CAPITULO IV

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 OBJETIVO

Para efectuar el análisis del acero estudiado para este proyecto se acordó utilizar los siguientes estándares de calidad:

- 1. Chrysler Corporation Laboratory Procedure No: LP-461K-170 (43).
- 2. Chrysler Corporation Laboratory Procedure No: LP-461K-173 (44).
- 3. Chrysler Corporation Process Standard No: PS-9471<S> (45).

La razón para la utilización de tales estándares se debe a que en la empresa proveedora del material que se a naliza se u san e stas normas para certificar los aceros que a hí se producen ante las empresas que compran esos materiales.

Cabe aclarar que los estándares antes mencionados sirven solamente como referencia o guía para las pruebas efectuadas en el acero bajo estudio. Debido a que el acero es un producto experimental, en la empresa se busca analizar los efectos de la variación de los parámetros de soldadura en las piezas soldadas así como también encontrar las condiciones óptimas a las que se pueda someter el acero bajo el proceso de soldadura cumpliendo los requerimientos bajo los cuales se analice.

4.2 PARÁMETROS DE SOLDADURA

Según el estándar PS-9471<S> (45) para el espesor del acero analizado se recomienda el siguiente programa de soldadura mostrado en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Espesor de la hoja mas delgada 1.78 mm $(0.70 \text{ in})^{(45)}$.		
Programa de Soldadura Variación		
Fuerza del electrodo	5340 N (1200 lb)	
Tiempo de soldadura	13-16 ciclos	
Corriente de soldadura	13.5-16.5 kA	
Tamaño de la Punta del Electrodo	7.9 mm (0.313 in)	
Diámetro Mínimo del Núcleo	5.6 mm (0.22 in)	

La Tabla 4.1 se tomó como referencia para establecer los parámetros de soldadura con los que se trabajó finalmente en la prueba experimental, los cuales se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros de soldadura de la prueba experimental.					
Parámetro	Valor/Rango				
Fucrza del electrodo	5870 N (1320 lb)				
Tiempo de soldadura	10, 13, 16 y 19 ciclos				
Tiempo de sostenimiento	5 y 30 ciclos				
Tiempo de presión	99 ciclos				
Tiempo de separación	24 ciclos				
Corriente de soldadura	8 kA- hasta expulsión				
Tamaño de la punta del electrodo	$7.9 \pm 0.25 \text{ mm } (0.313 \pm 0.01 \text{ in})$				
Geometría del electrodo	Cono truncado Cr-Cu				
Flujo del agua refrigerante	3.8 l/min (1 gal/min) ± 5%				
Temperatura del agua refrigerante	18-20 °C				

Notas:

Según la norma cuando se sueldan dos aceros HSLA la fuerza del electrodo se debe incrementar en un 10% adicional a la del programa recomendado.

- En los tiempos de soldadura se decidió realizar pruebas por debajo del rango recomendado y por encima del mismo, con el propósito de analizar su efecto en la soldadura.
- Respecto a las corrientes de soldadura, para cada uno de los tiempos de soldadura se inició con la corriente a la que los botones estuvieran firmemente soldados.
- Para el acero que se analiza, el tiempo de sostenimiento que se especifica según el estándar LP-461K-170 (43) es de 30 ciclos, pero se agregó el de 5 ciclos para observar algún posible efecto de sensibilidad del material.

4.3 PRUEBA DE SOLDADURA

4.3.1 Obtención del material

Para efectuar la prueba de soldadura el siguiente material fue requerido:

- Cupones: corte de la lámina en medidas de 38 x 127 mm (1.5 x 5 in).
- Tiras: corte de la lámina en medidas de 76.2 x 914 mm (3 x 36 in).

4.3.2 Prueba de soldadura

La prueba de soldadura fue realizada en un máquina soldadora de pedestal marca ARO modelo PAO94-SC, la cual se aprecia en la Figura 4.1.

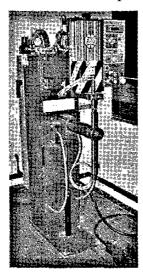


Figura 4.1 Máquina soldadora de pedestal utilizada para la prueba de soldadura localizada en la empresa Galvak, S.A de C.V.

4.3.3 Estabilización de corriente y electrodos

Las tiras de lámina fueron utilizadas para realizar la estabilización de la corriente de soldadura y de los electrodos, y fueron soldadas en pares, una encima de la otra. Cuando los electrodos están nuevos se requiere efectuar este procedimiento y se tiene que llegar a un punto en que la corriente no fluctúe y se mantenga, ya que de lo contrario podría haber variaciones en las mediciones de los resultados finales en las probetas ya soldadas.

La estabilización se lleva a cabo conforme la norma LP-461K-173 ⁽⁴⁴⁾, que es una serie de pasos que consisten de iniciar con ciertos valores de corriente y porcentajes de calor incluidos en la norma e ir variándolos ya sea incrementando o disminuyendo tales valores según se requiera en cada etapa.

4.3.4 Soldadura de cupones

Con la estabilización efectuada el siguiente paso fue la soldadura de pares de cupones, los cuales se soldaron según la siguiente configuración mostrada en la Figura 4.2.

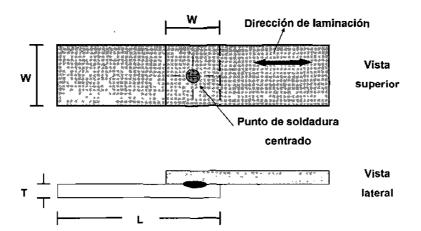


Figura 4.2 Configuración para la soldadura de los pares de cupones ⁽⁴³⁾.

Donde
$$L = 127 \text{ mm (5 in)}$$

 $W = 38 \text{ mm (1.5 in)}$
 $T = \text{Espesor}$

Se soldaron 4 pares de cupones para cada una de las corrientes a los diferentes tiempos de soldadura.

4.4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Para efectuar la caracterización del material, el análisis se dividió en tres partes: la caracterización del substrato, del recubrimiento y de los puntos de soldadura.

Nota: en el Anexo III se puede consultar información sobre los equipos utilizados en la caracterización del material, así como también imágenes de algunos de estos equipos.

4.4.1 Substrato

Los siguientes puntos corresponden a las pruebas efectuadas a la lámina recubierta:

- Condiciones de proceso: se recopilaron los datos de los tiempos y las temperaturas a las que la lámina se procesó, así como también la composición química del baño de Zn y las velocidades de línea.
- **Composición química:** el equipo usado fue un espectrómetro por chispa.
- Medición de espesor: la medición se realizó a lo largo de la lámina cortada en tiras de 30 x 100 cm; se obtuvo el promedio de éstas, la medición se efectuó con un micrómetro digital marca Mitutoyo.
- Medición de dureza: se realizaron mediciones en secciones de los extremos y del centro de la lámina; se realizó un decapado con HCl para remover el recubrimiento de Zn de la lámina y tomar las mediciones.
- Microestructura: se cortaron pequeños pedazos de lámina en dirección longitudinal y transversal, con respecto a la de laminación, y se montaron en

pastillas de baquelita, para ser posteriormente pulidas y atacadas químicamente con nital al 2% y ser vistas en el microscopio óptico.

- Medición de microdureza: se realizaron pruebas de microdureza en la microestructura.
- Pruebas mecánicas: se cortaron probetas de tensión según la norma ASTM E8 a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación del acero. La velocidad del cabezal utilizada fue de 10 mm/min, constante.

4.4.2 Recubrimiento

Los siguientes análisis fueron efectuados en el recubrimiento:

- Microestructura: se prepararon muestras de la misma manera que el metal base, en este caso se atacó con nital al 2% diluido en alcohol en una proporción aproximada de 10:1. Las imágenes fueron tomadas con el microscopio óptico.
- ► Composición química: para obtener el análisis químico se utilizó un espectrofotómetro de emisión por plasma.
- Medición de espesor del recubrimiento: la medición del espesor se efectuó en el microscopio óptico para una apreciación general del recubrimiento total, para la medición de cada una de las capas que integran el recubrimiento se utilizó el microscopio electrónico de barrido.
- Medición del peso del recubrimiento: se utilizó un corte de la lámina tipo bocado con medidas de 8 cm de diámetro mostrado en la Figura 4.3, el cual se obtuvo mediante una troqueladora. Para realizar la medición de peso, primero se pesó el bocado en una balanza de precisión, luego se decapó uno

de los lados con HCL y se volvió a pesar, por último se decapó el otro lado y la probeta se pesó otra vez, obteniéndose el peso del recubrimiento de cada lado.

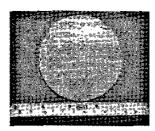


Figura 4.3 Bocado de lámina con dimensiones de 8 cm de diámetro.

- Medición de rugosidad: se efectuaron mediciones de rugosidad sobre la superficie de la lámina en forma longitudinal y transversal con respecto a la dirección de laminación en el centro de la lámina y en sus extremos. Los parámetros obtenidos fueron R_a (valor promedio aritmético del perfil de rugosidad determinado de las desviaciones de la línea central dentro de la longitud de evaluación recorrida por la aguja del rugosímetro), R_y (máxima altura entre pico-valle del perfil de rugosidad) y R_{PC} (conteo de los picos detectados sobre la longitud de evaluación).
- desprendimiento del recubrimiento al doblar y desdoblar la lámina en angulos de 90 y 60°. En el caso del acero bajo estudio se efectuó la prueba sólo a 90° según el calibre de la lámina. Se volvieron a utilizar bocados como el que se muestra en la Figura 4.3. La máquina utilizada para efectuar esta prueba se muestra en el Anexo III. La prueba de doblez consiste en colocar el bocado en la máquina, se hace bajar un punzón que fuerza al bocado a doblarse al ángulo seleccionado, enseguida se desdobla la lámina y se coloca un pedazo de cinta adhesiva en la zona del doblez, se desprende la cinta y se compara el desprendimiento con la hoja de estándar (en este caso, el estándar interno de la empresa Galvak, S.A. de C.V.) designándole un valor (de 1 a 6) conforme al grado de desprendimiento de recubrimiento registrado.

4.4.3 Puntos de soldadura

- Microestructura: los botones de soldadura fueron cortados transversalmente y montados en pastillas de baquelita, a l i gual que con el metal base, estas pastillas se pulieron y se atacaron con nital al 2% para revelar la microestructura. Posteriormente se tomaron imágenes con los microscopios estereográfico, óptico y electrónico.
- Microdureza: se realizó un patrón de indentaciones en forma diagonal sobre la microestructura del núcleo, con una distancia de separación entre cada indentación de 1 mm, así como se muestra en la Figura 4.4.

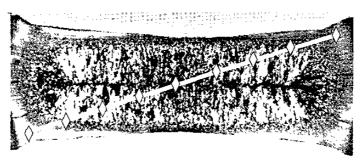


Figura 4.4 Patrón de microdureza en el núcleo de soldadura (43).

- Análisis de falla: con las imágenes tomadas con los microscopios, se analizaron los botones y los núcleos para encontrar posibles fallas en la soldadura, como las grietas, poros y sensibilidad al tiempo de sostenimiento.
- Patrón de crecimiento del núcleo: se tomaron imágenes del cambio en el crecimiento del núcleo con respecto al incremento en la corriente de soldadura.

4.4.4 Electrodos

Se analizaron los electrodos una vez que la prueba de soldadura fue terminada. Los análisis que se le hicieron a los electrodos superior e inferior fueron:

- Obtención de microestructura.
- Obtención de microdureza.
- Análisis de las capas formadas durante la soldadura.
- Análisis de desgaste.

