

# CAPITULO V

## RESULTADOS

Para conocer el efecto que pudiera tener el espesor y las fases del recubrimiento sobre la soldabilidad del material y la integridad del recubrimiento, se procedió a examinar los recubrimientos de los materiales.

Se realizaron pruebas de soldadura a las mismas condiciones a todos los materiales entregados (muestra A, B, C, D y decapada) por una empresa en la localidad (ver Anexo 3). Se analizó la evolución de la zona soldada con respecto a la variación de la corriente de soldadura suministrada, para así poder concluir si existían diferencias entre los materiales.

### 5.1 Material

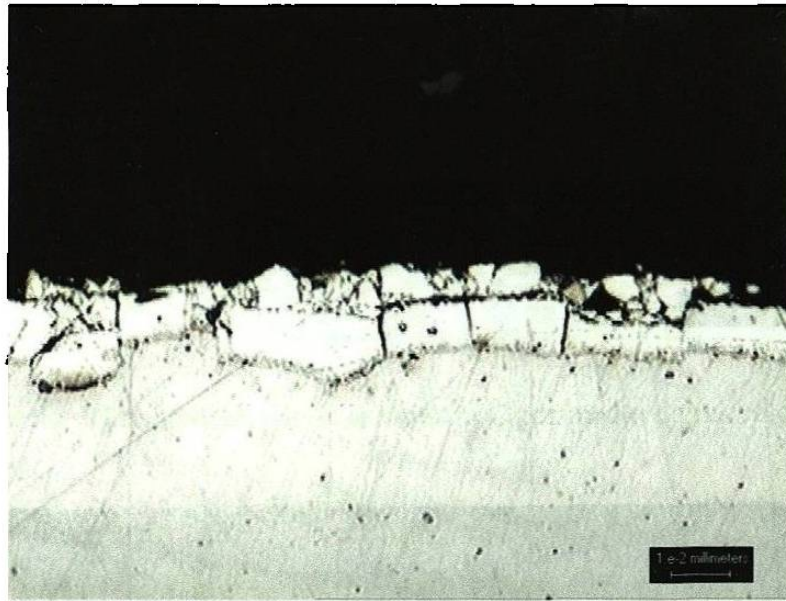
La microestructura del material y la composición química proporcionada por la empresa muestran que es un acero libre de intersticiales (IF). En la Figura 5.1 se muestra la microestructura totalmente ferrítica que presentaron todos los materiales analizados.



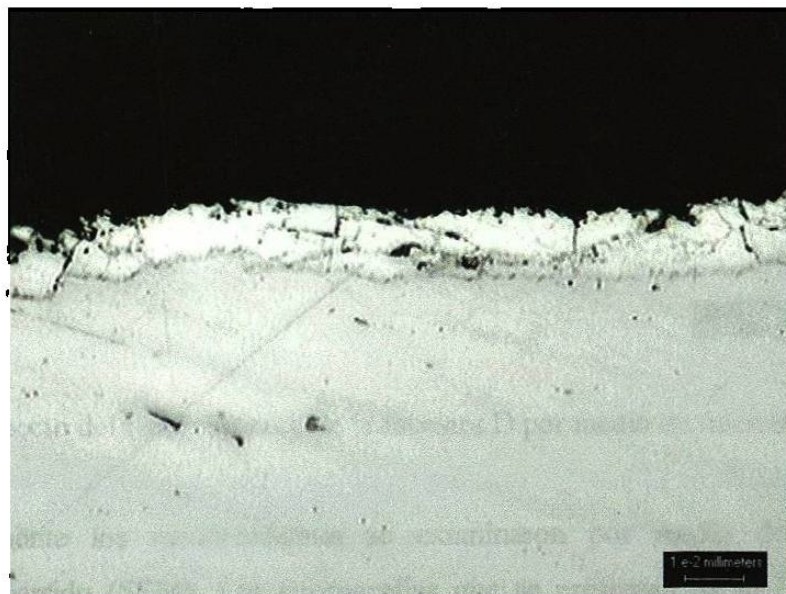
**Figura 5.1.-** Microestructura del acero libre de intersticiales.

## 5.2. RECUBRIMIENTO.

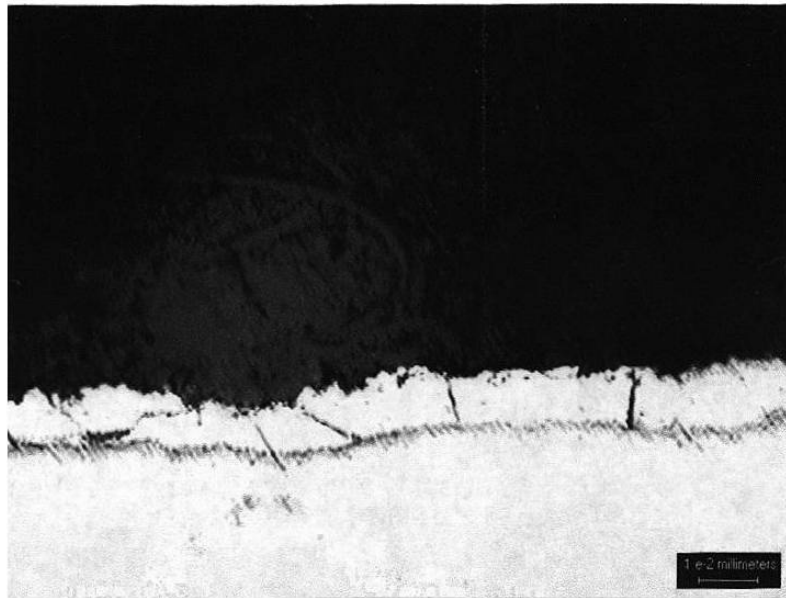
El recubrimiento se observó en forma transversal en todas las muestras por medio del microscopio óptico. Las Figuras 5.2 a la 5.5 muestran el aspecto de los recubrimientos.



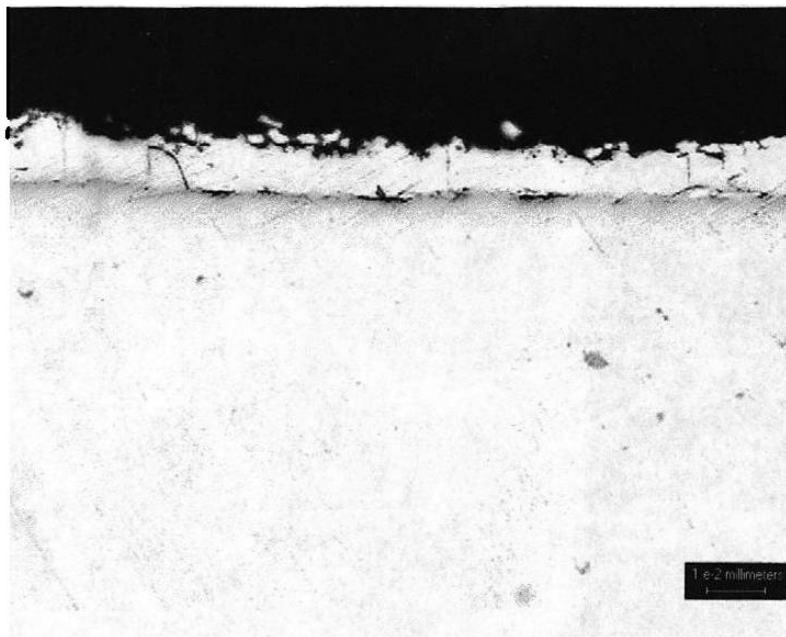
**Figura 5.2.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra A por medio de microscopio óptico.



**Figura 5.3.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra B por medio de microscopio óptico.

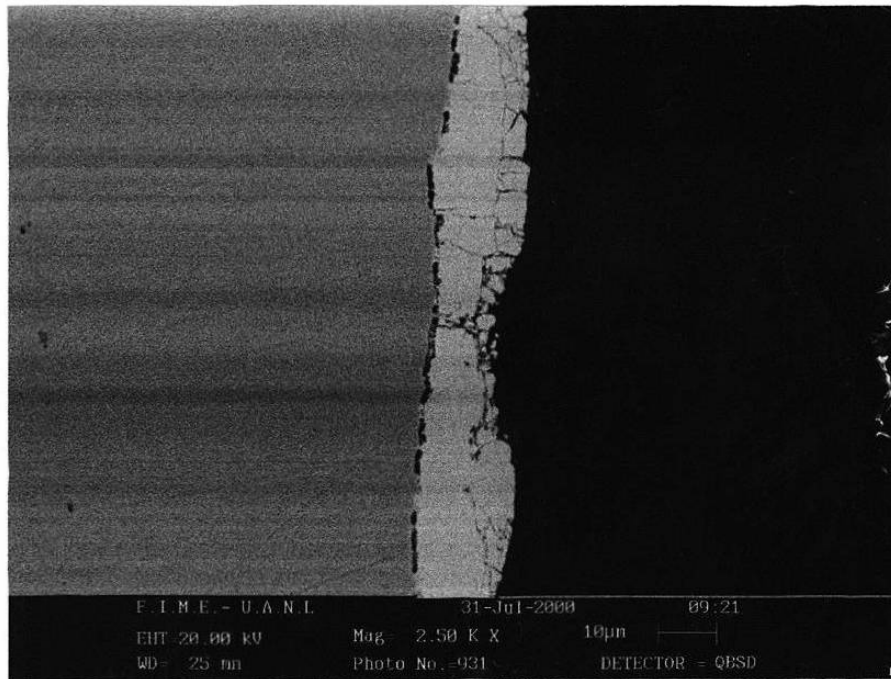


**Figura 5.4.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra C por medio de microscopio óptico.

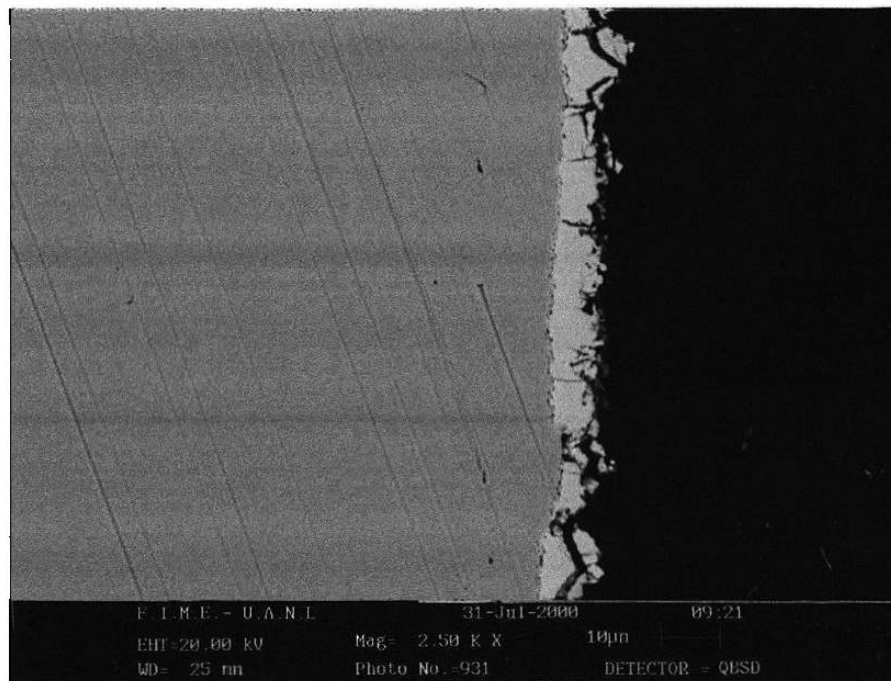


**Figura 5.5.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra D por medio de microscopio óptico.

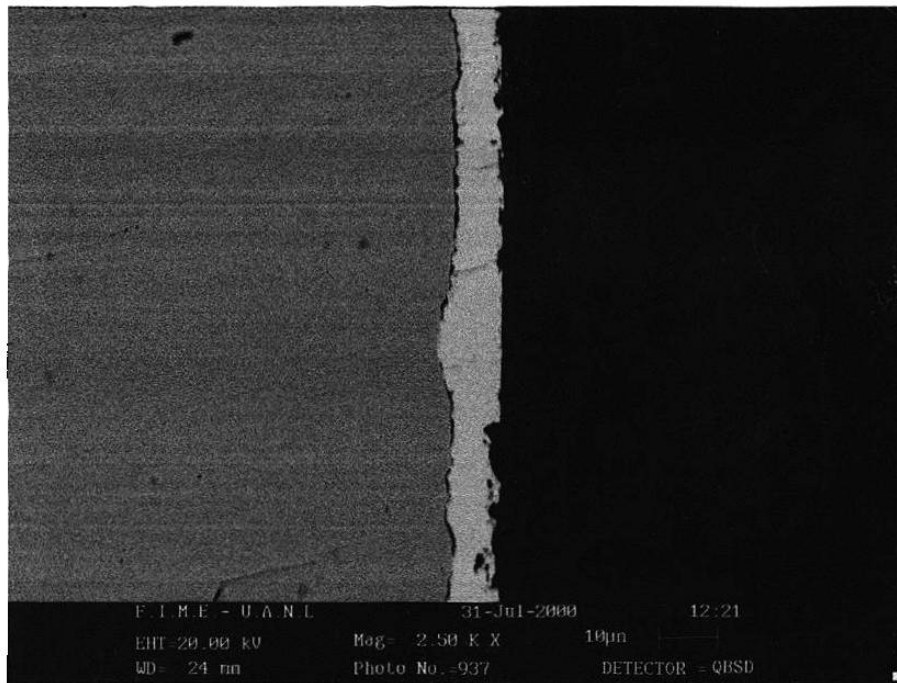
Posteriormente los recubrimientos se examinaron por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM). Las micrografías que se presentan de la Figura 5.6 a la Figura 5.9 se obtuvieron con el detector de electrones retrodispersados.



