Tabla 5.12. – Composición química de las fases formadas en la superficie de los electrodos utilizados en la prueba de calidad de soldadura.

Material	Fase	Elemento (% Peso)		
		Fe	Cu	Zn
Bajo Sb	Aleación Fe-Zn	69 ± 6	5.2 ± 2.4	26 ± 6
	Aleación Fe-Zn	14.2 ± 2.4	21.8 ± 4.4	64 ± 5
	Latón γ	2.1 ± 1.0	35 ± 5	63 ± 5
	Latón β	0	50 ± 5	50 ± 5
	Latón β	0	57 ± 5	43 ± 5
	Metal base	0	100	0
Alto Sb	Aleación Fe-Zn	44.1 ± 3.5	0	55.9 ± 3.5
	Aleación Fe-Zn	18.1 ± 1.9	0	82.0 ± 2.1
	Aleación Fe-Zn	19.6 ± 2.4	0.9 ± 0.6	79.6 ± 3.9
	Aleación Fe-Zn	64 ± 5	6 ± 3	29.7 ± 4.5
	Latón γ	0	34.7 ± 3.5	65.3 ± 4.0
	Latón β	0	51.9 ± 4.4	48.1 ± 4.3
	Latón β	0	54.1 ± 4.5	45.9 ± 4.6
	Metal base	0	100	0

Mediciones para ($\eta = 4$).

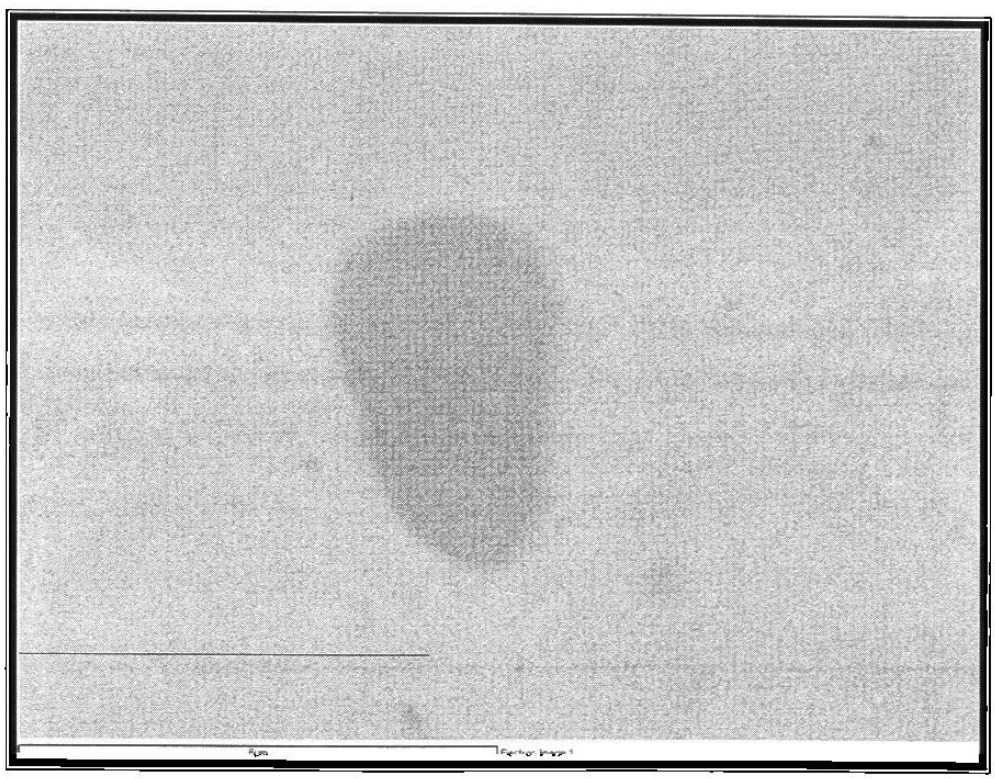

Figura 5.33. – Micrografía de un precipitado de cromo formado en el material base de los electrodos.

5.7 PRUEBAS DE SOLDABILIDAD.

En esta seccion se presentan los resultados obtenidos en la prueba de calidad de la soldadura y la prueba de resistencia del electrodo, así como la posterior caracterización, inspección y evaluación de los puntos en ellas realizados a través de las técnicas mencionadas en el Capítulo 4.

5.7.1 Inspección visual.

La Figura 5.34 muestra la apariencia de puntos de soldadura representativos de la prueba de calidad de soldadura realizados para dos valores de HT (5 y 90 ciclos).

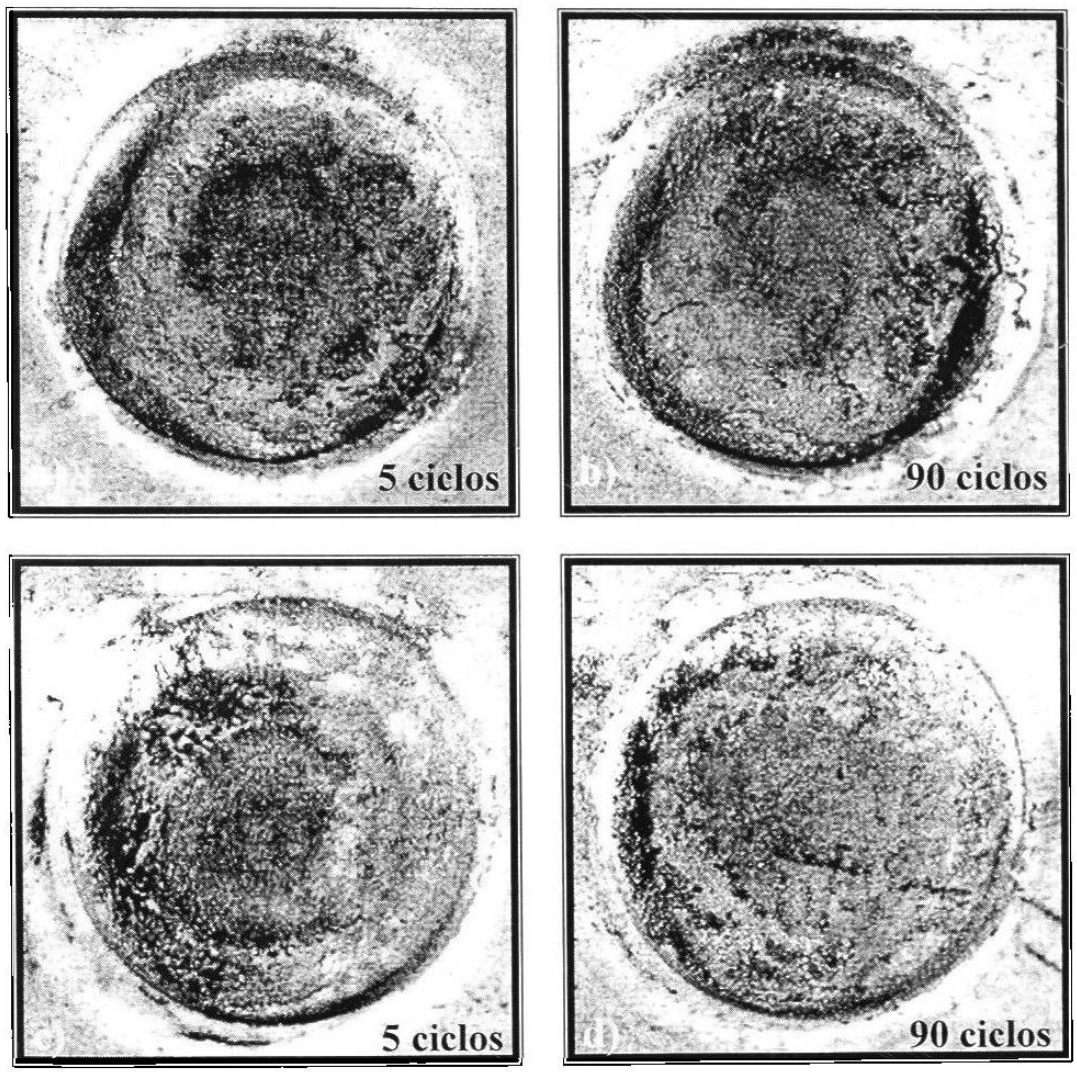

Figura 5.34. – Aspecto superficial de los puntos de soldadura. a) y b) bajo Sb; c) y d) alto Sb. ıel 1, punto 7. b) Panel 3, punto 4. c) Panel 1, punto 5. d) Panel 3, punto 1.

