

CAPITULO III

SOLDADURA POR RESISTENCIA

3.1 Introducción

El proceso de soldadura por resistencia por puntos forma parte de la familia de soldaduras por resistencia. Ocurre a través de la fusión localizada y coalescencia de un pequeño volumen de material debido al calentamiento generado por la resistencia de contacto en la interfase de las partes metálicas al paso de un alto valor de corriente eléctrica, en un circuito del cual forman parte las piezas de trabajo, mantenidas juntas bajo presión por los electrodos. Calor suficiente puede ser generado para producir ya sea soldadura por fusión o por forja en estado sólido, resultando en un botón de soldadura. El metal fundido es contenido por la presión aplicada por la punta de los electrodos y el metal sólido que lo rodea, el efecto de la fuerza es para refinar la estructura de grano, lo cual produce una soldadura con propiedades físicas en muchos casos, iguales a las del metal base e incluso algunas veces superiores. Esta difiere de otras formas de soldadura en que ningún material extraño, como varillas de relleno, fundentes, etc., son utilizados^(1, 42-46).

Debido al contacto de asperezas y la contaminación superficial entre las dos piezas de metal, la mayor resistencia se presenta en la superficie interfásial entre las hojas y el calentamiento (y la fusión) ocurre en primera instancia en esta superficie, el calor generado dependerá de la resistencia eléctrica, la conductividad térmica del metal y el tiempo en que la corriente es aplicada^(42, 46, 47).

El tamaño y forma de las soldaduras individualmente formadas está limitado principalmente por el tamaño y contorno de los electrodos, los cuales son generalmente de cobre ya que tiene una resistencia eléctrica más baja y una

conductividad térmica más alta que otros metales, esto asegura que el calor sea generado en la pieza de trabajo y no en los electrodos^(44, 47).

La soldadura por puntos es uno de los procesos de soldadura más viejos. Su uso principal es la unión de hojas de metal traslapadas cuando la unión no tiene que ser hermética, puede ser usado en láminas muy delgadas o en secciones gruesas pero raramente es utilizado en espesores por encima de los 6 mm^(1, 45). Este proceso es económico y rápido, es utilizado en una amplia gama de industrias pero notablemente para el ensamble de hojas de acero de cuerpos automotrices en donde es el principal proceso de soldadura empleado. Este hecho es causado no sólo por su gran adaptabilidad para realizar soldaduras automotrices, sino por mantener además los altos niveles de producción requeridos a bajo costo^(1, 42, 43, 45).

En términos de economía y productividad, la soldadura por resistencia es el mejor de todos los procesos de fusión. Intensidades de calor de 100,000 watts/cm² pueden ser generados, desarrollando altas tasas de producción utilizando equipo que cuesta aproximadamente lo mismo que el equipo de soldadura por arco, el proceso puede ser fácilmente automatizado y una gran variedad de máquinas soldadoras están disponibles en el mercado. Desafortunadamente, la soldadura por resistencia no puede ser aplicada a todos los tamaños de materiales en todas las geometrías, pero cuando puede ser aplicada, es a menudo el proceso más económico, simple y confiable, aunque virtualmente no inspeccionable^(1, 46).

3.2 Principios del proceso de soldadura por puntos

El sistema de corriente alterna monofásica es usado en la mayoría de las aplicaciones de soldadura por resistencia por puntos. Este es el equipo más económico y simple de soldadura por resistencia que consiste de⁽⁴³⁾:

1. Transformador de corriente.
2. Sistema de aplicación de corriente (neumático, hidráulico o tipo resorte).
3. Temporizador y contactor.
4. Cables asociados.

La Figura 3.1 es un dibujo simplificado del equipo necesario. El sistema de fuerza es capaz de mover los sujetadores hacia la pieza de trabajo y en retroceso, produciendo así la fuerza requerida de soldadura. Se requiere de un dispositivo de control para energizar el transformador por un intervalo durante la aplicación de la fuerza y para programar el movimiento de los electrodos. Si el movimiento y la fuerza se hacen por medios manuales, solo el temporizador de corriente es necesario. Ensamblajes de alta calidad pueden ser producidos consistentemente por el uso de diseños y procedimientos de soldadura apropiados⁽¹⁾.

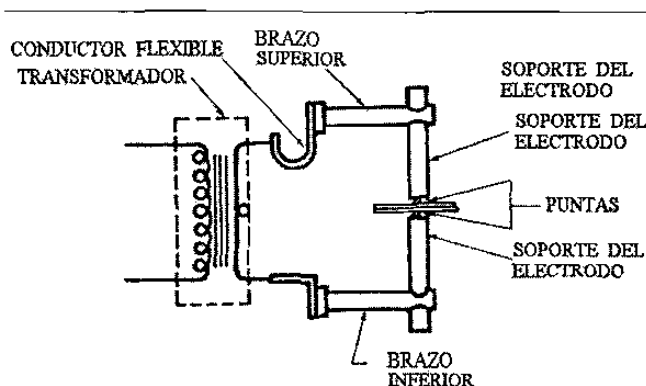


Figura 3.1. Diagrama del circuito secundario de una máquina de soldadura por puntos⁽⁴²⁾.

Una alta tasa de generación de calor se requiere en la zona de soldadura para minimizar la disipación de cualquier cantidad de calor por conducción al material adyacente. Esta se logra por el paso de un alto valor de corriente a través de la zona de soldadura en un corto intervalo de tiempo. Es importante que dicha generación de calor sea mucho más alta en la zona de soldadura que en cualquier otra porción del circuito secundario de la máquina soldadora⁽¹⁾.

En un conductor eléctrico la cantidad de calor generado depende del amperaje que fluye a través de la resistencia del conductor (incluyendo la resistencia interfásial), esto no es otra cosa más que la ley de Watt con la se obtiene una potencia según la ecuación^(1, 48):

$$W = I^2R \quad (3.1)$$

Donde:

W = potencia eléctrica en watts,

I = corriente en amperes,

R = resistencia en ohms.

El calor generado durante el tiempo en el cual circula la corriente de acuerdo a la ley de Joule se expresa de acuerdo a la ecuación:

$$Q = I^2Rt \quad (3.2)$$

Donde:

Q = watt-segundos o joules.

El calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente de soldadura y directamente proporcional a la resistencia y tiempo. Parte del calor generado se utiliza para efectuar la soldadura y otra parte se pierde hacia el metal de los alrededores⁽⁴⁸⁾.

La corriente de soldadura requerida para producir una soldadura dada es aproximadamente inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Por lo tanto, si el tiempo es extremadamente corto, la corriente requerida deberá ser muy grande. Una combinación de alta corriente e insuficiente tiempo puede producir una distribución de calor en la zona de soldadura indeseable, resultando en una severa fusión superficial y deterioro de los electrodos⁽⁴⁸⁾.

La resistencia de las piezas de trabajo que se están soldando permanece fija, los dos tipos de resistencia eléctrica presentes en el circuito secundario de una máquina de soldadura por resistencia son la resistencia en volumen del material en el circuito, incluyendo las piezas de trabajo y la resistencia interfásial de las superficies en contacto⁽⁴⁸⁾.

La resistencia ofrecida a la corriente directa es conocida como resistividad y es la resistencia de un volumen estándar medida a una temperatura conocida. Es una función de la composición del material y varía con la temperatura. La resistencia es mayor al paso de la corriente alterna (AC) debido a la presencia de corrientes de Eddy generadas en el interior del conductor. Esto es conocido como efecto de piel e incrementa con un aumento en la frecuencia de la corriente y del área transversal del

conductor. La resistencia real es llamada resistencia efectiva y es directamente proporcional a la longitud del conductor y casi inversamente proporcional al área transversal, si el efecto piel está presente. Para propósitos de comparación, el recíproco de la resistividad, la conductividad es utilizado⁽¹⁾.

La resistencia interfásial es la resistencia al paso de la corriente a través de superficies de contacto de dos metales. El valor varía con la composición de los metales, condición superficial, área de contacto y presión. En general, esta resistencia sigue en algún grado a la resistividad volumétrica de los materiales involucrada. Es importante notar que la resistencia interfásial puede variar significativamente debido a la contaminación y condición superficiales. La resistencia interfásial de las superficies de las piezas de trabajo es usualmente más grande que la resistencia volumétrica efectiva de cualquier sección del circuito secundario e incluso mayor que cualquier otra superficie de contacto⁽¹⁾.

El circuito secundario de una máquina de soldadura por resistencia y la pieza de trabajo que está siendo soldada constituye una serie de resistencias como se observa en la Figura 3.2. La resistencia total al camino de la corriente afecta la magnitud de la corriente. La corriente será la misma en todas las partes del circuito independientemente de la resistencia instantánea en cualquier lugar en el circuito, pero el calor generado en dicho lugar será directamente proporcional a la resistencia en ese punto. Existen por lo menos siete resistencias conectadas en serie^(1, 48):

1. Resistencia de volumen del electrodo superior.
2. Resistencia de contacto entre el electrodo superior y la lámina superior.
3. Resistencia de volumen de la lámina superior.
4. Resistencia de contacto entre las láminas superior e inferior (superficie interfásial).
5. Resistencia de volumen de la lámina inferior.
6. Resistencia de contacto entre la lámina inferior y el electrodo inferior.
7. Resistencia de volumen del electrodo inferior.

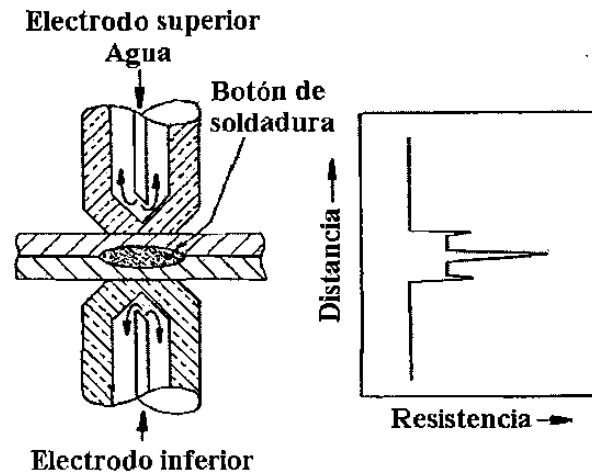


Figura 3.2. Ilustración esquemática del proceso de soldadura por puntos⁽⁴²⁾.

El calor se genera en todos esos lugares y no únicamente en la interfase entre láminas. El flujo de calor hacia o desde la interfase del metal base es gobernado por el gradiente de temperatura establecido por el calor generado debido a la resistencia eléctrica de los diversos componentes en el circuito. El calor de soldadura es requerido solamente en la interfase entre las piezas de trabajo y el calor generado en los demás lugares debe de ser minimizado ya que la mayor resistencia se localiza en tal interfase, el calor se desarrolla más rápidamente en este punto. Los siguientes puntos de mayor resistencia son las superficies de contacto entre la pieza de trabajo y los electrodos, el calor generado en estos puntos se disipa rápidamente en los electrodos enfriados por agua, por lo que mientras continua el flujo de corriente la tasa en el aumento de temperatura en la interfase metálica será mayor que en la interfase con los electrodos^(1, 48).

Los factores que pueden afectar la cantidad de calor generado en la soldadura a una corriente dada por unidad de tiempo son las resistencias eléctricas del metal que se suelda y los electrodos, las resistencias de contacto entre las piezas de trabajo y entre los electrodos y las piezas de trabajo y las pérdidas de calor hacia las piezas de trabajo y hacia los electrodos⁽⁴⁸⁾.

3.3 Ciclos de soldadura

El ciclo típico de la soldadura por puntos generalmente consiste de una serie de pasos, los cuales son ilustrados en la Figura 3.3. Sin embargo no todos los pasos deben de ser necesariamente programados en todo ciclo de soldadura^(42, 48).

- *Tiempo de sujeción.* Es proporcionado antes del flujo de corriente para permitir que los electrodos desarrollen la fuerza completa y asegurar el contacto de las piezas de trabajo.
- *Tiempo de soldadura.* En este punto, los contactores son energizados y la corriente de soldadura comienza a fluir. La corriente puede alcanzar abruptamente el nivel de soldadura, o un incremento gradual de corriente puede ser programado, por lo general este incremento gradual se elimina en aplicaciones automotrices. El tiempo de soldadura es el tiempo sobre el cual la corriente completa de soldadura fluye. Para aplicaciones automotrices, este tiempo generalmente oscila entre unos cuantos ciclos (1 ciclo = 1/60 de segundo) alrededor de medio segundo. Un periodo de reducción gradual de corriente puede ser también programado. Después de un corto periodo de apagado, otros ciclos de soldado pueden ser programados, o para materiales difíciles de soldar, un ciclo de bajo calor puede ser utilizado. Estos ciclos agregan tiempo adicional a la operación de soldadura y por lo tanto son considerados como inaceptables en la industria automotriz.
- *Tiempo de sostenimiento.* Es el tiempo durante el cual la fuerza es mantenida en las piezas de trabajo después de que el último impulso de corriente termina. Este tiempo se emplea para asegurar la coalescencia apropiada del botón de soldadura.
- *Tiempo de apagado.* Es el tiempo durante el cual los electrodos se retiran de la pieza de trabajo para moverse hacia el lugar de la próxima soldadura. Generalmente se aplica en donde el ciclo de soldadura es repetitivo.

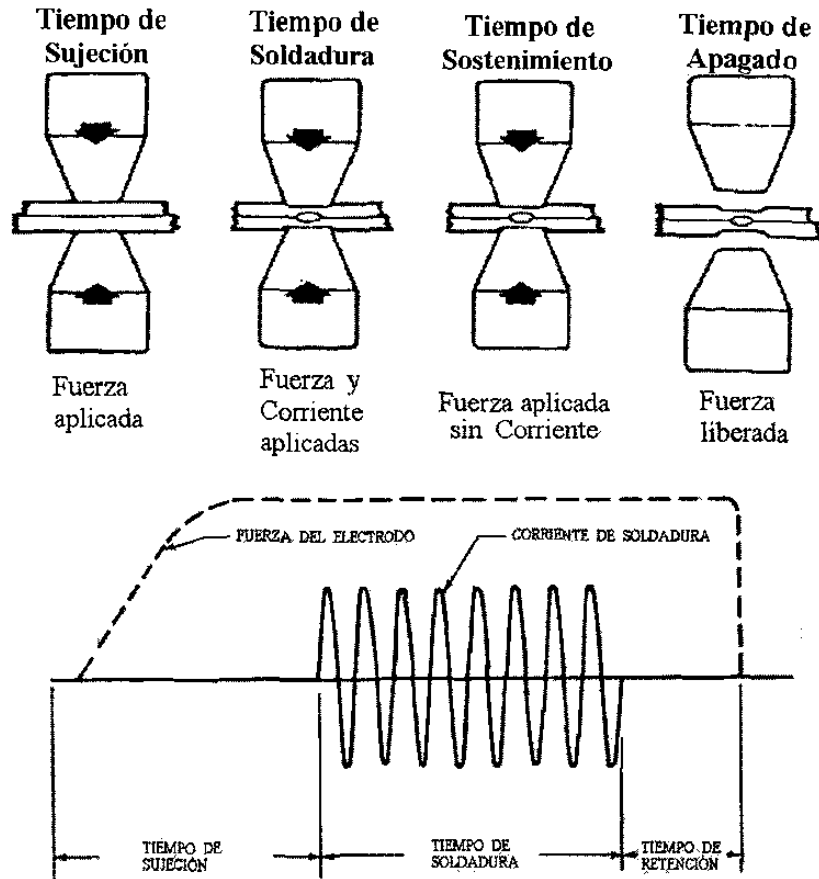


Figura 3.3. Ciclo típico del proceso de soldadura por puntos⁽⁴⁸⁾.

3.4 Medición de parámetros de soldadura

Los valores medidos más a menudo para asegurar que la operación de soldadura por puntos sea adecuada y para asegurar una aceptable soldabilidad son^(42, 48):

1. *Tiempo de soldadura.* Es expresado en periodos o ciclos para una máquina convencional de 60Hz. Un valor típico de tiempo de soldadura es de 10 ciclos por cada milímetro del espesor de la lámina.
2. *Corriente de soldadura.* Los tres valores de medición más comúnmente utilizados son el pico de corriente, la corriente promedio y la raíz cuadrada media de corriente o RMS, ya que este valor representa el calentamiento por la corriente, es el usado más frecuentemente en especificaciones automotrices.
3. *Fuerza del electrodo.* Generalmente se establece variando la presión de aire del cilindro neumático y esta fuerza se mide utilizando una celda de carga.

4. *Resistencia del material.* Las mediciones realizadas antes del proceso de soldadura usando bajos valores de corriente se conocen como medidas de resistencia estática. La resistencia total es la suma de las resistencias de contacto y las de volumen. El flujo de corriente ocurre a lo largo de caminos de contacto localizado de metal y no es uniformemente distribuido a través de la superficie. La resistencia de contacto es por lo tanto dependiente en las características mecánicas y topográficas de la interfase como de las propiedades eléctricas de las películas superficiales que pudieran estar presentes.

El valor de resistencia cambia continuamente con la temperatura y se le conoce como resistencia dinámica. Después de los primeros ciclos de soldadura donde el efecto de la resistencia superficial domina, mientras la superficie se ablanda y las asperezas se colapsan, la resistencia dinámica es altamente dependiente de los cambios de la resistencia en volumen o resistividad como función de la temperatura. La relación entre la resistividad y la temperatura para aceros HSLA se puede apreciar en la Figura 3.4, en donde a cualquier temperatura el valor de resistividad es mayor que el que presenta un acero de bajo carbono⁽⁴²⁾.

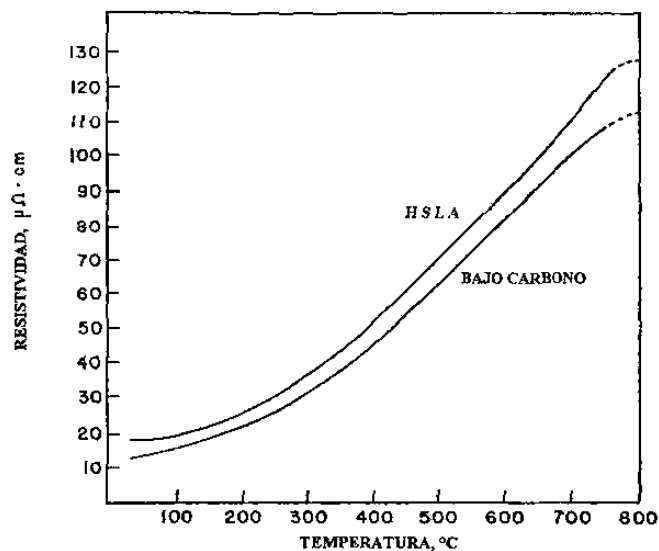


Figura 3.4. Resistividad como función de la temperatura⁽⁴²⁾.

3.5 Curvas de soldabilidad

La soldabilidad por puntos de un material en particular puede ser definida de muchas maneras. Uno de los métodos involucra la corriente de soldadura, así como el tiempo, como se ilustra en la Figura 3.5. La figura superior ilustra el diámetro del botón de soldadura como función de la corriente a un tiempo de soldadura A. Mientras la corriente se incrementa, el diámetro del botón de soldadura se incrementa también hasta el nivel de corriente de expulsión y en algunos casos más allá. Las especificaciones automotrices generalmente establecen un tamaño del botón de soldadura mínimo aceptable e indican que los botones de soldadura producidos con expulsión, independientemente de su tamaño, son inaceptables. Es posible, por lo tanto, establecer un rango de corriente dentro del cual las soldaduras por puntos que tienen un tamaño del diámetro del botón aceptable son obtenidos para un tiempo de soldadura en particular. Este rango aceptable puede ser expandido a otros tiempos de soldadura para producir una región dentro de la cual los botones de soldadura aceptables son producidos. Un ejemplo de estas curvas de soldabilidad se presenta en la parte inferior de la Figura 3.5. Sólo los botones realizados con corrientes y tiempos que están dentro de la región de la curva de soldabilidad son considerados como aceptables. Otros criterios, como la posición relativa de esta curva y el desgaste relativo de los electrodos, comparados contra el acero de bajo carbono, son también considerados como factores de soldabilidad^(42, 46, 49).

Un intervalo de soldadura de 1.5kA es considerado suficientemente grande como para asegurar una buena producción⁽⁴⁹⁾. La construcción experimental de la curva de soldabilidad es relativamente simple y permite la selección del juego de parámetros, en los cuales cae la porción más gruesa de la curva. Es aquí en donde el proceso es más tolerante a variaciones ya sea en el proceso o inclusive en el material⁽⁴⁶⁾.

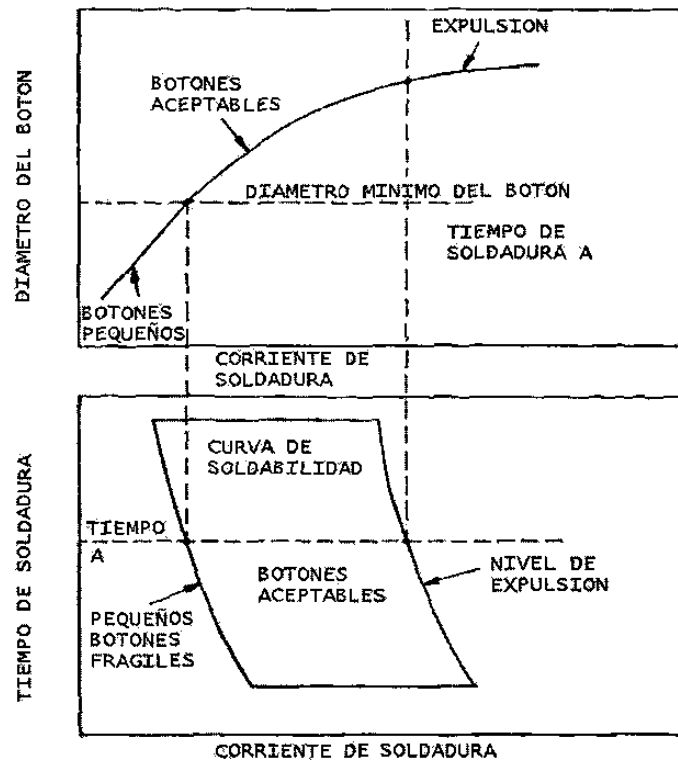


Figura 3.5. Ilustración esquemática del desarrollo de una curva de soldabilidad⁽⁴²⁾.

3.6 Estándares y procedimientos de calificación de soldadura por puntos

La industria automotriz ha establecido estándares de soldadura y procedimientos de calificación, probando y certificando los nuevos materiales de cada productor de acero para asegurar consistentemente una buena soldabilidad por puntos en materiales automotrices. Esto requiere que el material cumpla una o más de las siguientes condiciones:

1. Un tamaño aceptable de los botones de soldadura debe de ser generado a todas las corrientes de soldadura dentro de un rango específico de corrientes.
2. Este rango de corriente debe de estar centrado dentro de un nivel nominal de corriente.
3. Los botones de soldadura no deben de exhibir fractura interfásial a lo largo de la línea de centro del botón de soldadura una vez desprendido éste.
4. El material no debe de promover excesivo desgaste de los electrodos durante una extensa campaña de soldadura.

5. Los botones de soldadura deben de tener las propiedades mecánicas requeridas para servicio. Estas propiedades dependen del tipo de aplicación y son establecidas por la compañía automotriz.

Tres distintos niveles de estándares pueden ser identificados en la literatura, el primero de estos niveles es el de las practicas recomendadas, las cuales han sido establecidas para la soldadura de aceros por la American Welding Society y la Resistance Welding Manufacturer's Association. El segundo tipo de estándar es un estándar de proceso el cual se utiliza para asegurar la calidad de la soldadura por puntos en las líneas de producción. El tercer tipo de estándar es un procedimiento de calificación de soldaduras por puntos para evaluar la soldabilidad de un material para su inclusión o exclusión de la lista de proveedores calificados para un determinado material⁽⁴²⁾.

3.6.1 Práctica recomendada

Estas muestran los parámetros de soldadura establecidos por estos organismos, los cuales varían con el espesor de las partes a soldar. Las variables establecidas incluyen el tamaño del electrodo, diseño del electrodo, material del electrodo, fuerza, tiempo de soldadura, corriente de soldadura, traslape mínimo, espaciamiento entre soldaduras, diámetro mínimo del botón de soldadura y valores de resistencia. Estos son establecidos como valores ideales recomendados para algún valor nominal de corriente, los cuales se grafican para su comparación⁽⁴²⁾.

3.6.2 Estándares de calificación

Los estándares de calificación son utilizados por Ford Motor Company, Fisher Body división de GMC y Chrysler Corporation para calificar proveedores de materiales. Cada compañía tiene especificaciones separadas para materiales recubiertos y no recubiertos. Chrysler además cuenta con especificaciones para lubricantes de formado que pudieran afectar la subsecuente soldabilidad⁽⁴²⁾.

En general y para estas tres compañías, los parámetros tal como los calibres, tamaños de especímenes, espaciamiento, tamaño del electrodo, fuerza, tiempo de soldadura y de sostenimiento, tamaño mínimo del botón de soldadura, las pruebas de evaluación, así como los criterios de aceptabilidad para los diferentes materiales pueden variar de acuerdo a criterios propios⁽⁴²⁾.

Los objetivos detrás de estos requerimientos están relacionados con la experiencia en producción. En general los parámetros de soldadura a los que el material presenta soldaduras aceptables deben de ser lo suficientemente amplios para que el material sea más tolerante a las variaciones de parámetros en la línea de producción minimizando defectos. Finalmente, debido a que materiales diferentes provenientes de diferentes proveedores pueden ser utilizados para fabricar la misma parte, se desea que exista una intercambiabilidad, lo cual significa que cada material deberá presentar niveles de corriente de soldadura similares⁽⁴²⁾.

3.6.3 Estándares de proceso

Los estándares de proceso son establecidos para asegurar el control de calidad en la línea de producción. En general estos estándares realizan algunas de las siguientes funciones:

1. Listan los procedimientos de configuración recomendados de la línea de producción.
2. Describen los procedimientos de prueba de la línea de producción para inspección y aseguramiento de calidad.
3. Establecen límites en el número de soldaduras defectuosas.
4. Establecen límites en el ajuste de partes de juntas para soldadura.
5. Establecen límites en el desempeño del equipo de soldadura.
6. Establecen límites en la condición del material recibido.
7. Listan recomendaciones para el mantenimiento requerido.
8. Definen las soldaduras ordinarias y las localizadas críticamente.
9. Establecen procedimientos alternos de producción.

Estos estándares de proceso son adoptados tanto por las compañías automotrices como las proveedoras para establecer una guía de producción para el control del proceso de soldadura por puntos⁽⁴²⁾.

3.7 Parámetros involucrados en la soldadura por puntos y su influencia en la soldabilidad

A continuación se presentan los factores que intervienen y afectan en el proceso de soldadura por resistencia por puntos, así como en la soldabilidad de los aceros, tanto recubiertos como no recubiertos.

3.7.1 Efecto de la corriente de soldadura

El tipo de corriente, así como sus respectivos picos pueden afectar la soldabilidad. Altos niveles de corriente RMS y altos niveles de picos de corriente resultan en un incremento en el calentamiento de la punta del electrodo. Esto ocurre especialmente cuando la corriente es lo suficientemente alta como para producir expulsión⁽⁴²⁾.

Debido al decremento de las resistencias de contacto de las interfases de zinc, el requerimiento de corriente de soldadura para acero galvanizado es siempre más alto que para el acero no recubierto en un 25 a 50%, esto incrementa el calentamiento del electrodo, reduciendo su vida⁽⁴²⁾.

La principal razón para estas corrientes mayores es que la resistencia de contacto de la superficie galvanizada es más baja que en aceros no recubiertos. Un buen contacto entre los electrodos y la pieza de trabajo se forma debido a que el recubrimiento de zinc es más suave y tiene una mayor conductividad por lo que una alta corriente de soldadura es necesaria para compensar la reducida generación de calor debida a la baja resistencia de contacto en la interfase de la soldadura⁽⁴²⁾.

El efecto del desplazamiento de zinc forma un anillo alrededor del botón de soldadura que resulta en un desvío de corriente a través del zinc, lo que reduce la densidad de

corriente y por lo tanto incrementa la cantidad de corriente requerida para una buena fusión (Figura 3.6). La presencia del recubrimiento de zinc causa que el electrodo se comporte como si este fuera de un mayor tamaño. Como consecuencia de esto, se presenta una reducción en el valor aceptable de corriente y se incrementa el desgaste de los electrodos^(1, 42).

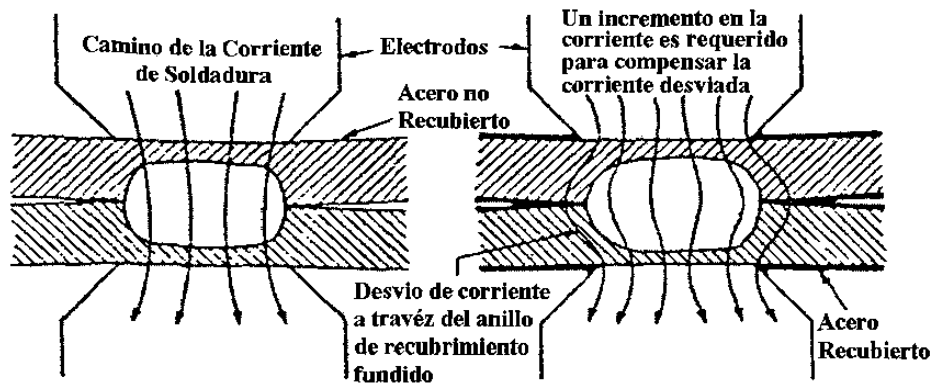


Figura 3.6. Efecto del zinc al desplazar la trayectoria de la corriente de soldadura⁽⁴²⁾.

La utilización de incrementos graduales en la aplicación de corriente permite a los electrodos asentarse gradualmente antes de que la corriente de soldadura se alcance, esto minimiza el calentamiento del electrodo y la pieza de trabajo, reduciendo así la aleación del zinc con el electrodo^(1, 42).

3.7.2 Efecto del tiempo de soldadura

El tiempo en el que la corriente de soldadura se presenta es uno de los factores que controlan la energía calorífica total generada. La corriente y el tiempo pueden ser complementarios, un cambio deseado en el calor puede ser asegurado, ya sea al cambiar la corriente o el tiempo. Sin embargo se debe de recordar que la transferencia de calor es una cuestión de tiempo y para el desarrollo de un tamaño de botón apropiado, el elemento tiempo no puede ser acertado mucho, independientemente del aumento en la corriente⁽¹⁾.

Si el tiempo de aplicación de corriente fuera excesivo, la temperatura de la zona de contacto interfacial entre láminas pasaría al punto de ebullición en pequeñas áreas del

material de las piezas de trabajo, causando burbujas de gas. El resultado sería la expulsión de partículas de metal, o un destello acompañado de chispas. Una continua aplicación de corriente causaría que el botón de soldadura creciera completamente en las caras de los electrodos y las zonas de material se convertirían en zonas plásticas, permitiendo la completa penetración de los electrodos en las piezas de trabajo. Además de esto, la zona afectada térmicamente pasaría hacia los electrodos. En muchos casos, las pérdidas de calor por radiación serían equivalentes al calor introducido por un intervalo de tiempo, hasta que el aumento de la temperatura cesara⁽¹⁾.

El primer efecto de un tiempo insuficiente se nota cuando el calor es generado demasiado rápido en los tres contactos entre superficies, resultando en picaduras superficiales y expulsión, especialmente en las superficies de contacto de los electrodos⁽¹⁾. Se ha notado que en varias aleaciones tiempos de soldadura ligeramente más largos ensanchan el intervalo de corriente aceptable, mejorando así la soldabilidad⁽⁴²⁾.

El tiempo de soldadura recomendado para acero galvanizado es del 50 al 100% mayor que para el acero no recubierto, este tiempo adicional es necesario para desplazar el zinc de la zona de soldadura antes de que se genere suficiente calor para producir la fusión del metal. Así mismo, a largos tiempos de soldadura, el rango de soldaduras aceptables es más estrecho en la curva de soldabilidad⁽⁴²⁾.

Tiempos de soldadura, ya sea excesivamente cortos o largos, resultan en una reducción en la vida del electrodo. Tiempos más largos incrementan la duración del contacto con el recubrimiento de zinc fundido, lo que incrementa la difusión y con ésta la erosión del electrodo. Por otra parte, tiempos de soldadura cortos requieren de mayores corrientes, las cuales causan un mayor calentamiento de los electrodos. Un tiempo de soldadura intermedio resulta más benéfico para la vida del electrodo⁽⁴²⁾.