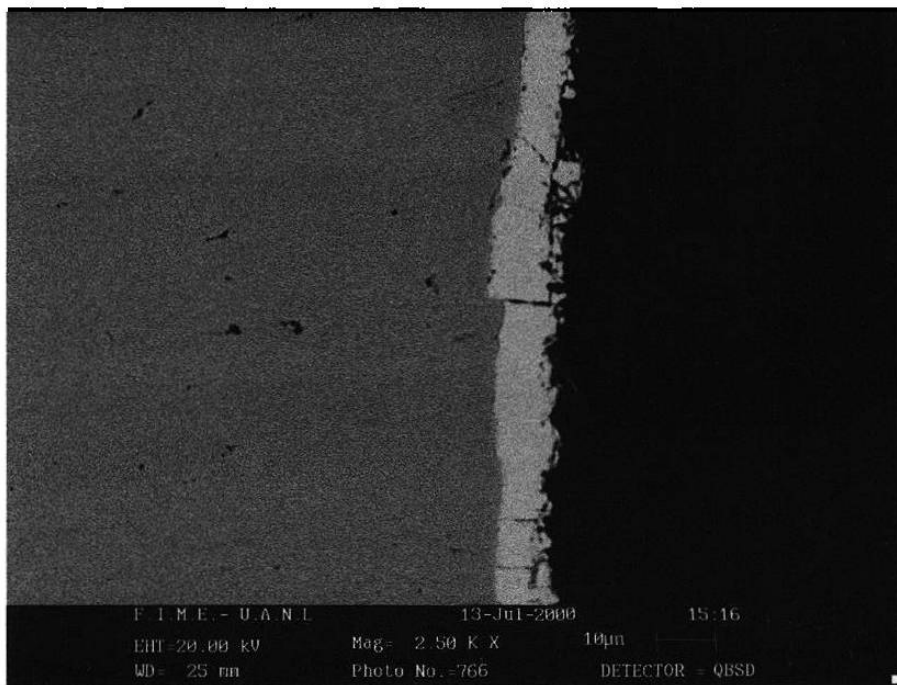
**Figura 5.6.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra A por medio de SEM.



**Figura 5.7.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra B por medio de SEM.

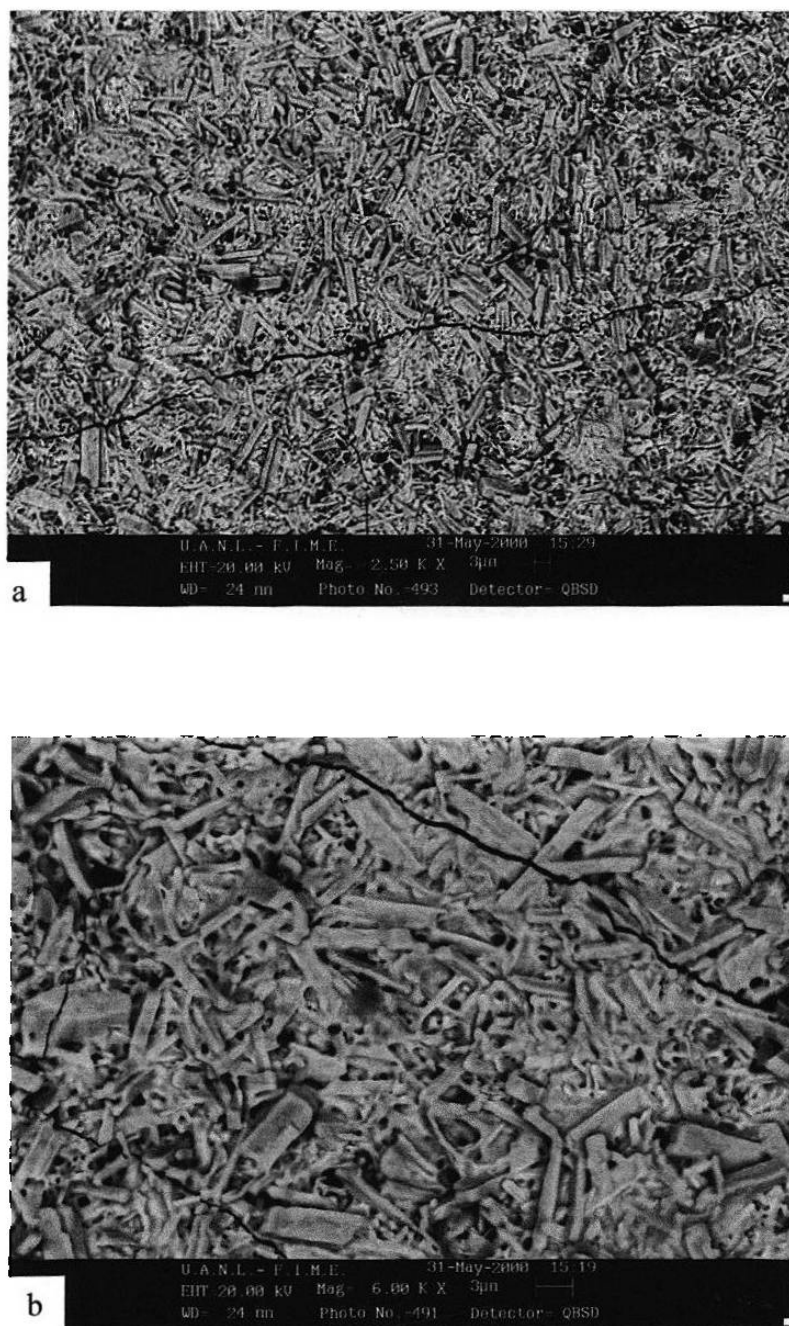


**Figura 5.8.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra C por medio de SEM.

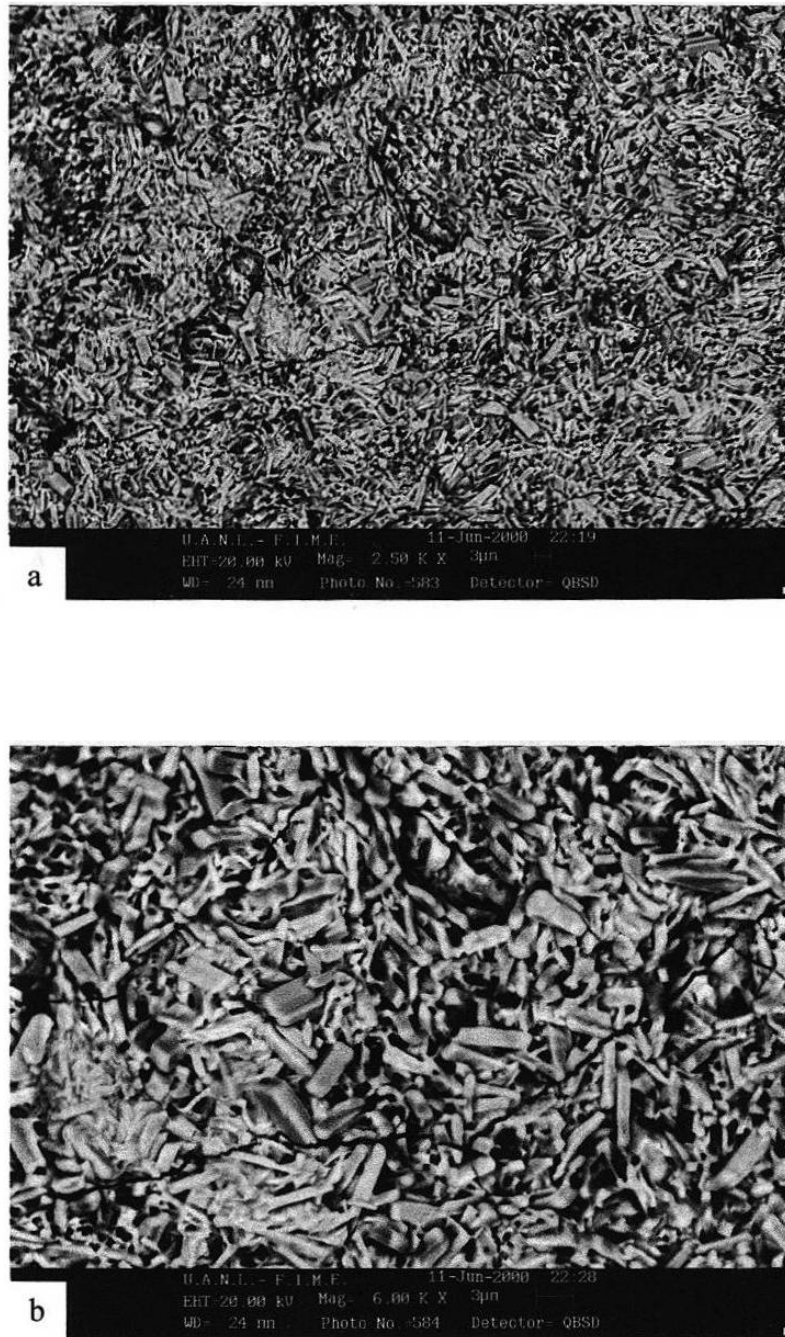


**Figura 5.9.-** Aspecto del recubrimiento de la muestra D por medio de SEM.

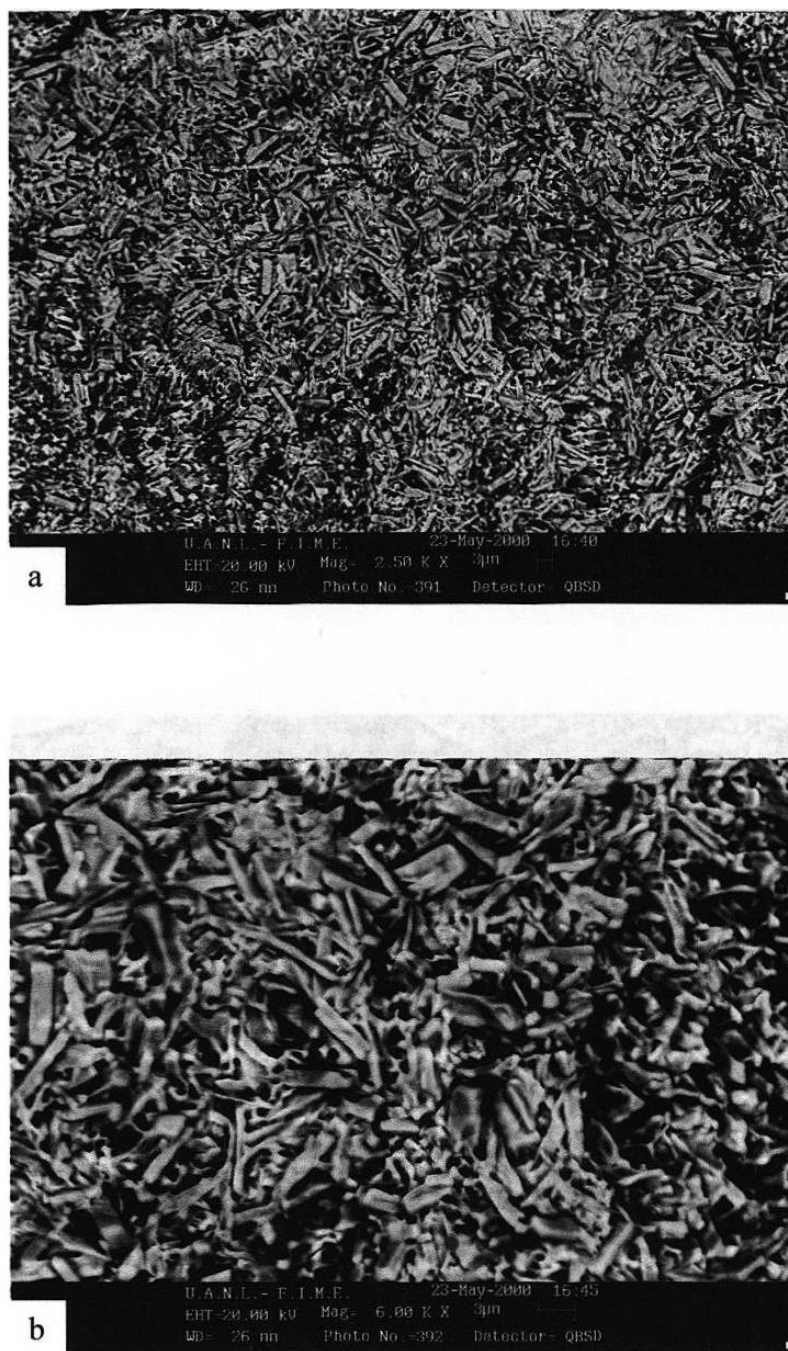
El aspecto y calidad superficial del recubrimiento también se analizaron mediante el SEM. Las micrografías con el detector de electrones retrodispersados de la superficie del recubrimiento se muestran de la Figura 5.10 a la Figura 5.13.



