

CAPITULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos de las pruebas y análisis efectuados, tanto en el material de trabajo como resultado de sus condiciones de procesamiento; la posible influencia de las características del material en su soldabilidad, así como las variables del proceso de soldadura que pueden afectar las propiedades y características de la unión soldada.

6.2 Procesamiento

El procesamiento térmico de los tres materiales de prueba mostrado en la Figura 5.1 para el recocido de lámina negra exhibe condiciones muy similares en cuanto a los rangos de temperatura, aún y cuando en el acero de prueba correspondiente a la condición de bajo Sb en la paila se tienen registros de temperatura en tres puntos en el horno F3 y solo uno en los dos materiales restantes, el objetivo de este recocido es el de brindarle las propiedades mecánicas al acero para que cumpla con las especificaciones demandadas, en este caso para la industria automotriz.

Con respecto a las temperaturas correspondientes a la zona de inmersión, éstas se encuentran en los niveles de práctica recomendada. Mientras que la temperatura de recocido del horno de inducción fue registrada a la salida de éste, la temperatura real a la cual el recubrimiento experimenta el tratamiento térmico se considera más elevada y dependerá de la potencia del horno de inducción, ya que no es posible medirla directamente, por lo que para la reproducibilidad del recubrimiento termogalvanizado de estos aceros los parámetros mostrados en la Tabla 5.1 se consideran suficientes.

La composición química del baño de galvanizado para las láminas de prueba en su condición de bajo y alto Sb corresponden al porcentaje óptimo de Al en el baño de 0.135% para operaciones de termogalvanizado como ya se explicó en el Capítulo II, mientras que para lámina de prueba en su condición de medio Sb es ligeramente menor. Las variaciones en el contenido de Sb en la paila se realizan como una medida para regular el tamaño de grano dendrítico del recubrimiento al afectar este contenido la tensión superficial, principalmente en líneas que frecuentan la transición de procesos de galvanizado a termogalvanizado y cuya influencia se tratará más adelante.

6.3 Material

6.3.1 Acero

Aunque la designación de este tipo de acero no está basada en su composición química, sino en sus propiedades mecánicas, es importante destacar la presencia de Nb y V los cuales influyen para obtener la resistencia mecánica mostrada manteniendo al mínimo el contenido de C, además de esto, los elementos que pudieran influir en la soldabilidad por puntos como son P, S, Si, Mn y Ti se encuentran en niveles en los que no tienen efecto alguno. La cantidad de carbono equivalente de acuerdo a la ecuación 4.1 para los tres aceros es de 0.12, 0.114 y 0.126% para la condición de bajo, medio y alto Sb respectivamente, muy por debajo del límite establecido por el estándar de 0.30%.

Las propiedades mecánicas de los tres aceros de prueba mostrados en la Figura 5.2 y Tabla 5.2 como resultado del procesamiento térmico coincide con un acero de tipo HSLA 050 XLK de acuerdo a la nomenclatura SAE presentada en el Capítulo I, y de calibre 16 de acuerdo a su espesor, presentando una dureza y porcentaje de elongación adecuados para la industria automotriz, como se aprecia en la Tabla 5.3.

Otro de los factores a considerar para la obtención de las propiedades mecánicas es su microestructura, la cual se puede apreciar en las Figuras 5.3 a 5.5 para los tres aceros de prueba, consistiendo ésta de granos de ferrita debido al bajo contenido de C, siendo éstos de un tamaño entre 5.6 y 7 μm . El tamaño de grano del acero de prueba de bajo Sb es el menor, presentando la mejor relación entre la resistencia contra la elongación, lo cual es benéfico en operaciones de formado.

6.3.2 Recubrimiento

La rugosidad del recubrimiento para los tres aceros de prueba depende tanto de la temperatura de termogalvanizado, así como por la laminación superficial en el tensonivelado, en este aspecto, el valor de rugosidad mostró tener similitudes en los tres aceros de prueba, con una mayor rugosidad en el sentido transversal de la lámina, Tabla 5.5. Aunque la rugosidad del recubrimiento, así como la del electrodo afectan la resistencia superficial inicial, el efecto de la fuerza aplicada por el electrodo y el desplazamiento de la capa de Zn con el colapso de asperezas al momento de soldar, provoca que esta característica no sea un factor de gran importancia para el proceso de soldadura, pero al tratarse de láminas automotrices, la rugosidad influye en procesos posteriores de pintado.

El espesor del recubrimiento para los diferentes aceros se vio afectado posiblemente por la velocidad de la línea, ya que conforme ésta aumenta, el espesor disminuye. Se puede observar en las Figuras 5.6 a 5.8 que los recubrimientos de los tres aceros de prueba tienen la similitud de contar únicamente con fases Γ y δ , la ausencia de fase ζ sugiere que la temperatura de termogalvanizado es mayor a la registrada, como ya se ha mencionado antes, sin embargo también es notorio que el recubrimiento de la lámina de prueba de bajo Sb presenta más agrietamiento que la correspondiente a la de medio Sb, mientras que el recubrimiento para la lámina de prueba procesado con alto Sb presenta un recubrimiento continuo y uniforme, lo que puede sugerir una mayor uniformidad en su conductividad eléctrica y térmica. Aunque este efecto se debe también a la temperatura del ciclo térmico del recubrimiento, que para la condición de alto Sb fue mayor.

La composición química de fases que se presenta en la Figura 5.9 muestra un mayor contenido de Fe en la fase δ para el acero de prueba concerniente a la condición de alto Sb, esto es también notorio en el perfil de intensidades que se presenta en la Figura 5.10 y es debido a que el recubrimiento de este acero se realizó con una temperatura de termogalvanizado mayor que las demás. Los resultados de composición química obtenidos por medio del espectrofotómetro de emisión por plasma de la Tabla 5.6 muestran el contenido de Fe similar para los tres aceros, el porcentaje de Fe en el recubrimiento varía de acuerdo al método de medición utilizado, ya que en el análisis por medio del espectrofotómetro de emisión por plasma el recubrimiento se analiza al ser diluido por ácidos, los cuales pueden disolver alguna cantidad de Fe del sustrato de acero. En cuanto al contenido de Al encontrado en el recubrimiento, se puede observar que existe un enriquecimiento debido a la fuerte afinidad que tiene con el Fe, esta cantidad de Al se concentra en la capa de inhibición generada para controlar el espesor del recubrimiento, la cual se rompe en el proceso de termogalvanizado para permitir la difusión de Fe en Zn. Con respecto al contenido de Sb en el recubrimiento, el cual es el principal parámetro de variación, se puede observar que para la condición de bajo Sb en la paila, el recubrimiento presenta un pequeño enriquecimiento, mientras tanto para la condición de medio Sb, como para la de alto Sb, el contenido de Sb en el recubrimiento es notoriamente inferior al de la paila (0.0298, 0.0213% respectivamente), esto probablemente se puede deber a la segregación de este elemento debido a las diferencias en solubilidad en Zn sólido y líquido, por lo que en caso de afectar la soldabilidad del material, éste sería por su efecto en el proceso de recubrimiento más que por su presencia en el mismo.

El peso del recubrimiento para los tres materiales de prueba de la Tabla 5.7 muestra que el correspondiente a la condición de medio Sb en la paila presenta el mayor peso, esto debido a que la velocidad de la línea para éste fue la menor con respecto a los otros dos y es por lo tanto el de mayor espesor del recubrimiento. La cantidad de

recubrimiento, ya sea en peso o en espesor puede afectar de manera directa la soldabilidad, ya que disminuye considerablemente la vida del electrodo.

La integridad del recubrimiento como una característica de la capacidad del acero recubierto a ser formado mostrada en la Tabla 5.8 hace notar que la cantidad de recubrimiento desprendido es mayor para el ensayo de doblez de 60° , como era de esperarse, sin embargo, y con respecto a los tres aceros de prueba ensayados, el acero procesado con alto Sb en la paila presenta la menor cantidad de desprendimiento, pudiendo deberse esto a la cantidad de Fe en el recubrimiento por la más elevada temperatura de termogalvanizado, siendo éste el que presenta menos grietas en la fase δ , así como una fase Γ continua, contrario a esto, el acero de prueba en su condición de medio Sb presenta el mayor desprendimiento debido a que es el de mayor espesor de recubrimiento.

6.4 Soldabilidad

Las pruebas realizadas a los tres materiales de experimentación fueron realizadas en los paneles y cupones correspondientes de acuerdo a los procedimientos de la norma Chrysler⁽⁴⁴⁾ como ya se ha indicado.

La primer técnica de evaluación de los puntos de prueba realizada, consistió en la inspección visual de los puntos de soldadura con el fin de determinar los botones de prueba sospechosos. En la Figura 5.13 se muestran puntos representativos de cada una de las pruebas realizadas en cada acero, en estas imágenes se puede apreciar el desplazamiento del recubrimiento en todos los botones. Se puede notar que el botón de soldadura luce una apariencia más oscura en los puntos realizados a 5 ciclos de tiempo de sostenimiento, esto es debido a que la temperatura a la cual fueron liberados los electrodos de la pieza de trabajo resultaba más elevada que la correspondiente a los puntos realizados con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento. El punto de soldadura del acero de prueba de bajo Sb en la paila y 5 ciclos de sostenimiento presenta este obscurecimiento únicamente en una pequeña zona, mientras que para los puntos de soldadura concernientes a los otros aceros se presenta

en mayor magnitud tanto a 30, como a 5 ciclos de tiempo de sostenimiento. Estas manchas oscuras, al representar la mayor temperatura, indican además que la elevada temperatura se presentó en zonas localizadas, por lo que puede considerarse similarmente un suministro de corriente localizado que al ser en menor área que la correspondiente a la totalidad de la cara del electrodo, genera así una mayor densidad de corriente. En algunos casos es evidente la aleación del cobre del electrodo, sobre todo en los botones de bajo contenido de Sb ya que en estos el oscurecimiento es menor. Se aprecia agrietamiento en el botón correspondiente a la prueba con alto Sb a 5 ciclos (panel 5, punto 2) en la parte superior derecha de la imagen.

El análisis microestructural del botón de soldadura presentado en la Figura 5.14 muestra un patrón de agujas más delgadas de ferrita acicular en las pruebas realizadas con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos, mientras que para un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos, debido a una diferencia en el enfriamiento, la microestructura es más burda. En las micrografías mostradas en la figura 5.15, debido al tipo de ataque en donde la formación de películas superficiales de acuerdo a las diferencias cristalográficas o de diferente potencial de los granos provoca la diferencia en colores y tonalidades, se puede apreciar un mayor contraste en color para las micrografías realizadas a 5 ciclos de sostenimiento, ya que son estructuras de mayor tamaño, apreciándose la trayectoria de extracción de calor.