3.7.3 Efecto de la fuerza de soldadura

Suficiente fuerza debe de ser aplicada por el electrodo durante la soldadura para minimizar o eliminar la porosidad. Soldaduras indeseables, desde el punto de vista de tamaño y resistencia resultan a menudo de una distribución de corriente insatisfactoria a baja presión. Por otro lado, una anormalmente alta presión produce una distorsión objetable de lámina ⁽⁴²⁾.

Debido a la rugosidad del electrodo, cuando se aplican fuerzas ligeras, el contacto entre láminas es sólo un pequeño porcentaje del área de contacto superficial total. Conforme la fuerza se incrementa, se incrementa el contacto metálico, por lo que se reduce la resistencia de contacto, este incremento en la fuerza del electrodo también reduce la resistencia en las superficies interfaciales⁽¹⁾. Variaciones en la fuerza causan variaciones en la resistencia total, la aplicación de la fuerza del electrodo promueve la ruptura de óxidos y capas por asperezas superficiales resultando en una rápida reducción de la resistencia inicial. Para una geometría de electrodo y condición superficial, conforme aumenta la presión, las asperezas se colapsan incrementando el área de contacto y disminuyendo la resistencia casi linealmente⁽⁴²⁾. Si la cara del electrodo estuviera en forma de radio, una mayor fuerza incrementaría el área de contacto efectiva y reduciría la densidad de corriente, por lo cual, un incremento en la fuerza del electrodo reduce el calor generado⁽¹⁾.

El decremento de la resistencia con el incremento de la fuerza puede llevar a la reducción del diámetro del botón cuando la densidad de la corriente de soldadura se mantiene constante. Variaciones en la fuerza del electrodo pueden causar variaciones en el tamaño y localización de las curvas de soldabilidad y el nivel de corriente. Al incrementar la fuerza, la curva de soldabilidad se mueve hacia niveles de mayor corriente y la reduce a tiempos más cortos de soldadura. Finalmente, fuerzas mayores reducen la sensibilidad del botón a las corrientes de soldadura⁽⁴²⁾.

En el caso de aceros galvanizados, la utilización de fuerzas menores a las usadas en aceros no recubiertos resulta en diámetros de soldadura más consistentes y en una

mayor vida del electrodo. En materiales de mayor resistencia, que son más susceptibles a expulsión debido a su elevada resistividad eléctrica, una mayor fuerza puede ser requerida para asegurar el contacto entre las piezas de trabajo, sin embargo, una fuerza muy baja causara expulsión prematura de zinc, lo que ocasiona la pérdida del recubrimiento superficial. Demasiada fuerza demanda una corriente excesiva lo que reduce la vida de los electrodos^(42, 53).

3.7.4 Efecto del electrodo

Los electrodos son los componentes del proceso de soldadura por resistencia que hacen contacto con las piezas de trabajo y conducen la corriente para efectuar la soldadura. Realizan tres importantes funciones en todos los procesos de soldadura por resistencia:

1. Conducen la corriente de soldadura a las piezas de trabajo.
2. Transmiten la presión o fuerza adecuada a las piezas de trabajo para producir soldaduras satisfactorias.
3. Ayudan a disipar el calor de la zona de soldadura.

La primera de estas funciones es eléctrica. La alta conductividad eléctrica mantiene el calor interno generado al mínimo. La adecuada selección del electrodo puede ser hecha casi completamente en base a su conductividad eléctrica y térmica, tomando en consideración la resistencia del electrodo y la resistencia del área del electrodo que se encuentra en contacto con la pieza de trabajo⁽¹⁾.

La segunda función es mecánica. Durante las operaciones de soldadura los electrodos están sujetos a esfuerzos, los cuales a menudo son de una magnitud considerable. Deben resistir estos esfuerzos a temperaturas elevadas sin sufrir una considerable deformación. Esto es debido a que la corriente debe de ser conducida localmente en una determinada área para concentrarla y a su vez forjar las piezas de trabajo calientes. Esto particularmente en las superficies de contacto en donde una alta concentración de temperatura y fuerza se desarrolla. Por lo tanto, de las aleaciones desarrolladas para electrodos, se debe de elegir la mejor dependiendo de cada aplicación⁽¹⁾.

En la tercera función los electrodos deben de poseer una conductividad térmica mayor que los metales que están siendo soldados. Generalmente la conductividad térmica y eléctrica de los metales es proporcional. Debido a esta propiedad, los electrodos conducen el calor rápidamente hacia el exterior de la zona de soldadura⁽¹⁾.

3.7.4.1 Efecto del material del electrodo

La selección de la aleación es importante ya que esto puede ayudar a modificar el balance térmico o reducir el desgaste de la cara⁽¹⁾. El material del electrodo utilizado para soldadura por resistencia es generalmente de aleaciones base cobre. Estas aleaciones fueron seleccionadas debido a su alta conductividad eléctrica y térmica pudiendo ser endurecidas por la adición de pequeñas cantidades de elementos aleantes⁽⁴²⁾.

En general, el material del electrodo es más suave que el de las piezas de trabajo, con excepción de unas cuantas aplicaciones, consecuentemente, la aplicación de una fuerza dada resultará en un mejor contacto entre las superficies de contacto de los electrodos que en la superficie interfásial de las piezas de trabajo⁽¹⁾.

Un limitado número de experimentos han sido conducidos para determinar el efecto de la composición del material del electrodo en su vida, la cual es gobernada por la deformación excesiva. Se ha mostrado que la dureza a temperatura es el mayor factor en el desgaste del electrodo, en donde la débil unión en las aleaciones de cobre-cromo convencionales deteriora las fronteras de grano de los electrodos. Pequeñas cantidades de zirconio incrementan la resistencia de las fronteras de grano⁽⁴²⁾.

La introducción de la capa de galvanizado a la hoja de acero cambia las características de soldadura, los electrodos de cobre están en contacto directo con el zinc en vez del acero, este cambio resulta en diferentes características eléctricas⁽²⁸⁾. La difusión de zinc en el material del electrodo como mecanismo de deterioro muestra que la profundidad de difusión está relacionada con su deterioro, su presencia

causa un incremento en la resistividad eléctrica del electrodo que lo sobrecalienta, resultando en deformación y generación de cráteres⁽⁴²⁾.

Con las temperaturas alcanzadas en la soldadura por resistencia por puntos, hay una marcada tendencia del zinc para alearse con el material de cobre del electrodo y formar latón que es más frágil y tiene una menor conducción eléctrica, lo que provoca desprendimientos que resultan en poros. Como resultado, la punta del electrodo se erosiona y cambia de forma prematuramente. La aleación del zinc con el cobre en el punto de contacto acorta la vida del electrodo, siendo esta mayor para recubrimientos termogalvanizados que para recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente. La aleación se reduce con valores más altos de dureza del electrodo y altos puntos de fusión del recubrimiento de Fe-Zn^(11, 28, 42, 49).

En algunos casos la aleación del electrodo resulta benéfica al prevenir que se adhiera con la pieza de trabajo y reducir la expulsión excesiva de zinc, por tal motivo se realiza un acondicionamiento del electrodo en muchas operaciones de soldadura. La vida de los electrodos en aceros recubiertos es apenas de unos miles de puntos de soldadura mientras que en aceros no recubiertos es del orden de las decenas de millar⁽⁴²⁾.

3.7.4.2 Efecto del diseño del electrodo

Aunque existen muchas aleaciones, tipos, tamaños y formas de electrodos comercialmente disponibles existen seis estándar (en punta, domo, plana, excéntrica, trunca y en radio), de las cuales la plana, en radio y en domo son de las más frecuentemente utilizadas⁽¹⁾. Investigaciones en los diferentes diseños de electrodo han mostrado que el de cono trunco a 20 grados es el que necesita menos mantenimiento en acero, seguido por el de forma de domo. Por otro lado, el electrodo de domo provee una distribución de corriente más simétrica, una mayor reproducibilidad del tamaño del botón y una mayor vida que los electrodos planos. Además de esto, la configuración en domo ofrece una mayor densidad de corriente y de capacidad de fuerza, a comparación del de tipo de cono⁽⁴²⁾.

El diámetro de la cara del electrodo y su contorno deben de ser siempre considerados ya que estos factores controlan la presión de soldadura y la densidad de corriente la cual debe de estar dentro de un rango aceptable para resultados satisfactorios⁽¹⁾. Un incremento en el diámetro del electrodo aumenta el valor de corriente aceptable, sin embargo, debido a criterios de diseño, esto no es siempre posible. Con respecto al orificio de agua de enfriamiento, mientras más cercana esté el agua de enfriamiento a la cara del electrodo, más eficiente será el enfriamiento, por lo que se incrementará su vida, la óptima razón de flujo de agua de enfriamiento a través de los electrodos es de 3.8l/min (1 gal/min). Finalmente y con respecto a la rugosidad de la cara del electrodo, superficies rugosas, marcas o superficies distorsionadas causan sobrecalentamiento local y reducen la vida del electrodo. Para aceros galvanizados se han reportado temperaturas de la cara del electrodo de entre 820 a 920°C, mientras que para acero no recubierto el rango es de entre 540 a 650°C. ^(1, 42, 50).

La geometría más común usada en acero galvanizado es el cono trunco con ángulos de entre 90 a 140°. Los electrodos con radio sólo son recomendados cuando existen problemas de alineamiento ya que el zinc se adhiere a las caras de los radios reduciendo drásticamente la densidad de corriente, esto también ocurre con el electrodo de cono trunco, sin embargo, éste presenta menor incremento en el área de contacto⁽⁴²⁾.

La geometría de la punta del electrodo debe de ser mantenida. La Figura 3.7 muestra gráficamente la importancia del mantenimiento de la punta del electrodo y los efectos adversos de la deformación de estos en la densidad de corriente y presión⁽⁵⁰⁾.






Area de contacto 400% más pequeña	Area de contacto apropiada	Area de contacto 56% más grande	Area de contacto 125% más grande	Area de contacto 300% más grande
				
<p>Exceso en la fuerza y la corriente de un 400%. Identación y expulsión severa debido a la alta densidad de corriente</p>	<p>Puntos de soldadura aceptables. Configuración ideal</p>	<p>Solo el 64% de la fuerza y la corriente requerida es aplicado. Puntos de soldadura débiles</p>	<p>Solo el 44% de la fuerza y la corriente requerida es aplicado. Adherencia de la pieza con los electrodos</p>	<p>Solo el 25% de la fuerza y corriente requerida es aplicado. No hay buena unión</p>

Figura 3.7. Variación de la fuerza y densidad de corriente debido a la falta de mantenimiento del electrodo⁽⁵⁰⁾.

3.7.5 Efecto del tiempo de sostenimiento

En el instante en que la corriente deja de fluir, la generación de calor cesa y la pieza de trabajo comienza a enfriarse. Los electrodos de cobre enfriados por agua extraen una significativa cantidad de calor del área de soldadura. Cuando los electrodos permanecen en contacto con el botón de soldadura después de realizado, esta región se temple durante el tiempo de sostenimiento. La razón de enfriamiento es determinada por las mismas condiciones que gobiernan la cantidad de calor introducido. Si los electrodos se separaran inmediatamente después del cese de corriente, serían incapaces de absorber el calor de la soldadura, lo cual retardaría el enfriamiento. Además, cuando la presión se remueve mientras la soldadura continúa en un estado plástico o fundido, resulta en una soldadura de baja calidad^(1, 42).

Algunos materiales son sensibles a la formación de botones de soldadura frágiles al templarse. Para materiales sensibles al tiempo de sostenimiento, la curva de soldabilidad es más estrecha para tiempos de sostenimiento más largos. Para algunos materiales el efecto de incrementar el tiempo de sostenimiento resulta en una reducción del diámetro del botón de soldadura⁽⁴²⁾.

Cuando el tiempo de sostenimiento se mantiene en un mínimo la adherencia del electrodo con la pieza de trabajo se reduce, esta adherencia causa aleación, picaduras y desgaste del electrodo, sin embargo, tiempos de sostenimiento muy cortos aunados a altas corrientes reducen o remueven el recubrimiento de zinc en la zona de soldadura, lo que ocasiona problemas de corrosión⁽⁴²⁾.

3.7.6 Efecto de la secuencia de soldadura y desvíos de corriente

Si un punto de soldadura es hecho muy cerca del anterior, habrá un efecto de desvío, el cual es equivalente a dos resistencias en paralelo. La corriente pasará a través de los dos caminos en proporción inversa a su resistencia, la acción de la primera soldadura elimina la resistencia interfásial en ese punto y, dado que las superficies de contacto de los electrodos son iguales, la división de la corriente dependerá de la razón entre la resistencia de la segunda soldadura con la resistencia del camino de la corriente a través de la primera soldadura. Entonces, el metal entre los electrodos se convierte en un circuito dividido, parte de la corriente sigue la trayectoria del primer botón de soldadura, mientras que el resto lo hace para formar el segundo botón de soldadura. Si la distancia al primer botón es grande, su resistencia a comparación con la del segundo será grande. Sin embargo, si esta distancia es corta, una apreciable porción de la corriente total será desviada. Otro factor a considerar es que mientras se genera el segundo botón existe un incremento en la temperatura, que a su vez incrementa la resistencia, lo cual favorece el efecto de desvío de corriente⁽¹⁾.

Para acero galvanizado una proporción más grande de la corriente de soldadura pasa a través del botón primario debido a que la menor resistencia de contacto ofrece un

circuito de resistencia menor a través de la zona de soldadura en comparación con los aceros no recubiertos, sin embargo, no existe una gran diferencia entre estos⁽⁴²⁾.

El tamaño del botón de soldadura puede ser afectado por:

1. Efecto de desvío de corriente.
2. Inductancia magnética causada por la masa de la pieza de trabajo en los brazos de la máquina soldadora.
3. Pérdida de fuerza efectiva del electrodo como resultado de la distorsión al doblar o girar la pieza de trabajo.

Cada uno de estos factores puede variar con el cambio en la secuencia de soldadura. En secuencias de soldadura en línea recta, el efecto de desviación de corriente es bajo para espaciamientos entre soldaduras grandes, pero el diámetro del botón se reduce ligeramente a medida que se reduce el paso entre soldaduras. Por lo general es deseable un espaciamiento de cinco veces el diámetro del electrodo⁽⁴²⁾.

Cuando la soldadura se realiza entre otras dos soldaduras existentes un paso entre soldaduras de por lo menos ocho veces el diámetro del electrodo se requiere para reducir el efecto de desvío de corriente. Cuando la soldadura se realiza en piezas en donde una considerable cantidad de material se encuentra entre los brazos de la soldadora causando inductancia magnética, se puede notar una reducción en el diámetro del botón de soldadura. Otros factores tal como la impedancia de la soldadora, el espesor de la lámina, su temperatura, así como la resistividad eléctrica del metal base afectan la cantidad de desvíos de corriente⁽⁴²⁾.

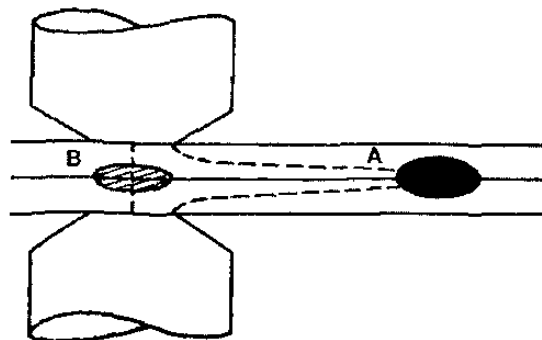


Figura 3.8. Efecto del desvío de corriente hacia el botón de soldadura previamente formado⁽¹⁾.

3.7.7 Efecto de los tratamientos posteriores

Los ciclos térmicos en el proceso de soldadura por puntos son rápidos y complejos con tasas de enfriamiento muy elevadas, suficientes para producir martensita en aceros de bajo carbono. Esta martensita de alta resistencia y baja ductilidad puede llevar a fractura interfásial por la reducida ductilidad del botón de soldadura, esto puede llevar a la reducción en la resistencia a la tensión y el rendimiento al impacto de la unión y posible agrietamiento en la soldadura. Por este motivo es conveniente efectuar un tratamiento térmico posterior al soldado para aquellas aleaciones susceptibles a la formación de martensita. La mayoría de estos tratamientos se efectúa directamente en la máquina soldadora^(42, 53).

Se debe de tener cuidado al seleccionar el tratamiento térmico adecuado. Para un resultado óptimo se debe de permitir a la soldadura enfriar por debajo de M_f pero sin causar recalentamiento por encima de A_1 . Aunque la industria automotriz, por lo general, se ha comportado poco dispuesta a estos tratamientos con excepción de algunas partes críticas⁽⁴²⁾.

3.7.8 Efecto del espesor de la lámina

Los materiales más delgados tienen su zona de fusión más cercana a los electrodos de cobre enfriados por agua que los materiales gruesos. Esto causa tasas de enfriamiento más rápidas en los botones de soldadura de materiales delgados. Por lo tanto, para composiciones químicas equivalentes, los puntos de soldadura de láminas de acero más delgadas presentan una mayor dureza que en láminas gruesas. La razón de enfriamiento en la soldadura es lo suficientemente rápida para formar martensita en materiales delgados⁽⁴²⁾.

Al soldar, ya sea materiales disimilares o de diferente espesor, o variando el contacto o material de los electrodos, existirán variaciones en el gradiente térmico del sistema que provocarían un desplazamiento del botón de soldadura hacia la zona donde se presente el valor máximo de éste⁽¹⁾.

3.7.9 Efecto de la condición superficial

Idealmente, las superficies de las piezas de trabajo deben de estar libres de cualquier sustancia que degrade la operación de soldadura, estas varían desde materiales aplicados como pintura o aceite, hasta productos de oxidación en forma de películas delgadas o escorias gruesas provenientes del baño de galvanizado. La suciedad y los óxidos superficiales, los cuales están en contacto con los electrodos, pueden reducir la vida de éstos al incrementar rápidamente el diámetro de su cara. Esto ocurre más rápidamente en materiales gruesos debido a que requieren corrientes más elevadas. El mecanismo de deterioro es la nula uniformidad de la resistencia en los óxidos, lo que produce áreas localizadas de excesiva temperatura, lo que provoca expulsión entre la lámina y el electrodo, causando la erosión, desgaste y deformación en forma de hongo de los electrodos, los cuales generan botones de soldadura de forma irregular. En las superficies interfaciales, la expulsión de metal puede ocurrir y la existencia de inclusiones de escorias, así como poros a menudo se encuentra en la zona de fusión^(1, 42).

El aceite superficial en acero de bajo carbono tiende a causar partículas de suciedad que son dañinas. Además de esto, el aceite en contacto con los electrodos causa carbonización en las puntas de los electrodos, reduciendo su vida considerablemente. Este aceite incrementa la resistencia de contacto en las superficies interfaciales⁽⁴²⁾. El desengrase alcalino no tiene influencia en el número máximo de puntos de soldadura, pero la corriente de soldadura se incrementa un poco, esto por una mayor resistencia de contacto cuando el óxido de aluminio está presente en superficies galvanizadas⁽³³⁾.

3.7.10 Efecto de la limpieza del acero

Se ha observado que la limpieza del acero afecta la fractura interfacial del botón de soldadura ya que pueden acumularse inclusiones en el centro de la soldadura durante solidificación. Ya que la limpieza de los aceros no calmados es inferior a la de los calmados, estos aceros presentan una curva de soldabilidad limitada. Estos resultados indican que si no se controlan las prácticas de fusión se puede deteriorar la soldabilidad del acero⁽⁴²⁾.

3.7.11 Efecto de la composición química del acero

Siempre es posible la unión de dos aceros por soldadura, el problema es hacerlo sin perder las propiedades del material como resistencia, ductilidad, resistencia a la fatiga, etc. Durante el soldado es importante minimizar la zona de soldadura, así como la zona afectada térmicamente. Debido al enfriamiento rápido de la zona de soldadura y la afectada térmicamente, fases frágiles como martensita o bainita pueden ser formadas. La formación de estas fases frágiles indeseables es principalmente dependiente en la composición del acero, el calor introducido por el proceso de soldadura y la velocidad de enfriamiento^(1, 49).

Probablemente el elemento más importante que afecta la soldabilidad es el carbono. Para calibres automotrices, la dureza se incrementa rápidamente con pequeños incrementos en el contenido de carbono, lo que ocasiona ruptura interfásial y deterioro del botón de soldadura. Se ha sugerido que para obtener un desempeño aceptable en las soldaduras, el contenido de carbono debe de ser mantenido por debajo de $0.10\% + 0.011t$, en donde t es el espesor del acero en milímetros. Los aceros HSLA, ya que son vendidos de acuerdo a su resistencia y que cada productor tiene su propia composición, esta diferencia en composición química puede causar variaciones en su soldabilidad^(1, 42).

El efecto de varios elementos aleantes en la soldabilidad por puntos se resume a continuación:

Carbono. Es uno de los más potentes elementos endurecedores, sin embargo, si su contenido no excede un porcentaje de 0.200 no tiene ningún efecto en la soldadura por resistencia⁽¹⁾.

Fósforo y azufre. Promueven ruptura interfásial cuando su contenido total, aunado al carbono excede un valor crítico, esto resulta en rangos reducidos de corriente que originan curvas de soldabilidad mínimas. Sin embargo, se ha mostrado que tiempos de soldadura más largos de lo normal, junto con tiempos de sostenimiento cortos, pueden mejorar la soldabilidad de aceros con contenido de fósforo^(1, 42).

Manganeso. Incrementa la tendencia al agrietamiento a contenidos por encima de los 0.600% con relativamente alto contenido de carbono. Por debajo de 0.300% puede incrementar la susceptibilidad a porosidad interna y agrietamiento⁽¹⁾.

Silicio. Incrementa la susceptibilidad al agrietamiento de la zona de soldadura, particularmente con el incremento del contenido de carbono⁽¹⁾.

Titanio. Reduce el diámetro máximo del botón de soldadura, la resistencia a tensión y a corte, así como el rango de corriente de soldadura. Se recomienda que el contenido de titanio no exceda el 0.18%, además de esto, la utilización de electrodos de diámetro mayor, así como un aumento en la fuerza puede ser requerido⁽⁴²⁾.

Nitrógeno. Provoca falla interfásial del botón de soldadura. Esta sensibilidad puede ser reducida disminuyendo el contenido de nitrógeno con aluminio en aceros calmados⁽⁴²⁾.

Oxígeno. Altos niveles promueven fallas interfásiales, ya sea por la presencia de agrietamiento en caliente en el centro, o a través de un mecanismo de fragilización de la soldadura. El nivel de oxígeno puede ser controlado reduciendo el contenido de oxígeno en la fundición y evitando las soldaduras en superficies oxidadas⁽⁴²⁾.

Hidrógeno. Proveniente de los aceites superficiales, asiste a las fallas en las soldaduras al difundir del área de soldadura⁽⁴²⁾.

3.7.11.1 Influencia del carbono equivalente en la soldabilidad

Una pobre soldabilidad es causada por altos valores de carbono, así como de carbono equivalente, es decir, altos valores de capacidad de endurecimiento que son más sensibles a la formación de estructuras frágiles. Las estructuras de los aceros tradicionales tienen alta sensibilidad a agrietamiento inducido por hidrógeno en las zonas afectadas térmicamente después de soldado^(49, 51).

La presencia de elevados contenidos de carbono y grandes cantidades de elementos aleantes requeridos para obtener las propiedades de resistencia y dureza también llevan a altos valores de carbono equivalente. La soldabilidad y la tenacidad de la soldadura son inversamente relacionadas con el valor de carbono equivalente, especialmente a altos contenidos. La Figura 3.9 sugiere la importancia crítica de bajos

contenidos de carbono en la mejora de la soldabilidad y tenacidad de soldaduras en aceros⁽⁵¹⁾.

El valor de carbono equivalente es calculado de acuerdo a la siguiente ecuación⁽⁵²⁾:

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (3.3)$$

Los procesos de soldadura sin demasiado aporte de calor como lo es el de soldadura por puntos puede reducir la formación de estructuras frágiles⁽⁴⁹⁾.

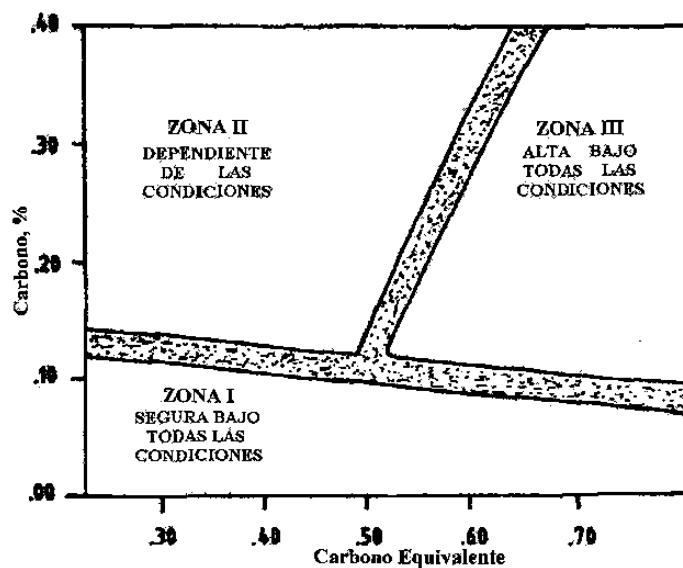


Figura 3.9. Susceptibilidad al agrietamiento de la zona afectada térmicamente como función del contenido de carbono y carbono equivalente de acuerdo a Graville⁽⁵²⁾.

3.7.12 Efecto del espesor del recubrimiento

La corriente de soldadura disponible para producir soldaduras satisfactorias es también sensible al espesor de la capa del recubrimiento, particularmente a niveles de 5 a 10 μm , justamente las de especificaciones comerciales. Las variaciones en la calidad de las soldaduras son mayores para los recubrimientos más pesados, estos requieren un incremento en la corriente o tiempo de soldadura para compensar el espesor del recubrimiento por lo que se ha observado que la vida del electrodo disminuye conforme el espesor del recubrimiento aumenta^(1, 28, 42).

Se ha observado que los materiales más delgados son más sensibles al deterioro de los electrodos. Entre más grande sea la proporción entre el espesor del recubrimiento con el de la lámina mayor será el deterioro de los electrodos⁽⁴²⁾.

3.7.13 Efecto de la composición química y microestructura del recubrimiento

Las condiciones uniformes de la fase Γ en los recubrimientos termogalvanizados provocan que requiera corrientes de menor magnitud y produce un calentamiento continuo y uniforme lo que mejora la soldabilidad e incrementa la vida del electrodo, sin embargo con relativamente poca formabilidad⁽⁴²⁾.

Los recubrimientos termogalvanizados con fases de ζ y δ presentes tienen alta resistencia al flujo lateral de corriente de soldadura reduciendo el efecto de desvío de corriente y presentando una excelente soldabilidad⁽⁴²⁾.

La soldabilidad de los recubrimientos por inmersión en caliente, depende de las fases intermetálicas presentes y su uniformidad, espesor y dureza. La formación de una uniforme y continua fase ζ promueve una soldabilidad excelente pero puede reducir la formabilidad. En general, la formación de capas intermetálicas continuas, duras y uniformes mejoran la soldabilidad⁽⁴²⁾.

3.7.14 Efecto de la integridad y dureza del recubrimiento

La integridad de la capa de aleación Fe-Zn del recubrimiento y su dureza tienen un efecto significativo en la calidad de la soldadura. Se ha reportado que los recubrimientos que se despedazan y rompen, o que son más suaves y presentan una menor uniformidad en su conductividad eléctrica y térmica, tienen una pobre soldabilidad y promueven el rápido deterioro de los electrodos⁽⁴²⁾.

3.8 Propiedades mecánicas de los puntos de soldadura

El comportamiento a la fractura de las juntas soldadas por puntos es investigado por pruebas de corte a tensión, prueba de arranque o prueba de tensión cruzada, el

desempeño a la fatiga es de importancia en aplicaciones automotrices. Una buena soldadura es obtenida si la zona fundida o botón de soldadura permanece en la lámina después de la prueba mecánica (en donde en ocasiones se determina un mínimo de fuerza requerida). Grietas interfaciales son típicas en soldaduras frágiles y deben de ser evitadas por una elección óptima de los parámetros de soldadura^(49, 53).

Una buena soldadura puede ser definida como sigue:

- No debe presentar fractura frágil, la adaptación de parámetros es requerida, así como también una baja cantidad de carbono equivalente en el acero.
- Debe presentar un buen diámetro del botón, esto es resultado de una buena elección de parámetros y el control de la estabilidad del proceso para compensar daños en el electrodo.

Las propiedades mecánicas obtenidas en el botón de soldadura son afectadas por muchos factores, los cuales incluyen⁽⁴²⁾:

1. Geometría del espécimen, espesor de la lámina y arreglo de puntos de soldadura.
2. Condiciones de soldadura (corriente de soldadura, tiempo de soldadura, tiempo de sostenimiento).
3. Tratamientos térmicos posteriores a la soldadura.
4. Condiciones de prueba (temperatura, velocidad, atmósfera).

Las variaciones en la geometría del espécimen, espesor de la hoja y el arreglo de puntos de soldadura alteran la distribución de esfuerzos locales alrededor de cada botón de soldadura causando una variación en la carga última que el botón es capaz de soportar. Así mismo, variaciones en las condiciones de soldadura pueden alterar la resistencia del botón de soldadura y por lo tanto causar variaciones en la capacidad de carga. Alteraciones en la química y resistencia del metal base pueden promover el debilitamiento de los botones de soldadura, exhibiendo fallas interfaciales, que es responsable de un reducido rendimiento⁽⁴²⁾.

CAPITULO IV

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

El procedimiento experimental comprende la obtención de los parámetros de proceso de las láminas de prueba, así como su caracterización en base al equipo disponible para tal efecto y con apoyo de las técnicas reportadas en la literatura existente que proporcionen información útil acerca de las propiedades del material y su posible influencia en el resultado de las pruebas de este estudio.

El proceso de pruebas de soldabilidad en el acero obtenido bajo las diferentes condiciones, así como el análisis de dichas soldaduras para su evaluación se efectúa en base a los requerimientos necesarios para su apego a la norma Chrysler y su uso para determinar la capacidad del acero a formar botones de soldadura por resistencia aceptables bajo los parámetros y criterios establecidos.

4.2 Determinación de parámetros de proceso

El material de entrada a la línea y las condiciones del procesamiento del acero son los requeridos para obtener un acero de alta resistencia baja aleación (HSLA). Los parámetros bajo los cuales las diferentes láminas de acero de prueba fueron procesados se obtienen por medio del equipo instalado de monitoreo de la empresa, que registra las temperaturas medidas por los termopares y pirómetros instalados en los diferentes puntos del proceso, así como la velocidad de la lámina, la composición química del baño de galvanizado y parámetros de operación del horno de inducción de termogalvanizado, como son, potencia, voltaje, corriente y frecuencia.

Todos estos parámetros son leídos y registrados en los paneles de monitoreo del cuarto de control que se observan en la Figura 4.1.

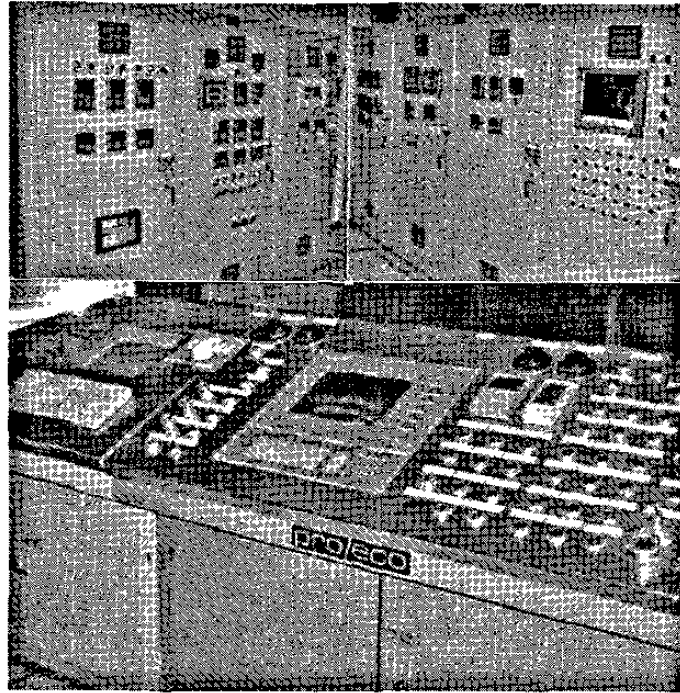


Figura 4.1. Paneles de monitoreo y control de proceso.