**Figura 5.10.-** Micrografías de la superficie del recubrimiento A, a) 2500x, b).- 6000x



**Figura 5.11.-** Micrografías de la superficie del recubrimiento B, a) 2500x, b).- 6000x



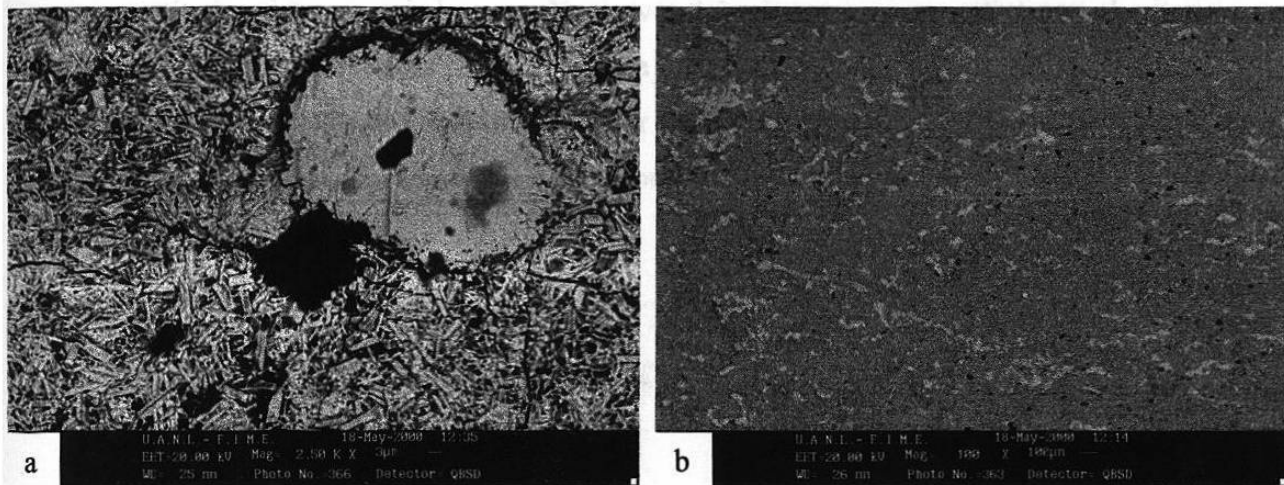
**Figura 5.12.-** Micrografías de la superficie del recubrimiento C, a) 2500x, b).- 6000x





**Figura 5.13.-** Micrografías de la superficie del recubrimiento D, a) 2500x, b).- 6000x

Las muestras analizadas en el presente estudio fueron sometidas a una laminación superficial para controlar su rugosidad. Como se muestra en la Figura 5.14, este proceso tiene como función secundaria disminuir la rugosidad por medio del aplastamiento de las asperezas presentes en la superficie del recubrimiento.



**Figura 5.14.-** Efecto de la laminación superficial sobre el recubrimiento, con el detector de electrones retrodispersados, a).- 2500x, b).-100x.

Se realizaron una serie de mediciones en diferentes puntos de las muestras para obtener los espesores promedio de los recubrimientos. En la Tabla 5.1 se muestran estos resultados, además de la rugosidad de cada uno. El promedio de las rugosidades se obtuvo de las mediciones realizadas con un equipo SurfTest 301 marca Mitutoyo, modelo MST-301, serie 178 con un intervalo de mediciones de  $R_a$  de 0.05 a 40  $\mu\text{m}$ . La muestra decapada mostró una rugosidad en la dirección de rolado (RD) de 1.57 $\mu\text{m}$  y 1.40  $\mu\text{m}$  a 90° de RD (TD).

Muestra	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Desv. Std ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )			
			RD	Desv. Std ( $\mu\text{m}$ )	TD	Desv. Std ( $\mu\text{m}$ )
A	13.09	3.13	2.06	0.42	1.91	0.36
B	9.79	1.55	1.98	0.34	1.84	0.20
C	10.11	2.41	1.59	0.23	1.85	0.42
D	9.54	1.88	1.43	0.29	1.39	0.28

RD: Dirección de laminado  
TD: 90° a RD

**Tabla 5.1.-** Espesores de los recubrimientos y rugosidades del mismo.

### 5.3 PERFIL DE CONCENTRACIÓN DE Fe PRESENTE EN EL RECUBRIMIENTO.

Las fases presentes en el recubrimiento se detectaron mediante el análisis semicuantitativo del espectro de rayos X a través del mismo. Esto se realizó con el criterio de la Tabla 5.2. Las pruebas se realizaron a una distancia determinada por medio de análisis puntual. Los muestreos se iniciaron alrededor de la interfase acero/recubrimiento en una línea recta hasta llegar a la superficie del recubrimiento. De la Figura 5.15 a la Figura 5.18, se muestran estos resultados.

Fase	% Fe (peso)
Gama $\Gamma$	28.46 a 12.05
Delta $\delta$	12.05 a 7.08
Zeta $\zeta$	6.15

\* Valores obtenidos del Diagrama Fe-Zn a 500 °C (ver Anexo 1)

Tabla 5.2.- Contenido de Fe establecido para el presente estudio en cada fase.

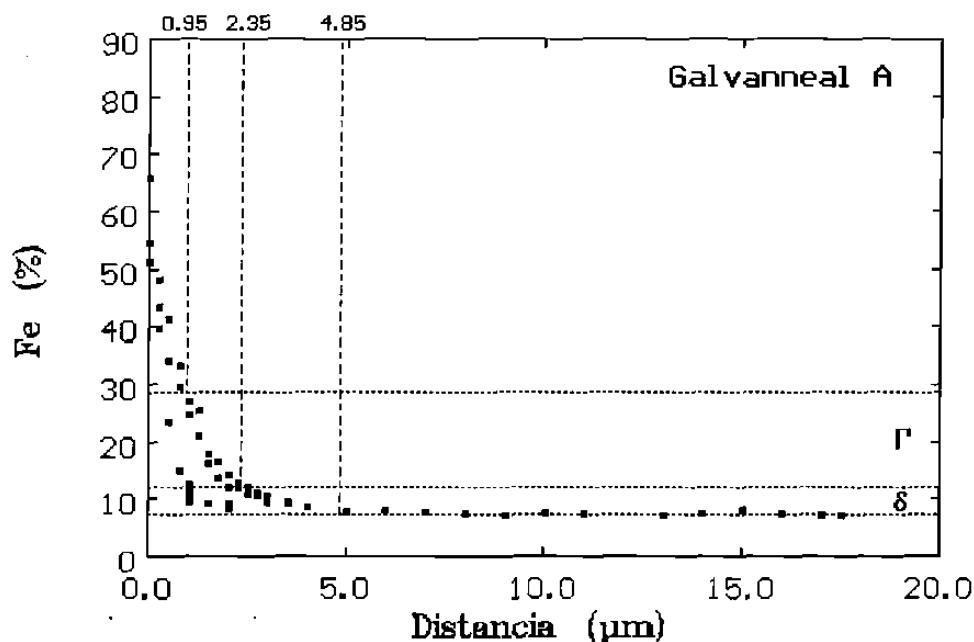


Figura 5.15.- Perfil de concentración de Fe presente en el recubrimiento A.

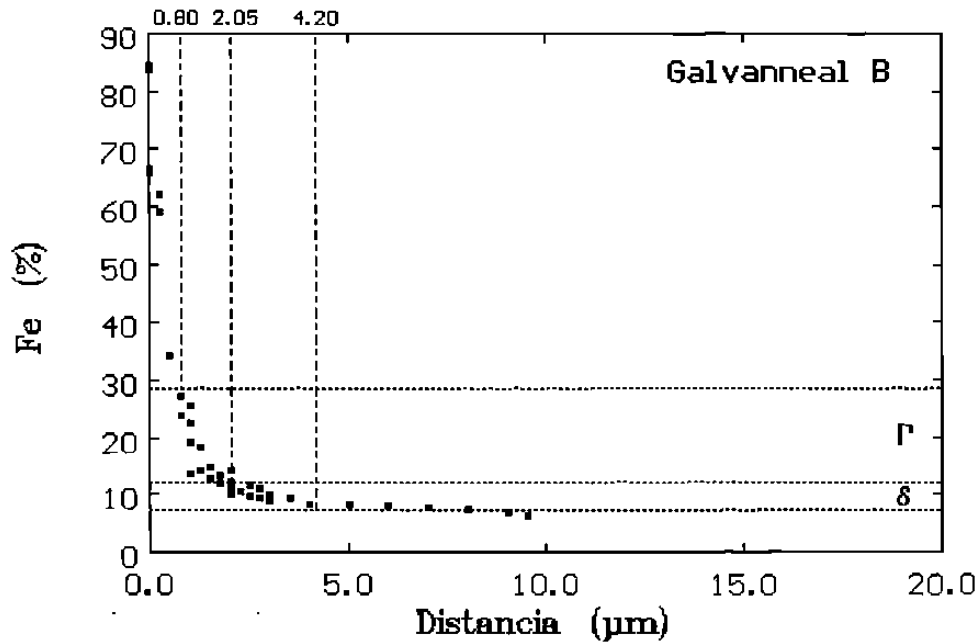


Figura 5.16.- Perfil de concentración de Fe presente en el recubrimiento B.

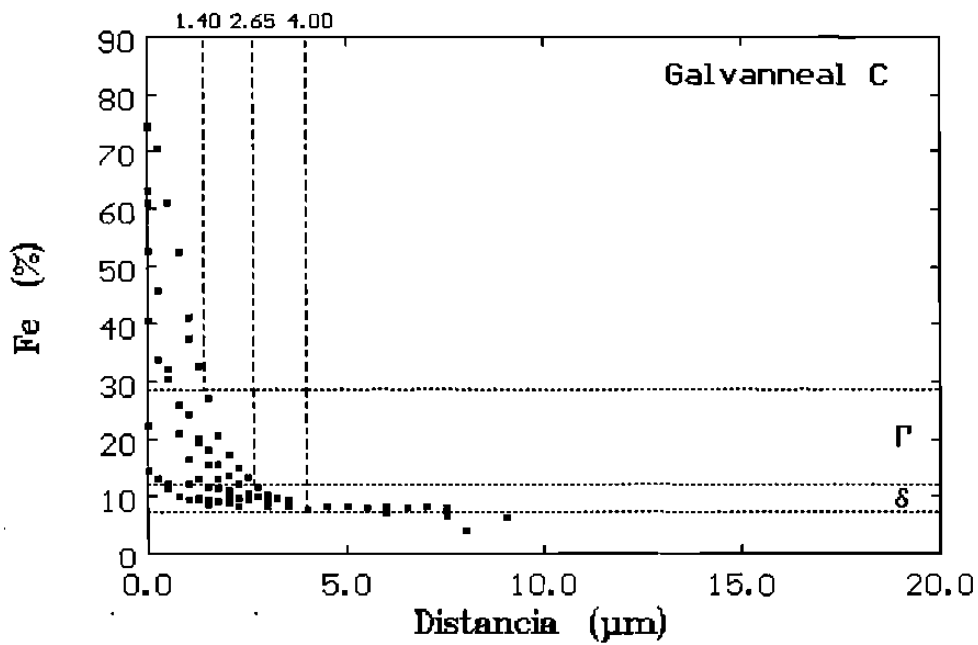


Figura 5.17.- Perfil de concentración de Fe presente en el recubrimiento C.

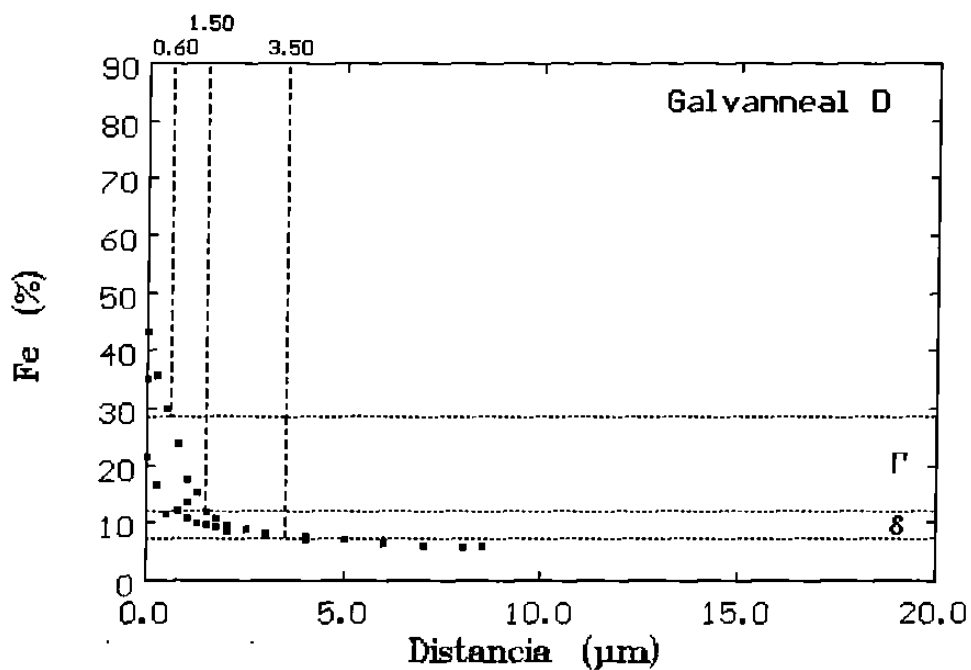


Figura 5.18.- Perfil de concentración de Fe presente en el recubrimiento D.

