

No.

SECRETARIA GENERAL			JURADO EXAMINADOR		FECHA EXAMEN		
CONFORMACION DE NOTAS	FECHA		APELLIDOS Y NOMBRES	FIRMA			
REVISADO POR			Ignoto Vicente	<i>[Firma]</i>	25	10	2001
NOMBRE			RODRIGUEZ JACINTO	<i>[Firma]</i>			
FIRMA			Falcón Víctor Othman	<i>[Firma]</i>			



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA



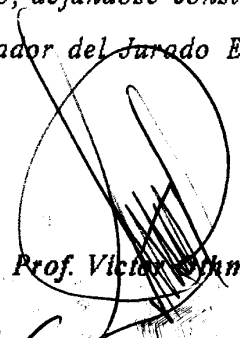
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCIÓN

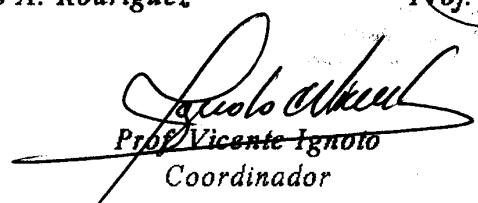
VEREDICTO

Los suscritos, miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller **MIGUEL ANGEL GRELLA CHACÓN**, Cédula de Identidad V.- 12. 419. 635, el cual lleva por título: **"SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PULSO EN LA SOLDADURA DE ALEACIONES Al-Si Y Al-Mg CON EL PROCESO GMAW-P"**, decidimos conferirle una **MENCION PUBLICACIÓN** como premio al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de esta Tesis de Grado. El trabajo constituye un aporte importante en la SOLDADURA DE ALEACIONES DE ALUMINIO A BASE DE SILICIO Y DE MAGNESIO CON EL PROCESO GMAW-P, debido a que los parámetros de pulso hallados para soldar estas aleaciones proporcionan depósitos de excelente calidad y no se reportan en la literatura.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en Caracas, a los veinticinco días del mes de octubre del año dosmil uno, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador el Prof. Vicente Ignoto.


Prof. (a). **María de los A. Rodríguez**


Prof. **Víctor Schman Falcón**


Prof. **Vicente Ignoto**
Coordinador

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PULSO EN LA SOLDADURA DE ALEACIONES Al-Si Y Al-Mg CON EL PROCESO GMAW-P

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Grella Ch., Miguel A.
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PULSO EN LA SOLDADURA DE ALEACIONES Al-Si Y Al-Mg CON EL PROCESO GMAW-P

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Vicente Ignoto

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Grella Ch., Miguel A.
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

© Miguel A. Grella Ch. 2001.

Hecho el Depósito de Ley

Depósito Legal N° 14872001620206

AGRADECIMIENTOS

Señor, te doy gracias por haber tenido la oportunidad de haber estudiado en esta maravillosa universidad y por darme vida y salud para llevar a cabo todas mis metas. Gracias Señor Dios por tener tampoco que pedirte y tanto que agradecerte.

Gracias a mis padres por haberme guiado por el buen camino, ayudarme y aconsejarme; sin ustedes no estaría donde estoy.

A mi esposa, por amarme y quererme, acompañarme y alentarme en el transcurso de mi carrera y en todo momento.

Al profesor y tutor Vicente Ignoto por su tiempo y por permitir que el Centro Venezolano de Soldadura dispusiera los recursos necesarios para la realización de este trabajo.

A mi escuela de Ingeniería Mecánica y a esta universidad por haberme formado como profesional y como humano.

A todo el personal del CVS, en particular a la Ing. Isis Plaza por su colaboración.

Gracias a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, al Laboratorio Químico Instrumental, al personal del CENMACOR y del Laboratorio de Aluminio, en especial al Prof. Crisanto Villalobos.

A mis compañeros y a todas esas personas que prestaron su colaboración para la realización de este trabajo.

Grella Ch., Miguel A.

SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PULSO EN LA SOLDADURA DE ALEACIONES Al-Si Y Al-Mg CON EL PROCESO GMAW-P

**Tutor Académico: Prof. Vicente Ignoto. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2001. 138 pág.**

Palabras Claves: GMAW Pulsado, Parámetros de Pulso, Zona Paramétrica, Características del depósito, Aleación de Aluminio.

El objetivo de este trabajo es la selección de los parámetros de pulso en la soldadura de aleaciones de aluminio con el proceso GMAW-P, los cuales son de vital importancia en la producción de depósitos de calidad, ya que influyen en el tipo de transferencia metálica y en las características geométricas del cordón. La compleja interdependencia existente entre los parámetros de pulso, corriente pico (I_p), tiempo pico (T_p), corriente base (I_b) y tiempo base (T_b) hace difícil la selección de la combinación de parámetros más adecuada para lograr soldaduras de calidad. Con base en el método desarrollado por *Amin* y considerando las respectivas correcciones realizadas por *Rajasekaran et al* se determinó una zona paramétrica inicial que proporcionó arcos eléctricos estables con tasas de consumos balanceadas con la velocidad de alimentación, para tiempos de ciclos fijos y desprendimiento de una gota por pulso. Mediante ensayos adicionales, se redujo la zona paramétrica a un área de comportamiento estable tomando en cuenta aquellas condiciones que produjeron arcos con alto consumo del alambre, esto condujo a la selección de tres combinaciones de parámetros de pulso entre las cuales la condición dada por $I_p = 320$ A, $T_p = 2.3$ ms, $I_b = 60$ A, $T_b = 5.7$ ms, $W = 6$ m/min y $V_a = 10$ mm/s empleando aporte ER 4043 e $I_p = 300$ A, $T_p = 2.3$ ms, $I_b = 46$ A, $T_b = 3.7$ ms, $W = 8$ m/min y $V_a = 13.33$ mm/s empleando aporte ER 5356, produjeron depósitos de calidad. La selección se hizo en base a la inspección visual (aspecto superficial, continuidad y salpicaduras) y a la caracterización química y metalográfica.

ÍNDICE GENERAL

Página

INTRODUCCIÓN.....	1
--------------------------	----------

CAPITULO 1:

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
1.1. El aluminio y sus aleaciones.....	4
1.1.1. Designación para aleaciones de aluminio.....	4
1.1.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio.....	6
1.1.2.1. Aleaciones de Aluminio Tratables Térmicamente.....	6
1.1.2.2. Aleaciones de Aluminio No Tratables Térmicamente.....	10
1.2. Soldabilidad del Aluminio.....	14
1.2.1. Formación de Óxidos.....	15
1.2.2. Solubilidad del Hidrógeno.....	14
1.2.3. Agrietamiento en Caliente.....	15
1.2.4. Porosidad.....	16
1.2.5. Conductividad Eléctrica.....	17
1.2.6. Características Térmicas.....	17
1.2.7. Influencia de los Elementos Aleantes en las Propiedades de las Aleaciones de Aluminio.....	18
1.3. Proceso GMAW-P.....	22
1.3.1. Principios de Operación del Proceso GMAW-P.....	22
1.3.2. Equipo.....	22
1.3.3. Material de Aporte.....	24
1.3.4. Modos de Transferencia	25
1.3.4.1. Transferencia Cortocircuito.....	27
1.3.4.2. Transferencia Globular.....	28
1.3.4.3. Transferencia Spray.....	29
1.3.4.4. Transferencia por Tensión Superficial (STT).....	31
1.3.4.5. Transferencia Pulsada (GMAW-P).....	32

1.3.5. Determinación de los Parámetro de Pulso Mediante el Método de la Zona Paramétrica.....	36
1.3.5.1. Criterio de Burnoff.....	37
1.3.5.2. Criterio de Transferencia Metálica.....	41
1.3.5.3. Criterio de Estabilidad del Arco.....	47
1.4. Caracterización de la Soldadura.....	48
1.4.1.1. Técnicas no Destructivas de Caracterización.....	49
1.4.1.2. Caracterización Interna Mediante Procedimientos Destructivos.....	50
1.4.1.3. Técnicas de Medición y Procedimientos.....	50

CAPITULO 2:

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	52
2.1. Equipo de Soldadura.....	52
2.1.1. Procedimiento de Soldadura.....	54
2.2. Registro y Análisis de Oscilogramas.....	56
2.3. Caracterización Química del Material Base y de Aporte.....	57
2.4. Selección de los Parámetros de Pulso.....	59
2.4.1. Criterio de Burnoff.....	59
2.4.2. Criterio de Transferencia Metálica.....	59
2.4.2.1. Limitación de la Corriente Pico (I_p) y Tiempo Pico (T_p).....	59
2.4.2.2. Determinación del parámetro de desprendimiento (K_v).....	60
2.4.3. Criterio de Estabilidad del Arco.....	61
2.4.4. Construcción de la Zona Paramétrica.....	61
2.4.5. Preparación Metalográfica.....	62
2.4.5.1. Macrografía.....	65
2.4.5.2. Micrografía.....	65
2.4.6. Medición de la Geometría de los Depósitos.....	67

CAPITULO 3:

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
3.1. Caracterización Química del Material.....	70
3.1.1. Material Base.....	70
3.1.2. Material de Aporte.....	70
3.1.3. Cordón de Soldadura.....	71
3.2. Selección de los Parámetros de Pulso.....	72
3.2.1. Criterio de Burnoff.....	72
3.2.2. Criterio de Transferencia Metálica.....	80
3.2.2.1. Determinación del Parámetro de Desprendimiento K_V	86
3.2.3. Criterio de Estabilidad del Arco.....	100
3.2.4. Construcción de la Zona Paramétrica.....	101
3.3. Estudio Metalográfico.....	114
3.3.1. Macrografía.....	114
3.3.2. Micrografía.....	122

CAPITULO 4:

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
4.1. Conclusiones	
4.2. Recomendaciones	

CAPITULO 5:

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
6. ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Proceso de soldadura GMAW automático	23
2. Mecanismo de autorregulación de la longitud del arco durante el proceso de soldadura GMAW.....	24
3. Modelo de transferencia metálica según la teoría de la opresión inestable.....	27
4. Oscilogramas y sketches de transferencia en modo cortocircuito.....	28
5. Transferencia Globular.....	29
6. Variación en volumen y tasa de transferencia de gotas para un acero al carbono....	30
7. Corriente en el electrodo y formas de onda de tensión para un ciclo típico de soldadura.....	31
8. Tasa de consumo típicas para electrodos de aluminio empleando GMAW.....	33
9. Curva voltio-ampere para corriente pulsada.....	34
10. Gráfica del Criterio de Burnoff para soldadura convencional y por arco pulsado....	38
11. Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff.....	40
12. Oscilogramas típicos de corriente y tensión representando separación de una gota por pulso (izquierda) y más de una gota por pulso (derecha).....	42
13. Relación entre I_p y T_p para diferentes tipos de separación de gota por pulso.....	43
14. Corriente y voltaje del arco empleando soldadura convencional.....	44
15. Histograma de frecuencia para los intervalos de tiempo con parámetros dados.....	44
16. Relación entre los niveles de corriente y volumen modal de gota (izquierda); Relación entre tiempo modal de desprendimiento de gota y volumen modal de gota (derecha).....	45
17. Imposición de la curva paramétrica de separación (curva B) sobre la zona predicha por el Criterio de Burnoff.....	46
18. Límite de corriente base (C), junto con la curva paramétrica de separación (B), superpuestas sobre la zona paramétrica predicha por el criterio de burnoff.....	47
19. Máquina de soldar MTE DIGITEC.....	52
20. Panel de control.....	53

21. Carro guía para deposición de los cordones.....	54
22. Disposición general del equipo.....	55
23. Pantalla de trabajo del software Microcal Origin 4.0.....	56
24. Corte de los cupones de prueba.....	62
25. Secciones del cupón de prueba.....	63
26. Sierra de esmeril BUEHLER Abrasimet 2.....	63
27. Prensa de montaje BUEHLER Simplimet 3.....	64
28. Lijador-pulidor de dos velocidades BUEHLER Ecomet 5.....	64
29. Pulidora BUEHLER Vibramet 2.....	65
30. Celda de ataque electrolítico.....	66
31. Medición de la geometría del depósito.....	67
32. Características de Burnoff para corriente constante y corriente pulsada usado aporte ER 4043 de diámetro 1.2 mm.....	74
33. Características de Burnoff para corriente constante y corriente pulsada usado aporte ER 5356 de diámetro 1.2 mm.....	76
34. Zona Paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 4043.....	78
35. Zona Paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 5356.....	79
36. Oscilograma S.11 indicando una gota por pulso. ER 4043.....	82
37. Oscilograma S.9 indicando una gota por pulso. ER 4043.....	83
38. Oscilograma M.12 indicando una gota por pulso. ER 5356.....	83
39. Oscilograma M.14 indicando una gota por pulso. ER 5356.....	84
40. Relación I_p vs. T_p para desprendimiento de una gota por pulso. ER 4043.....	85
41. Relación I_p vs. T_p para desprendimiento de una gota por pulso. ER 5356.....	85
42. Oscilograma S.17. ER 4043.....	88
43. Histograma correspondiente al ensayo S.17 indicando un $T_{MD} = 2.08$ ms. ER 4043.....	88
44. Oscilograma S.18. ER 4043.....	89
45. Histograma correspondiente al ensayo S.18 indicando un $T_{MD}=1.79$ ms. ER 4043.....	89

46. Oscilograma S.19. ER 4043.....	90
47. Histograma correspondiente al ensayo S.19 indicando un $T_{MD}=1.56$ ms. ER 4043.....	90
48. Oscilograma S.20. ER 4043.....	91
49. Histograma correspondiente al ensayo S.20 indicando un $T_{MD} = 1.29$ ms. ER 4043.....	91
50. Oscilograma M.15. ER 5356.....	92
51. Histograma correspondiente al ensayo M.15 indicando un $T_{MD} = 3.00$ ms. ER 5356.....	92
52. Oscilograma M.16. ER 5356.....	93
53. Histograma correspondiente a ensayo M.16 indicando un $T_{MD} = 2.6667$ ms. ER 5356.....	93
54. Oscilograma M.17. ER 5356.....	94
55. Histograma correspondiente a ensayo M.17 indicando un $T_{MD} = 1.72$ ms. ER 5356.....	94
56. Oscilograma M.18. ER 5356.....	95
57. Histograma correspondiente al ensayo M.18 indicando un $T_{MD} = 0.78$ ms. ER 5356.....	95
58. Oscilograma M.19. ER 5356.....	96
59. Histograma correspondiente al ensayo M.19 indicando un $T_{MD} = 0.50$ ms. ER 5356.....	96
60. Relación entre volumen modal de gota y corriente continua	98
61. Relación entre tiempo modal de gota y corriente continua .ER 4043.....	98
62. Relación entre volumen modal de gota y corriente continua	98
63. Relación entre tiempo modal de gota y corriente continua .ER 5356.....	98
64. Límite de corriente base junto con curva paramétrica de separación superpuestas sobre la zona paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 4043.....	102
65. Límite de corriente base junto con curva paramétrica de separación superpuestas sobre la zona paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 5356.....	104
66. Zona paramétrica estable. ER 4043.....	107