La principal variación en el proceso del acero de prueba es el concerniente al contenido de antimonio en el baño de galvanizado, inicialmente el contenido en el baño es el relativo a las condiciones normales de procesamiento de la línea de galvanizado, por lo que una corrida de acero de prueba fue procesada con esta cantidad de Sb. En orden de minimizar el contenido de Sb en el baño para procesar el acero de prueba a niveles más bajos, la línea de galvanizado trabajó recubriendo material para así ir disminuyendo gradualmente el contenido de los elementos aleantes del zinc fundido en la paila, manteniendo constante una composición adecuada en ésta por la adición de lingotes de los componentes de dicha composición, con excepción del Sb, hasta llegar a reducir su contenido a niveles casi nulos. Una corrida de material de prueba se realizó con una composición intermedia entre la

composición normal y la composición mínima de Sb en la paila para así poder determinar su efecto en la soldabilidad del acero de prueba.

4.3 Caracterización de la lámina termogalvanizada

La caracterización de la lámina termogalvanizada involucra tanto al metal base como al recubrimiento de Fe-Zn con objeto de conocer, determinar y validar sus propiedades.

4.3.1 Preparación de muestras

Después de que ha sido procesado el acero, al final de la línea y antes de enrollar la lámina se obtienen los paneles de lámina termogalvanizada de 30 cm por el ancho del rollo (aproximadamente 90 cm), los cuales servirán de muestra tanto para su caracterización como para las pruebas de soldabilidad.

Se cortaron las probetas para el ensayo de tensión y análisis químico de los paneles de lámina galvanizada haciendo uso de la troqueladora mecánica mostrada en la Figura 4.2 la cual cuenta con las dimensiones especificadas por la norma ASTM E8. La probeta para análisis químico es un bocado de 8 cm de diámetro.

Tanto para el análisis óptico, microdurezas y análisis de recubrimiento, se procede a la preparación de muestras de lámina galvanizada, dividiendo éstas en pequeñas secciones de 1.5 x 0.7 cm aproximadamente tanto en su sentido longitudinal y transversal con la cortadora marca BUEHLER modelo 75-C1700-160 de la Figura 4.3. Posteriormente a esto se procede al encapsulado en resina epóxica de baquelita en una encapsuladora marca BUEHLER modelo 20-1410-115 mostrada en la Figura 4.4.

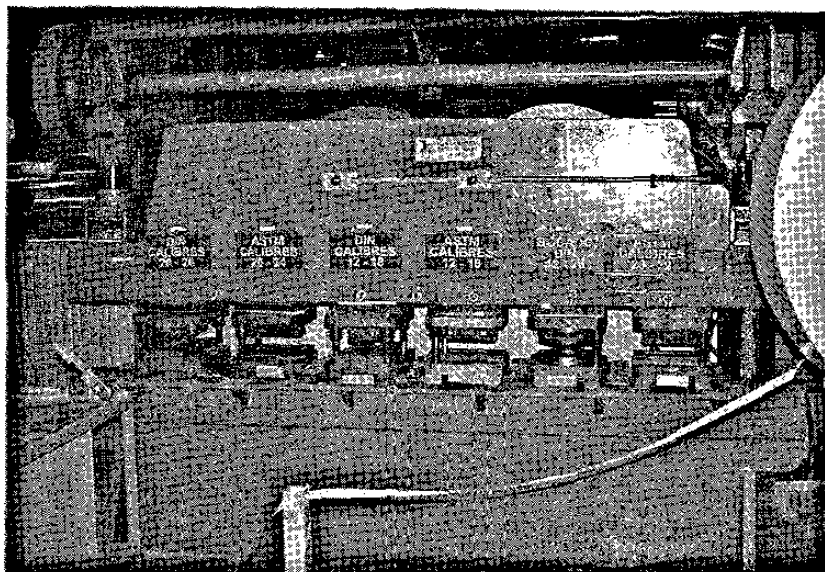


Figura 4.2. Troqueladora mecánica.

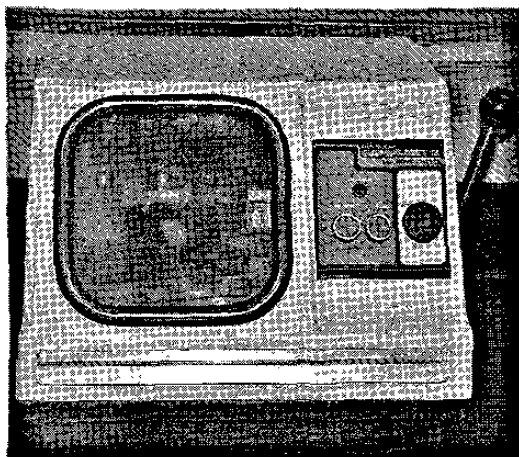


Figura 4.3. Cortadora marca BUEHLER

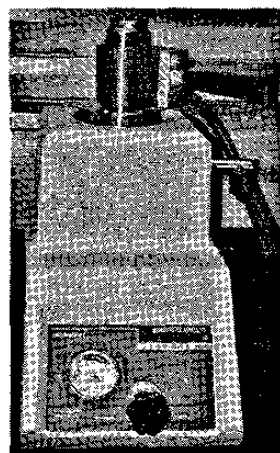


Figura 4.4. Encapsuladora marca BUEHLER

Después del encapsulado de las muestras se procede a su desbaste con una secuencia de lijas de granulometría 240, 320, 400, 600, 1200 y 4000 utilizando para esto la desbastadora manual mostrada en la Figura 4.5. Para posteriormente dar un pulido en un paño rotatorio (Figura 4.6) aplicando pasta de diamante de un μm para obtener un acabado a espejo en la muestra.

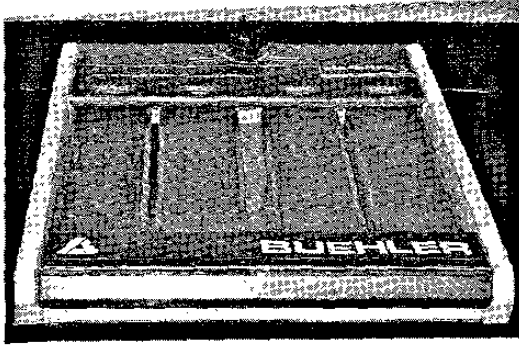


Figura 4.5. Desbastadora manual.

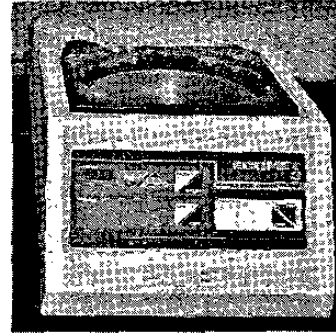


Figura 4.6. Pulidor rotatorio.

A partir del pulido y dependiendo del tipo de análisis a efectuar se procede al ataque ya sea del metal o del recubrimiento con nital al 2% (2% de HN en 98% de alcohol metílico) con objeto de revelar su microestructura.

4.3.2 Análisis del metal base

Se efectúa la medición del espesor de las muestras obtenidas de lámina termogalvanizada con un micrómetro digital marca Mitutoyo, este valor servirá como referencia para el ensayo de tensión, así como para la determinación de los parámetros de soldadura.

4.3.2.1 Ensayo de tensión

A partir de las probetas obtenidas en el sentido de laminación del rollo se realizan los ensayos de tensión en la máquina universal Instron modelo 2525-802 de la Figura 4.7 para evaluar las propiedades mecánicas finales del acero procesado y así verificar su correspondencia con las especificaciones requeridas para el material y la prueba.



Figura 4.7. Máquina universal de pruebas Instron.

4.3.2.2 Análisis químico

El bocado de 8 cm de la Figura 4.8, ya sea de lámina negra o galvanizada decapada con ácido clorhídrico (HCl), se lija con el fin de remover óxidos superficiales y así realizar el análisis químico correspondiente en el espectrómetro por chispa marca Spectrolab previamente calibrado mostrado en la Figura 4.9.

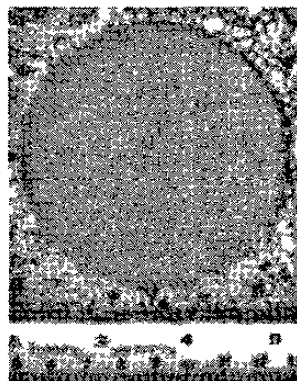


Figura 4.8. Bocado troquelado de lámina de 8 cm de diámetro.



Figura 4.9. Espectrómetro por chispa.

4.3.2.3 Ensayo de dureza

Se determinó la dureza superficial a las probetas de lámina galvanizada en un área decapada con un durómetro marca United, modelo Tru Blue en HRB, así como su microdureza transversal con el microdurómetro marca Shimadzu (Figura 4.10) con una carga de 100g y un tiempo de indentación de 15 segundos.

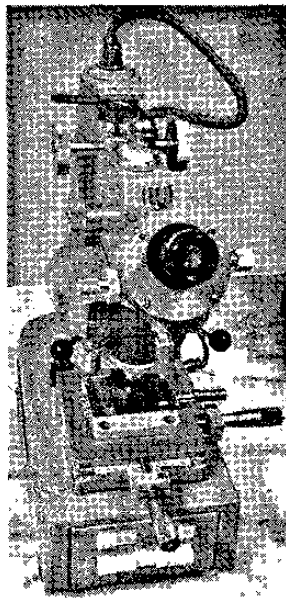


Figura 4.10. Microdurómetro marca Shimadzu.

4.3.2.4 Análisis óptico

Se efectúa un análisis óptico a las muestras metalográficas con el fin de determinar tanto la microestructura de las fases presentes, así como las correspondientes mediciones de tamaño de grano con el microscopio óptico marca Nikon modelo EPHIPOT (Figura 4.11) complementado con su equipo de analizador de imágenes, con el cual se miden además las indentaciones realizadas con el microdurómetro.

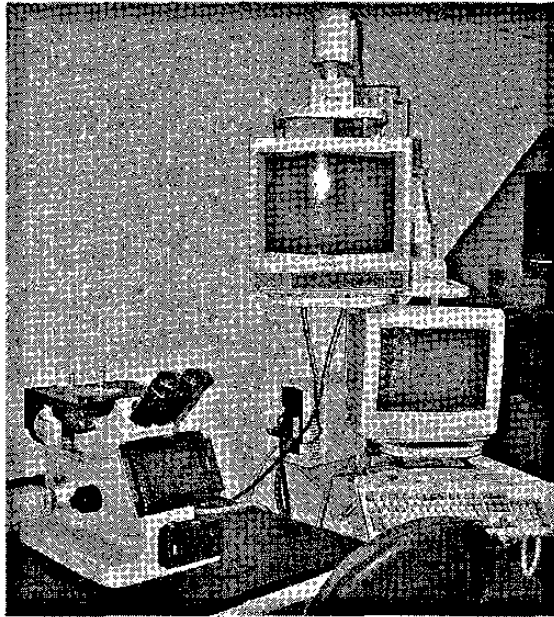


Figura 4.11. Microscopio óptico.

4.3.3 Análisis del recubrimiento

4.3.3.1 Medición de rugosidad

Con objeto de determinar la rugosidad superficial del recubrimiento después de ser procesado, se realiza la medición de este parámetro en la muestra obtenida en diferentes puntos, tanto en extremos como en su zona central, haciendo uso de un rugosímetro marca Hommel, modelo T500 que se muestra en la Figura 4.12.

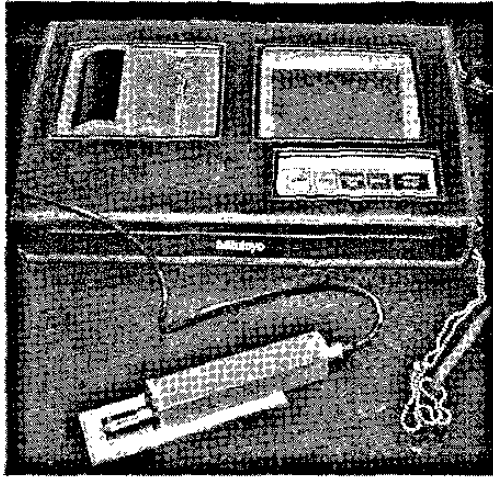


Figura 4.12. Rugosímetro Hommel, modelo T500.

4.3.3.2 Análisis químico

El análisis químico del recubrimiento se realiza al disolver el recubrimiento de un bocado de lámina termogalvanizada con HCl, este es diluido y analizado por medio del espectrofotómetro de emisión por plasma marca Jarrell Ash, modelo 13860302 (Figura 4.13) para determinar su composición química.

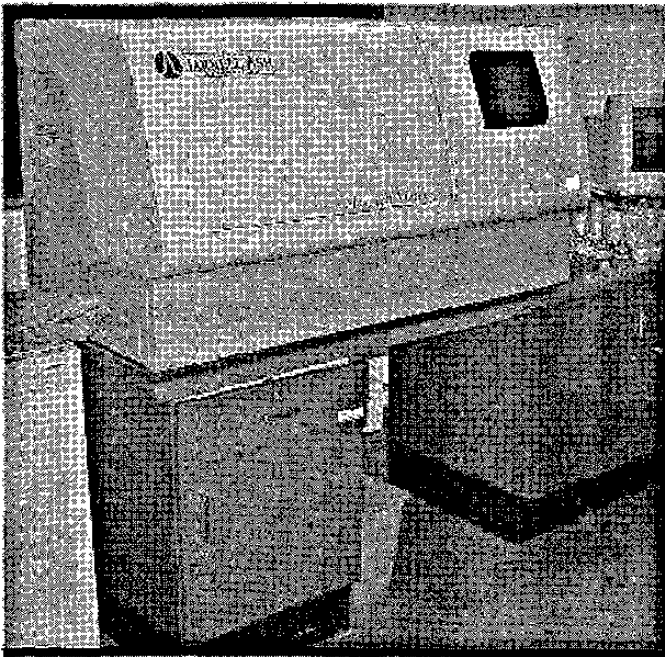


Figura 4.13. Espectrofotómetro de emisión por plasma.

Además de esto se realiza el análisis de las fases del recubrimiento haciendo uso del microscopio electrónico de barrido marca Jeol, modelo JSM-5600 de la Figura 4.14. La composición química puntual de las fases presentes y la distribución del contenido de Fe en función de la distancia al sustrato se determinan por medio del espectro de rayos X.

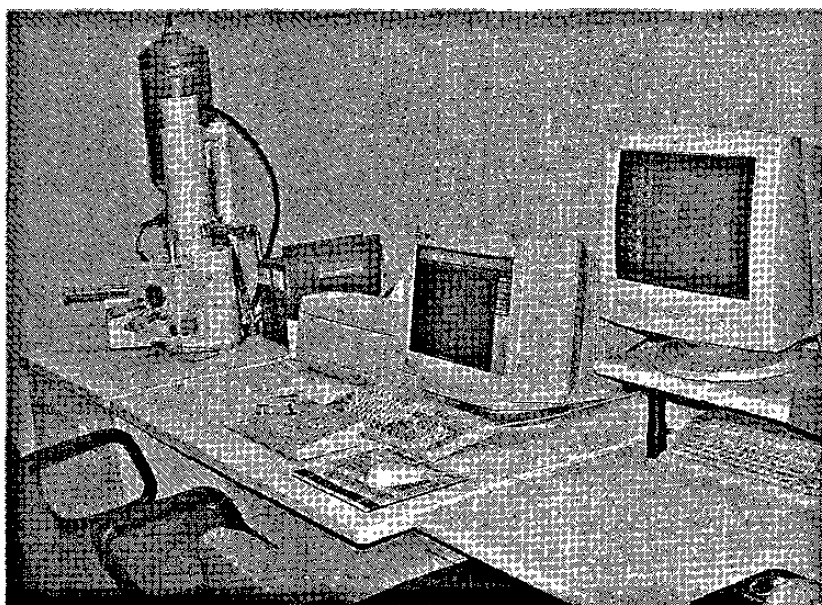


Figura 4.14. Microscopio electrónico de barrido.

4.3.3.3 Análisis óptico

El análisis óptico del recubrimiento se lleva a cabo mediante el microscopio óptico de la Figura 4.11 y con el microscopio electrónico de barrido de la Figura 4.14 con objeto de determinar la microestructura de sus fases intermetálicas, así como su espesor.

4.3.3.4 Peso del recubrimiento

El peso del recubrimiento se determina por medio de la pérdida en peso por lado de un bocado de lámina de 8cm de diámetro, al disolver su recubrimiento en HCl, el peso es medido en la báscula de precisión mostrada en la Figura 4.15.

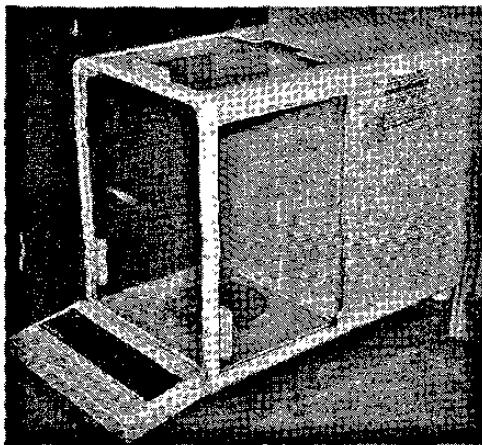


Figura 4.15. Bascula de precisión.

4.3.3.5 Integridad del recubrimiento

Ya que la lámina de acero está destinada a la industria automotriz y en ésta el proceso de formado es esencial, se realizan los ensayos de doblez para determinar la capacidad de recubrimiento a permanecer adherido a la lámina después de haber sido sometida a un doblado y desdoblado.

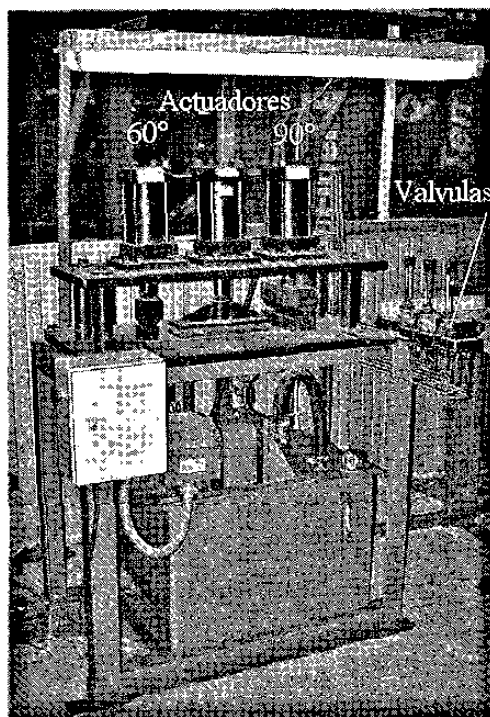


Figura 4.16. Máquina dobladora.

Para tal efecto se realizan doblados de bocados de lámina galvanizada de 8cm de diámetro a dos diferentes ángulos, los cuales son 90° y 60° con la máquina dobladora mostrada en la Figura 4.16, los bocados de lámina son pesados antes de su doblez haciendo uso de la báscula de precisión mostrada en la Figura 4.15, después del desdoblamiento se coloca una cinta adhesiva en la línea sobre la cual se efectúa el doblez, para capturar el polvo del recubrimiento de Zn desprendido, el bocado es pesado nuevamente para determinar su pérdida en peso relativa al polvo desprendido.

4.4 Prueba Chrysler de calidad de soldaduras

La prueba de calidad de las soldaduras determina la capacidad del acero para formar soldaduras por puntos por resistencia aceptables realizadas dentro de los parámetros de soldadura recomendados por el estándar de proceso. Los aceros de alta resistencia sensibles a tiempos de sostenimiento largos o cortos son similarmente sometidos a prueba⁽⁴⁴⁾.

Un resumen del procedimiento general se describe a continuación:

1. La corriente de prueba se establece siguiendo un procedimiento que asegura que cada prueba inicia con una corriente que es cercana, pero por debajo del nivel de expulsión para el acero de prueba.
2. Las soldaduras se realizan en el acero de prueba iniciando con los paneles correspondientes a 30 ciclos de tiempo de sostenimiento y terminando con 5 ciclos.
3. Una evaluación de una porción de soldaduras se realiza para determinar el diámetro del botón, estos resultados son registrados.
4. Se recopila información metalográfica, de dureza, indentación, penetración y diámetro de la zona fundida del botón de soldadura de los pares de paneles de prueba soldados.
5. Después de revisar todos estos datos se determina la aceptabilidad o no del acero de prueba para ser soldado satisfactoriamente bajo este estándar.

4.4.1 Limitantes y consideraciones de aplicación del estándar

Este estándar se aplica a todos los componentes automotrices fabricados de hojas de acero no recubierta y galvanizada, termogalvanizada, electrogalvanizada y acero de alta resistencia soldable con un máximo de 414MPa o 60,000 psi de cedencia⁽⁵⁰⁾.

Es además aplicable a aceros teniendo un carbono equivalente máximo de 0.30% generalmente usados para estampado y otras partes maquinadas. El carbono equivalente (CE) es calculado por la siguiente ecuación:

$$CE = \%C + \%Mn/6 \quad (4.1)$$

La razón de espesor para dos espesores de metales y hojas adyacentes para tres espesores de metales no debe de exceder de 3:1 tanto para aceros recubiertos, como para no recubiertos, esto no aplica para tres espesores de material si el más delgado se encuentra en medio de los otros⁽⁵⁰⁾.

4.4.2 Preparación de muestras

Los aceites de molino u otros tratamientos químicos superficiales utilizados como protección contra la corrosión o para envío no deben de ser removidos antes de la prueba de soldabilidad por puntos, sin embargo, aceites de molino pesados pueden ser limpiados ligeramente con una toalla de papel seca, por lo tanto, los paneles de lámina galvanizada obtenidos después de su procesamiento únicamente se protegen de suciedad o partículas de polvo del medio ambiente.

El corte de las muestras para las pruebas de soldadura se realiza a partir del rollo como lo indica la Figura 4.17, desechando aproximadamente 2.54cm (1 in) de los extremos del rollo, el resto de éste es cortado en tiras de 7.62 cm de ancho (3 in), que servirán como tiras de acondicionamiento, a partir de éstas se obtienen paneles de 30.5 cm (12 in) de longitud y los cupones tanto metalográficos como tensiles que se muestran en la Figura 4.18 se obtienen en el sentido de laminación, los cortes se realizan en la cizalla hidráulica de la Figura 4.19.

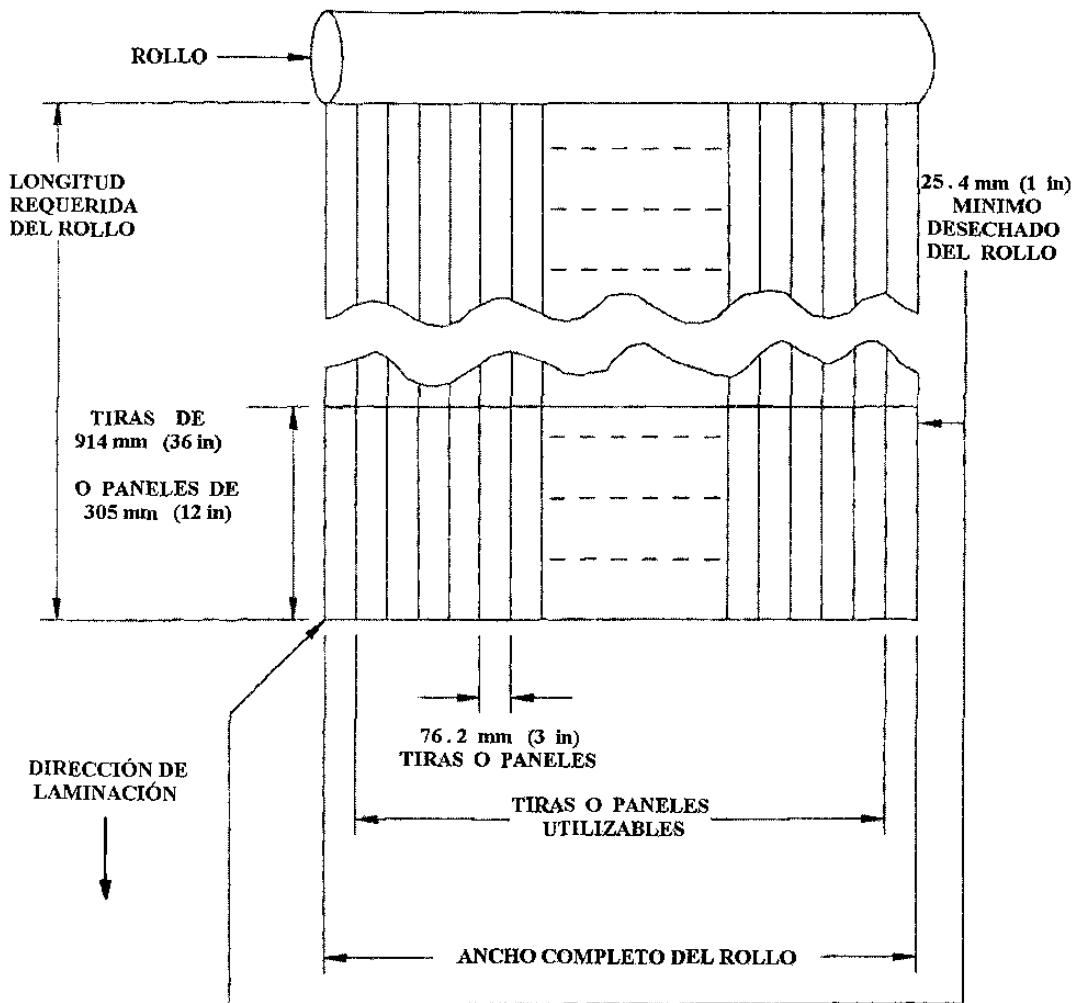


Figura 4.17. Instrucciones de corte para tiras y paneles de prueba⁽⁴⁴⁾.

Descripción	Ancho	Largo
Tiras de acondicionamiento	7.62cm (3in)	91.4cm (36in)
Paneles	7.62cm (3in)	30.5cm (12in)
Cupón metalográfico	3.8cm (1.5in)	12.7cm (5in)
Cupón de tensión	3.8cm (1.5in)	10.2cm (4in)

Tabla 4.1. Dimensiones de las hojas utilizadas.

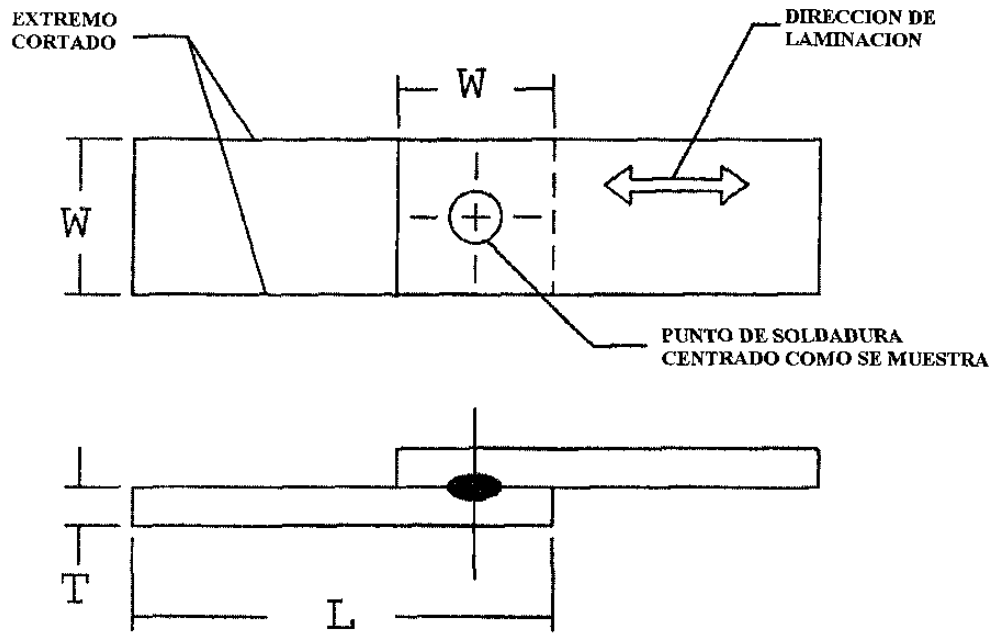


Figura 4.18. Cupón metalográfico y de tensión⁽⁴⁴⁾.

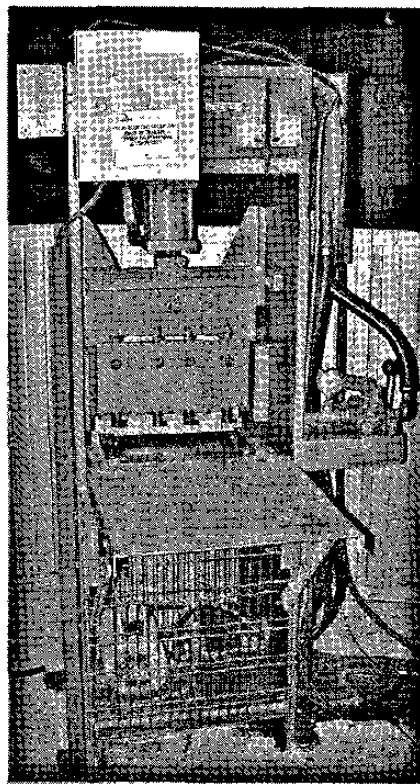


Figura 4.19. Cizalla hidráulica.

4.4.3 Preparación de máquina

De acuerdo al estándar los electrodos deben de ser RWMA tipo “A” clase 2 cobre-cromo con una dureza Rockwell B mínima de 78 y deben de ser instalados con las caras paralelas, con un flujo de agua de enfriamiento de 3.8 litros (1 galón) por minuto \pm 5% a una temperatura de entre 10 y 32°C. La tolerancia del diámetro de la cara del electrodo requerida es de \pm 0.25mm (\pm 0.010in). La fuerza de los electrodos para hojas de acero de HSLA debe incrementarse en un 10% y estas partes deberán estar en contacto y alineadas sin tener que aplicar más de dicho porcentaje de la fuerza requerida.

Para la puesta en marcha de la máquina soldadora de pedestal marca ARO modelo PAO94-SC, que se muestra en la Figura 4.20, se ajustan los requerimientos establecidos por la norma relativa de soldabilidad en el panel de control. Se instalan los electrodos correspondientes, se regula la presión del actuador neumático para proporcionar la fuerza requerida, así como el flujo de agua de enfriamiento de los electrodos con los parámetros mostrados en la Tabla 4.2, en base al calibre del metal de prueba.

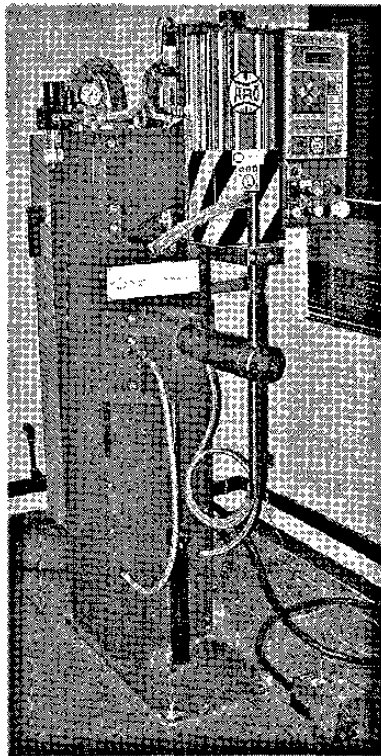


Figura 4.20. Máquina soldadora de pedestal.

Parámetro	Especificación
Espesor de la hoja más delgada	1.524 mm (0,060 in)
Fuerza neta del electrodo	4895 N (1100 Lbs)
Ø de la punta del electrodo	7.9 mm (0.313 in)
Tipo y clase del electrodo	RWMA 2 cobre - cromo
Rango de corriente de soldadura	12 - 15 kA
Tiempo de compresión	99 ciclos
Tiempo de soldadura	14 ciclos
Tiempo de sostenimiento	5/30 ciclos
Tiempo de apagado	24 ciclos
Flujo de agua de refrigeración	3.8 l/min (1,0 gpm)
Temp. del agua de refrigeración	10 - 32 °C
Ø mínimo requerido del botón de soldadura	5.4 mm (0.213in)

Tabla 4.2. Especificaciones según norma Chrysler.