En la Figura 5.19 se presenta el perfil de concentración promedio de Fe de cada uno de los recubrimientos, obtenido de las gráficas anteriores.

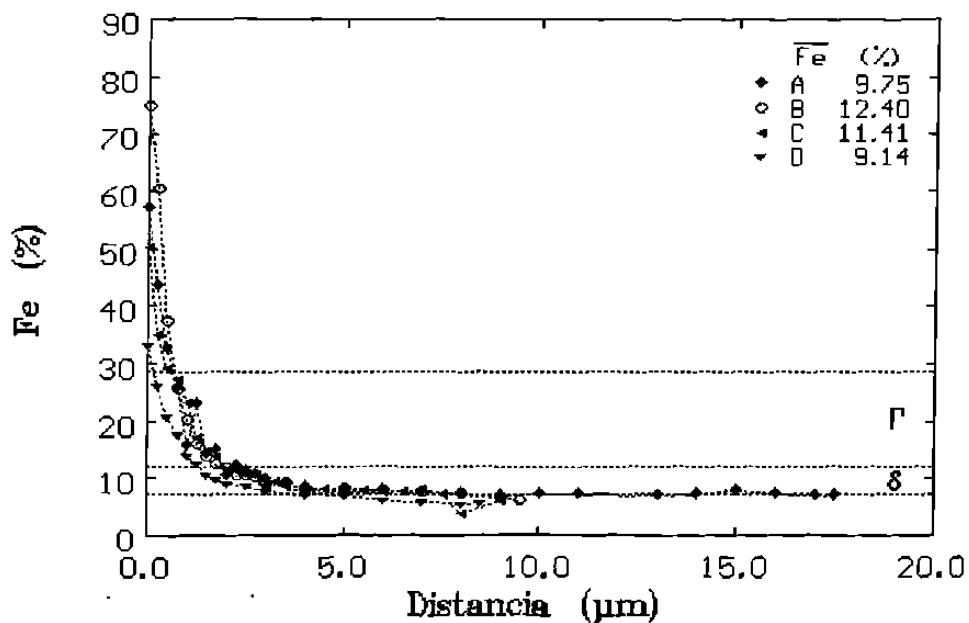


Figura 5.19.- Perfil de concentración promedio de Fe presente en los recubrimientos.

Se realizaron análisis químicos de los recubrimientos por vía húmeda en una empresa de la localidad. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.3, la cual muestra el contenido de Fe y Al presente en el recubrimiento, así como la capa del mismo.

<b>Muestra</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Po (g)	45.5147	44.8206	45.4105	45.3564
Pi (g)	44.799	44.2231	44.8678	44.8056
Diferencia (g/m <sup>2</sup> )	0.7157	0.5975	0.5427	0.5508
<b>Capa (oz/ft<sup>2</sup>) *</b>	<b>0.47</b>	<b>0.39</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>
<b>Capa (g/m<sup>2</sup>) *</b>	<b>143</b>	<b>119</b>	<b>109</b>	<b>110</b>
<b>Capa</b>	<b>G-47</b>	<b>G-39</b>	<b>G-36</b>	<b>G-36</b>
% Al	0.1916	0.1785	0.2212	0.2973
% Fe	11.10	10.01	11.07	10.61

**Tabla 5.3.-** Análisis químico obtenido por vía húmeda de las muestras analizadas.

#### **5.4 CONTENIDO DE Fe EN LA SUPERFICIE DEL RECUBRIMIENTO.**

El contenido de Fe presente en la superficie de los recubrimientos se determinó por medio de análisis semicuantitativos del espectro de la imagen del SEM. En la Tabla 5.4 se muestran los contenidos de Fe, Zn y Al en los recubrimientos.

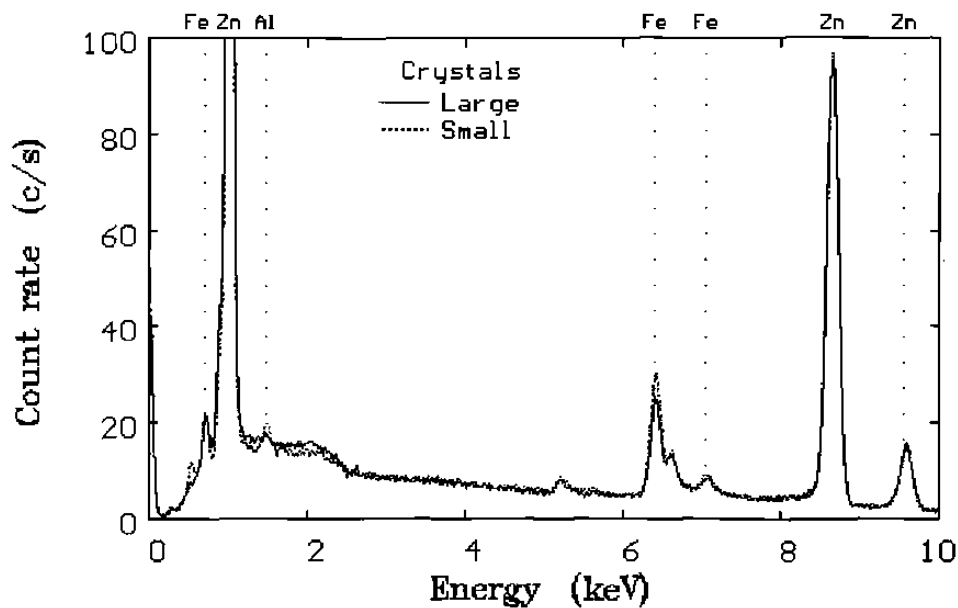
<b>Muestra</b>	<b>Elemento</b>		
	<b>Fe [%]</b>	<b>Zn [%]</b>	<b>Al [%]</b>
A	8.80	90.04	1.13
B	9.04	90.02	0.93
C	9.00	89.71	1.29
D	9.14	89.84	1.02

**Tabla 5.4.-** Composición química de la muestra en la superficie de los diferentes recubrimientos tomadas con un voltaje de excitación de 20 kV, resultados obtenidos por SEM.

Otra característica observada por medio del SEM es la presencia de dos diferentes tamaños de cristales, como se puede observar en las Figuras 5.10 a la 5.13. Por tal motivo, se procedió a realizar una serie de análisis semicuantitativos en los diferentes cristales, para conocer si se trataba de cristales diferentes. Estas diferencias fueron más notorias en las muestras del material D. Los resultados se muestran en la Tabla 5.5 y en la Figura 5.20.

Cristales	Fe (%)		Al (%)	
	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.
Chico	7.32	0.11	0.97	0.30
Grande	6.48	0.45	0.51	0.26

**Tabla 5.5.-** Resultados del análisis semicuantitativo puntual del espectro de rayos X en la muestra D.

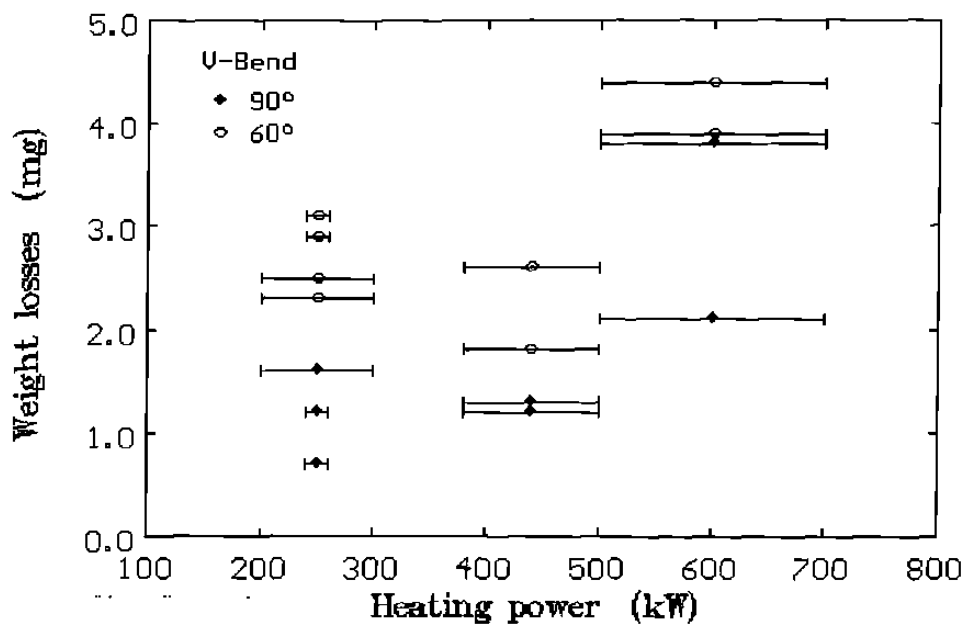


**Figura 5.20.-** Espectro puntual de rayos X de cristales de tamaño diferente de la muestra D.

## 5.5 INTEGRIDAD DEL RECUBRIMIENTO.

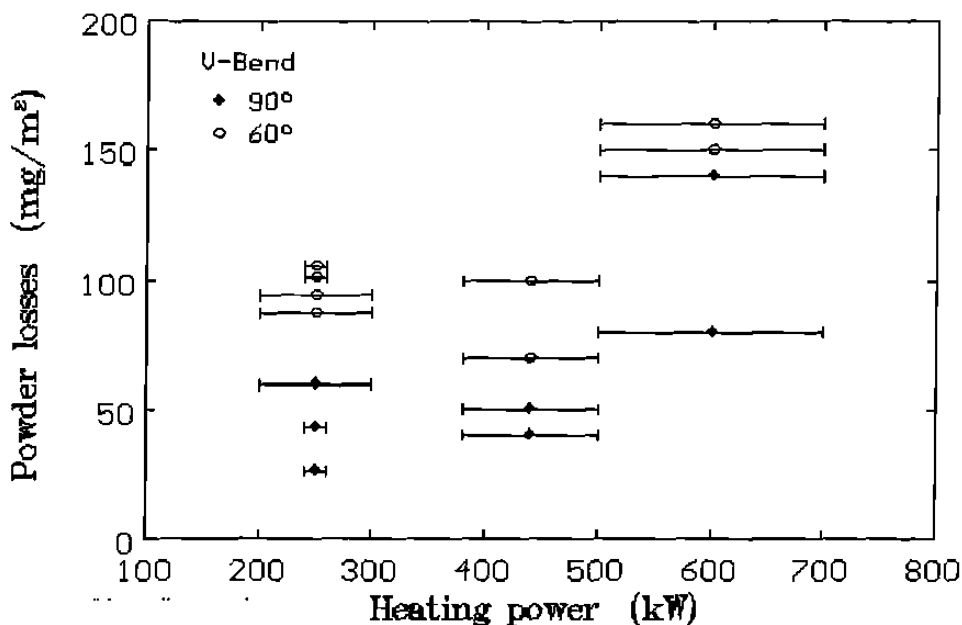
Durante un proceso de formado se desea que la lámina recubierta con galvanneal presente una buena integridad del recubrimiento, esto quiere decir que no sufra pérdida de recubrimiento durante el estampado.

En las Figuras 5.21 y 5.22 se muestran los resultados obtenidos durante los ensayos de doblez en V (V-bend) aplicados sobre el material para evaluar la integridad del recubrimiento de acuerdo a la variación de la potencia suministrada por el horno de inducción durante el galvanneal. El ensayo reversible de doblez aplica fuerzas de tensión y compresión durante el ensayo. La Figura 5.21 muestra la pérdida de peso de la probeta después de realizado el ensayo, mientras que la Figura 5.21 muestra la cantidad perdida según la Ec. 4.1 para cada probeta.



**Figura 5.21.-** Pérdida de peso del material en base a la potencia suministrada por el horno de inducción durante el proceso de galvanneal.



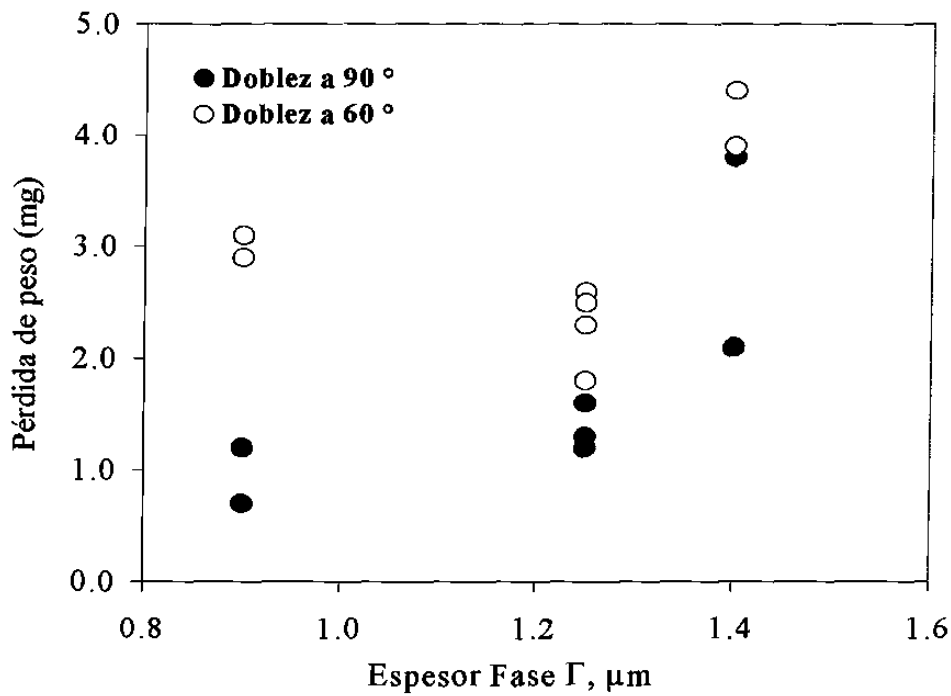


**Figura 5.22.-** Cantidad de recubrimiento perdido (ver Ec. 4.1) según la potencia suministrada por el horno de inducción utilizada el proceso de galvanneal.