5.7.2 Análisis microestructural.

La Figura 5.35 muestra la microestructura en sección transversal de los botones de soldadura (zona de fusión) para cada tiempo de sostenimiento.

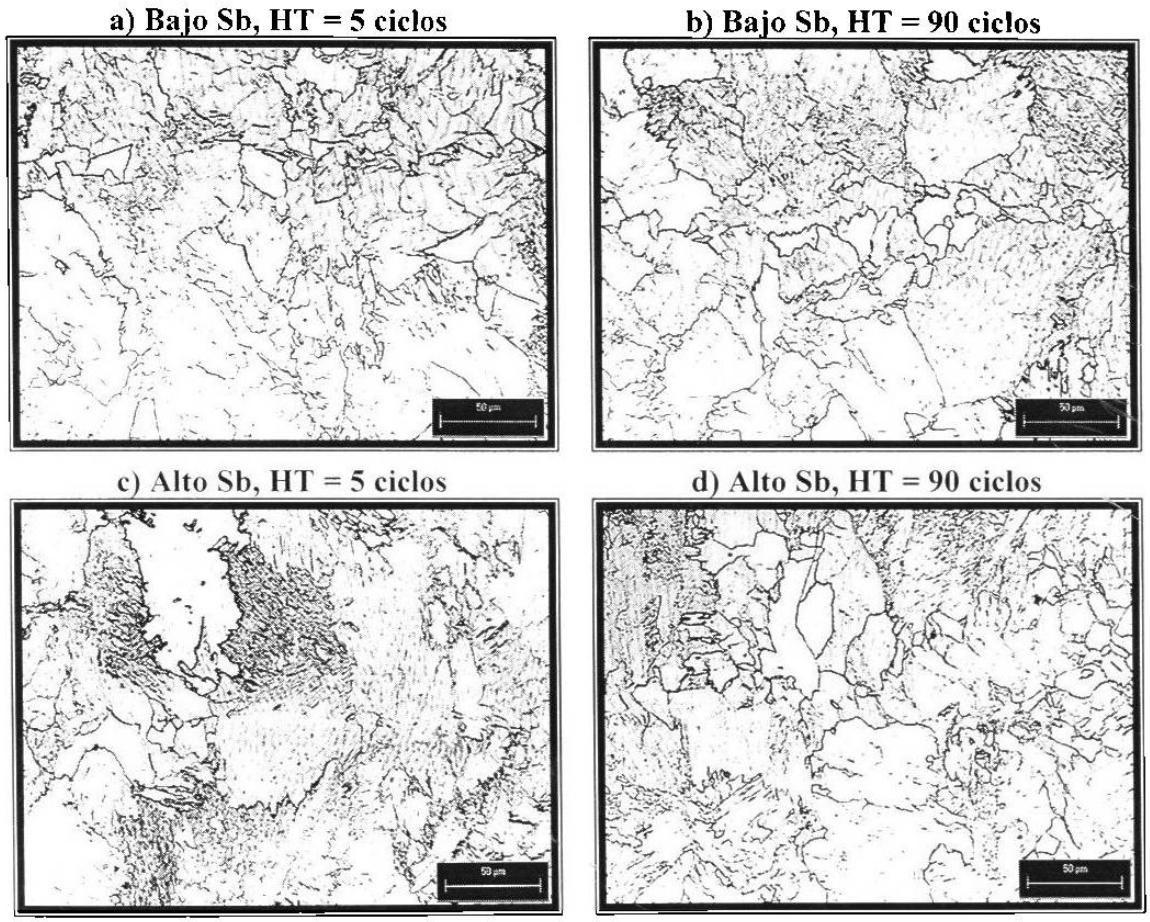

Figura 5.35. – Micrografías de la microestructura de los botones de soldadura. a) Panel 2, punto 4 b) Panel 4, punto 1. c) Panel 2, punto 7. d) Panel 4, punto 4.

5.7.3 Corriente de soldadura.

Las Figuras 5.36 y 5.37 muestran gráficamente la evolución de la corriente de soldadura y el porcentaje de calor suministrados por la máquina soldadora durante las pruebas de calidad de soldadura de los materiales con bajo y alto Sb respectivamente. La corriente utilizada para la realización de los paneles de prueba fue de 7.5kA para la condición de bajo Sb y de 7.9kA en la de alto Sb. Se observa además que el intervalo de operación inicial es mucho mayor en el material con la condición de bajo Sb, al

presentar un intervalo de 4.0kA, con una II_{min} de 4.1kA (D_{min} = 3.42mm) y una II_{max} de 8.1kA ($D_{máx}$ = 6.54mm), mientras que el material procesado con alto Sb presentó un intervalo de sólo 1.3kA, con una II_{min} de 6.9kA (D_{min} = 3.99mm) y una II_{max} de 8.2kA (D_{max} = 6.83mm).

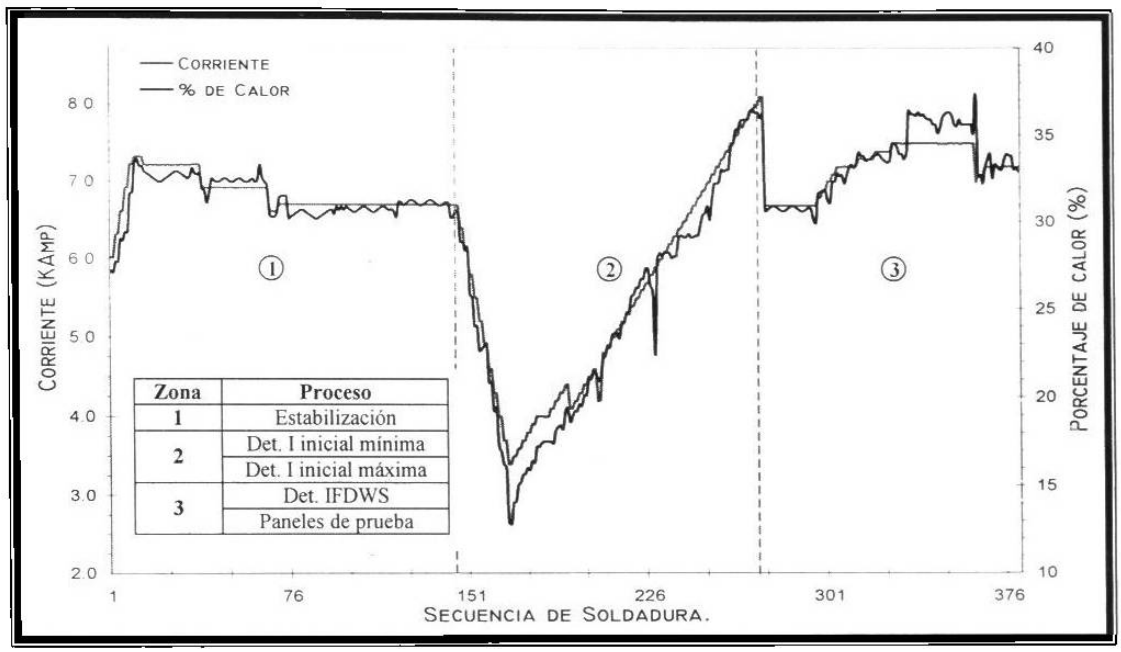

Figura 5.36. – Evolución de la corriente de soldadura y del calor aportado durante la prueba de calidad de soldadura para el material con recubrimiento de bajo Sb.