4.5 CRITERIOS DE EVALUACION EN LOS PUNTOS DE SOLDADURA

Los criterios de evaluación para los puntos de soldadura se muestran a continuación:

4.5.1 Botones de soldadura

Los botones de soldadura serán aceptables si sus diámetros son mayores o iguales al diámetro mínimo del núcleo. La medición de los diámetros se efectuó como se muestra la Figura 4. 5, se realizaron dos mediciones en los diámetros y se obtuvo el promedio de éstos.

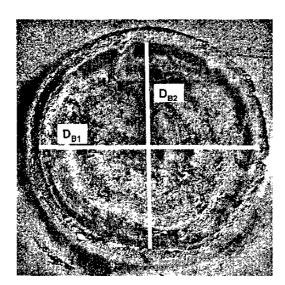


Figura 4.5 Patrón de medición del diámetro de un botón de soldadura.

Los botones no deben exhibir grietas ni porosidades, de ser así no pueden ser aceptados.

4.5.2 Núcleos de soldadura

- El diámetro mínimo del núcleo deberá ser de 5.6 mm.
- La sección transversal de la soldadura deberá mostrar una penetración mínima del 20% del espesor de una de las láminas soldadas.
- La indentación de la superficie no debe de exceder el 30% del espesor de la lámina.
- No deben de presentarse agrietamientos ni poros en la zona soldada.

La Figura 4.6 muestra la forma de medición en el núcleo.

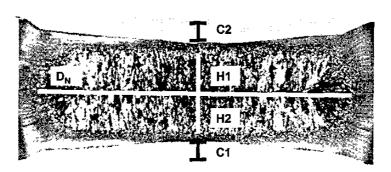


Figura 4.6 Mediciones en el núcleo de soldadura.

Donde

 $D_N = Diámetro del núcleo.$

T = Espesor de la lámina.

H1 = Penetración de la soldadura en la lámina superior.

H2 = Penetración de la soldadura en la lámina inferior.

C1 = Indentación del electrodo en la lámina superior.

C2 = Indentación del electrodo en la lámina inferior.

Las ecuaciones (4.1) y (4.2) ⁽⁴³⁾, se utilizan para obtener el porcentaje de penetración de la soldadura en la lámina superior e inferior respectivamente, mientras que las ecuaciones (4.3) y (4.4) ⁽⁴³⁾ son usadas para los porcentajes de indentación del electrodo en la lámina:

$$P_{T1\min} = \frac{H1}{T1} \times 100 \tag{4.1}$$

$$P_{T2\,\text{min}} = \frac{H2}{T2} \times 100 \tag{4.2}$$

$$I_{T1} = \frac{C1}{T1} \times 100$$
 4.3

$$I_{T2} = \frac{C2}{T2} \times 100$$
 4.3

Donde

P_{T1min} % Penetración en la lámina superior.

P_{T2min} % Penetración en la lámina inferior.

I_{T1} % Indentación en la lámina superior.

I_{T2} % Indentación en la lámina inferior.

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 PROCESAMIENTO DE LA LÁMINA

Se o btuvieron las condiciones y los datos del proceso mediante e l cual la lámina fue procesada; la Tabla 5.1 resume esta información.

Tabla 5.1 Condiciones de procesamiento de la lámina.					
	# Rollo		6329624	Tiempo de	
Velocid	lad de la lám	ina	15.4 m/min	estancia (min)	
· ## W-1886-14	Horn	o F1	810 ° C	0.3344	
	Horn	o F2	813 ° C	0.5323	
Antes		Etapa 1	776 ° C	0.6074	
de la	Horno F3	Etapa 2	735 ° C	0.3445	
Inmersión	I J	Etapa 2	583 ° C	1.3180	
	Enfriamiento (Jet Cooling)		454 ° C	0.4948	
	Paila de Zi	1	462 ° C	0.5208	
Durante la	Química	% A1	0.1381 %		
Inmersión	del baño	% Sb	0.0878 %		
Después de	Hor Aire ca		475 ° C	2.1224	
la Inmersión	Enfriamiento		35 ° C	1.4713	

En la Tabla 5.1 se muestra que el horno de recocido se divide en las secciones F1, F2 y F3, y esta última se encuentra integrada por tres etapas. Se observa que la velocidad de la lámina durante el proceso es menor que velocidades utilizadas para láminas de menor espesor, como 25 m/min para un acero de calibre 16, reportada en estudios anteriores (67). Debido al espesor de la lámina la velocidad es mucho menor, lo que permite que el proceso de termogalvanizado de la lámina pueda ser efectuado y las reacciones de difusión en el horno de termogalvanizado se completen correctamente.

En la Figura 5.1 se representa el comportamiento de las temperaturas con respecto al tiempo del procesado de la lámina.

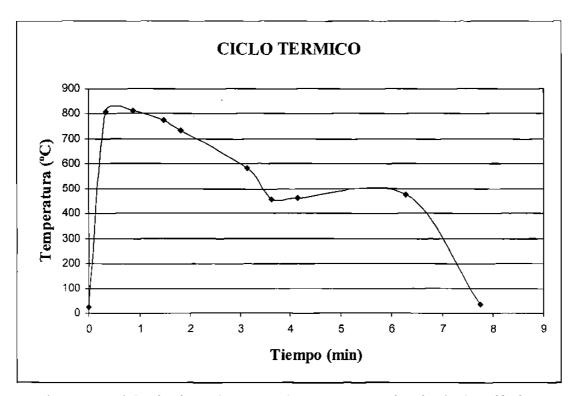


Figura 5.1 Ciclo térmico del procesamiento de termogalvanizado de la lámina.

5.2 ANALISIS DEL SUBSTRATO

Se obtuvo la composición química del substrato mediante un espectrómetro por chispa, la cual se muestra en la Tabla 5.2. Se observa que los elementos aleantes principales son el Cr y el Mn, agregados para incrementar la resistencia del material.

		Tab	la 5.2	Compos	ición q	uímica	del su	bstrato	(%).	-	
C	Mn	P	S	Ti	Ni	Si	Nb	Al	Cu	Cr	Mo
0.076	1.26	0.013	0.002	0.0018	0.02	0.135	0.025	0.031	0.036	0.517	0.13

Las Tablas 5.3 y 5.4 presentan las propiedades físicas y mecánicas del metal base. En la Tabla 5.3 se reportan los valores mínimo, máximo y promedio de microdureza del substrato, donde se aprecia que tales valores difieren en 25 puntos de microdureza aproximadamente, lo que puede deberse a que el material no presente una homogeneidad en su microestructura y produzca esa variación en los valores obtenidos. De acuerdo con la clasificación descrita en el Capítulo I y los valores obtenidos en la Tabla 5.4, este acero es designado como un acero SAE J2340 Alta Resistencia Avanzado.

Tabla 5.3 Propiedades físicas y mecánicas del					
	substrato.	:			
Espesor $1.828 \text{ mm} \pm 0.018$					
Dureza	90.08 HRB ± 0.03				
	Valor mínimo	176.92			
Microdureza	Valor máximo	201.76			
	Promedio	$190.4 \text{ HV} \pm 8.5$			

	Tabla 5.4 Propiedades mecánicas de la prueba de tensión.						
	Límite	Elástico	Resistenc	ia Tensión	Fra	actura	Florigación
Angulo (respecto a la dir. de	P _y (kN)	σ _y (MPa)	P _{max} (kN)	UTS (MPa)	P _{fract} (kN)	σ _{fract} (Mpa)	Elongación en 50.8 mm (%)
0 °	9.03	377.8	15.57	651.6	3.11	130.0	20.95
45 °	10.29	434.4	15.55	657.1	2.69	113.6	21.01
90°	10.78	455.8	16.25	687.4	2.89	121.8	16.02

La Figura 5.2 presenta la gráfica de la prueba de tensión a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación, en la cual se aprecia que el porcentaje de deformación que experimenta la lámina al ser tensionada es menor a 90° con respecto a la dirección de laminación comparado con la deformación a 0° y 45°. El comportamiento que presentan las pruebas de tensión en los valores de esfuerzos de cedencia es un incremento conforme el ángulo de corte respecto a la dirección de laminación aumenta.

También se aprecia que todas las curvas presentan cedencia continua y que el material exhibe anisotropía ya que su comportamiento difiere al ser deformado en diferentes direcciones respecto a la dirección de laminación, este fenómeno es característico de la orientación preferencial de los granos producida por una deformación severa, que en este caso sucede de esta forma; mas adelante se hará una descripción de la microestructura del material.

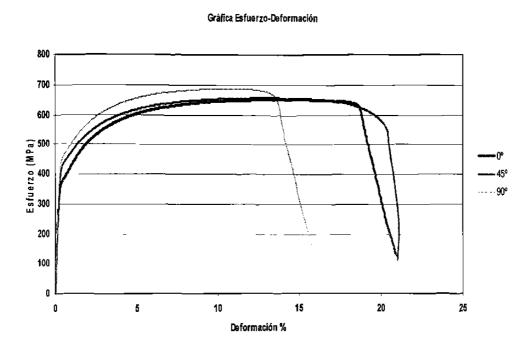
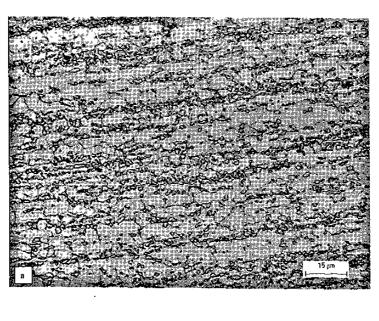


Figura 5.2 Gráfica esfuerzo-deformación del substrato.

En la Figura 5.3a se muestra la microestructura del metal base atacada con nital al 2% y en la microestructura de la Figura 5.3b se atacó con nital al 2% y metabisulfito de sodio al 4%. El acero muestra una matriz de ferrita con carburos dispersos. En la Figura 5.3b

se aprecia que en la zona central de la lámina se encuentra una concentración de carburos alineados y orientados en sentido de la laminación, que pudieron haber precipitado durante el calentamiento de la lámina antes de haber sido sumergida en el baño de Zn para su galvanizado o durante su procesamiento en frío, así mismo estos carburos forman bandas localizadas y concentradas hacia el centro de la lámina que probablemente se formaron durante el laminado en frío, antes de que la lámina ingresara al proceso de galvanizado.



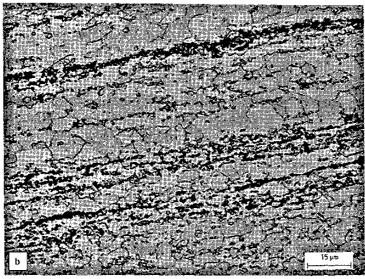


Figura 5.3 Imágenes de la microestructura del substrato tomadas con el microscopio óptico a) nital, 400x, b) nital y metabisulfito de sodio, 400x.

Como se mencionó en la Tabla 5.3, los valores de microdureza presentaron gran diferencia unos de otros, una de las razones podrían ser los carburos vistos en la Figura 5.3, los cuales pudieron haber contribuido a las diferencias encontradas en los valores de microdureza del metal base.

Se efectuaron mediciones de tamaño de grano en un área aproximada de 50 μm x 50 μm, el tamaño de grano más pequeño fue de 2.91 μm y el mayor fue de 11.39 μm. Debido a la heterogeneidad del material en su microestructura no es posible designar un tamaño de grano específico ya que la variación de éste es relativamente grande.