El registro de las corrientes de soldadura durante el transcurso de la prueba se muestra en las Tablas 5.9 a 5.14 para todos los puntos de paneles y cupones a 30 y 5 ciclos de tiempo de sostenimiento, las casillas sombreadas indican la expulsión en la realización de dicho punto. Para el primer punto de cada grupo de seis de los paneles de prueba es muy común que ocurra expulsión, así como en cada uno de los cupones, esto es debido a que existe inicialmente una mayor resistencia interfásial entre láminas que provoca una mayor generación de calor que favorece la expulsión, en los puntos consecutivos, debido a la presencia de puntos previamente realizados, existen desvíos de corriente que hacen que no se genere la misma cantidad de calor que en el primer punto, sin embargo, dependiendo de la magnitud de la corriente efectiva que

pasa a través del botón que se está realizando, la expulsión en los puntos siguientes no se descarta.

En estas tablas se tiene información acerca del porcentaje de calor programado para la prueba, éste es el resultado del procedimiento de ajuste de corriente realizado a cada acero como parte de la prueba y está en proporción directa con la cantidad de corriente suministrada por la máquina soldadora. Como se muestra en las Figuras 5.16 y 5.17, el nivel de corriente más alto corresponde a la prueba de alto Sb, seguido de la de bajo Sb, siendo el más bajo el de medio Sb, para estas pruebas, la corriente de soldadura requerida por la norma Chrysler⁽⁴⁴⁾ se encuentra en el rango de los 12 a los 15 kA. Aunque es notorio que la prueba de alto Sb es la que presenta mayor porcentaje de puntos de soldadura que presentan expulsión debido a que es la de mayor nivel de corriente, el estándar de prueba es tolerante a la expulsión, sin embargo utiliza otros parámetros de evaluación con motivo de regular la severidad de la misma, como se discutirá más adelante.

El procedimiento de ajuste de corriente juega un papel muy importante en la determinación de la corriente de prueba, sin embargo, puede tener variaciones con respecto a ésta en el sentido de que este ajuste se realiza en láminas en las que el paso entre botones consecutivos, como se muestra en la Figura 4.21 es menor que para los paneles de prueba, existiendo un mayor desvío de corriente, por lo que en la prueba de soldadura los requerimientos de corriente serían menores debido a un menor desvío. En la prueba de alto Sb y debido a la uniformidad del recubrimiento, la menor resistencia presentada por éste hace que durante el ajuste de corriente el requerimiento sea mayor, sin embargo durante la prueba y debido a la adherencia de Zn a los electrodos, estas condiciones cambian, haciendo que el nivel de corriente esté por encima del requerido en ese momento, lo que causa una mayor generación de calor. En el caso de la prueba de medio Sb, la adherencia de Zn al electrodo durante el ajuste de corriente provoca que el área de contacto sea menor lo que hace que el flujo se concentre en ésta zona y el requerimiento de corriente sea menor, como si se tratara de un electrodo más pequeño.

El diámetro del botón de soldadura medido tanto con vernier como con analizador de imágenes en las muestras metalográficas de los cupones y puntos sospechosos en paneles mostrados en las Tablas 5.15 a 5.20 es dependiente de la corriente de soldadura suministrada para la generación de tal punto. De las Figuras 5.18 y 5.19 se observa que mientras que los diámetros de los botones de soldadura relativos a las pruebas de bajo y alto Sb son de dimensiones muy similares, los diámetros para la prueba de medio Sb permanecen en un nivel inferior debido a una corriente de soldadura menor, se puede notar también que el diámetro de los botones de soldadura para todas las pruebas realizadas con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos son menores que aquellas realizadas con 30 ciclos. Es importante mencionar que el diámetro del botón para todas las pruebas está muy por encima del diámetro mínimo requerido que solicita el estándar de 5.4 mm.

La carga máxima soportada por los botones de soldadura en el ensayo de corte a tensión se muestra en las Tablas 5.21 a 5.26, esta resistencia es dependiente del diámetro del botón y del tiempo de sostenimiento, se puede observar que la carga máxima soportada por los puntos de todas las pruebas a 30 ciclos de tiempo de sostenimiento es ligeramente mayor que la de sus pruebas correspondientes a 5 ciclos. En las Figuras 5.20 y 5.21 se aprecia que la resistencia de los botones parece mantenerse estable y esto es debido al modo de fractura que presenta, que en la mayoría de los casos fue el arranque completo del botón de soldadura de la lámina ensayada, esto es por que el extremo del botón actúa como un concentrador de esfuerzos por lo que cede la lámina y no el botón. Los valores más bajos de resistencia a la tensión de los puntos se registraron en los paneles de prueba de medio Sb debido a que estos presentaron un modo de fractura interfásial que se considera indeseable. De acuerdo con la ecuación 4.3, que establece la fuerza mínima del botón de soldadura, la carga mínima para los tres aceros de prueba se encuentra alrededor de los 1000 kg, la cual representa una cantidad mucho menor a cualquiera de los puntos ensayados.

El análisis visual y dimensional de las muestras metalográficas presentadas en las Figuras 5.22 a 5.24 se cuantifica en las Tablas 5.27 a 5.29 y se muestra gráficamente en las Figuras 5.25 a 5.36. Del análisis visual de los botones de soldadura de la prueba a bajo Sb se observa que se presenta una indentación del electrodo, así como una penetración de soldadura uniforme, la mayor indentación del electrodo en los puntos relativos al tiempo de sostenimiento de 5 ciclos es el factor que regula la severidad de la expulsión.

La inspección de los botones para la prueba de medio Sb revela que existe un corrimiento del botón de soldadura hacia uno de los lados con respecto a la huella de indentación del electrodo, este corrimiento se presenta en la dirección en la que la indentación del electrodo es mayor, que es debida a la adherencia de Zn del recubrimiento en la cara del electrodo, lo que provoca que existan áreas de contacto localizadas por las que circula la mayor cantidad de corriente y a su vez hace que el botón de soldadura se genere en ese lugar.

En los botones de la prueba de alto Sb se puede observar que la penetración de la soldadura es mayor que en las dos pruebas anteriores, llegando casi a la superficie del botón, esto es debido a que esta prueba fue la realizada con el nivel de corriente más elevado. Se presenta además un ligero corrimiento del botón de soldadura hacia la zona de mayor indentación del electrodo provocada por la adherencia de Zn, que con ayuda del alto calor generado llega a distorsionar el botón.

El diámetro del botón en todas las pruebas, en paneles y cupones y para los dos tiempos de sostenimiento ensayados varía en proporción directa con la corriente suministrada como se observa en las Figuras 5.25 a 5.28.

La penetración promedio de soldadura para los cupones de las tres pruebas mostrada en las Figuras 5.29 y 5.30 resulta mayor que para sus correspondientes paneles mostrados en las Figuras 5.31 y 5.32, esto es debido a que la resistencia de contacto inicial es mayor y no ocurren desvíos de corriente por puntos adyacentes como en los

paneles. La penetración de la soldadura para la prueba de alto Sb resultó ser la mayor debido a que es la realizada con una mayor corriente, siguiendo con la de medio Sb que aunque se efectuó con la menor corriente, ésta se efectuó localizadamente como ya se ha descrito, por lo que existió una generación de calor más elevada en tal zona. La prueba de bajo Sb, ya que es más uniforme la penetración de soldadura, es la que registra los valores más bajos, que sin embargo son muy superiores a los requerimientos del estándar que indica el porcentaje mínimo en un 20% del espesor de la lámina.

Los principales factores que afectan la indentación del electrodo son el acontecimiento y severidad de la expulsión al momento de realizar el punto de soldadura, así como la adherencia localizada de recubrimiento en la cara del electrodo, las Figuras 5.33 a 5.36 muestran gráficamente el comportamiento en la prueba. Para los cupones de prueba analizados, el porcentaje de indentación del electrodo se mantiene en un estrecho rango entre el 20 y 30% para los dos tiempos de sostenimiento programados. Ya que el límite establecido por el estándar es del 30%, se puede observar que para los paneles de prueba, la indentación a 30 ciclos de tiempo de sostenimiento supera ligeramente ese valor en dos de éstas pruebas, mientras que para 5 ciclos se presentan en mayor magnitud.

De la Figura 5.37 se puede observar que el perfil de microdurezas a través del botón de soldadura presenta valores más altos para los botones realizados con tiempo de sostenimiento de 30 ciclos que los relativos a 5 ciclos, excepto para el de alto Sb, esto debido a la razón de extracción de calor por los electrodos, que a mayor tiempo permite mayor extracción de calor, influyendo así en su microestructura como ya se ha descrito. Las microdurezas más altas se encontraron en los botones de soldadura de la prueba de bajo Sb, seguido por la de medio Sb y alto Sb, esto es debido que la adherencia y aleación presentada por los electrodos en las pruebas de medio y alto Sb reducen la eficiencia térmica con la que se extrae el calor, haciendo que al momento en que se libera el botón esté más caliente, lo cual es visible en el exterior de los puntos como ya se ha descrito.

El tipo de defecto presentado por el botón de soldadura, así como el número de incidencias en la prueba afectan las propiedades mecánicas del botón de soldadura y su ausencia es uno de los principales criterios de aceptabilidad del estándar. La prueba de bajo Sb presentó la menor cantidad de defectos, siendo estos un poro y una grieta, este último es el único tipo de defecto que el estándar menciona como indeseable, mientras que los poros dependiendo de su ubicación y tamaño son más tolerables. La prueba de medio Sb, debido a que la formación del botón de soldadura se realizó en forma localizada, se presenta la existencia de fallas interfaciales, es decir, zonas en donde no existió una fusión completa entre las hojas en ubicaciones diferentes a la generación principal de calor, este tipo de defecto es el causante de que el botón de soldadura presente un modo de fractura a la mitad del botón cuando se somete a tensión, lo cual es indeseable ya que reduce la resistencia mecánica, como se observa en la Figura 5.21.

La prueba con alto Sb presentó el mayor número de defectos, siendo el principal la aparición de grietas, que es causa de incumplimiento al estándar. Esta alta cantidad de grietas es debida a que los botones de esta prueba fueron realizados con la corriente más alta, generándose una cantidad de calor muy grande que afecta al botón al solidificar. Aún y cuando esta prueba presenta un gran número de grietas, éstas no demostraron tener efecto alguno en las propiedades mecánicas de los botones de soldadura, ya que por su ubicación en el botón, no actúan como concentradores de esfuerzos, sin embargo pueden ser dañinas al ser sometidas a ciclos de fatiga.

La Figura 5.40 muestra la relación que existe entre el área por la cual circula la corriente al inicio y al final de las pruebas de soldadura. La impresión de las caras del electrodo al finalizar la prueba muestra el área a través de la cual la mayor cantidad de corriente circula, esto debido a la adherencia de Zn en la cara del electrodo que se muestra en la Figura 5.41, causando la aleación con el Cu del electrodo, generándose así una capa de latón vista en sección transversal en la Figura 5.42. Es notorio que para la prueba de alto Sb la adherencia de Zn resulta más localizada, seguido de la de

medio y bajo Sb que aunque también experimentan adherencia, ésta se presenta mejor distribuida en la cara del electrodo.

