the thickness of the coating influences the microstructure of the welds, affecting the size and morphology of the areas and the zinc coating when in contact with the acidified solution, in a short time, forms a synergistic inhibiting effect.

Key words: Steel galvanized, localized corrosion, spot welding, intercritical zone.

I. INTRODUCCIÓN

El recubrimiento galvanizado es un proceso que brinda protección catódica al acero. Cuando el daño se produce en el acero galvanizado, el cinc del recubrimiento se sacrifica y se corroe para proteger al acero. El recubrimiento de cinc se corroe a una velocidad más lenta que el sustrato de acero haciendo que el acero galvanizado tenga una duración hasta tres veces mayor que el acero pintado, lo que lo hace especialmente atractivo como opción contra la corrosión.

Uno de los posibles efectos de corrosión en láminas galvanizadas se debe a la utilización de soldadura como medio de ensamble industrial. Este proceso puede generar la pérdida parcial o total de la capa de cinc por la formación del arco eléctrico y por ende que el acero este en contacto con el medio ambiente haciéndose más vulnerable. Un proceso industrial de soldadura frecuentemente utilizado para la unión de láminas galvanizadas es la soldadura por electropunto.

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 Fig. 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 [1].

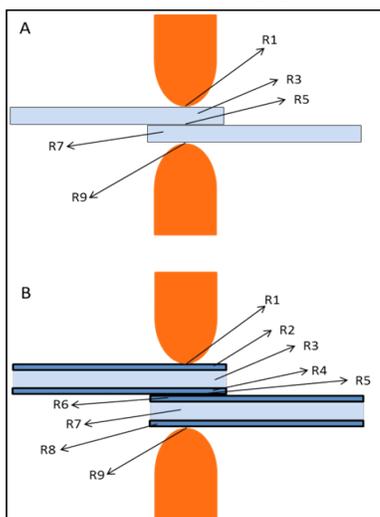


Figura 1: Esquema de puntos de resistencia en el área de trabajo de la soldadura por electropunto. A) Láminas

de acero sin recubrimiento, B) Láminas de acero con recubrimiento [2].

Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo estudiar la evaluación de la soldadura por electropunto en láminas de acero AISI 1015 galvanizadas por inmersión en caliente con el fin de evaluar el comportamiento a la corrosión en diferentes ambientes. Se evaluaron las soldaduras de láminas galvanizadas con tres diferentes tipos de espesor de recubrimiento G35, G50 Y G100 (Norma ASTM A-123) [3], los parámetros del proceso de soldadura se mantuvieron constantes para todos los recubrimientos.

Para obtener los resultados de este trabajo se determinó la calidad de la soldadura de electropunto en las láminas, mediante ensayos de desabotonado y perfiles de dureza. Así mismo, se efectuó el análisis Microestructural a través de microscopía óptica (MO), y microscopía electrónica de barrido (MEB). Por otra parte, se determinó el comportamiento a la corrosión de las muestras mediante ensayos gravimétricos y electroquímicos en dos soluciones corrosivas y, se estableció el mecanismo de corrosión de las láminas soldadas con diferentes espesores de recubrimiento de cinc a través de ecuaciones matemáticas.

II. DESARROLLO

I.- MATERIALES

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 (ver Fig. 2.B) y se secaron con aire a temperatura ambiente. La temperatura del baño líquido de cinc puro fue de 450°C (ver Fig. 2.C), los recubrimientos fabricados fueron clasificados según la norma ASTM A-123 [3] 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).



Figura 2: Proceso de galvanizado por inmersión en caliente. A) Corte de lámina de acero en tiras, B) Proceso de fluxado con cloruro de amonio y C) Inmersión en baño de cinc a 450°C y D) Corte de las tiras galvanizadas en las distintas medidas para los ensayos.

III.- METODOLOGÍA

III.1.- Procedimiento de soldadura por electropunto.

El procedimiento de Soldadura de Electropunto se realizó a través de la norma AWS C1.1. [4]. Los parámetros del proceso de soldadura por electropunto utilizados, tales como presión de los electrodos, corriente de soldadura y tiempo de aplicación son constantes para todos los espesores de recubrimientos utilizados (ver tabla I). Es de destacar la importancia del calor generado, Q , en el proceso de soldadura por electropunto para efecto del cambio de morfología en las microestructuras. Este se puede describir según la ecuación 1.

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

Donde;

Q = Calor generado por la soldadura.

K = Constante de calibración.

R = Resistencia eléctrica total del circuito.

I = Corriente de soldadura.

T = Tiempo de soldeo.

TABLA I. PARÁMETROS DE SOLDADURA PARA LAS LÁMINAS GALVANIZADAS CON DIFERENTES ESPESORES DE RECUBRIMIENTO

PARAMETROS	
Diámetro del Electrodo	7mm
Horma del Electrodo	Tipo E Truncada
Presión de los Electrodos	190,6 N
Tiempo de Soldadura	60 ciclos
Corriente de Soldadura	8200 A

III.2.- Ensayo de desabotonado.