En la Figura 5.4 se muestran imágenes de la microestructura del substrato tomadas con microscopio electrónico de barrido (SEM), se realizó un análisis químico de los carburos dispersos en la matriz de ferrita; los resultados se presentan en el espectro mostrado en la Figura 5.5, se deduce que los carburos están compuestos de Cr y Fe.

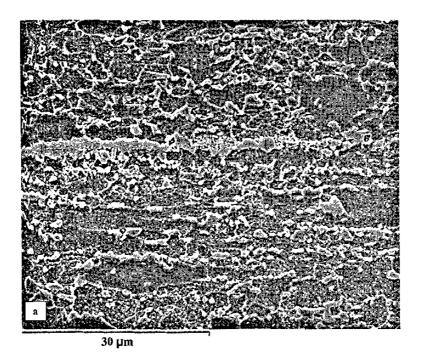


Figura 5.4a Imagen de la microestructura del substrato, SEM, 2000x.

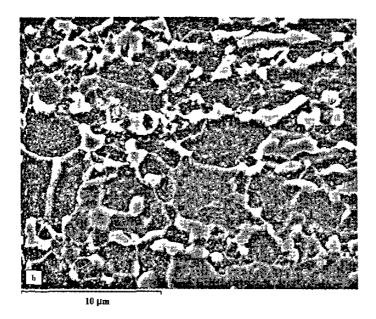


Figura 5.4b Imagen de la microestructura del substrato, SEM, 5000x.

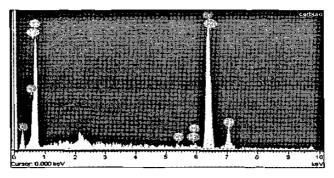


Figura 5.5 Espectro del análisis químico de los carburos del substrato.

5.3 ASPECTO DEL GALVANIZADO

La Tabla 5.5 muestra la composición química del recubrimiento de la lámina termogalvanizada obtenida mediante espectrofotómetro de emisión por plasma; la Tabla 5.6 resume los porcentajes de Fe y Zn presentes en las fases del recubrimiento, las cuales fueron analizadas mediante SEM.

Tabla 5.5	Tabla 5.5 Composición química del recubrimiento (%).						
Fe	Pb	Al	Sb	Zn			
10.48	0.0047	0.3249	0.0359	Bal.			

En la Tabla 5.6 se muestra el peso promedio del recubrimiento en cada uno de los lados de la lámina, así como también la pérdida de peso total obtenido. Se observa que el recubrimiento en el lado exterior de la lámina pesa 0.1 g más que el recubrimiento del interior de la lámina, lo que pudo haber sido influenciado por los factores de procesamiento durante la inmersión en el baño de Zn, las cuchillas de aire para la remoción del exceso de Zn o por alguna diferencia de temperatura en la lámina durante la estancia en el horno donde se produjo el termogalvanizado.

Tabla 5.6 Peso del recubrimiento.				
Lado de la lámina	Peso (g)			
Exterior	0.32 ± 0.06			
Interior	0.42 ± 0.04			
Total	0.742 ± 0.023			

La Tabla 5.7 resume los resultados de las mediciones de rugosidad en ambas superficies de la lámina en las direcciones longitudinal y transversal con respecto a la dirección de laminación.

Tabla 5.7 Mediciones de rugosidad en la lámina.						
w ·	Ra (μm)	Ry (µ	ım)	RPC (1/cm)
Dirección de laminación	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior
Longitudinal	0.81 ± 0.19	1.01 ± 0.26	5.21 ± 0.86	6.0 ± 1.7	122 ± 48	92 ± 28
Transversal	0.89± 0.23	1.03 ± 0.24	5.2 ± 1.5	6.1 ± 1.3	119 ± 55	112 ± 48

Al analizar los valores de rugosidad obtenidos, Tabla 5.7, se observa que los lados interior y exterior difieren un poco en sus valores, pero se comportan de manera similar cada uno en dirección longitudinal y transversal respecto a la laminación.

En la Tabla 5.8 se muestra la pérdida de peso del recubrimiento obtenida de la prueba de integridad que se realizó conforme estándares internos de la empresa al material que se estudia, este número de estándar comprende del 1 al 6 y en cada uno hay un patrón de desprendimiento, el cual se compara con un formato interno de la empresa con el que se establece el criterio de clasificación asignando el número correspondiente.

Tabla 5.8 Prue	ba de integridad del	recubrimiento, dol	olez a 90°.
Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Diferencia (g)	Estándar
72.6900	72.5907	0.0193	6

La Figura 5.6 muestra el desprendimiento del recubrimiento obtenido con la prueba de doblez a 90° de la lámina, descrita en el punto 4.4.2 del Capítulo IV. El estándar o nivel de polvos es una indicación de referencia en propiedades finales de la lámina procesada. En este caso, el acero que se estudia, por sus propiedades mecánicas, puede ser considerado para ser utilizado en partes automotrices internas, por lo que el nivel de desprendimiento talvez no sería uno de los factores más importantes para permitir su uso que si fuera un acero que tuviera que ser pintado, formado y expuesto al medio ambiente, donde el desprendimiento pudiera iniciar una zona de corrosión y por lo tanto deteriorar el material.

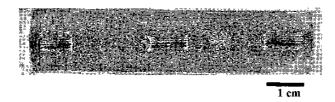


Figura 5.6 Imagen del desprendimiento del recubrimiento de la lámina.

Las Figuras 5.7 y 5.8 son imágenes del recubrimiento tomadas con microscopio óptico y electrónico respectivamente. Se encontró que las fases del recubrimiento no son continuas, además el recubrimiento exhibe desprendimiento en las capas zeta y delta, así como también se presentan grietas en la fase delta, la fase gamma presenta variaciones en su espesor. En la Figura 5.8 se aprecia el desprendimiento de los cristales de fase zeta

formados en la parte superior del recubrimiento, lo que puede deberse a que la lámina haya experimentado un proceso de termogalvanizado pobre.

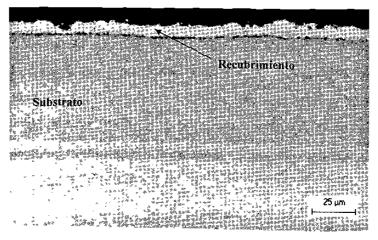


Figura 5.7 Imagen del recubrimiento tomada con microscopio óptico a 200x.

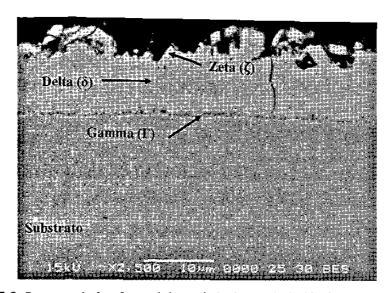


Figura 5.8 Imagen de las fases del recubrimiento de la lámina, SEM, 2500X.

Tabla 5.9 Porcentajes de Fe y Zn en las fases del recubrimiento de la lámina.				
Fase	% Peso Fe	% Peso Zn		
Zeta (ζ)	6.56 ± 1.43	93.44 ± 1.43		
Delta (δ)	9.34 ± 1.61	90.66 ± 1.61		
Gamma (Γ)	25.69 ± 2.57	74.31 ± 2.57		

Los porcentajes mostrados en la Tabla 5.9 concuerdan con los contenidos reportados en el Capítulo II respecto a las fases que constituyen el recubrimiento.

La Tabla 5.10 presenta el espesor de las fases del recubrimiento, la medición fue efectuada con el SEM en las fases delta y gamma. No fue posible medir la fase zeta debido a que en el recubrimiento había cristales de esta fase muy dispersos unos de otros y además se observó desprendimiento de la misma a lo largo del recubrimiento, lo que representa que el recubrimiento exhiba fragilidad.

Tabla 5.10	Espesor de las fases			
del recubrimiento.				
Delta (μm)	7.71 ± 0.67			
Gamma (nm)) 439 ± 127			

5.4 ANALISIS DE LOS PUNTOS DE SOLDADURA

5.4.1 Botones de soldadura

Se realizaron mediciones de los diámetros promedio de los botones de soldadura, los cuales se presentan en las Tablas 5.11 y 5.12 para tiempos de sostenimiento (HT) de 5 y 30 ciclos, respectivamente, a los diferentes tiempos de soldadura (WT), 10, 13, 16 y 19 ciclos.

En la Figura 5.9 se encuentran graficados estos diámetros con respecto a la corriente aplicada. No se presentó fusión en los puntos al tiempo de 10 ciclos de soldadura usando 8 y 9 k A. Las pruebas de soldadura se detuvieron al momento en que se presenta la expulsión en los materiales que se soldaron, que corresponde a los valores finales reportados en cada una de las columnas de las Tablas 5.11 a la 5.18.

El comportamiento que presentan los botones de soldadura es un incremento en el tamaño del botón conforme se aumenta la corriente y los ciclos de soldadura, debido a

que a la umentar el tiempo de soldadura se concentra más calor en la interfase de las láminas y, aunado con los incrementos en la corriente, esta generación de calor contribuye al crecimiento gradual de los diámetros de los botones.

Tab	ola 5.11 Diámet	ro de los bot	ones de soldad	lura		
<u> </u>	Tiemp	o de sostení	miento HT= 5	ciclos		
Corriente	Tie	mpo de solda	adura WT (ciclo	os)		
I (kA)	10	13	16	19		
- ()	D _B (mm)					
8	Sin fusión	6.9	7.0	7.3		
9	Sin fusión	7.4	7.5	7.8		
10	7.0	7.7	7.9	7.9		
11	7.5	8.0	8.2	8.4		
12	7.9	8.4	8.3	-		
13	8.1	-	-	-		

	Tabla 5.12 Diám	netro de los bo	tones de soldad	ura		
	,	HT= 30 ciclo	S			
··· · · · · · · · · · · · · · · · · ·		W	/T			
I (kA)	10	13	16	19		
I (MA)	D _B (mm)					
8	Sin fusión	7.0	7.1	7.0		
9	Sin fusión	7.1	7.9	7.4		
10	7.0	7.9	8.1	7.8		
11	7.4	8.1	8.4	8.5		
12	7.8	8.4	8.5	-		
13	8.2	8.6		_		

Donde 1 ciclo = 1/60 seg.

En el punto 4.5.1 del Capítulo IV se especificó que los botones serían aceptables siempre y cuando sus diámetros fueran iguales o mayores que el diámetro del núcleo establecido en 5.6 mm. En las Tablas 5.11 y 5.12 se muestra que todos los valores en los diámetros son mayores a 5.6 mm, por lo que los botones se consideran aceptables, pero

si se observa detalladamente en las Tablas para 10 ciclos de soldadura los diámetros son muy pequeños y esto se puede visualizar mejor en la Figura 5.9, de 13 a 19 ciclos de soldadura los valores se encuentran en un área común a diferencia de los valores de 10 ciclos de soldadura que están situados por debajo de las líneas de los demás ciclos de soldadura, probablemente por el tiempo de soldadura tan pequeño que se aplicó.

Diámetro del botón de soldadura

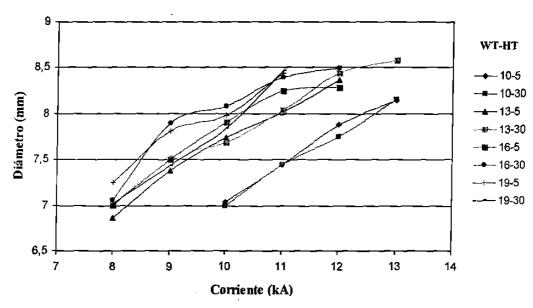


Figura 5.9 Gráfica del diámetro del botón a 5 y 30 ciclos de sostenimiento.