La microestructura del material del electrodo mostrada en la figura 5.38 presenta partículas de Cr dispersas en una matriz de Cu, que es el principal endurecedor para este material, mientras que la composición química presentada en la Tabla 5.31 muestra el contenido de Cr y Zr, correspondiente al material RWMA clase 2 cobre-cromo requerido por el estándar. La dureza del electrodo mostrada en la figura 5.42 de 88 Vickers es menor a la del acero de prueba, lo cual es recomendado para este proceso de soldadura.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

La cantidad de Sb en la paila afecta indirectamente la soldabilidad de la lámina recubierta ya que influye en las características del recubrimiento, sin embargo, los resultados mostraron que la temperatura en el horno de recocido es la variable que más influye en la formación fases del recubrimiento.

Se encuentra que la cantidad de Sb no es un factor de peso que afecte la soldabilidad, debido a que ocurre segregación de éste durante solidificación, lo que provoca variaciones en su contenido con respecto a la cantidad inicial presente en la paila, se encontró que existe un límite de Sb permitido que se encuentra alrededor de 0.03%. Lo que es de importancia para el productor de lámina que frecuentemente cambia del proceso de galvanizado normal al de termogalvanizado

La temperatura del horno de termogalvanizado afecta el porcentaje de Fe que se encuentra en las fases presentes en el mismo, a altas temperaturas, la formación de fases es más uniforme.

El aumento en el espesor del recubrimiento resulta en una mayor adherencia en el electrodo y aumenta además la cantidad de desprendimiento de recubrimiento en operaciones de formado.

El procedimiento de ajuste de corriente utilizado es inadecuado para lámina galvanizada, ya que no contempla las variaciones que se puedan presentar debido a la

adherencia de Zn en los electrodos, además la diferencia en el espaciamiento entre puntos con respecto a la prueba, así como las dimensiones de las láminas son factores causantes de variaciones en la corriente durante la ejecución de la prueba.

Al ajustar la corriente de soldadura a niveles cercanos al de expulsión de material, los rangos de temperatura alcanzados provocan que exista aleación y adherencia al material del electrodo con el recubrimiento con mayor facilidad, lo que disminuye la vida del electrodo.

La generación de calor de soldadura en los botones es influenciada por áreas de adherencia localizada de Zn en la cara del electrodo, ya que la corriente fluye a través de un área menor, ocasionando que aumente la densidad de corriente en dichas áreas.

La adherencia de Zn en la cara del electrodo resultó ser una de las principales causas de incumplimiento de los parámetros requeridos por la norma, ya que ocasionan una mayor indentación en el área del botón de soldadura en donde están presentes, ocasionando distorsión en el botón, provocan el corrimiento del botón con respecto a la cara de los electrodos y ocasionan la generación de defectos interfaciales en las zonas de menor flujo de corriente que debilitan al botón de soldadura.

La aleación del electrodo con el recubrimiento, así como su adherencia afecta la capacidad térmica del electrodo, lo que provoca que no extraiga la misma cantidad de calor del botón de soldadura y afecte la microestructura y dureza del mismo.

Las corrientes de soldadura mayores a 12.5 kA para el calibre de lámina utilizado involucran una mayor generación de calor, esto mostró estar directamente relacionado con la aparición de grietas en el botón de soldadura.

De los tres defectos encontrados, el de mayor incidencia fue el agrietamiento en el botón de soldadura, sin embargo se encontró que no tiene influencia en las

características mecánicas a tensión al ubicarse éstas en zonas en las que no participan en el modo de fractura del punto de soldadura, mientras que los defectos interfaciales provocan la disminución en la resistencia mecánica del botón.

7.2 Recomendaciones

Un procedimiento de ajuste de corriente en base a las dimensiones del botón resultante con respecto al mínimo requerido propiciaría que las corrientes de soldadura durante la prueba permanecieran en niveles inferiores al especificado por el estándar, esto es benéfico ya que se utiliza menor energía. Sin embargo, al estar el rango de corriente requerido por la norma a niveles más altos, desde el punto de vista del productor de lámina recubierta, esto resulta inconveniente.

Es recomendable utilizar un método de ajuste de corriente en base al diámetro del botón durante la prueba para obtener una mejor correspondencia con los puntos durante el transcurso de ésta.

Para aumentar la corriente de soldadura al rango que requiere la norma de evaluación, se recomienda aumentar el espesor de recubrimiento, sin embargo esto puede reducir la vida del electrodo y causar aleación severa, es posible minimizar la aleación del Zn con el material del electrodo con un proceso posterior de fosfatizado.

Se recomienda realizar un análisis de estabilidad térmica del recubrimiento para determinar su posible influencia en el desempeño de este tipo de soldadura.

REFERENCIAS

1. Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers' Association, 4^{ta} Edición, Caps. 1, 2, 7, 10, 18 y 24, 1999, Philadelphia, EUA.
2. AMS Handbook Volume I, ASM International Handbook Committee, The material information Society, 10th edition, HSLA Steels pp 398-423, 1990, EUA.
3. SAE J410 High Strength, Low Alloy Steel, 1990 SAE Handbook, Volume 1 Recommended Practice, pp 1.143-1.144, 1990, EUA.
4. The Role Of Niobium In Multi-Phase Steel, Klaus Hulka, Niobium Products Company, Düsseldorf, 2003, Alemania.
5. SAE J1392 Steel, High Strength, Hot Rolled Sheet And Strip, Cold Rolled Sheet, And Coated Sheet, 1990 SAE Handbook, Volume 1, Recommended Practice, pp 1.145-1.148, 1990, EUA.
6. Characteristic Feature Of Titanium, Vanadium And Niobium As Microalloy Additions To Steel, K. Hulka, 2003, Brasil.
7. Control Of Grain Size Through Controlled Rolling Schedules, The University of Liverpool, http://www.matter.org.uk/steelmatter/forming/6_1_1_1.html, 2000, Inglaterra.
8. Propiedades A Impactos De Aceros Microaleados, J.A. Fuentes, Tesis Doctoral, pp 54-58, 140, 2003, México.
9. Dynamic Recrystallization: Laboratory Curiosity To Industrial Tool, J.J. Jonas, Thermomechanical Processing: Mechanics, Microstructure & Control, Conference Proceedings, pp 2-8, 2002, Inglaterra.
10. The Critical Strain For Dynamic Recrystallization, E.I. Poliak, J.J. Jonas, Thermomechanical Processing: Mechanics, Microstructure & Control, conference proceedings, pp 405-412, 2002, Inglaterra.
11. Modern Hot Dip Coated Sheet Steel – Processing, Coating Characteristics And Fabricating Properties, W. Warnecke, R. Bode, Zinc Based Steel Coating Systems: Metallurgy and Performance, The Minerals, Metals & Materials Society, pp 3-17, 1990, EUA.
12. The Metallurgy Of Zinc-Coated Steel, A.R. Marder, Progress in Materials Science, Ed Pergamon, pp 191-271, 2000, EUA.
13. Key Features In The Landscape Of Hot Dip Galvanizing, J. Fader, G. Angeli, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 381-389, 2002, EUA.
14. AMS Handbook Volume XIII, ASM International Handbook Committee, The Material Information Society, Specific Alloy Systems, pp 526, 765-766, 1987, EUA.
15. The Continuous Hot-Dip Coating Process For Steel Sheet Products, GalvInfoNote #2, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-4, 2003, EUA.

16. Zinc-Based Coating Production Capabilities For Steel Sheet: Current Technical Topics And Scientific Needs, F.E. Goodwin, E.A. Silva, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 365-379, 2002, EUA.
17. Enhanced Hot Dip Galvanizing By Controlling Oxidation In The Annealing Furnace, L. Bordignon, G. Angeli, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 833-844, 2002, EUA.
18. Determination Of Liquid-Phase Boundaries In Zn-Fe-Mx Systems, N. Y. Tang, Journal of Phase Equilibria, Vol. XXI No.1, pp 70-77, 2000 EUA.
19. Hot-Dip Galvanized Sheet Steel With Excellent Press Formability And Surface Quality For The Automotive Panels, K. Abotani, K. Hirohata, T Kiyasu, Kawasaki Steel Technical Report, No. 48, pp 17-22, 2003, EUA.
20. Numerical Analysis Of The Effect Of Temperature Variation On Flow In A Continuous Galvanizing Bath, F. Ajersch, F. Ilincă, J. F. Héту, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 863-873, 2002, EUA.
21. Particle Size And Composition Of Dross Particles From Galvanize And Galvanneal Operations, F. Ajersch, L. Trépanier, F.E. Goodwin, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 771-780, 2002, EUA.
22. Dross Formation And Control During Transitions From Galvannealing To Galvanizing, Y.H. Liu, N. Y. Tang, L. Zhang, S.G. Denner, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 781-790, 2002, EUA.
23. Air Knife Coating In Hot-Dip Galvanizing, A.N. Hrymak, J.F. Forbes, J. Knight, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 853-861, 2002, EUA.
24. Galvanizing – The Use Of Chemical Fluxes, GalvInfoNote #17, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-3, 2003, EUA.
25. Control Of Coating Weight (Mass) For Continuous Hot-Dip Galvanized Sheet Products, GalvInfoNote #11, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-6, 2003, EUA.
26. Protecting Galvanized Steel Sheet Products From Storage Stain, GalvInfoNote #7, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-6, 2003, EUA.
27. Zinc Phosphate Treatments For Painted Galvanized & Galvannealed Sheet Products, GalvInfoNote #18, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-2, 2003, EUA.
28. The Impact Of The Zinc Layer On The Manufacture Of Automotive Sheet Steel, J.H. Lindsay, Zinc Based Steel Coating Systems: Metallurgy and Performance, The Minerals, Metals & Materials Society, pp 281-294, 1990, EUA.
29. The Spangle On Hot-Dip Galvanized Steel Sheet, GalvInfoNote #13, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-4, 2003, EUA.