Para conocer el efecto que tiene el espesor de la fase gama ( $\Gamma$ ) sobre la integridad del recubrimiento de las diferentes muestras, se calculó el espesor de la fase de acuerdo a los análisis mostrados en las Figuras 5.15 a la 5.18, los valores indicados en la parte superior indica los valores máximos de inicio y final de dicha fase en cada muestra, además de los espesores de las fases delta y zeta. Los resultados obtenidos se muestran en la en la Tabla 5.6 y en la Figura 5.23.

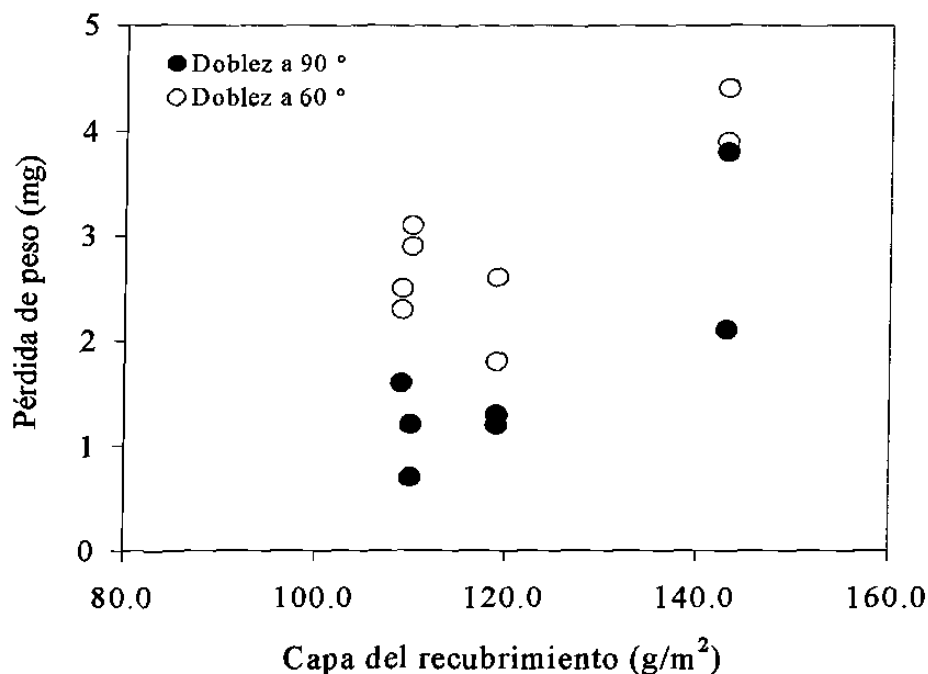
Muestra	Espesor de la Fase ( $\mu\text{m}$ )		
	$\Gamma$	$\delta$	$\zeta$
A	1.40	15.15	<1.00
B	1.25	6.95	1.00
C	1.25	5.05	1.50
D	0.90	4.20	2.50

**Tabla 5.6.-** Espesor de las fases de cada recubrimiento obtenidos del perfil de contenido de Fe en cada muestra.



**Figura 5.23.-** Efecto del espesor de la fase  $\Gamma$  sobre la cantidad de material perdido.

Debido a que el peso del recubrimiento ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) también ha sido reportado como una variable a considerar para evaluar la integridad del recubrimiento, se procedió a analizar el efecto de esta variable (ver Tabla 5.3) sobre la cantidad de material perdido de las muestras analizadas, Figura 5.24.

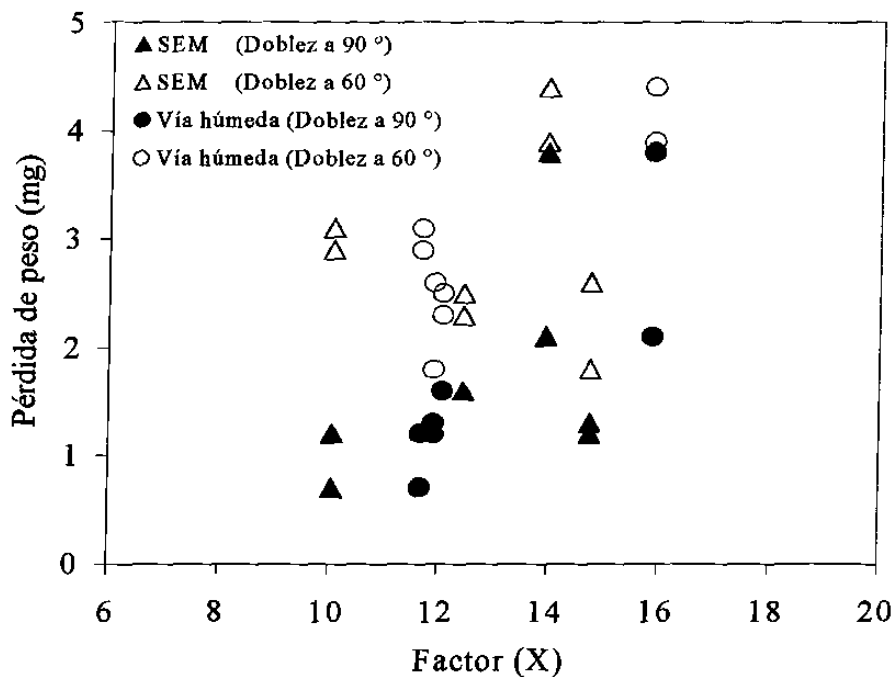


**Figura 5.24.-** Efecto del peso del recubrimiento sobre la cantidad de material perdido.

Otros autores <sup>(33)</sup> han considerado que además de la capa del recubrimiento, el contenido de Fe presente en el recubrimiento juega un papel importante en la integridad del recubrimiento y han reportado un factor (X) que incluye el porcentaje de Fe presente en el recubrimiento y al espesor del mismo para evaluar la integridad del recubrimiento. Este factor es la multiplicación del porcentaje de Fe dividido entre 100 por la capa del recubrimiento en g/m<sup>2</sup>, ver Ec. 5.1.

$$X = \frac{(\%Fe) * (p)}{100} \quad (5.1)$$

Donde **p** es el peso o capa del recubrimiento en g/m<sup>2</sup> obtenido según el estándar ASTM A 90/ A 90M – 95a. El porcentaje de Fe utilizado para obtener el factor (X), se obtuvo de los análisis realizados por SEM y vía húmeda. Ver Figura 5.25.



**Figura 5.25.-** Efecto del factor X del recubrimiento sobre la cantidad de material perdido en las muestras ensayadas.

El efecto del espesor del recubrimiento sobre la integridad del recubrimiento se presenta en las Figuras 5.26 y 5.27. El porcentaje de Fe utilizado para obtener el factor Y (Ec. 5.2) se obtuvo de los análisis realizados en el SEM y el espesor del recubrimiento (e) está en  $\mu\text{m}$ .

$$Y = \frac{(\%Fe) * (e)}{100} \quad (5.2)$$

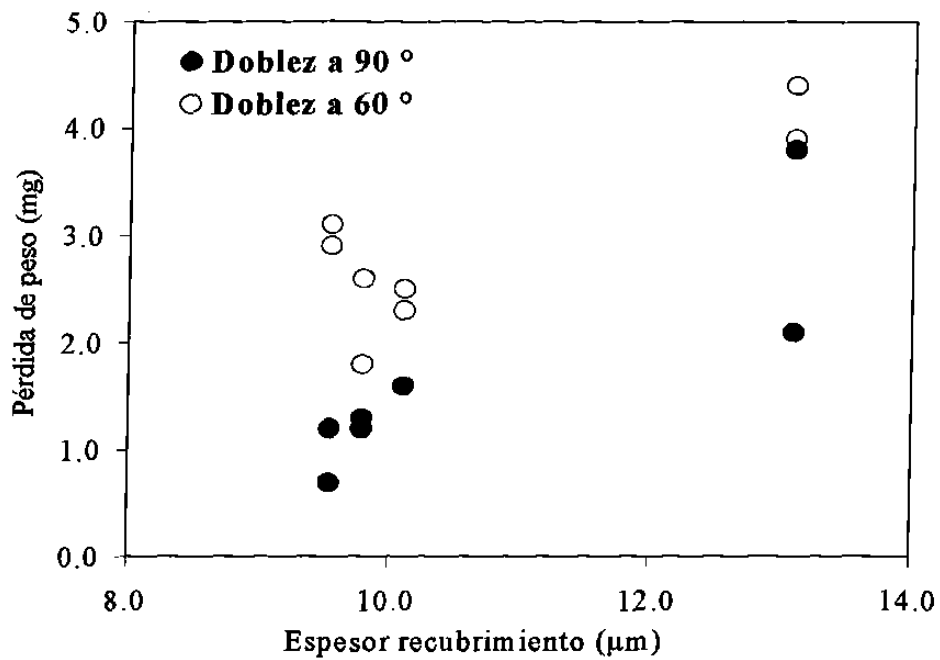


Figura 5.26.- Efecto del espesor del recubrimiento sobre la cantidad de material perdido.

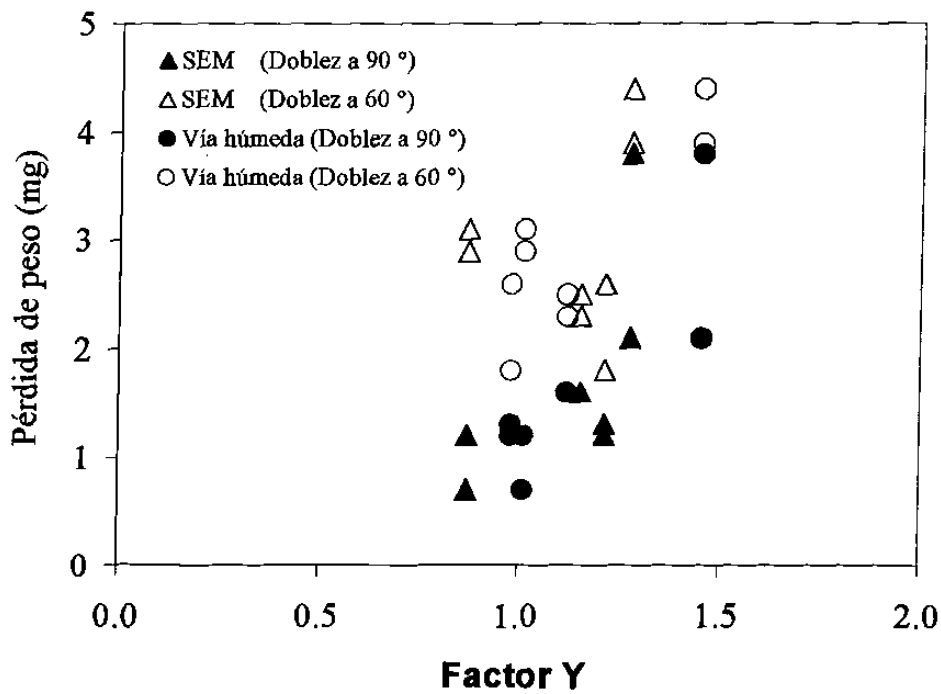
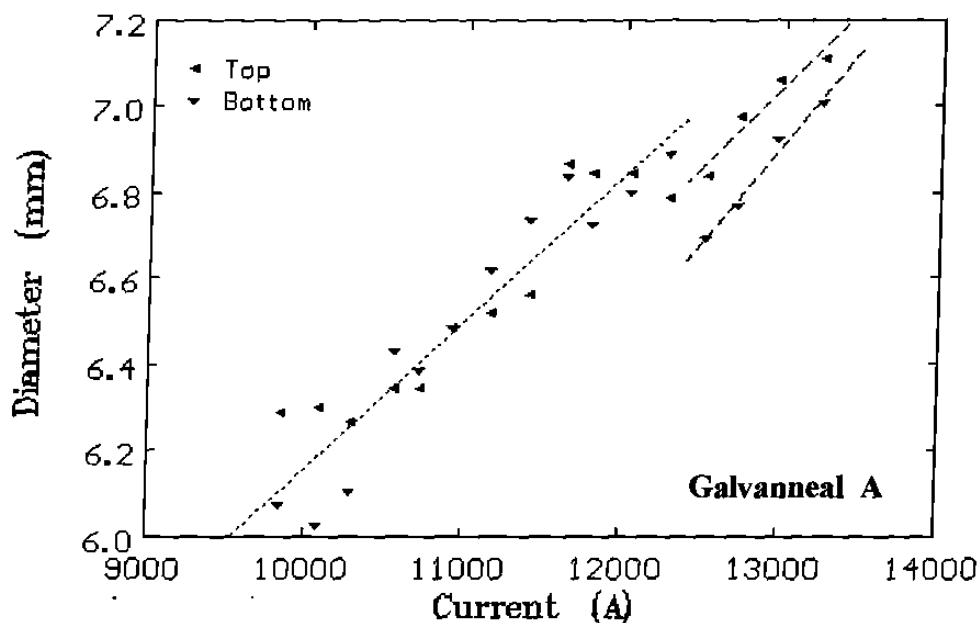


Figura 5.27.- Efecto del factor Y sobre la cantidad de material perdido de las muestras ensayadas.