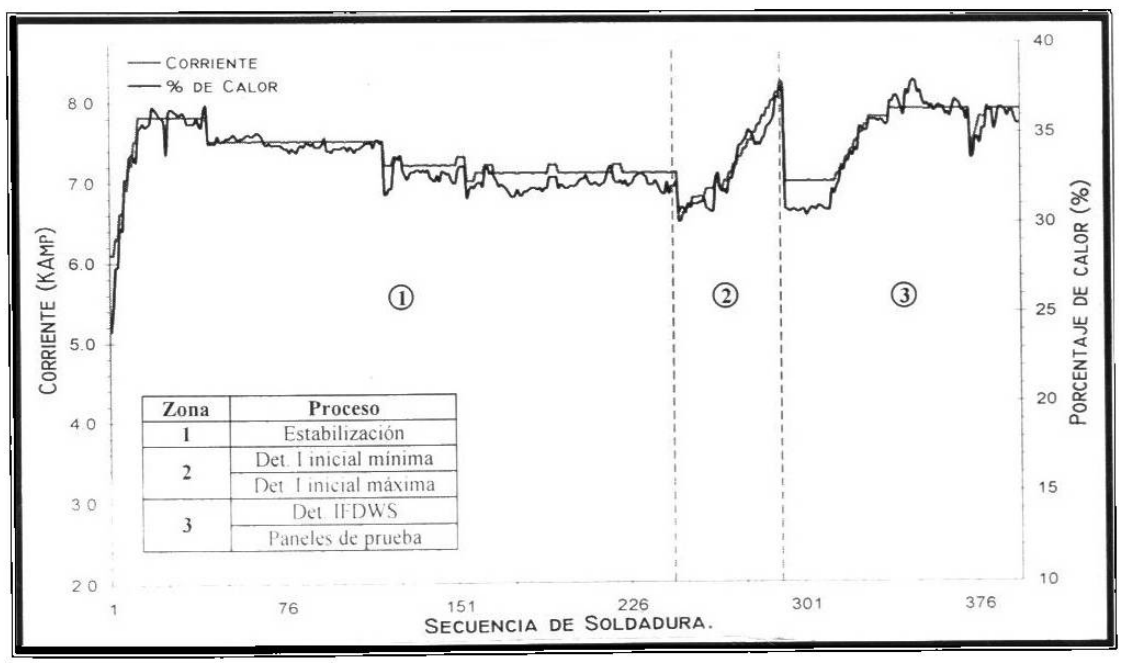

Figura 5.37. – Evolución de la corriente de soldadura y del calor aportado durante la prueba de calidad de soldadura para el material con recubrimiento de alto Sb.

5.7.4 Ensayos de arranque y de resistencia a la tensión a corte.

La Tabla 5.13 muestra la media de los valores obtenidos en los ensayos de tensión con esfuerzo de corte y la prueba de arranque, así como la cantidad de probetas que presentaron modo de fractura regular e irregular.

Tabla 5.13. – Resultados de los ensayos de tensión con esfuerzo de corte y de arranque.

Ensayo	Material	HT	Fractura		Diámetro	Carga Máx.
		Ciclos	Regular	Irregular	mm	N
Tensión	Bajo Sb	5	3 de 3	0 de 3	5.58 ± 0.27	2640 ± 60
		90	3 de 3	0 de 3	5.09 ± 0.20	2590 ± 80
	Alto Sb	5	3 de 3	0 de 3	5.73 ± 0.13	2722 ± 34
		90	3 de 3	0 de 3	5.63 ± 0.12	2710 ± 70
Arranque	Bajo Sb	5	7 de 7	0 de 7	5.35 ± 0.13	- - -
		90	7 de 7	0 de 7	5.29 ± 0.14	- - -
	Alto Sb	5	7 de 7	0 de 7	5.17 ± 0.07	- - -
		90	7 de 7	0 de 7	4.99 ± 0.14	- - -

Mediciones para tensión ($\eta = 3$) y para arranque ($\eta = 7$).

La Figura 5.38 muestra la imagen de dos botones con fractura regular después de haber sido ensayados, uno en el ensayo de tensión con esfuerzo de corte y otro resultado de un ensayo de arranque, en ambos casos se observa que la fractura ocurre en el material que se encuentra en la periferia del botón de soldadura. Las Figuras 5.39 y 5.40 muestran gráficamente los valores de carga máxima y diámetro de los botones registrados en ambos materiales durante los ensayos de tensión con esfuerzo de corte. Los resultados individuales de ambos ensayos se incluyen en el Anexo B.1 y B.2.

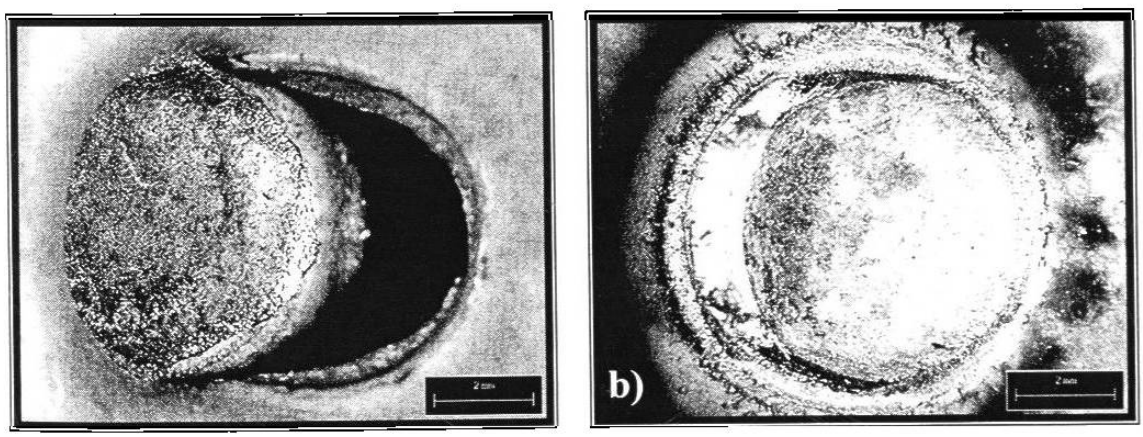

Figura 5.38. – Botones de soldadura que presentan fractura regular después de haber sido ensayados. a) Ensayo de tensión con esfuerzo de corte. b) Ensayo de arranque.

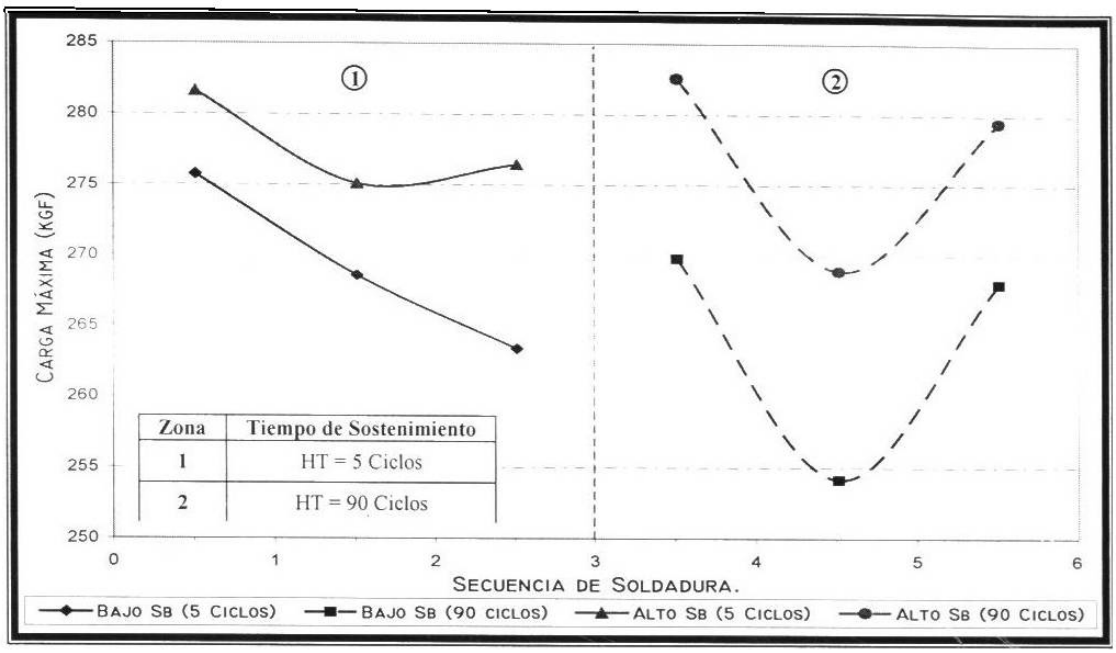

Figura 5.39. – Carga máxima que soportaron los botones de soldadura en los ensayos de tensión con esfuerzo de corte para ambos valores de HT.