El ensayo de desabotonado se realizó bajo las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 14329 [5] y la ASME Sección IX [6]. La finalidad de este ensayo es determinar si hay presencia del núcleo, pepita o lenteja lo cual significa que se han soldado las láminas. Esto se puede observar en la Fig. 3.



Figura 3: Sujeción de la Probeta en la prensa para el ensayo de desabotonado

III.3.- Análisis microestructural.

Para la preparación metalográfica de las probetas galvanizadas y soldadas por electropunto se realiza el siguiente procedimiento basado en la norma ASTM E-3 [7]. Las probetas fueron observadas a través del microscopio óptico (MO) y electrónico de barrido (MEB) para identificar: la zona de fusión, zona parcialmente fundida, zona afectada por el calor y material base, detallando fases, morfología y tamaño.

II.4.- Perfil de dureza.

Se utilizó un microdurómetro de escala Vickers basándose en la Norma COVENIN 616-89 [8], tomando mediciones de dureza desde el centro del punto de soldadura o pepita pasando por la zona afectada por el calor hasta el material base, con una separación de cada medición de 100 μ m (0,1mm).

II.5.- Ensayo de corrosión.

Las probetas soldadas por electropunto son sometidas a ensayos de corrosión según las normas ASTM G-31 [9], para el método gravimétrico, y ASTM G5 [10], para

el método electroquímico. Se utilizaron dos soluciones, una solución de NaCl con una concentración de 3,5 % (pH = 5,7) y otra para la solución de NaCl acidificada con una concentración de 3,5 % NaCl y 1 ml de H2SO4 al 98% (pH = 4).

Para el ensayo gravimétrico se sumergen las probetas por un tiempo de 720hrs. (30días), sin agitación a una temperatura entre 30 a 35°C (ver Fig.4). Los cálculos para determinar la velocidad de corrosión corresponden a la ecuación 2.

$$VC = \frac{K*W}{D*A*t} \quad (2)$$

Donde:

W: Pérdida de peso en gr.

D: Densidad del material en gr/cm3.

A: Área del material en cm2.

t: Tiempo de exposición en horas

K: (3,45x106 para obtener mpy)

VC: Velocidad de corrosión en mpy.



Figura 4: Ensayo gravimétrico para las probetas con recubrimiento G35, G50 y G100 sumergidas en NaCl al 3.5% (derecha) y NaCl al 3.5% acidificado (izquierda).

Para determinar la velocidad de corrosión por el método electroquímico se registra su potencial de corrosión durante aproximadamente 30 min (ver Fig. 5). Los datos de corriente y potencial fueron procesados posteriormente para obtener las curvas de polarización a través de la ecuación 3 de la velocidad de corrosión.

$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW$$

Donde:

CR = Velocidad de corrosión (mpy).

K1 = Constante de conversión.

icorr = Densidad de corrosión (µA/cm2)

ρ = Densidad de la aleación (gr/cm3)

EW = Peso de la aleación



Figura 5: Montaje de los ensayos electroquímicos. Se muestra la celda inmersa en el baño termostatzado, el potencióstato, el convertidor analógico digital, la base de tiempo y la computadora de escritorio.

III.6.- Análisis macroestructural.

Este ensayo se realizó a las probetas corroídas por el ensayo gravimétrico en el cual se observa y se detalla los daños corrosivos en la zona afectada por el calor y la zona fundida.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

IV.1.-Procedimiento de soldadura por electropunto.

Para encontrar los parámetros de soldadura primero se realizaron pruebas pilotos con posterior ensayo de desabotonado a cada lámina soldada. El calor generado se encontró a través de la ecuación (1). Los parámetros de soldadura utilizados para el estudio se observan en la tabla II.

Tabla II: Parámetros de soldadura para las láminas galvanizadas con diferentes espesores de recubrimiento

Recubrimiento	TIEMPO (seg)	PRESIÓN (N)	Corriente de Soldadura (A)	Resistencia (Ω)	Calor Generado (Joule)
G35	1	190,6	8200	0,060430000584	4063313,2393
G50				0,060430000835	4063313,2561
G100				0,060430001669	4063313,3123

En el proceso de soldadura para las láminas de acero con recubrimiento tipo G35, se observó la pérdida parcial del cinc luego de la soldadura, provocando que el acero quede al desnudo; para las láminas de acero con recubrimientos G50 y G100, se mantenían los recubrimientos luego de la soldadura. En la Fig 6, se detalla las probetas soldadas con los parámetros mencionados en la tabla II.