30. Study Of Zinc Crystals Orientation Effect On The Corrosion Behavior, J.D. Culcasi, P.R. Seré, C.I. Elsner, A.R. Di Sarli, *The Journal of Scanning Microscopies*, Vol. XX, pp 251-252, 1998, EUA.
31. Microstructural Characterization Of Zinc Coatings, A. R. Marder, *Zinc Based Steel Coating Systems: Metallurgy and Performance*, The Minerals, Metals & Materials Society, pp 55-82, 1990, EUA.
32. The Role Of Aluminum In Continuous Hot-Dip Galvanizing, GalvInfoNote #10, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-5, 2003, EUA.
33. Al-Oxid Layer On Hot-Dip Galvanized Steel Sheet: Characterization And Influence On Weldability, J. Faderl, J. Strutzenberger, J. Angeli, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 845-851, 2002, EUA.
34. Hot-Dip Galvanizing Of Al Alloyed TRIP Steels, J. Mahieu, J. Maki, S. Claessens, *Iron And Steelmaking*, Vol. 29, No. 6, pp 29-34, 2002, EUA.
35. Galvannealed Coatings, How Do They Differ From Galvanized?, GalvInfoNote #5, The International Lead Zinc Research Organization, pp 1-5, 2003, EUA.
36. Influence Of Substrate Characteristics On The Inhibition Layer Breakdown And Galvannealing Kinetics, S. Dionne, G. Botton, F. Goodwin, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol. XL, pp 405-415, 2002, EUA.
37. Applications Of Mössbauer Spectroscopy In Industry, D.C. Cook, *Proceedings of the International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect*, pp 1-11, 2001, Inlaterra.
38. Phase Measurement Of Galvanneal Task, L. Lowry, B. Tai, *Jet Propulsion Laboratory*, pp 22-25, 1995, EUA.
39. Development Of Zinc-Based Coatings For Automotive Sheet Steel In Japan, T. Irie, *Zinc Based Steel Coating Systems: Metallurgy and Performance*, The Minerals, Metals & Materials Society, pp 143-155, 1990, EUA.
40. Characterization And Development Of Zn-Fe Alloyed Coating Layer, S. Chang, *Zinc Based Steel Coating Systems: Metallurgy and Performance*, The Minerals, Metals & Materials Society, pp 319-330, 1990, EUA.
41. Galvannealed Coating Optimized For Coating Adhesion Through Dies, M.F. Shi, G.M. Smith, M. Moore, D.J. Meuleman, *Zinc Based Steel Coating Systems: Metallurgy and Performance*, The Minerals, Metals & Materials Society, pp 387-398, 1990, EUA.
42. Welding In The Automotive Industry: State Of The Art, D.W. Dickinson, *Republic Steel Corporation*, Report on AISI Project No. 1201-409C, pp 1-400, 1984, EUA.
43. SAE J836a, SAE Automotive Metallurgical Joining, 1990 SAE Handbook, Volume 1 Recommended Practice, pp 9.07-9.11, 1990, EUA.
44. Resistance Weldability Test For Bare, Galvanized, Galvannealed, High Strength, Low Carbon, And Interstitial Free (IF) Hot And Cold Rolled Steel

- Sheet, Chrysler Corporation Laboratory Procedure No: LP-461K-170, Vehicle Engineering Office, pp. 1-46, 1992, EUA.
45. Resistance Spot Welding, TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridge, CB1 6AL, pp 1-2, 2004, Inglaterra.
 46. Processes Of Joining Materials, T. W. Eagar, MIT, 2001, EUA.
 47. Dr Weld, J.J. Hernandez, Procex, www.drweld.com, pp 1-3, 2001, EUA.
 48. Spot, Seam And Projection Welding, Welding Handbook, American Welding Society, Cap 17, pp 532-552, 1991, EUA.
 49. Application Guidelines For High Strength And Ultra High Strength Steels, R. Slock, Sidstahl N.V., GENT, pp. 14-15, 2002, EUA.
 50. Resistance Spot Welding Automotive Components, Chrysler Corporation Process Standard No: PS-9471<S>, Vehicle Engineering Office, pp 1-20, 1998, EUA.
 51. HSLA-100 Steels: Influence Of Aging Heat Treatment On Microstructure And Properties, M. Mujahid, A.K. Lis, C.I. Garcia, A.J. DeArdo, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 7, ASM International, pp 247-257, 1998, EUA.
 52. Microstructure And Properties Of Quenched-And-Aged Plates Produced From A Cooper-Bearing HSLA Steel, S.K. Sen, A. Ray, R. Avatar, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 7, ASM International, pp 504-510, 1998, EUA.
 53. Resistance Spot Welding Of High Strength Steels, G. Shi, S.A. Westgate, JOM - Eleventh International Conference on the Joining of Materials, pp 1-10, 2003, Dinamarca.
 54. Current Adjustment Procedure For Welding Strip Pairs, Chrysler Corporation Laboratory Procedure No: LP-461K-173, Vehicle Engineering Office, pp 1-6, 1991, EUA.
 55. Tint Etching, G. Vander Voort, Metal Progress, ASM International, 1985, EUA.

ANEXO I

TABLAS DE MICRODUREZA

Cupón, bajo Sb, 30 ciclos, punto 1					Cupón, bajo Sb, 30 ciclos, punto 2				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers	# indentación	medida 1 (μm)	medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	33.55	33.02	33.28	167.39	1	35.12	35.41	35.26	149.11
2	32.13	31.27	31.70	184.53	2	31.09	32.09	31.59	185.80
3	28.45	27.92	28.19	233.40	3	29.24	29.49	29.36	215.05
4	26.92	28.49	27.71	241.54	4	29.45	27.99	28.72	224.81
5	27.85	27.00	27.42	246.59	5	27.53	28.32	27.92	237.85
6	26.67	26.95	26.81	257.95	6	29.31	28.28	28.79	223.69
7	27.85	27.17	27.51	245.01	7	27.60	28.38	27.99	236.69
8	26.03	27.24	26.63	261.41	8	29.70	28.78	29.24	216.92
9	26.46	27.17	26.82	257.90	9	28.85	29.09	28.97	220.95
10	27.21	26.24	26.72	259.72	10	26.78	28.99	27.88	238.53
11	28.17	27.92	28.04	235.78	11	27.75	29.02	28.39	230.15
12	27.03	26.49	26.76	258.97	12	27.13	28.32	27.73	241.23
13	26.64	26.42	26.53	263.40	13	27.95	28.74	28.35	230.78
14	27.92	27.95	27.94	237.58	14	29.17	28.28	28.72	224.80
15	26.46	26.28	26.37	266.71	15	28.52	28.61	28.56	227.27
16	27.24	27.88	27.56	244.12	16	29.89	29.13	29.51	212.94
17	28.28	28.28	28.28	231.95	17	27.78	28.63	28.20	233.14
18	28.52	27.92	28.22	232.81	18	28.74	27.99	28.36	230.50
19	29.74	29.42	29.58	211.97	19	29.09	30.35	29.72	209.95
20	30.82	29.20	30.01	205.93	20	28.63	28.74	28.68	225.38
21	30.56	29.74	30.15	204.04	21	32.55	33.06	32.80	172.32
22	28.74	28.45	28.60	226.78	22	33.12	34.16	33.64	163.85
23	29.02	29.95	29.49	213.27	23	37.87	37.22	37.54	131.56
24	27.34	29.09	28.22	232.87					
25	29.27	30.02	29.65	210.98					
26	34.02	34.16	34.09	159.60					
27	32.16	33.87	33.02	170.11					

Tabla A. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Tabla B. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de bajo Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, bajo Sb, 30 ciclos, punto 3				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	35.69	36.08	35.89	143.99
2	34.02	33.52	33.77	162.63
3	32.13	31.27	31.70	184.53
4	29.09	30.66	29.88	207.72
5	25.53	27.00	26.26	268.82
6	28.06	28.45	28.26	232.26
7	27.49	28.74	28.11	234.61
8	29.29	30.13	29.71	210.06
9	29.48	29.39	29.43	214.08
10	27.80	29.02	28.41	229.74
11	28.09	26.97	27.53	244.69
12	28.46	27.93	28.19	233.29
13	28.18	29.30	28.74	224.51
14	28.55	27.34	27.95	237.46
15	28.18	28.75	28.47	228.85
16	27.26	27.91	27.58	243.71
17	27.73	28.19	27.96	237.24
18	26.98	27.63	27.30	248.77
19	27.06	27.44	27.25	249.66
20	26.13	28.46	27.30	248.89
21	29.39	27.34	28.37	230.46
22	28.27	28.47	28.37	230.41
23	29.39	29.20	29.30	216.07
24	28.37	28.27	28.32	231.16
25	33.29	34.05	33.67	163.59
26	34.13	34.69	34.41	156.58
27	35.43	35.08	35.25	149.22

Tabla C. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, bajo Sb, 5 ciclos, punto 1				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	36.27	37.48	36.87	136.38
2	35.35	35.75	35.55	146.72
3	38.81	39.96	39.39	119.54
4	36.87	37.60	37.23	133.76
5	30.68	31.95	31.32	189.08
6	35.44	35.64	35.54	146.82
7	29.81	29.78	29.79	208.89
8	32.07	33.35	32.71	173.30
9	33.31	32.65	32.98	170.50
10	35.70	34.39	35.05	150.99
11	35.89	34.93	35.41	147.91
12	31.89	31.15	31.52	186.65
13	30.97	31.14	31.06	192.28
14	30.65	31.90	31.27	189.60
15	32.19	31.56	31.88	182.49
16	30.60	31.20	30.90	194.18
17	29.07	28.74	28.91	221.95
18	30.23	31.69	30.96	193.46
19	31.73	31.56	31.65	185.14
20	30.45	32.02	31.24	190.04
21	33.11	34.32	33.71	163.14
22	31.61	32.27	31.94	181.78
23	31.11	32.14	31.62	185.42
24	31.44	31.73	31.59	185.86
25	33.45	33.64	33.55	164.78
26	35.41	36.76	36.09	142.41

Tabla D. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, bajo Sb, 5 ciclos, punto 2				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	40.67	39.92	40.29	114.23
2	34.89	34.59	34.74	153.65
3	37.05	37.11	37.08	134.86
4	36.72	35.59	36.15	141.86
5	37.14	37.14	37.14	134.41
6	36.22	36.20	36.21	141.43
7	33.85	33.77	33.81	162.24
8	35.59	36.01	35.80	144.66
9	32.64	35.05	33.85	161.87
10	35.05	36.30	35.68	145.68
11	31.14	32.99	32.07	180.34
12	31.73	33.64	32.68	173.58
13	31.14	31.33	31.24	190.03
14	31.60	31.27	31.44	187.64
15	31.48	31.93	31.70	184.48
16	32.08	32.74	32.41	176.53
17	32.02	31.46	31.74	184.05
18	34.18	34.19	34.18	158.69
19	34.68	35.47	35.07	150.73
20	31.77	31.53	31.65	185.15
21	35.30	35.14	35.22	149.49
22	33.14	34.10	33.62	164.07
23	36.34	35.72	36.03	142.84
24	35.14	38.64	36.89	136.28
25	36.26	37.20	36.73	137.45
26	36.69	37.84	37.27	133.53
27	38.19	38.24	38.21	126.99

Tabla E. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de bajo Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, bajo Sb, 5 ciclos, punto 3				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	40.69	41.47	41.08	109.89
2	37.55	38.47	38.01	128.35
3	36.98	36.90	36.94	135.89
4	34.87	35.51	35.19	149.74
5	32.57	31.91	32.24	178.39
6	34.94	33.73	34.34	157.28
7	35.12	37.34	36.23	141.27
8	33.04	33.60	33.32	167.04
9	34.27	33.55	33.91	161.26
10	31.77	33.09	32.43	176.33
11	35.02	35.02	35.02	151.22
12	34.09	32.41	33.25	167.71
13	35.18	33.73	34.45	156.22
14	33.63	33.17	33.40	166.27
15	33.39	32.41	32.90	171.32
16	34.69	33.16	33.93	161.10
17	33.84	33.73	33.78	162.47
18	33.68	34.45	34.07	159.79
19	35.05	32.73	33.89	161.46
20	32.41	33.16	32.79	172.49
21	34.41	33.70	34.06	159.86
22	35.77	36.98	36.37	140.17
23	34.43	36.16	35.29	148.88
24	36.49	34.73	35.61	146.22
25	38.00	37.80	37.90	129.11
26	36.15	39.67	37.91	129.01
27	34.31	33.73	34.02	160.23