5.4.2 Secuencia de crecimiento de los botones de soldadura

Las Figuras 5.10 a la 5.17 muestran la secuencia del crecimiento de los botones de soldadura impresos en la lámina conforme la corriente se fue incrementando a los distintos tiempos de soldadura y de sostenimiento. Se puede apreciar que para bajas corrientes la impresión del electrodo en la lámina no es tan notable en comparación a altas corrientes, causado por el calor total producido en la interfase lámina-lámina.

El análisis de las Figuras 5.10 y 5.11 permite apreciar la presencia de áreas de oxidación en los botones soldados a 12 y 13 kA respectivamente. En la Figura 5.13 hay oxidación en los botones de 11, 12 y 13 kA, para la Figura 5.14 la oxidación se presenta en 11 y 12 kA y en la Figura 5.15 los botones de 10, 11 y 12 kA también muestran oxidación, así

como también en los botones a 9, 10 y 11 k A de la Figura 5.17. La o xidación en el material puede deberse al calentamiento por la excesiva generación de calor. También se aprecian algunas zonas donde se presenta una especie de acumulación de material, sobre todo en el centro del botón, probablemente esto se deba al contacto del electrodo con la lámina y al calor generado que provocara una aleación entre estos dos y la transferencia de tal material hacia la superficie de la lámina.

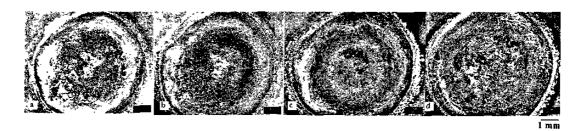


Figura 5.10 WT= 10 ciclos, HT= 5 ciclos, I= a) 10 kA, b) 11 kA, c) 12 kA y d) 13 kA.

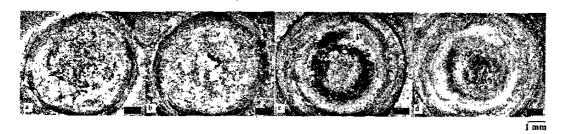


Figura 5.11 WT= 10 ciclos, HT= 30 ciclos, I= a) 10 kA, b) 11 kA, c) 12 kA y d) 13 kA.

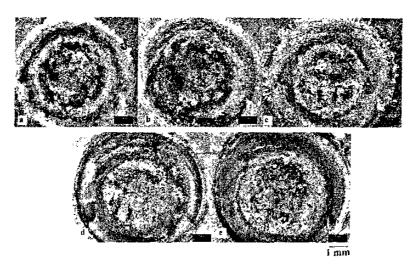


Figura 5.12 WT= 13 ciclos, HT= 5 ciclos, I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA y e) 12 kA.

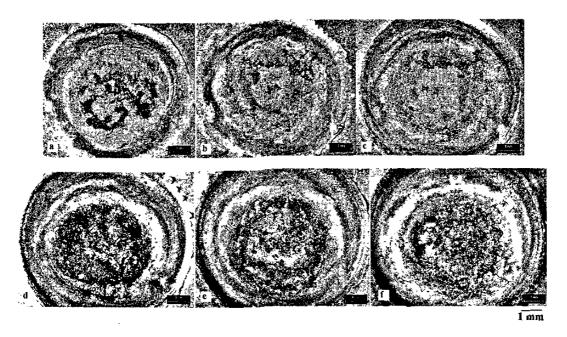


Figura 5.13 WT= 13 ciclos, HT= 30 ciclos, I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA, e) 12 kA y f) 13 kA.

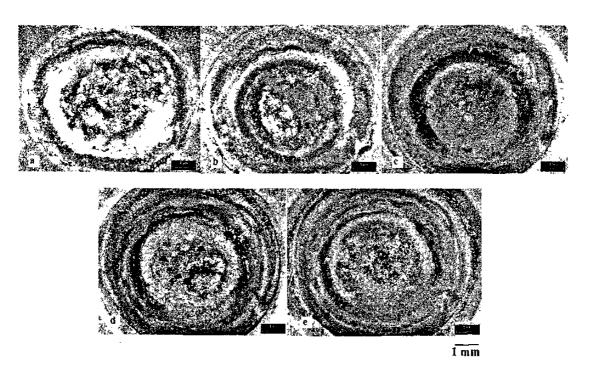


Figura 5.14 WT= 16 ciclos, HT= 5 ciclos, I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA y e) 12 kA.

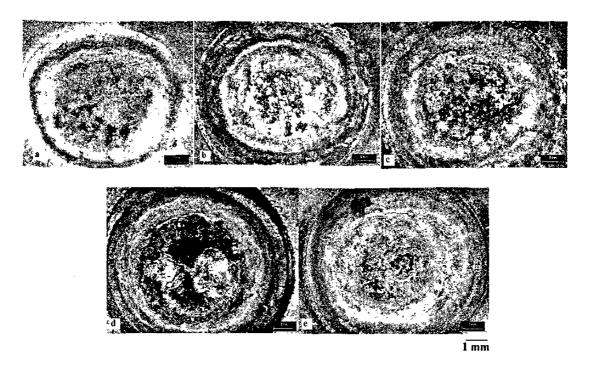


Figura 5.15 WT= 16 ciclos, HT= 30 ciclos, I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA y e) 12 kA.

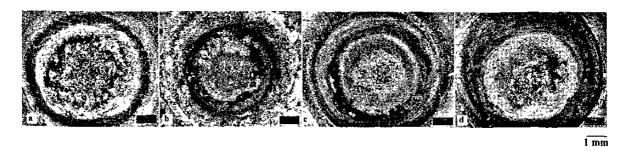


Figura 5.16 WT= 19 ciclos, HT= 5 ciclos, I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA y d) 11 kA.

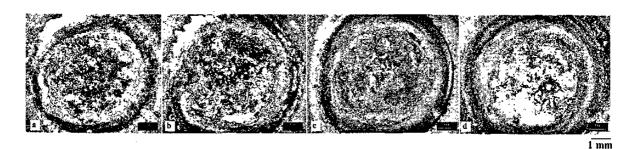


Figura 5.17 WT= 19 ciclos, HT= 30 ciclos, I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA y d) 11 kA.

5.4.3 Defectos en los botones de soldadura

Se presentaron fallas por agrietamiento en los botones de soldadura. La Figura 5.18 muestra algunas de las grietas más severas que se encontraron en el análisis visual de los puntos de soldadura.



Figura 5.18 Grietas en los botones de soldadura, a) WT= 16 ciclos, HT= 5 ciclos, I= 12 kA, b) WT= 16 ciclos, HT= 30, I= 12 kA y c) WT= 13 ciclos, HT= 30 ciclos, I= 13 kA.

La Tabla 5.13 r esume los valores de corriente, tiempos de soldadura y sostenimiento donde se presentaron agrietamientos en la superficie del botón de soldadura, los cuadros resaltados presentan las condiciones donde se localizaron grietas y los cuadros resaltados en el color más intenso pertenecen a las condiciones donde hubo grietas y además expulsión de material.

Se observa que los agrietamientos se manifiestan a altos valores de corriente y, la mayoría, a tiempos de soldadura también altos lo que provoca el excesivo calentamiento de las superficies en contacto y es posible que la fuerza del electrodo sobre las láminas influya a la aparición de tales grietas, ya que si el material tiene una alta temperatura y la presión que se ejerce es demasiado alta se estaría causando un colapso y una gran deformación superficial. Para el WT-HT de 10-5 ciclos y 12 kA, aunque no es expulsión se podría decir que el botón fue susceptible a agrietarse por el rápido enfriamiento que experimentó ocasionando algún esfuerzo residual en la superficie. En el caso del WT-HT de 13-30 y 8 kA se pudo haber calentado demasiado debido a un alto WT y HT.

		3 Prese	ncia de	grietas en	los bo	tones de s	oldadu	ra.
			* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	WT-HT	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	······································	
I	10-5	10-30	13-5	13-30	16-5	16-30	19-5	19-30
8		 -						1
9	-	_						
10					V. V			
11		:					HE STATES	
12	11 1 14 1 14 - 1 - 14 - 15		,,				-	-
13					-	-	_	_

5.4.4 Núcleos de soldadura

Se midieron los diámetros de los núcleos de soldadura, los cuales se encuentran en las Tablas 5.14 y 5.15 para HT de 5 y 30 ciclos respectivamente. De acuerdo al criterio de evaluación e stablecido e n e l p unto 4.5.2 e l diámetro mínimo del núcleo de soldadura debe ser de 5.6 mm. De nuevo, se observa que a bajos valores de corriente los diámetros son pequeños aun cuando son iguales o mayores al diámetro mínimo aceptable. Para los dos tiempos de sostenimiento utilizados se aprecia que varían muy poco, lo que se puede ver reflejado en las curvas correspondientes de la Figura 5.19.

Т	Tabla 5.14 Diámetro de los núcleos de soldadura					
HT= 5 ciclos						
WT						
I (kA)	10	13	16	19		
- (K.)	D _N (mm)					
8	Sin fusión	5,6	5.8	5.8		
9	Sin fusión	6.4	7.1	7.9		
10	5.8	7.4	7.8	8.5		
11	6.6	7.9	8.2	7.8		
12	7.4	7.9	7.9			
13	8.0	-	-	-		

Та	Tabla 5.15 Diámetro de los núcleos de soldadura					
	H	T= 30 ciclos				
WT						
I (kA)	10	13	16	19		
- (IC/I)	D _N (mm)					
8	Sin fusión	6.0	5.7	6.1		
9	Sin fusión	6.6	7.5	6.8		
10	5.8	7,2	8.1	7.7		
11	6.7	8.1	8.4	7.9		
12	7.6	7.9	8.0	_		
13	7.9	8.3	-	-		

Diámetro del núcleo de soldadura

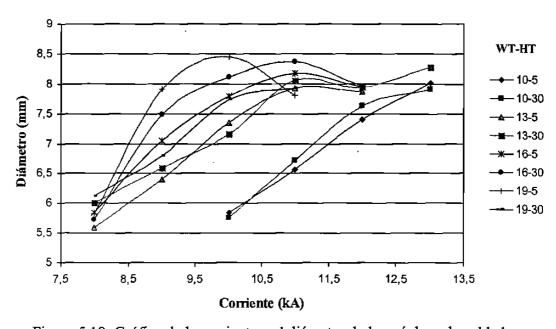


Figura 5.19 Gráfica de la corriente y el diámetro de los núcleos de soldadura.

Se graficó la variación de la corriente con respecto al diámetro del núcleo de soldadura, que se presenta en la Figura 5.19. Para WT de 10 ciclos a HT de 5 y 30 ciclos se aprecia que el diámetro se incrementa conforme aumenta la corriente, este comportamiento también lo presenta el WT-HT de 19-30 ciclos. Para WT-HT de 13-5, 16-5, 16-30 y 19-5 ciclos las curvas respectivas en la Figura 5.19 presentan un comportamiento de un punto máximo seguido de una caída de las mismas. Por último se muestra que para un

WT de 13 ciclos y HT de 30 ciclos la curva sube gradualmente y después baja un poco y finalmente se dispara de nuevo hacia arriba. También se observa que en WT de 10 ciclos las dos curvas se separan de las demás debido a los valores de los diámetros, lo que indica que se pudo haber obtenido una fusión pobre en estas condiciones de soldadura.