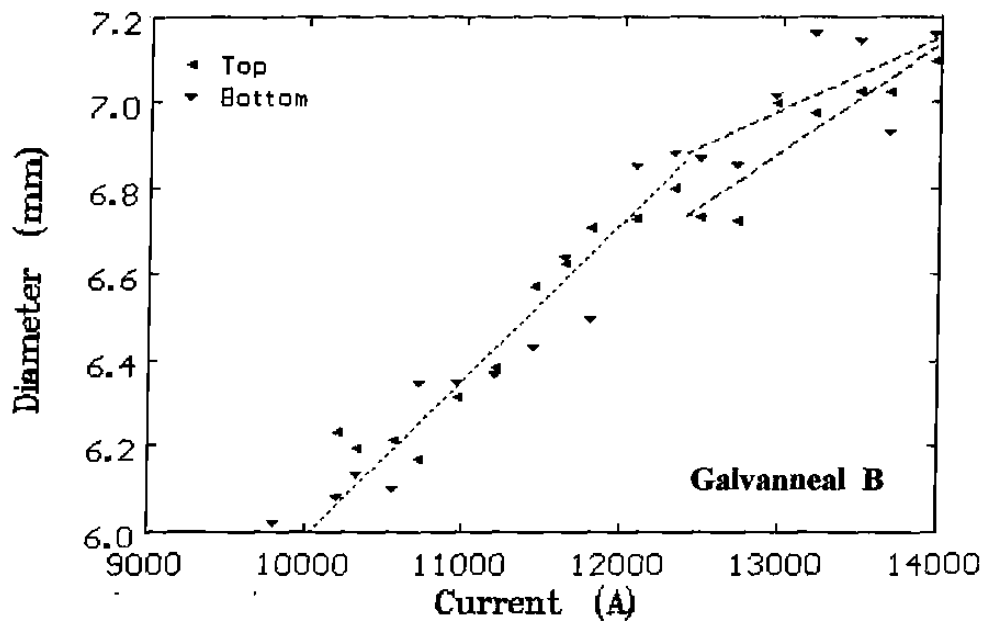
## 5.6 DIÁMETRO DE HUELLA EXTERIOR.

Para los efectos de calidad superficial se decidió considerar el diámetro exterior de la huella dejada por el electrodo. Una buena soldadura es aquella que cumple con los estándares requeridos como son: una corriente de soldadura dentro de los parámetros establecidos, un diámetro de la zona soldada adecuado, penetración máxima establecida de los electrodos, sin deteriorar la calidad superficial del punto de soldadura.

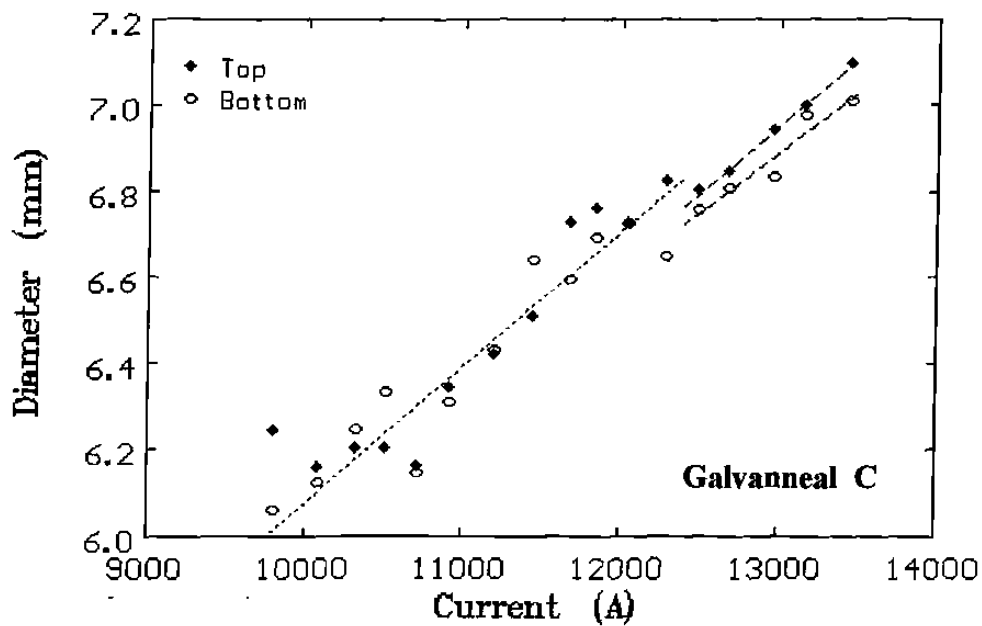
El diámetro promedio de la huella exterior dejada por el electrodo según la corriente de soldadura utilizada se puede observar en las Figuras 5.28 a la 5.32.



**Figura 5.28.-** Diámetro promedio de la huella exterior dejada por el electrodo en la muestra A con respecto a la corriente de soldadura aplicada.



**Figura 5.29.-** Diámetro promedio de la huella exterior dejada por el electrodo en la muestra B con respecto a la corriente de soldadura aplicada.



**Figura 5.30.-** Diámetro promedio de la huella exterior dejada por el electrodo en la muestra C con respecto a la corriente de soldadura aplicada.

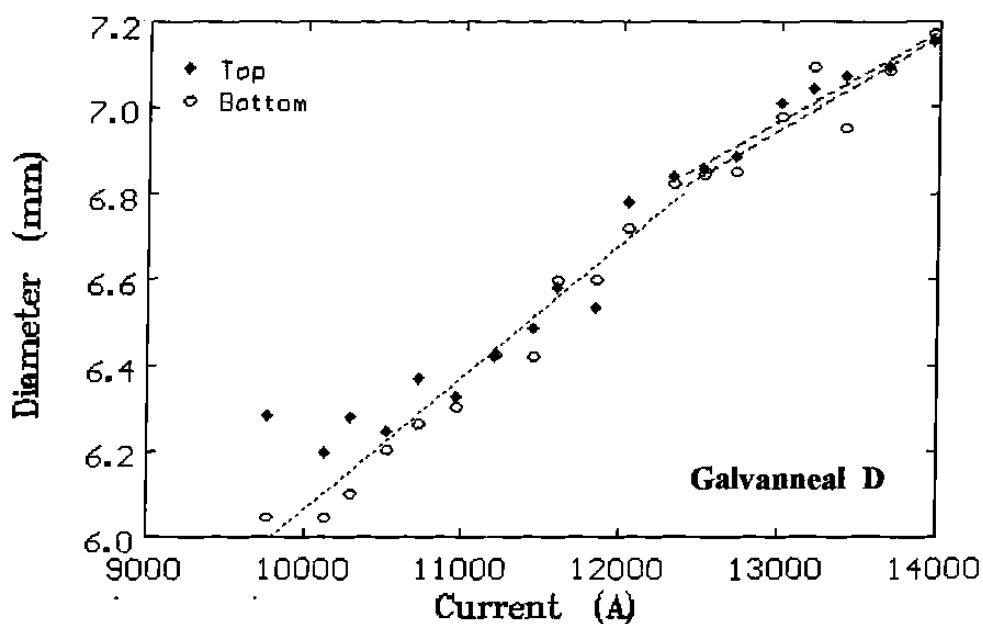


Figura 5.31.- Diámetro promedio de la huella exterior dejada por el electrodo en la muestra D con respecto a la corriente de soldadura aplicada.

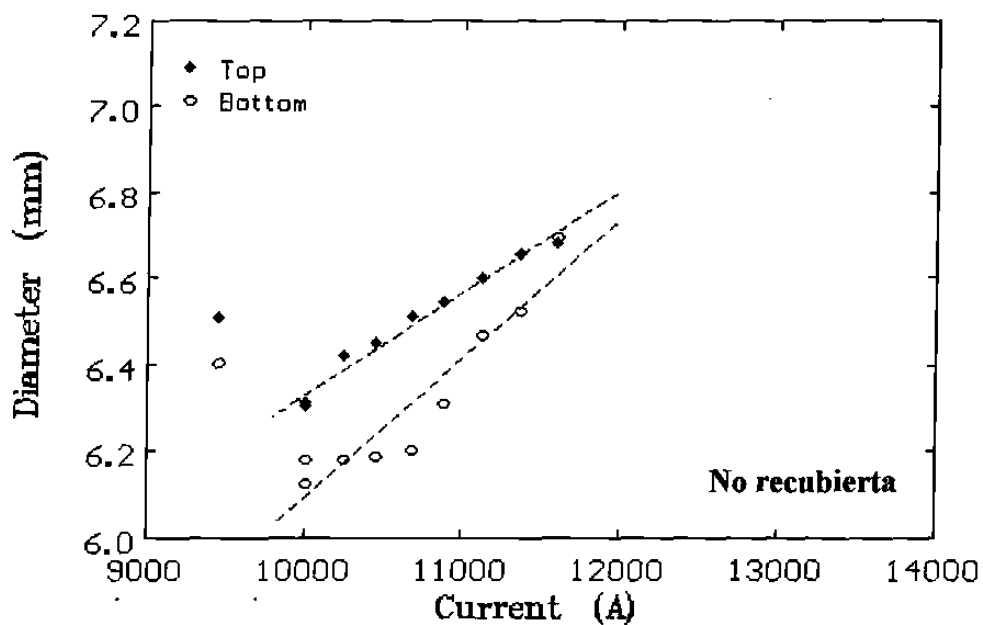
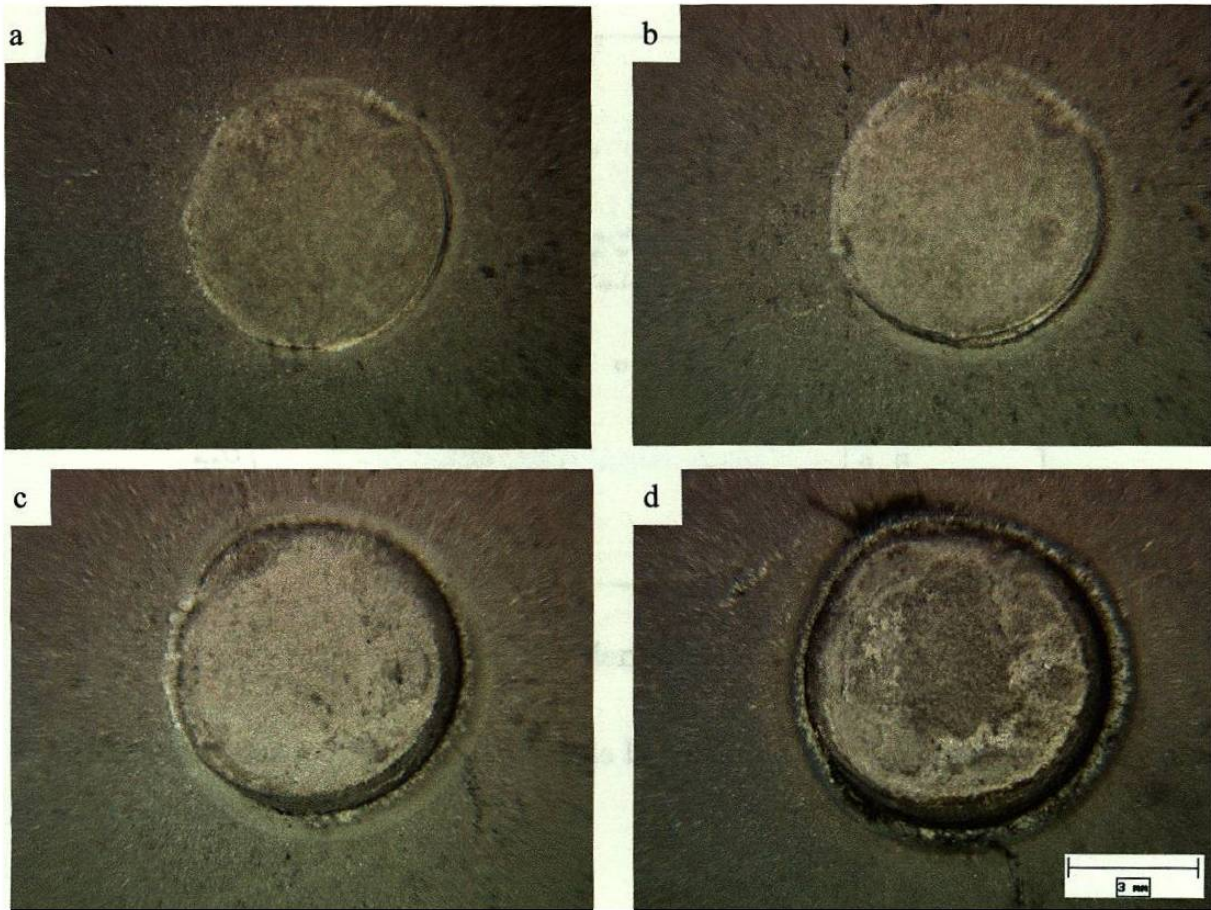


Figura 5.32.- Diámetro promedio de la huella exterior dejada por el electrodo en la muestra sin recubrimiento con respecto a la corriente de soldadura aplicada.



