

Evaluación del Deterioro de los Electrodo al Incrementar el Número de Pulsos del Tiempo de Soldadura en Aceros IF y HSLA Galvanizados y la Afectación de las Propiedades Mecánicas en los Puntos de Soldadura

Miguel Fernando Delgado-Pamanes¹, Simitrio Ignacio Maldonado-Ruiz², Martha Patricia Guerrero-Mata³, Zedy Lizbeth Olvera-Vázquez¹

- ¹ Instituto Politécnico Nacional – UPIIZ, Zacatecas, Zac, México.
² Universidad Autónoma de Zacatecas – UAZ, Zacatecas, Zac, México.
³ Universidad Autónoma de Nuevo León – UANL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, División de estudios de Posgrados, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Recibido: 12 Jun., 2016
Aprobado: 14 Nov., 2016

E-mails: miguel.f.pamanes@gmail.com
(MFDP), smald@uaz.edu.mx (SIMR)

Resumen: La soldadura de resistencia por puntos, es el método más importante en la industria ensambladora de carrocería autoportante o monocasco debido a su automatización, su rapidez, flexibilidad de soldar piezas con forma compleja, es económico debido a que no requiere metal de aporte, además de la posibilidad de aplicar pulsos de precalentamiento y de postcalentamiento para mejorar la soldabilidad del punto de soldadura, el cual se define como la capacidad de la estructura de proporcionar protección adecuada a los pasajeros contra lesiones en caso de una colisión, principalmente depende de la integridad y rendimiento mecánico del botón de soldadura. Para extender la vida de los vehículos se producen aceros galvanizados. Sin embargo, los recubrimientos de cinc han incrementado la dificultad de soldabilidad, siendo necesarias corrientes mayores en el proceso, pues se presenta una menor resistencia en la interfase de soldadura debido a una mejor conductividad eléctrica. Este trabajo investiga el efecto del galvanizado en la disminución de la vida de los electrodos, por esta razón, se deduce una pérdida en las propiedades mecánicas en los botones de soldadura conforme se aumenta el número de puntos de soldadura. El objetivo principal del presente estudio es correlacionar el desgaste de los electrodos con las propiedades mecánicas de los botones de soldadura. El procedimiento experimental consiste en hacer 1.000 puntos de soldadura; para cada vigésimo quinto punto de soldadura a partir del primero, los cuales se examinaron por estereoscopia, ensayos de dureza, ensayos de desbotonamiento y ensayos de tensión al corte. En el desgaste del electrodo, se evaluó la cara por impresión en papel carbón, microscopia óptica y espectroscopia de rayos-X (EDX).

Palabras-clave: Acero IF; Acero HSLA; Galvanizado; Soldadura de resistencia por puntos; Deterioro de electrodos; Propiedades mecánicas de los puntos de soldadura.

Assessment of Impairment of the Electrodes by Increasing the Number of Pulses of the Welding Time on IF and HSLA Steels Galvanized and Involvement of the Mechanical Properties in the Nuggets Welds

Abstract: Resistance welding points, is the most important method in the assembly industry of unibody because of its automation, which is defined as the ability of the structure to provide adequate protection to passengers against injury from a collision, mainly depends on the mechanical performance of the weld nugget. To extend the life of vehicles produced coated steels. However, zinc coatings have increased the difficulty of weldability due to it being higher currents needed in the process because less resistance is presented at the welding interface due to improved electrical conductivity. This work investigates the effect of affecting the galvanized decrease electrode life, for this reason, a lost follows in the mechanical properties in the weld buttons as the number of weld points is increased. The main objective of this study is to correlate the wear of the electrodes with the mechanical properties of welded buttons. The experimental procedure involves making 1.000 welding points. Where every twenty-fifth for each welding point from the first, which were examined by stereoscopy, hardness tests, tests unbuttoning (PTS-English acronym, peel sample test) and shear stress. In the electrode wear, the face by printing carbon paper, optical microscopy and spectroscopy (EDX) X-ray was evaluated.

Key-words: IF steel; HSLA steel; Galvanized; RSW; Electrode life; Mechanical properties of welded buttons.



1. Introducción

En los países desarrollados industrialmente, el acero se ha convertido en una parte integral de la vida, lo cual resulta más evidente en la industria automotriz. Al crecer este sector productivo, se incrementan también sus demandas y requerimientos para los productores de acero, los cuales a su vez, para lograr ser competitivos controlan muy estrechamente la calidad superficial, las tolerancias dimensionales y la uniformidad de las propiedades mecánicas de sus productos [1].

En el siglo XX, surgen nuevas prioridades en el sector automotriz, tales como desempeño de seguridad a los pasajeros, reducción de emisiones contaminantes, de costos y peso en las unidades; para lograr estas demandas la industria acerera ha desarrollado una gran variedad de aceros tales como los de alta resistencia convencionales (IF y HSLA) y los de alta resistencia avanzada (DP, TRIP, TWIP entre otros). Sin embargo estos nuevos aceros presenta un reto en la soldabilidad debido a su composición química y microestructura. Los fabricantes de automóviles reconocen que para mejorar la eficiencia en la unidades, el secreto es poner el acero correcto en el lugar correcto. La formabilidad y estética fueron la máxima prioridad durante mucho tiempo; la resistencia no era una preocupación, ya que si era necesario una mayor resistencia se incrementaba con el espesor de la chapa [2].

Actualmente hay un interés importante en el desarrollo y uso de los aceros de alta-resistencia baja-aleación (HSLA por su acrónimo en inglés: High-Strength Low-Alloy) en aplicaciones automotrices con el objetivo de disminuir el peso de las unidades. En los últimos 30 años, los aceros HSLA, aceros de bajo contenido de carbono microaleados con niobio, titanio y vanadio, se han utilizado ampliamente en este sector. La alta resistencia de estos aceros la obtienen a partir de una combinación de mecanismos que incluye: solución sólida, tamaño de grano, acritud y endurecimiento por precipitación [3].

El grupo mayor de aceros formables para la industria automotriz es el de los aceros libres de intersticiales (IF por su acrónimo en inglés: Interstitial-Free). Estos aceros fueron desarrollados a partir de los aceros de bajo carbono calmados al aluminio con calidad de estirado. Debido a su contenido ultra bajo de carbono [4] y la adición de titanio y niobio como elementos microaleantes, los aceros IF no tienen átomos intersticiales como carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno o boro en la red cristalina [1]. Los aceros IF se distinguen por tener valores de elongación uniaxial (%E), coeficiente de anisotropía normal (r) y un coeficiente de endurecimiento por deformación (n) superior a los aceros de bajo carbono, además de su baja resistencia de esfuerzo de cedencia [1,4].

Aunque estos aceros pueden tener espesores más delgados que los aceros convencionales, la corrosión puede reducir significativamente su resistencia mecánica, debido a la disminución de su sección transversal. Para mejorar la resistencia a la corrosión, se aplica un recubrimiento de cinc, ya que así el metal base queda con protección catódica del ánodo de sacrificio que es el cinc [5].

La soldadura de resistencia por puntos RSW (por su acrónimo en inglés: Resistance Spot Welding) es el método más usado para unir componentes en la industria automotriz [6], existen en promedio cuatro a seis mil puntos de soldadura entre el cuerpo y los componentes de un automóvil compacto ordinario [7-9]. Las grandes líneas de fabricación realizan rutinariamente más de dos millones de puntos en un turno [9]. Las operaciones de RSW incluyen la aplicación coordinada de corriente eléctrica, tiempo de soldadura y fuerza de los electrodos [8,10,11]. Además, la corriente y la presión deben ser lo suficientemente altas para formar el botón, pero sin provocar la expulsión de material [10]. El aporte de calor [6] es generado por el efecto Joule y viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

donde Q es el calor (Joules-J), I es la corriente (Amperes-A), R es la resistencia eléctrica (Ohm- Ω) y t es el tiempo de la corriente (segundos-s).

2. Metodología Experimental

En el presente trabajo se investiga el efecto del galvanizado en el mecanismo de desgaste de la cara de contacto de los electrodos y evaluando su impacto en las propiedades mecánicas en los botones de soldadura.