En las Tablas 5.16 y 5.17 se presentan los porcentajes de indentación de los electrodos en la lámina para 5 y 30 ciclos de sostenimiento respectivamente. En el punto 4.5.2 se especificó que para que fueran aceptables los puntos de soldadura la indentación no debe de sobrepasar el 30%.

Ta	abla 5.16 Inde	ntación en	la lámina (%	6).		
	HT= 5 ciclos					
I (kA)		WT				
	10	13	16	19		
8	Sin fusión	5.4	4.8	5.5		
9	Sin fusión	5.8	7.2	9.9		
10	5.3	7.6	10.5	12.8		
11	5.2	20.1	20.2	30.3		
12	6.9	24.6	21.0	_		
13	10.7			_		

Tabla 5.17 Indentación en la lámina (%).						
		HT= 30 ciclos				
I (kA)		WT				
I (KA)	10	13	16	19		
8	Sin fusión	4.6	3.8	3.7		
9	Sin fusión	4.5	5.5	5.8		
10	4.6	5.3	8.9	8.4		
11	4.2	17.9	9.4	19.4		
12	5.8	16.2	28.4	-		
13	15.7	25.8	-	-		

Según la Tabla 5.16, para un WT-HT de 19-5ciclos la indentación sobrepasa el 30% a una corriente de soldadura de 11 kA, a la cual se presentó la expulsión de material. Esta condición de prueba no es aceptable, el electrodo penetró la lámina demasiado, esto pudo haber causado la expulsión de material debido a la alta corriente, alto tiempo de soldadura y el poco tiempo de enfriamiento.

Para los valores de indentación obtenidos con 30 ciclos de sostenimiento, en la Tabla 5.17, para 10 ciclos de soldadura la indentación aumenta gradualmente desde 10 hasta 12 kA y luego se dispara un poco en 13 kA de corriente, en 13 ciclos de soldadura el aumento de indentación de 8 a 10 kA es bajo pero luego en 11 kA se dispara y no varía mucho para 12 kA y en 13 kA de corriente vuelve a aumentar considerablemente. Para 16 ciclos de soldadura el aumento de la indentación es gradual desde 8 hasta 11 kA para luego dispararse hacia arriba en 12 kA y finalmente para 19 ciclos de soldadura el comportamiento es gradual de 8 a 10 kA y hay un aumento notable en 11 kA de corriente aplicada.

Indentacion del Electrodo

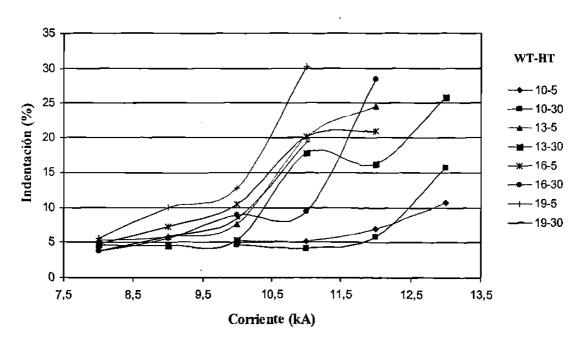


Figura 5.20 Gráfica del porcentaje de indentación con respecto a la corriente aplicada.

La Figura 5.20 muestra la gráfica de los porcentajes de indentación con respecto a la corriente. Como se había mencionado, en el comportamiento del WT-HT de 10-5 ciclos, la indentación aumenta de forma gradual en todos los valores de corriente, pero para WT de 13, 16 y 19 ciclos al llegar a la corriente de 10 kA el aumento es gradual y a 11 kA los porcentajes de indentación se disparan considerablemente. Este tipo de comportamiento puede atribuirse a que la corriente aplicada, que circula a través del material, sea muy alta y también se esté concentrando el calor en la interfase de las láminas que permita que fluya plásticamente el material de tal manera que la presión no sea suficiente para mantener el equilibrio mecánico y se origine un colapso que tenga como resultado la expulsión de material y por lo tanto la pérdida en masa del mismo, que se ve reflejado en las imágenes de los núcleos de soldadura que se presentan más adelante.

Las Tablas 5.18 y 5.19 muestran los porcentajes de penetración de la soldadura a 5 y 30 ciclos de sostenimiento con respecto al espesor original de la lámina y su gráfica se encuentra representada en la Figura 5.21.

El porcentaje mínimo de penetración se había establecido en 20% en el punto 4.5.2, según las tablas 5.18 y 5.19 se cumple este criterio en todos los casos.

	.18 Penetración spesores origin		_		
		HT= 5	ciclos		
I (kA)	WT (ciclos)				
I (KA)	10	13	16	19	
8	Sin fusión	65.9	61,4	66.6	
9	Sin fusión	71.4	65.9	76.6	
10	64.0	71.1	79.0	74.9	
11	68.5	62.9	68.0	56.2	
12	68.9	61.1	65.8		
13	72.9	-	=	-	

	19 Penetración spesores origin		-			
		HT= 30 ciclos				
I (kA)	-	WT (ciclos)				
	10	13	16	19		
8	Sin fusión	72.5	65.2	68.5		
9	Sin fusión	73.7	78.9	73.9		
10	58.5	77.5	81.8	76.7		
11	75.6	71.3	79.2	63.7		
12	77.7	69.9	55.3	-		
13	70.7	60.2	-	_		

Penetración en la soldadura en base a los espesores originales de las láminas

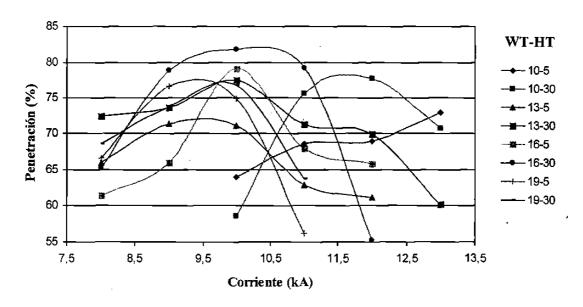


Figura 5.21 Gráfica del porcentaje de penetración en la soldadura con respecto a la corriente aplicada.

En la Figura 5.21, para 10 ciclos de WT y 5 de HT, el comportamiento de la penetración es de un aumento gradual según se incrementa la corriente, pero para los demás valores de tiempos de soldadura el comportamiento es parecido, en las curvas se aprecia un aumento en porcentaje de penetración alcanzando un máximo y después decaen

bruscamente las curvas. Esto se puede deber a que se está presentando una penetración tan grande por parte del electrodo que provoca tal deformación y adelgazamiento en la zona de fusión y resulta en un descenso muy marcado en las curvas graficadas en la Figura 5.21.

Para observar el comportamiento de penetración real en la soldadura se obtuvieron valores del espesor final de las láminas soldadas y del núcleo mostradas en las Tablas 5.20 y 5.21; se utilizaron las fórmulas descritas en el Capítulo IV para obtener la penetración con los nuevos valores medidos mostrados en la Figura 5.22.

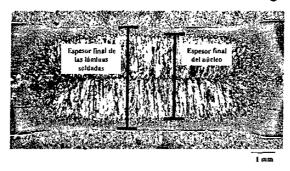


Figura 5.22 Medición de la penetración real en la soldadura.

En las Tablas 5.20 y 5.21 se observa que se está alcanzando una penetración máxima de 91% y el crecimiento es gradual, mientras más alta sea la corriente el espesor del núcleo será mayor por tanto calor que se concentra en la zona de fusión y el tiempo de enfriamiento aplicado. Para apreciar mejor este comportamiento la Figura 5.23 muestra los valores graficados.

		HT= 5	ciclos		
1 (kA)		WT (ciclos)			
	10	13	16	19	
8	Sin fusión	72.4	61.3	61.2	
9	Sin fusión	78.5	75.6	83.0	
10	60.3	74.8	87.7	84.9	
11	67.0	86.8	89.9	89.8	
12	70.1	87.6	88.5	-	
13	80.0	—	=	_	

Tabla 5	5.21 Penetració	n real en la	a soldadura	ı (%).
		HT= 5 e	iclos	
I (kA)		WT (cic	los)	
	10	13	16	19
8	Sin fusión	73.2	64.7	69.0
9	Sin fusión	81.3	83.7	76.5
10	55.5	84.6	88.3	79.3
11	68.3	88.1	85.9	81.8
12	80.9	86.6	91.6	
13	86.3	90.7	-	-

Penetración en la Soldadura

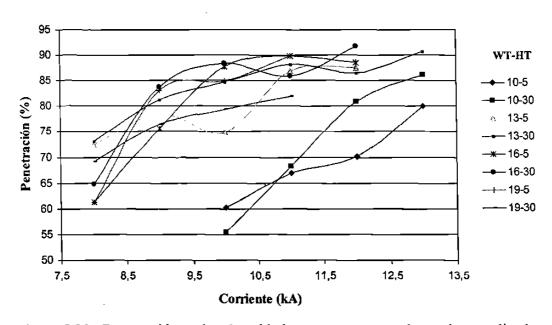


Figura 5.23 Penetración real en la soldadura con respecto a la corriente aplicada.

Nuevamente se observa en la Figura 5.23 que los WT de 10 ciclos se encuentran separados de los demás WT y la penetración es menor aun a valores altos de corriente, comparados con el comportamiento de los otros WT. También se observa que se alcanzan valores de penetración superiores al 90%, lo que indica que se está generando una degradación considerable en la zona de fusión, la cual se puede apreciar en las imágenes tomadas de los núcleos de soldadura que se presentan mas adelante. Aun cuando en el Capítulo IV no se especifica hasta que porcentaje de penetración es

aceptable, el análisis microestructural de la zona de fusión será el que permita decidir cuando la soldadura es inaceptable, ya que se podrá observar con detalle las deformaciones severas que experimenta el material al ser sometido a condiciones no aptas para el buen desempeño de tales puntos de soldadura.

Se realizaron mediciones de dureza Vickers, Figura 5.24, en forma diagonal sobre el núcleo de soldadura como se describe en el Capítulo IV, las Tablas 5.22 y 5.23 muestran los valores promedio de las indentaciones realizadas en los núcleos.

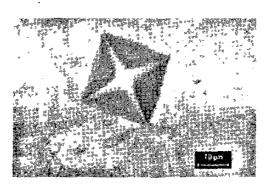


Figura 5.24 Dureza Vickers en la zona de soldadura, microscopio óptico 400x.