Índice de Figuras

67. Zona paramétrica estable. ER 5356.....	108
68. Cupón de prueba SC.1. $V_a = 10$ mm/s, $I_p = 320$ A, $T_p = 2.3$ ms, $I_b = 60$ A, $T_b = 5.7$ ms. ER 4043 vs. AA 1100.....	110
69. Cupón de prueba SC.2. $V_a = 10$ mm/s, $I_p = 395$ A, $T_p = 2$ ms, $I_b = 45$ A, $T_b = 6$ ms. ER 4043 vs. AA 1100.....	111
70. Cupón de prueba SC.3. $V_a = 10$ mm/s, $I_p = 320$ A, $T_p = 2.5$ ms, $I_b = 47$ A, $T_b = 5.5$ ms. ER 4043 vs. AA 1100.....	112
71. Cupón de prueba MC.1. $V_a = 13.33$ mm/s, $I_p = 300$ A, $T_p = 2.4$ ms, $I_b = 36$ A, $T_b = 3.6$ ms. ER 5356 vs. AA 1200.....	112
72. Cupón de prueba MC.2. $V_a = 13.33$ mm/s, $I_p = 300$ A, $T_p = 2.3$ ms, $I_b = 46$ A, $T_b = 3.7$ ms. ER 5356 vs. AA 1100.....	113
73. Cupón de prueba MC.3. $V_a = 13.33$ mm/s, $I_p = 290$ A, $T_p = 2.5$ ms, $I_b = 36$ A, $T_b = 3.5$ ms. ER 5356 vs. AA 1200.....	113
74. Geometría del depósito de soldadura.....	114
75. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta SC.1.....	115
76. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta SC.2.....	115
77. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta SC.3.....	116
78. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta MC.1.....	116
79. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta MC.2.....	117
80. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta MC.3.....	117
81. Efecto del calor aportado en la penetración (L_p), altura de refuerzo (L_R) y ancho de cordón (W) para una relación $W_F/V_a = 10$	120
82. Efecto del calor aportado en las relaciones de forma W/L_R y W/L_P para una relación $W_F/V_a = 10$	121
83. Efecto del calor aportado en el porcentaje de dilución para una relación $W_F/V_a =$ 10.....	122
84. Microestructuras en distintas zonas del depósito SC.1.....	123
85. Microestructuras en distintas zonas del depósito SC.2.....	125
86. Microestructuras en distintas zonas del depósito SC.3.....	127
87. Microestructuras en distintas zonas del depósito MC.1.....	128
88. Microestructuras en distintas zonas del depósito MC.2.....	130
89. Microestructuras en distintas zonas del depósito MC.3.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Sistema de designación de aleaciones de aluminio según Aluminum Association.....	4
2. Designación numérica para tratamientos de aleaciones de aluminio tratables térmicamente.....	5
3. Designación numérica para tratamientos de aleaciones de aluminio no tratables térmicamente.....	6
4. Composiciones y Aplicaciones de las Aleaciones Maquinadas Tratables Térmicamente.....	7
5. Aplicaciones de algunas Aleaciones Maquinadas No Tratables Térmicamente.....	10
6. Composición de aleaciones de aluminio maquinadas no tratables térmicamente.....	12
7. Especificaciones Técnicas de la máquina de soldar MTE DIGITEC.....	53
8. Composición Química del metal base y aporte según ANSI/AWS A5.10.....	57
9. Composición química del material base.....	70
10. Composición química del material de aporte.....	71
11. Composición química de los depósitos.....	71
12. Parámetros de arco estable con GMAW-P. ER 4043.....	72
13. Parámetros de arco estable con GMAW convencional. ER 4043.....	73
14. Parámetros de arco estable con GMAW-P. ER 5356.....	75
15. Parámetros de arco estable con GMAW convencional. ER 5356.....	75
16. Condiciones base para obtener la relación I_p vs. T_p	81
17. Relación I_p vs. T_p para ER 4043. ($I_b = 60$ A, $T_b = 6$ ms).....	81
18. Relación I_p vs. T_p para ER 5356. ($I_b = 40$ A, $T_b = 4$ ms).....	82
19. Pendientes de la relación I_p vs. T_p	86
20. Parámetros de corriente constante para obtener el parámetro K_v . ER 4043.....	86
21. Parámetros de corriente constante para obtener el parámetro K_v . ER 5356.....	87

22. Tiempo modal de gota y volumen modal de gota. ER 4043.....	97
23. Tiempo modal de gota y volumen modal de gota. ER 5356.....	97
24. Valores I_{DC} y T_{MD} para $V_{MD} = 0.905 \text{ mm}^3$	99
25. Valores mínimos de corriente base.....	100
26. Parámetros de pulso para afinar la zona paramétrica. ER 4043.....	103
27. Parámetros de pulso para afinar la zona paramétrica. ER 5356.....	105
28. Parámetros de pulso empleados para realizar los cupones de prueba con ER 4043. $V_a = 10 \text{ mm/s}$	109
29. Parámetros de pulso empleados para realizar los cupones de prueba con ER 5356. $V_a = 13.3 \text{ mm/s}$	110
30. Geometría del depósito y relaciones de forma.....	118
31. Geometría del depósito y relaciones de forma. Media aritmética.....	119

LISTADO DE SÍMBOLOS

- I_p = corriente pico
- I_b = corriente base
- I_M = corriente media
- I_{DC} = corriente constante
- T_p = tiempo pico
- T_b = tiempo base
- T = tiempo de ciclo
- T_D = tiempo de desprendimiento de gota
- T_{MD} = tiempo modal de desprendimiento de gota
- W = ancho de cordón
- W_F = velocidad de alimentación del alambre
- V_a = velocidad de avance
- V = tensión
- V_D = volumen de gota
- V_{MD} = volumen modal de gota
- L_p = profundidad de penetración
- L_R = altura de refuerzo
- A_p = área de sección transversal de penetración
- A_R = área de sección transversal de refuerzo
- W_F = área de sección transversal total del depósito
- m = pendiente de recta
- K_v = parámetro de desprendimiento
- C = constante

INTRODUCCIÓN

El Aluminio es un material que se ha incorporado progresivamente dentro de la industria gracias a su alta resistencia, bajo peso y ductilidad, entre otras propiedades. Parte de ésta incorporación se debe al desarrollo de nuevas tecnologías de unión, principalmente la Soldadura por Fusión y más objetivamente el proceso de Soldadura por Arco Eléctrico con Protección Gaseosa denominado por la American Welding Society (AWS) “Gas Metal Arc Welding” (GMAW).

GMAW es un proceso de alta productividad, su principal característica es la alimentación automática de un consumible (electrodo continuo), que es protegido externamente por un gas, actualmente se usa en la soldadura del aluminio en aplicaciones tan diversas como por ejemplo, la industria automotriz, férrea, náutica, aeronáutica y aeroespacial.

Este trabajo contempla el estudio de una variante del proceso GMAW, desarrollada recientemente, conocida con el nombre de GMAW pulsado (GMAW-P), cuya principal característica es la variación del nivel de corriente entre un valor pico (I_p) y uno base (I_b) a intervalos fijos de tiempo (T_p y T_b). Estos parámetros de pulso junto con otras variables como la velocidad de alimentación del alambre, la velocidad de avance y el flujo y tipo de gas, tienen una fuerte influencia en las características geométricas y superficiales de los cordones de soldadura, por lo cual es imprescindible que los valores de estos parámetros sean los más adecuados para que los depósitos realizados cumplan con los niveles de calidad exigidos por la aplicación.

Debido a la compleja interrelación entre los parámetros de pulso (I_p , T_p , I_b , T_b), y la amplia gama de las combinaciones posibles, la selección de estos parámetros se hace verdaderamente difícil, por lo que en muchos casos las soldaduras realizadas no satisfacen verdaderamente los requerimientos de cada aplicación.

Sin embargo, investigadores de todo el mundo se han volcado al desarrollo de métodos matemático-experimentales para seleccionar correctamente dichos parámetros. Entre ellos se destaca uno denominado *método de la zona paramétrica* basado en la construcción de un área paramétrica determinada bajo requerimientos de estabilidad de arco y transferencia metálica. Esta área permite seleccionar la combinación de parámetros de pulso mas adecuada para producir soldaduras de calidad.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

1.1.1. DESIGNACIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO

El Sistema de designación de aleaciones y tratamientos de Aluminum Association (Aluminum Association Alloy and Temper Designation System^[1]) forma parte de los estándares de la American National Standards Institute (ANSI) en las secciones H35.1 y H35.2. El sistema usado consiste de cuatro dígitos, el primero de ellos indica el grupo de aleación y el segundo una modificación consecutiva de la aleación original. En el caso de la serie 1XXX los últimos dos dígitos indican el porcentaje mínimo de pureza. (Ej. 1060 tiene un 99.60 % mín. de Al). La tabla 1 muestra la nomenclatura usada para designar cada uno de los grupos de aleaciones de aluminio.

Tabla 1. Sistema de designación de aleaciones de aluminio según Aluminum Association^[1].

Principal elemento aleante	Grupo de aleación
Aluminio puro, 99.00 % o mayor	1XXX
Cobre	2XXX
Manganeso	3XXX
Silicio	4XXX
Magnesio	5XXX
Magnesio y Silicio	6XXX
Zinc	7XXX
Otros elementos	8XXX
Series inusuales	9XXX

Cuando las aleaciones de aluminio tratables térmicamente son sometidas a tratamientos térmicos o mecánicos se utiliza la designación de tratamiento (*Temper*) como complemento de la designación de aleación. La designación común para tratamientos utiliza una H para denotar el trabajo en frío, una O para representar un material recocido y una T acompañada de uno o más números para indicar una secuencia específica de tratamientos térmicos. La tabla 2 resume la designación numérica usada para describir esta secuencia.

Tabla 2. Designación numérica para tratamientos de aleaciones de aluminio tratables térmicamente^[2].