La medición del desgaste de la cara de contacto de los electrodos utilizados en la evaluación de calidad de soldadura de dos aceros HSLA y un acero IF, galvanizados; se realizó a través de las impresiones de las huellas de

los electrodos tomadas sobre papel carbón al inicio y para cada 100 hasta llegar a los 1.000 puntos de soldadura, de acuerdo a la norma AWS/SAE D8.9M:2002 [12], ver Figura 1. Las mediciones se realizaron tanto en el electrodo superior como en el inferior y la combinación de ambos, ver Figura 1, a través de impresiones en papel carbón y al final de la prueba se realizaron macrográficas de la sección transversal de la cara de contacto y espectroscopia de rayos-X, para la identificación de nuevas fases.

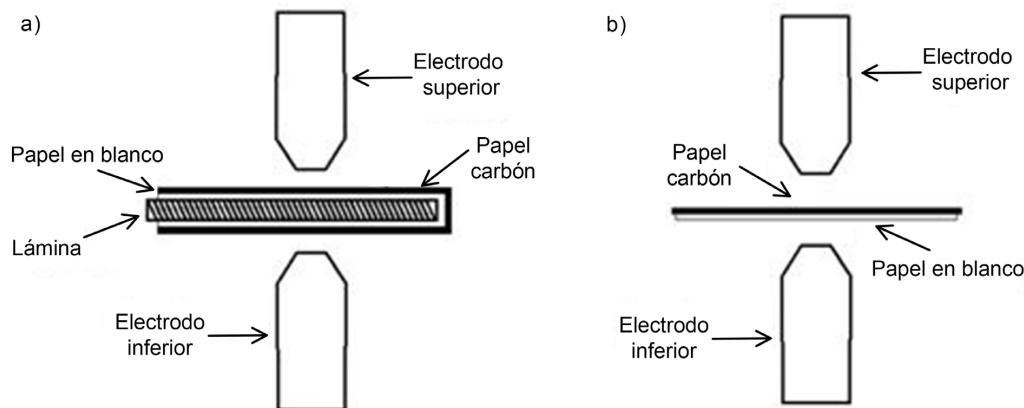


Figura 1. Esquema de impresión de la cara de los electrodos: (a) Impresión de electrodo superior e inferior y (b) Impresión de la combinación de ambos electrodos [12].

En la prueba de calidad de soldadura se realizaron 1.000 puntos de soldadura por grado de acero. Se utilizaron 20 chapas de 914 mm de largo \times 76,2 mm de ancho \times 1,81 y 3,09 mm de espesor en los aceros HSLA y 2,53 mm de espesor en el acero IF, debido a que estos aceros son galvanizados y existe la posibilidad que la capa de galvanizado varíe en las superficies de las chapas, se marcó la cara superior, que se utiliza para determinar la orientación de cada chapa con respecto a la otra y al electrodo estacionario. Cada una de las orientaciones requeridas se identifican por un estilo de letra, "A", "B", "C" y "D". Las dimensiones de las chapas se presentan a continuación, ver Figura 2.

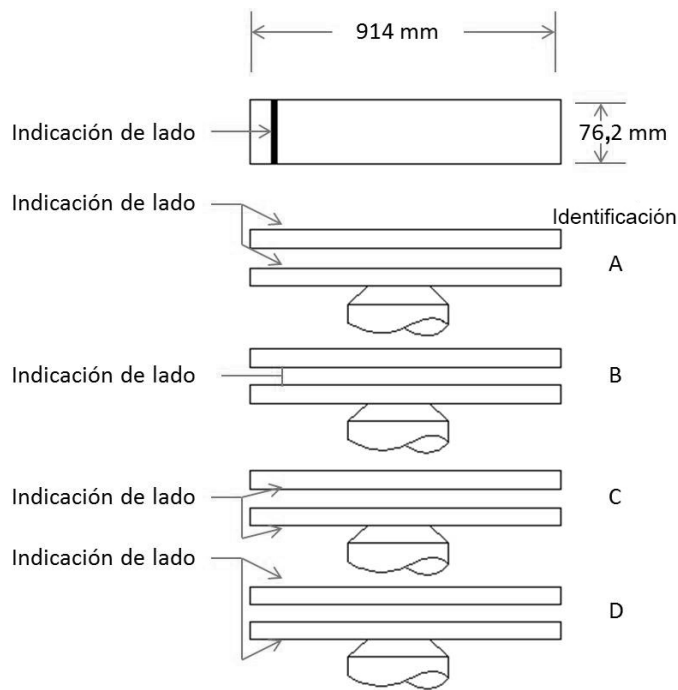


Figura 2. Orientación del par de chapas e identificación de los lados.

La secuencia de soldadura en el par de chapas se muestra en la Figura 3. La velocidad de soldadura fue de 60 puntos-soldadura por minuto en cada línea, el tiempo de enfriamiento fue de 30 s entre líneas. Las soldaduras 23, 48, 73 y 98 de cada par de chapas se utilizó para macrográficas (medición de indentación y penetración) y microdureza, para medir el diámetro del botón de soldadura se realizaron ensayos PTS (por su acrónimo del inglés: peel-test-sample) [13], sobre las soldaduras 24, 49, 74 y 99 y por último se realizaron ensayos de tensión al corte, a los puntos de soldaduras 25, 50, 75 y 100 de cada par de chapas.

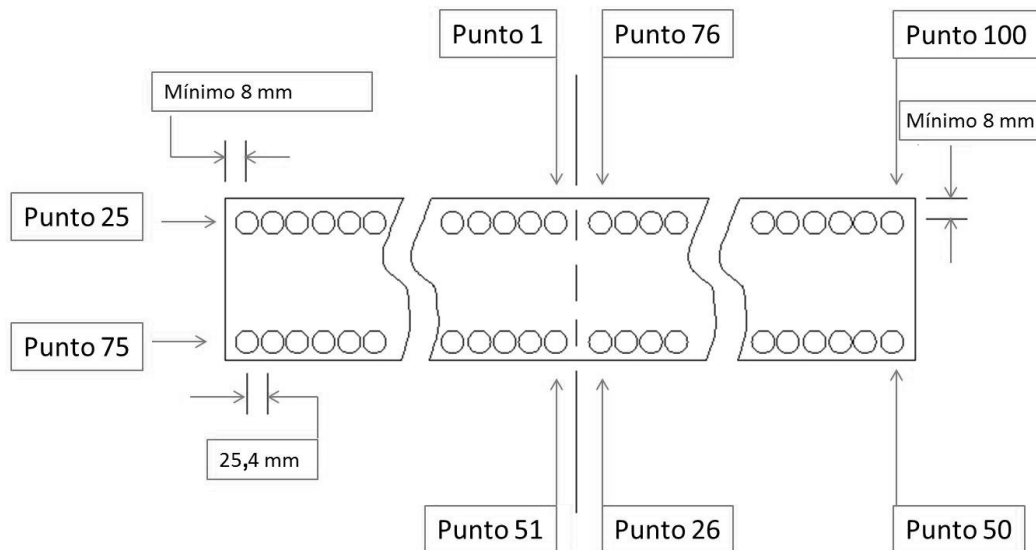


Figura 3. La secuencia de soldadura en el par de chapas.

Se ensayaron dos aceros HSLA y un acero IF, galvanizados; las características de estos aceros se muestran en la Tabla 1. Los parámetros de soldadura empleados para cada acero se muestran en la Tabla 2. El rango de tiempo típico para aceros es de 10 a 25 ciclos [7] (un ciclo a 60 Hz es igual a 0,0166 segundos). El flujo de refrigerante en los electrodos fue de 3,8 L/min. Los electrodos fueron del tipo RWMA (por su acrónimo en inglés: Resistance Welding Manufacturing Alliance of AWS) clase 2, No. 2,18200 tipo E truncados, con diámetro de cara de 8 y 5 mm. Estos electrodos se elaboran de una aleación cromo-cobre.