Tabla	5.22 Microc	lurezas del n	úcleo de sole	dadura.
<u> </u>		HT= 5	ciclos	
# Punto	10	13	16	19
		Microdu	reza HV	
1	208.4	172.1	160.6	233.4
2	320.9	237.7	219.1	247.6
3	304.8	260.7	260.3	325.6
4	318.9	271.1	246.0	316.0
5	317.1	271.2	290.5	325.2
6	305.7	272.9	273.3	327.3
7	311.3	282.2	267.9	330.2
8	306.2	276.5	279.9	332.5
9	325.3	258.7	205.0	322.3
10	291.6	239.2	232.3	324.4
11	222.3	186.2	190.6	311.9
12	197.5	158.6	159.4	258.0

Tabla 5.2	3 Microdu	rezas del nú	icleo de sold	ladura.
		HT= 3	0 ciclos	
# Punto	10	13	16	19
		Microdu	reza HV	
1	220.9	175.8	177.9	237.9
2	316.7	273.0	317.8	401.8
3	336.0	264.2	334.9	380.6
4	340.9	266.8	296.6	384.2
5	338.0	271.8	303.0	357.3
6	334.7	277.0	299.1	392.8
. 7	357.6	266.3	323.9	397.9
8	335.9	283.3	309.1	390.3
9	352.8	286.4	304.5	398.4
10	284.0	252.9	238.6	388.2
11	321.1	204.7	271.8	392.6
12	208.0	161.2	218.7	344.6

La Figura 5.25 muestra el comportamiento del patrón de microdureza realizado en el núcleo de soldadura en diferentes puntos del mismo. El análisis de las curvas muestra que el comportamiento del cambio de microdureza en el núcleo de soldadura es similar para todos los tiempos de soldadura, primero presentan un incremento considerable, luego se mantienen relativamente constantes y después disminuyen gradualmente. Se están presentando valores de microdureza más bajos que el del metal base en las esquinas del HAZ, lo que puede estar influenciado por el calor que se transfiere hacia esas zonas y que está provocando un efecto de recocido y refinamiento de grano, lo que hace al material más suave.

También es notable que existe una gran diferencia entre las curvas de 19 ciclos de WT, la de 30 ciclos de HT se encuentra desplazada por encima de todas las demás, además las curvas con 5 ciclos de HT están ubicadas debajo de las de 30 ciclos, por lo que la microestructura se endurece cuando se aplican tiempos de enfriamiento largos. Además los WT que presentan mayor endurecimiento son de 19 ciclos seguido de 10, 16 y

finalmente de 13 ciclos con HT de 5 y 30 ciclos, que podría estar siendo causado por la presencia de fases duras en la microestructura como la martensita. Los tiempos de enfriamiento aplicados influyen en la diferencia de durezas y es probable que contribuyan a que el material exhiba sensibilidad al tiempo de sostenimiento.

Microdureza en el núcleo de soldadura

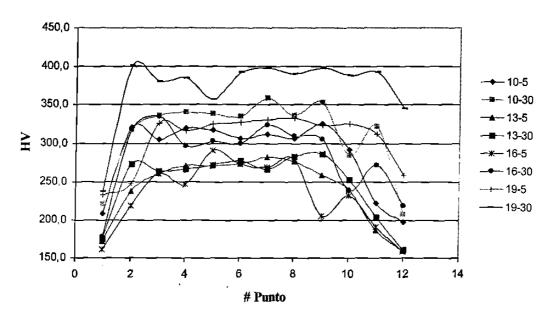


Figura 5.25 Gráfica de los valores de dureza Vickers en diferentes puntos del núcleo de soldadura.

5.4.5 Secuencia de crecimiento de los núcleos de soldadura

Las Figuras 5.26 a la 5.33 muestran el crecimiento de los núcleos de soldadura conforme la corriente aplicada se fue incrementando.

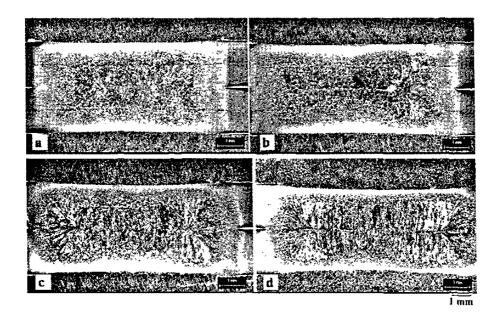


Figura 5.26 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 10 ciclos, HT= 5 ciclos I= a)10 kA, b) 11 kA, c) 12 kA y d) 13 kA.

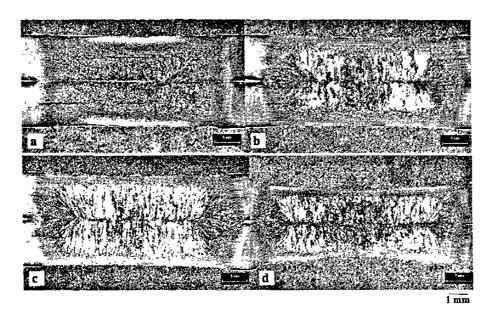


Figura 5.27 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 10 ciclos, HT= 30 ciclos I= a)10 kA, b) 11 kA, c) 12 kA y d) 13 kA.

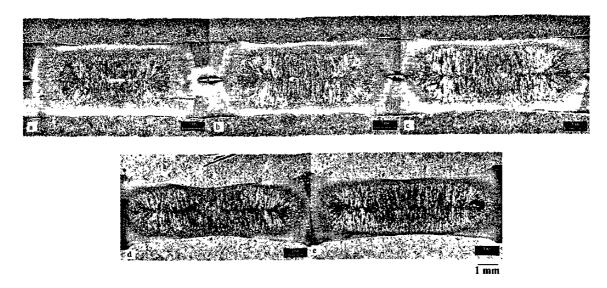


Figura 5.28 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 13 ciclos, HT= 5 ciclos I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA y e) 12 kA.

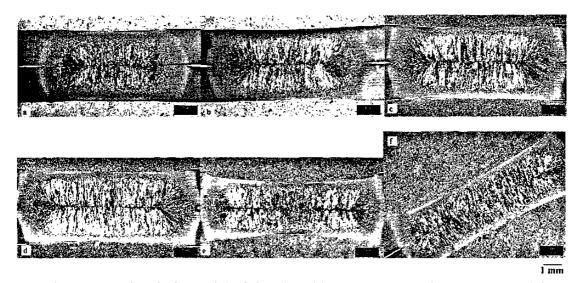


Figura 5.29 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 13 ciclos, HT= 30 ciclos I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA, e) 12 kA y f) 13 kA.

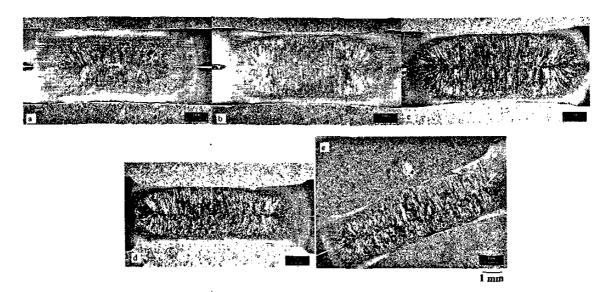


Figura 5.30 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 16 ciclos, HT= 5 ciclos I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA y e) 12 kA.

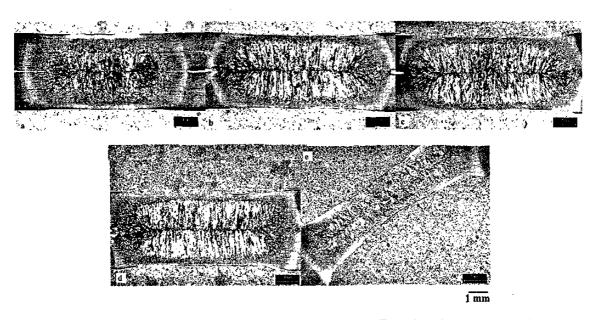


Figura 5.31 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 16 ciclos, HT= 30 ciclos I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA, d) 11 kA y e) 12 kA.

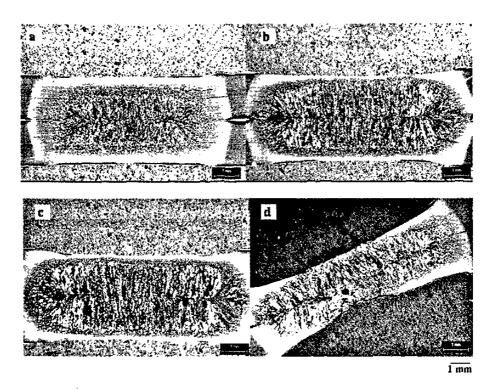


Figura 5.32 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 19 ciclos, HT= 5 ciclos I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA y d) 11 kA.

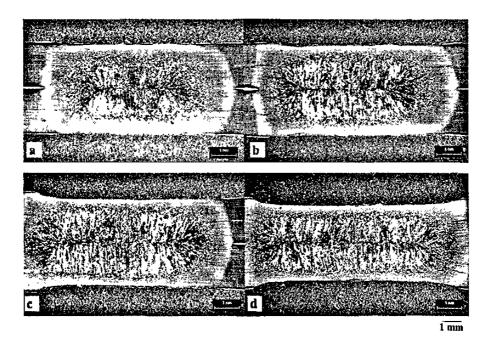


Figura 5.33 Crecimiento del núcleo de soldadura WT= 19 ciclos, HT= 5 ciclos I= a) 8 kA, b) 9 kA, c) 10 kA y d) 11 kA.

En la Figura 5.27a se observa que a un valor de corriente de 10 kA la fusión entre las dos láminas no se completó, se puede apreciar una pequeña separación entre ellas, lo mismo sucede en la Figura 5.22b donde tampoco alcanza a completarse la fusión quedando un pequeño hueco entre las dos láminas. En la Figura 5.28a y 5.28b se presentaron poros interfaciales y en la Figura 5.29a la fusión no fue completa al igual que en las Figuras 5.30a y 5.31a, donde la primera exhibe un poro en la interfase lámina-lámina. En las Figuras 5.32e y 5.32d se presentaron grietas muy severas. A bajas corrientes se están presentando porosidades debido a la fusión incompleta que experimentan las láminas. Los poros encontrados a altas corrientes, al igual que las grietas, son causados por la excesiva presión de los electrodos y el calentamiento excesivo en la zona de fusión.

5.4.6 Microestructura del núcleo de soldadura

En la Figura 5.34 se muestran serie de imágenes donde se comparan los centros de los núcleos de soldadura efectuados a 19 ciclos de WT con 5 y 30 ciclos de HT, con el fin de analizar el cambio tan marcado en las microdurezas presentadas en las Tablas 5.22 y 5.23.

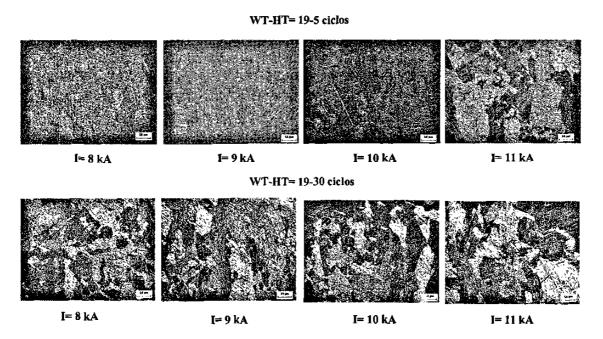


Figura 5.34 Microestructura de los centros de núcleos de soldadura.

Comparando el crecimiento que siguen los núcleos de soldadura en la Figura 5.34, para un HT= 5 ciclos desde 8 hasta 10 kA se observa que la microestructura es relativamente fina, comparada con la obtenida a 11 kA. En el HT= 30 ciclos las estructuras presentan una estructura mas gruesa, para los dos tiempos de sostenimiento se observa una microestructura tipo acicular. Este cambio en microestructura concuerda con la diferencia en microdurezas obtenidas en las Tablas 5.22 y 5.23. De nuevo se observa que el material es sensible al tiempo de enfriamiento.

5.4.7 Defectos en los núcleos de soldadura

La Figuras 5.35 muestra algunas de las grietas más severas que se presentaron en los núcleos de soldadura a diferentes condiciones de prueba, las imágenes fueron tomadas con microscopio óptico.