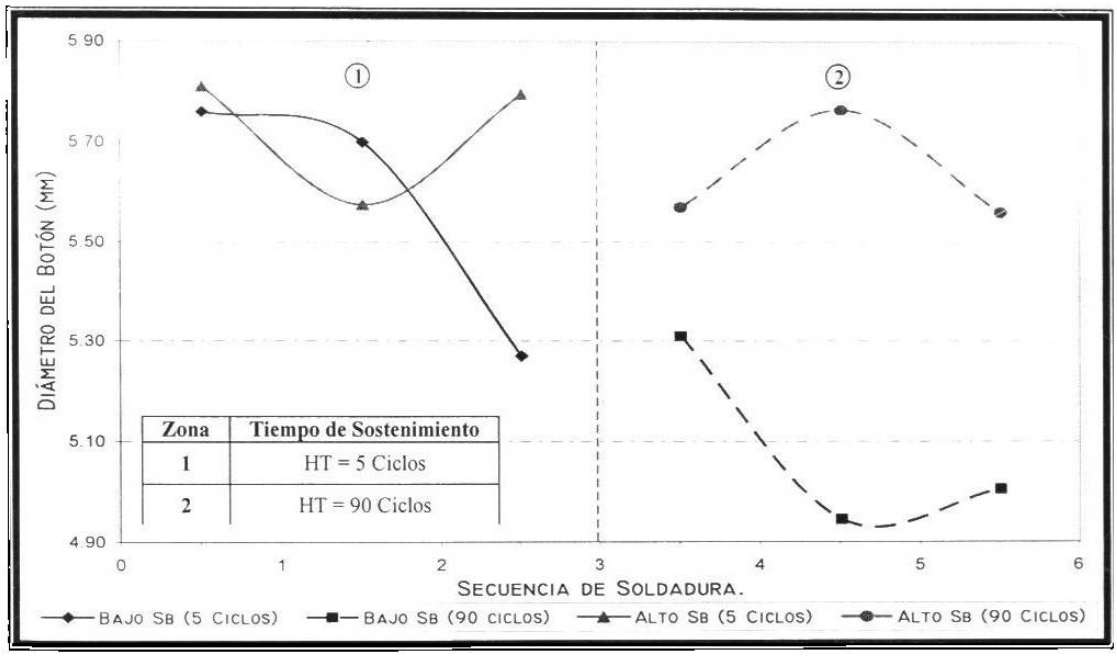

Figura 5.40. – Diametro de los botones de soldadura en las probetas ensayadas a tension con esfuerzo de corte de ambos valores de HT

Mientras que la Figura 5.41 muestra gráficamente los valores obtenidos al medir el diámetro de los botones de soldadura a los que se les practicó la prueba de arranque, (paneles de sensibilidad 1 y 3).

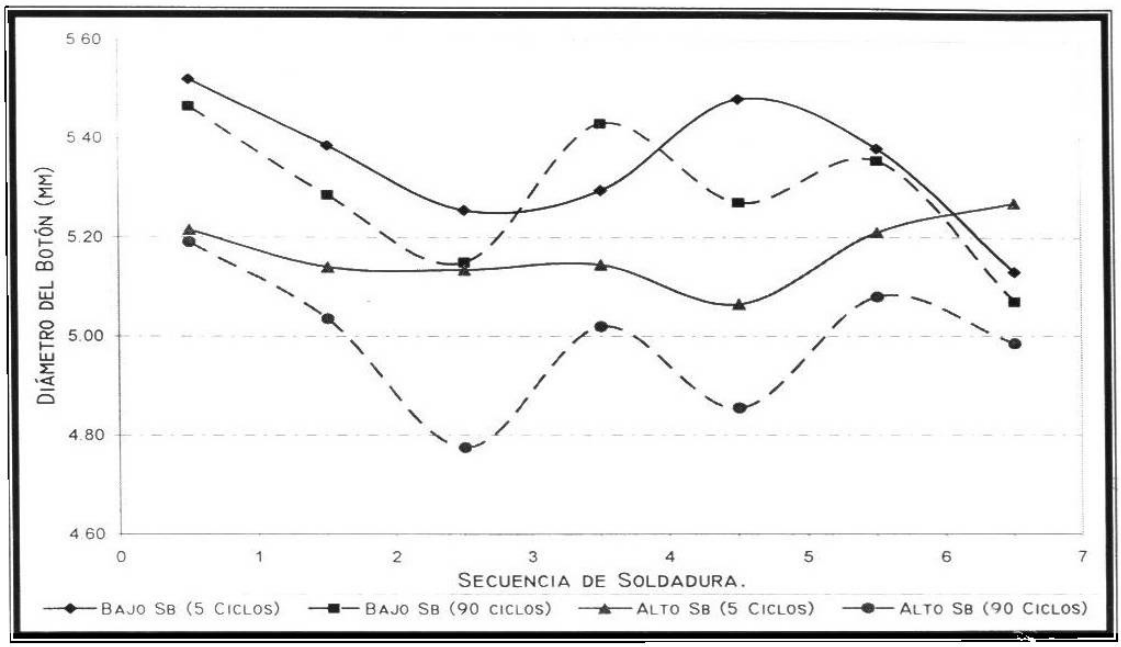

Figura 5.41. – Diámetros de los botones de soldadura en las pruebas de arranque.

5.7.5 Inspección y evaluación dimensional del botón de soldadura.

El análisis dimensional fue realizado a través de metalografías en la sección media transversal de los botones de soldadura de los paneles de sensibilidad 2 y 4, mostrando los resultados gráficamente a través de las Figuras 5.42 a 5.44, mientras que sus valores promedio se concentran en la Tabla 5.14. Los parámetros de penetración de la soldadura e indentación del electrodo se presentan como porcentaje con respecto al espesor promedio de la lámina de acero recubierto.

Para la evaluacion de estos parámetros se consideraron los criterios recomendados por las normas Chrysler [81], y GM para aceros de alta resistencia [82], ya que la norma utilizada [80] no incluye un criterio para la evaluación de estos parámetros. Por lo que:

- Los botones serán aceptables si tienen un diámetro mayor o igual al MWS [80].
- La penetración de la zona fundida no deberá ser menor al 20% del espesor original de la hoja de metal [81-82]. Mientras que la depresión superficial no deberá exceder el 30% del espesor original de la lámina [81-82].
- No deberá presentar grietas en el botón, ni en el metal alrededor del mismo [81].

Tabla 5.14. – Valores promedio de los parámetros de soldadura.

Material	HT Ciclos	Diámetro mm	Penetración mm	Penetración %	Indentación. mm	Indentación. %
Bajo Sb	5	5.56 ± 0.16	0.719 ± 0.029	51.9	0.146 ± 0.014	21.0
	90	5.43 ± 0.09	0.717 ± 0.028	51.7	0.143 ± 0.013	20.7
Alto Sb	5	5.15 ± 0.16	0.695 ± 0.043	50.1	0.140 ± 0.022	20.2
	90	4.96 ± 0.14	0.695 ± 0.018	50.1	0.131 ± 0.021	18.9

Mediciones para ($\eta = 7$).

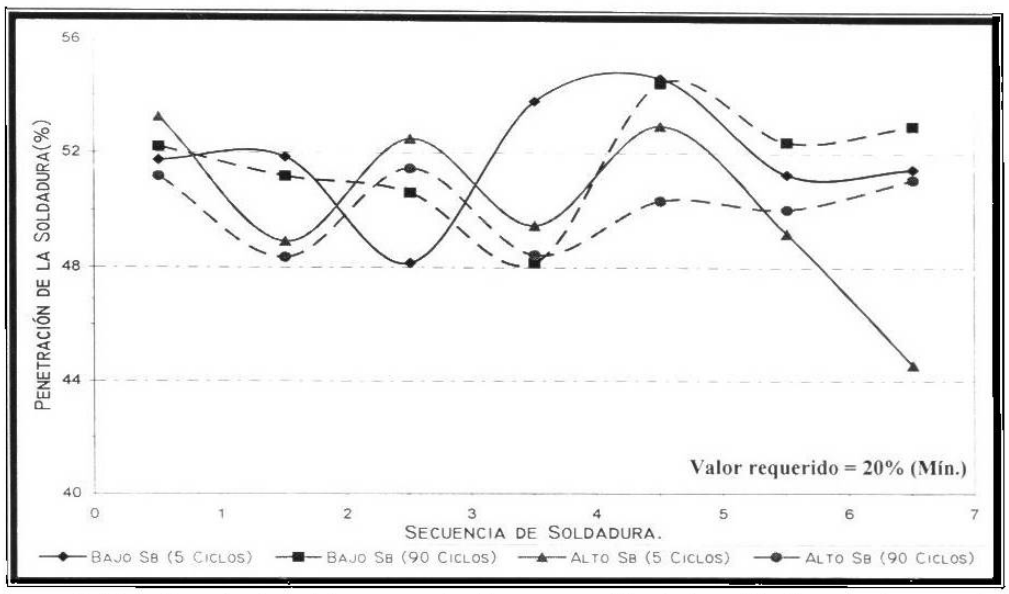

Figura 5.42. – Resultados del porcentaje de penetración de la soldadura en funcion de la secuencia de soldadura.