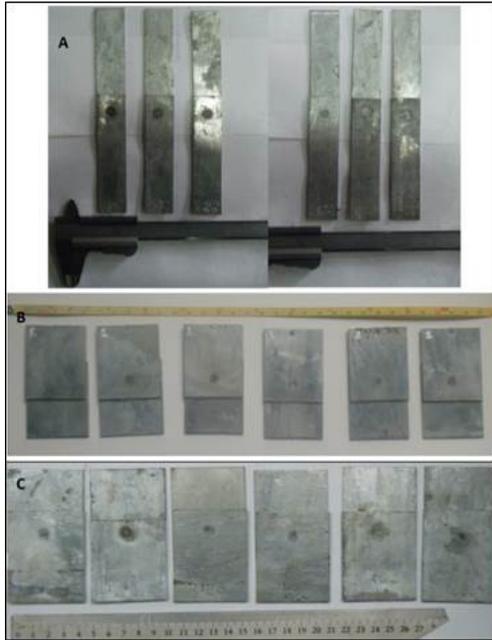


Figura 6: Probetas soldadas por electropunto. A) Probetas para el ensayo de desabotonado, B) Probetas para el análisis microestructural y dureza y C) Probetas para el ensayo de corrosión.

IV.2.- Ensayo de desabotonado.

En la Fig. 7 se puede observar el resultado del ensayo de desabotonado.



Figura 7: Probeta PG35 después de realizar el ensayo de desabotonado.

En la tabla III se muestran los diámetros promedio de la pepita de las soldaduras por electropunto al someterlas al ensayo de desabotonado.

TABLA III: Diámetro promedio de perforación en las probetas a través del ensayo de desabotonado.

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

Todas las probetas tienen tamaño del núcleo superior al mínimo requerido por lo cual se da garantía de que existe fusión producto de la 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 [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.

IV.3.- Análisis Microestructural

La Fig. 8 se muestra la microestructura con recubrimientos G35. Se observa los cuatro tipos de zonas que se encuentran en las soldaduras por electropunto.

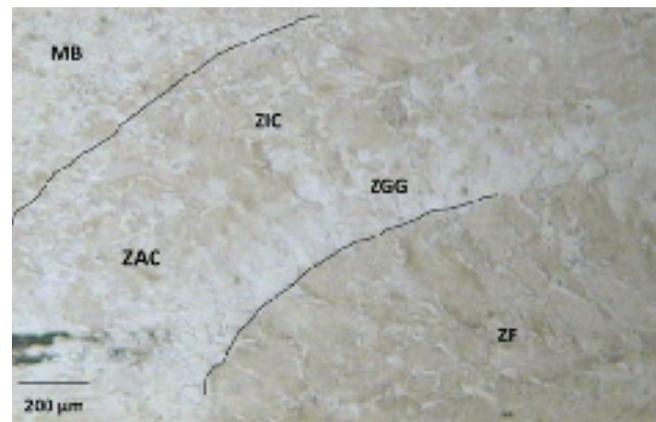


Figura 8: Micrografía óptica de la soldadura por electropunto con recubrimiento G35, se muestran la zona de fusión (ZF), las zona afectada por el calor (ZAC): Zona de grano grueso (ZGG) y la zona intercrítica (ZIC); y el material base (MB).

La microestructura de la probeta con recubrimiento G35 (ver Fig. 8) presenta una zona fundida (ZF) que es el núcleo o pepita de la soldadura. Dentro de la ZAC se observan dos áreas diferentes; el área del anillo o de grano grueso (ZGG), 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). El metal base (MB) es la estructura sin modificación o alteración de la soldadura y corresponde a la estructura típica del acero en estudio. Es importante resaltar que estas mismas morfologías están representadas en las demás probetas con recubrimientos G50 y G100 respectivamente. La ZAC en espesores de recubrimiento G35 es aproximadamente 1200 μm , para recubrimientos G50 aproximadamente 1500 μm y para recubrimiento G100 aproximadamente 1800 μm

La Fig. 9 muestra la microestructura de la zona fundida para todos los espesores de recubrimiento.

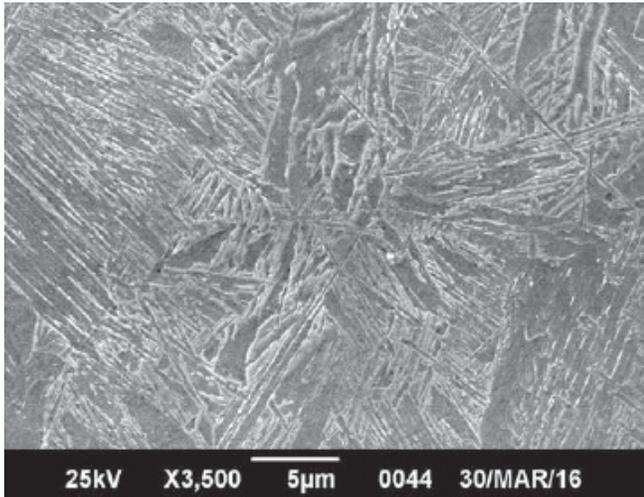


Figura 9: Micrografía por MEB de la soldadura por electropunto con recubrimiento G50, se muestra la formación de ferrita acicular en la zona de fusión (ZF).