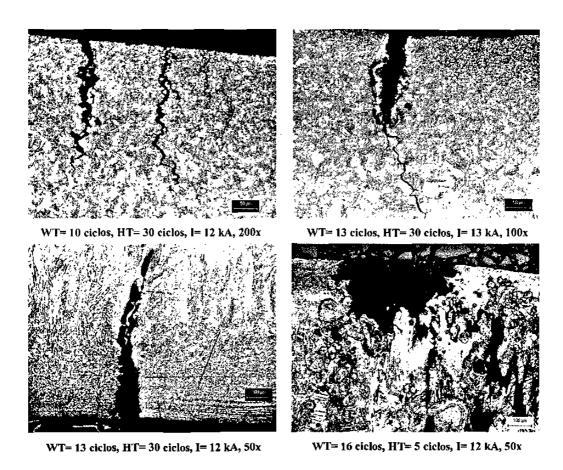


Figura 5.35 Grietas en los núcleos de soldadura a distintas condiciones de prueba.

Visualmente se aprecia que las grietas se encuentran localizadas sobre la zona de contacto electrodo-lámina y la propagación de tales grietas es hacia el centro de la interfase lámina-lámina, estos defectos son causados por la presión ejercida de los electrodos sobre el material y la alta corriente. Pudiera darse el caso de que durante la solidificación del metal fundido se estén generando demasiados esfuerzos residuales y al momento en que el enfriamiento esté llegando a su fin el material no resista la presión y, por lo tanto, genere la grieta. Otro fenómeno que se suscita es la expulsión de material, a excepción de la imagen inferior izquierda de la Figura 5.35 la expulsión se presentó y la degradación de la soldadura fue muy severa como se puede apreciar en la imagen inferior derecha de la Figura 5.35, también debido a los valores tan altos de calor y corriente y la presión del electrodo.

La Tabla 5.24 resume las condiciones a las cuales se encontraron grietas en los núcleos de soldadura. Los espacios sombreados indican la presencia de grietas, el color más obscuro se refiere a la presencia de expulsión de material. El agrietamiento se está experimentando a corrientes muy altas y en algunas condiciones donde hubo expulsión, lo que indica de nuevo la gran concentración de calor en la zona provocada por el flujo de corrientes muy altas.

7	Tabla 5.24 Presencia de grietas en los núcleos de soldadura.					a.		
				WT-HT			······································	
I	10-5	10-30	13-5	13-30	16-5	16-30	19-5	19-30
8	_	_						
9	-	-						
10								
11	* .	The second secon		A. A. C.				
12	3. 2		1		eresia Karad		-	-
13			_		-	-	_	-

En la Figura 5.36 se presentan porosidades en algunos núcleos de soldadura con distintas condiciones de prueba. Las imágenes presentan defectos localizados en la línea central de la fusión. En los poros formados con un HT= 5 ciclos fueron causados por el poco tiempo de enfriamiento proporcionado al metal fundido y al desplazamiento incompleto del recubrimiento de Zn durante el calentamiento, el cual quedó atrapado en la etapa de enfriamiento provocando la formación de la cavidad. En el poro formado con HT= 30 ciclos se aprecia claramente material atrapado en el centro del mismo debido a la fusión incompleta del metal fundido.

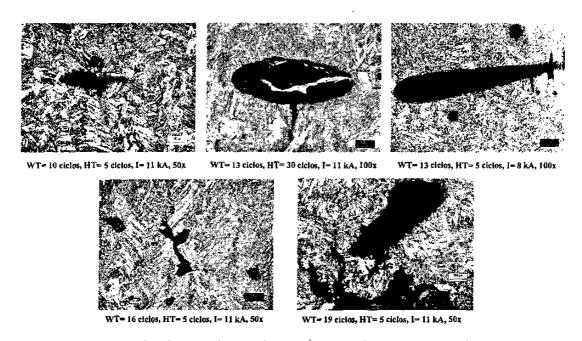


Figura 5.36 Porosidades en núcleos de soldadura a diferentes condiciones de prueba.

Al igual que en las grietas se realizó un estimado de los poros que se presentaron en los núcleos de soldadura presentado en la Tabla 5.25, donde se observa que en los valores de WT de 13, 16 y 19 ciclos con HT de 5 ciclos los poros indican poca fusión debido a la utilización de bajas corrientes. Para el WT-HT de 10-5 ciclos los poros aparecen a corrientes muy altas al igual que en el WT-HT de 13-30 ciclos y WT-HT de 19-5 ciclos a la corriente donde se presentó la expulsión del material, que indican la presencia de mucho calor concentrado en la zona de fusión causado por las altas corrientes.

	Tabla 5.25 Presencia de poros en los núcleos de soldadura.					l .		
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	***************************************	WT-HT	9 * · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
I	10-5	10-30	13-5	13-30	16-5	16-30	19-5	19-30
8	-	-						······································
9	-	_		:				
10								
11	, , ,	سيسيف فيستها بهريوات الأولى اردينها التاليق و						
12	- 18th ASI	gagge, coloning magazing or otherwaying gaggers, co-co-		and the second s		reference recent seasons in a sea on the first than the	-	
13			-		-	-	-	-

En la Figura 5.37 se presenta una imagen de un núcleo de soldadura que muestra la transferencia de material a la zona de contacto electrodo-lámina. Por la morfología de crecimiento dendrítico de la adherencia que aparentemente se ve superficial, puede ser que este material se haya formado en la cara del electrodo debido al contacto electrodo-recubrimiento de Zn al inicio del calentamiento de las láminas y fuera desprendido durante la etapa final de enfriamiento y separación del electrodo y la lámina.



Figura 5.37 Aleación formada en la parte superior del núcleo de soldadura, WT= 13 ciclos, HT= 30 ciclos, microscopio óptico 100x.

Se efectuó el análisis en el SEM de las grietas y poros en algunos núcleos de soldadura. Las Figuras 5.38 a la 5.41 muestran los análisis de tales defectos.

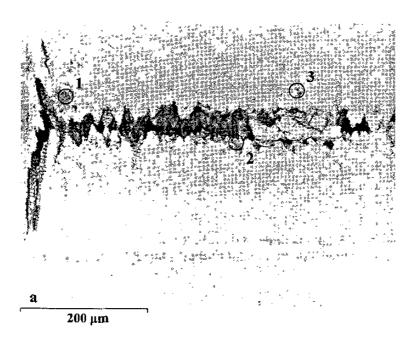


Figura 5.38a Porosidad en un núcleo de soldadura encontrada en la interfase lámina-lámina, WT= 16 ciclos, HT= 5 ciclos, I= 8 kA, SEM a) 200x.

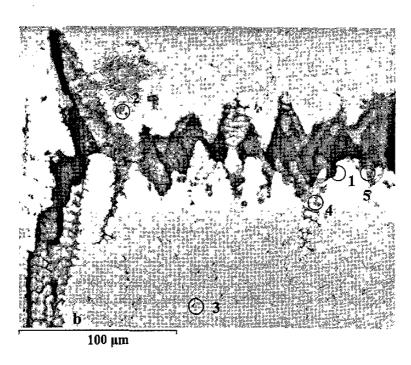


Figura 5.38b Porosidad en un núcleo de soldadura encontrada en la interfase lámina-lámina, WT= 16 ciclos, HT= 5 ciclos, I= 8 kA, SEM, 500x.

En la Figura 5.38b se aprecia el crecimiento de las dendritas en la interfase láminalámina y la insuficiencia de fusión en esta zona causada por el poco tiempo de enfriamiento aunado a la baja corriente aplicada. Se realizó el análisis del espectro de rayos X de las zonas marcadas de la Figura 5.38a mostrado en la Tabla 5.26 y la Tabla 5.27 pertenece a las zonas analizadas de la Figura 5.38b.

	-	ición químic Figura 5.38a.	
Elemento	Co	mposición (%)
Exemento	1	2	3
O	39.01	34.43	33.32
Si	1.02	_	_
Cr	3.59	-	5
Fe	56.39	59.42	61.68
Al	-	1.26	-
Zn		4.9	-

Elemento		Co	mposición (%)	
Elemento	1	2	3	4	5
0	er de ventr _{entere} ntentententententen det un ventre terre ventrententen. V	20.25	33.6	37.71	30.34
Cr	0.47	3.01	1.09	-	_
Mn	2.31	_	0.67	-	1.56
Fe	97.22	76.74	64.64	0.85	62.62
Al		-		59.38	0.54
Zn	-	_	_	2.07	5.24

En la Figura 5.38a se aprecia que se están formando óxidos de Cr, Mn, Fe y Si en las zonas 1 y 3; probablemente debido a la alta temperatura en la zona de fusión se estén oxidando los carburos de Cr y Mn del metal base y algo del Si de la composición química del mismo y el Fe del recubrimiento al momento de la fusión del material. En la zona 2 se detecta la presencia de Al y Zn, esta zona se encuentra localizada cerca de la unión entre las láminas donde la fusión no se completó y el recubrimiento no se desplazó adecuadamente quedando atrapado en la cavidad.

Para la Figura 5.38b también se forman óxidos de Cr, Mn y Fe en las zonas 1, 2 y 3. En las zonas 4 y 5 de nuevo hay presencia de Zn y Al, del recubrimiento, las cuales son zonas cercanas a la formación de las dendritas de la figura, que son causados por el corto tiempo de enfriamiento y la baja corriente que se aplicó.

En la Figura 5.39 se muestra la formación de una grieta con propagación hacia el centro del núcleo. Asimismo la Tabla 5.28 despliega la composición química de las zonas marcadas en la figura.

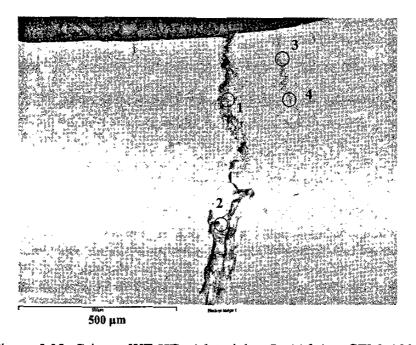


Figura 5.39 Grieta a WT-HT= 16-5 ciclos, I= 11 kA, , SEM, 100x.

Elemento	·	Composid	ción (%)	
Liemento	1	2	3	4
Fe	67.8	59.9	37.83	25.62
Cu	3.81	3.82	47.83	22.69
Zn	28.39	5.48	_	38.64
O		-	14.34	13.05

En las zonas 1 y 2 de la grieta de la Figura 5.39 hay presencia de Fe, Zn del recubrimiento y Cu del electrodo; los contenidos de Fe y Zn disminuyen hacia la punta de la grieta mientras que el Cu se mantiene igual, lo que indica que hubo penetración de Zn líquido del recubrimiento al momento de la solidificación debido a la presión de los electrodos en la lámina. En la zona 3 el Fe, Cu y O se detectan en una zona cercana a la superficie donde se pudo infiltrar Cu del electrodo además de la formación de óxido de Fe. La zona 4, que es la parte interna de la fisura, muestra contenidos de Fe, Cu, Zn y O, de nuevo el Zn del recubrimiento no alcanzó a ser desplazado hacia la superficie por lo que quedó atrapado en la fisura. Por la localización de la fisura ésta debió ser generada por la presión de los electrodos en la lámina.

La Figura 5.40 es una amplificación de la Figura 5.39 donde se presentan otras grietas formadas en el interior del núcleo de soldadura. En las zonas 1 y 2 se muestran óxidos de Fe y Cr, pero en la zona 3 hay presencia de Zn que quedó atrapado debido a que el recubrimiento no fue removido por completo.