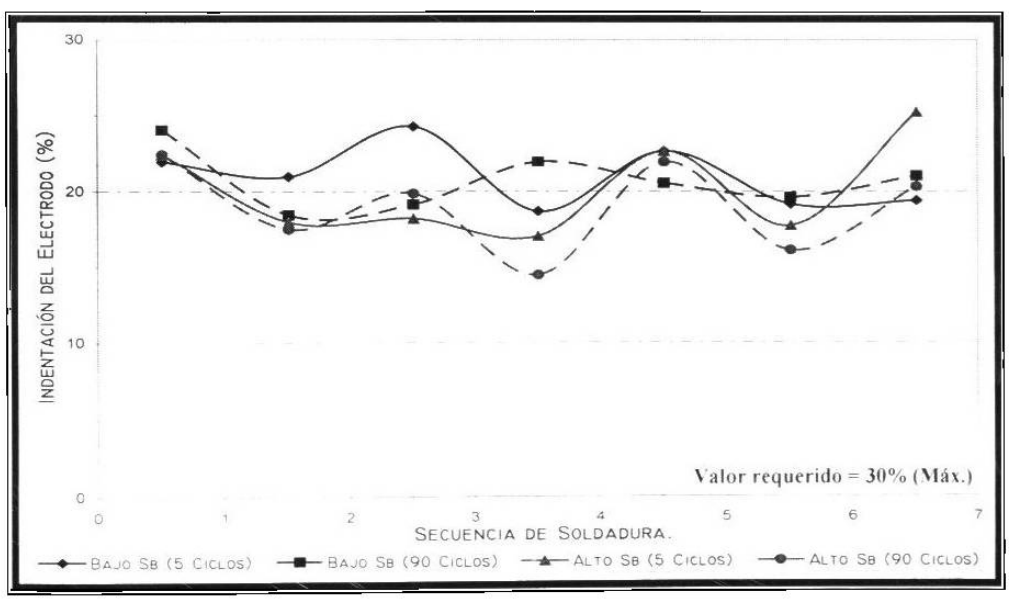

Figura 5.43. – Resultados del porcentaje de indentación del electrodo en función de la secuencia de soldadura.

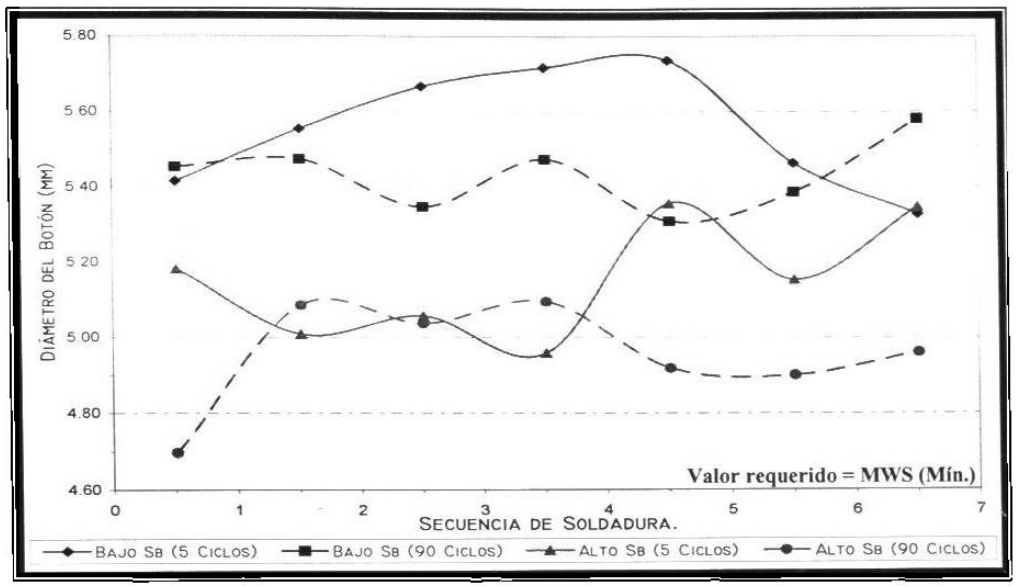

Figura 5.44. – Resultados del diámetro del botón de soldadura en función de la secuencia de soldadura.

Las Figuras 5.45 y 5.46 muestran metalografías de la sección media transversal de los botones de soldadura en los que se realizó el análisis dimensional, mientras que las mediciones a detalle de cada punto de soldadura se incluyen en el Anexo B.3.

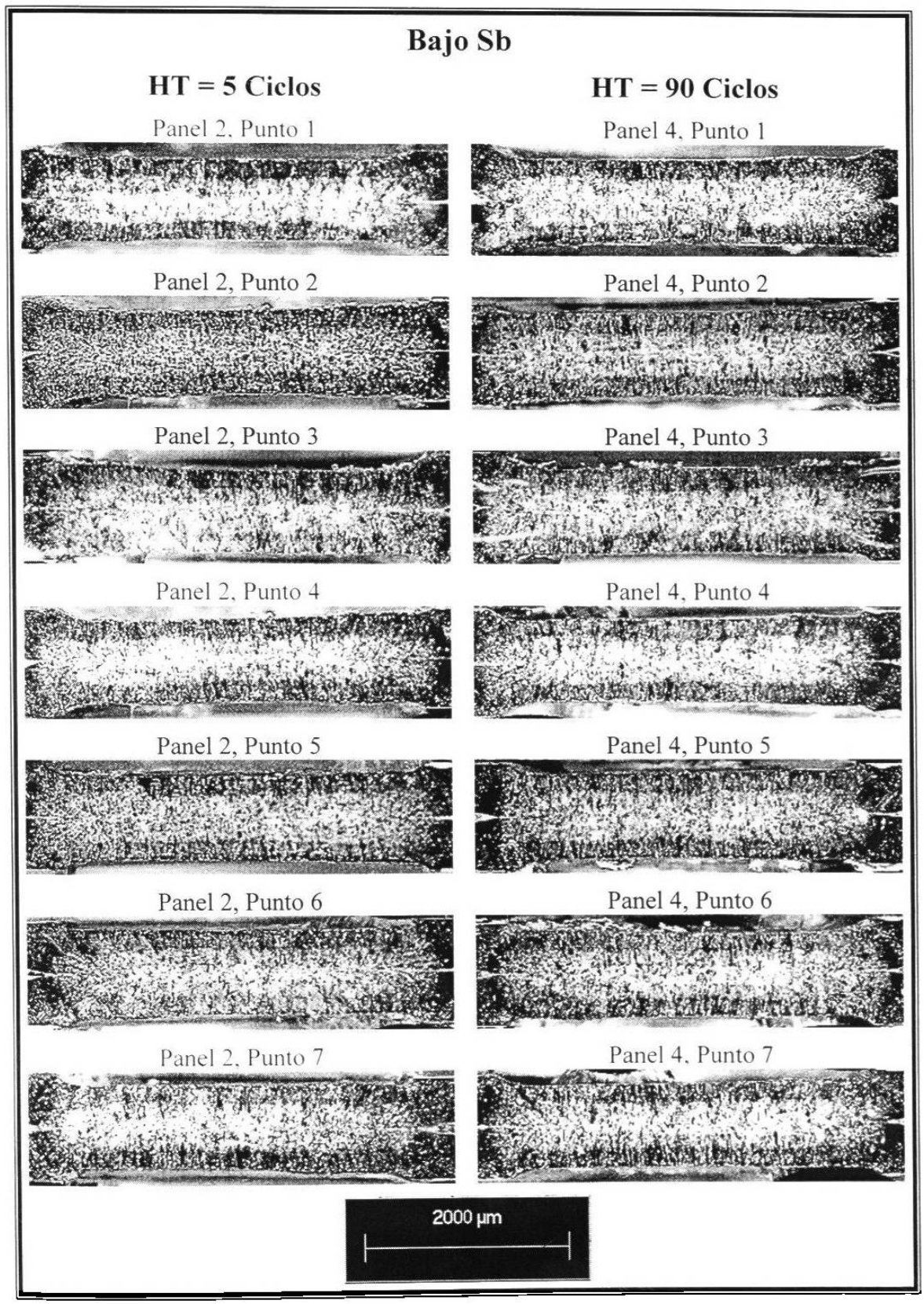

Figura 5.45. – Metalografías de los botones de soldadura del acero recubierto con la condición de bajo antimonio.