La ZF se caracteriza por poseer una estructura básicamente de ferrita con morfología acicular, debido a la rápida velocidad de solidificación que se presenta en la zona de la pepita. En este proceso de soldadura, una vez fundida la zona de la pepita 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.

En la Fig. 10 se observa como la ZAC está conformada por la ZGG o anillo y la ZIC, la ZGG se ubica alrededor de la pepita o zona fundida, presenta una estructura básicamente de ferrita equiaxial de gran tamaño, ver la Fig 10.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 la pepita se transfiere hacia esta zona y se produce un crecimiento de grano austenítico con posterior formación de ferrita equiaxial de gran tamaño. [11]

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 Fig 10.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. [11].

Al comparar las microestructuras de las láminas soldadas con diferentes espesores de recubrimientos se encontró que la ZIC y la ZGG aumentan de tamaño 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.

En la Fig. 11, muestra la estructura típica de un acero de bajo carbono conformada por ferrita y perlita con deformación plástica producto del proceso de laminación.

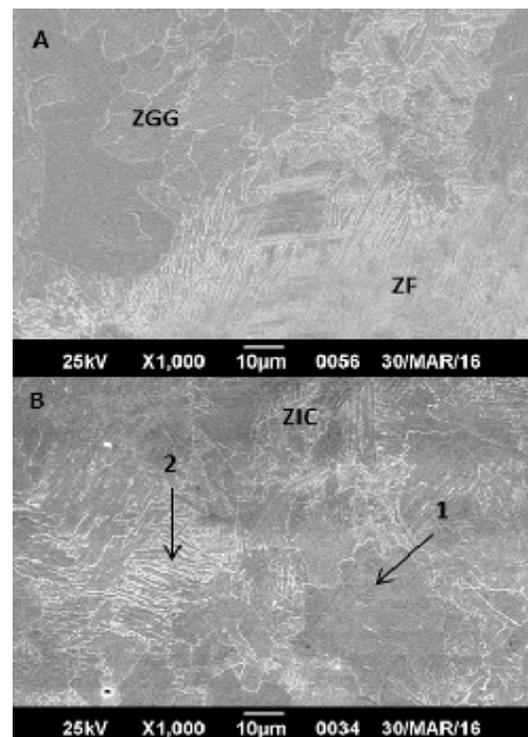


Figura 10: Micrografía por MEB de la soldadura por electropunto con recubrimiento G100, A) Se muestra

la ZGG con ferrita equiaxial de gran tamaño adyacente a la ZF; B) Se observa la ZIC conformada por ferrita equiaxial (1) y ferrita alotriomórfica (2).

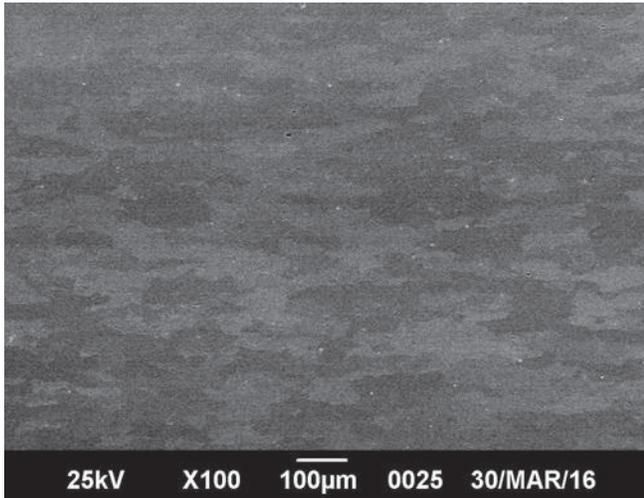


Figura 11: Micrografía por MEB de la soldadura por electropunto con recubrimiento G35, se muestra el material base (MB). Atacadas con Nital al 2%.

IV.4.- Perfiles de dureza

En las Fig.12 se puede observar las gráficas correspondientes a la microdureza de las probetas con tipo de recubrimiento G35, G50 y G100.

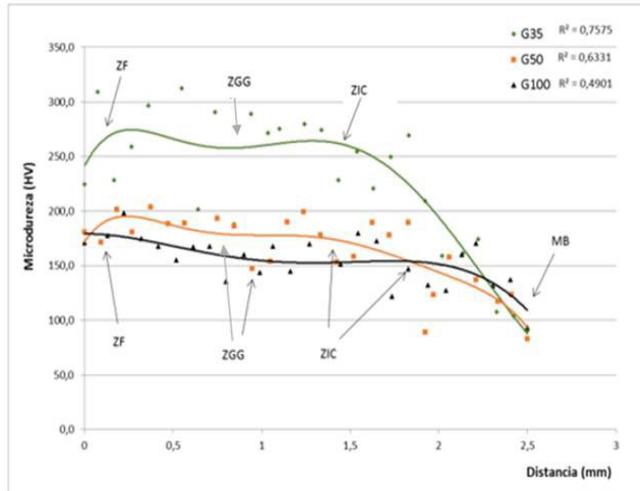


Figura 12: Perfiles de microdureza de las laminas de acero galvanizadas, soldadas por electropunto.