4.4.4 Procedimiento de ajuste de corriente de prueba

El propósito de este procedimiento es el de establecer la corriente de soldadura para ser usada en toda la prueba. Esto con el objeto de determinarla de una manera predecible y reproducible, minimizando el riesgo de influenciar la prueba⁽⁵⁴⁾.

El promedio de medidas en el espesor de la lámina, tomadas de diferentes tiras, se utiliza en la selección del rango apropiado de corriente, de acuerdo con el estándar de proceso. El procedimiento para establecer la corriente de prueba se menciona a continuación.

Una vez instalados los electrodos de acuerdo con los requerimientos mencionados y un tiempo de sostenimiento programado de 30 ciclos, se ajusta el porcentaje de calor

(%Ht) necesario para aplicar la corriente mínima (I_L) del rango recomendado para el espesor del acero antes mencionado, esto se realiza con las caras de los electrodos en contacto directo, es decir, en ausencia de la resistencia de la pieza de trabajo y registrando el promedio de tres lecturas tanto de I_L como de %Ht_L. El mismo proceso se realiza hasta obtener la corriente máxima (I_H) del rango recomendado.

A partir de las lecturas anteriores se calcula la diferencia (Δ) de estas, tanto en %Ht, como en I. Una adición de corriente (I_{Add}) se calcula dividiendo la diferencia en la corriente entre un factor R para compensar la corriente inicial de acuerdo con el material de prueba, en este caso, y al tratarse de lámina termogalvanizada, el factor R es de 2. Una corriente deseada (I_D) se obtiene al sumar $I_L + I_{Add}$.

Utilizando las tiras de lámina de prueba de 7.9 x 90.6 cm (3" x 36") y tomando en consideración la Figura 4.21 se realiza el primer punto de soldadura ajustando la soldadora a %Ht_L. Se realizan cinco soldaduras más en la lámina de prueba, siguiendo con el patrón mencionado, registrando la corriente correspondiente a cada una de ellas para calcular su promedio, esta será una corriente real (I_{Act}).

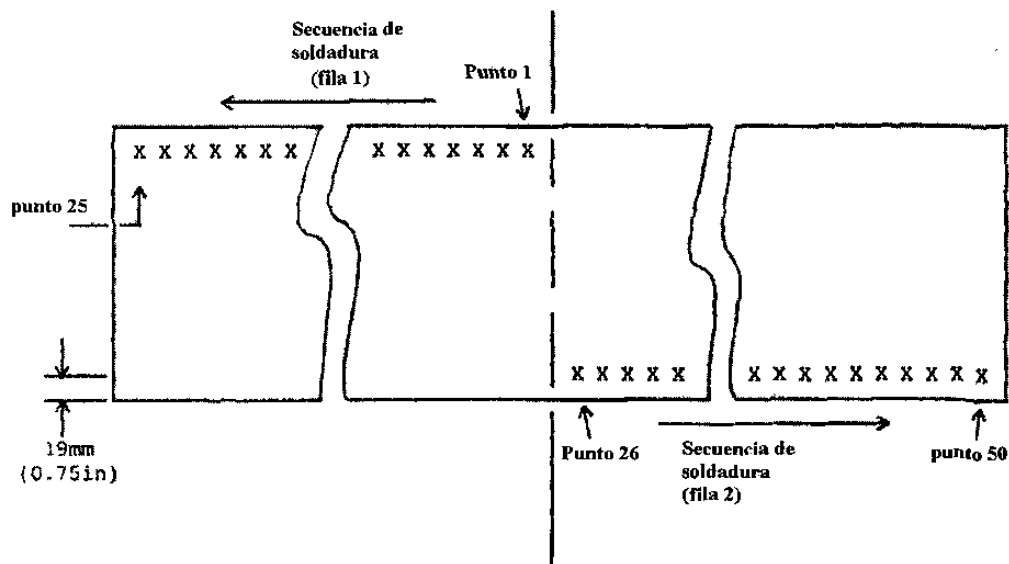


Figura 4.21. Secuencia y localización de los puntos de acondicionamiento⁽⁵⁴⁾.

Se calcula un factor de corrección (CF) = I_{Act}/I_L y una diferencia en la corriente corregida (ΔI_{Corr}) = $I_D - I_{Act}$ para calcular el incremento total en el porcentaje de calor ($\%Ht_{inc}$) con:

$$\%Ht_{inc} = \frac{(\Delta\%Ht)(\Delta I_{Corr})}{(\Delta I)(CF)} \quad (4.2)$$

Con este incremento en el porcentaje de calor total se calcula el porcentaje de calor objetivo ($\%Ht_{Tar}$) = $\%Ht_L + \%Ht_{inc}$. El número de incrementos del 5% entre $\%Ht_L$ y $\%Ht_{Tar}$ se obtiene de dividir $\%Ht_{inc}$ entre 5. Por lo tanto se inicia en $\%Ht_L$, al que se le irá incrementando cada vez 5% hasta llegar a la corriente de prueba o alcanzar $\%Ht_{Tar}$.

Se realizan cinco puntos de soldadura al primer incremento de $\%Ht$ en la lámina de prueba continuando con el patrón iniciado, si menos de tres de las cinco soldaduras realizadas exhiben expulsión de material se efectúa el siguiente incremento de $\%Ht$ hasta que por lo menos tres de las cinco soldaduras exhiban expulsión o se llegue a $\%Ht_{Tar}$. En caso de tener al menos tres puntos que presenten expulsión se debe de reducir el $\%Ht$ un 3% y realizar cinco puntos de soldadura más (en caso de haber llegado a $\%Ht_{Tar}$ sólo se realizan las cinco soldaduras).

Si de las últimas cinco soldaduras realizadas menos de tres exhiben expulsión se debe de incrementar el porcentaje de calor un 1% hasta que al menos tres de cualquier grupo de cinco exhiban expulsión. Al cumplirse esto se debe reducir el porcentaje de calor un 1% y realizar cinco soldaduras más continuando con el patrón.

Si al menos tres de los cinco puntos de soldadura exhiben expulsión se debe de reducir el porcentaje de calor existente un 1% y realizar cinco soldaduras más hasta que por lo menos tres soldaduras no exhiban expulsión. Al llegar a este punto se debe de incrementar el porcentaje de calor un 1% y realizar cinco soldaduras más.

Si al menos tres de los cinco puntos de soldadura no exhiben expulsión se debe de incrementar el porcentaje de calor un 1% y realizar cinco soldaduras más hasta que por lo menos tres soldaduras de cualquier grupo de cinco exhiban expulsión. Cuando esto sucede se debe de reducir el porcentaje de calor un 1% y realizar cinco soldaduras más hasta que al menos tres soldaduras de cualquier grupo de cinco no presenten expulsión. Se deben de realizar tres soldaduras más a este nivel de %Ht, registrando el valor promedio, y si este es menor que %Ht_H se puede comenzar con la prueba, completando primero la lámina de prueba como acondicionamiento de los electrodos⁽⁵⁴⁾.

4.4.5 Pruebas de soldabilidad

Estando la máquina al nivel especificado para el material de acuerdo al ajuste se efectúa la prueba, la cual consiste en una secuencia de 6 puntos alternados en los paneles con una razón de 6 a 10 puntos por minuto, esta secuencia de puntos se realiza en 5 paneles como se muestra en la Figura 4.22, seguido de los cupones metalográficos y de tensión con el tiempo de sostenimiento de 30 ciclos ya programado, registrando a su vez el valor de corriente suministrada por la máquina para cada punto durante el transcurso de la prueba, así como la identificación de los puntos que presentan expulsión.

Posteriormente se ajusta la máquina haciendo una variación en el tiempo de sostenimiento programado a 5 ciclos con el fin de determinar la sensibilidad del material a este cambio con el tiempo de sostenimiento, esto se hace en tres paneles, seguido de los correspondientes cupones metalográficos y de tensión.

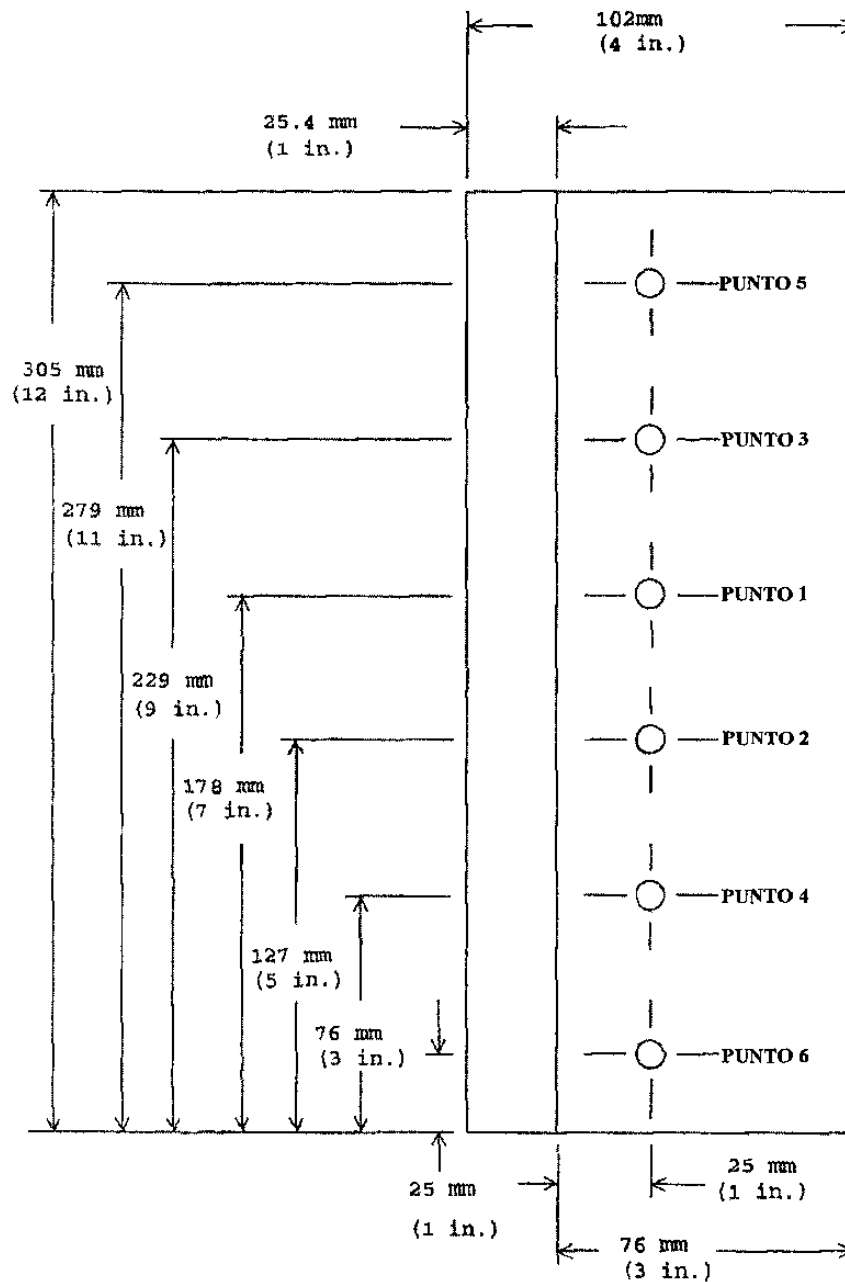


Figura 4.22. Secuencia y espaciamiento de puntos en el panel de prueba⁽⁴⁴⁾.

4.4.6 Técnicas de evaluación de aceptabilidad de las soldaduras

Estas son técnicas que permiten la caracterización del punto de soldadura con las cuales se determina o no su aceptabilidad, ya que aunque el hecho de que el botón cumpla con algunos de los criterios de evaluación por medio de estas técnicas, no

significa que cumpla con todas, tomando en cuenta las condiciones del material y su reacción al proceso de soldadura.

4.4.6.1 Inspección visual de los puntos de soldadura

Ya que algunas soldaduras discrepantes pueden ser detectadas fácilmente a simple vista, cada punto es observado con la finalidad de detectar grietas, ya sea en la cara del punto o en las zonas adyacentes a el, sin ayuda de ningún tipo de dispositivo de magnificación.

4.4.6.2 Análisis microestructural

A partir de las tres soldaduras en los pares de cupones metalográficos realizadas con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento, las tres soldaduras en los pares de cupones realizadas con 5 ciclos de tiempo de sostenimiento y además de aquellos puntos sospechosos en cualquiera de los paneles de prueba, se preparan las muestras en una sección transversal del botón. Esta sección transversal de la soldadura se realiza a través de un corte ligeramente excéntrico en el botón de soldadura, para ser entonces encapsulado, con el fin de obtener la sección media transversal del punto después de desbaste y pulido.

Por medio del microscopio óptico se conduce una examinación metalográfica de la microestructura obtenida de la fusión y coalescencia del botón de soldadura a diferentes magnificaciones con lo cual además es posible la detección de fallas, poros o grietas interfaciales que pudieran estar presentes en la soldadura.

4.4.6.3 Análisis dimensional del botón de soldadura

Se utilizan el estereoscopio marca Olympus modelo 5740, mostrado en la Figura 4.23, y el analizador de imágenes para digitalizar la sección transversal del botón de soldadura en que se determinan los parámetros que se muestran en la Figura 4.24 y se definen a continuación.

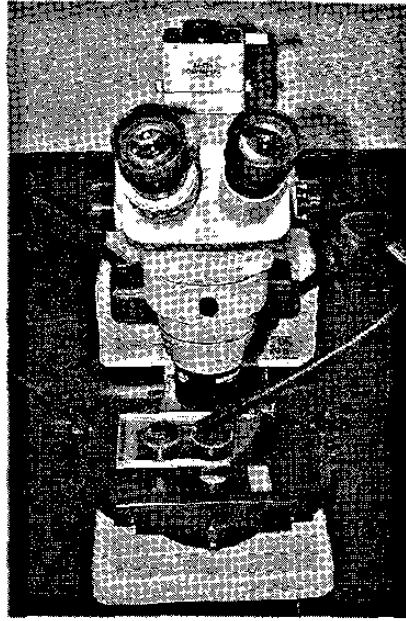


Figura 4.23. Estereoscopio Olympus.

Indentación del electrodo: Es la medida de la distancia máxima a partir de la cara superficial de la lámina hasta la cara del botón de soldadura como porcentaje del espesor de la lámina, este valor es medido en ambas caras del botón de soldadura.

Penetración de la soldadura: Es la medida de la distancia desde el centro del botón de soldadura hacia la altura del botón como porcentaje del espesor de cada una de las láminas.

Diámetro del botón de soldadura: Es la distancia transversal del botón de soldadura relativa a la sección que presenta fusión.

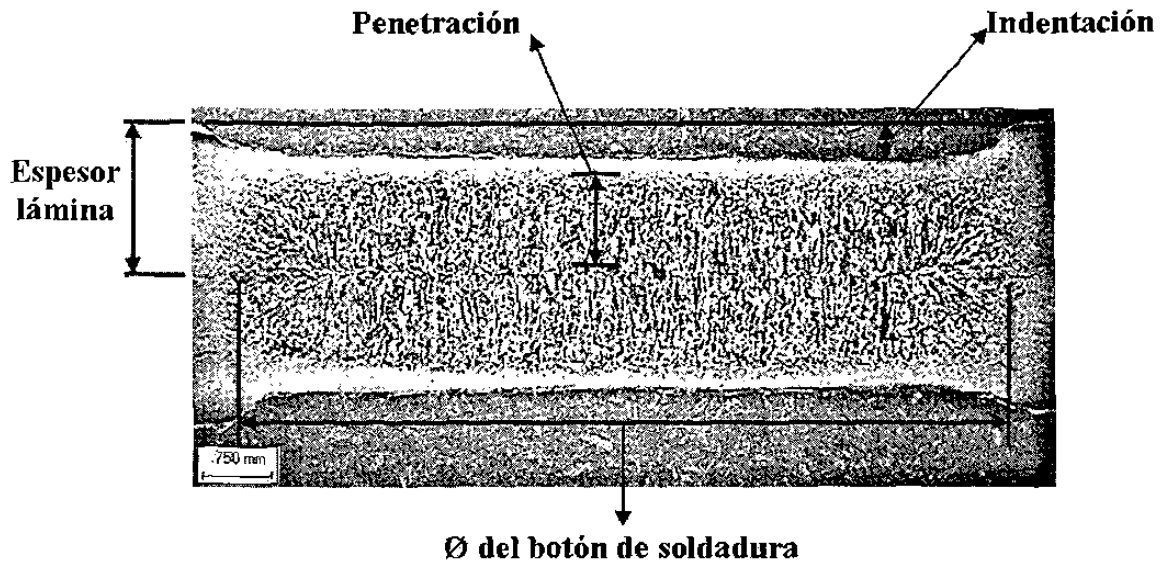


Figura 4.24. Parámetros dimensionales del botón de soldadura.

4.4.6.4 Ensayo de corte a tensión

Los cupones de tensión, así como cada uno de los puntos de los paneles, se someten a un ensayo de tensión con el fin de determinar la resistencia máxima de estos para poder determinar su aceptabilidad al compararlo con el esfuerzo de corte a tensión mínimo requerido. La mínima fuerza de corte a tensión por un solo punto de soldadura se calcula realizando la siguiente operación:

$$F = \pi \cdot \sigma_{\min} \cdot \varnothing_{\min} \cdot t \quad (4.3)$$

Donde:

F: Mínima fuerza de corte a tensión.

σ_{\min} : Mínimo esfuerzo de tensión de las hojas de acero a soldar (MPa o psi).

\varnothing_{\min} : Diámetro mínimo requerido del botón de soldadura (mm o in).

t: Espesor de la hoja de acero más delgada (mm o in).

Este valor representa la fuerza de corte del área periférica al punto de soldadura de la lámina más delgada.

4.4.6.5 Registro del diámetro del botón

Después de que se efectúa el ensayo de tensión en cada punto, el botón de soldadura se arranca de una de las láminas a las que fue soldado, sin embargo, el tipo de arranque del botón hace inaccesible a las puntas de un vernier para su medición directa, por tal motivo, los botones de soldadura se cortan en su sección media transversal y se miden con un vernier digital marca Mitutoyo, apoyados en el estereoscopio antes mencionado, para obtener un registro de su evolución conforme al transcurso de la prueba.

4.4.6.6 Ensayo de microdureza

Se efectúa este ensayo con motivo de determinar la sensibilidad del botón de soldadura al tiempo de sostenimiento a través de un patrón de indentaciones a lo largo de la diagonal transversal del botón de soldadura a intervalos de 0.38cm (0.015in), como se muestra en la Figura 4.25 y así obtener un perfil definido para ser evaluado a los dos tiempos de sostenimiento de prueba.

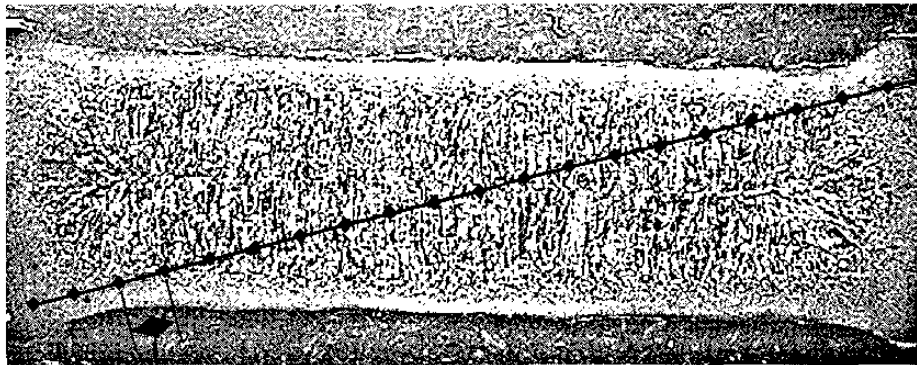


Figura 4.25. Patrón de indentaciones ($L = 0.38\text{cm}$).

4.4.7 Criterios de evaluación de soldaduras

La cantidad de fusión determinada por el diámetro del botón de soldadura es el principal criterio para establecer la aceptabilidad de soldaduras por resistencia por puntos en producción.

- Los botones de soldadura son aceptables si son *más grandes o iguales* que el diámetro del botón de soldadura *requerido*.
- Una soldadura discrepante será aquella cuya depresión superficial causada por cualquiera de los electrodos exceda del 30% del espesor de la hoja de metal.
- La penetración de la zona fundida no debe de ser *menor del 20% del espesor original de la hoja de acero*.
- La soldadura no cumplirá el estándar si presenta grietas, ya sea en el metal alrededor del botón de soldadura o en el mismo botón de soldadura.

4.5 Análisis del electrodo

Con motivo de corroborar las características del electrodo conforme a lo estipulado por el estándar se sometió a mediciones y evaluación de:

- Diámetro de la cara.
- *Composición química*.
- Microestructura.
- Microdureza.

Los resultados concernientes a las pruebas y análisis mencionados en la presente metodología y llevados a cabo se muestran en el siguiente Capítulo.

CAPITULO V

RESULTADOS

5.1 Introducción

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas y análisis descritos en el Capítulo IV se presentan para su discusión. La principal diferencia en cada uno de estas pruebas es el contenido de Sb en la paila durante su procesamiento, por lo que los aceros han sido catalogados de acuerdo a esta condición.

5.2 Determinación de parámetros de proceso

Las condiciones de procesamiento a que fue sometida la lámina se muestran en la Tabla 5.1 en sus diversas etapas y para las diferentes pruebas. El ciclo térmico para cada condición de acero de prueba se presenta en la Figura 5.1.

Condición de Sb		Bajo	Medio	Alto
Velocidad lámina (m/min)		25.0	24.0	24.5
Antes de Inmersión	Horno F1 (°C)	756	738	758
	Horno F2 (°C)	773	759	763
	Horno F3-1 (°C)	780		
	Horno F3-2 (°C)	700	659	624
	Horno F3-3 (°C)	578		
	Jet Cooling (°C)	462	443	465
Durante Inmersión	Temp Paila (°C)	459.5	456.8	460
	% Al	0.1369	0.1298	0.1385
	% Sb	0.0013	0.0462	0.1
Después de Inmersión	Potencia (kW)	480	477	616
	T. des ind (°C)	347	347	355
	T. des tem (°C)	37	35	35

Tabla 5.1. Condiciones del procesamiento de la lámina.

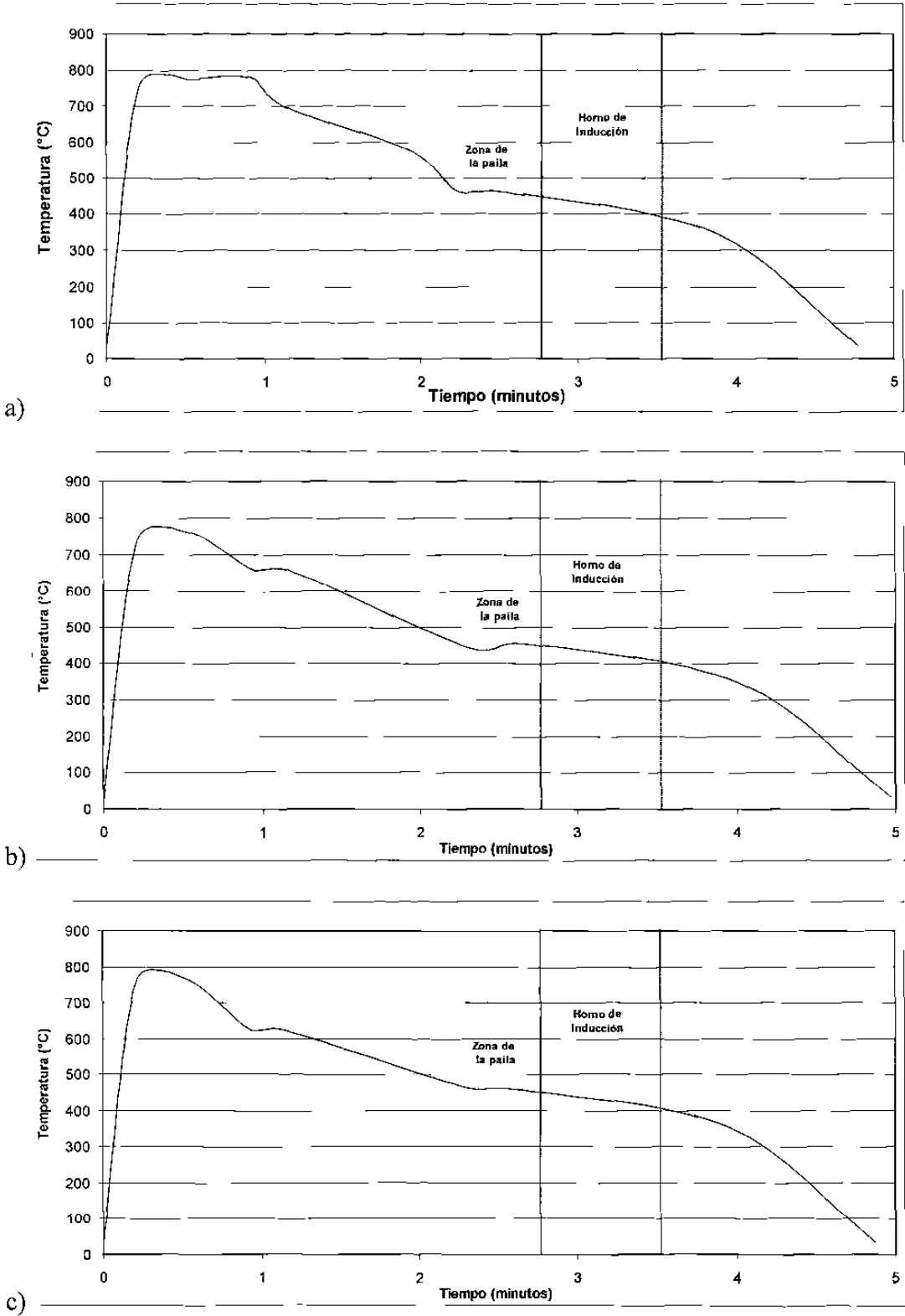


Figura 5.1. Ciclo térmico de la lámina para un contenido de Sb en la paila a) bajo, b) medio, y c) alto.

5.3 Caracterización de la lámina termogalvanizada

5.3.1 Análisis del metal base

Los diferentes análisis efectuados en el metal base con el fin de determinar sus propiedades se presentan a continuación.

5.3.1.1 Análisis químico

La Tabla 5.2 muestra el análisis químico del metal base obtenido por espectrómetro por chispa.

Sb en paila	Bajo	Medio	Alto
C	0.050	0.049	0.056
Mn	0.422	0.390	0.420
P	0.0081	0.017	0.014
S	0.0057	0.0081	0.0073
Cu	0.022	0.031	0.036
Ni	0.0044	0.011	0.0069
Si	0.013	0.036	0.043
Cr	0.021	0.013	0.014
Nb	0.023	0.023	0.026
Al	0.043	0.043	0.046
Mo	0.0059	0.0055	0.0047
V	0.0027	0.0622	0.0028
Ti	0.000	0.000	0.000

Tabla 5.2. Composición química del metal base.

5.3.1.2 Ensayo de tensión

La Figura 5.2 muestra la gráfica de esfuerzo contra deformación en la dirección de laminación de las hojas de prueba utilizadas de acuerdo con la norma ASTM E8, presentando los valores correspondientes a cada una de éstas en la Tabla 5.3.

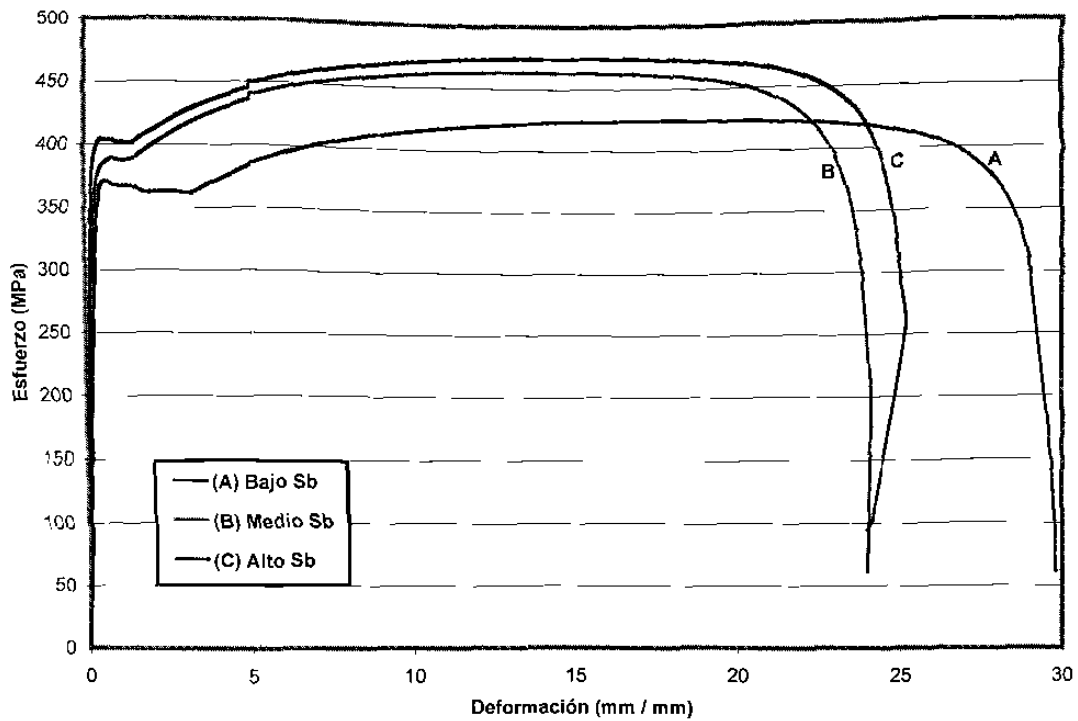


Figura 5.2. Curvas de esfuerzo contra deformación del material utilizado para cada condición de Sb en la paila.

Sb	Esp. Lam. (mm)	Ancho Próbete (mm)	Área (mm ²)	Limite elástico		Resistencia a la tensión		Relación de esfuerzo	% elong.
				N	MPa	N	MPa		
Bajo	1.54	12.75	19.66	7,269.8	369.8	8,352.3	424.9	0.87	28.9
Medio	1.55	12.83	19.87	7,492.5	377.0	9,207.5	463.3	0.81	23.7
Alto	1.52	12.90	19.65	7,829.6	398.4	9,322.2	474.3	0.84	25

Tabla 5.3. Propiedades mecánicas del material de prueba.

5.3.1.3 Ensayo de dureza

Los resultados de las pruebas de dureza superficial realizados en lámina decapada, así como microdureza transversal para los diferentes aceros de prueba se muestran en la Tabla 5.4 en su valor promedio.

Sb	Dureza HRB	Desviación Estándar	Dureza Vickers	Desviación Estándar
Bajo	75.7	0.6735	138.74	6.9281
Medio	78.5	0.2082	133.82	3.6284
Alto	77.9	0.4470	102.58	7.0131

Tabla 5.4. Resultados de dureza superficial y microdureza transversal.

5.3.1.4 Análisis óptico

El análisis realizado al metal base por medio del microscopio óptico a las muestras metalográficas del acero de prueba resulta en las micrografías de estos aceros, presentadas a 400 aumentos en las Figuras 5.3 a 5.5, mostrando además el valor respectivo de las mediciones de tamaño de grano obtenido por medio del analizador de imágenes de acuerdo a su estándar ASTM, así como su equivalente en μm .

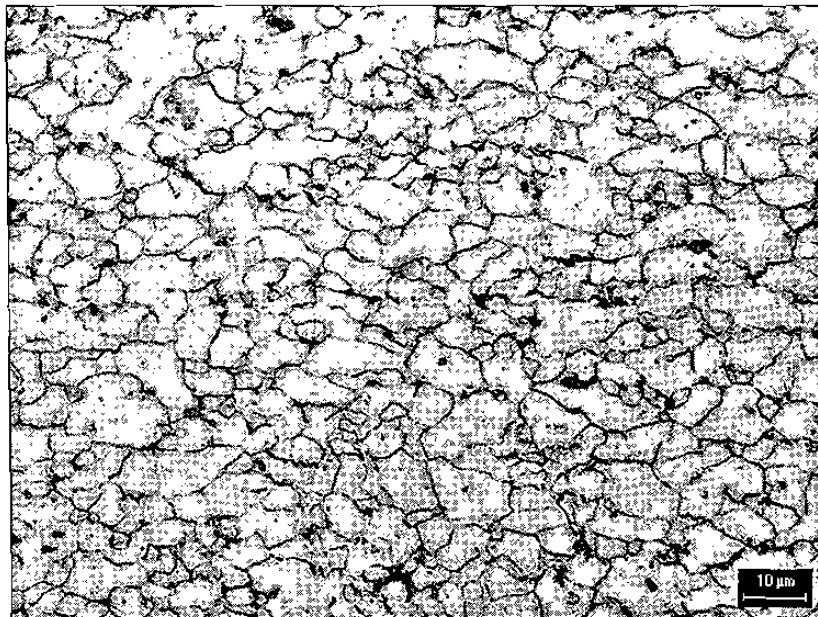


Figura 5.3. Micrografía del acero de prueba para la condición de bajo Sb en la paila, tamaño de grano ASTM 12 ($5.6 \mu\text{m}$).