Tratamiento	Descripción
T1	Enfriamiento desde una temperatura elevada, mediante un proceso controlado y envejecido naturalmente a una condición solidamente estable.
T2	Enfriamiento desde una temperatura elevada, mediante un proceso controlado, trabajado en frío y envejecido naturalmente a una condición solidamente estable.
T3	Tratamiento térmico con solución, trabajado en frío y envejecido naturalmente a una condición solidamente estable.
T4	Tratamiento térmico con solución y envejecido naturalmente a una condición solidamente estable.
T5	Enfriamiento desde una temperatura elevada, mediante un proceso controlado y luego envejecido artificialmente.
T6	Tratamiento térmico con solución y luego envejecido artificialmente.
T7	Tratamiento térmico con solución y sobre-envejecido hasta la estabilización.
T8	Tratamiento térmico con solución, trabajado en frío y luego envejecido artificialmente.
T9	Tratamiento térmico con solución, envejecido artificialmente y luego trabajado en frío.
T10	Enfriamiento desde una temperatura elevada, mediante un proceso controlado, trabajado en frío y luego envejecido artificialmente.

La designación empleada para los tratamientos térmicos y mecánicos realizados a las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente, incluye un recocido en solución (designado por la letra O) y una condición de trabajo en frío (designada por la letra H1). Cuando el trabajo en frío ejecutado durante el procesamiento se ha excedido de los valores deseados, se puede usar un recocido parcial para reducir la resistencia mecánica (designación H2). Cuando se trata con las aleaciones de la serie 5xxx, es común realizar un tratamiento térmico a baja temperatura (designación H3) para estabilizar la microestructura y prevenir la corrosión intergranular. Este tratamiento consiste de un calentamiento hasta 120°C (250°F), mediante el cual se logra una recuperación parcial de las propiedades y una reducción de la susceptibilidad de las mismas ante el paso del tiempo.

Cuando se trabaja con los tratamientos del tipo H, se usa un segundo dígito para indicar la intensidad del trabajo en frío como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Designación numérica para tratamientos de aleaciones de aluminio no tratables térmicamente^[2].

Dureza relativa	Designación de tratamiento
Dureza máxima	H18
$\frac{3}{4}$ de dureza	H16
$\frac{1}{2}$ de dureza	H14
$\frac{1}{4}$ de dureza	H12

1.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

1.1.2.1. Aleaciones de Aluminio Tratables Térmicamente

Las adiciones de elementos aleantes y el subsiguiente procesamiento térmico y mecánico, son los responsables de lograr las propiedades finales de resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión en aleaciones de aluminio tratables térmicamente; sin embargo, lo que se controla usualmente, es la relación de éstas propiedades, tenacidad vs. resistencia, dependiendo de los requerimientos de la aplicación. La amplia variedad de formas

producidas (láminas, placas, rollos de alambre, barras, extrusiones, piezas forjadas y fundiciones), amplia el número de aplicaciones para las que pueden ser empleadas las aleaciones de aluminio tratables térmicamente. Algunas de estas aplicaciones se indican en la tabla 4.

Tabla 4. Composiciones y Aplicaciones de las Aleaciones Maquinadas Tratables Térmicamente^[3]

Aleación Base	Composición Química (% en peso)							Aplicaciones Típicas
	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	
2014	4.4	0.8	0.8	0.5	-	-	-	Estructuras, accesorios hidráulicos y estructurales, ferretería, forjado de alta resistencia para industria automotriz y aeronáutica
2017	4.0	0.5	0.7	0.6	-	-	-	Igual que 2024, partes atornillables para maquinaria.
2024	4.4	-	0.6	1.5	-	-	-	Estructuras, láminas para aeronaves, ruedas para camiones, en algunos casos se somete a tratamientos (cladding) para mejorar su resistencia y características anticorrosión.
2036	2.6	-	0.25	0.45	-	-	-	Láminas para carrocería de automóviles.
2090	2.7	-	-	-	-	-	-	Estructuras, aplicaciones aeronáuticas de alta resistencia y tolerancia a daños.
2218	4.0	-	-	1.5	-	2.0	-	Aleaciones forjadas, culatas y pistones de motores a combustión interna, elementos que requieren alta resistencia y dureza a elevadas temperaturas.
2219	6.3	-	0.30	-	-	-	-	Estructuras, resistencia a altas temperaturas, tanques para aplicación aeroespacial, buena soldabilidad.
2519	5.8	-	0.30	0.17	0.06	-	-	Estructuras, blindaje de alta resistencia.
2618	2.3	0.18	-	1.6	-	1.0	-	Igual que 2218
6005	-	0.8	-	0.5	-	-	-	Estructuras y arquitectura.
6009	0.4	0.8	0.50	0.6	0.25	-	0.1	Láminas para carrocerías de automóviles.
6010	0.4	1.0	0.50	0.8	0.25	-	0.1	Láminas para carrocerías de automóviles.
6013	0.9	0.25	0.35	0.95	-	-	-	Aplicaciones estructurales generales, resistencia mejorada respecto a 6061.
6061	0.25	0.6	-	1.0	-	-	0.2	Aplicaciones estructurales, industria automotriz, férrea y navegación, tuberías y accesorios de tuberías, buena capacidad de conformado, soldabilidad, resistencia a la corrosión y resistencia mecánica.
6063	-	0.4	-	0.87	-	-	-	Tuberías, industria férrea, arquitectura, ferretería.
6070	-	1.4	-	0.8	-	-	-	Aplicaciones estructurales, tuberías.
6101	0.5	-	-	0.6	-	-	-	Productos atornillables para maquinaria, accesorios.
6262	0.28	-	-	1.0	-	-	0.09	Conductores eléctricos.
6351	-	1.0	0.6	0.6	-	-	-	Igual que 6061
6951	-	0.35	-	0.6	-	-	-	Soldadura fuerte de láminas rellenas con aleación.
7004	-	-	-	1.5	4.2	-	-	Trailers de camiones, extrusiones para vagones de trenes.
7005	-	-	0.45	1.4	4.5	-	0.13	Trailers de camiones, extrusiones para vagones de trenes.
7039	-	-	0.30	2.8	4.0	-	0.2	Blindaje en placas, puentes militares.
7075	1.6	-	-	2.5	5.6	-	0.23	Aplicación de alta resistencia en aeronaves, el tratamiento (cladding) mejora sus características anticorrosión.
7079	0.6	-	-	3.3	4.3	-	0.2	Aleación de Aluminio mas fuerte en requerimientos de espesores mayores a 76.2 mm (3 pul), elementos grandes y macizos de aeronaves y construcciones similares.

Los grupos que conforman las aleaciones de aluminio tratables térmicamente son:

- **Serie 2xxx:** Contienen cobre como principal elemento aleante, poseen una alta resistencia mecánica aunque su poder anticorrosivo es menor que en la mayoría de las otras aleaciones de aluminio. Muchas de estas aleaciones también poseen una buena resistencia mecánica a elevadas temperaturas.

El magnesio también se añade a las aleaciones de la serie 2xxx para incrementar su resistencia pero a cambio de una mayor sensibilidad al agrietamiento en la soldadura. La aleación 2024 es una de las que mayor resistencia entre su grupo y tiene gran aplicación en la industria aeronáutica, sin embargo el 1.5 % del contenido nominal de Cu, esconde una baja soldabilidad debido al aumento en la sensibilidad de agrietamiento en la soldadura. Las aleaciones que tienen niveles controlados de magnesio, tales como 2014, 2219 y 2519, son utilizadas para aplicaciones que requieren de buena soldabilidad. Generalmente estas aleaciones presentan buena maquinabilidad, pero menos conformabilidad, que otras aleaciones de aluminio tratables térmicamente.

- **Serie 6xxx:** Contienen silicio y magnesio, proveen resistencia moderada y buena resistencia a la corrosión en comparación con otras aleaciones de aluminio tratables térmicamente. Debido a que son fácilmente extruídas, se pueden encontrar en una amplia gama de formas estructurales, así como en láminas o placas. La versatilidad de esta serie, es representada por la aleación 6061, la cual es una de las aleaciones de aluminio más comúnmente usadas. Las aleaciones de la serie 6xxx, tienen buena conformabilidad y buena soldabilidad.
- **Serie 7xxx:** Posee la resistencia más alta de todas las aleaciones de aluminio, aunque esto, está siendo retado por el reciente desarrollo de las aleaciones de aluminio-litio. La alta resistencia de la serie 7xxx se logra mediante la adición de elementos aleantes como el zinc, magnesio y a veces cobre combinada con el procesamiento térmico y mecánico, aunque en ciertos casos dicha combinación reduce la soldabilidad de la

aleación ya que se incrementa la sensibilidad al agrietamiento en la soldadura. Una importante característica de la serie 7xxx es la habilidad de recristalización natural de la zona afectada por el calor (HAZ), o la transformación por precipitación-reforzamiento a temperatura ambiente, después de soldar.