La variabilidad de los valores de microdureza en las distintas zonas de la soldadura se debe a la diversidad de morfología presente en su microestructura. Se muestra un comportamiento similar en todas las soldaduras, donde las durezas en la zona de fusión son mayores, en la ZAC disminuyen ligeramente, y aumentan nuevamente en la ZIC, disminuyendo hasta el metal base. Las durezas de las soldaduras de las laminas con

recubrimiento G35 son mayores al compararse con los otros recubrimientos. Como se comentó anteriormente en el proceso de soldadura de las laminas con recubrimiento G35, se presentaron pérdida parcial del recubrimiento de cinc, dejando el acero parcialmente desnudo, esto aumenta la transferencia de calor hacia el exterior de las laminas, aumentando la velocidad de enfriamiento en las mismas. Por otra parte, este tipo de recubrimiento, de los tres evaluados, es el que ofrece la menor resistencia eléctrica en el proceso de soldadura, por lo tanto, el calor generado y las temperaturas son menores 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. También se observa como las zonas están desplazadas independientemente del espesor de recubrimiento y esto es debido al crecimiento de la ZAC al aumentar el espesor de recubrimiento. Estas zonas tienen mayor tamaño por cual hace decrecer la dureza y por ende ser zonas de menor resistencia a la hora de someter a alguna carga externa.

IV.5.- Ensayos de corrosión

IV.5.1.- Ensayo gravimétrico

En la Tabla IV se detallan las velocidades de corrosión de las diferentes probetas con los promedios por tipo de recubrimiento conseguidos a través de la ecuación (2).

Tabla IV: Velocidad de corrosión de las diferentes probetas por el método gravimétrico

PROBETAS	VC (mpy)	Velocidad de Corrosión (mpy)	Recubrimiento
P _{G35(4-A)}	0,32148588	0,361671615	G35
P _{G35(4-B)}	0,40185735		
P _{G50(4-A)}	0,160550664	0,140481831	G50
P _{G50(4-B)}	0,120412998		
P _{G100(4-A)}	0,160358847	0,120269135	G100
P _{G100(4-B)}	0,080179421		
P _{G35(5-A)}	0,56260029	0,72334323	G35
P _{G35(5-B)}	0,884085169		
P _{G50(5-A)}	0,481651991	0,441514825	G50
P _{G50(5-B)}	0,401376659		
P _{G100(5-A)}	0,24053827	0,440986829	G100
P _{G100(5-B)}	0,641435387		

En la Fig. 13, se puede observar que para el caso de las probetas con diferentes tipos de recubrimientos sumergidas en la solución corrosiva de NaCl al 3.5% y en la solución de NaCl al 3.5% acidificado, la

velocidad de corrosión más alta la sufrió las probetas con espesores G35 debido a que existe recubrimiento parcial en la pepita ya que en el proceso de soldadura se perdió parte del recubrimiento de cinc. Existe disminución de la velocidad de corrosión de manera decreciente al aumentar el recubrimiento, G50 y G100 respectivamente, esto es producto de que el cinc, a mayor cantidad presente en el recubrimiento, ofrece mayor resistencia a la corrosión ya que ocurre una protección catódica después de un tiempo determinado ante la presencia de la solución corrosiva.

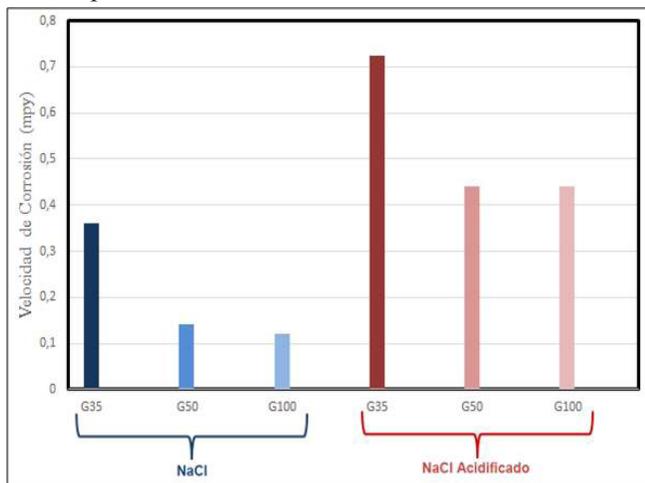


Figura 13: Velocidades de corrosión por método gravimétrico, considerando corrosión uniforme (mpy), de las probetas de acero AISI 1015 galvanizado con soldadura por electropunto. Los materiales se evaluaron en NaCl 3,5% y NaCl 3,5% acidificado con H₂SO₄ a 30°C.