Tabla F. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, medio Sb, 30 ciclos, punto 1				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	43.22	45.75	44.48	93.72
2	38.62	38.73	38.68	123.96
3	41.90	42.36	42.13	104.47
4	39.75	37.52	38.64	124.22
5	34.44	35.20	34.82	152.95
6	32.07	31.82	31.95	181.72
7	30.11	29.40	29.75	209.50
8	30.71	32.37	31.54	186.41
9	33.43	33.94	33.68	163.43
10	29.80	29.90	29.85	208.09
11	31.31	28.99	30.15	203.95
12	32.73	31.26	32.00	181.14
13	32.88	31.77	32.32	177.50
14	33.18	32.47	32.83	172.09
15	31.12	29.95	30.54	198.88
16	30.81	30.96	30.89	194.40
17	30.31	30.71	30.51	199.23
18	31.82	33.79	32.80	172.33
19	31.97	33.44	32.71	173.37
20	32.53	31.57	32.05	180.56
21	30.56	30.61	30.58	198.27
22	35.90	35.90	35.90	143.85
23	38.62	36.20	37.41	132.47
24	39.33	39.83	39.58	118.35
25	38.88	40.34	39.61	118.20
26	44.42	45.74	45.08	91.25

Tabla G. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de medio Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, medio Sb, 30 ciclos, punto 2				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	45.58	44.33	44.96	91.76
2	41.45	40.19	40.82	111.29
3	38.68	39.48	39.08	121.43
4	41.10	40.99	41.05	110.07
5	35.30	34.59	34.94	151.86
6	31.82	32.57	32.20	178.89
7	35.65	36.01	35.83	144.44
8	34.49	35.93	35.21	149.60
9	31.46	32.42	31.94	181.73
10	34.79	33.84	34.32	157.46
11	34.74	34.89	34.82	152.97
12	34.70	35.01	34.86	152.64
13	29.90	30.56	30.23	202.89
14	31.16	31.53	31.35	188.74
15	38.93	39.88	39.41	119.41
16	31.16	33.48	32.32	177.50
17	29.75	29.35	29.55	212.39
18	30.96	31.67	31.31	189.11
19	30.05	30.96	30.51	199.24
20	30.67	31.17	30.92	193.99
21	30.46	31.57	31.01	192.83
22	32.22	31.98	32.10	179.93
23	32.83	34.39	33.61	164.18
24	42.11	42.61	42.36	103.35
25	40.69	40.34	40.52	112.97
26	39.08	41.41	40.24	114.50
27	39.48	39.19	39.33	119.86

Tabla H. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de medio Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, medio Sb, 30 ciclos, punto 3				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	45.94	47.76	46.85	84.50
2	43.67	45.64	44.66	92.99
3	38.02	38.48	38.25	126.76
4	39.28	40.99	40.14	115.11
5	42.25	42.66	42.46	102.88
6	39.94	41.15	40.55	112.80
7	36.46	36.41	36.43	139.69
8	31.62	31.92	31.77	183.75
9	31.47	31.16	31.32	189.07
10	33.88	34.99	34.44	156.35
11	32.98	32.07	32.53	175.29
12	31.77	31.87	31.82	183.17
13	32.23	32.27	32.25	178.31
14	33.08	32.83	32.95	170.78
15	34.04	33.68	33.86	161.75
16	32.83	34.55	33.69	163.42
17	32.78	33.53	33.15	168.70
18	32.17	31.92	32.04	180.60
19	34.14	34.44	34.29	157.73
20	32.32	32.68	32.50	175.57
21	34.94	33.94	34.44	156.35
22	34.59	35.30	34.94	151.86
23	31.11	31.16	31.14	191.27
24	38.22	37.07	37.65	130.85
25	41.30	40.49	40.89	110.89
26	37.87	39.08	38.48	125.26
27	39.08	39.73	39.41	119.41
28	39.48	40.30	39.89	116.54

Tabla I. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de medio Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, medio Sb, 5 ciclos, punto 1				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	41.03	42.93	41.98	105.23
2	38.79	40.37	39.58	118.39
3	38.60	39.32	38.96	122.20
4	37.93	37.87	37.90	129.09
5	40.30	39.12	39.71	117.60
6	35.97	37.87	36.92	136.05
7	35.97	36.29	36.13	142.06
8	35.63	36.16	35.90	143.91
9	36.36	35.57	35.96	143.39
10	35.11	37.47	36.29	140.79
11	35.24	38.53	36.88	136.32
12	39.05	37.41	38.23	126.88
13	35.50	35.84	35.67	145.72
14	38.26	37.93	38.10	127.75
15	33.47	33.54	33.51	165.19
16	32.21	33.60	32.90	171.27
17	32.87	33.73	33.30	167.24
18	35.70	35.64	35.67	145.77
19	34.65	34.12	34.38	156.85
20	35.64	35.90	35.77	144.95
21	36.55	37.94	37.25	133.66
22	36.62	36.42	36.52	139.03
23	38.13	37.87	38.00	128.42
24	36.04	35.30	35.67	145.72
25	41.29	41.16	41.22	109.13
26	40.96	40.70	40.83	111.25
27	44.05	44.57	44.31	94.44

Tabla J. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de medio Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, medio Sb, 5 ciclos, punto 2				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	45.89	46.81	46.35	86.31
2	43.85	44.18	44.02	95.72
3	41.23	41.09	41.16	109.46
4	40.63	41.42	41.03	110.17
5	44.97	45.76	45.36	90.11
6	41.22	41.68	41.45	107.93
7	40.43	40.89	40.66	112.15
8	40.44	38.86	39.65	117.96
9	39.71	39.91	39.81	117.00
10	38.66	37.87	38.27	126.65
11	39.51	39.45	39.48	118.95
12	38.79	39.32	39.05	121.59
13	38.26	37.48	37.87	129.29
14	35.96	36.95	36.46	139.53
15	36.89	36.88	36.89	136.28
16	37.80	36.69	37.24	133.68
17	39.58	39.71	39.64	117.99
18	38.26	39.65	38.96	122.20
19	40.89	41.55	41.22	109.13
20	40.83	40.37	40.60	112.50
21	36.63	37.48	37.05	135.07
22	43.13	43.66	43.40	98.47
23	44.31	44.45	44.38	94.16
24	40.50	41.88	41.19	109.30
25	39.34	38.92	39.13	121.10
26	39.05	37.15	38.10	127.75
27	43.33	44.77	44.05	95.57

Tabla K. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de medio Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, medio Sb, 5 ciclos, punto 3				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	41.48	41.62	41.55	107.40
2	43.13	40.52	41.83	106.00
3	43.07	45.04	44.05	95.55
4	42.15	43.46	42.80	101.21
5	38.07	38.40	38.24	126.84
6	40.50	37.48	38.99	121.98
7	35.64	34.92	35.28	149.00
8	39.45	39.25	39.35	119.78
9	38.59	38.79	38.69	123.86
10	36.23	36.70	36.46	139.49
11	37.41	36.56	36.98	135.57
12	39.65	39.65	39.65	117.96
13	36.75	38.14	37.45	132.25
14	35.63	34.39	35.01	151.28
15	37.28	36.69	36.98	135.57
16	36.36	36.23	36.29	140.78
17	35.90	36.82	36.36	140.30
18	38.79	38.67	38.73	123.64
19	38.40	39.26	38.83	123.00
20	39.38	40.25	39.81	116.98
21	40.17	40.89	40.53	112.88
22	38.33	40.37	39.35	119.75
23	40.11	40.70	40.40	113.60
24	40.57	40.52	40.54	112.82
25	41.16	40.83	40.99	110.35
26	42.80	43.52	43.16	99.54

Tabla L. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de medio Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, alto Sb, 30 ciclos, punto 1				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	43.79	43.00	43.39	98.49
2	41.16	42.74	41.95	105.39
3	43.79	43.33	43.56	97.75
4	41.75	41.55	41.65	106.90
5	37.48	38.53	38.00	128.39
6	37.15	37.87	37.51	131.80
7	34.65	35.37	35.01	151.30
8	34.78	34.06	34.42	156.55
9	36.76	37.01	36.89	136.29
10	33.60	34.58	34.09	159.58
11	34.78	35.70	35.24	149.33
12	37.01	40.39	38.70	123.80
13	35.64	35.83	35.74	145.19
14	34.26	35.30	34.78	153.30
15	35.63	37.61	36.62	138.28
16	36.29	36.95	36.62	138.28
17	35.04	35.37	35.21	149.61
18	35.76	35.70	35.73	145.24
19	34.91	38.13	36.52	139.03
20	38.26	38.20	38.23	126.87
21	38.86	37.21	38.03	128.19
22	37.87	39.45	38.66	124.09
23	40.30	41.35	40.83	111.25
24	44.57	44.38	44.48	93.74
25	43.26	43.79	43.52	97.89
26	46.68	47.01	46.84	84.51

Tabla M. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de alto Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, alto Sb, 30 ciclos, punto 2				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	45.30	45.96	45.63	89.07
2	42.80	43.92	43.36	98.64
3	41.95	42.47	42.21	104.09
4	37.54	37.47	37.51	131.82
5	37.47	38.33	37.90	129.09
6	38.00	37.34	37.67	130.66
7	35.63	36.16	35.90	143.89
8	34.84	33.93	34.39	156.81
9	37.21	36.62	36.92	136.08
10	37.15	37.74	37.44	132.27
11	33.73	34.19	33.96	160.83
12	36.29	37.47	36.88	136.32
13	34.52	32.81	33.66	163.65
14	35.70	35.05	35.37	148.20
15	32.87	32.54	32.71	173.34
16	35.37	35.63	35.50	147.12
17	37.74	39.45	38.59	124.51
18	33.47	33.07	33.27	167.55
19	37.68	37.41	37.54	131.56
20	33.93	34.65	34.29	157.71
21	35.37	35.70	35.54	146.84
22	37.21	36.63	36.92	136.05
23	40.30	40.43	40.37	113.80
24	40.70	40.76	40.73	111.79
25	40.17	39.58	39.88	116.63
26	40.04	40.43	40.24	114.54
27	40.11	41.35	40.73	111.78

Tabla N. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de alto Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, alto Sb, 30 ciclos, punto 3				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	45.43	46.55	45.99	87.68
2	42.80	42.68	42.74	101.51
3	41.22	41.42	41.32	108.61
4	38.66	38.20	38.43	125.58
5	36.49	36.23	36.36	140.29
6	34.52	34.65	34.58	155.06
7	33.01	33.01	33.01	170.23
8	34.91	37.15	36.03	142.86
9	34.19	33.40	33.80	162.36
10	33.86	34.06	33.96	160.81
11	32.67	32.74	32.71	173.34
12	35.90	34.25	35.07	150.74
13	32.35	31.69	32.02	180.88
14	32.41	33.86	33.14	168.89
15	32.54	33.27	32.91	171.24
16	32.56	34.52	33.54	164.87
17	34.58	32.61	33.60	164.28
18	33.40	33.01	33.20	168.22
19	33.73	33.33	33.53	164.95
20	34.98	35.11	35.04	151.01
21	34.52	35.70	35.11	150.43
22	33.02	34.59	33.80	162.31
23	35.30	35.76	35.53	146.86
24	33.53	34.19	33.86	161.73
25	36.95	36.75	36.85	136.55
26	37.80	38.13	37.97	128.64
27	40.50	40.63	40.56	112.70

Tabla O. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de alto Sb a 30 ciclos de sostenimiento.