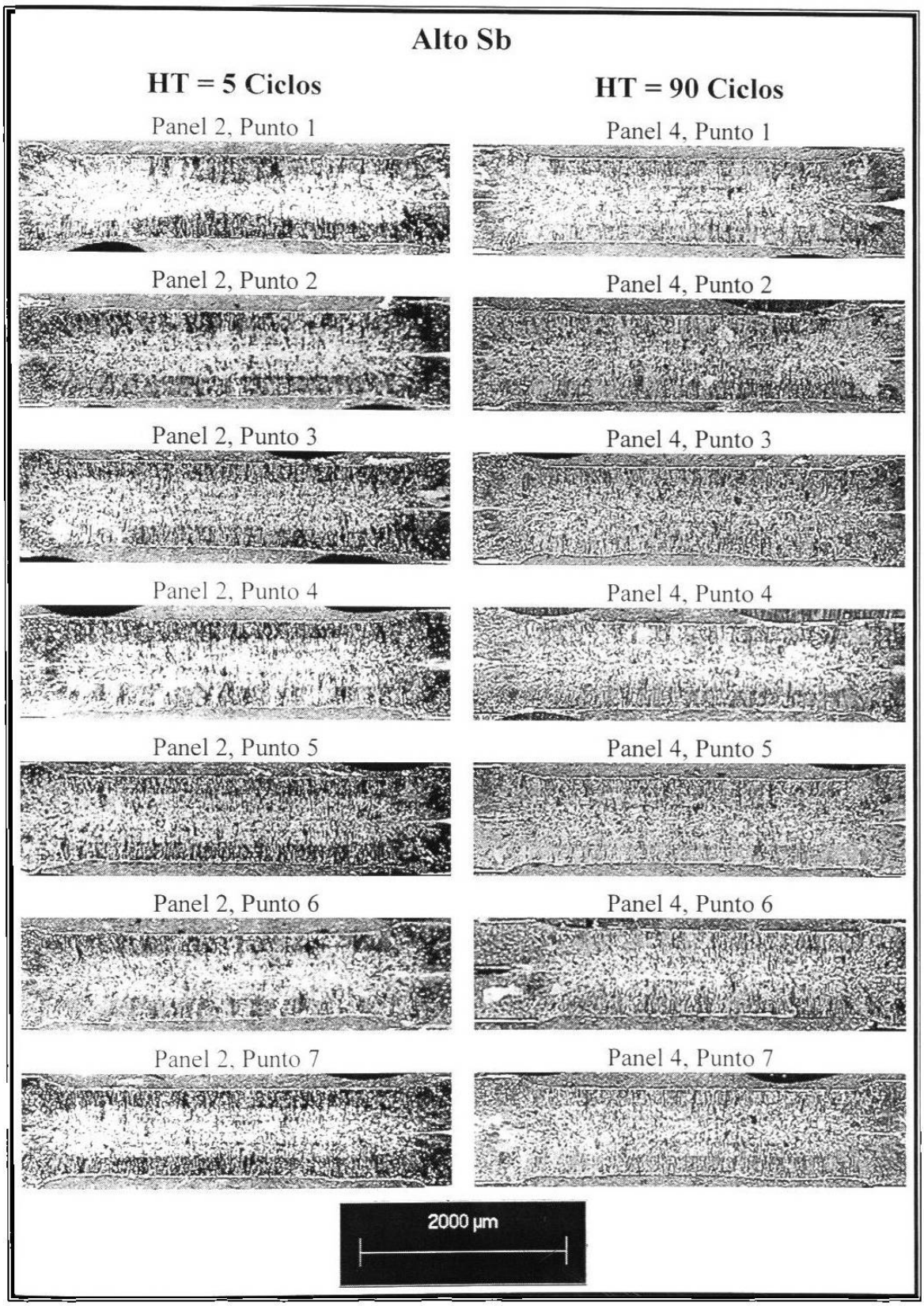

Figura 5.46. – Metalografías de los botones de soldadura del acero recubierto con la condición de alto antimonio.

5.7.6 Ensayo de microdureza.

La Figura 5.47 fue construida con los valores de microdureza promedio (η = 7), realizados sobre la diagonal transversal de los botones de soldadura, los cuales se encuentran ordenados en función de la distancia entre la indentación y el centro del botón, mientras que los valores individuales se incluyen en Anexos B.4 y B.5.

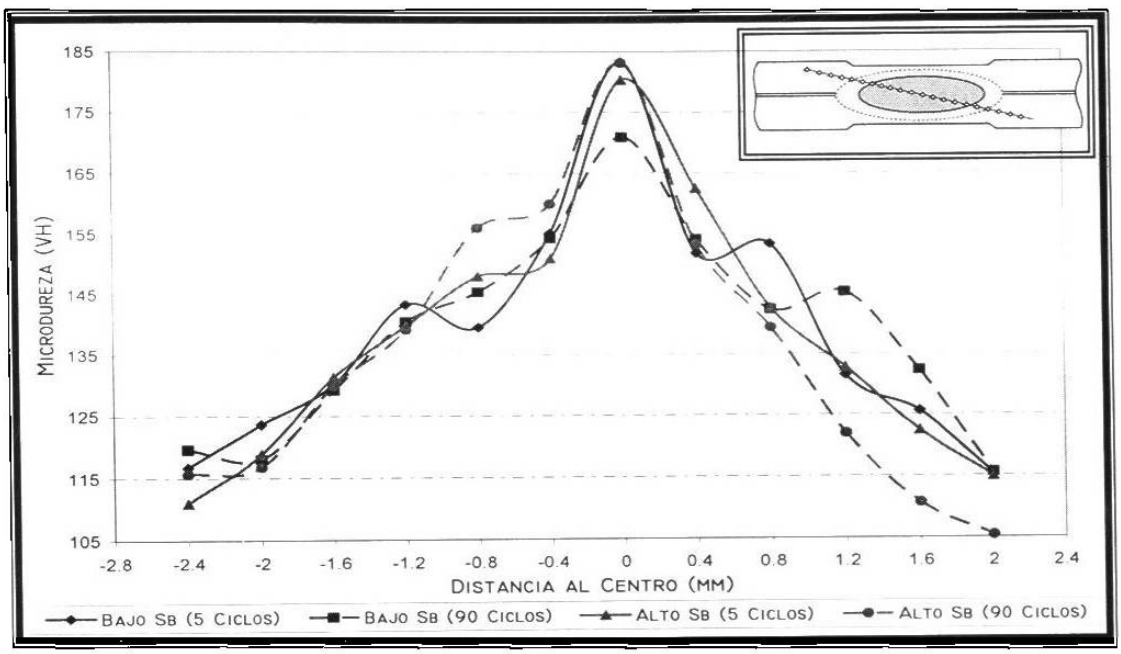

Figura 5.47. – Perfil de microdureza promedio sobre la diagonal transversal de los botones de soldadura de ambos materiales.

5.7.7 Prueba de resistencia.

La Figura 5.48 muestra gráficamente la evolución de la corriente de soldadura y el calor aportado durante el proceso de estabilización y determinación de corrientes iniciales de la prueba de resistencia, registrando un intervalo de operación inicial de 3.9kA con una $II_{mín}$ de 3.8kA (DI_{min} = 3.48mm) y una $II_{máx}$ de 7.7kA ($DI_{máx}$ = 6.26mm); la prueba se realizó con una corriente de operación de 7.5kA, registrando un valor de resistencia límite de 6200 puntos y un intervalo de operación final de 0.9kA con una IF_{min} de 8.2kA y una $IF_{máx}$ de 9.1kA. Por su parte, la Figura 5.49 muestra gráficamente la evolución del diámetro del botón durante la prueba de resistencia, mientras que los datos registrados y las huellas del electrodo en papel carbón se exhiben en el Anexo B.6.