IV.5.2.- Ensayo electroquímico

En la Fig. 14, se observa que el comportamiento de los potenciales de corrosión del sistema evaluado es similar, con el paso del tiempo decrece y esto puede asociarse con la ocurrencia de corrosión activa sobre su superficie. Los potenciales en NaCl 3,5% son ligeramente más nobles que para la solución de NaCl 3,5% acidificada. Esto es debido a que al bajar el pH (de aproximadamente 6 a 4) la solución se hace más agresiva y los potenciales tienden a hacerse más negativos por el proceso de corrosión. Los potenciales en las probetas con recubrimiento G35, sumergidas en la solución acidificada, fueron mayores debido a la pérdida parcial de la capa de cinc ya que una parte se evaporó por la alta intensidad de corriente de soldadura. En la Fig. 15, se observa las curvas de polarización potenciodinámica para las probetas sumergidas en solución NaCl al 3,5% y NaCl 3,5% acidificado con H₂SO₄. De aquí se detalla que la rama catódica tiene marcada polarización por concentración o difusión

(corriente límite). La polarización está limitada por la difusión de protones y/o oxígeno. La rama anódica de baja pendiente muestra una cinética de corrosión alta.

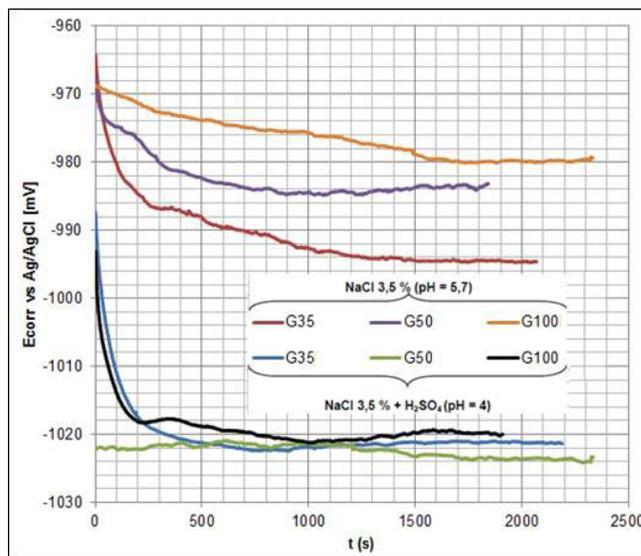


Figura 14: Potencial de corrosión en función del tiempo para las probetas de acero galvanizado. Los ensayos se obtuvieron en NaCl 3,5% (pH=5,7) y NaCl 3,5% acidificado con H₂SO₄ (pH = 4,0) a 30°C, sin desairear y sin agitación.

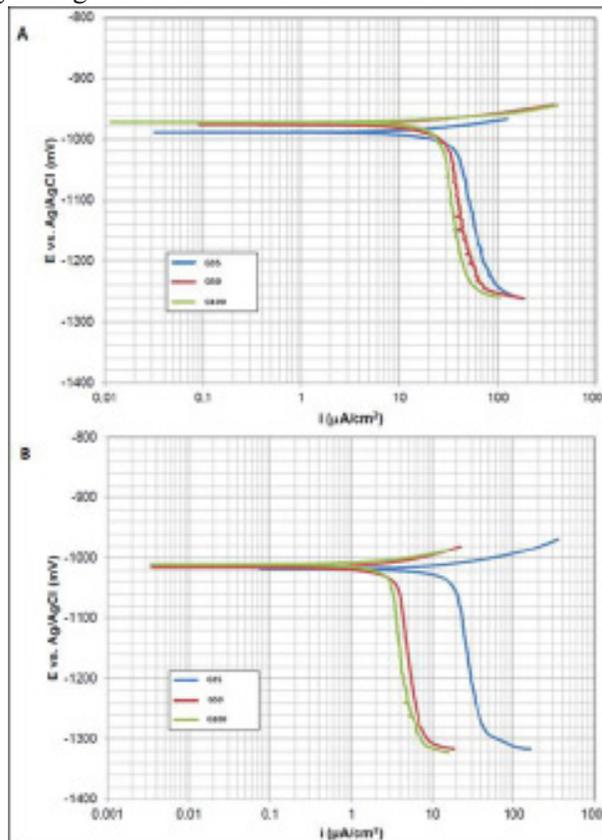


Figura 15: Curvas de polarización potenciodinámica para las probetas de acero AISI 1015 galvanizado. Los

ensayos se obtuvieron: A) NaCl 3,5% (pH=5,7) y B) NaCl 3,5% acidificado con H2SO4 (pH = 4) a 30°C, sin desairear y sin agitación.