1.1.2.2. Aleaciones de Aluminio No Tratables Térmicamente

La resistencia inicial de las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente depende principalmente del efecto de endurecimiento de los elementos aleantes tales como el silicio, hierro, manganeso y magnesio; aunque sus propiedades mecánicas pueden ser mejoradas mediante el trabajo en frío, al someterse al proceso de soldadura, se ven afectadas en una porción del material adyacente a la unión, afectada por el calor (HAZ). La tabla 5 muestra algunas de las aplicaciones típicas en las que estas aleaciones son empleadas.

Tabla 5. Aplicaciones de algunas Aleaciones Maquinadas No Tratables Térmicamente^[3]

Designación	Aplicaciones Típicas
1060	Equipos para proceso químicos, tanques y tuberías.
1100	Aplicaciones de arquitectura y decoraciones, mobiliario, partes estampadas.
1350	Conductores eléctricos y alambres.
3003	Aplicaciones de propósito general en donde se requieren resistencias ligeramente superiores a aleación 1100. equipo para manufactura y procesamiento de alimentos, tanques para industria petrolera y petroquímica.
3004	Laminado de resistencia superior a aleación 3003.
5005	Conductores eléctricos y aplicaciones de arquitectura.
5050	Similar a aleación 3003 y 5005, pero más fuerte. Excelentes cualidades para acabados.
5052, 5652	Aplicaciones de laminado que requieren una resistencia superior a aleación 5005. Conformado y buena resistencia a corrosión. Tanques de almacenamiento, accesorios para botes. La aleación 5652 presenta mejor control de impurezas en servicio para H ₂ O ₂ .
5083	Componentes para marina, tanques, recipientes a presión, estructuras para criogénica, vagones de trenes, aparejos de perforación.
5086	Componentes para marina, tanques, tanqueros, chasis para camiones.
5154, 5254	Recipientes a presión, tanqueros. La aleación 5254 presenta mejor control de impurezas en servicio para H ₂ O ₂ .
5454	Aplicaciones estructurales y tanques para servicio a altas temperaturas.
5456	Estructuras, tanques, recipientes a presión, componentes para marina.

Los grupos que conforman las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente se indican a continuación:

- **Serie 1xxx:** Las aleaciones de la serie 1xxx son de pureza comercial (mayor a 99% Al), y se usan en donde la conducción térmica y/o eléctrica o la resistencia a la corrosión, supera las exigencias de resistencia mecánica en las consideraciones de diseño.
- **Serie 3xxx:** Las aleaciones de la serie 3xxx se usan en aplicaciones en donde se requiere de una resistencia y conformabilidad adicional, junto con una buena resistencia a la corrosión.
- **Serie 4xxx:** Aparte de uso como material de aporte para soldar, la serie 4xxx tiene un uso limitado en aplicaciones industriales en forma de aleaciones maquinadas.
- **Serie 5xxx:** Las aleaciones de la serie 5xxx son usadas en aplicaciones en las cuales aún se requieren altas resistencias, las cuales se logran a partir de grandes cantidades de magnesio en solución sólida. Es de relevancia señalar que el magnesio promueve el endurecimiento por trabajo en frío reduciendo la energía de falla concentrada, y de esta manera, la tendencia a recuperación dinámica. Estas aleaciones presentan normalmente una buena resistencia a la corrosión, pero debe tenerse cuidado durante el procesamiento para evitar la formación continua de precipitados $\beta\text{-Mg}_3\text{Al}_2$ en los límites de grano, los cuales pueden promover la corrosión intergranular. Esto puede ocurrir en aleaciones intensamente trabajadas en frío con alto contenido de magnesio cuando se exponen a temperaturas entre los 120 y 200 °C (250 a 390°F).

La tabla 6 muestra la composición química de las aleaciones no tratables térmicamente que mayor participación tienen en la industria.

Tabla 6. Composición de aleaciones de aluminio maquinadas no tratables térmicamente^[3]

Designación de Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	Al
1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	.....	.....	0.05	0.03	.....	99.50
1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	.....	.....	0.05	0.03	.....	99.60
1100	0.95(Si+Fe)		0.05-0.20	0.05	.....	.....	.....	0.10	.....	0.15	99.00
1145	0.55(Si+Fe)		0.05	0.05	0.05	.....	.....	0.05	0.03	.....	99.45
1175	0.15(Si+Fe)		0.10	0.02	0.02	.....	.....	0.04	0.02	.....	99.75
1188	0.00	0.06	0.005	0.01	0.01	.....	.....	0.03	0.01	.....	99.88
1200	1.00(Si+Fe)		0.05	0.05	.....	.....	.....	0.10	0.05	0.15	99.00
1230	0.70(Si+Fe)		0.10	0.05	0.05	.....	.....	0.10	0.03	.....	99.30
1235	0.65(Si+Fe)		0.05	0.05	0.05	.....	.....	0.10	0.06	.....	99.35
1345	0.03	0.40	0.10	0.05	0.05	.....	.....	0.05	0.03	.....	99.45
1350	0.10	0.40	0.05	0.01	.....	0.01	.....	0.05	.....	0.10	99.50
3003	0.6	0.7	0.05-0.20	1.0-1.5	.....	.....	.....	0.10	.....	0.15	balance
3004	0.30	0.7	0.25	1.0-1.5	0.8-1.3	.....	.....	0.25	.....	0.15	balance
3005	0.6	0.7	0.30	1.0-1.5	0.20-0.6	0.10	.....	0.25	0.10	0.15	balance
3105	0.6	0.7	0.30	0.03-0.8	0.20-0.8	0.20	.....	0.40	0.10	0.15	balance
4032	11.0-13.5	1.0	0.50-1.3	.....	0.8-1.3	0.10	0.50-1.3	0.25	.....	0.15	balance
4043	4.5-6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	.....	.....	0.10	0.20	0.15	balance
4045	9.0-11.0	0.8	0.30	0.05	0.05	.....	.....	0.10	0.20	0.15	balance
4047	11.0-13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	.....	.....	0.20	.....	0.15	balance
4145	9.3-10.7	0.8	3.3-4.7	0.15	0.15	0.15	.....	0.20	.....	0.15	balance
4343	6.8-8.2	0.8	0.25	0.10	.....	.....	.....	0.20	.....	0.15	balance
4643	3.6-4.6	0.8	0.10	0.05	0.10-0.30	.....	.....	0.10	0.15	0.15	balance
5005	0.30	0.7	0.20	0.20	0.50-1.1	0.10	.....	0.25	.....	0.15	balance

Tabla 6. Composición de aleaciones de aluminio maquinadas no tratables térmicamente (Continuación)^[3]

Designación de Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	Al
5050	0.40	0.7	0.20	0.10	1.1-1.8	0.10	.....	0.25	.....	0.15	balance
5056	0.30	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.6	0.05-0.20	.....	0.10	.....	0.15	balance
5083	0.40	0.40	0.10	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	.....	0.25	0.15	0.15	balance
5086	0.40	0.50	0.10	0.20-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	.....	0.25	0.15	0.15	balance
5154	0.25	0.40	0.10	0.10	3.1-3.9	0.15-0.35	.....	0.20	0.20	0.15	balance
5183	0.40	0.40	0.10	0.50-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	.....	0.25	0.15	0.15	balance
5556	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	.....	0.25	0.05-0.20	0.15	balance
5652	0.40(Si+Fe)		0.04	0.01	2.2-2.8	0.15-0.35	.....	0.10	.....	0.15	balance
5654	0.45(Si+Fe)		0.05	0.01	3.1-3.9	0.15-0.35	.....	0.20	0.05-0.15	0.15	balance
5657	0.08	0.10	0.10	0.03	0.6-1.0	.....	.....	0.05	.....	0.05	balance

1.2. SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO

Según el manual *Soldadura para Ingenieros*^[4] se dice que un material es soldable en un grado prefijado, cuando se logra la continuidad metálica de la unión a través de un procedimiento determinado y para una aplicación específica, de manera que dicha unión cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de la cual forma parte integrante.

En el caso específico del aluminio, así como sus propiedades lo hacen acreedor del primer lugar en la selección de materiales para ciertas aplicaciones, también dificultan pero no imposibilitan el proceso de soldadura. Esta dificultad, como lo indican *Dickerson et al*^[5] depende del grupo de aleación de aluminio al cual nos refiramos.