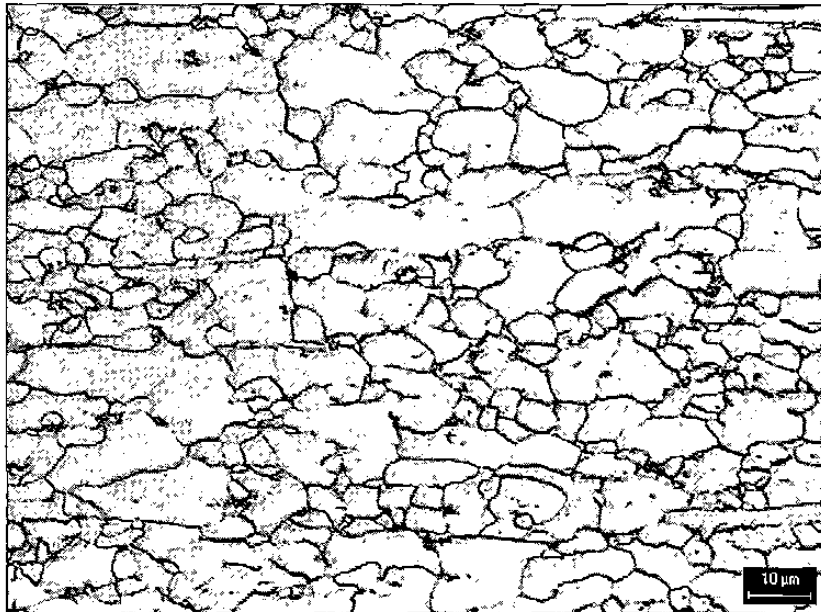


Figura 5.4. Micrografía del acero de prueba para la condición de medio Sb en la paila, tamaño de grano ASTM 11.4 ($7\ \mu\text{m}$).

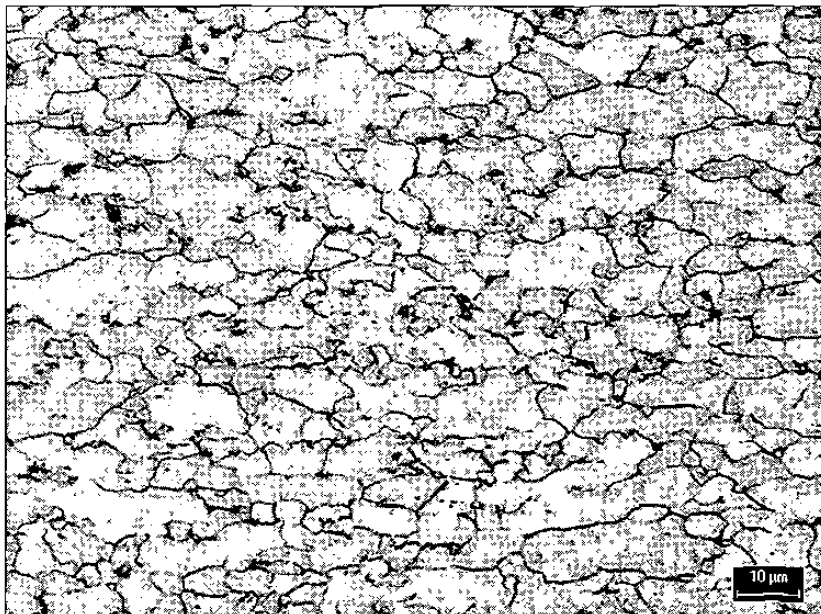


Figura 5.5. Micrografía del acero de prueba para la condición de alto Sb en la paila, tamaño de grano ASTM 11.8 ($6\ \mu\text{m}$).

5.3.2 Análisis del recubrimiento

5.3.2.1 Medición de rugosidad

Los valores de rugosidad superficial del recubrimiento en las diferentes direcciones y lugares de las láminas de prueba se presentan en la Tabla 5.5.

Bajo Sb						
Dirección / lado	Ra μm		Ry μm		R _{Pc} (10%) 1/cm	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Long. lado 1	0.6998	0.0233	4.2685	0.0485	77.1	25.9
Tran. lado 1	0.7836	0.0126	4.5834	0.2281	119.9	12.4
Long. lado 2	0.6896	0.0198	4.1110	0.4293	139.3	3.1
Tran. lado 2	0.8687	0.1293	5.1232	0.2981	95.4	2.4

Medio Sb						
Dirección / lado	Ra μm		Ry μm		R _{Pc} (10%) 1/cm	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Long. lado 1	0.6401	0.0790	4.0983	0.7921	124.1	10.9
Tran. lado 1	0.7607	0.1742	4.5504	0.7849	116.0	25.2
Long. lado 2	0.6541	0.0665	3.9738	0.2676	92.9	8.3
Tran. lado 2	0.7849	0.0359	4.3091	0.5370	79.8	2.1

Alto Sb						
Dirección / lado	Ra μm		Ry μm		R _{Pc} (10%) 1/cm	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Long. lado 1	0.6977	0.0910	4.6042	0.5654	98.2	7.2
Tran. lado 1	0.7451	0.0957	5.1232	0.2886	84.2	14.8
Long. lado 2	0.7366	0.0584	4.8031	0.5227	60.1	8.2
Tran. lado 2	0.8501	0.1148	5.1816	0.5180	92.5	28.8

Tabla 5.5. Registro de valores de rugosidad superficial.

5.3.2.2 Análisis óptico

El análisis óptico del recubrimiento, efectuado por medio del microscopio óptico, así como por el microscopio electrónico de barrido en su función de electrones retrodispersados, muestra tanto el espesor como las fases presentes en el

recubrimiento, tales micrografías se presentan en las Figuras 5.6 a 5.8. Para el ataque del recubrimiento se utilizó nital al 1% o inclusive más diluido, ya que ataca rápidamente a la fase Γ , permitiendo que se deposite baquelita disuelta en la cavidad correspondiente a esta fase. El espesor de capa promedio de las muestras se obtuvo con ayuda del analizador de imágenes.

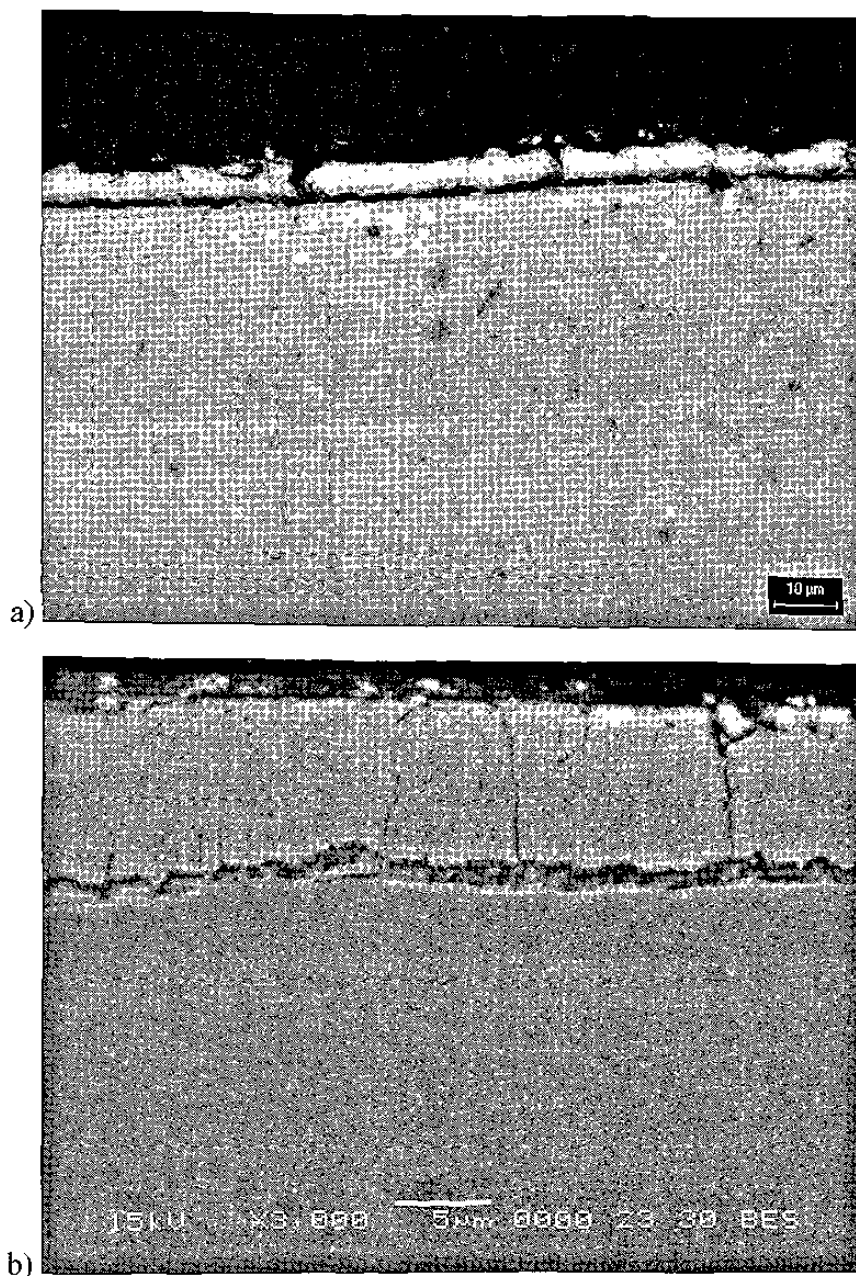


Figura 5.6. Microestructura del recubrimiento de bajo Sb por microscopio (a) óptico y (b) electrónico, espesor de capa promedio $6.65 \mu\text{m}$.

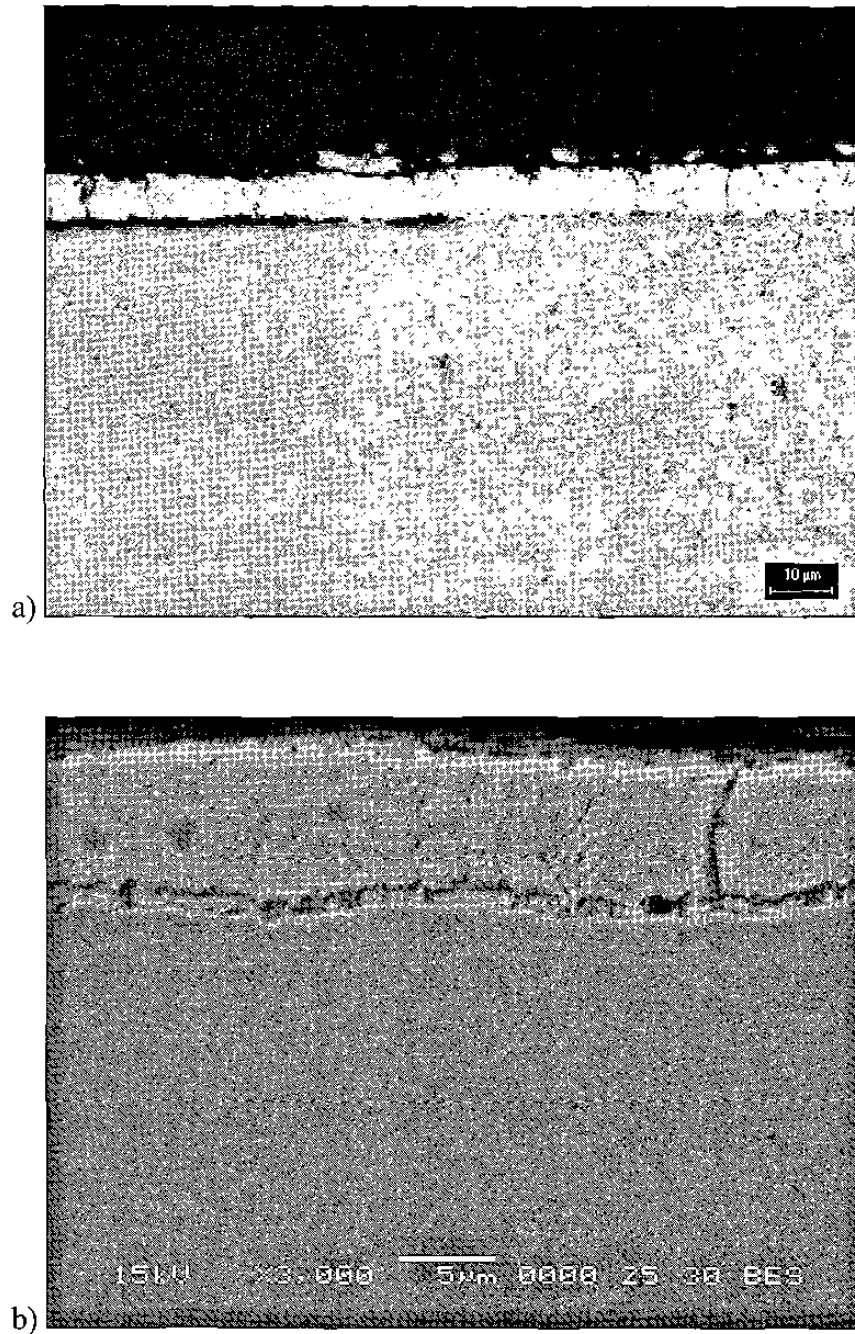


Figura 5.7. Microestructura del recubrimiento de medio Sb por microscopio (a) óptico y (b) electrónico, espesor de capa promedio $8.3 \mu\text{m}$.

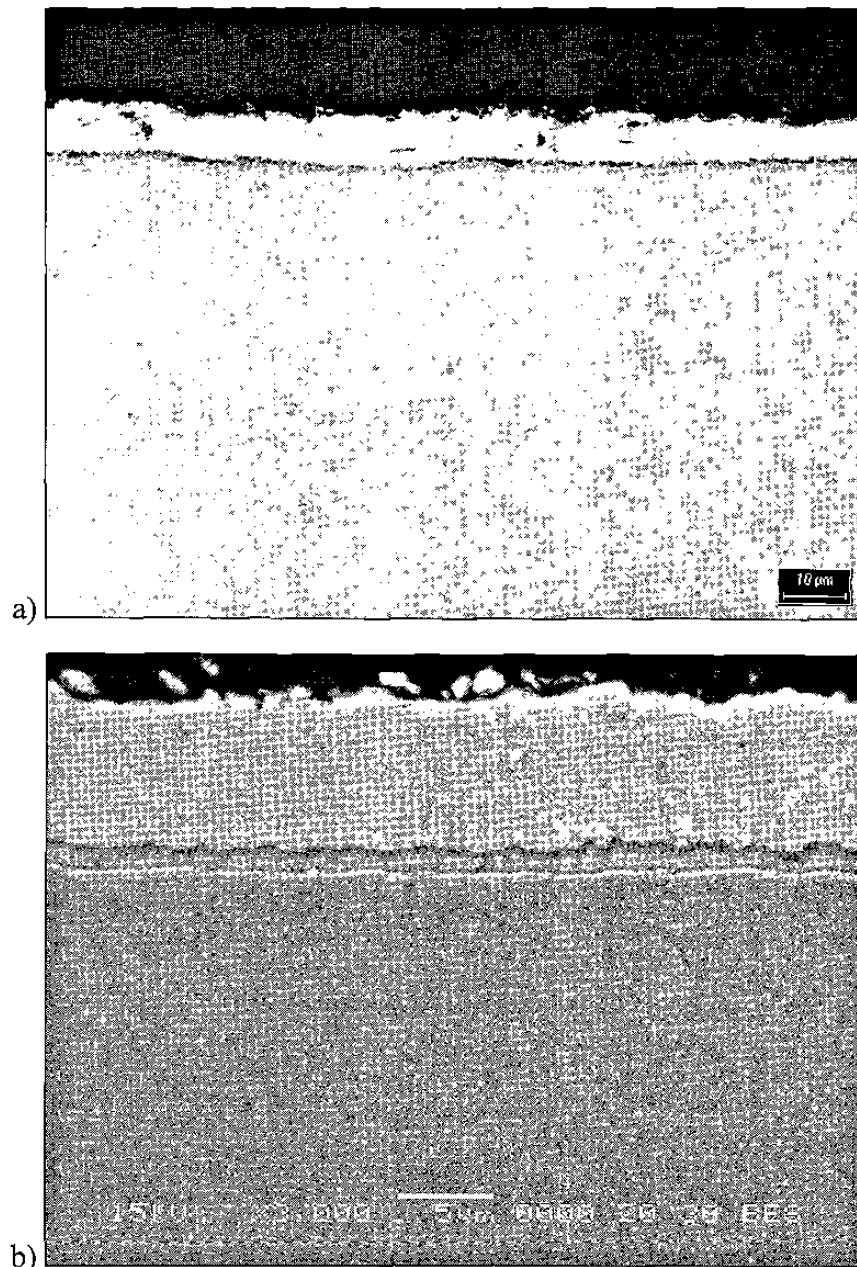


Figura 5.8. Microestructura del recubrimiento de medio Sb por microscopio (a) óptico y (b) electrónico, espesor de capa promedio $7.4 \mu\text{m}$.

5.3.2.3 Análisis químico

La Figura 5.9 muestra la composición química de las fases del recubrimiento para cada espécimen, mientras que en la Figura 5.10 se observa una línea de barrido de las intensidades de Fe y Zn presentes. La Tabla 5.6 muestra la composición química del recubrimiento por medio del espectrofotómetro por emisión por plasma.

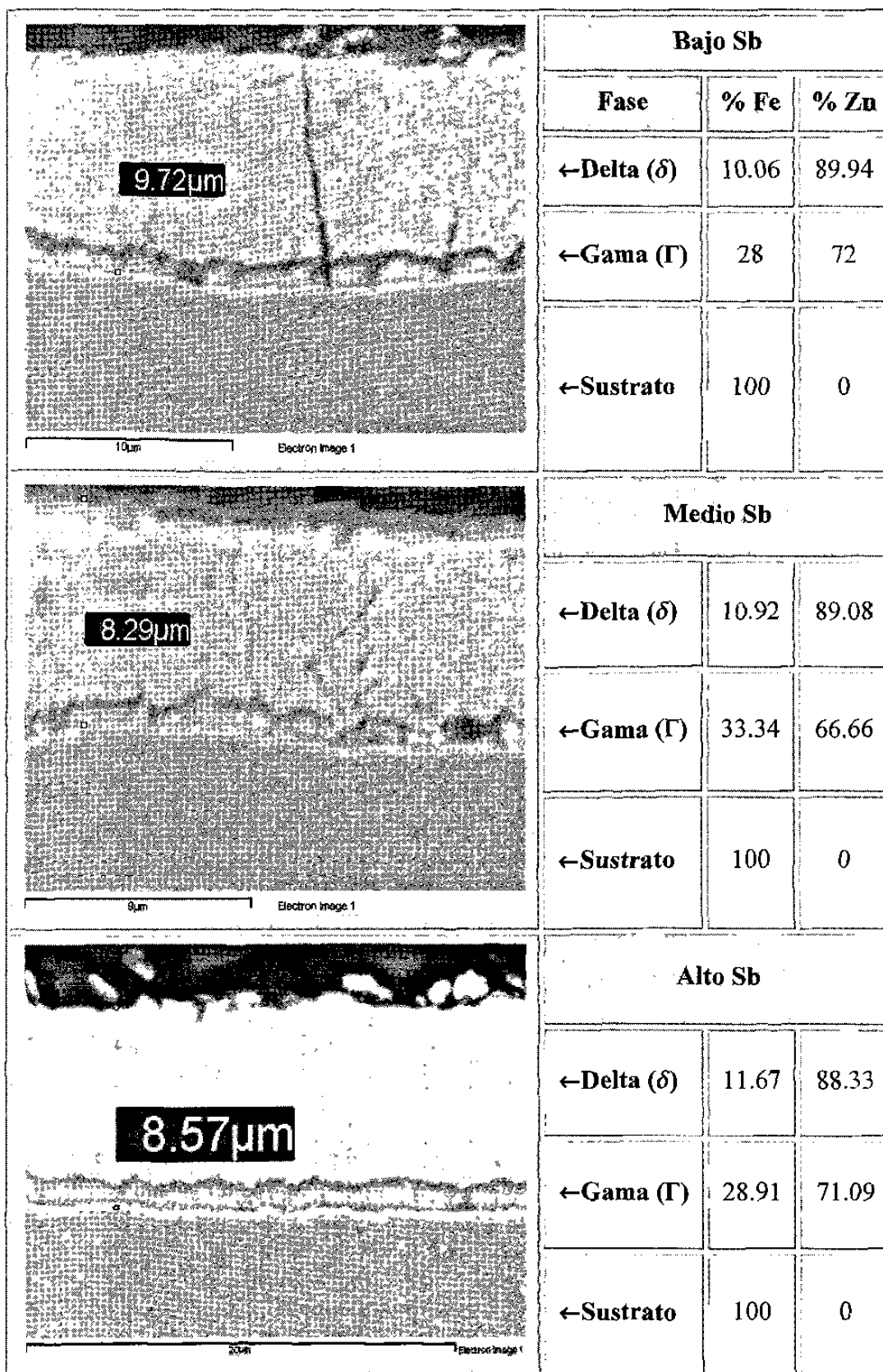


Figura 5.9. Composición química puntual de las fases del recubrimiento.

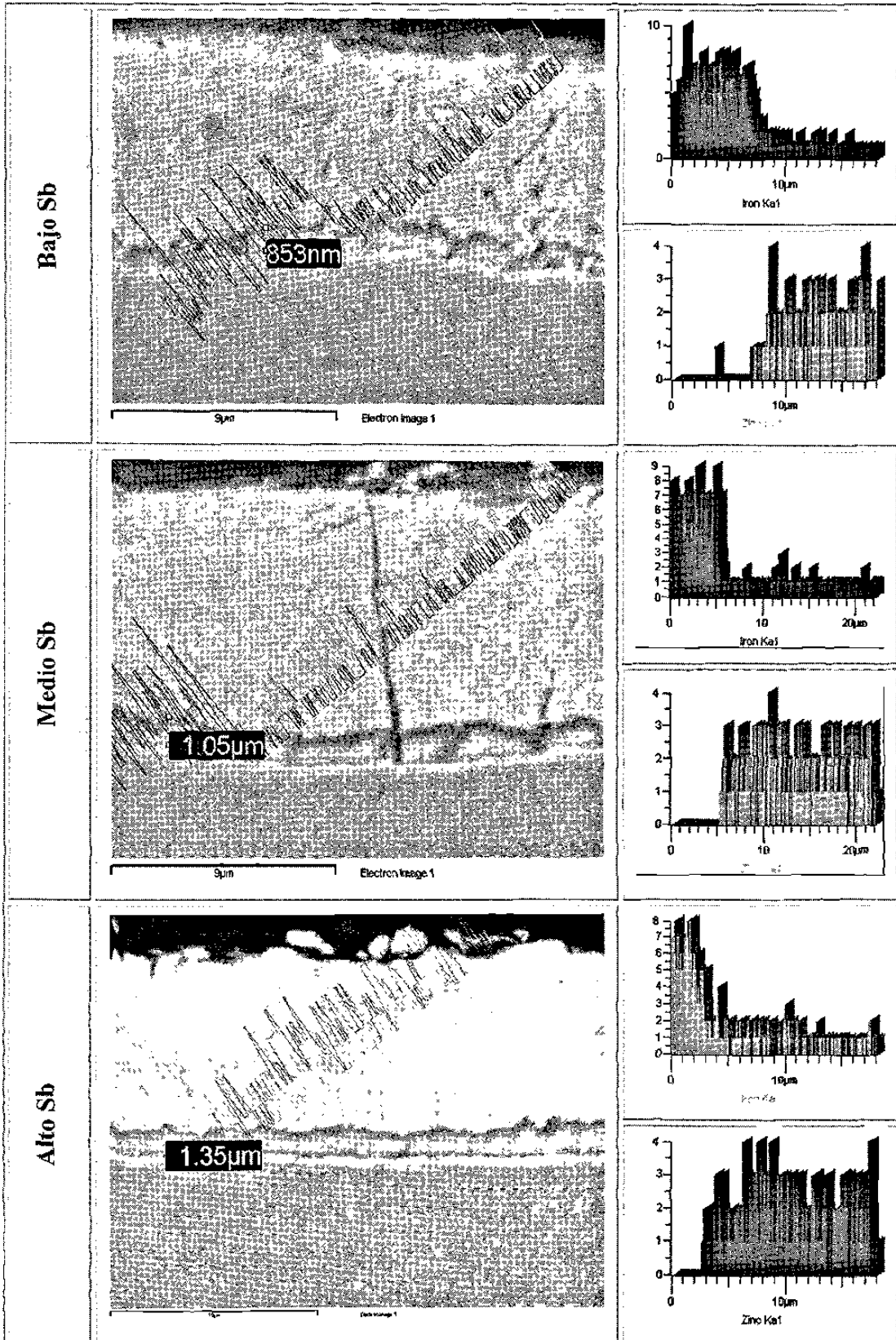


Figura 5.10. Línea de barrido de intensidades de Fe y Zn a través del recubrimiento.

Sb en paila	% Fe	% Al	% Sb	% Pb	% Zn
Bajo	16.44	0.3161	0.003	0.0083	83.2326
Medio	17.18	0.3409	0.0298	0.0076	82.4417
Alto	16.81	0.3238	0.0213	0.0088	82.8361

Tabla 5.6. Composición química del recubrimiento (% en peso).

5.3.2.4 Peso del recubrimiento

Las mediciones del peso del recubrimiento por unidad de área para cada lado de las láminas de prueba se presentan en la Tabla 5.7 tanto en su valor promedio como su desviación estándar al ser decapadas en HCl.

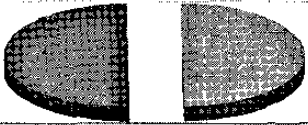
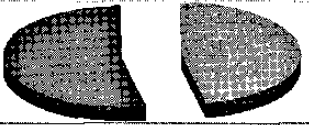

Pérdida en peso promedio y desviación estándar (g/m^2)					
Bajo Sb		Medio Sb		Alto Sb	
					
lado 1	lado 2	lado 1	lado 2	lado 1	lado 2
51.88	49.96	105.18	86.06	55.31	49.98
0.46	1.11	16.58	3.11	5.40	1.51

Tabla 5.7. Peso del recubrimiento termogalvanizado por lado.

5.3.2.5 Integridad del recubrimiento

La integridad del recubrimiento medida como la pérdida en peso después de ser sometido a la prueba de doblado y desdoblado a ángulos de 90 y 60° se presenta en la Tabla 5.8, en donde se muestra además la huella del recubrimiento desprendido en forma de polvo, capturado por medio de una cinta adhesiva en la línea de doblez.

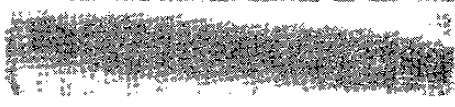

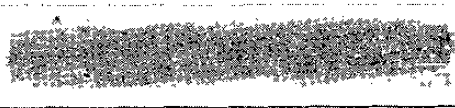
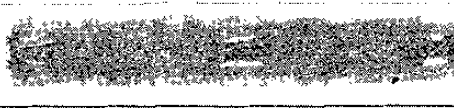


Integridad del recubrimiento		
Sb en paila	Pérdida de peso en dobléz (g)	
	90°	60°
Bajo		
	0.0123	0.0142
Medio		
	0.0153	0.0245
Alto		
	0.0059	0.0104

Tabla 5.8. Pérdida en peso del recubrimiento sometido a las pruebas de integridad.

5.4 Prueba de soldabilidad

Los puntos de soldadura de los paneles y cupones de prueba mostrados en las Figuras 5.11 y 5.12 a 30 y 5 ciclos de tiempo de sostenimiento realizados con las especificaciones de prueba descritas en el Capítulo IV fueron sometidos a las técnicas de evaluación correspondientes obteniendo los resultados que se presentan en las siguientes secciones.

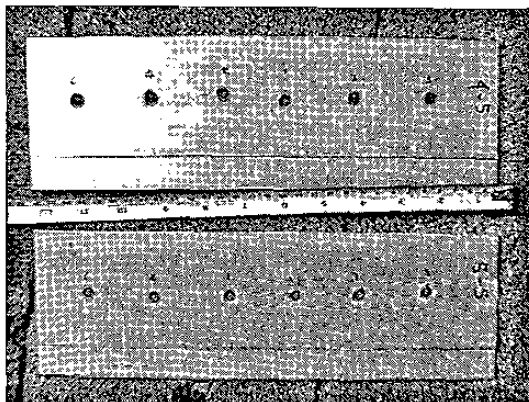


Figura 5.11. Paneles de prueba.

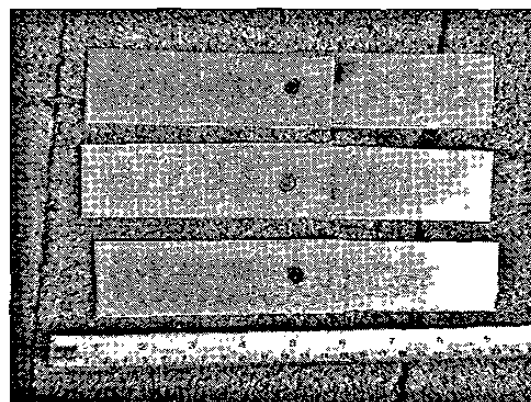


Figura 5.12. Cupones de prueba.

5.4.1 Inspección visual de los puntos de soldadura

La Figura 5.13 muestra la apariencia de puntos representativos de las pruebas de soldabilidad para tiempos de sostenimiento de 30 y 5 ciclos.

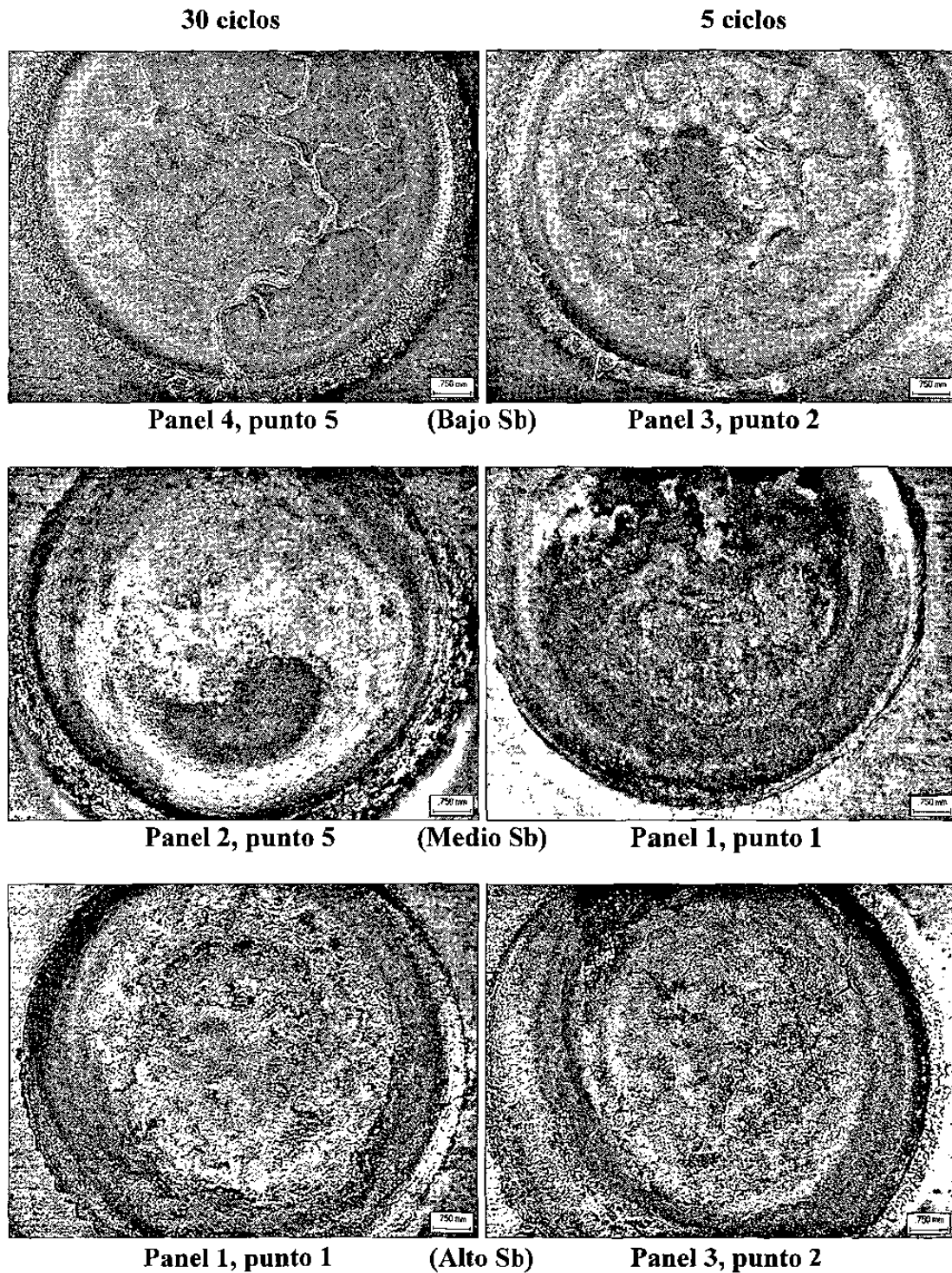


Figura 5.13. Aspecto superficial de los puntos de soldadura.