En la Figura 5.33 se presentan una serie de fotografías donde se puede observar claramente que el diámetro de la huella se incrementa conforme se aumenta la corriente de soldadura.



**Figura 5.33.-** Huella del electrodo inferior de la muestra D, a).- 9,760 amps, b).- 10,960 amps, c).- 12,520 amps, d).- 13,960 amps.

## **5.7 DIÁMETRO DE LA ZONA SOLDADA.**

Una de las variables más importantes para evaluar la calidad de la soldadura es el diámetro de la zona soldada, la cual hasta cierto punto, garantiza la resistencia mecánica de la soldadura. En la Figura 5.34 se puede observar como varía el diámetro de la zona soldada con respecto a la corriente de soldadura que es aplicada para las diferentes muestras.

Además se pueden observar los valores de corriente de soldadura y diámetro de la zona soldada que establecen los estándares utilizados como referencia <sup>(38,39)</sup>.

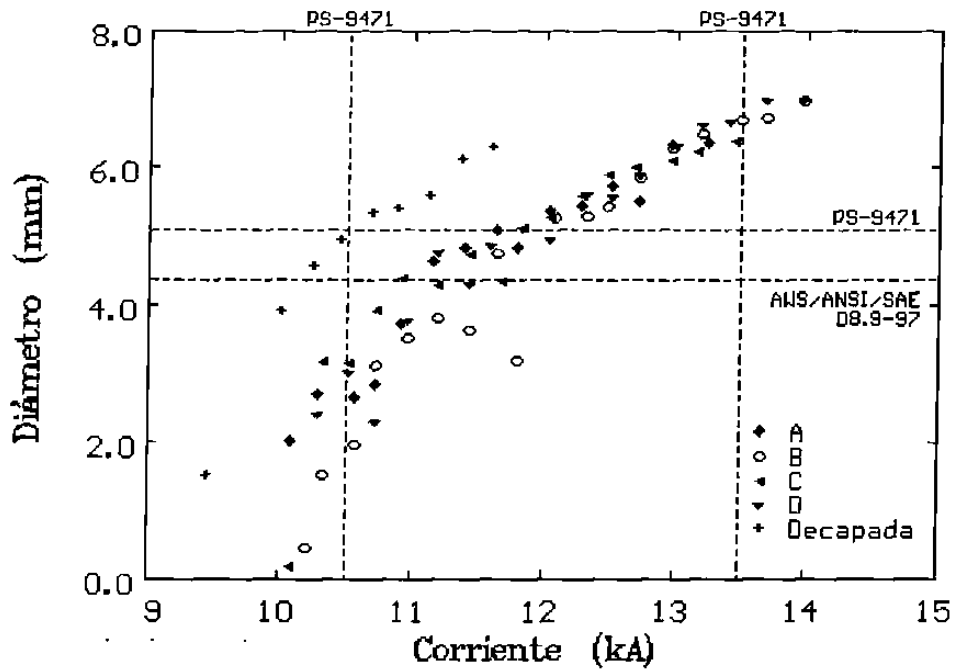


Figura 5.34.- Diámetro de la zona soldada de las muestras con respecto a la corriente de soldadura aplicada.

En la Figura 5.35 se muestra un acercamiento de la Figura 5.34 para poder observar los puntos de la gráfica que cumplen con los mínimos valores establecidos según los estándares anteriormente mencionados.

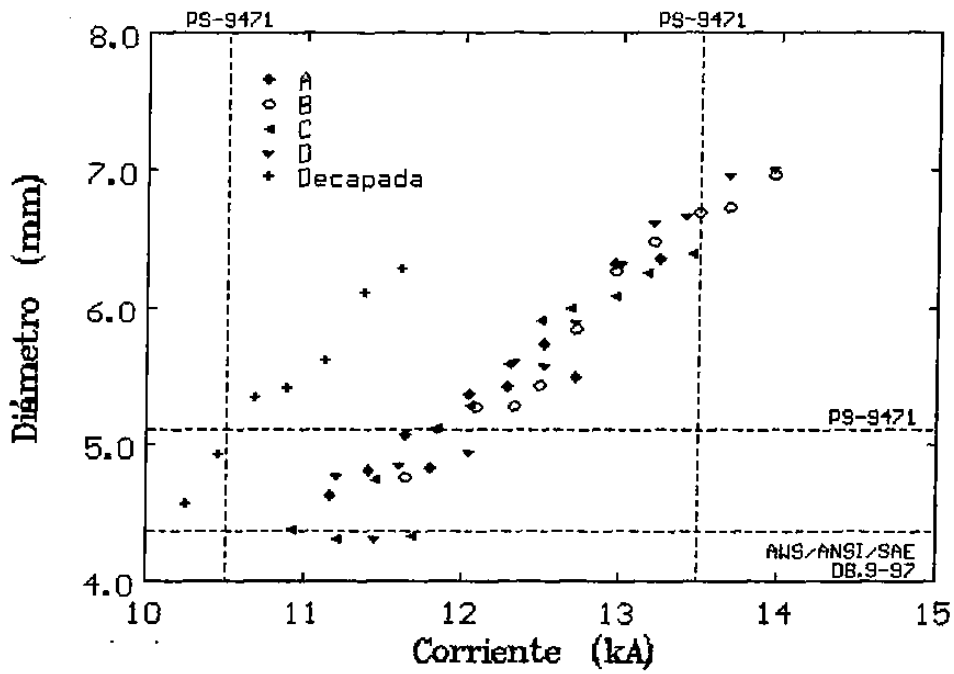
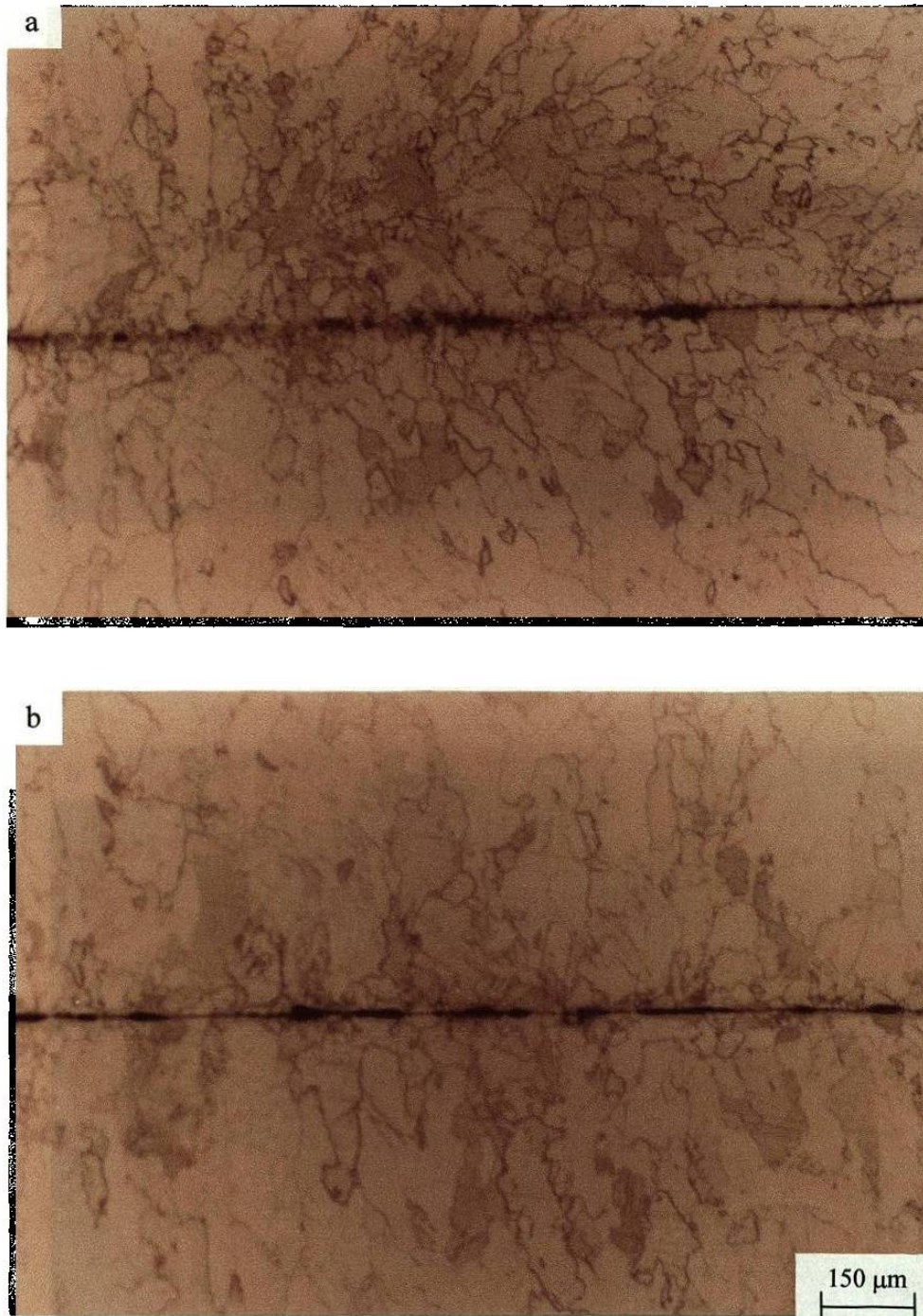
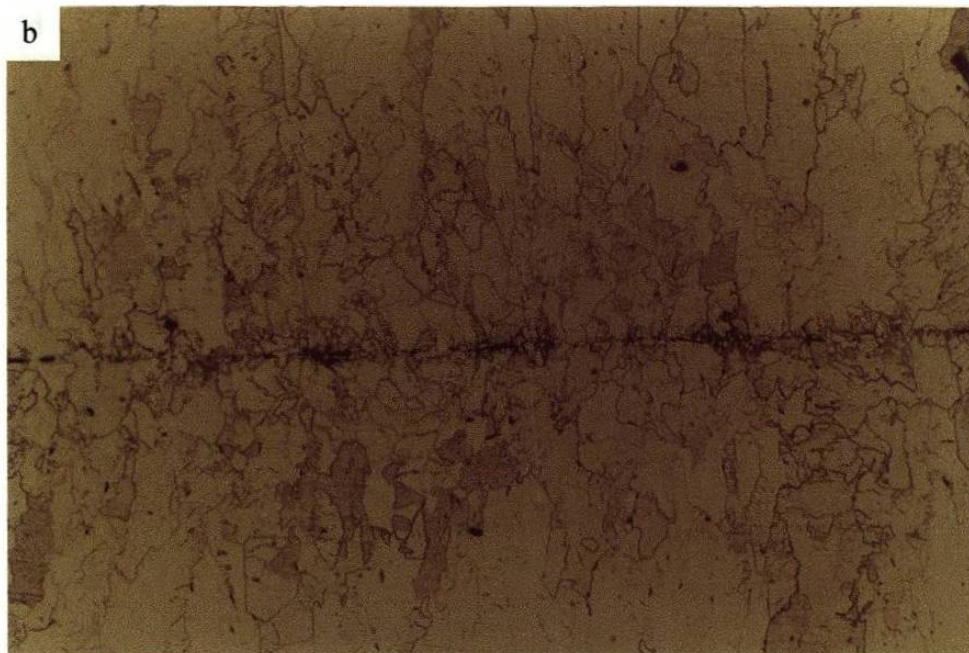
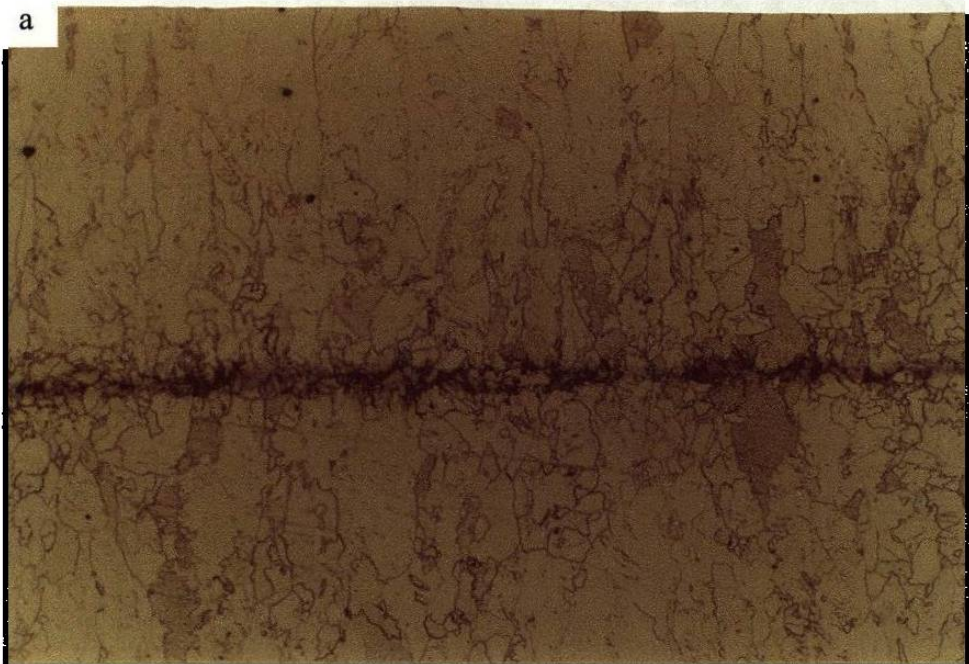