1.2.1. FORMACIÓN DE ÓXIDOS

Tanto el Aluminio como sus aleaciones tienen una fuerte afinidad química por el oxígeno, por lo que desarrollan rápidamente una película de óxido refractaria y tenaz cuando se exponen al aire, conocida como Alúmina (Al_2O_3). Según *Dickerson et al*^[5] esta película de óxido de aluminio funde a $2037\text{ }^\circ\text{C}$ ($3700\text{ }^\circ\text{F}$)^[6], y debe ser removida por medios químicos o mecánicos antes de la soldadura, ya que si esto no llegara a realizarse el resultado será una fusión incompleta.

Los fundentes usados en algunos procesos de unión contienen cloruros y fluoruros con el fin de eliminar los óxidos, éstos deben ser removidos después del proceso de unión para evitar posibles problemas de corrosión durante el servicio. Otros procesos como la soldadura por arco con gases inertes (MIG), permiten la remoción de los óxidos sin la utilización de fundentes.

Los tratamientos electrolíticos anódicos aplicados al aluminio, generan también una densa y espesa capa de óxido que impide la formación del arco eléctrico, ya que es capaz de resistir más de 400 Voltios. En este caso la reducción de la capa de óxido es requerida no solo en la junta soldada, sino también en el sitio en donde se acopla el terminal a tierra. En el alambre usado para el proceso GMAW, la formación de una gruesa capa de óxido

producto de los tratamientos térmicos o el almacenamiento en atmósferas húmedas, puede producir conmutación eléctrica errónea en la boquilla de contacto de la pistola de soldar, provocando un escaso derretimiento del metal y un pobre flujo del material de aporte.

1.2.2. SOLUBILIDAD DEL HIDRÓGENO

Según *Dickerson*^[6] el hidrógeno se disuelve muy rápidamente en el aluminio fundido, sin embargo, en estado sólido, tiene poca solubilidad y se ha determinado que es el principal causante de porosidad en la soldadura de aluminio. Las altas temperaturas del charco de soldadura permiten que una gran cantidad de hidrógeno sea absorbido, pero cuando el charco solidifica, la solubilidad del hidrógeno se reduce bruscamente. El hidrógeno que excede los límites de solubilidad efectiva y no escapa del metal solidificado, forma poros de gas. Cualquier fuente de hidrógeno, tales como lubricantes o humedad sobre la superficie del metal base o de aporte, infiltraciones o condensación en la tobera o en el sistema de enfriamiento por agua de la pistola o humedad en el gas de protección, debe ser eliminada para producir soldaduras de calidad.

Las aleaciones de aluminio de la serie 5000 son mas sensitivas a la formación de óxidos hidratados, por lo que los carretes de alambre deben ser almacenados en un lugar seco y caliente. La humedad no debe ser removida de los óxidos hidratados por calentamiento, como se hace con los electrodos revestidos.

1.2.3. AGRIETAMIENTO EN CALIENTE

Los problemas con el agrietamiento en caliente tienen lugar cuando una soldadura se encuentra bajo condiciones muy severas de compresión o cuando se sueldan aleaciones que son muy susceptibles al agrietamiento, tal y como ocurre con la soldadura de las aleaciones de la serie 5xxx, cuyo bajo contenido de magnesio (0.5 a 2.5 % en peso de Mg), coincide con el rango en el cual ocurre el máximo de susceptibilidad al agrietamiento para evitar el agrietamiento, se recomienda, entonces usar aportes de aleaciones con alto contenido de magnesio. Es posible encontrar problemas similares cuando se utilizan

materiales de aporte 1xxx para unir aleaciones 5xxx (o viceversa), o cuando se soldan aleaciones disímiles como 1100 y 5083, donde la dilución mutua puede provocar bajos niveles de magnesio. Otro punto que debe considerarse cuando persiste el agrietamiento en caliente, es el uso de aportes de aleación 4xxx. Estas aleaciones de Aluminio- Silicio tienen una excepcional resistencia contra el agrietamiento, debido en parte a la abundancia en líquido eutéctico disponible para el relleno de soporte. Sin embargo, su uso debe evitarse cuando se soldan aleaciones con alto contenido de magnesio (>3% en peso), debido a la fragilización ocasionada por la excesiva precipitación de Mg_2Si . Otras desventajas son la baja ductilidad de la junta y la diferencia de color cuando es anodizada. La soldabilidad se incrementa con el contenido de silicio (por ejemplo, la aleación 4047 vs. la aleación 4043).

1.2.4. POROSIDAD

La porosidad en las soldaduras de aluminio es producto del hidrógeno atrapado durante la solidificación, ya que este tiene una apreciable solubilidad en el aluminio fundido y baja solubilidad en estado sólido. *Martukanitz*^[7] señala que velocidades de avance mas bajas crean frentes de solidificación mas lentos y por lo tanto una expulsión favorable de los poros. Las fuentes de hidrógeno presentes en el sistema de soldeo dependen particularmente del proceso de soldadura. Según *Martukanitz et al*^[8], en el caso de la soldadura por arco eléctrico, las fuentes de gases que pueden generar porosidad son: el metal base, el metal de aporte y el gas de protección. Por lo tanto, la porosidad puede evitarse, minimizando la contaminación con hidrógeno durante la soldadura, mediante la correcta preparación de la junta, el uso de un gas de protección de alto grado (bajo punto de rocío) y el adecuado almacenamiento del material de aporte (protección contra ambientes húmedos y aceite).

A continuación se indican ciertas prácticas recomendadas para la selección de algunos materiales de aporte, cuando se soldan aleaciones de aluminio no tratables térmicamente:

Metal Base	Material de aporte
1xxx	1xxx, 4xxx
3xxx	1xxx, 4xxx
5xxx (bajo magnesio)*	5xxx, 4xxx
5xxx (alto magnesio)**	5xxx

* < 3 % en peso, ** > 3 % en peso.

1.2.5. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En la soldadura por arco eléctrico el terminal de tierra puede ser conectado en cualquier parte, aunque se recomienda hacerlo sobre una mesa de trabajo de acero, ya que la capacidad aislante del óxido sobre el aluminio, pueden provocar deficiencias en la transferencia de la corriente eléctrica. La formación de arcos eléctricos entre los puntos de contacto puede dañar la superficie de aluminio. Las aleaciones de aluminio poseen una alta conductividad eléctrica, que evita el calentamiento del electrodo por resistencia, como sucede con los electrodos ferrosos, haciendo posible el uso de largas boquillas de contacto, que además, son deseables porque proveen muchos puntos de contacto y permiten la buena conmutación eléctrica.

1.2.6. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

La conductividad térmica del aluminio es cerca de seis veces la del acero^[6]. Aunque la temperatura de fusión de las aleaciones de aluminio es sustancialmente menor que la de las aleaciones ferrosas, se requieren un mayor aporte de calor para soldar aluminio debido al alto valor del calor específico. Incluso de esta manera, cuando se utilizan bajas velocidades de avance, el calor puede ser conducido mas allá del arco, requiriendo continuos ajustes de los parámetros de soldadura.

La alta conductividad térmica hace al aluminio muy sensitivo ante las fluctuaciones en el aporte de calor que suministra el proceso. Específicamente, se requiere un aporte

permanente de calor en los procesos de soldadura más rápidos, tales como el GMAW, para evitar variaciones en la penetración y la fusión. Por ejemplo, estos defectos pueden producirse por fluctuaciones en la corriente usada al realizar un pase de raíz en una junta biselada o de filete, cuando se manipula la pistola de soldar alimentada por una fuente de corriente constante. Cuando se realizan montajes sujetos a pruebas radiográficas, se recomienda el uso de fuentes de alimentación de corriente constante, de manera de producir soldaduras de calidad.

La expansión térmica del aluminio es aproximadamente el doble que la del acero, y las soldaduras de aluminio se contraen cerca de un 6% de su volumen inicial cuando solidifican^[6]. Los materiales delgados deben ser sujetados adecuadamente para mantener los bordes de la unión juntos y alineados. Los cráteres formados al final de los cordones deben ser tomados en cuenta y evitados en lo posible para prevenir la falta de contracción y el agrietamiento de cráteres.

1.2.7. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LAS PROPIEDADES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Aunque las principales diferencias entre las propiedades y características de las aleaciones de aluminio están usualmente asociadas a las adiciones de elementos aleantes en diferentes magnitudes, muchos de ellos producen efectos significantes cuando se añaden en cantidades del orden de 1%.