Cupón, alto Sb, 5 ciclos, punto 1				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	44.71	45.56	45.13	91.04
2	42.08	42.28	42.18	104.25
3	43.92	44.90	44.41	94.02
4	43.72	42.27	43.00	100.31
5	42.34	43.72	43.03	100.15
6	41.75	41.88	41.81	106.06
7	38.92	37.08	38.00	128.41
8	39.71	38.07	38.89	122.62
9	38.99	38.07	38.53	124.94
10	39.65	38.26	38.96	122.19
11	39.71	38.86	39.28	120.17
12	39.19	41.29	40.24	114.54
13	38.33	39.18	38.76	123.46
14	39.12	40.43	39.78	117.21
15	39.58	39.19	39.38	119.56
16	37.93	37.28	37.61	131.13
17	38.40	38.99	38.69	123.87
18	38.20	38.99	38.59	124.51
19	37.74	38.00	37.87	129.31
20	37.21	39.05	38.13	127.54
21	37.93	39.19	38.56	124.72
22	39.78	39.91	39.84	116.82
23	38.59	39.12	38.86	122.83
24	39.18	40.17	39.68	117.80
25	44.18	43.65	43.92	96.14
26	41.22	41.42	41.32	108.60
27	44.51	45.76	45.13	91.04

Tabla P. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de alto Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, alto Sb, 5 ciclos, punto 2				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	41.88	42.47	42.18	104.24
2	41.75	42.08	41.91	105.57
3	44.31	44.65	44.48	93.71
4	44.77	43.79	44.28	94.58
5	42.74	41.42	42.08	104.73
6	40.24	39.78	40.01	115.86
7	38.99	39.45	39.22	120.58
8	37.80	40.24	39.02	121.79
9	36.69	39.05	37.87	129.31
10	37.21	38.26	37.74	130.21
11	40.04	37.61	38.82	123.03
12	38.33	38.33	38.33	126.23
13	41.23	40.56	40.89	110.88
14	36.49	36.75	36.62	138.28
15	38.92	38.79	38.86	122.83
16	37.93	37.01	37.47	132.05
17	35.37	34.84	35.11	150.45
18	35.37	34.46	34.91	152.12
19	36.82	37.34	37.08	134.87
20	35.50	35.63	35.57	146.58
21	39.84	39.18	39.51	118.78
22	38.08	36.88	37.48	132.02
23	39.12	37.87	38.49	125.15
24	40.89	40.96	40.93	110.72
25	41.62	41.42	41.52	107.57
26	39.58	40.43	40.01	115.86

Tabla Q. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de alto Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

Cupón, alto Sb, 5 ciclos, punto 3				
# indentación	Medida 1 (μm)	Medida 2 (μm)	Promedio (μm)	Dureza Vickers
1	42.27	43.26	42.77	101.39
2	41.42	41.82	41.62	107.07
3	42.41	42.14	42.28	103.76
4	42.73	42.74	42.74	101.54
5	41.42	40.50	40.96	110.53
6	40.24	40.83	40.53	112.88
7	34.19	35.24	34.71	153.90
8	37.48	39.25	38.36	125.99
9	35.37	36.82	36.09	142.34
10	34.71	35.31	35.01	151.27
11	38.59	37.41	38.00	128.42
12	34.19	33.14	33.66	163.66
13	33.92	33.40	33.66	163.66
14	36.96	36.89	36.92	136.03
15	36.42	37.47	36.95	135.84
16	37.21	36.36	36.78	137.05
17	35.24	35.44	35.34	148.49
18	34.65	35.50	35.08	150.72
19	35.25	35.83	35.54	146.82
20	33.66	33.46	33.56	164.62
21	37.68	37.68	37.68	130.63
22	37.28	38.99	38.13	127.52
23	36.88	37.80	37.34	132.98
24	35.57	37.01	36.29	140.80
25	41.82	44.31	43.07	99.99
26	40.63	41.95	41.29	108.76

Tabla R. Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de alto Sb a 5 ciclos de sostenimiento.

ANEXO II

GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO DEL BOTON

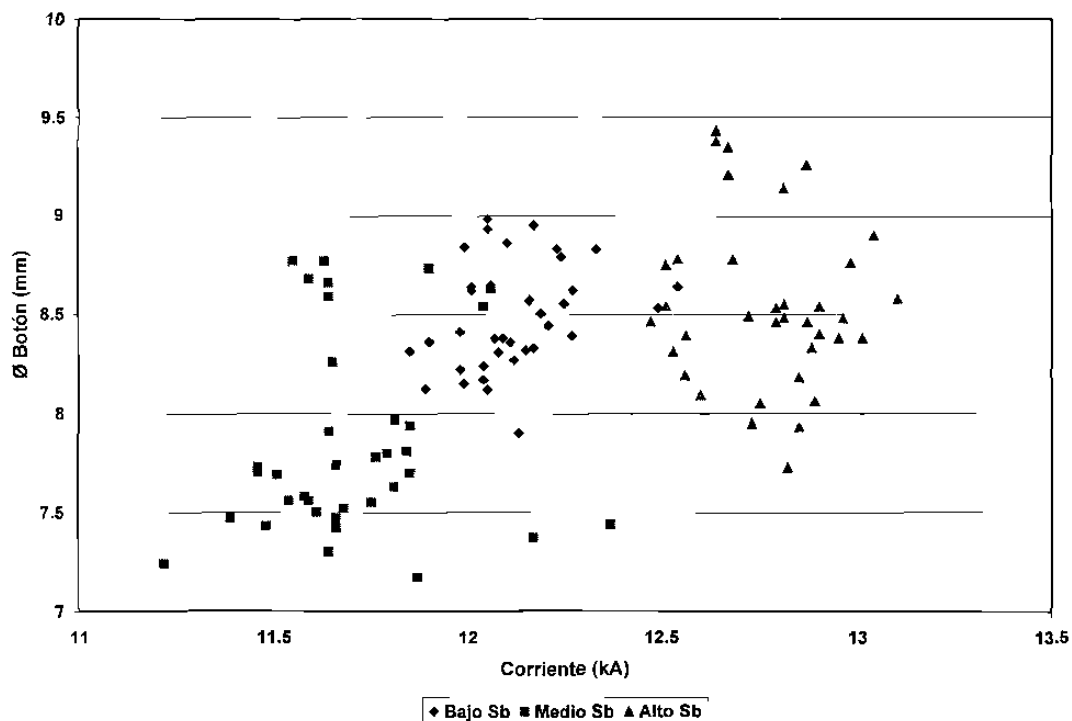


Figura A. Diámetro del botón con respecto a la corriente de soldadura para un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

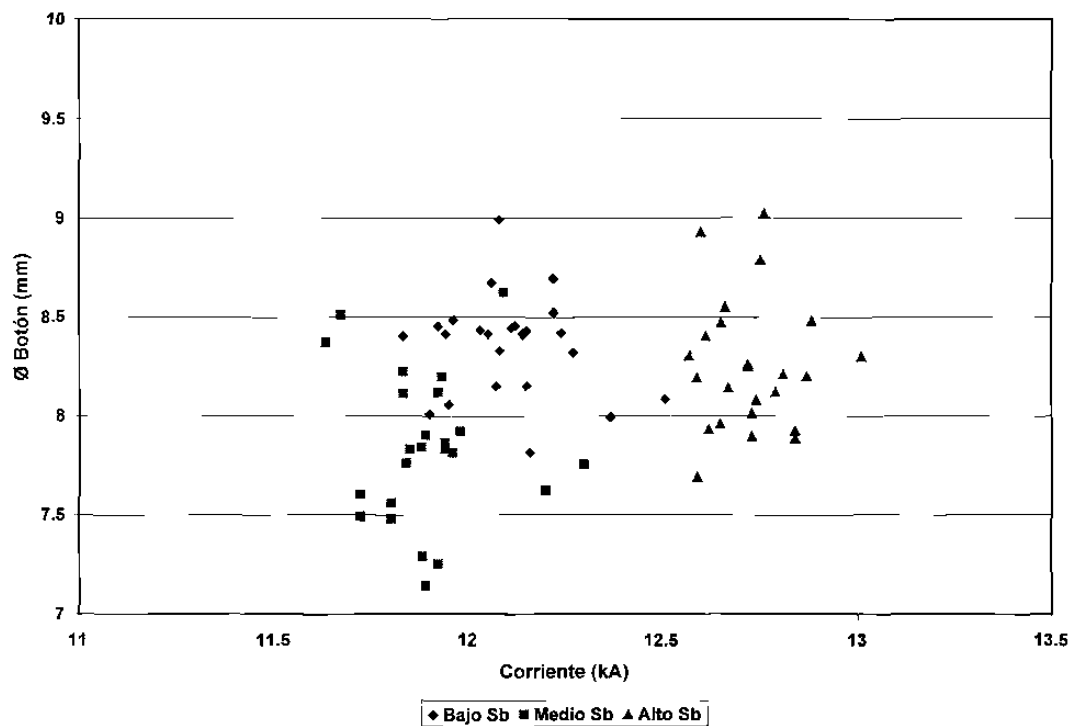


Figura B. Diámetro del botón con respecto a la corriente de soldadura para un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