Tabla 1. Características de los aceros de alta resistencia convencionales.

| Propiedades | Tipo de acero | | |
|---------------------------------------|---------------|------|------|
| Denominación | HSLA | IF | HSLA |
| Espesor, mm | 1,81 | 2,53 | 3,09 |
| Dureza, HV | 239 | 133 | 231 |
| Esfuerzo de Cedencia-YS, MPa | 476 | 193 | 398 |
| Esfuerzo Último de Tensión-UTS, MPa | 541 | 304 | 482 |
| Valor-n | 0,11 | 0,22 | 0,14 |
| Valor-r | 1 | 0,9 | 1 |
| Carbono Equivalente-C.E., % | 0,24 | 0,03 | 0,15 |
| Espesor de galvanizado, μm | 12 | 14 | 12 |

Tabla 2. Programación de soldadura.

| Acero | Diámetro electrodo, Mm | Tiempo de acercamiento, ciclos | Tiempo de soldadura, ciclos | Fuerza de soldadura, kN | Corriente de soldadura, kA | Tiempo de mantenimiento, Ciclos |
|--------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| HSLA 1,81 mm | 8 | 30 | 13 | 6.4 | 15,5 | 30 |
| IF 2,53 mm | 5 | 30 | 9-2-9* | 6.4 | 11,6 | 10 |
| HSLA 3,09 mm | 5 | 30 | 13-2-13-2-13* | 6.4 | 9,8 | 10 |

* 9-2-9 Indica que se utilizan 2 pulsos de soldadura de 9 ciclos con un tiempo de separación entre pulsos de 2 ciclos.

* 13-2-13-2-13-2 Indica que se utilizan 3 pulsos de soldadura de 13 ciclos con un tiempo de separación entre pulsos de 2 ciclos.

3. Resultados

La Figura 4, muestra la sección transversal de los electrodos antes de iniciar la corrida de los 1.000 puntos de soldadura. Las impresiones de la evaluación del desgaste de la cara de los electrodos para cada 100 hasta llegar a los 1.000 puntos de soldadura se muestra en la Figura 5. La medición del incremento del diámetro de la punta de los electrodos se representa en la Figura 6.

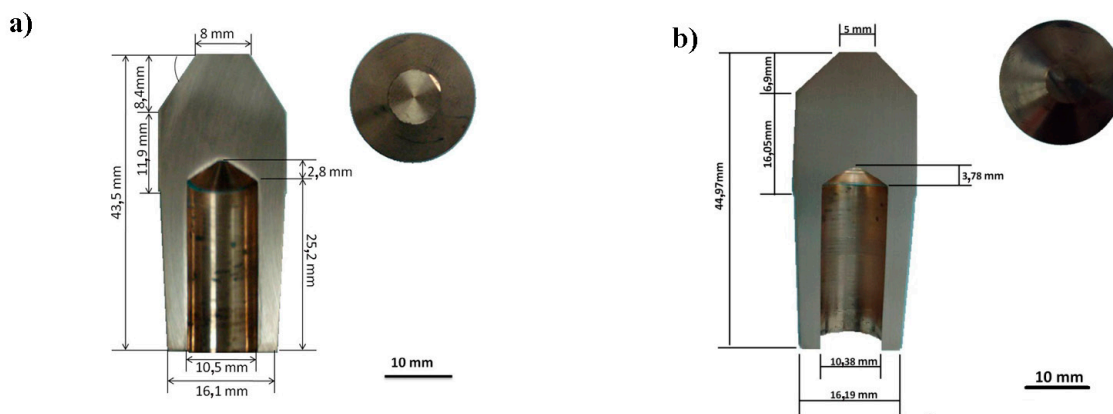


Figura 4. Dimensiones de los electrodos utilizados en: (a) Acero HSLA de 1,81 mm y (b) Acero IF de 2,53 mm y HSLA de 3,09 mm.

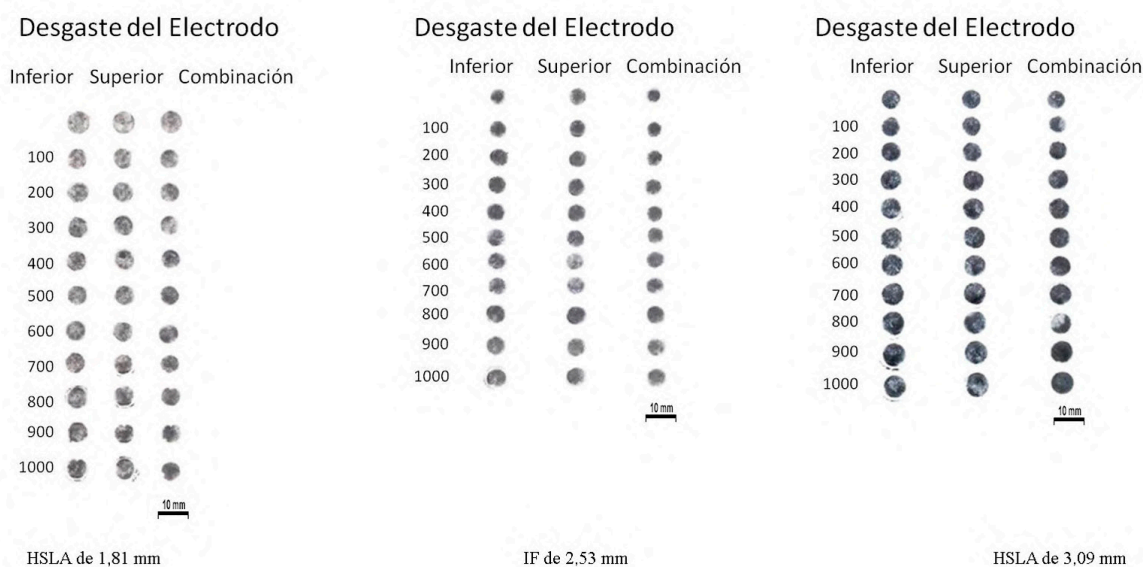


Figura 5. Impresión de las huellas de los electrodos que muestran la evolución del desgaste de la cara de contacto del electrodo inferior.

La Figura 7 presenta los pares de electrodos después de los 1.000 puntos de soldadura sobre cada uno de los aceros galvanizados. La Figura 8 muestra la sección transversal de cada uno de los electrodos, utilizados en la prueba de calidad de soldadura de los aceros. La espectroscopia de rayos-X sobre la superficie de contacto de cada uno de los electrodos se muestra en la Figura 9.

La Figura 10 muestra las secciones transversales de los botones 23, 348, 523, 698 y 998 de soldadura en los aceros HSLA de 1,81 mm, IF de 2,53 mm y HSLA de 3,09 mm, respectivamente. La medición de la diagonal de la zona de fusión se muestra en la Figura 11, mientras que la indentación y penetración de soldadura se muestran

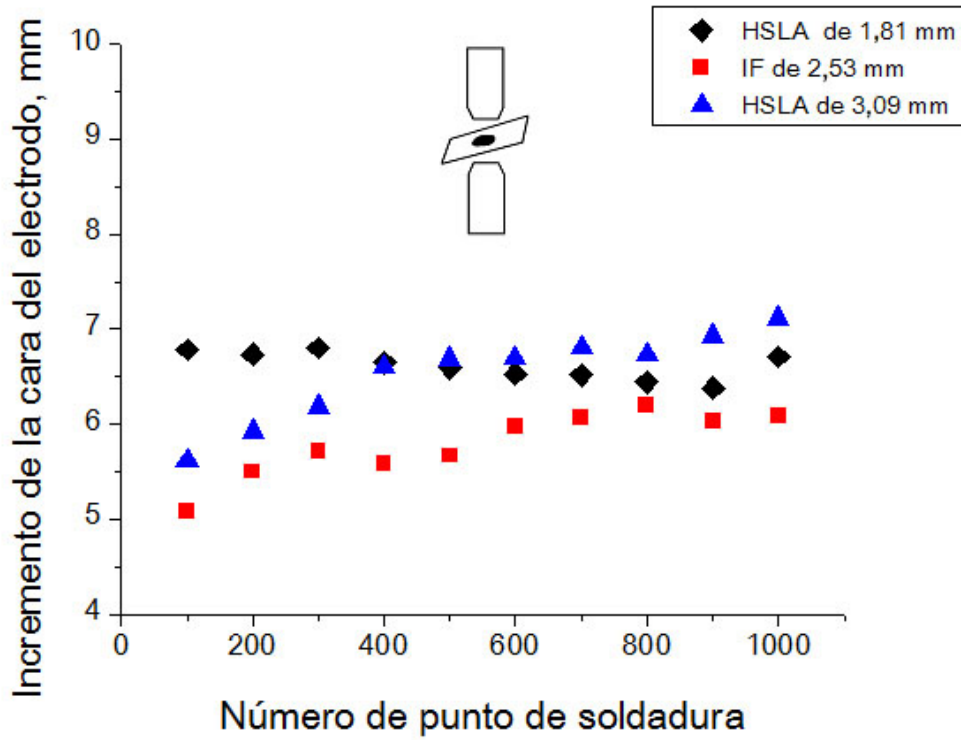


Figura 6. Medición del desgaste en ambos electrodos después de la corrida de 1.000 puntos de soldadura.