Según como lo reporta ASM^[9] se indican los efectos que producen las adiciones de los siguientes elementos:

- **Carbono:** puede presentarse con poca frecuencia en el aluminio en forma de oxocarburos o carburos, de los cuales el mas común es el Al_4C_3 , aunque es posible la formación de carburos con otras impurezas como el titanio. El Al_4C_3 se descompone ante la presencia de agua o vapor de agua, lo cual puede conducir al abollamiento de la

superficie. La transferencia metálica normal y las operaciones con fundentes usualmente reducen el contenido de carbono al orden de ppm.

- **Cromo:** esta presente en el aluminio comercial como una impureza menor (de 5 a 10 ppm). Tiene un gran efecto sobre la resistividad eléctrica y es añadido en muchas aleaciones de Al-Mg, Al-Mg-Si y Al-Mg-Zn en cantidades que generalmente no exceden el 0.35 %. Cuando se excede de éste límite, tiende a formar constituyentes gruesos con otras impurezas o adiciones, como el manganeso, hierro y titanio. El cromo forma fases dispersas en los productos maquinados, las cuales inhiben la nucleación y el crecimiento de grano. Es usado para controlar la estructura de grano y prevenir su crecimiento en aleaciones Al-Mg. Las estructuras fibrosas que desarrolla reducen la sensibilidad a la corrosión por esfuerzo y mejoran la tenacidad. El cromo en solución sólida y como fina fase dispersa incrementa suavemente la resistencia de las aleaciones. La principal desventaja del cromo en las aleaciones tratables térmicamente es el incremento a la sensibilidad al templado cuando la fase endurecida tiende a precipitar sobre las partículas de fase cromo preexistentes.
- **Cobre:** las aleaciones aluminio-cobre contienen entre 2 y 10 % de Cu, generalmente con otras adiciones, formando importantes familias de aleaciones. Tanto las fundiciones como las aleaciones maquinadas responden al tratamiento térmico y al subsecuente envejecimiento con un incremento en la resistencia y la dureza y una reducción de la ductilidad. La resistencia máxima se logra entre un 4 y 6% de Cu, dependiendo de la influencia de los demás constituyentes presentes.
- **Hierro:** es la impureza más comúnmente encontrada en el aluminio. Tiene gran solubilidad en el aluminio fundido por lo que se disuelve muy fácilmente en todas las etapas de fundición, mientras que en estado sólido su solubilidad es de aproximadamente 0.04%, el hierro se usa en conductores eléctricos para elevar un poco su resistencia y reducir la fluencia a temperaturas moderadamente altas, también reduce el crecimiento de grano en las aleaciones maquinadas.

- **Magnesio:** la solubilidad máxima en estado sólido en el aluminio es de 17.4%, aunque en las aleaciones corrientes maquinadas no excede de 5.5%. El magnesio precipita preferentemente en los límites de grano como una fase altamente anódica (Mg_5Al_3 o Mg_5Al_8), lo cual produce susceptibilidad al agrietamiento intergranular y a la corrosión por esfuerzo. La adición de magnesio incrementa fuertemente la resistencia del aluminio sin reducir su ductilidad. La resistencia a la corrosión y la soldabilidad son buenas.
- **Manganeso:** su concentración se ubica normalmente entre 5 y 50 ppm. Disminuye la resistividad, incrementa la resistencia tanto en solución sólida como en fase intermetálica precipitada finamente. No tiene efectos adversos sobre la resistencia a la corrosión. Cuando se usa como adición incrementa la resistencia y controla la estructura de grano; su efecto es el de aumentar la temperatura de recristalización y promover la formación de estructuras fibrosas sobre el trabajo en caliente. Como un precipitado disperso es efectivo en la recuperación gradual de y la prevención del crecimiento de grano, asimismo mejora la sensibilidad al templado en las aleaciones tratables térmicamente.
- **Níquel:** la solubilidad sólida de este elemento en el aluminio no excede el 0.04%, por encima de este valor se presenta como un insoluble intermetálico usualmente en combinación con el Fe. El níquel por encima del 2% incrementa la resistencia del aluminio de alta pureza pero reduce la ductilidad. Cuando se añade a aleaciones Al-Cu y Al-Si mejora la dureza y la resistencia a elevadas temperaturas y reduce el coeficiente de expansión.
- **Titanio:** se encuentra en el aluminio comercial en cantidades de 10 a 100 ppm. El titanio se usa principalmente como refinador de grano en las fundiciones de aleación de aluminio. Cuando se usa solo, el efecto del titanio disminuye con el tiempo de permanencia en estado líquido y con la refusión repetida. El titanio es un elemento

añadido comúnmente a los alambres de aporte ya que refina la estructura de la soldadura y previene el agrietamiento.

- **Zinc:** las aleaciones de Al-Zn que contienen otros elementos ofrecen la mas alta combinación de propiedades mecánicas entre todas la aleaciones de aluminio maquinadas. La presencia de zinc en el aluminio incrementa el potencial de disolución, de aquí su uso como recargue protector (7072).

1.3. PROCESO GMAW-P

1.3.1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN EL PROCESO GMAW-P

Según el *ASM Handbook*^[10] Gas Metal Arc Welding (GMAW) es un proceso de soldadura por arco eléctrico que incorpora la alimentación automática de un electrodo continuo, consumible y que es protegido externamente por un suministro de gas. Puesto que el equipo provee la autorregulación automática de las características eléctricas del arco y de la tasa de deposición, los únicos controles manuales requeridos por el soldador para la operación semiautomática son la posición de la pistola de soldar, la dirección y la velocidad de recorrido. La longitud del arco y el nivel de corriente se mantienen automáticamente.

El proceso fue desarrollado y comercializado desde el año de 1948, aunque el concepto básico fue introducido realmente en el 1920. En sus aplicaciones iniciales, se utilizó para soldar aluminio con un gas protector inerte, dando lugar al término “MIG” (Metal Inert Gas). Progresivamente se han ido incorporando variaciones al proceso, entre las cuales está el uso de gases protectores activos, particularmente CO₂, para la soldadura de ciertos metales ferrosos. Esto condujo eventualmente al uso del término “MAG” (Metal Active Gas).

1.3.2. EQUIPO

Las partes fundamentales que conforman el equipo GMAW son:

- Pistola de soldar
- Motor de alimentación del alambre junto con sus engranajes o rodillos impulsores
- Controlador del proceso
- Fuente de energía
- Suministro regulado de gas protector
- Suministro de electrodo
- Cables de interconexión y mangueras

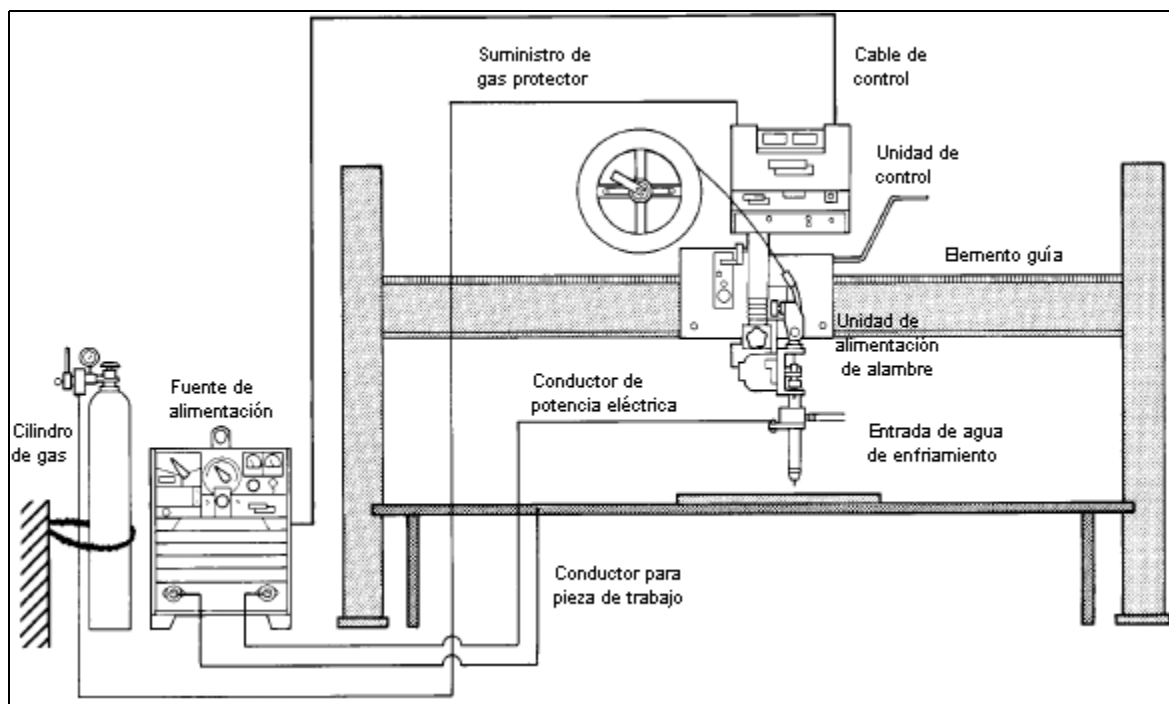


Figura 1. Proceso de soldadura GMAW automático^[11]

Cuando se presiona el interruptor de la pistola, el gas, la potencia, y el electrodo se conducen simultáneamente a la pieza de trabajo y se crea un arco eléctrico.