Según el análisis químico de la Tabla 5.29 se indica la presencia de óxidos de Cr y Fe, así como también residuos de Zn del recubrimiento encapsulado en las cavidades de la grieta, debido a la alta corriente aplicada y el poco tiempo de enfriamiento que impidió la fusión completa del núcleo.

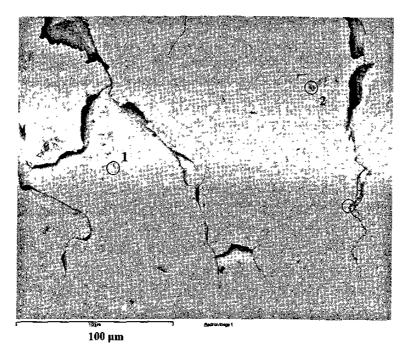


Figura 5.40 Oxidación y agrietamiento en el núcleo, WT-HT= 16-5 ciclos, SEM, 500x.

	-	sición químio Figura 5.40.	a de las
Elemento	Co	mposición (%)
Elemento	1	2	3
O	38.63	18.52	28.29
Cr	2.31	2.99	-
Fe	59.06	78.49	66.56
Zn ·		<u>-</u>	5.15

En la Figura 5.41 se observa un área de un núcleo cercana a la superficie externa donde se presentaron agrietamientos y degradación de material; el análisis químico efectuado en las zonas marcadas de la figura se presenta en la Tabla 5.30. En las zonas 1 y 2 hay presencia de latón formado de la aleación entre el Cu del electrodo y el Zn del recubrimiento, a demás del deterioro superficial c ausado p or la indentación s evera del

electrodo, en la zona 3 se detecta bajo contenido de Zn el cual penetró a un nivel relativamente profundo, no hay Cu por lo que evidencias de formación de latón sólo se dieron en el área del contacto lámina-electrodo, también se encontró Fe y O que sugieren fenómenos de oxidación en el núcleo de soldadura causados por la alta temperatura que se está concentrado en la zona de fusión.



Figura 5.41 Daño severo en núcleo de soldadura, WT-HT= 16-5 ciclos, I= 12 kA, SEM, 100x.

	30 Composicio zonas de la Fig	_	e las
Elemento	Cor	nposición (%	·)
Plemento	. 1	2	3
0	16.15	7.43	33.76
Fe	21.49	73.1	60.77
Cu	29.27	5.37	-
Zn	33.09	14.1	5,47

5.4.8 Condiciones óptimas de parámetros de soldadura

Se realizó un análisis de las Tablas 5.13, 5.24 y 5.25, de las cuales se seleccionaron los valores de corriente donde no se presentaron defectos en los puntos de soldadura; los valores se muestran en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31 Valores de corriente óptimos para la prueba de soldadura.			
HT (ciclos)	WT (ciclos)	I (kA)	
	13	10, 11	
	16	10	
	10	11	
20	13	9,10	
30	16	9, 10	
	19	8-10	

Los defectos presentados en la soldadura fueron muy severos, el material se degradó demasiado, debido a esto los criterios de selección de las corrientes óptimas se realizaron estableciendo como restricción que no se tuviera la presencia de algún defecto, aun siendo muy pequeño, en la soldadura.

5.5 ANALISIS DEL ELECTRODO

Se obtuvo la microestructura de los electrodos utilizados en la prueba, la cual es mostrada en la Figura 5.42, así mismo la Tabla 5.32 contiene la información de la composición química de los electrodos.

Se efectuaron mediciones de dureza Vickers en el material del electrodo así como también en algunas de las capas formadas durante la prueba de soldadura, los valores se

muestran en la Tabla 5.33. La Figura 5.43 muestra las indentaciones realizadas en las fases del corte transversal del electrodo, se utilizó una carga de 50 g.

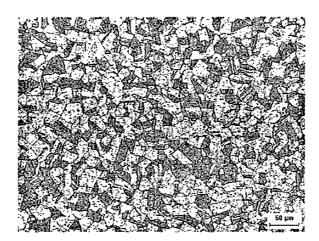


Figura 5.42 Imagen tomada con microscopio óptico de la microestructura del electrodo, 100x.

Elemento	Peso (%)
Cr	1.79
· Zr	0.78
Cu	Bal.

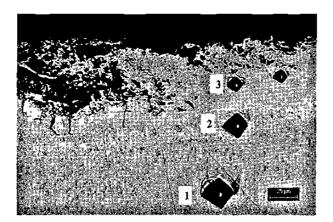


Figura 5.43 Mediciones de dureza Vickers en el electrodo y las capas formadas durante la prueba de soldadura, microscopio óptico, 200x.

Tabla 5.33 Medición de dureza Vickers en el electrodo		
Dureza Vickers (HV)		
75.1 ± 1.8		
118.1 ± 5.9		
275.9 ± 1.5		

Como se observa en la Tabla 5.33, la fase 1 corresponde al metal base del electrodo, en este caso es Cu, el cual es un material dúctil, por lo tanto es el que presenta menor dureza, le siguen los latones formados causados por la aleación con el recubrimiento, los cuales fueron endureciendo la cara del electrodo conforme fueron creciendo. No se realizaron indentaciones en todas las capas debido al espesor tan pequeño.

La Figura 5.44 muestra una imagen tomada en SEM con las fases formadas en la cara del electrodo.

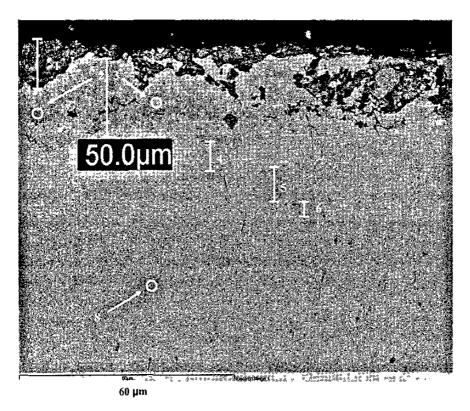


Figura 5.44 Fases formadas en la cara del electrodo, SEM.

Se realizó un análisis químico a las fases marcadas en la Figura 5.44, el cual es mostrado en la Tabla 5.34.

Elemento	Composición (%)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
О	22.04	, 	-	-	_	-	-	-
Al	1.63	-	-	_	-	-	_	-
Cr	0.71		_	_	_	_	0.97	91.34
Mn	2.33		-	-		-	-	-
Fe	8.41	65.45	19.19	1.97	-	_	_	-
Cu	_	_	15.11	31.96	49.04	52.07	97.28	7.88
Zn	64.88	34.55	65.71	66.08	50.96	47.93	-	_
Zr		-	_	-	_	-	1.74	0.78

Al efectuar el análisis de la Figura 5.44 y la Tabla 5.34, la fase 1 corresponde a una adherencia debido al contacto del electrodo con el recubrimiento ya que se encontró contenidos de Fe, Al y Zn, respecto a la detección de Cr y Mn estos podrían estarse transfiriendo del metal base a la capa exterior del electrodo por la alta temperatura concentrada en el contacto del mismo con la lámina. Las fases 2 y 3 están formando una especie de capa de transición, como se observa en la figura, si se analizan los porcentajes de elementos encontrados en las fases se verá que en la fase 2 (obscura) se detectó mayor contenido de Fe que en la fase 1 (clara), lo mismo sucede con el Zn, en la 2 es menor y en la 1 aumenta. En las fases 4, 5 y 6 se observa la variación de los porcentajes, el Cu va en aumento conforme se acerca hacia el metal base, efecto contrario al Zn, el cual disminuye, el Fe solamente se detecta hasta la fase 4 y ya no aparece en las siguientes fases. La fase 7 corresponde al metal base, la composición concuerda con los datos reportados en la Tabla 5.32 y la fase 8 es un precipitado de Cr perteneciente al metal base del electrodo.

Para observar mejor la variación de los porcentajes de los elementos en el electrodo se efectuó un barrido lineal mediante el SEM, el cual se muestra en la Figura 5.45. Se observa como disminuye el Fe desde la capa superior hacia el metal base, asimismo el aumento del Cu y la disminución del Zn, además de los elementos Cr, Mn y O presentes cerca de la superficie.

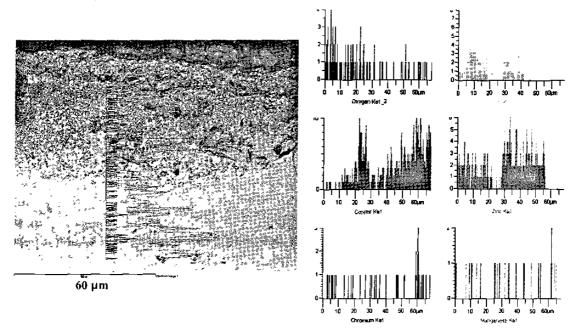


Figura 5.45 Barrido lineal efectuado en las capas formadas en la cara del electrodo.

La Tabla 5.35 describe algunas de las fases con sus respectivas mediciones de espesor. Según los contenidos de Zn en cada una de las fases analizadas se le asignó el tipo de latón correspondiente que se formó en las caras de los electrodos.

Tabla 5.35	Descripción de fases del electrodo.		
Fase	Espesor (µm)	Descripción	
2	15.6	Fase Fe-Zn	
3		Latón γ	
4	9.42	Latón γ	
5	8.1	Latón β'	
6	4.1	Latón β	

En la Figura 5.46 se presentan las imágenes del cambio del electrodo antes y después de la prueba, en la Figura 5.46a y 5.46b se aprecia la capa formada debido a la interacción del electrodo con la lámina, la cual representa los latones descritos anteriormente en la Tabla 5.34.

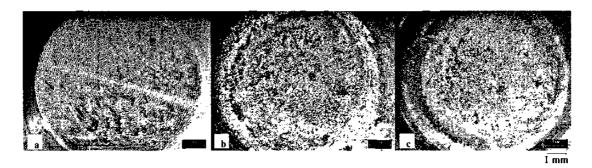


Figura 5.46 a) Cara del electrodo antes de la prueba de soldadura. b) Cara del electrodo superior después de la prueba. c) Cara del electrodo inferior después de la prueba.

Se tomaron las impresiones de los electrodos en una hoja de papel antes del inicio de la prueba y después del término de la misma para analizar el cambio en los diámetros, las impresiones son mostradas en la Tabla 5.36 y las medidas antes y después de la prueba de soldadura se presentan en la Tabla 5.37.

Prueba de	Huella del electrodo				
soldadura	Compuesta	Superior	Inferior		
Antes			0		
Después					

Tabla 5.37 Diámetros de las caras de los electrodos.						
Prueba de	Diámetros de las huellas (mm)					
soldađura	Compuesta	Superior	Inferior			
Antes	7.55 ± 0.03	7.9 ± 0.2	7.7 ± 0.1			
Después	5.95 ± 0.17	6.4 ± 0.3	7.03 ± 0.23			
Reducción del diámetro (%)	21 %	18 %	8 %			

Como se observa en las Tablas 5.36 y 5.37, las impresiones de los diámetros se redujeron debido a las capas formadas durante la prueba, lo que indica que se presentó desgaste en las caras de los electrodos. Este fenómeno de desgaste también puede ser asociado con el incremento en temperatura en la interfase electrodo-lámina, por la resistencia adicional que se crea a medida que las fases de latón y adherencias del recubrimiento de Zn se forman en la cara del electrodo.