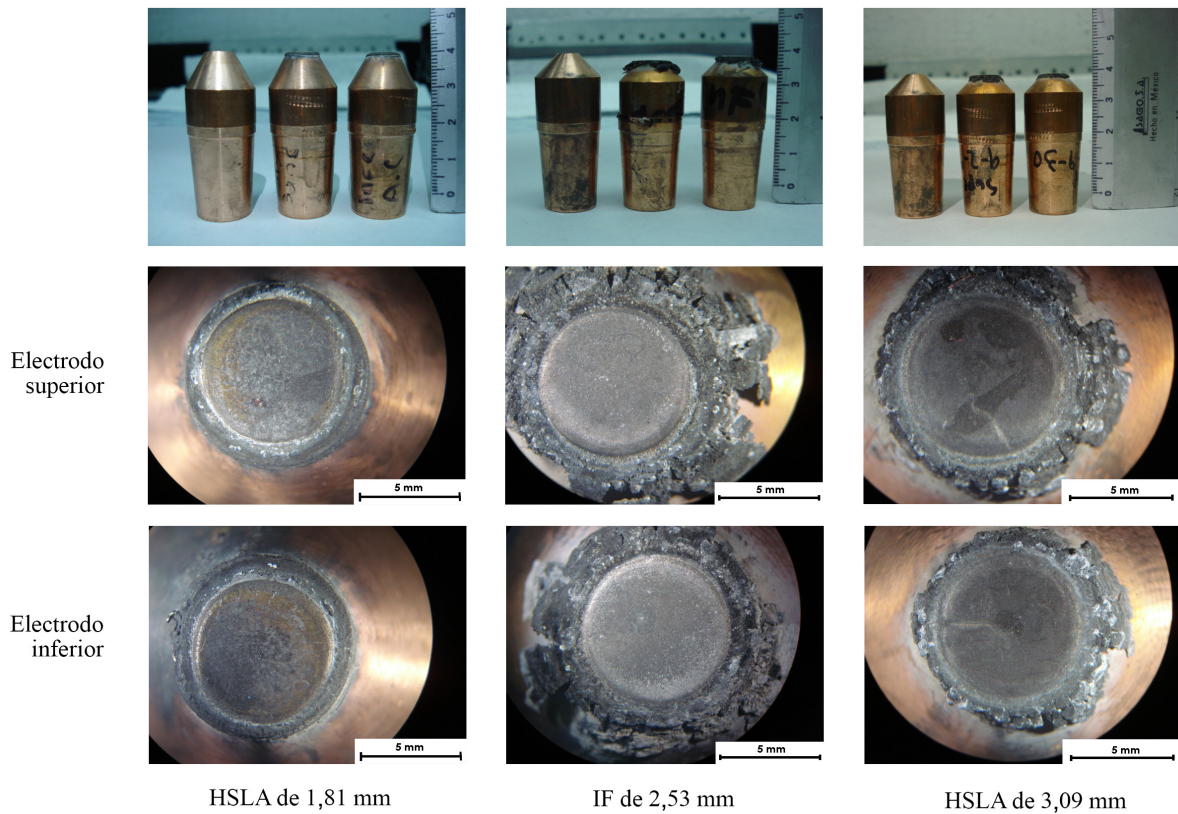


Figura 7. Desgaste de la cara de contacto de los electrodos después de 1.000 puntos de soldadura.

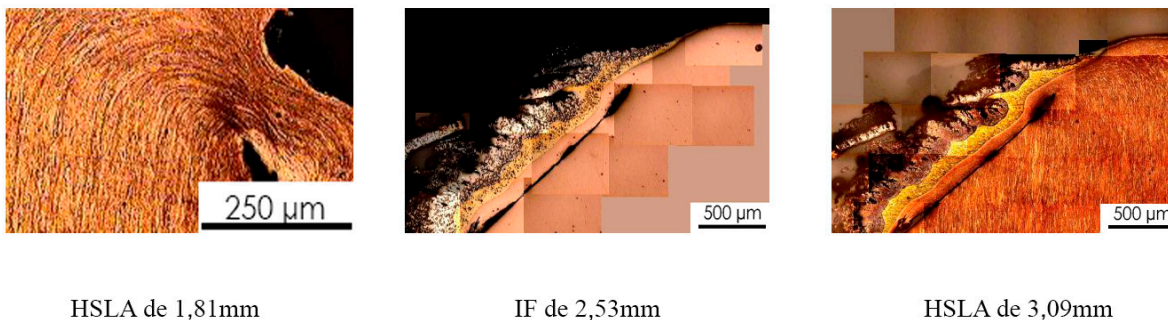


Figura 8. Sección transversal de la cara de contacto de los electrodos después de 1.000 puntos de soldadura.

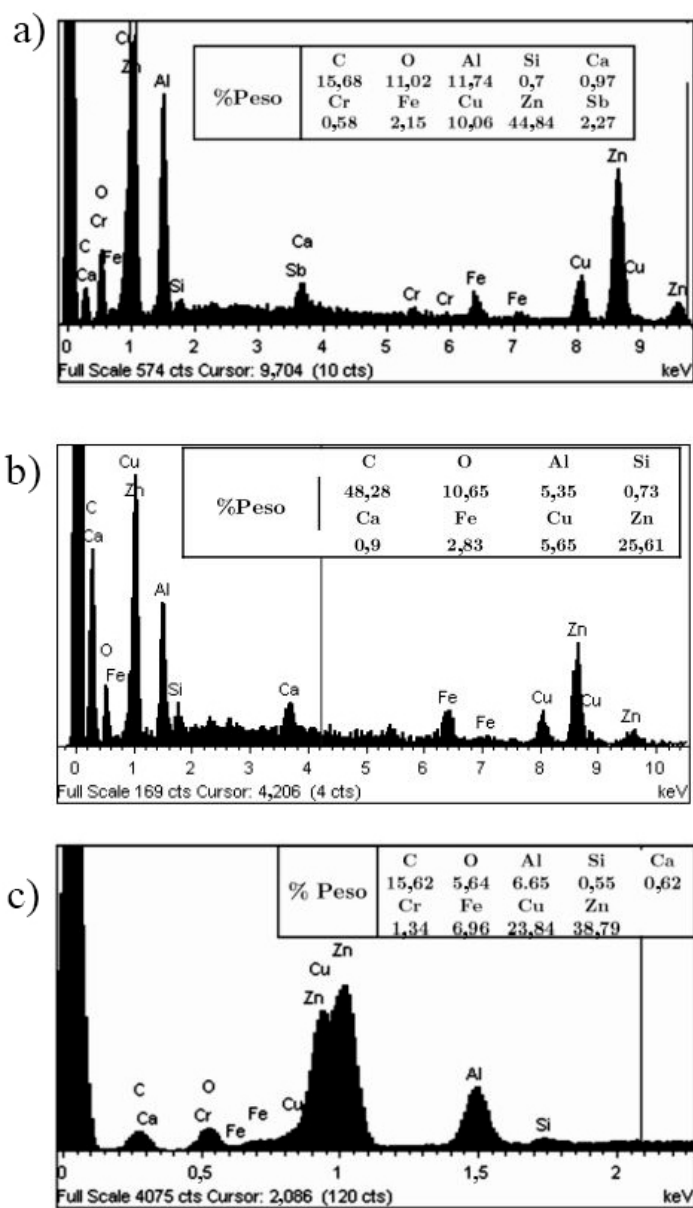


Figura 9. Espectroscopia de rayos-X sobre la superficie del electrodo utilizado sobre los aceros; (a) HSLA de 1,81 mm, (b) IF de 2,53 mm y (c) HSLA de 3,09 mm.