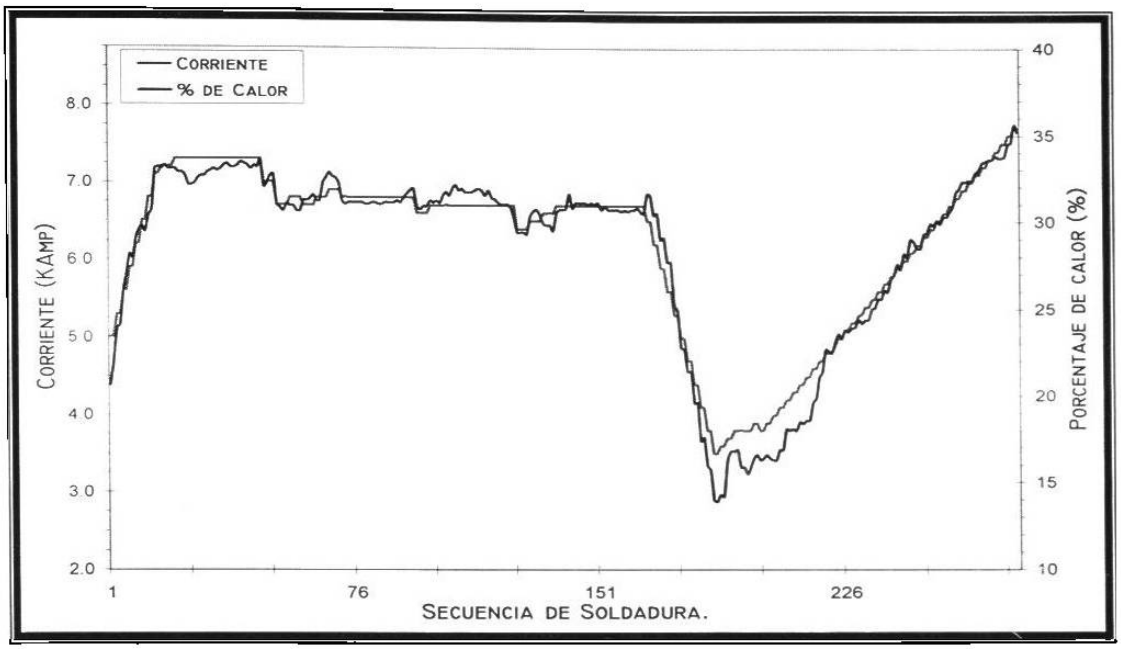

Figura 5.48. – Evolución de la corriente de soldadura y del calor durante la estabilización y la determinación de las corrientes iniciales de la prueba de resistencia de los electrodos.

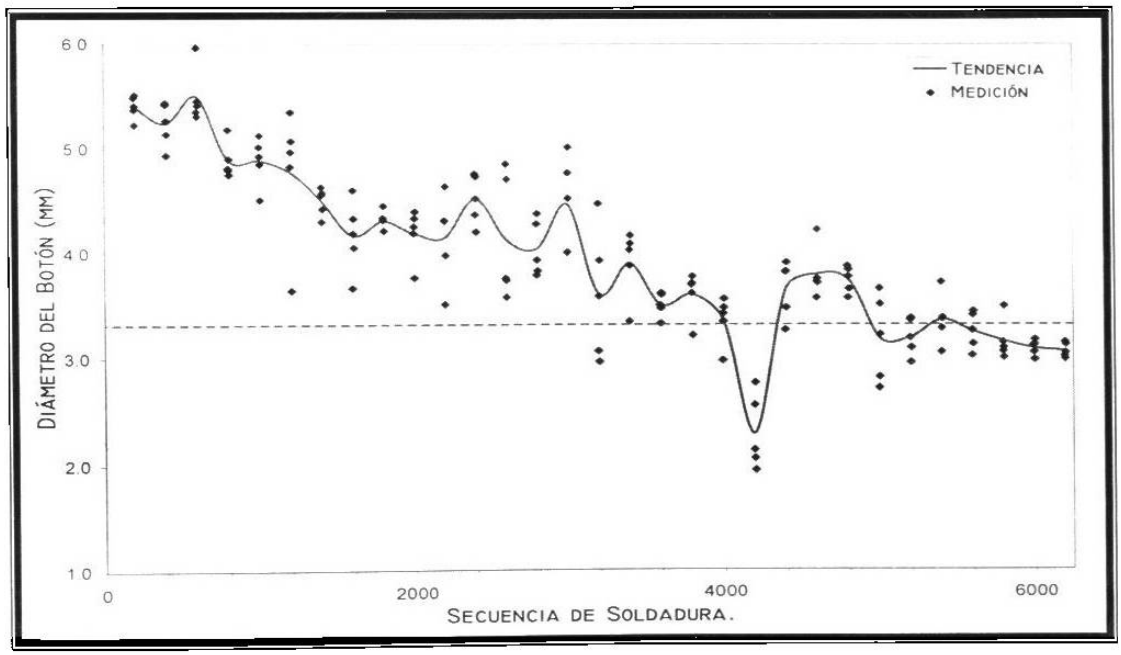

Figura 5.49. – Mediciones del diámetro del boton realizadas durante la prueba de resistencia de los electrodos (la línea punteada indica el MWS).

En la Figura 5.50 aparecen tres imágenes de la sección transversal de los electrodos utilizados durante la prueba de resistencia, en las cuales se aprecia el evidente deterioro y la alta deformación de la superficie de contacto del electrodo, además de un

ligero achatamiento en la periferia del mismo. También se observa la formación de una capa uniforme de latón β de 9.97 ± 1.6μm, otra de latón γ de 72 ± 5μm y una gran cantidad de adherencia proveniente del recubrimiento GA.

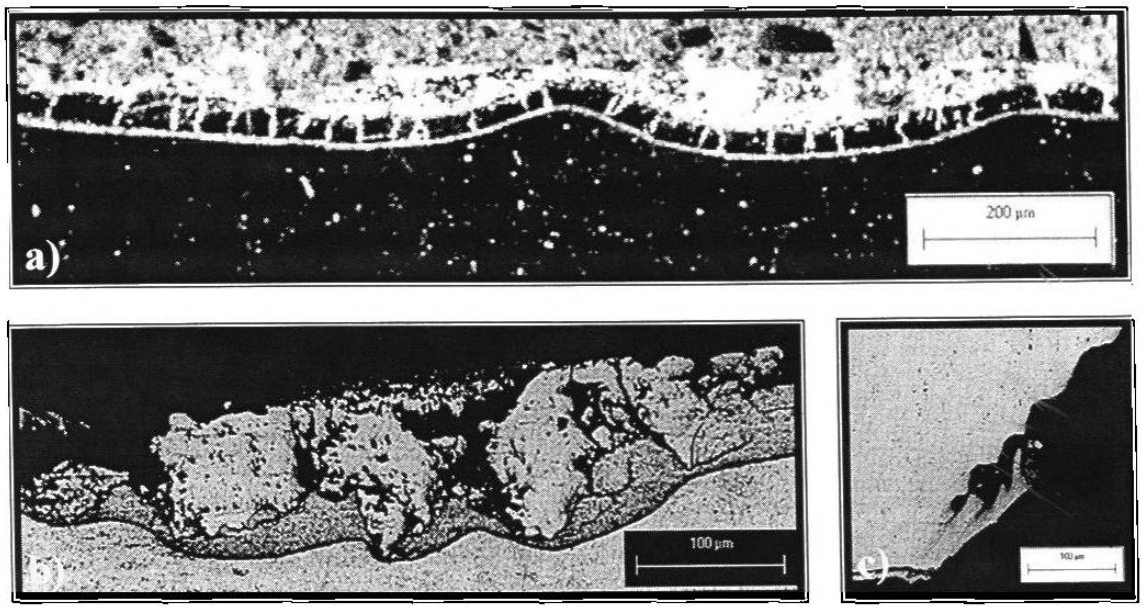

Figura 5.50. – Imágenes del deterioro de los electrodos en la prueba de resistencia. a) Alta deformación en la superficie de contacto. b) Adherencia de recubrimiento GA. c) Deformacion excesiva y achatamiento en la periferia del electrodo.