La velocidad de corrosión más alta la presentó la probeta con recubrimiento G35, para ambas soluciones corrosivas, ya que tiene más oportunidad de corroer la superficie debido a que el recubrimiento se perdió parcialmente. Las demás probetas, con recubrimiento G50 y G100 respectivamente, arrojaron velocidades de corrosión muy similares entre sí. También es de destacar que la superficie después del ensayo no se notaba apreciablemente afectada. En Fig. 15.B, se puede reflejar como la corriente de corrosión disminuye con respecto a las probetas sumergidas en solución

sin acidificar, esto es debido al efecto inhibitor del sulfato en cortos periodos de tiempo. El efecto de la hendidura puede subir la corriente de corrosión, por eso el desplazamiento hacia la derecha de esta curva de la probeta con recubrimiento G35.

De la Tabla V se desprende los resultados de la velocidad de corrosión de todas las probetas en los diferentes medios corrosivos, utilizando la ecuación (3); en los cuales se reflejan en la Fig. 16. Se destaca el aumento de la velocidad de corrosión en las probetas con espesor tipo G35 en las cuales se demuestra que el recubrimiento de cinc se perdió parcialmente al momento de realizar la soldadura lo cual no protege al acero del ataque corrosivo de las soluciones.

Tabla V: Velocidad de corrosión para las probetas calculadas a partir de los ensayos.

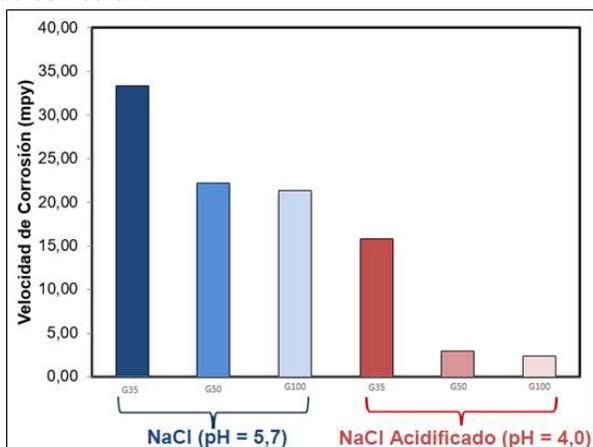
Solución	Muestra	masa (mg)	Area (cm ²)	Velocidad (mpy)
NaCl 3,5%	G35	56,60	33,38	0,85
	G50	37,70	22,23	0,56
	G100	36,20	21,35	0,54
NaCl 3,5% Acidificado	G35	26,80	15,80	0,40
	G50	5,00	2,95	0,07
	G100	4,00	2,36	0,06

En el Fig. 16, se destaca la disminución de la velocidad de corrosión en las probetas con espesor tipo G50 y G100, esto es debido a lo especificado en las referencias [12] – [14] en la cual el recubrimiento de cinc reaccionó con la solución formando como producto de corrosión el Zn(OH)2 que se adhirió a la superficie para formar una capa protectora uniforme. Esto sucede por el efecto sinérgico en la solución corrosiva lo cual produce inhibición de los iones de sulfato (SO4) al estar en contacto con los iones de cloruro. Esto se logra porque el tiempo de inmersión fue muy corto (30min) permitiendo la formación de dichos productos de corrosión.

Figura 16: Velocidades de corrosión por método electroquímico, considerando corrosión uniforme (mpy), de las muestras de acero AISI 1015 galvanizado con soldadura por electropunto. Los materiales se evaluaron en NaCl 3,5% y NaCl 3,5% acidificado con H2SO4 a 30°C, sin desairear y sin agitar.

IV.6.- Análisis macroestructural.

En la Fig. 17, se observan las macroestructuras de las probetas, con espesores de recubrimiento G35 provenientes del ensayo gravimétrico.



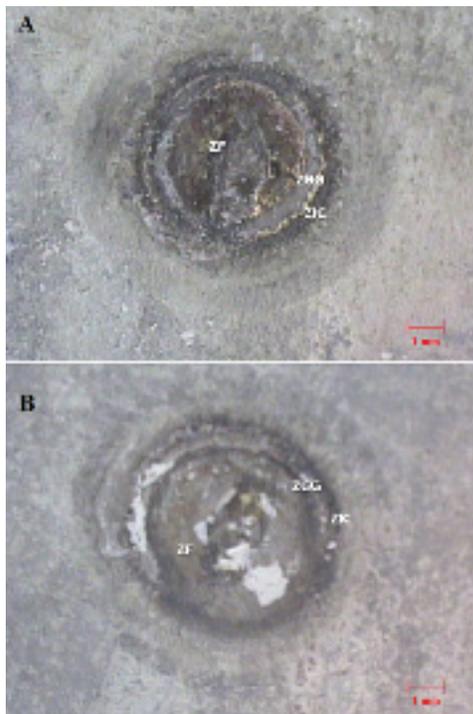


Figura 17: Macroestructuras de las probetas soldadas con recubrimiento G35 provenientes del ensayo gravimétrico. A) sumergidas en solución NaCl (pH= 5,7). B) sumergidas en solución NaCl + 1ml de H₂SO₄ (pH= 4).