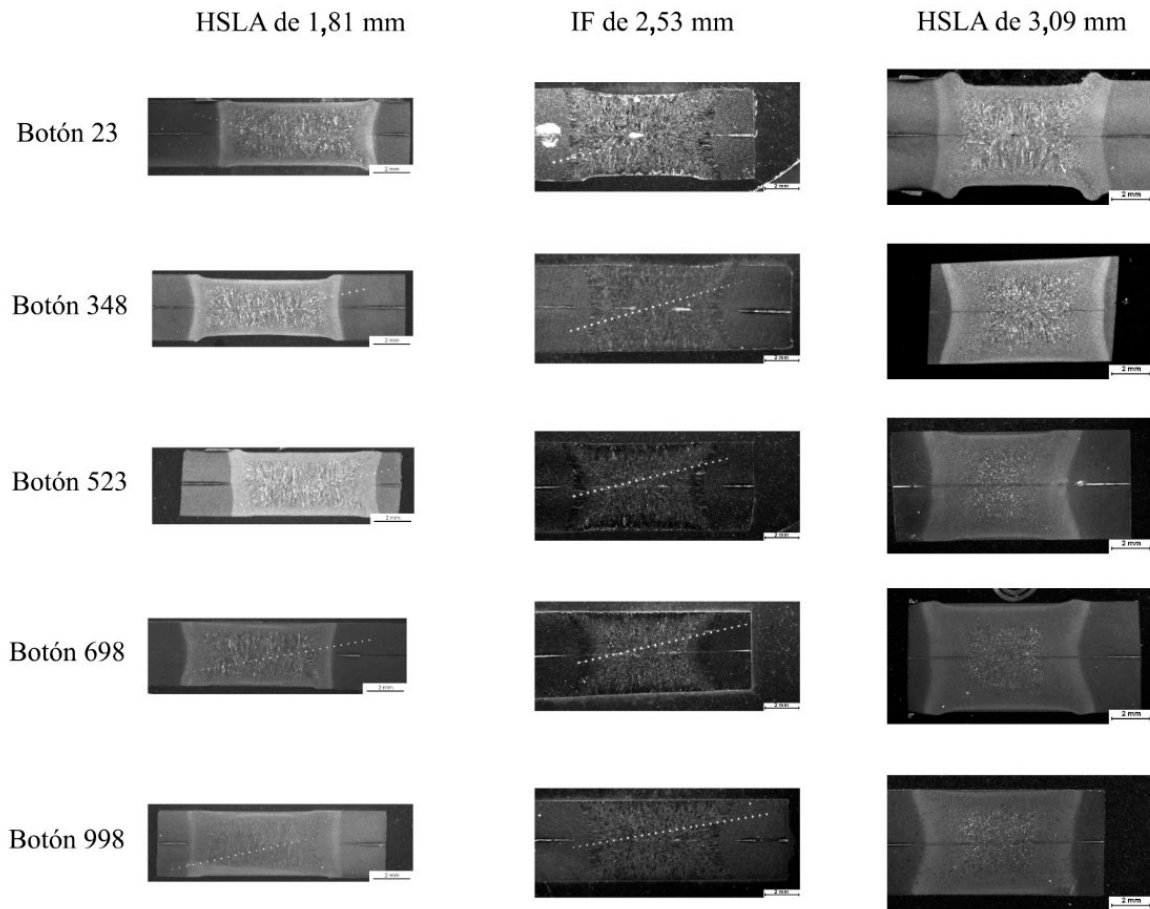


Figura 10. Macrografías de la sección transversal de los botones de soldadura.

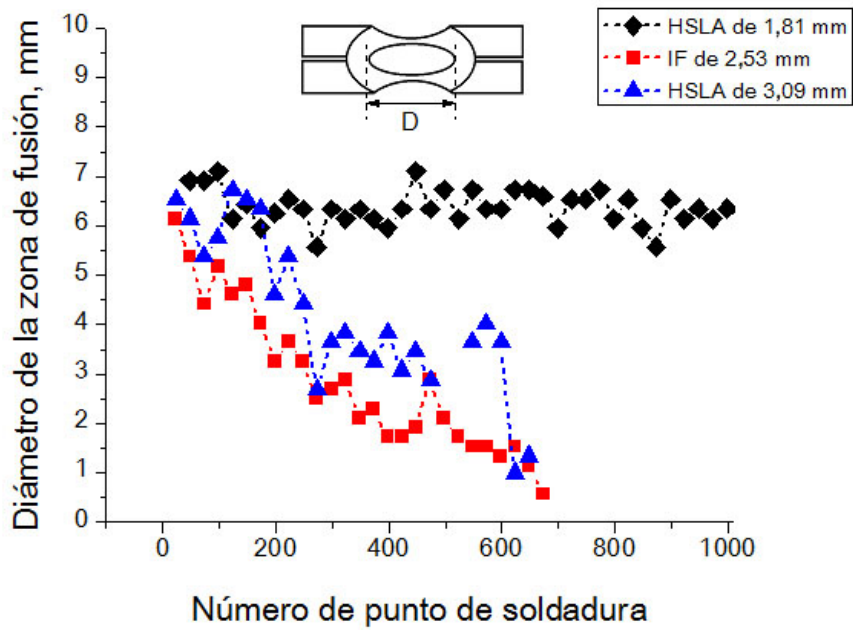


Figura 11. Medición de la diagonal de la zona de fusión de cada una de las corridas de 1.000 puntos de soldadura.

en las Figuras 12 y 13. La Figura 14 muestra las mediciones del diámetro de fusión obtenidas de los ensayos PTS. En el caso del acero HSLA de 1,81 mm, no fue necesario efectuar estos ensayos debido a que las metalografías mostraron que los diámetros de los botones de soldadura se mantuvieron constantes durante toda la corrida.

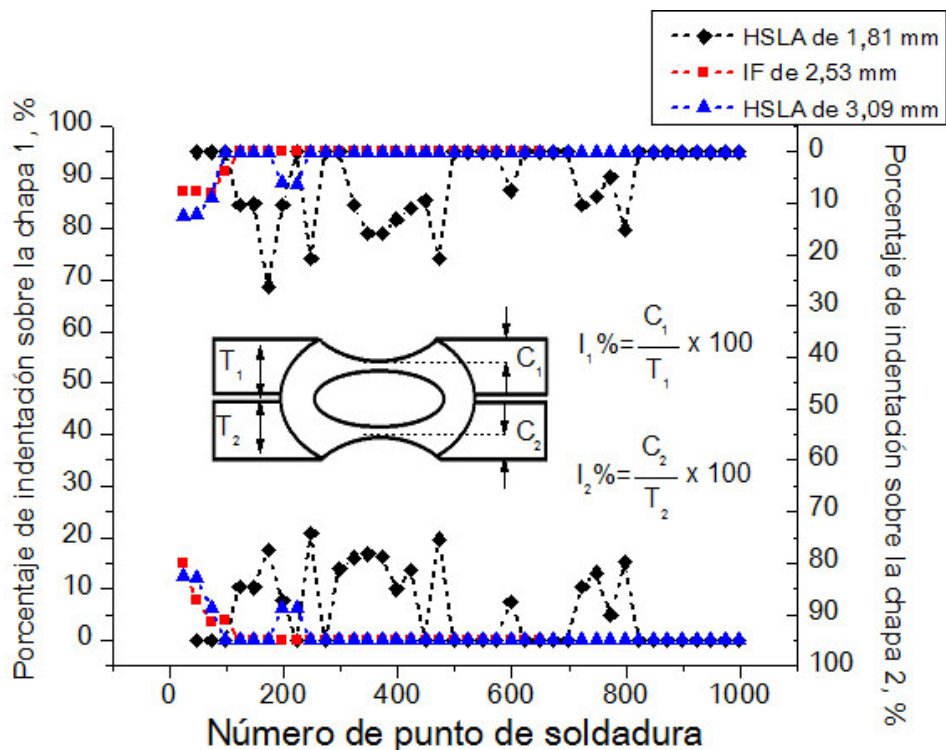


Figura 12. Medición del porcentaje de indentación de soldadura para cada corrida.