5.7.8 Defectos de la soldadura.

La Figura 5.51 muestra dos tipos de defecto en las pruebas de calidad de la soldadura realizadas, mientras que la frecuencia de aparición se encuentra en la Tabla 5.15. Además, cabe mencionar el gran tamaño de grano formado en el HAZ del botón (Figura 5.52), el cual aumenta considerablemente el factor de riesgo de falla por fatiga.

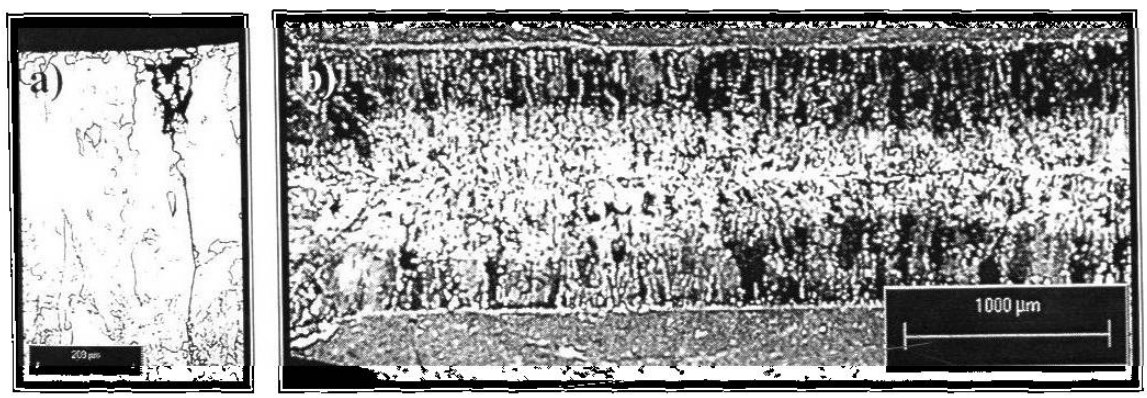

Figura 5.51. – Tipos de Defectos de soldadura formados. a) Grieta. b) Doble botón.

Tabla 5.15. – Frecuencia de aparición de defectos en los puntos soldados.

Material	HT (Ciclos)	Grieta	Doble botón
Bajo Sb	5	3 de 7	0 de 7
	90	3 de 7	0 de 7
Alto Sb	5	2 de 7	1 de 7
	90	2 de 7	0 de 7

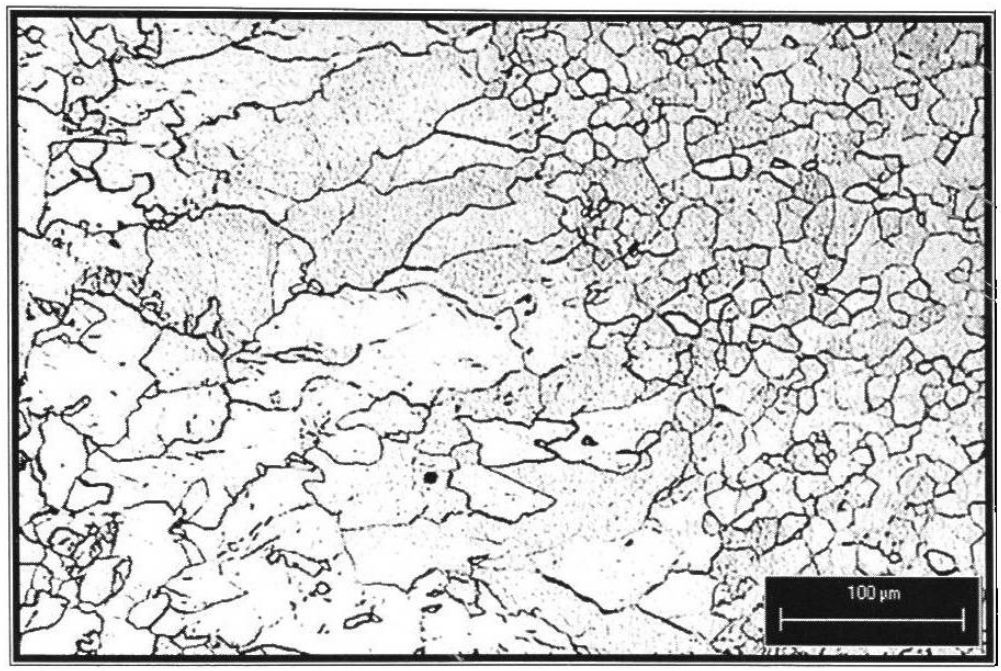

Figura 5.52. – Zona de transición HAZ - metal base en un punto de soldadura, en el que se aprecia el gran tamaño de grano de la zona afectada térmicamente.

Finalmente la Figura 5.53 muestra la imagen de un tipo de grietas particulares del material con la condición de bajo Sb (fractura intergranular), las cuales aunque son poco frecuentes resultan de importancia por las características de este tipo de falla que de ser más frecuentes y severas podrían provocar la generación y propagación de grietas al soldar el material con un proceso RSW.

Se realizó un análisis de composición química a lo largo de la grieta mostrada por medio del microscopio electrónico de barrido, encontrándose una composición aproximada de 5% de Zn en el inicio de la grieta, misma que disminuía hasta desaparecer según aumentaba la distancia de la superficie del recubrimiento.

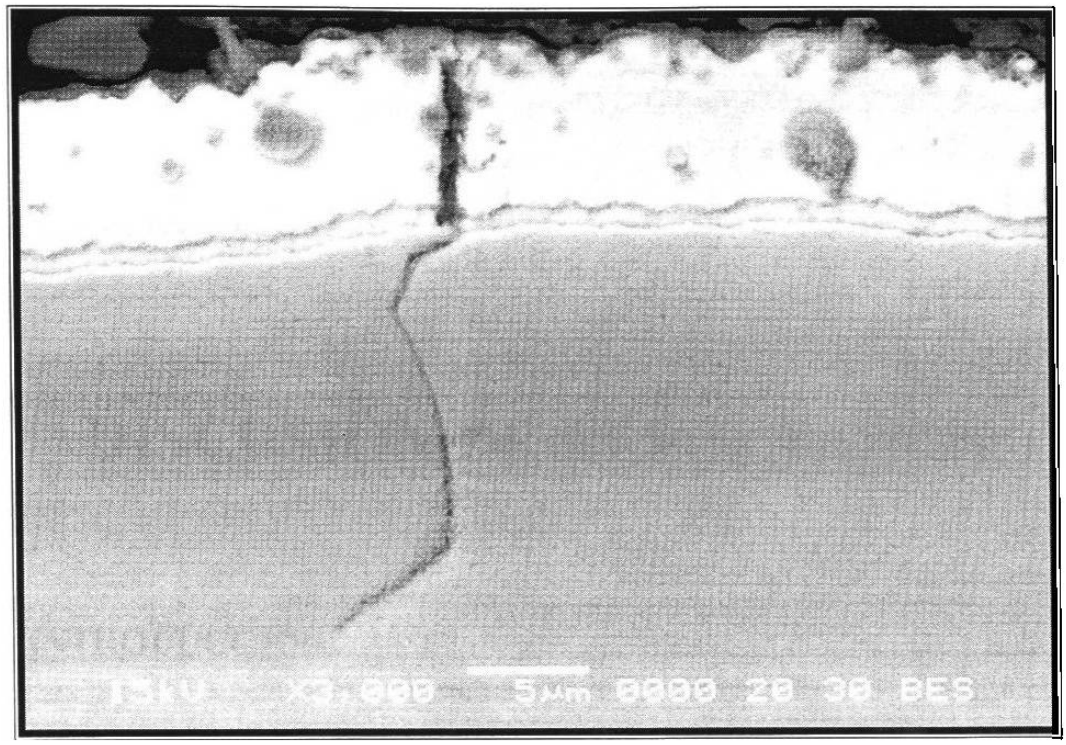

Figura 5.53. – Agrietamiento del recubrimiento por fractura intergranular encontrado en el material con bajo Sb.