5.4.2 Análisis microestructural

La microestructura en sección transversal de los botones de soldadura de las muestras metalográficas para cada tiempo de sostenimiento se presentan en la Figura 5.14.

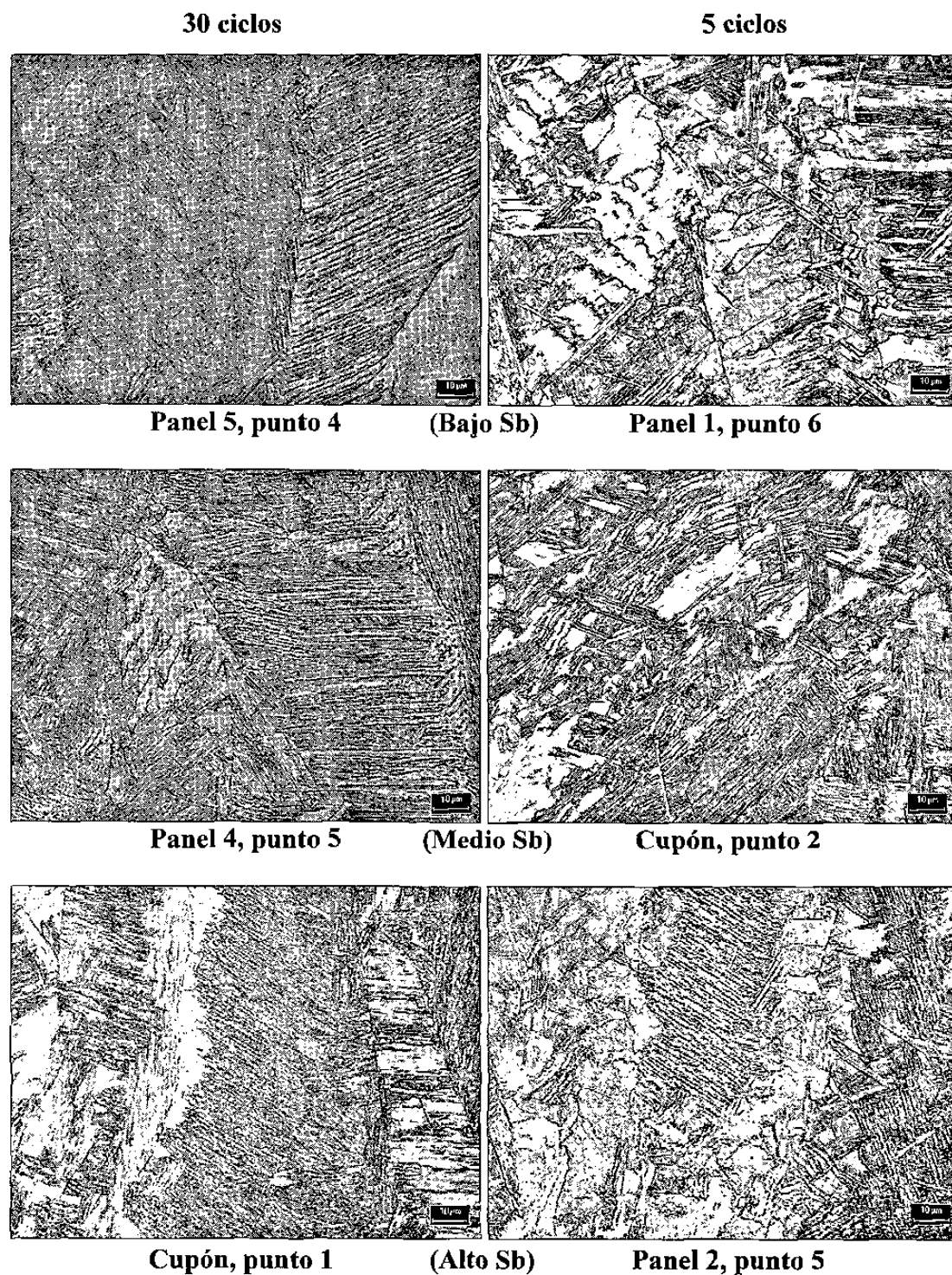


Figura 5.14. Micrografías del botón de soldadura tomadas a 400x.

Mientras que las micrografías de la Figura 5.14 se realizaron con un ataque de nital al 2%, en la Figura 5.15 se presentan con ataque de color de (a) Beraha, (b) metabisulfito de sodio, y (c) Beraha 10/3⁽⁵⁵⁾.

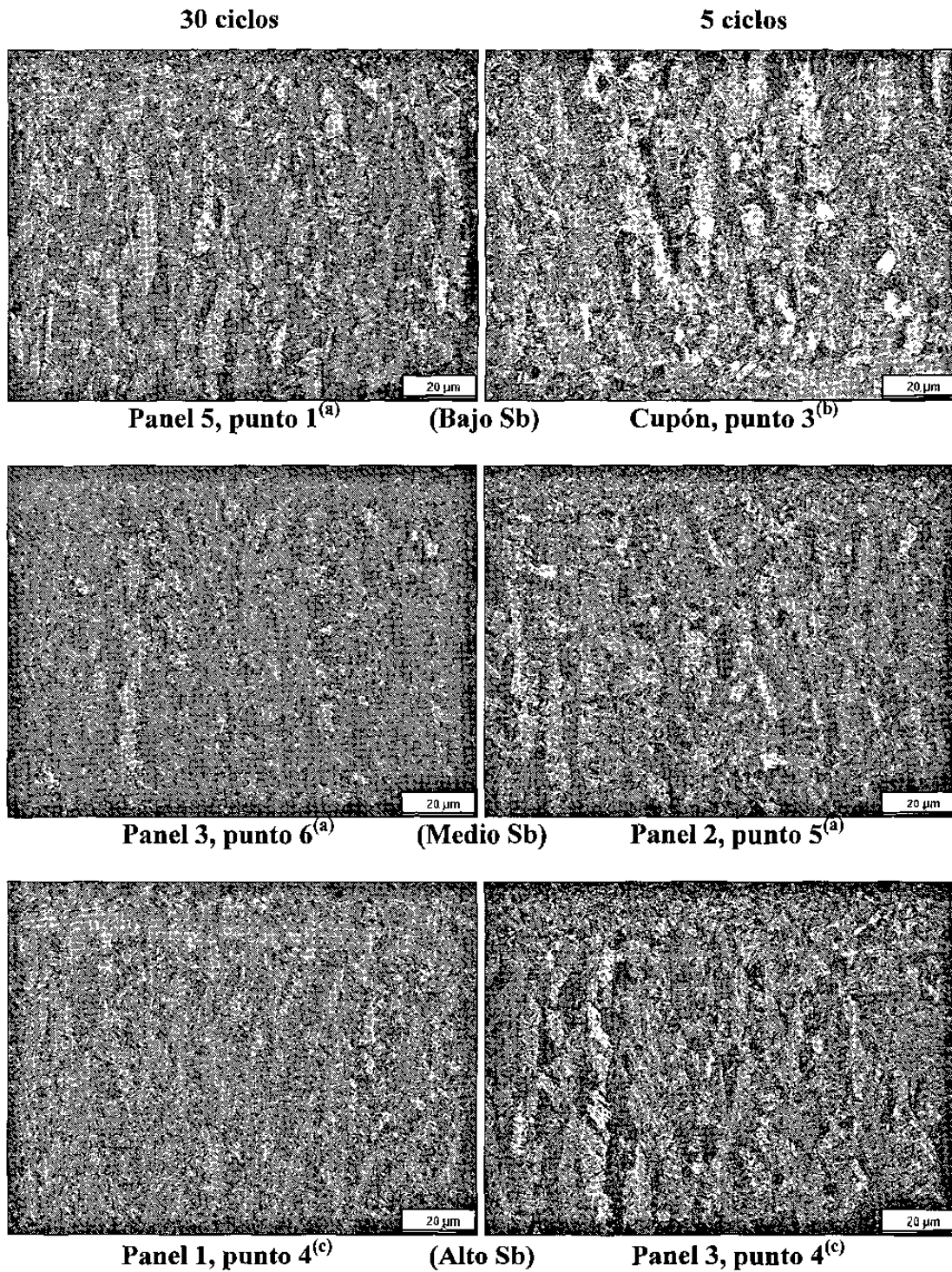


Figura 5.15. Micrografías del botón de soldadura tomadas a 500x.

5.4.3 Corriente de soldadura

El registro de la corriente suministrada por la máquina soldadora para los puntos de prueba, así como las condiciones en las que se realizaron con respecto al tiempo de sostenimiento, se presentan en las Tablas 5.9 a 5.14.

Corriente (kA), 30 Ciclos, Bajo Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	11.89	11.85	12.05	12.54	12.09	12.21	12.17
2	11.98	11.99	12.08	12.23	12.16	12.19	12.49
3	12.05	11.99	12.07	12.27	12.10	12.27	11.90
4	12.13	11.98	12.01	12.25	12.11	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 53% ■ Porcentaje de calor programado: 69.4% 	
5	12.04	12.06	12.01	12.24	12.17		
6	12.12	12.04	12.05	12.33	12.15		

Tabla 5.9. Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.12 kA.

Corriente (kA), 30 Ciclos, Medio Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	11.58	11.61	11.22	11.75	11.65	11.84	12.04
2	11.79	11.68	11.39	11.46	11.55	11.81	11.90
3	11.85	11.59	11.51	11.64	11.59	12.17	12.06
4	11.81	11.66	11.48	11.66	11.64	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 58% ■ Porcentaje de calor programado: 67.1% 	
5	11.85	11.76	11.46	11.64	11.63		
6	11.87	12.37	11.54	11.66	11.64		

Tabla 5.10. Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 11.7 kA.

Corriente (kA), 30 Ciclos, Alto Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	12.87	12.87	12.82	12.53	13.01	12.96	12.89
2	12.81	12.67	12.81	12.54	12.51	12.56	12.85
3	12.98	12.88	12.72	12.47	12.67	12.79	12.75
4	12.90	12.68	12.79	12.56	12.60	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 97% ■ Porcentaje de calor programado: 71.7% 	
5	13.04	12.95	12.85	12.51	12.64		
6	13.10	12.81	12.90	12.73	12.64		

Tabla 5.11. Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.77 kA.

Las tablas muestran además la corriente promedio y el acontecimiento del fenómeno de expulsión. Las Figuras 5.16 y 5.17 presentan de manera grafica la evolución de dicha corriente con respecto al transcurso de la prueba para las diferentes condiciones de tiempo de sostenimiento en cada acero.

Corriente (kA), 5 Ciclos, Bajo Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	12.27	12.06	11.90	12.51	12.24
2	12.15	12.11	11.83	12.37	12.08
3	12.14	12.12	11.94	12.16	12.22
4	12.07	12.08	11.92	■ Expulsión: 92% ■ Porcentaje de calor programado: 69.4%	
5	12.22	12.03	11.96		
6	12.15	12.05	11.95		

Tabla 5.12. Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.11 kA.

Corriente (kA), 5 Ciclos, Medio Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	11.72	11.83	11.83	12.20	11.93
2	11.63	11.80	11.88	11.72	11.67
3	11.94	11.88	11.94	12.30	12.09
4	11.85	11.96	11.92	■ Expulsión: 25% ■ Porcentaje de calor programado: 67.1%	
5	11.92	11.98	11.80		
6	11.89	11.84	11.89		

Tabla 5.13. Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 11.89 kA.

Corriente (kA), 5 Ciclos, Alto Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	12.65	12.87	12.67	12.88	12.59
2	12.65	12.61	12.62	13.01	12.84
3	12.74	12.66	12.79	12.72	12.81
4	12.73	12.57	12.59	■ Expulsión: 100% ■ Porcentaje de calor programado: 71.7%	
5	12.72	12.73	12.84		
6	12.76	12.6	12.75		

Tabla 5.14. Registro de corrientes de prueba, corriente promedio 12.73 kA.

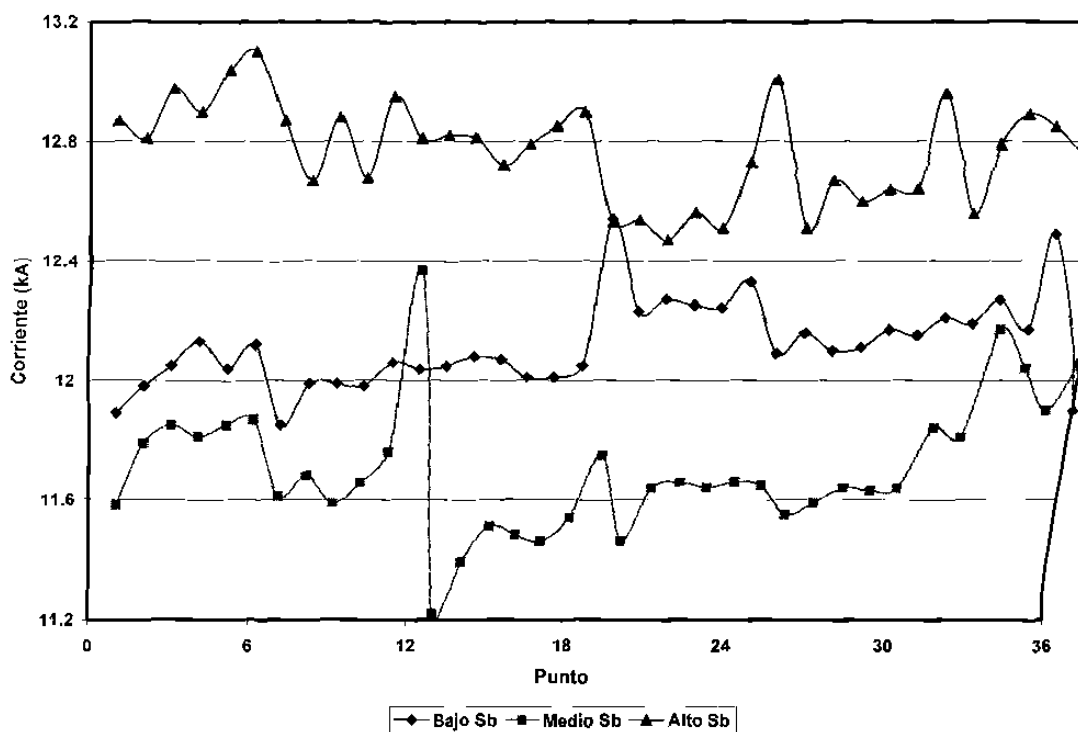


Figura 5.16. Evolución de la corriente para los puntos de soldadura realizados con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento.

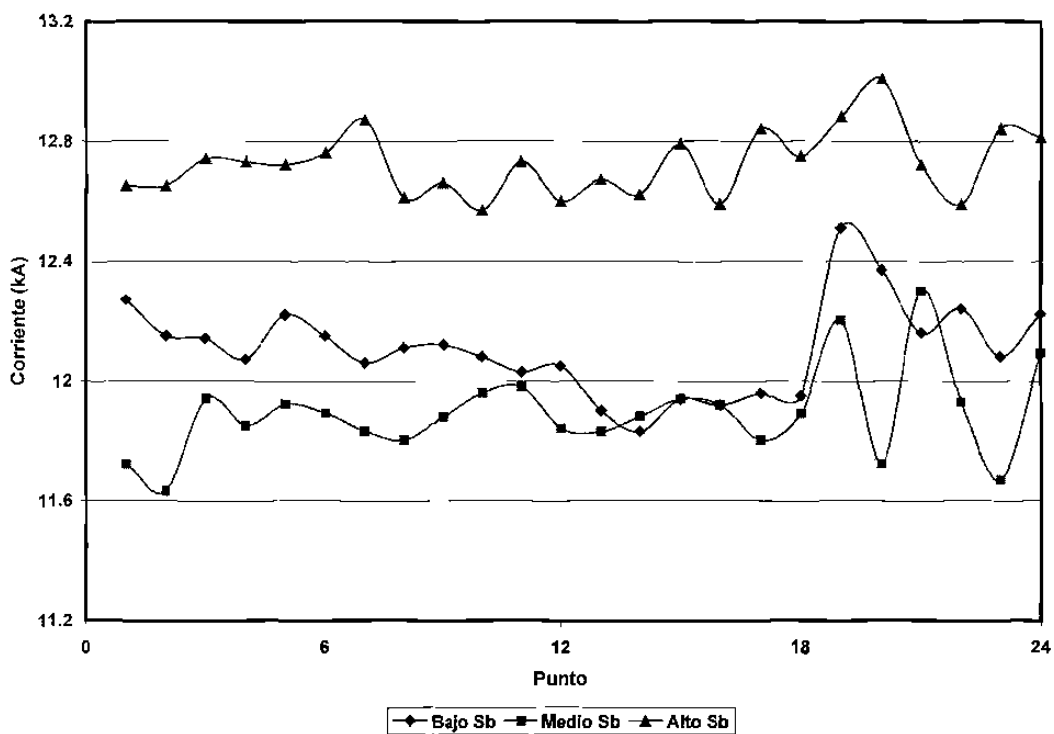


Figura 5.17. Evolución de la corriente para los puntos de soldadura realizados con 5 ciclos de tiempo de sostenimiento.

5.4.4 Diámetro del botón de soldadura

El registro del diámetro del botón de soldadura para las pruebas realizadas se presenta en las Tablas 5.15 a 5.20, tanto para los paneles como para los cupones de prueba a los tiempos de sostenimiento especificados.

Ø Botón (mm), 30 Ciclos, Bajo Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	8.12	8.31	8.98	8.64	8.38	8.44	8.95
2	8.22	8.84	8.31	8.83	8.57	8.50	8.53
3	8.12	8.15	8.38	8.62	8.86	8.39	8.36
4	7.90	8.41	8.62	8.55	8.36	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 53% ■ Analizador de imágenes ■ Vernier 	
5	8.24	8.65	8.64	8.79	8.33		
6	8.27	8.17	8.93	8.83	8.32		

Tabla 5.15. Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.49 mm.

Ø Botón (mm), 30 Ciclos, Medio Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	7.58	7.50	7.24	7.55	8.26	7.81	8.54
2	7.80	7.52	7.47	7.73	8.77	7.63	8.73
3	7.94	7.56	7.69	7.30	8.68	7.37	8.63
4	7.97	7.47	7.43	7.42	8.59	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 58% ■ Analizador de imágenes ■ Vernier 	
5	7.70	7.78	7.70	7.91	8.77		
6	7.17	7.44	7.56	7.74	8.66		

Tabla 5.16. Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 7.85 mm.

Ø Botón (mm), 30 Ciclos, Alto Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	8.46	9.26	7.73	8.31	8.38	8.48	8.06
2	9.14	9.35	8.48	8.78	8.54	8.19	8.18
3	8.76	8.33	8.49	8.46	9.21	8.53	8.05
4	8.54	8.78	8.46	8.39	8.09	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 97% ■ Analizador de imágenes ■ Vernier 	
5	8.90	8.38	7.93	8.75	9.38		
6	8.58	8.55	8.40	7.95	9.43		

Tabla 5.17. Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.55 mm.

En estas tablas se detalla también el diámetro promedio y se indica además el medio con que se realizó la medición, mientras que las Figuras 5.18 y 5.19 muestran el diámetro de cada uno de los puntos con respecto al transcurso de la prueba de soldadura.

Ø Botón (mm), 5 Ciclos, Bajo Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	8.32	8.67	8.01	8.08	8.42
2	8.43	8.44	8.40	7.99	8.99
3	8.41	8.45	8.41	7.81	8.69
4	8.15	8.33	8.45	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 92% ■ Analizador de imágenes ■ Vernier 	
5	8.52	8.43	8.48		
6	8.15	8.41	8.06		

Tabla 5.18. Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.35 mm.

Ø Botón (mm), 5 Ciclos, Medio Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	7.60	8.22	8.11	7.62	8.20
2	8.37	7.56	7.29	7.49	8.51
3	7.86	7.84	7.83	7.75	8.62
4	7.83	7.81	7.25	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 25% ■ Analizador de imágenes ■ Vernier 	
5	8.12	7.92	7.48		
6	7.90	7.76	7.14		

Tabla 5.19. Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 7.84 mm.

Ø Botón (mm), 5 Ciclos, Alto Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	7.96	8.20	8.14	8.48	7.69
2	8.47	8.40	7.93	8.30	7.88
3	8.08	8.55	8.12	8.25	8.21
4	7.89	8.30	8.19	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 100% ■ Analizador de imágenes ■ Vernier 	
5	8.26	8.01	7.92		
6	9.02	8.93	8.79		

Tabla 5.20. Registro del diámetro del botón, diámetro promedio 8.25 mm.

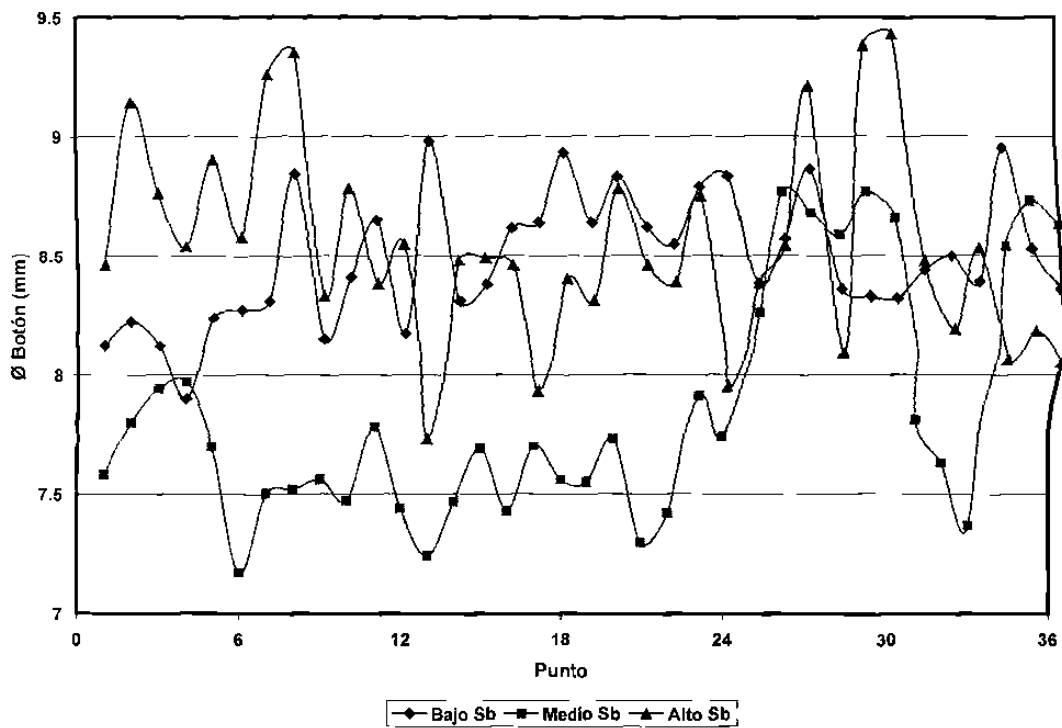


Figura 5.18. Evolución del diámetro del botón de soldadura para los puntos realizados con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento.

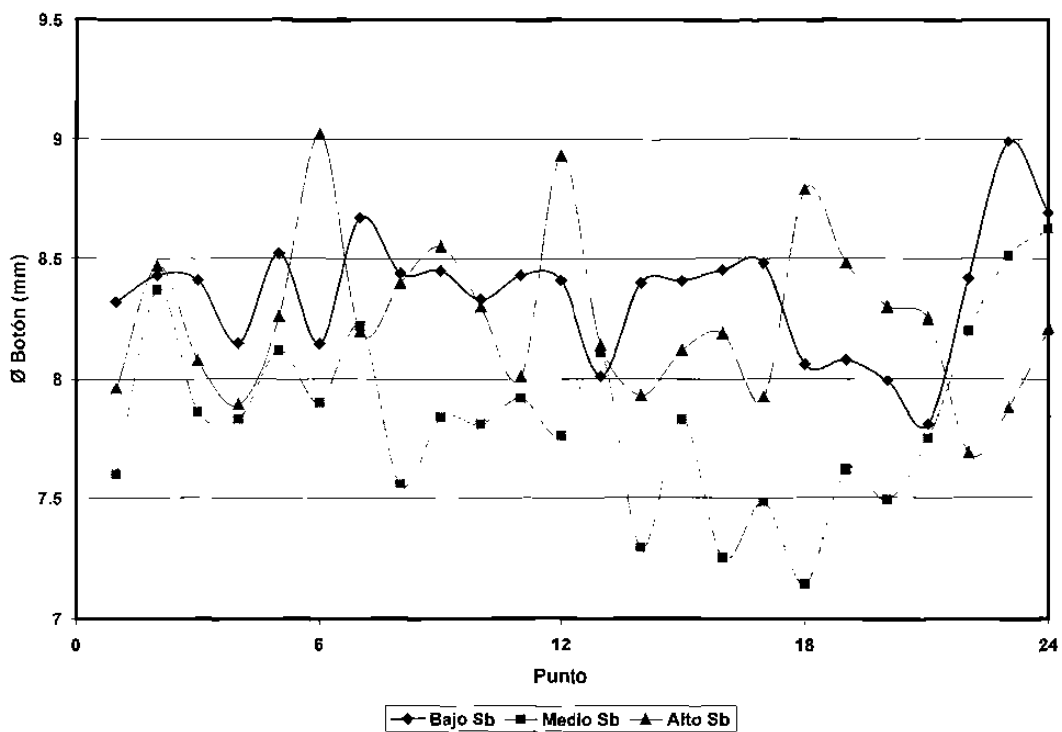


Figura 5.19. Evolución del diámetro de soldadura para los puntos realizados con 5 ciclos de tiempo de sostenimiento.

5.4.5 Resistencia a la tensión

La carga máxima de corte a tensión soportada por los puntos de soldadura en las láminas de prueba se presenta en las Tablas 5.21 a 5.26 para las condiciones especificadas en las mismas.

Resistencia a la tensión (kg), 30 Ciclos, Bajo Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	1,862	1,855	1,810	1,877	n/a	n/a	1,929
2	1,893	1,844	1,825	1,819	1,889	n/a	1,890
3	1,894	1,796	1,839	1,869	1,897	n/a	1,877
4	1,879	1,840	1,809	1,837	n/a	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 53% ■ Metalografía ■ Ensayo de tensión 	
5	1,881	1,842	1,801	1,867	n/a		
6	1,776	1,861	1,833	1,885	1,912		

Tabla 5.21. Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,856 kg.

Resistencia a la tensión (kg), 30 Ciclos, Medio Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	1,812	1,824	1,871	1,874	1,890	n/a	1,745
2	1,830	1,891	n/a	1,915	1,959	n/a	1,795
3	1,857	1,794	1,814	1,689	1,833	n/a	1,853
4	1,744	1,843	1,815	1,785	1,873	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 58% ■ Metalografía ■ Ensayo de tensión 	
5	1,825	1,889	1,836	n/a	1,836		
6	1,709	1,875	n/a	1,920	1,800		

Tabla 5.22. Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,830 kg.

Resistencia a la tensión (kg), 30 Ciclos, Alto Sb							
Punto	# Panel					Cupón	
	1	2	3	4	5	Metalográfico	Tensión
1	1,953	1,862	n/a	1,861	1,882	n/a	1,936
2	1,953	1,946	n/a	1,908	1,856	n/a	1,901
3	1,962	1,909	1,857	1,866	1,877	n/a	1,935
4	n/a	1,905	1,904	1,880	1,851	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 97% ■ Metalografía ■ Ensayo de tensión 	
5	1,944	1,922	1,882	1,829	1,835		
6	1,948	1,899	1,847	1,864	1,788		

Tabla 5.23. Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,892 kg.

En estas tablas se presenta además el valor de carga promedio y se especifican aquellos puntos que debido a que se realizó un estudio metalográfico en ellos no fue posible la realización del ensayo de tensión correspondiente, mientras que en las Figuras 5.20 y 5.21 se presentan de forma grafica conforme a la prueba.

Resistencia a la tensión (kg), 5 Ciclos, Bajo Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	1,924	1,765	1,875	n/a	1,759
2	1,847	1,793	1,879	n/a	1,860
3	1,844	1,794	1,889	n/a	1,817
4	n/a	1,777	1,886	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 92% ■ Metalografía ■ Ensayo de tensión 	
5	1,823	1,833	1,807		
6	n/a	n/a	1,862		

Tabla 5.24. Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,835 kg.

Resistencia a la tensión (kg), 5 Ciclos, Medio Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	n/a	n/a	1,899	n/a	1,794
2	1,769	1,802	1,898	n/a	1,843
3	1,437	1,920	1,657	n/a	1,884
4	1,700	1,735	1,832	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 25% ■ Metalografía ■ Ensayo de tensión 	
5	1,750	n/a	1,761		
6	1,639	1,820	1,828		

Tabla 5.25. Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,787 kg.

Resistencia a la tensión (kg), 5 Ciclos, Alto Sb					
Punto	# Panel			Cupón	
	1	2	3	Metalográfico	Tensión
1	1,837	1,823	1,870	n/a	1,915
2	1,884	1,879	n/a	n/a	1,879
3	1,838	1,855	1,821	n/a	1,881
4	1,825	1,867	n/a	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expulsión: 100% ■ Metalografía ■ Ensayo de tensión 	
5	1,825	n/a	1,869		
6	1,865	1,891	1,897		

Tabla 5.26. Registro de resistencia a la tensión, carga promedio 1,862 kg.

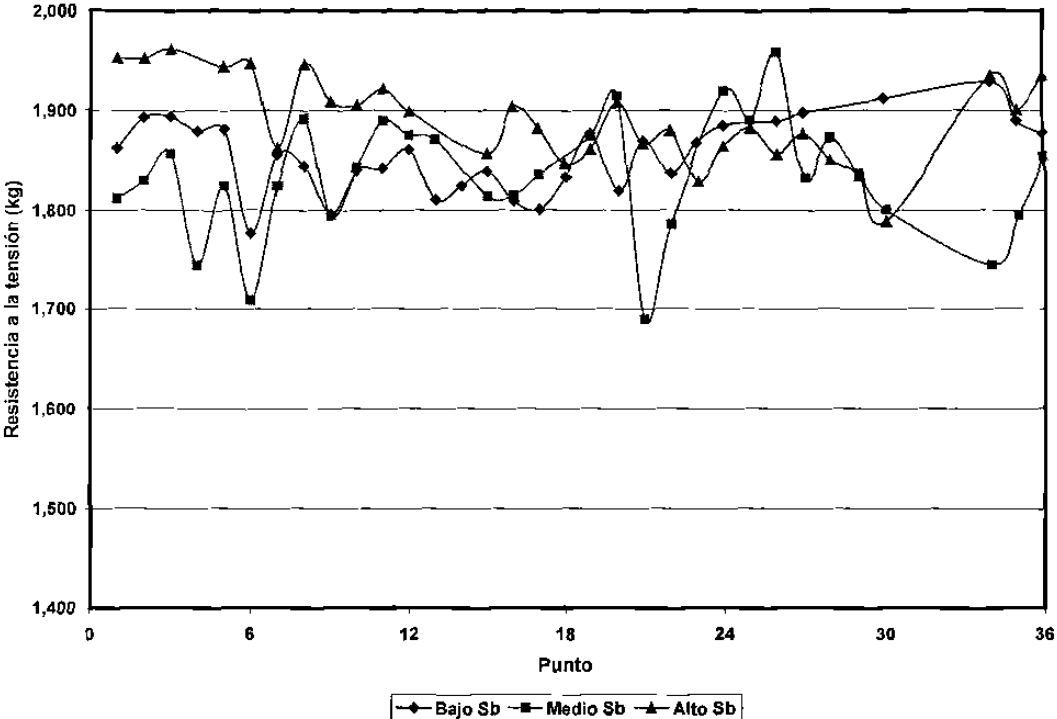


Figura 5.20. Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura realizados con 30 ciclos de tiempo de sostenimiento.