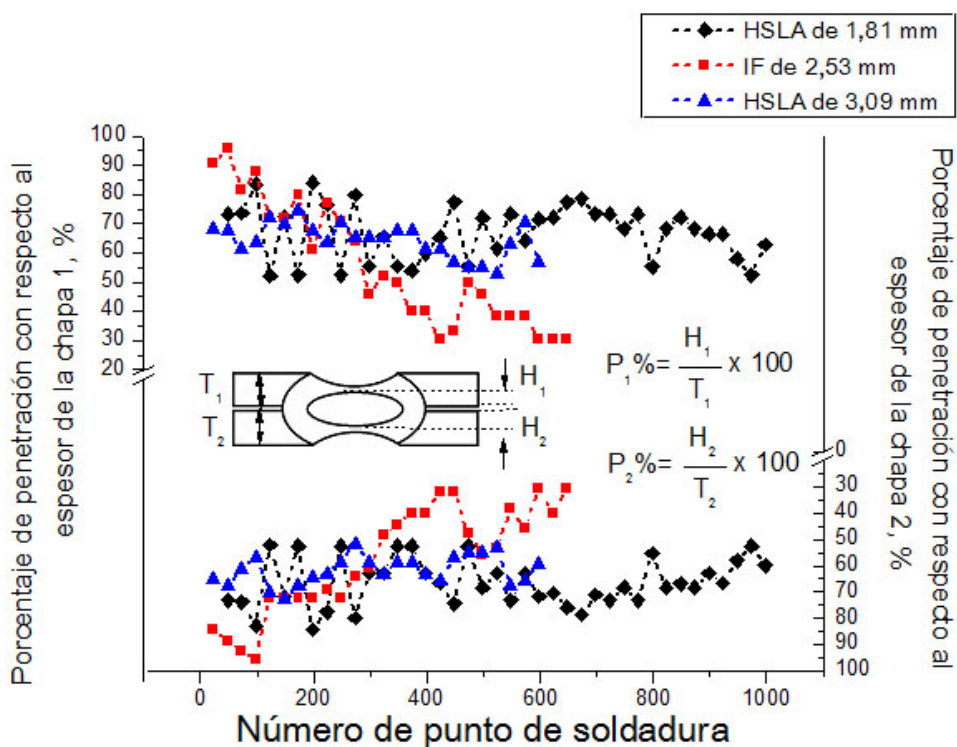


Figura 13. Medición del porcentaje de penetración de soldadura de cada una de las corridas.

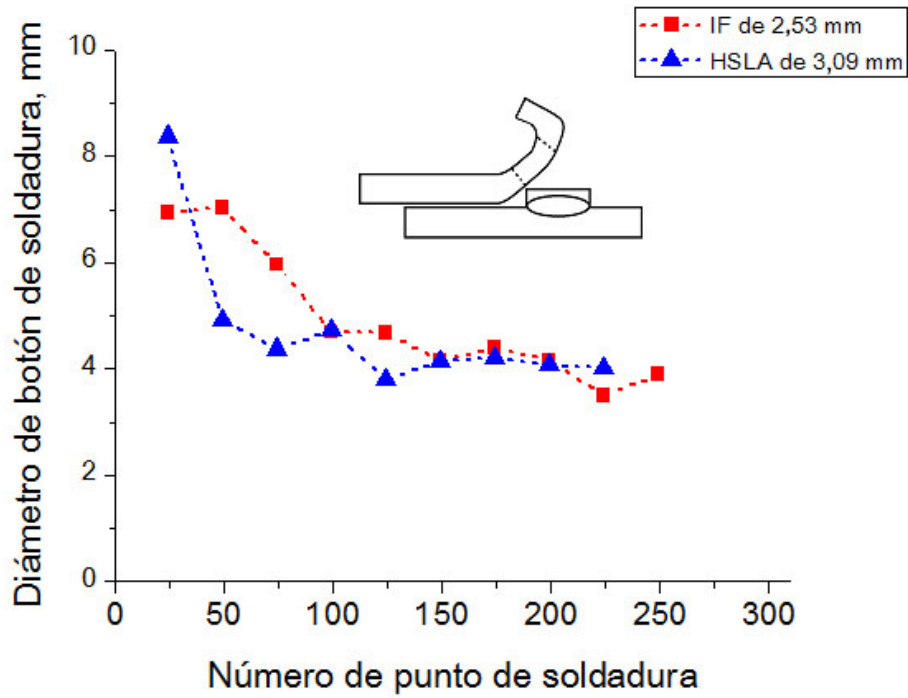


Figura 14. Medición de los diámetros de botones de soldadura.

La microdureza se realizó en la zona de fusión con una carga de 200 g y un tiempo de 15 s, con un espacio entre indentación de 0,4 mm, ver Figura 15. Para obtener la carga máxima que soportaron los botones de soldadura, se realizaron ensayos de tensión al corte con una velocidad de desplazamiento de cabezal de 10 mm/min, ver Figura 16.

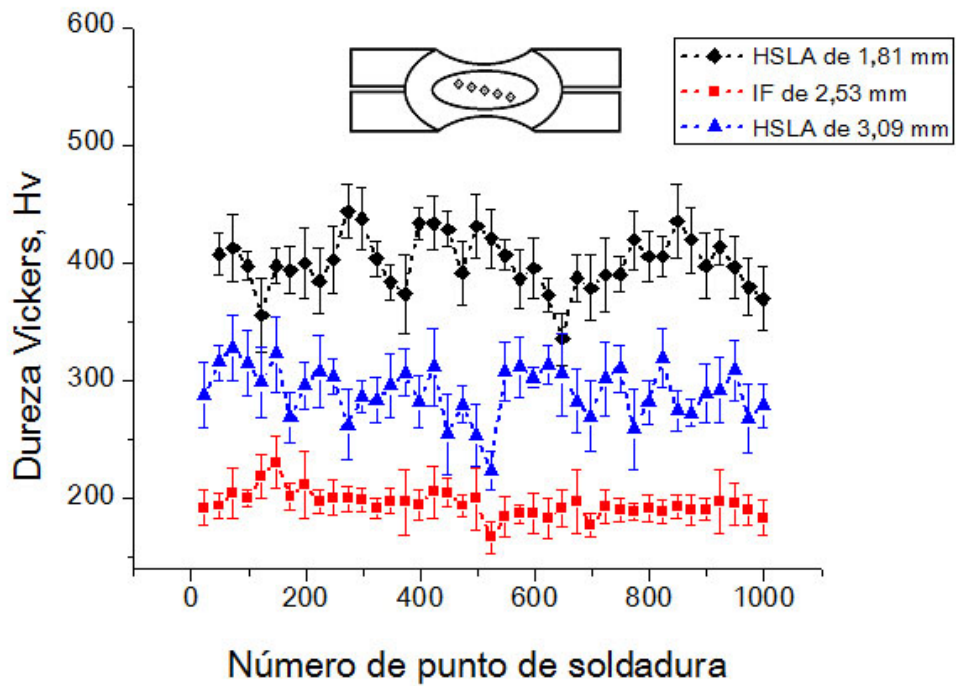


Figura 15. Dureza Vickers en el centro de la zona de fusión para cada corrida de 1.000 puntos para cada material.