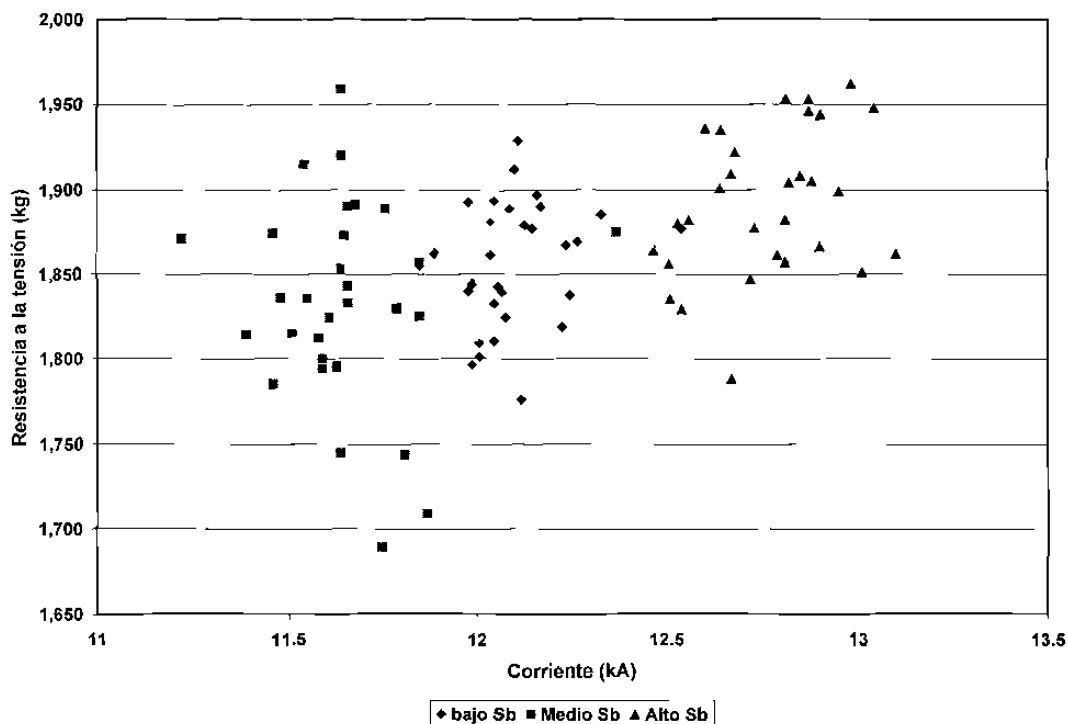


Figura C. Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto a la corriente suministrada para un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

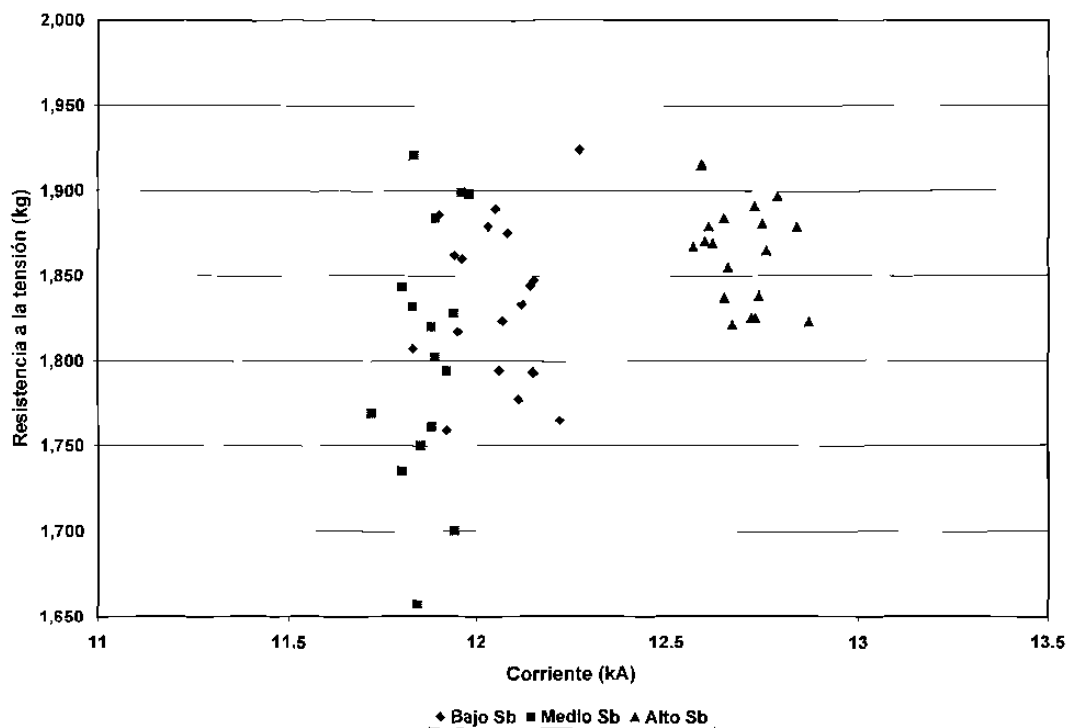


Figura D. Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto a la corriente suministrada para un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

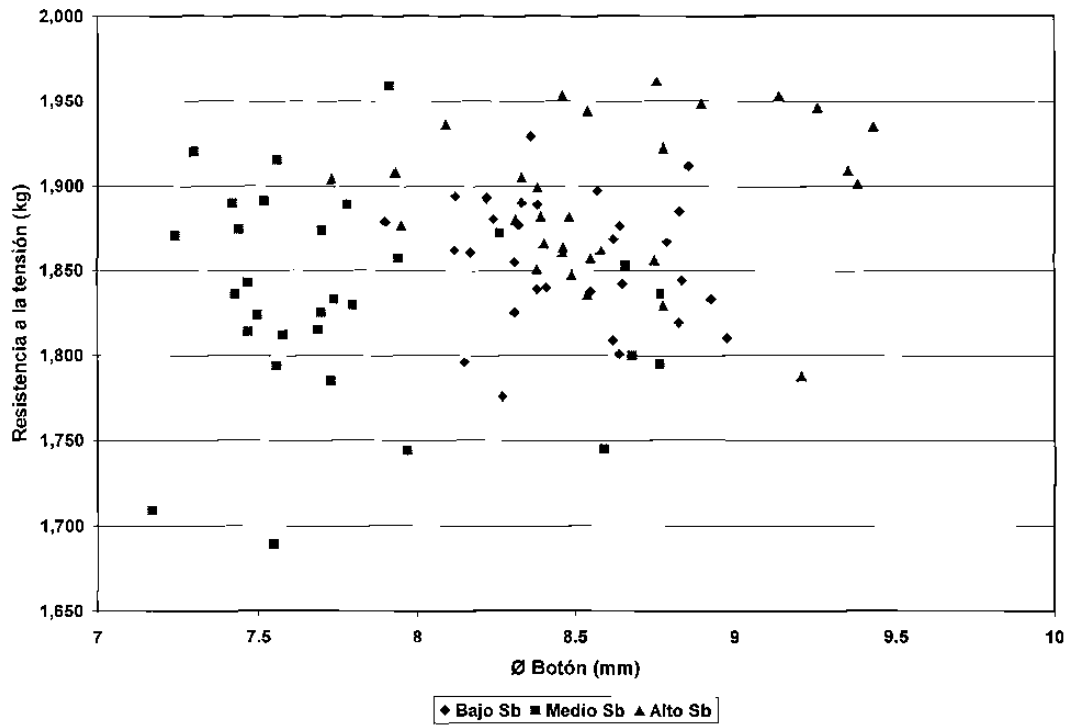


Figura E. Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto al diámetro del botón para un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

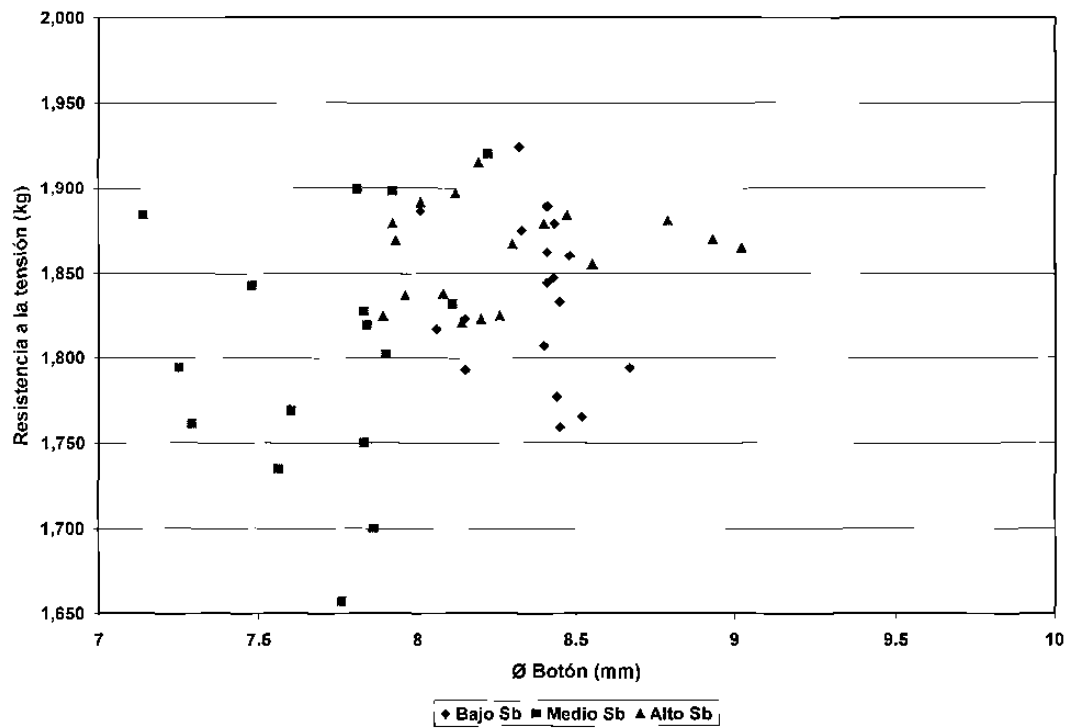


Figura F. Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto al diámetro del botón para un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

LISTADO DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Propiedades de resistencia y formado en frío de varios materiales automotrices en hoja.	2
1.2 Mecanismos de endurecimiento en hojas de acero HSLA microaleado.	6
1.3 Endurecimiento por solución sólida de ferrita.	6
1.4 Parte de la tabla periódica con el potencial de formar compuestos no metálicos.	9
1.5 Productos de solubilidad de a) Compuestos de carbonitruros en austenita y b) Compuestos de titanio.	10
1.6 Energías libres para la formación de carburos y nitruros.	11
1.7 Isotermas de solubilidad del NbN, TiC y VN en austenita.	12
1.8 Influencia del niobio disuelto y precipitado en el retardo de la recristalización de austenita.	13
1.9 Efecto de la fracción volumen y el tamaño de la partícula de NbC en el incremento de la resistencia por endurecimiento por precipitación.	14
1.10 Grafica simplificada del proceso de laminación controlada.	15
2.1 Procesos típicos de recubrimiento con zinc.	20
2.2 Esquema de una línea de galvanizado por inmersión en caliente.	20
2.3 Partículas intermetálicas típicas del sistema de aleación Zn-Al-Fe (a) partículas fase ζ (b) partículas coexistentes de fases FeZn_7 (δ , gris claro) y Fe_2Al_5 (η , gris oscuro).	28
2.4 Diagrama esquemático del control del espesor del recubrimiento por medio del empleo de cuchillas de aire.	30
2.5 Mapas del perfil del peso del recubrimiento para una velocidad de la línea de 1.6 m/s, peso del recubrimiento en g/m^2 , presiones en psi.	30