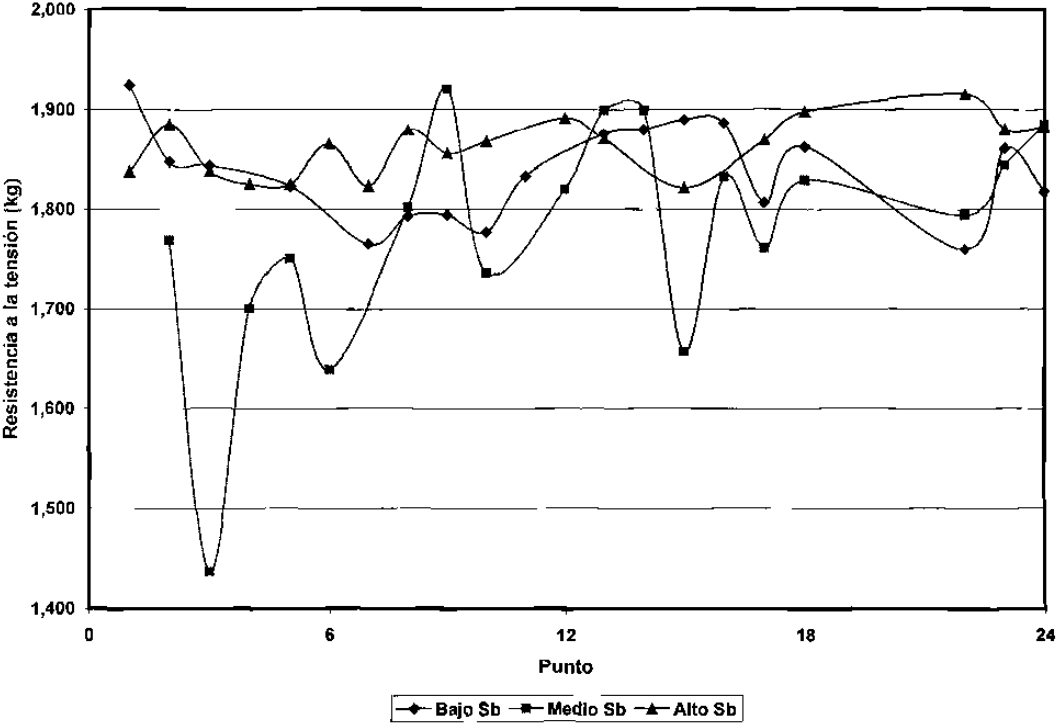


Figura 5.21. Resistencia a la tensión de los puntos de soldadura realizados con 5 ciclos de tiempo de sostenimiento.

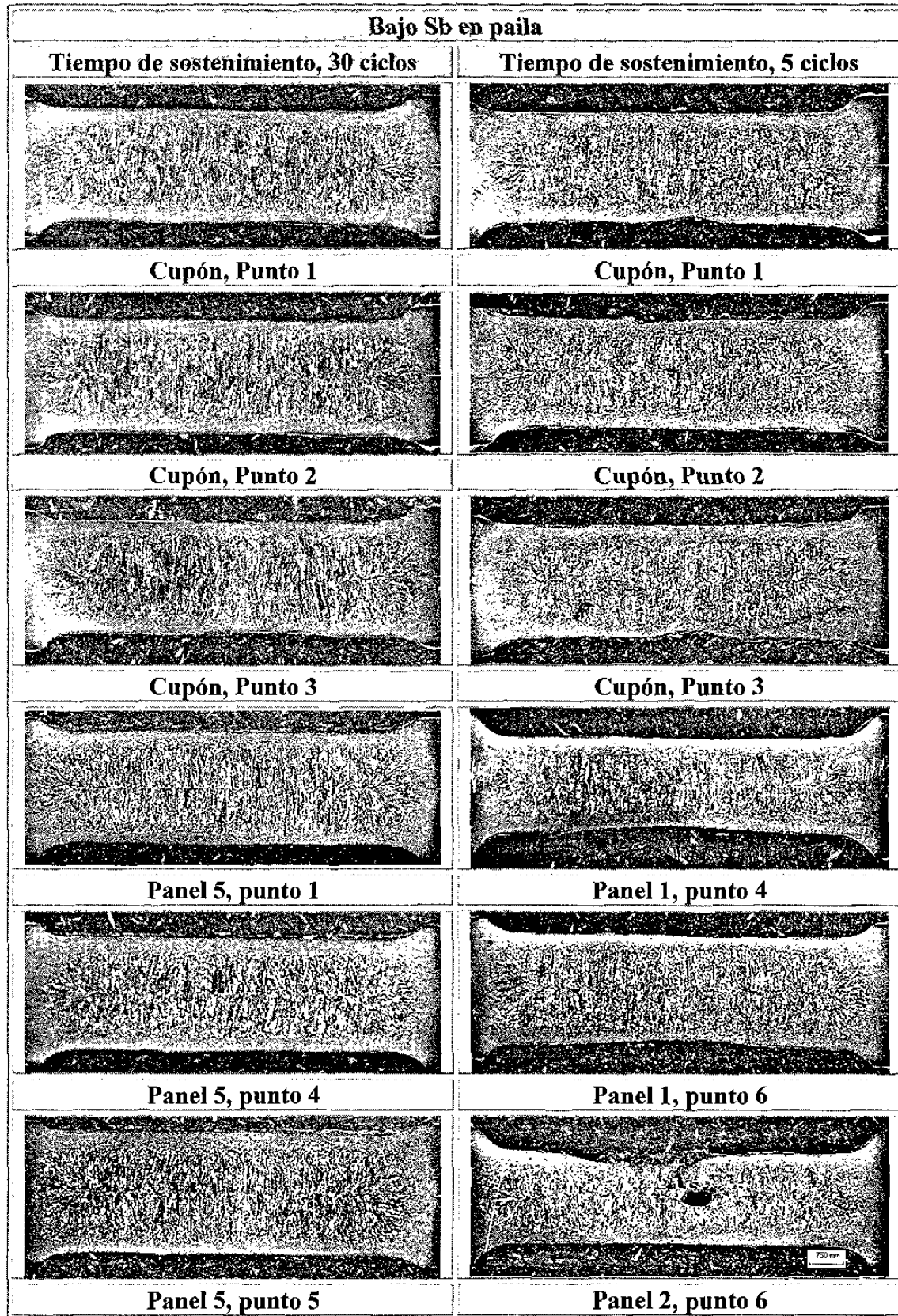


Figura 5.22. Sección transversal del botón de soldadura para la prueba de bajo Sb.

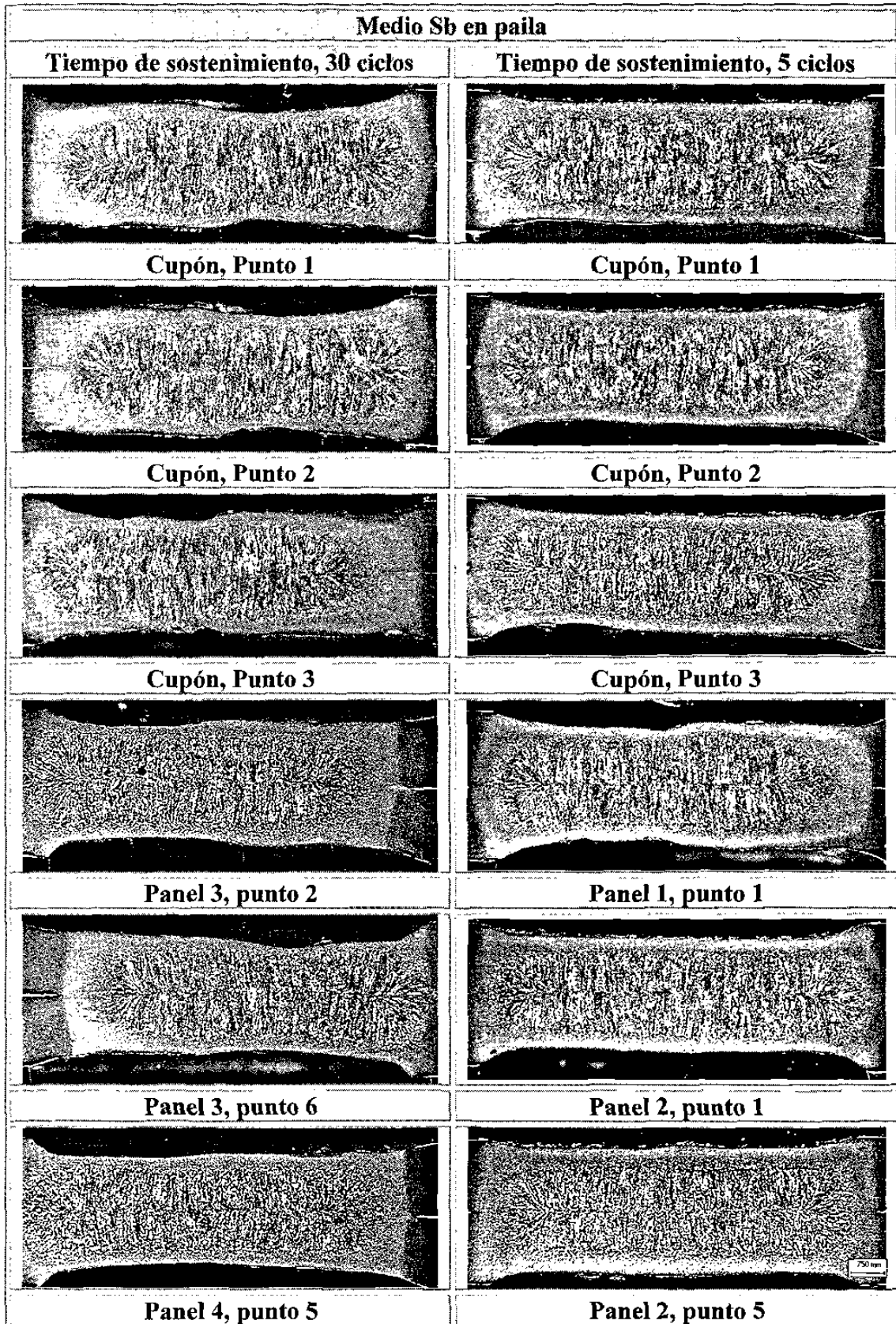


Figura 5.23. Sección transversal del botón de soldadura para la prueba de medio Sb.

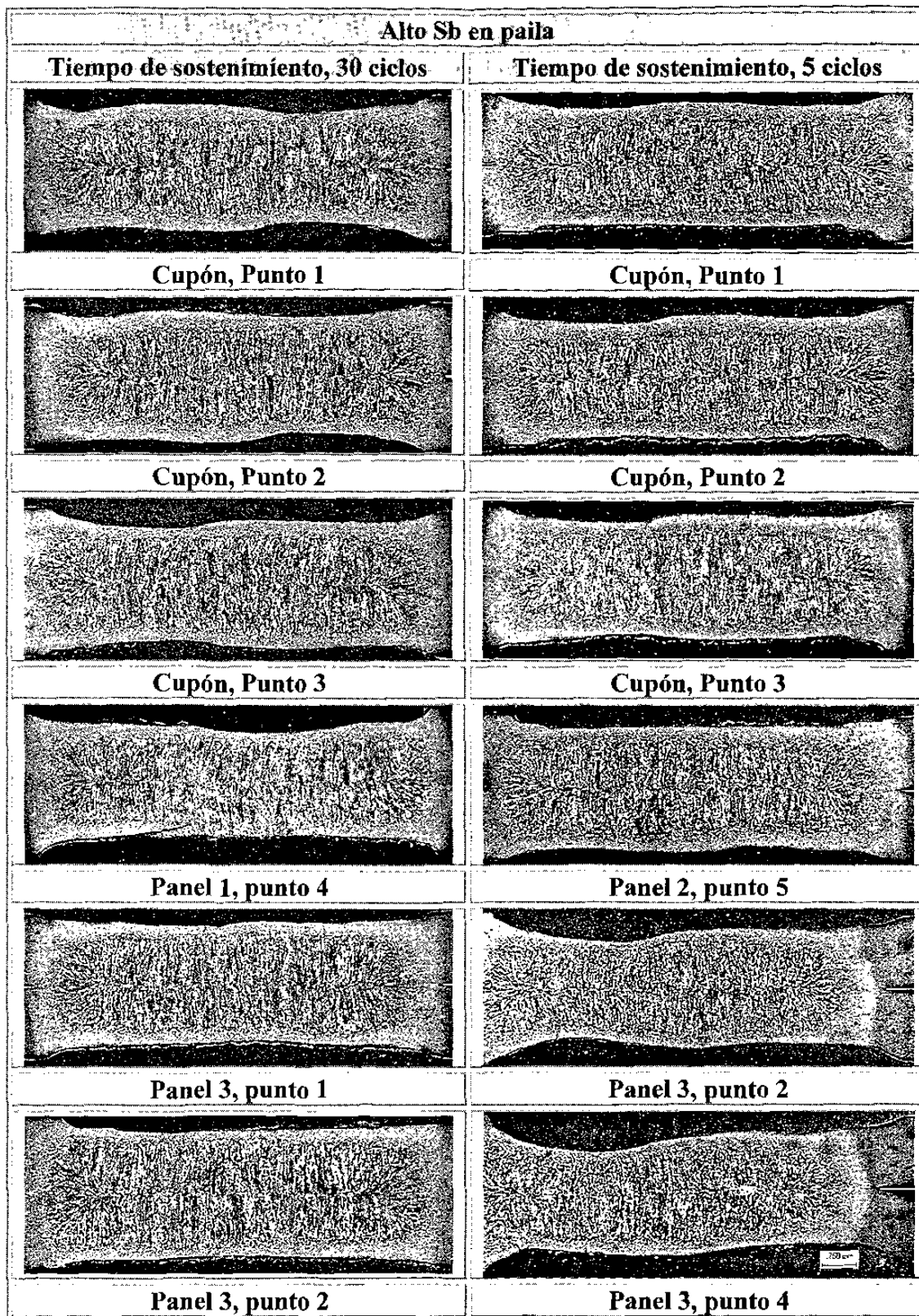


Figura 5.24. Sección transversal del botón de soldadura para la prueba de alto Sb.

5.4.6 Análisis dimensional del botón de soldadura

Las Figuras 5.22 a 5.24 muestran los botones de soldadura en su sección media transversal sometidos a examinación metalográfica tanto en paneles como cupones de prueba a 30 y 5 ciclos de tiempo de sostenimiento a partir de los cuales se realiza el análisis dimensional haciendo uso del analizador de imágenes para tal efecto. Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en las Tablas 5.27 a 5.29 y se presentan en forma grafica en las Figuras 5.25 a 5.36 como función de la corriente de soldadura suministrada por la máquina, los parámetros de indentación del electrodo y penetración de la soldadura se presentan como porcentaje con respecto al espesor de la lámina, en su valor promedio para ambos lados.

La selección de los botones de soldadura pertenecientes a los paneles de prueba para su examinación metalográfica se realizó en base a su consideración como puntos sospechosos de posible discrepancia con el estándar, como lo sugiere la prueba Chrysler⁽⁴⁴⁾.

Bajo Sb				
Punto	Corriente	Ø botón	% Indentación promedio	% Penetración Promedio
30c-1	12.21	8.44	23.29	61.20
30c-2	12.19	8.50	23.23	65.42
30c-3	12.27	8.39	22.97	61.22
30c-pan5-pto1	12.09	8.38	21.54	65.07
30c-pan5-pto4	12.11	8.36	21.55	62.23
30c-pan5-pto5	12.17	8.34	17.33	68.05
5c-1	12.51	8.08	28.15	60.53
5c-2	12.37	7.99	27.06	63.44
5c-3	12.16	7.81	26.07	62.34
5c-pan1-pto4	12.07	8.15	39.27	49.15
5c-pan1-pto6	12.15	8.15	27.83	60.72
5c-pan2-pto6	12.05	8.41	47.71	48.11

Tabla 5.27. Parámetros dimensionales del botón de soldadura para el acero de prueba con bajo contenido de Sb en la paila.

Medio Sb				
Punto	Corriente	Ø botón	% Indentación promedio	% Penetración Promedio
30c-4	11.84	7.81	26.45	63.50
30c-5	11.81	7.63	25.19	65.78
30c-6	12.17	7.37	27.60	64.64
30c-pan3-pto2	11.39	7.47	26.50	64.02
30c-pan3-pto6	11.54	7.56	31.39	58.69
30c-pan4-pto5	11.64	7.91	31.29	56.18
5c-4	12.20	7.62	15.92	67.39
5c-5	11.72	7.49	26.73	62.29
5c-6	12.30	7.75	23.85	67.83
5c-pan1-pto1	11.72	7.60	27.12	62.27
5c-pan2-pto1	11.83	8.22	25.19	62.19
5c-pan2-pto5	11.98	7.92	14.20	68.89

Tabla 5.28. Parámetros dimensionales del botón de soldadura para el acero de prueba con medio contenido de Sb en la paila.

Alto Sb				
Punto	Corriente	Ø botón	% Indentación promedio	% Penetración Promedio
30c-1	12.96	8.48	27.18	68.38
30c-2	12.56	8.19	22.57	68.82
30c-3	12.79	8.53	24.29	68.66
30c-pan1-pto4	12.90	8.54	33.50	57.89
30c-pan3-pto1	12.82	7.73	22.21	68.26
30c-pan3-pto2	12.81	8.48	18.85	71.69
5c-1	12.88	8.48	24.60	69.05
5c-2	13.01	8.30	26.53	68.46
5c-3	12.72	8.25	26.74	66.82
5c-pan2-pto5	12.73	8.01	23.00	70.04
5c-pan3-pto2	12.62	7.93	37.37	67.28
5c-pan3-pto4	12.59	8.19	37.27	61.25

Tabla 5.29. Parámetros dimensionales del botón de soldadura para el acero de prueba con alto contenido de Sb en la paila.

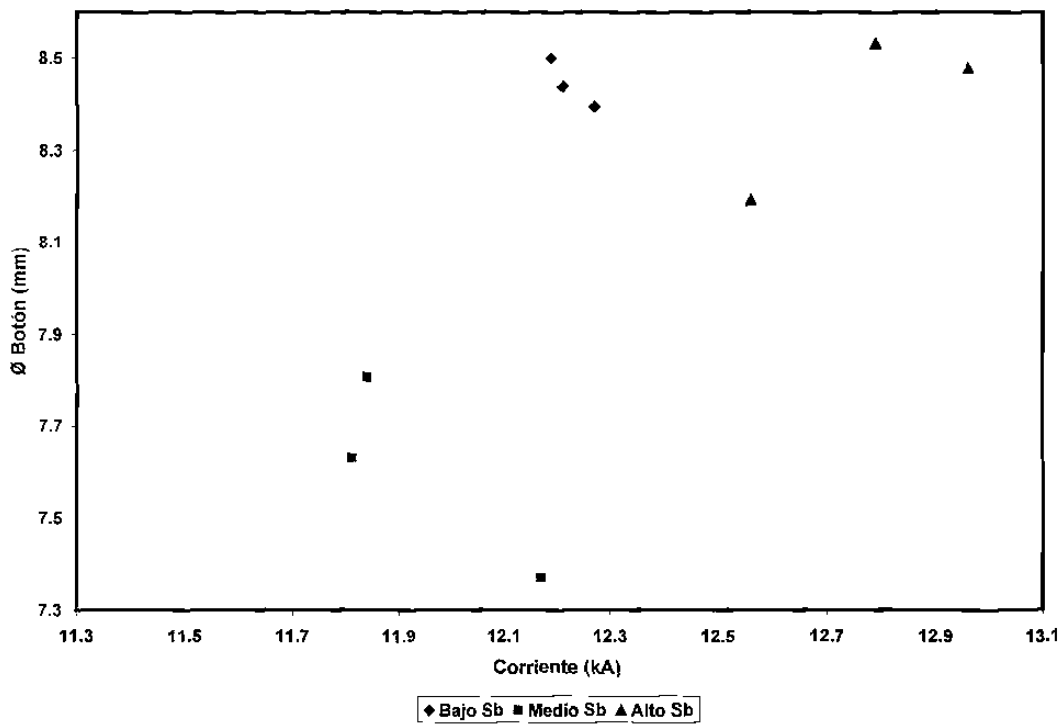


Figura 5.25. Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

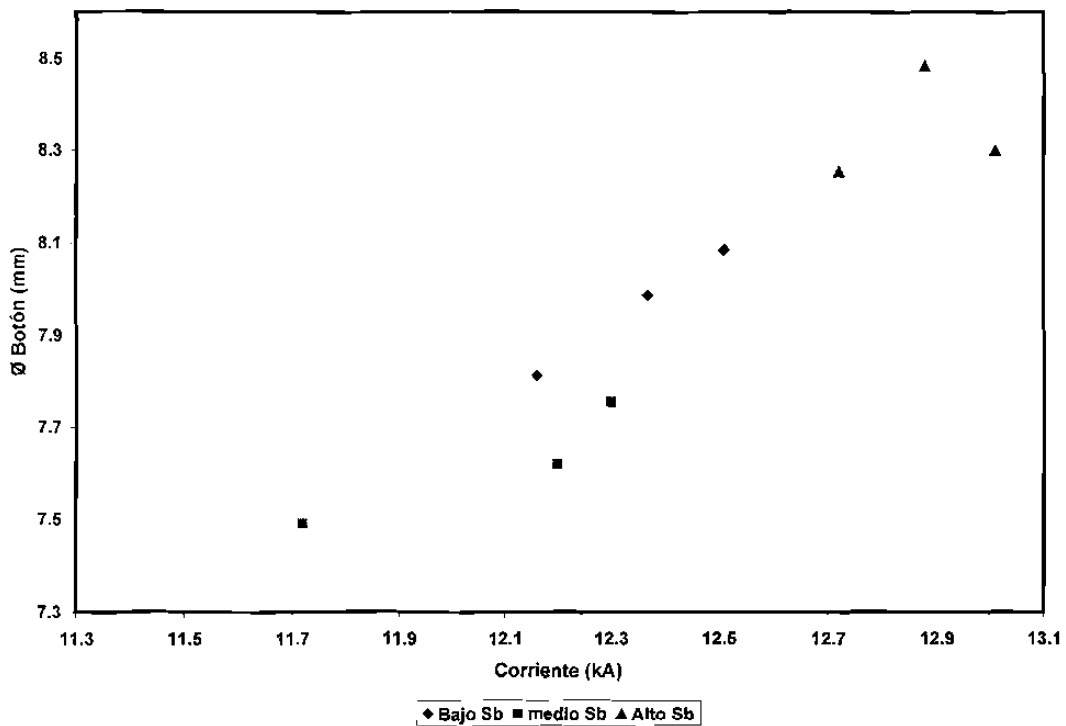


Figura 5.26. Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

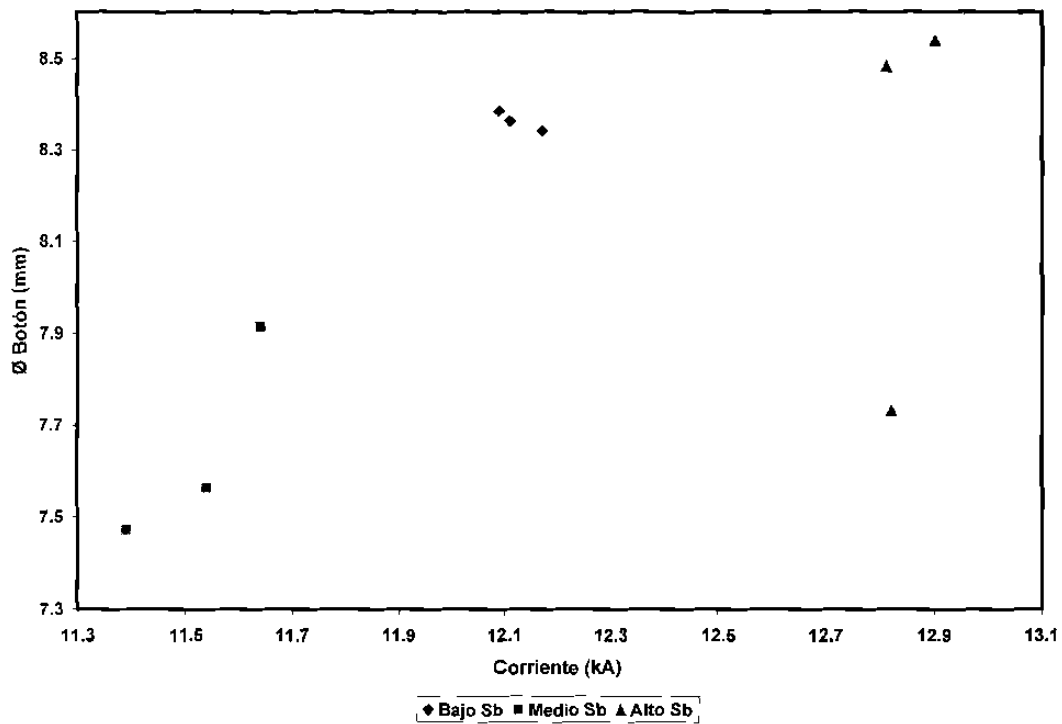


Figura 5.27. Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

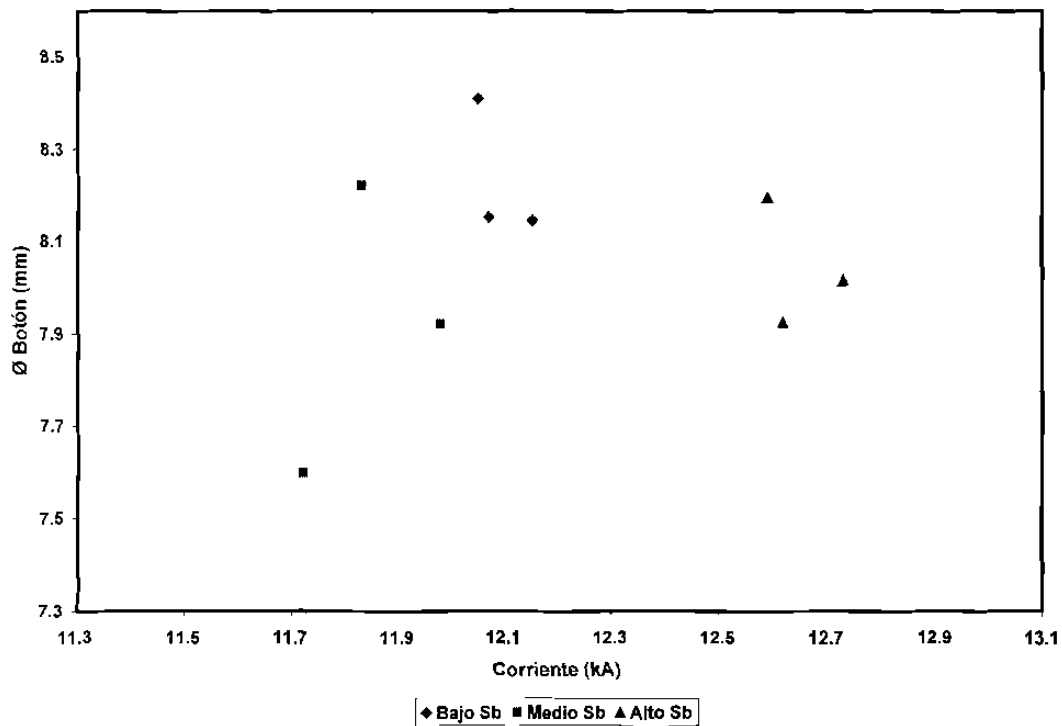


Figura 5.28. Diámetro del botón de soldadura en función de la corriente para los puntos realizados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