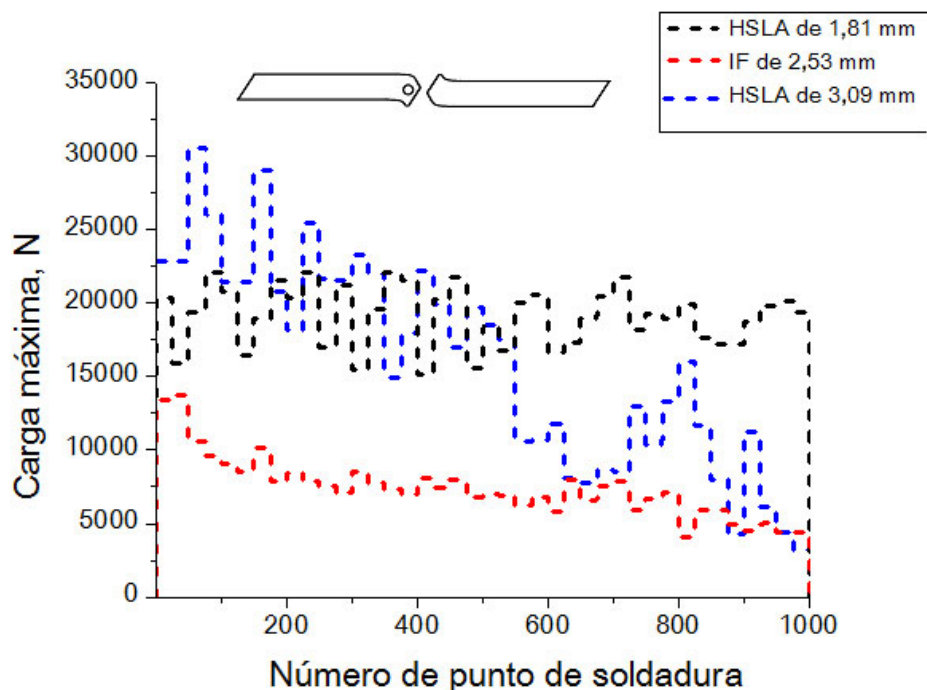


Figura 16. Carga máxima de los ensayos de tensión.

4. Discusión

Al analizar las impresiones de las caras de contacto de los electrodos se puede observar que hay un incremento de diámetro en dichas caras, principalmente en el acero HSLA de 3,09 mm, en seguida, en el acero IF de 2,53 mm y por último en el acero HSLA de 1,81 mm, ver Figura 5. Este incremento del área de contacto del electrodo es producido por una deformación que sufre el electrodo, debido a que las operaciones de RSW envuelven la aplicación coordinada de corriente eléctrica, tiempo de soldadura y fuerza de los electrodos

En la Figura 6 se observa que en el par de electrodos utilizados para el acero HSLA de 3,09 mm, el incremento del área de contacto es más grande que un 1,34% en el transcurso de los primeros 400 puntos de soldadura, mientras que el par de electrodos utilizados en el acero IF de 2,53 mm sufrieron un incremento del área de contacto más grande que un 1,10% en el área de contacto durante los primeros 300 puntos de soldadura y en el caso del acero HSLA de 1,81 mm no se presentaron cambios significativos en el área de contacto. Este incremento en el área de contacto del par de electrodos que se utilizaron en los 2 aceros mencionados, se debió a que tuvieron un mayor tiempo de soldadura, es decir un mayor tiempo de interacción con cinc, alterando las propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas de los electrodos. El cinc es más dúctil que el acero y se amolda mejor a las puntas de los electrodos produciendo una deformación plástica debido a la aplicación de fuerza de los electrodos.

La deformación de la cara de contacto de los electrodos se manifiesta mediante la extrusión del material en los bordes de punta de los electrodos, ver Figura 7, donde se aprecia que todos los electrodos presentaron este fenómeno.

Cuando se utilizaron dos y tres pulsos se incrementó el tiempo de soldadura, respecto a un pulso, y la adhesión de cinc en la superficie del electrodo fue mayor a partir de los primeros puntos de soldadura, formando una nueva aleación dúctil en la cara de contacto, causando que la deformación de esta se agrande por el flujo del material hacia la periferia de contacto, ver Figura 5. La deformación también está asociada con la pérdida de longitud que contribuye al crecimiento de la cara de contacto, ver Figura 7.

Otro fenómeno de desgaste que se observó fue la interacción de cinc con el cobre de los electrodos, debido a la alta temperatura generada en la interfase electrodo-chapa alcanzado el punto de fusión del cinc produciendo una rápida difusión hacia el cobre [14, 15], ver Figura 8.

En la reacción del cinc en la superficie de la cara de contacto de los electrodos que utilizaron dos y tres pulsos de soldadura fue evidente que existió difusión de cinc dentro del cobre produciendo una capa de latón alfa, identificada como 'capa blanca', ver Figura 8, ya que se alcanzaron altas temperaturas [6] por efecto del mayor aporte de calor, Ecuación 1.

De esta forma, al incrementarse el calor de aporte, también se incrementó la temperatura en la zona de la soldadura, produciendo que el cinc interactuara más rápido, debido a que el cinc en estado líquido difunde 500 veces más rápido que cuando se encuentra en estado sólido [16].

El análisis de espectroscopia de rayos-X, detectó los siguientes elementos Zn, Cu, Fe y Al. El aluminio se observó predominantemente en la superficie de los electrodos. Debido a su apariencia particular y al hecho de que el aluminio debería haber disuelto en las capas de latón; se cree que este aluminio pudiera estar presente en alguna forma de óxido, ver Figura 9.

Los electrodos utilizados en el acero HSLA de 1,81 mm presentaron la mayor difusión de Fe, Cu y Cr hacia la capa superficial del electrodo, esto seguramente se debe a que el calor generado en la interfase electrodo-chapa fue el más alto de las tres pruebas, ver Figura 9a.

En el caso de los electrodos utilizados en el acero IF de 2,53 mm, el análisis reveló una alta concentración de carbono a pesar de ser un acero libre de intersticiales. Esto se debió al contenido de aceite de laminación presente en la superficie del acero IF, ya que las normas automotrices no permiten limpiar la superficie de las chapas, ver Figura 9b.

En los electrodos utilizados en el acero HSLA de 3,09 mm se presentó una mayor difusión de Zn, Cu, Fe, Al y Cr hacia la capa superficial del electrodo, dado que el aporte de energía fue en un tiempo mayor y se proporcionó en tres pulsos, ver Figura 9c.

La evaluación de la sección transversal de los puntos de soldaduras de cada chapa de acero muestra que los puntos de soldadura efectuados sobre el acero HSLA de 1,81 mm presentaron buena calidad de geometría en toda la corrida. Mientras que los puntos de soldadura realizados en el acero IF de 2,53 mm y el acero HSLA de 3,09 mm conforme aumento el número de puntos soldados, la zona de fusión fue disminuyendo, perdiendo calidad de geometría, ver Figura 10.

En la Figura 11 se representa la medición de la diagonal de las zonas de fusión obtenidas de las secciones transversales de los botones de soldadura. Se observa que la diagonal del botón del acero HSLA de 1,81 mm se mantuvo aproximadamente a 6,5 mm mientras que los puntos soldados en los aceros IF de 2,53 mm y el acero HSLA de 3,09 mm presentaron un decrecimiento en la diagonal del botón, lo cual afectó en una disminución del diámetro del botón de soldadura, por tal motivo solo se realizaron los ensayos de desbotonamiento sobre los puntos soldados en el acero IF de 2,53 mm y en el acero HSLA de 3,09 mm. Adicionalmente, se observa que los puntos soldados sobre el acero HSLA de 3,09 mm a partir del punto 25 disminuye el diámetro de botón de soldadura de 8 mm a 5 mm aproximadamente y después del punto 225 presentaron falla interfacial. En el caso del acero IF de 2,53 mm a partir del punto 50 disminuye el diámetro de botón de soldadura de 7 mm a 6 mm, y desde del botón 100 hasta el botón 250 se mantiene un diámetro aproximadamente de 4 mm y a partir de ahí presentaron fallas del tipo interfacial.