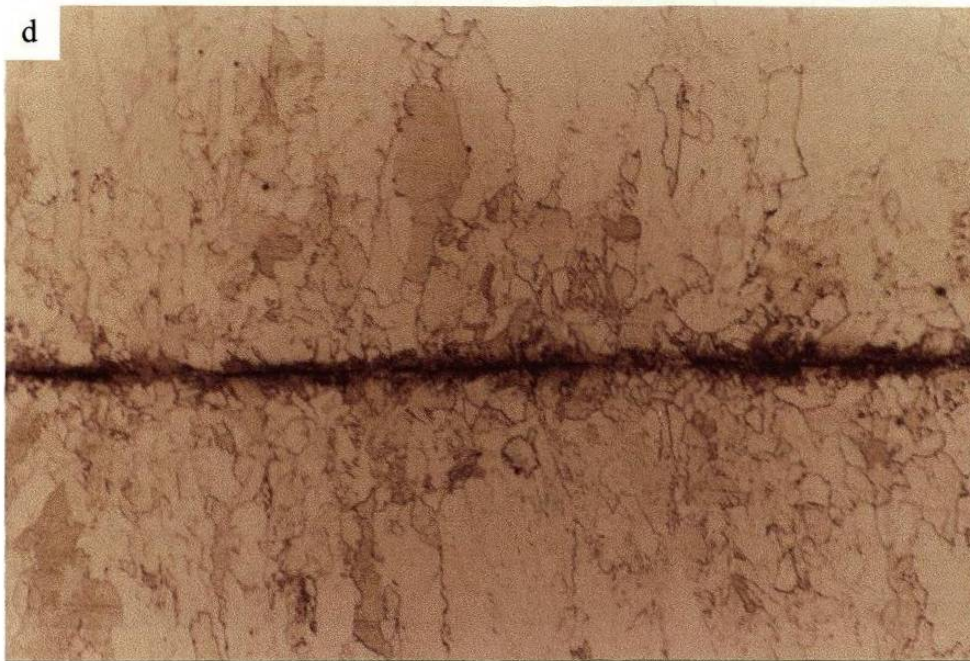
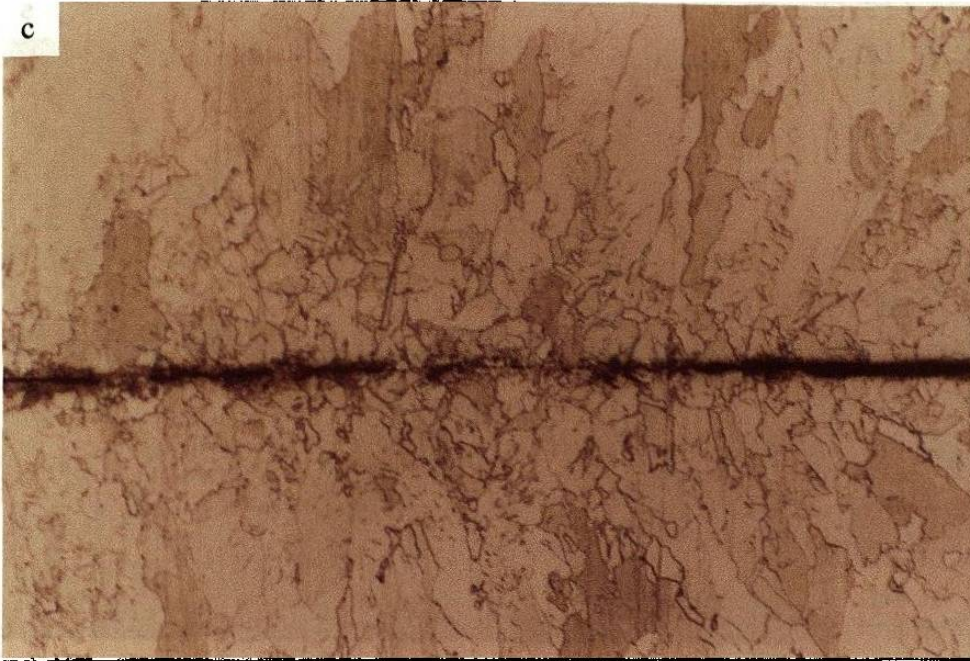
Figura 5.35.- Acercamiento de la Figura 5.34 para poder observar los puntos de la gráfica que cumplen con los estándares establecidos en el presente estudio.

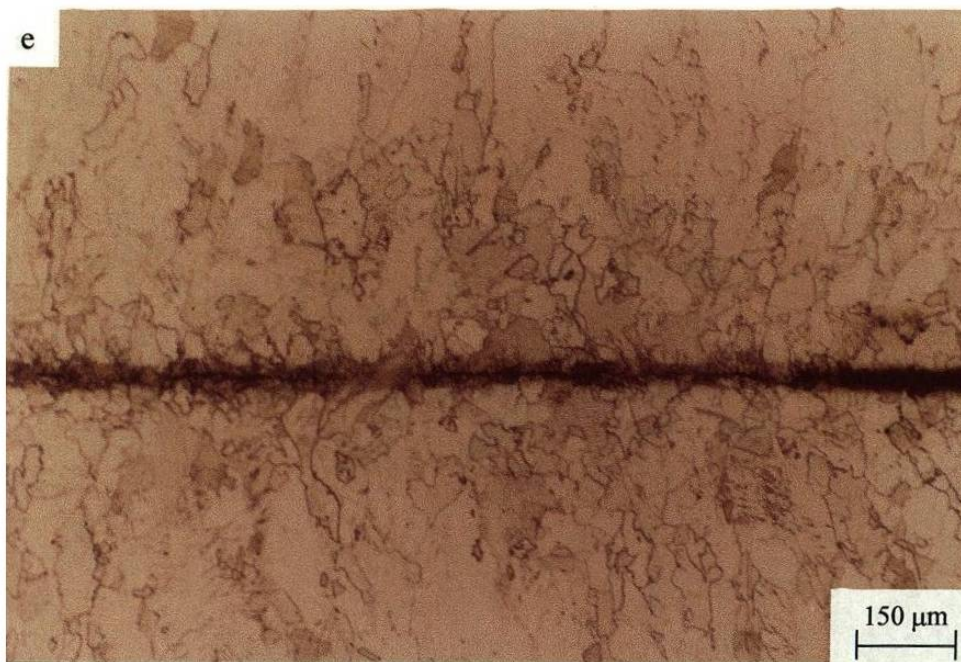
En las Figuras 5.36, 5.37, 5.38 y 5.39 se puede observar la evolución de la zona soldada conforme se aumenta la corriente de soldadura para las diferentes muestras analizadas.



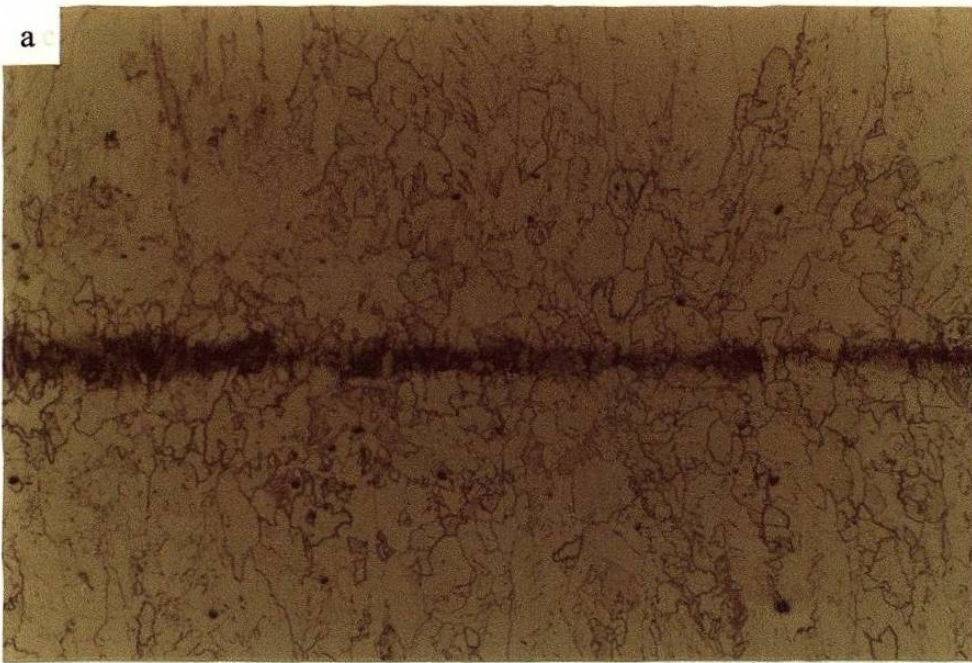
**Figura 5.36.-** Zona soldada en muestras decapada (a) a 9.44 kA y en muestra A (b) a 9.84 kA.



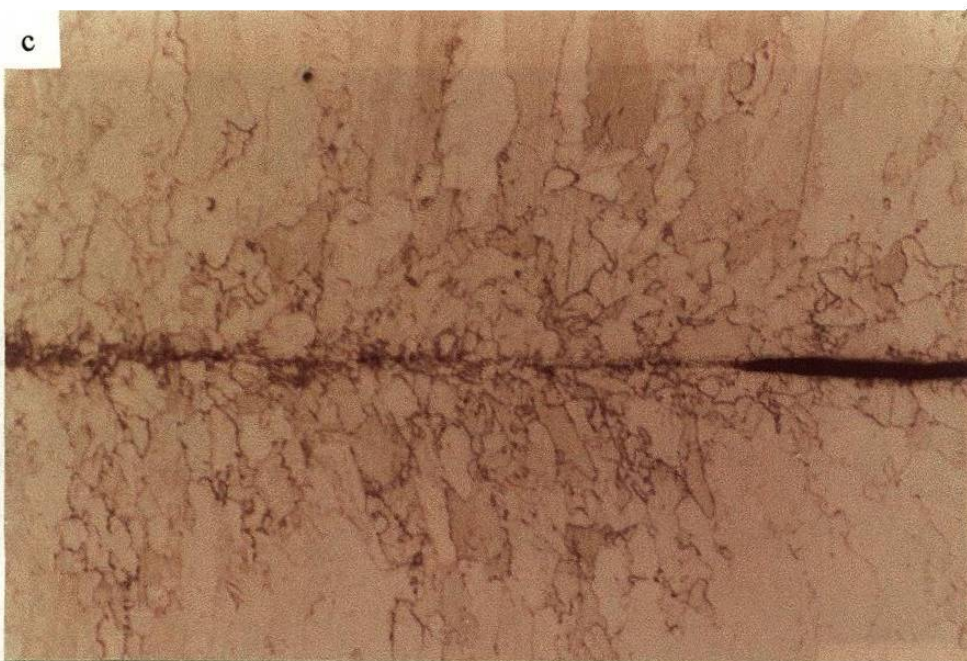


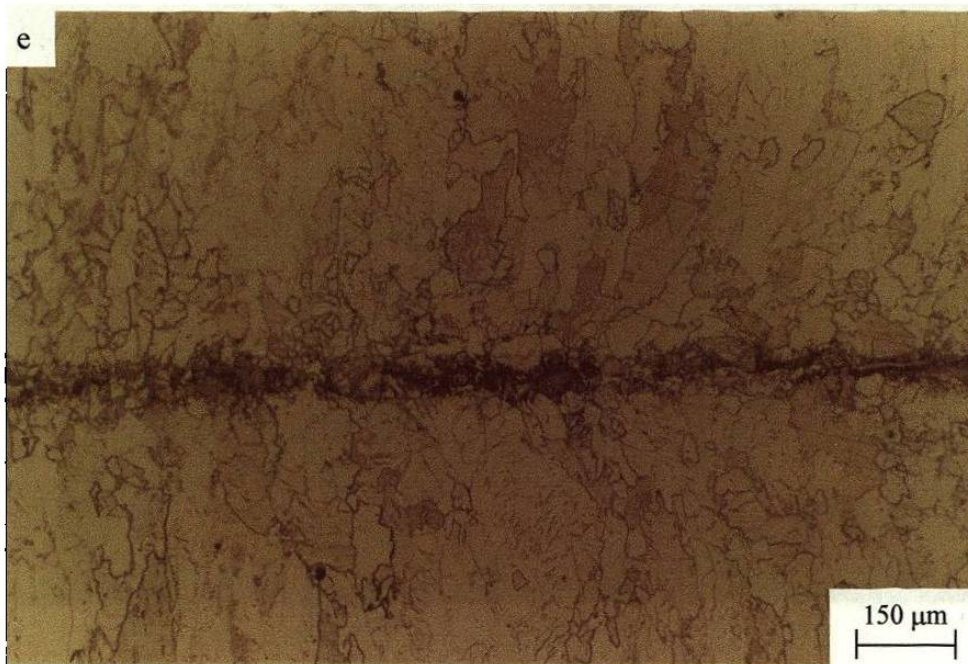


**Figura 5.37.-** Zona soldada en muestra decapada (10.0 kA) (a), b) muestra A (10.08 kA), c) muestra B (10.20 kA), d) muestra C (10.08 kA), e) muestra D (10.12 kA).









**Figura 5.38.-** Zona soldada en muestra decapada (10.24 kA) (a), b) muestra A (10.28 kA), c) muestra B (10.32 kA), d) muestra C (10.32 kA), e) muestra D (10.28 kA).