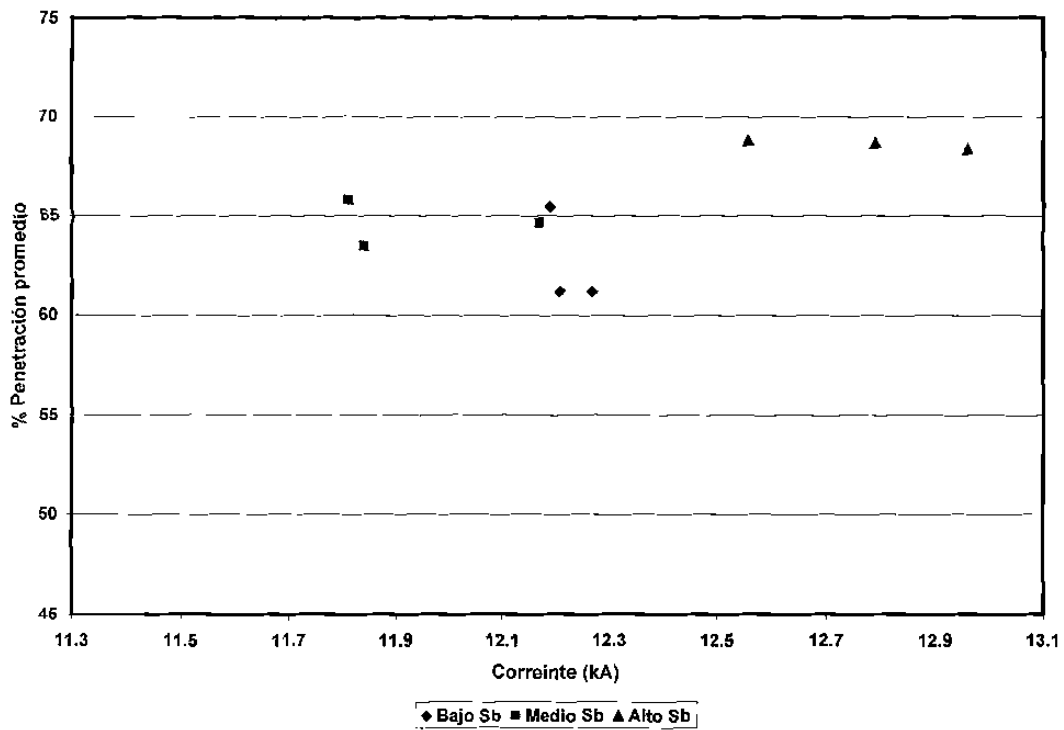


Figura 5.29. Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

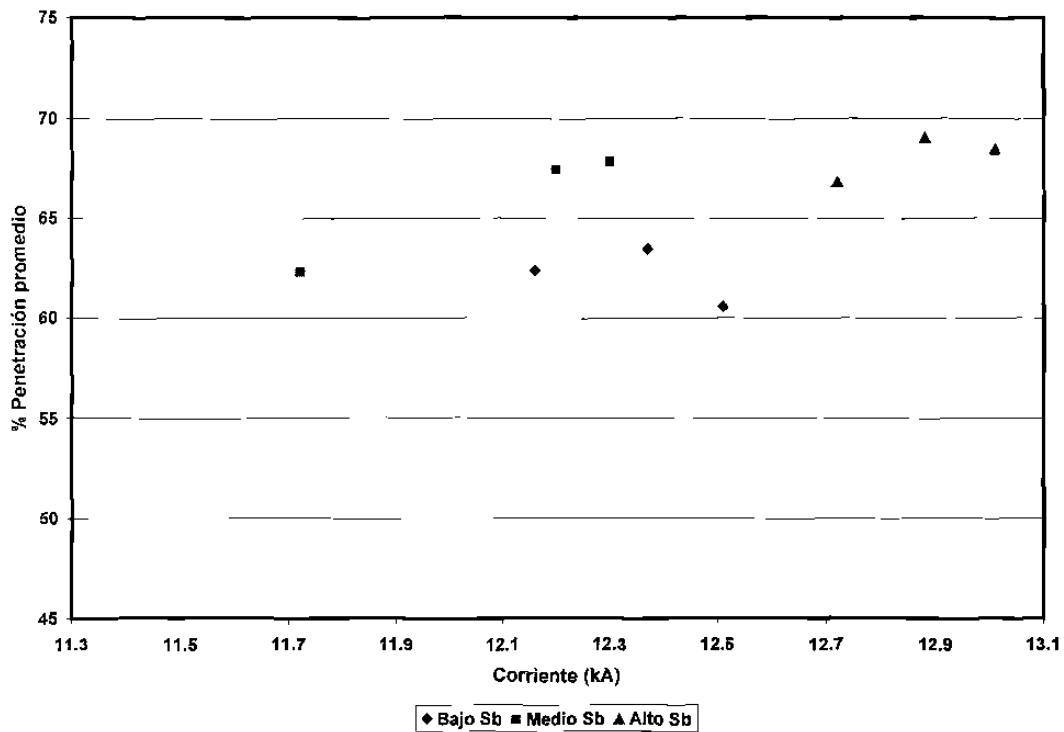


Figura 5.30. Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

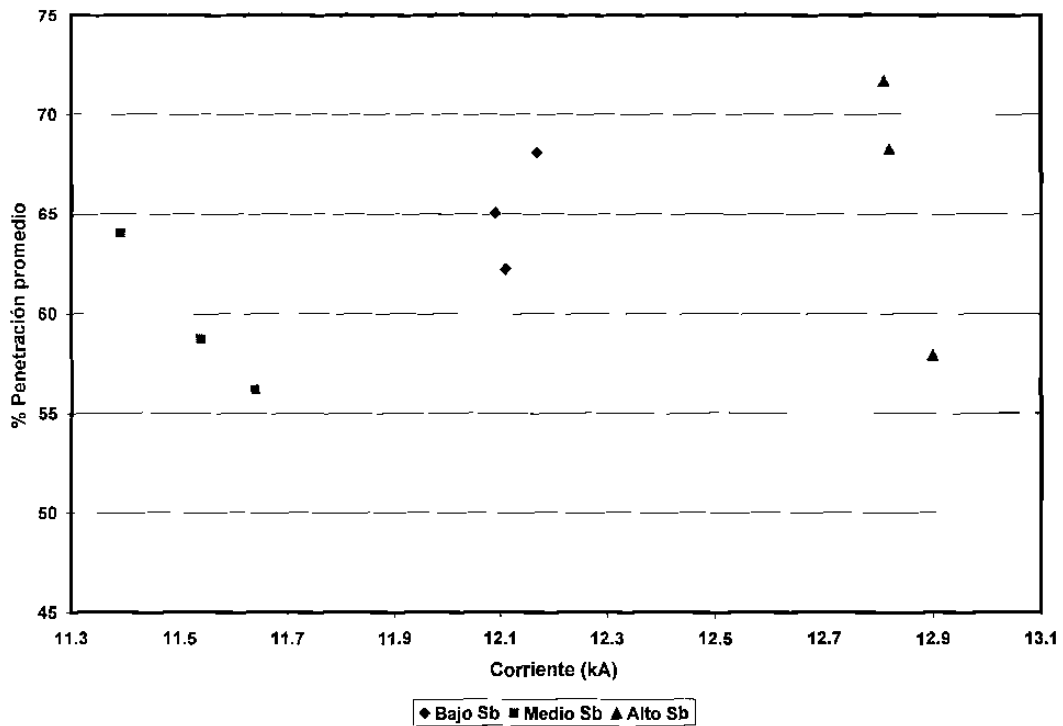


Figura 5.31. Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

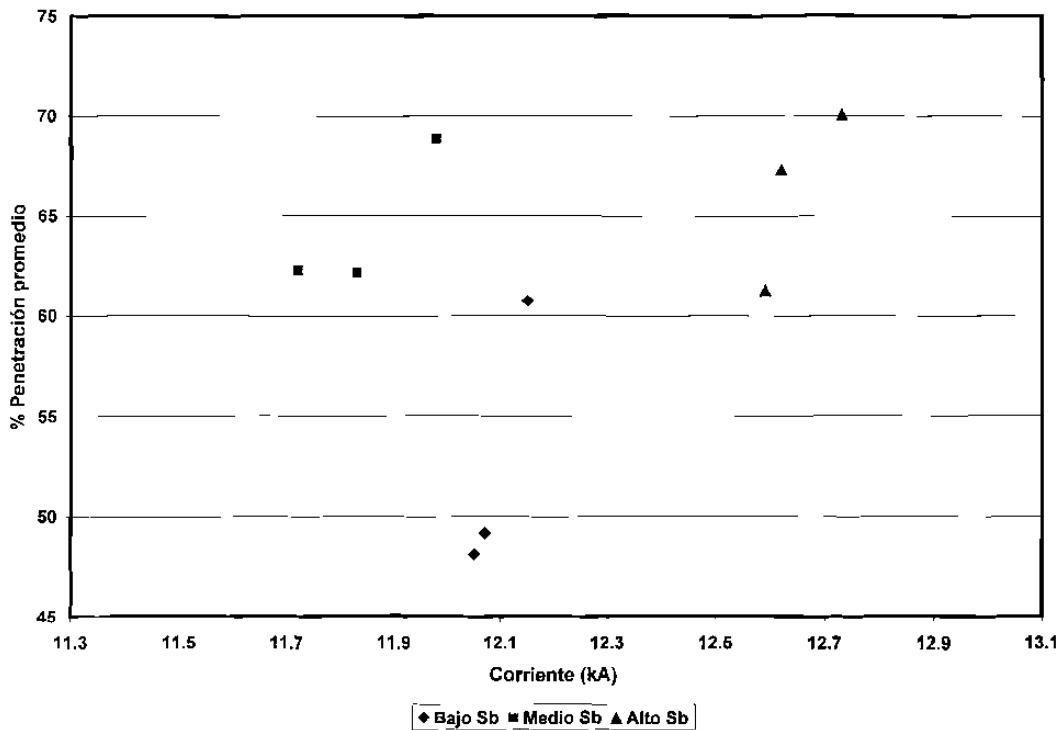


Figura 5.32. Penetración de soldadura promedio con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

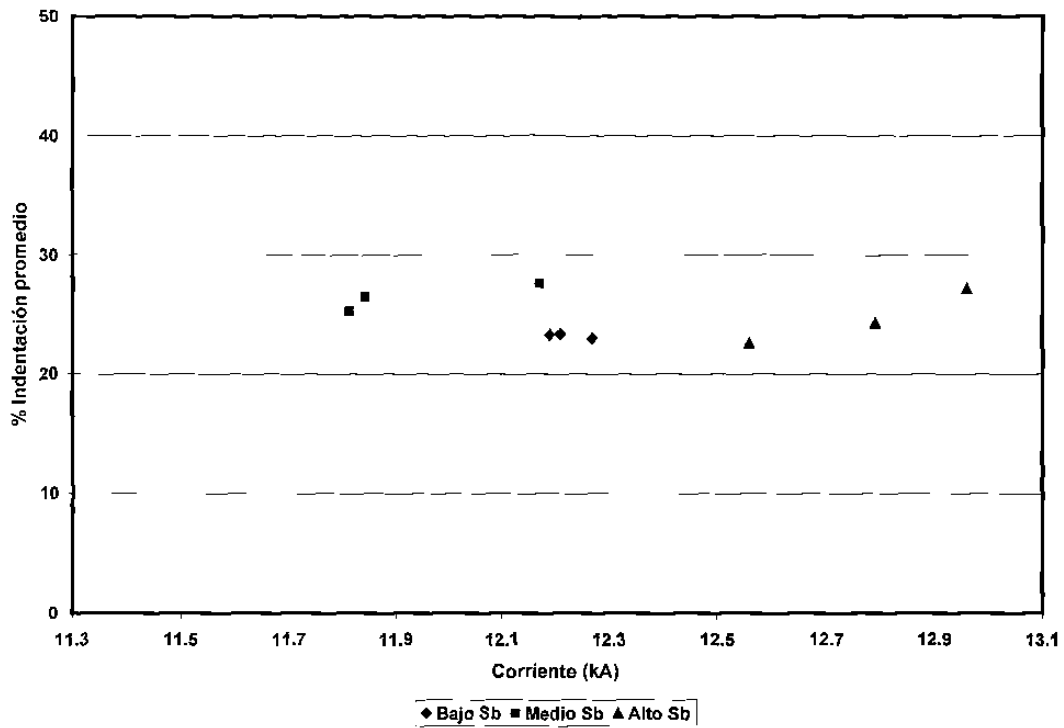


Figura 5.33. Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

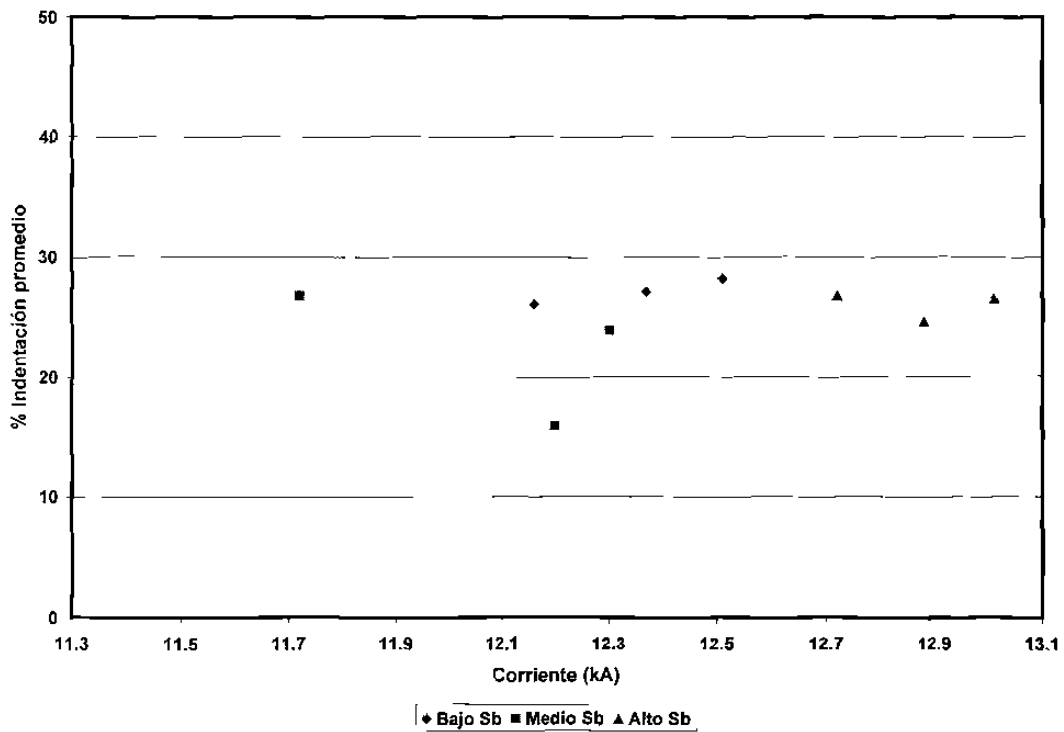


Figura 5.34. Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en cupones de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

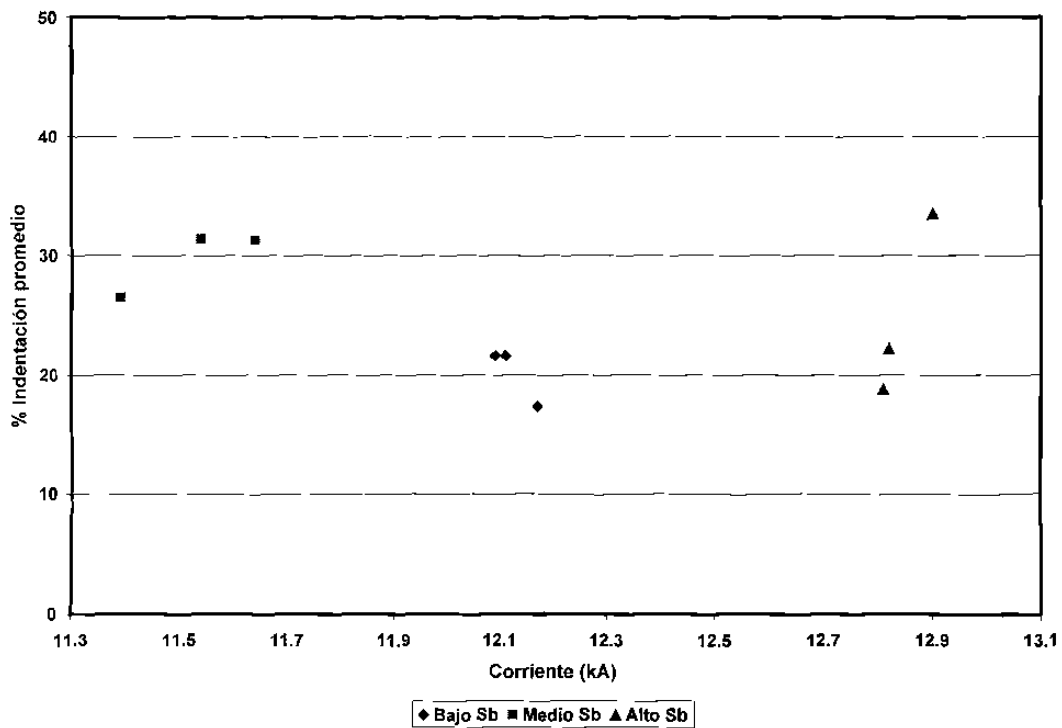


Figura 5.35. Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 30 ciclos.

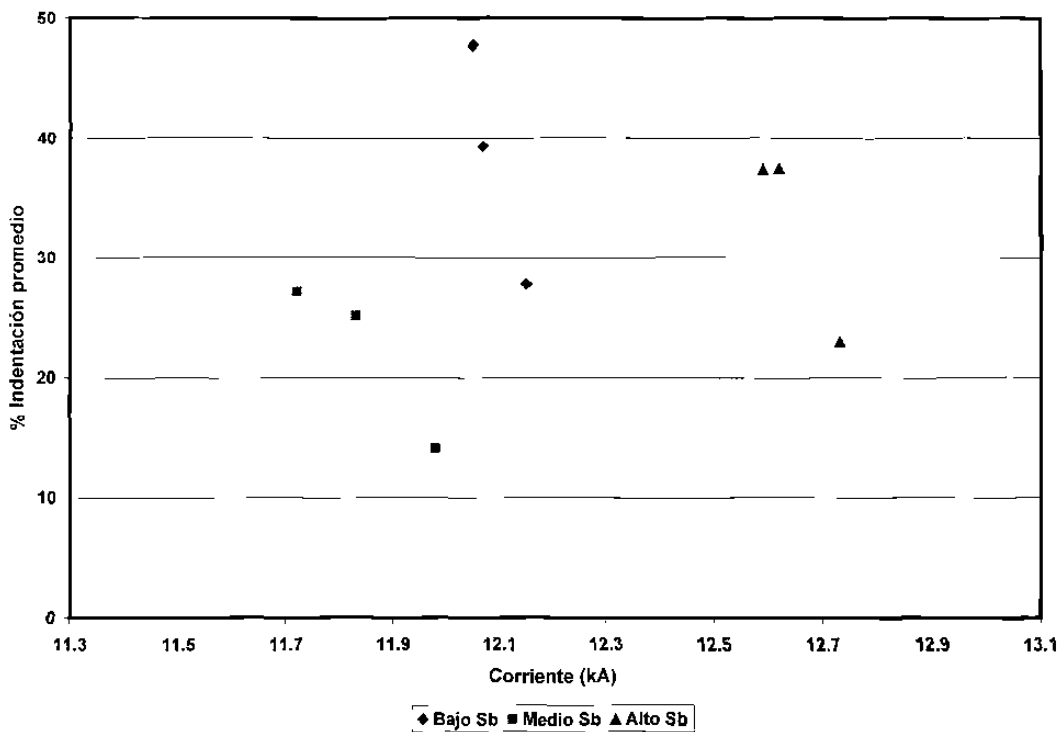


Figura 5.36. Indentación promedio del electrodo con respecto a la corriente de los botones formados en paneles de prueba con un tiempo de sostenimiento de 5 ciclos.

5.4.7 Ensayo de microdureza

El perfil de microdureza a través de la diagonal transversal del botón de soldadura para los cupones de prueba a los distintos tiempos de sostenimiento y para los tres aceros sometidos a prueba se presenta en la Figura 5.37, mientras que en el anexo 1 se exhiben las tablas con los valores de microdureza de los botones ensayados.

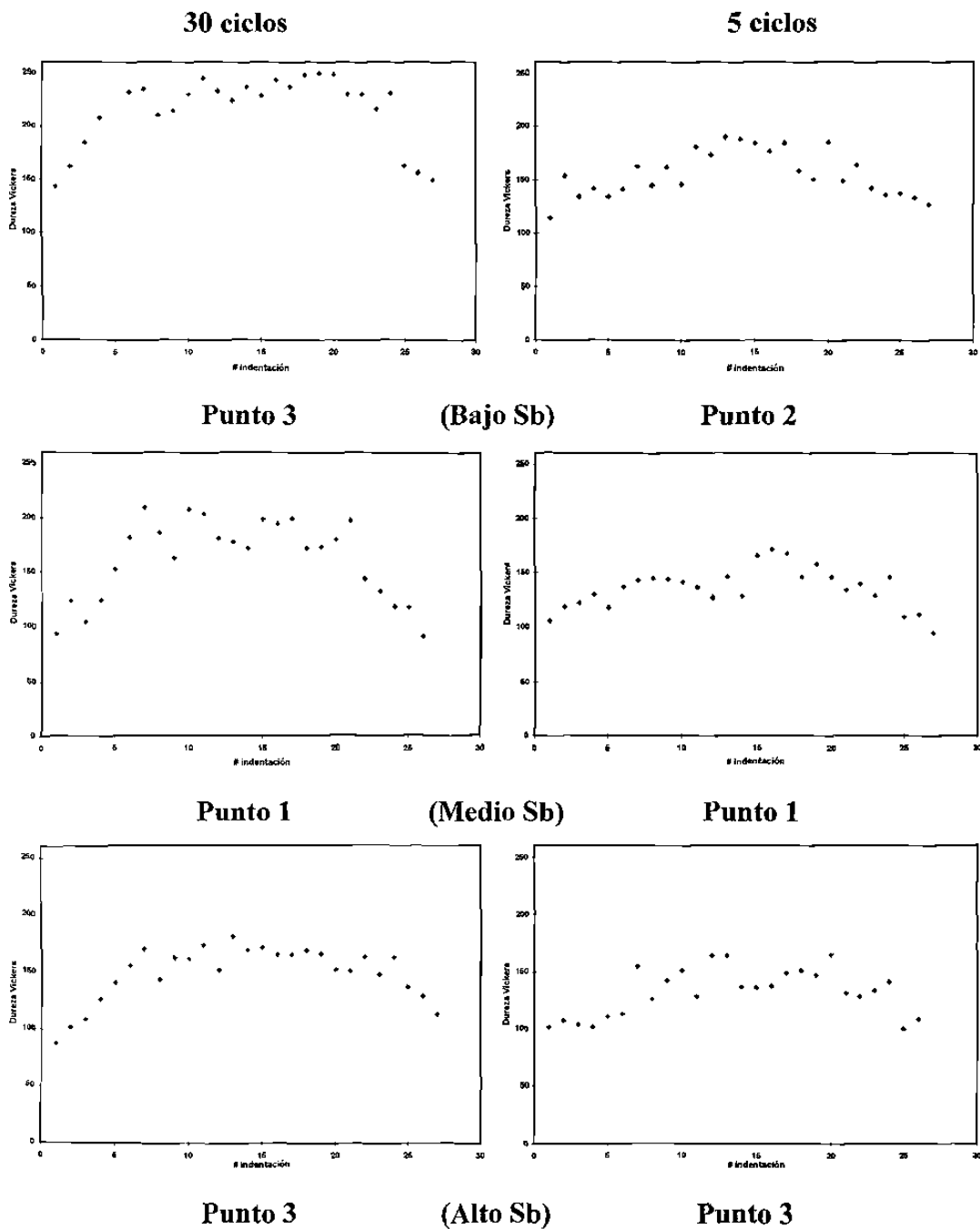
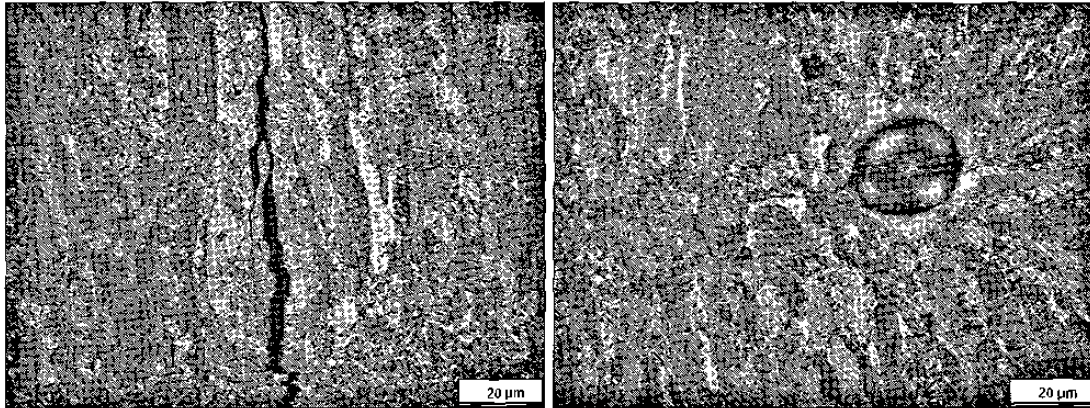


Figura 5.37. Perfil de microdureza a través del botón de soldadura.

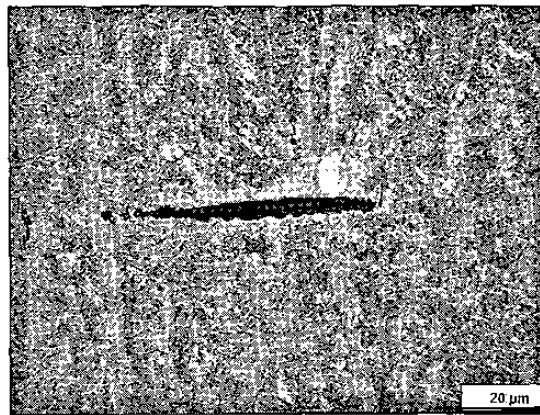
5.4.8 Defectos de soldadura

Los diferentes tipos de defectos que se presentaron en las pruebas realizadas se muestran en la Figura 5.38 mientras que su frecuencia se detalla en la Tabla 5.30.



(a) Cupón, alto Sb 5 ciclos.

(b) Cupón, medio Sb 5 ciclos.



(c) Cupón, medio Sb 5 ciclos.

Figura 5.38. Tipos de defecto observados, (a) grieta, (b) poro, (c) falla interfásial.

Prueba	Tiempo de sostenimiento	#	Tipo de defecto observado
Bajo Sb	30c	0	
	5c	2	Grieta, poro
Medio Sb	30c	8	Falla interfásial
	5c	5	
Alto Sb	30c	19	Grieta
	5c	9	

Tabla 5.30. Tipo y número de defectos en las soldaduras.

4.5 Análisis del electrodo

Se realizó la metalografía del material del electrodo con el fin de determinar su microestructura, la cual se presenta en la Figura 5.39, además de esto, se obtuvo la composición química correspondiente que se muestra en la Tabla 5.31.

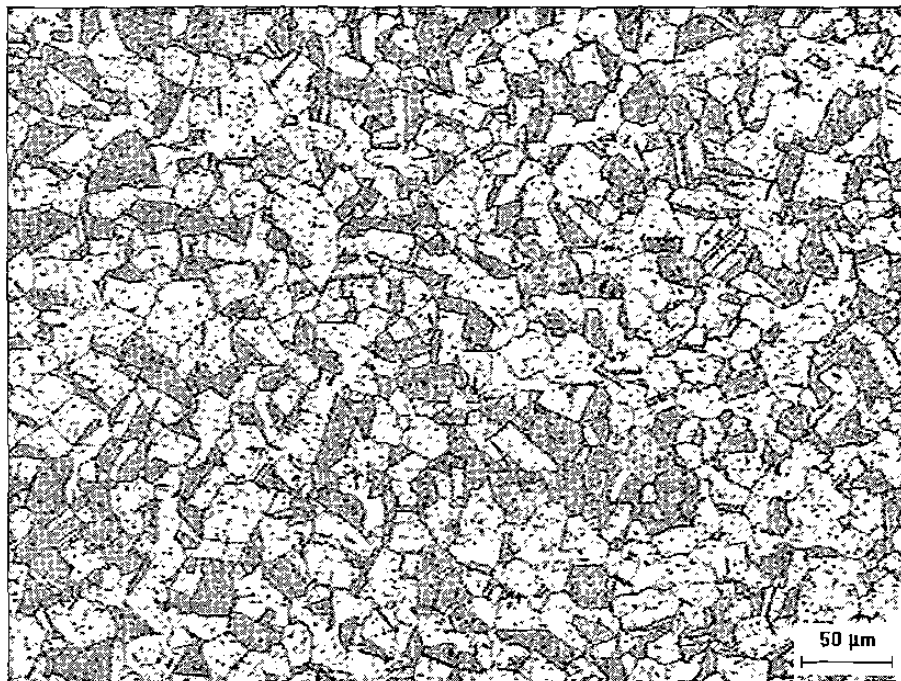


Figura 5.39. Microestructura del material del electrodo.

Elemento	Cr	Cu	Zr
% en peso	1.79	97.43	0.78

Tabla 5.31. Composición química del electrodo.

Como parte de la documentación de la prueba, se obtuvieron las impresiones de la huella de los electrodos antes y después de la misma para determinar su geometría de contacto. Estas impresiones, realizadas con papel carbón se muestran en la Figura 5.40, las relativas al inicio de la prueba corresponden al diámetro de la cara requerido de 7.90 mm, sirviendo como referencia para su condición final.

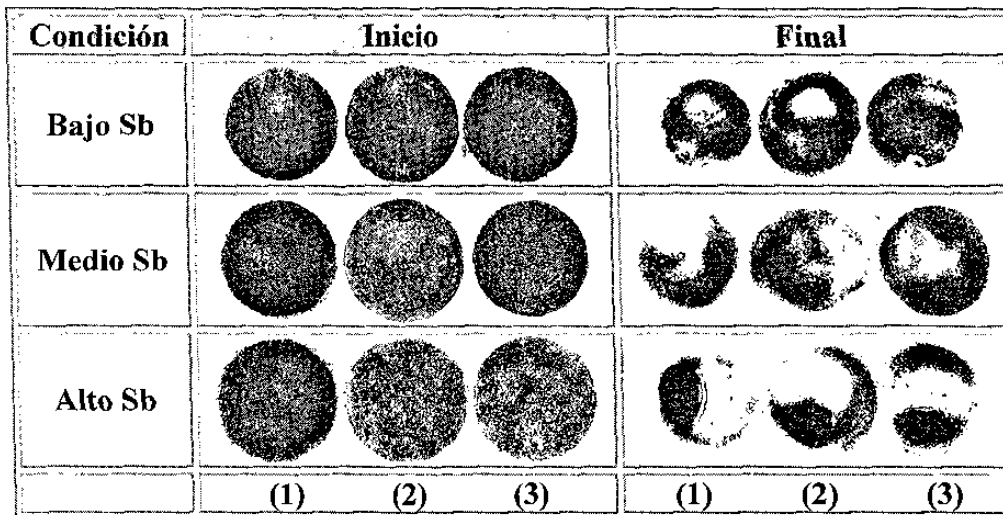


Figura 5.40. Impresión de la huella del electrodo al inicio y final de la prueba de soldadura, (1) compuesta, (2) electrodo superior y (3) electrodo inferior.

Con objeto de determinar la interacción del recubrimiento con los electrodos se muestra la imagen de la cara de éstos al término de una de las pruebas en la Figura 5.41, mientras que en la Figura 5.42 se presenta su micrografía en sección transversal en donde se aprecia la aleación de Zn.

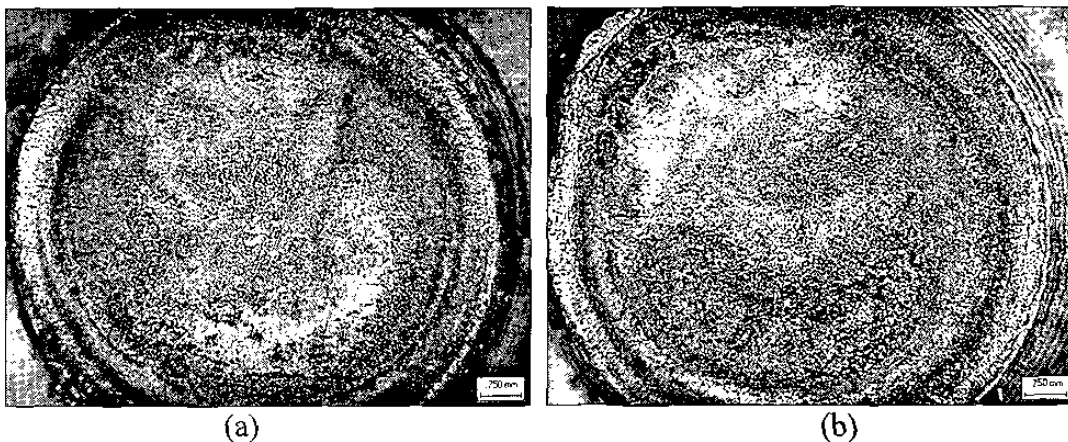


Figura 5.41. Cara de los electrodos después de la prueba de soldabilidad para la condición de medio antimonio en la paila, (a) electrodo inferior, (b) electrodo superior.

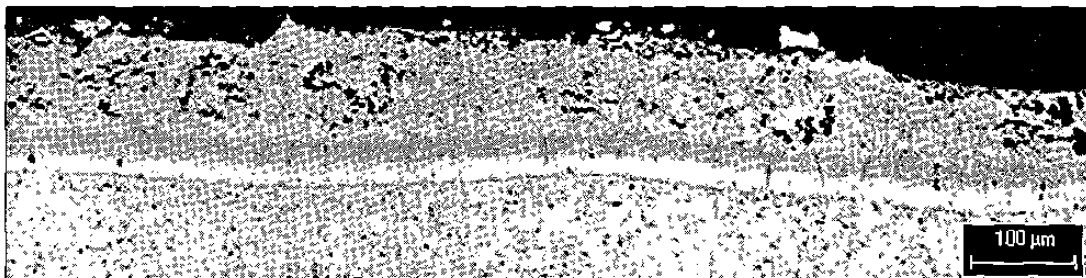


Figura 5.42. Metalografía de sección transversal mostrando adherencia y aleación de Zn en los electrodos, capa de latón uniforme de 10 μm de espesor.

Se realizaron ensayos de microdureza en diferentes puntos de los electrodos de prueba como se observa en la Figura 5.43, los cuales se registraron como parte de su caracterización, obteniendo así un valor promedio.

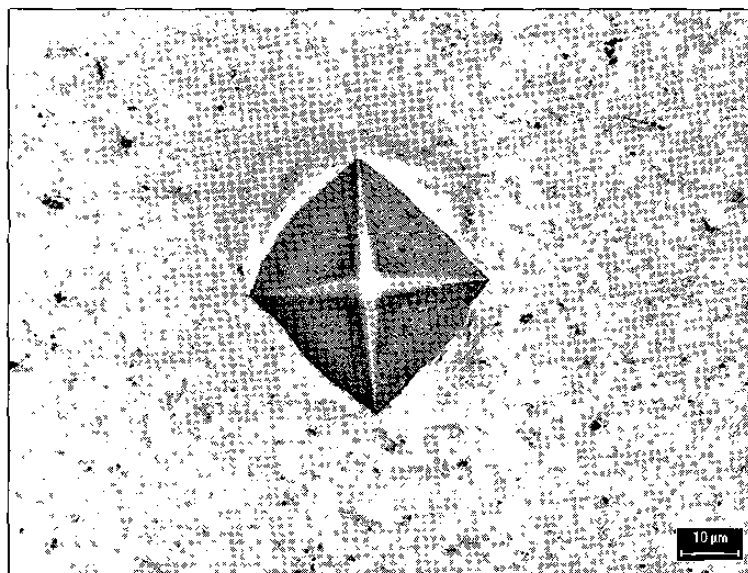


Figura 5.43. El valor obtenido de microdureza promedio del electrodo fue de 88 Vickers con una desviación estándar de 11.5 en indentaciones realizadas en los electrodos de las tres pruebas.

Los resultados mostrados en el presente capítulo son considerados y sometidos a discusión con mas detalle en el Capítulo VI.