La macroestructura arrojó un tipo de corrosión localizada debido a la presencia de partes oscuras producto de la inmersión en los ambientes corrosivos. La Fig. 17A presenta zonas oscuras en la ZF porque es la zona en contacto directo con los electrodos. Esto es consecuencia de la pérdida parcial del cinc por efecto de la alta corriente de soldadura por el proceso de electropunto lo que genera una mayor velocidad de corrosión. La Fig. 17B se observa una macroestructura donde la solución acidificada aceleró el proceso de corrosión haciendo que la ZF y ZIC presente un aspecto más oscuro, tendiendo a existir picaduras, producto de la agresividad del ácido sulfúrico en la solución haciendo perder en parte el recubrimiento de cinc en las probetas soldadas dejando más vulnerable el acero ante el ambiente corrosivo. En todos los espesores de recubrimiento se observó poca presencia de pigmentos blancos, que pueden ser productos de corrosión del cinc (Zn(OH)₂) al estar en presencia de la solución corrosiva acidificada.

V. CONCLUSIONES

1. Las soldaduras presentaron una buena zona de fusión, establecido mediante el ensayo de desabotonado y la medición de tamaño de la pepita. El tamaño del

núcleo o pepita 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.

2. Las soldaduras presentan 3 zonas definidas, la zona de fusión (ZF) o la pepita, 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 (ZGG) y una zona con dos morfologías de ferrita: equiaxial y alotriomórfica, identificada como zona intercrítica (ZIC).

3. 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).

4. Los perfiles de dureza determinaron una gran variabilidad que es producto de la morfología de cada zona de la soldadura. Las mayores durezas se encontraron en la zona fundida seguidamente de la zona intercrítica, después la zona de grano grueso y por último el material base para todos los tipos de revestimiento.

5. Los ensayos de corrosión arrojaron que las probetas soldadas por electropunto con mayor velocidad de corrosión son las de espesor de recubrimiento G35 debido a la pérdida parcial del recubrimiento en el proceso de soldadura.

6. Para el caso del ensayo electroquímico, las probetas sometidas a la solución NaCl acidificada no incrementó la velocidad de corrosión. Esto es debido al efecto sinérgico de los iones de sulfuro en presencia de los iones de cloruro lo cual produce inhibición en cortos períodos de tiempo de contacto. Esto genera una capa protectora de (Zn(OH)₂).

7. El análisis macroestructural de las soldaduras sometidas al ensayo de corrosión indicaron corrosión localizada en los dos ambientes evaluados, acentuado en la solución acidificada donde se evidenció la pérdida parcial del recubrimiento.

VII. REFERENCIAS

- [1] Miguel Delgado (2014). "Soldabilidad de aceros IF y HSLA galvanizados para aplicación automotrices" Universidad Autónoma de Nueva León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- [2] Kevin Randall Chan (2005). "Weldability and Degradation Study of Coated Electrodes for Resistance Spot Welding". University of Waterloo.
- [3] ASTM A-123. (2001). Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products. U.S.A.
- [4] AWS C1.1. (2012). Recommended Practices for

- Resistance Welding. USA.
- [5]UNE – EN ISO 14329 Y 10447. (2004). Ensayos Destructivos de Soldadura. Madrid, España.
- [6]ASME SECCIÓN IX. (2010). Norma de soldadura fuerte. USA
- [7]ASTM E-3. (2001). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. U.S.A.
- [8]COVENIN 616-89. (1989). Materiales Metálicos: Ensayo de Dureza Vickers. Caracas, Venezuela.
- [9]ASTM G-31. (2001). Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. U.S.A.
- [10]NORMA ASTM G-5. (2001). Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements. U.S.A.
- [11]ASM Metal handbook. (2006). Volumen VI “Welding, Brazing, And Soldering”. U.S.A. Página 326.
- [12]Rauchle y Díaz. (1990). Inhibición de la corrosión. Revista de Química de la Pontificia Universidad Católica del Perú Vol. IV. N° 1
- [13]Ballesteros y col, (2015). Corrosión de acero galvanizado en un ambiente que contiene cloruros y sulfatos mediante técnicas electroquímicas. Informador Técnico (Colombia) VOL 79(2) páginas 127-136.
- [14]ASM Metal Handbook. (1987). Volumen 13A. “Corrosion Fundamentals, Testing and Protection”. USA. Páginas 2019, 2306 y 2325.