La medición del porcentaje de indentación producida por la fuerza de los electrodos sobre los puntos de soldadura se representa en la Figura 12. Se observa que el porcentaje de indentación de los puntos soldados sobre el acero HSLA de 1,81 mm presenta una variación, sin embargo no excede el 30% de indentación [15]. En el caso de los puntos soldados sobre el acero IF de 2,53 mm y el acero HSLA de 3,09 mm, se observa como presentaron un comportamiento muy similar, donde inician con 15% de indentación y a partir de los 100 puntos soldados ya no presentan indentación, lo que se puede relacionar con una falta de fusión.

El porcentaje de penetración de los botones de soldadura se muestra en la Figura 13. El porcentaje de penetración de los botones soldados sobre el acero HSLA de 1,81 mm presenta una variación de penetración de 80% como máximo y 55% como mínimo. En el caso de los puntos soldados sobre el acero IF de 2,53 mm, presentaron una caída en el porcentaje de penetración de un 90% a un 20%, mientras que el acero HSLA de 3,09 mm presentó 70% de penetración, sin embargo a partir de los puntos 650 y 600 respectivamente ya no presentaron penetración.

La Figura 14 muestra como la medición de los diámetros de los botones de soldadura sobre el acero IF de 2,53 mm se redujo de aproximadamente 7 mm a 5 mm en los primeros 100 puntos de soldadura y a 4 mm después

de 250 puntos de soldadura; para permanecer constante el resto de la corrida de soldaduras. Sobre el acero HSLA de 3,09 mm, se redujo de 8,5 mm a 5 mm en los primeros 50 puntos de soldadura y a 4 mm después de 225 puntos de soldadura y permanecer aproximadamente constante hasta alcanzar los 1.000 puntos de soldadura. Además, se mantuvo constante el diámetro de fusión durante toda la corrida de los 1.000 puntos de soldadura para las chapas del acero HSLA de 1,81 mm, lo que indica que no presentaron desgaste prematuro los electrodos en este grado de acero.

Los puntos soldados sobre el acero HSLA de 1,81 mm, el acero HSLA de 3,09 mm y el acero IF de 2,53 mm presentaron valores de dureza de aproximadamente de 400 HV, 295 HV y 190 HV, respectivamente; como puede observarse en la Figura 15.

La carga máxima soportada por los puntos de soldadura en el ensayo de tensión al corte se muestran en la Figura 16, se puede observar que la carga máxima de los 1.000 puntos soldados en el acero HSLA de 1,81 mm, se mantuvo en un promedio de 20 kN, con 22,5 kN como máximo y 17,5 kN como mínimo; en el caso de los puntos soldados en el acero HSLA de 3,09 mm fue disminuyendo de 30 a 5 kN y para los puntos soldados en el acero IF de 2,53 mm fue de 12,5 a 5 kN. La resistencia es dependiente directa del diámetro del botón.

Se cree que el aluminio, presente en pequeñas cantidades en el recubrimiento de cinc, interactuó con el oxígeno de la atmosfera y se adhirió en alguna forma de óxido sobre la superficie de contacto de la cara de los electrodos alterando sus propiedades eléctricas y mecánicas.

Al disminuir la longitud y aumentar la sección transversal de los electrodos debería disminuir su resistencia al paso de la corriente eléctrica ($R = \rho \cdot l / A$) generando un mayor aporte de calor en la interfase chapa-chapa produciendo botones de soldadura más grandes, sin embargo se debe tomar en cuenta que el sistema de resistencia eléctrica de seis líneas (en serie) se modifica a uno de ocho esto debido a la formación en la superficie de una capa de óxido de aluminio y la formación de latón, lo cual aumenta la resistencia eléctrica en la interfase del electrodo-chapa generando que en esta interfase se genere cada vez mayor aporte de calor acelerando aún más el deterioro de los electrodos afectado directamente en el crecimiento del botón de soldadura disminuyendo sus propiedades mecánicas a niveles no aceptados.

5. Conclusiones

Los experimentos de soldadura realizados en el presente estudio demuestran, que al incrementar el número de pulsos de soldadura se acelera el deterioro de la cara de contacto de los electrodos, al soldar aceros galvanizados. Se concluye que la resistencia mecánica del punto de soldadura, es dependiente directa del diámetro del botón. Los resultados fueron los siguientes, considerando corridas de 1.000 puntos de soldadura por par de electrodos:

En el caso del acero HSLA de 1,81 mm, que fue el del menor espesor, no se presentaron cambios significativos en el área de contacto, por lo que se obtuvo un ligero incremento de diámetro de punta y por tanto de desgaste de electrodos apenas perceptible.

En el caso del acero IF de 2,53 mm se incrementó un 1,10% en el área de contacto durante los primeros 300 puntos de soldadura, para mantenerse constante los siguientes 300 puntos y posteriormente incrementarse lentamente, hasta llegar a los 1.000 puntos de soldadura.

En el caso del acero HSLA de 3,09 mm se incrementa el área de contacto un 1,34% en el transcurso de los primeros 400 puntos de soldadura, para mantenerse constante los siguientes 400 y posteriormente vuelve a incrementarse el área de contacto con la misma velocidad que se presentó de 1 a los 400 puntos soldados.

Referencias

- [1] Moya Salazar LA. Soldabilidad de aceros IF termogalvanizados para aplicaciones automotrices [disertación de maestría]. Monterrey: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León; 2005. p. 4.
- [2] Steel Market Development Institute. AHSS 101 the evolving use of Advanced High-Strength Steels for automotive applications. Michigan; 2011. p. 8-10.
- [3] Charleux M, Poole WJ, Militzer M, Deschamps A. Precipitation behavior and its effect on strengthening of an HSLA-Nb/Ti steel. Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science. 2001;32(7):1635-1647. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-001-0142-6>.
- [4] WorldAutoSteel. Advanced High Strength Steel (AHSS) application guidelines. Version 4.0. Middletown; 2009. p. 3-15.

- [5] Tamura I, Sekine H, Tanaka T, Ouchi C. Thermomechanical processing of HSLA steels. London: Butterworths; 1988. p. 154-166.
- [6] Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: UFMG; 2009. p. 293-306.
- [7] Natale T, Irving B. Automakers set the pace for spot welding the new galvanized steels. *Welding Journal*. 1992;3:47-52.
- [8] Williams NT, Parker JD. Review of resistance spot welding of steel sheets, part 1: modelling and control of weld nugget formation. *International Materials Reviews*. 2004;49(2):45-75.
- [9] Mitchell JW, Chang UI. Resistance spot welding of microalloyed steels for automotive applications. *Micro Alloying*, 75, 2000:599-609.
- [10] American Welding Society. AWS Handbook Committee. *Welding Handbook*. 8th ed. Miami: AWS; 1992. cap. 17:19. (vol. 2: Welding Processes).
- [11] Wolff MA, Silva RF, Vilarinho LO. Determinação dos campos de soldabilidade para o aço dual-phase 600 em equipamentos de soldagem a ponto ac e MFDC. *Soldagem & Inspeção*. 2010;15(3):200-208. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242010000300006>.
- [12] American Welding Society. AWS/SAE D8.9M:2002: recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials. Miami: AWS; 2002. 46 p.
- [13] Williams NT, Parker JD. Review of resistance spot welding of steel sheets, part 2: factors influencing electrode life. *International Materials Reviews*. 2004;49(2):77-108. <http://dx.doi.org/10.1179/095066004225010541>.
- [14] Nascimento VC, Scotti A. Metodologia para parametrizar e avaliar a técnica da "Burn-zinc" no processo de soldagem a ponto por resistência. *Soldagem & Inspeção*. 2010;15(1):11-21. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242010000100003>.
- [15] Silva RF, Vieira SL. Influência do tipo de revestimento na vida útil dos eletrodos na soldagem a pontos. *Soldagem & Inspeção*. 2008;13(2):105-110.
- [16] Ma N, Murakawa H. Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;(210):2045-2052.