2.6	Diagrama de fase de equilibrio Fe-Zn.	34
2.7	Microestructura de un recubrimiento de Zn puro formado después de 300s de inmersión a 450°C en un sustrato de acero de bajo carbono. (1) Fase Γ , (2) fase δ , (3) fase ζ .	37
2.8	Sección transversal de un recubrimiento galvanizado a partir de un baño con contenido de aluminio.	39
2.9	Frontera líquido-fases en la esquina de un sistema ternario Fe-Al-Zn a 460°C. Consistente de tres segmentos dictados por el equilibrio entre el líquido y las fases de ζ , δ y Fe_2Al_5 (η).	41
2.10	Diagrama de fase isotérmico Fe-Al-Zn a 450°C, (a) sección completa, (b) esquina rica en Zn.	42
2.11	Isotermas en el sistema Fe-Al-Zn. Las líneas punteadas conectan la esquina de hierro a la composición del baño de Zn-Al, estableciendo el camino de difusión sólido-líquido.	46
2.12	Esquema de solidificación de un recubrimiento galvanizado ($t_4 > t_3 > t_2 > t_1$).	47
2.13	Estructura de flor de un recubrimiento galvanizado por inmersión en caliente.	48
2.14	Etapas de la aleación entre el acero y el recubrimiento de zinc para producir recubrimiento termogalvanizado.	55
2.15	Composición de fases del recubrimiento como función del tiempo de recocido a una temperatura de (a) 482°C, la fase ζ se forma inicialmente y decrece al incrementarse el tiempo de recocido. (b) 538°C, la fase ζ no se forma y la fase δ alcanza un máximo después de un tiempo de recocido de 4 seg.	56
2.16	Compuestos intermetálicos Fe-Zn con respecto al contenido de hierro en el recubrimiento para sustratos de acero (a) refosforizado y (b) IF.	58
2.17	Esquema del desarrollo morfológico de fases para un acero (a) refosforizado y (b) libre de intersticiales.	58

2.18	Variación en la cantidad de polvo y contenido de Fe en el recubrimiento con la temperatura de termogalvanizado.	60
2.19	Cambios en las características del recubrimiento con el contenido de Fe en el recubrimiento termogalvanizado.	60
3.1	Diagrama del circuito secundario de una máquina de soldadura por puntos.	63
3.2	Ilustración esquemática del proceso de soldadura por puntos.	66
3.3	Ciclo típico del proceso de soldadura por puntos.	68
3.4	Resistividad como función de la temperatura.	69
3.5	Ilustración esquemática del desarrollo de una curva de soldabilidad.	71
3.6	Efecto del zinc al desplazar la trayectoria de la corriente de soldadura.	75
3.7	Variación de la fuerza y densidad de corriente debido a la falta de mantenimiento del electrodo.	82
3.8	Efecto del desvío de corriente hacia el botón de soldadura previamente formado.	84
3.9	Susceptibilidad al agrietamiento de la zona afectada térmicamente como función del contenido de carbono y carbono equivalente de acuerdo a Graville.	89
4.1	Paneles de monitoreo y control de proceso.	93
4.2	Troqueladora mecánica.	95
4.3	Cortadora marca BUEHLER	95
4.4	Encapsuladora marca BUEHLER	95
4.5	Desbastadora manual.	96
4.6	Pulidor rotatorio.	96
4.7	Máquina universal de pruebas Instron.	97
4.8	Bocado troquelado de lámina de 8 cm de diámetro.	97
4.9	Espectrómetro por chispa.	98
4.10	Microdurómetro marca Shimadzu.	98

4.11	Microscopio óptico.	99
4.12	Rugosímetro Hommel, modelo T500.	100
4.13	Espectrofotómetro de emisión por plasma.	100
4.14	Microscopio electrónico de barrido.	101
4.15	Bacula de precisión.	102
4.16	Máquina dobladora.	102
4.17	Instrucciones de corte para tiras y paneles de prueba.	105
4.18	Cupón metalográfico y de tensión.	106
4.19	Cizalla hidráulica.	106
4.20	Máquina soldadora de pedestal.	107
4.21	Secuencia y localización de los puntos de acondicionamiento.	109
4.22	Secuencia y espaciamiento de puntos en el panel de prueba.	112
4.23	Estereoscopio Olympus.	114
4.24	Parámetros dimensionales del botón de soldadura.	115
4.25	Patrón de indentaciones ($L = 0.38\text{cm}$).	116
5.1	Ciclo térmico de la lámina para un contenido de Sb en la paila a) bajo, b) medio, y c) alto.	119
5.2	Curvas de esfuerzo contra deformación del material utilizado para cada condición de Sb en la paila.	121
5.3	Micrografía del acero de prueba para la condición de bajo Sb en la paila, tamaño de grano ASTM 12 ($5.6\ \mu\text{m}$).	122
5.4	Micrografía del acero de prueba para la condición de medio Sb en la paila, tamaño de grano ASTM 11.4 ($7\ \mu\text{m}$).	123
5.5	Micrografía del acero de prueba para la condición de alto Sb en la paila, tamaño de grano ASTM 11.8 ($6\ \mu\text{m}$).	123
5.6	Microestructura del recubrimiento de bajo Sb por microscopio (a) óptico y (b) electrónico, espesor de capa promedio $6.65\ \mu\text{m}$.	125
5.7	Microestructura del recubrimiento de medio Sb por microscopio (a) óptico y (b) electrónico, espesor de capa promedio $8.3\ \mu\text{m}$.	126

5.8	Microestructura del recubrimiento de medio Sb por microscopio (a) óptico y (b) electrónico, espesor de capa promedio 7.4 μm .	127
5.9	Composición química puntual de las fases del recubrimiento.	128
5.10	Línea de barrido de intensidades de Fe y Zn a través del recubrimiento.	129
5.11	Paneles de prueba.	131
5.12	Cupones de prueba.	131
5.13	Aspecto superficial de los puntos de soldadura.	132
5.14	Micrografías del botón de soldadura tomadas a 400x.	133
5.15	Micrografías del botón de soldadura tomadas a 500x.	134
5.16	Evolución de la corriente para los puntos de soldadura realizados con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento.	137
5.17	Evolución de la corriente para los puntos de soldadura realizados con 5 ciclos de tiempo de sostenimiento.	137
5.18	Evolución del diámetro del botón de soldadura para los puntos realizados con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento.	140
5.19	Evolución del diámetro de soldadura para los puntos realizados con 5 ciclos de tiempo de sostenimiento.	140
5.20	Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura realizados con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento.	143
5.21	Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura realizados con 5 ciclos de tiempo de sostenimiento.	143
5.22	Sección transversal del botón de soldadura para la prueba de bajo Sb.	144
5.23	Sección transversal del botón de soldadura para la prueba de medio Sb.	145
5.24	Sección transversal del botón de soldadura para la prueba de alto Sb.	146
5.25	Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en cupones de prueba con un tiempo de	149

- sostenimiento de 30 ciclos.
- 5.26** Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos. 149
- 5.27** Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos. 150
- 5.28** Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos. 150
- 5.29** Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos. 151
- 5.30** Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos. 151
- 5.31** Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos. 152
- 5.32** Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos. 152
- 5.33** Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos. 153
- 5.34** Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos. 153
- 5.35** Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de 154

	sostenimiento de 30 ciclos.	
5.36	Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.	154
5.37	Perfil de microdureza a través del botón de soldadura.	155
5.38	Tipos de defecto observados, (a) grieta, (b) poro, (c) falla interfacial.	156
5.39	Microestructura del material del electrodo.	157
5.40	Impresión de la huella del electrodo al inicio y final de la prueba de soldadura, (1) compuesta, (2) electrodo superior y (3) electrodo inferior.	158
5.41	Cara de los electrodos después de la prueba de soldabilidad para la condición de medio antimonio en la paila, (a) electrodo inferior, (b) electrodo superior.	158
5.42	Metalografía de sección transversal mostrando adherencia y aleación de Zn en los electrodos, capa de latón uniforme de 10 μm de espesor.	159
5.43	El valor obtenido de microdureza promedio del electrodo fue de 88 Vickers con una desviación estándar de 11.5 en indentaciones realizadas en los electrodos de las tres pruebas.	159
A	Diámetro del botón con respecto a la corriente de soldadura para un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.	189
B	Diámetro del botón con respecto a la corriente de soldadura para un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.	189
C	Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto a la corriente suministrada para un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.	190
D	Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto a la corriente suministrada para un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.	190
E	Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto al diámetro del botón para un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.	191

- F** Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura con respecto al diámetro del botón para un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos. 191

LISTADO DE TABLAS

Tabla	Página
2.1 Características de fases Fe-Zn.	35
2.2 Resumen de las microestructuras encontradas en recubrimiento galvanizados continuos.	42
4.1 Dimensiones de las hojas utilizadas.	105
4.2 Especificaciones según norma Chrysler.	108
5.1 Condiciones del procesamiento de la lámina.	118
5.2 Composición química del metal base.	120
5.3 Propiedades mecánicas del material de prueba.	121
5.4 Resultados de dureza superficial y microdureza transversal.	122
5.5 Registro de valores de rugosidad superficial.	124
5.6 Composición química del recubrimiento (% en peso).	130
5.7 Peso del recubrimiento termogalvanizado por lado.	130
5.8 Pérdida en peso del recubrimiento sometido a las pruebas de integridad.	131
5.9 Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.12 kA.	135
5.10 Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 11.7 kA.	135
5.11 Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.77 kA.	135
5.12 Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.11 kA.	136
5.13 Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 11.89 kA.	136
5.14 Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.73 kA.	136
5.15 Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.49 mm.	138
5.16 Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 7.85 mm.	138
5.17 Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.55 mm.	138
5.18 Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.35 mm.	139

5.19	Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 7.84 mm.	139
5.20	Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.25 mm.	139
5.21	Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,856 kg.	141
5.22	Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,830 kg.	141
5.23	Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,892 kg.	141
5.24	Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,835 kg.	142
5.25	Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,787 kg.	142
5.26	Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,862 kg.	142
5.27	Parámetros dimensionales del botón de soldadura para el acero de prueba con bajo contenido de Sb en la paila.	147
5.28	Parámetros dimensionales del botón de soldadura para el acero de prueba con medio contenido de Sb en la paila.	148
5.29	Parámetros dimensionales del botón de soldadura para el acero de prueba con alto contenido de Sb en la paila.	148
5.30	Tipo y número de defectos en las soldaduras.	156
5.31	Composición química del electrodo.	157
A	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	179
B	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de bajo Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	179
C	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	180
D	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 5 ciclos de sostenimiento.	180
E	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de	181

	bajo Sb a 5 ciclos de sostenimiento.	
F	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de bajo Sb a 5 ciclos de sostenimiento.	181
G	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de medio Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	182
H	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de medio Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	182
I	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de medio Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	183
J	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de medio Sb a 5 ciclos de sostenimiento.	183
K	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de medio Sb a 5 ciclos de sostenimiento.	184
L	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de medio Sb a 5 ciclos de sostenimiento.	184
M	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de alto Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	185
N	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de alto Sb a 30 ciclos de sostenimiento.	185
O	Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de alto	186

- Sb a 30 ciclos de sostenimiento.
- P** Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el primer punto del cupón de prueba de alto Sb a 5 ciclos de sostenimiento. 186
- Q** Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el segundo punto del cupón de prueba de alto Sb a 5 ciclos de sostenimiento. 187
- R** Registro de las medidas de indentación y microdureza a través del botón de soldadura para el tercer punto del cupón de prueba de alto Sb a 5 ciclos de sostenimiento. 187