La unidad de la alimentación de alambre y la fuente de energía normalmente se acoplan para proporcionar la autorregulación de la longitud del arco, como se observa en la figura 2. La combinación básica usada para producir esta regulación consiste en una fuente de energía de tensión constante (CV) (que proporciona una curva característica voltio-amperio esencialmente plana) en conjunción con una unidad de alimentación de alambre de velocidad constante. Algunos equipos GMAW, sin embargo, utilizan una fuente de energía de corriente constante (CC) (que proporciona una curva característica voltio-amperio arqueada) más una unidad de alimentación de alambre de velocidad variable. Con esta última combinación, los cambios en la tensión del arco, causados por un cambio en su longitud, iniciarán una respuesta en la unidad de alimentación del alambre que conducirá a un aumento o disminución de la velocidad de alimentación de manera de mantener la configuración original de longitud de arco.

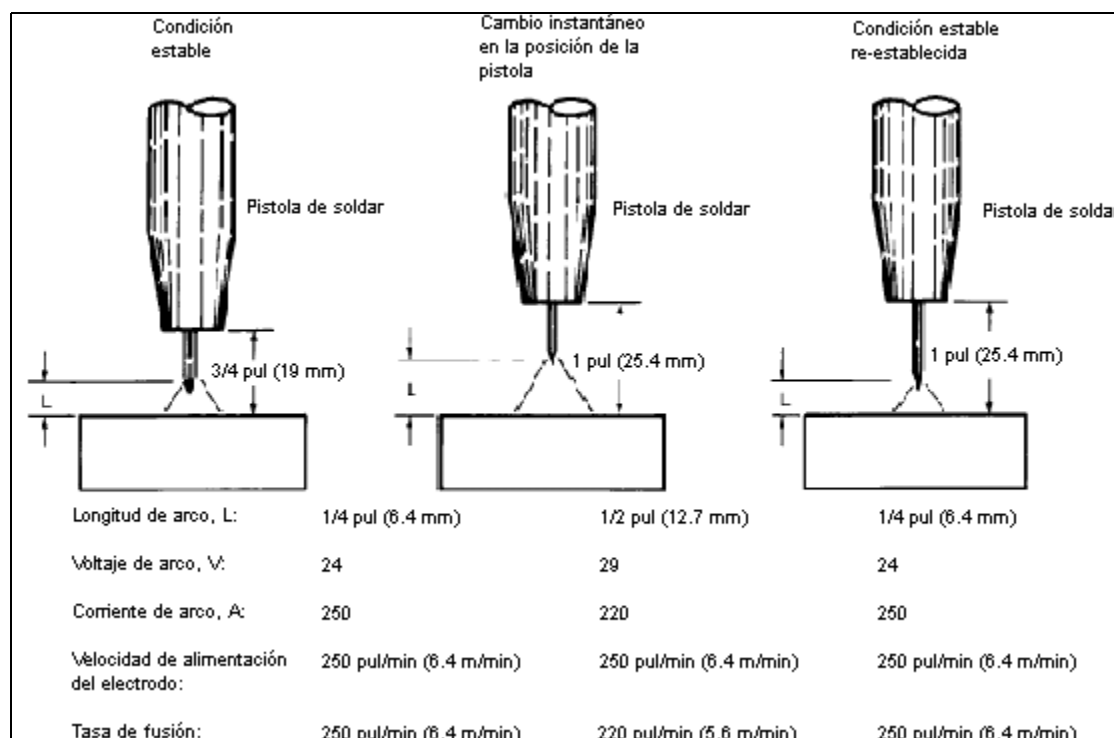


Figura 2. Mecanismo de autorregulación de la longitud del arco durante el proceso de soldadura GMAW^[11]

En algunos casos (soldadura del aluminio), puede emplearse una fuente de energía de corriente constante con una unidad de alimentación de alambre de velocidad constante, esta configuración proporcionará un pequeño grado de autorregulación automática. Sin embargo, algunos piensan que esta combinación limita el control de la energía del arco la cual se considera importante en hacer frente a la alta conductividad térmica del aluminio.

1.3.3. MATERIAL DE APORTE

El material de aporte se clasifica según la norma *ANSI/AWS A5. 10-92*^[12]. Su óptima selección obedece principalmente a la aplicación final de la soldadura y al desempeño deseado. Muchas aleaciones y combinaciones de aleaciones pueden ser unidas usando cualquiera de los aportes encontrados entre la extensa gama existente, pero sólo uno de ellos será el óptimo para una determinada aplicación. Los principales factores que se toman en cuenta para seleccionar un material de aporte de aleación son:

- Soldabilidad y sensibilidad al agrietamiento.
- Esfuerzo cortante y voltaje de soldadura.
- Ductilidad de la soldadura.
- Temperatura de servicio.
- Resistencia a la corrosión.
- Diferencia entre el color de la soldadura y el metal base después del anodizado.

Las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las aleaciones de aluminio dependen de la composición y microestructura. La incorporación de elementos aleantes al aluminio puro mejora enormemente sus propiedades y su utilidad. Por esta razón la mayoría de las aplicaciones de aluminio utilizan aleaciones que tienen uno o más elementos adicionales. Los principales elementos aleantes en aleaciones de aluminio son el cobre, manganeso, silicio, magnesio y zinc. La cantidad total de estos elementos puede llegar a superar el 10 % de la composición total de la aleación (todos los porcentajes son expresados en peso a menos que se indique lo contrario). Los elementos impuros también están presentes, pero su porcentaje total usualmente está por debajo del 0.15 %. Los dos métodos más comunes para aumentar la resistencia de las aleaciones de aluminio son la dispersión de los elementos aleantes en solución sólida y posterior trabajo en frío, o la dilución de los elementos aleantes en solución sólida para posteriormente precipitarlos a través de toda la matriz de la aleación como partículas de refuerzo^[2].

1.3.4. MODOS DE TRANSFERENCIA

Lesnewich^[13] demostró que el modo de transferencia metálica depende de muchas variables operacionales tales como la corriente de soldadura, la longitud libre del electrodo, el diámetro del alambre y la polaridad. Los tres modos tradicionales de transferencia que pueden producirse en el proceso GMAW son cortocircuito, globular y spray; adicionalmente y producto de los más recientes progresos en tecnología de fuentes de energía, se han desarrollado dos modos de transferencia de alto nivel, denominados spray pulsado y Transferencia por Tensión Superficial (STT). Aunque para realizar este tipo de

transferencia se requieren de fuentes de energía más costosas, las ventajas permiten justificar los costos adicionales en muchas aplicaciones.

El modo spray y el globular se asocian básicamente a relativamente alta energía del arco y se limitan normalmente a las posiciones de soldadura plana y horizontal con espesores de materiales superiores a 3.2 mm (1/8 pul), con la excepción del modo spray en electrodos de diámetros muy pequeños y de la transferencia pulsada, en la cual el nivel de energía promedio es reducido. La transferencia cortocircuito es un proceso de baja energía, limitado generalmente a espesores menores a 3.2 mm (1/8 pul), pero que puede emplearse en todas las posiciones de soldadura.

Kim et al^[14] realizaron estudios para determinar como se realizaba la transferencia metálica del electrodo a la pieza de trabajo usando como base los modelos teóricos de la opresión inestable y del balance de la fuerza estática. La fuerza de opresión es responsable de separar el metal fundido del electrodo y de propulsarlo a través del arco hasta el metal base. Este encuellamiento momentáneo de la porción líquida del electrodo como puede observarse en la figura 3, es resultado del flujo de corriente. Las fuerzas electromagnéticas son producidas y controladas por la cantidad de corriente que fluye a través del electrodo y hacia la pieza de trabajo.

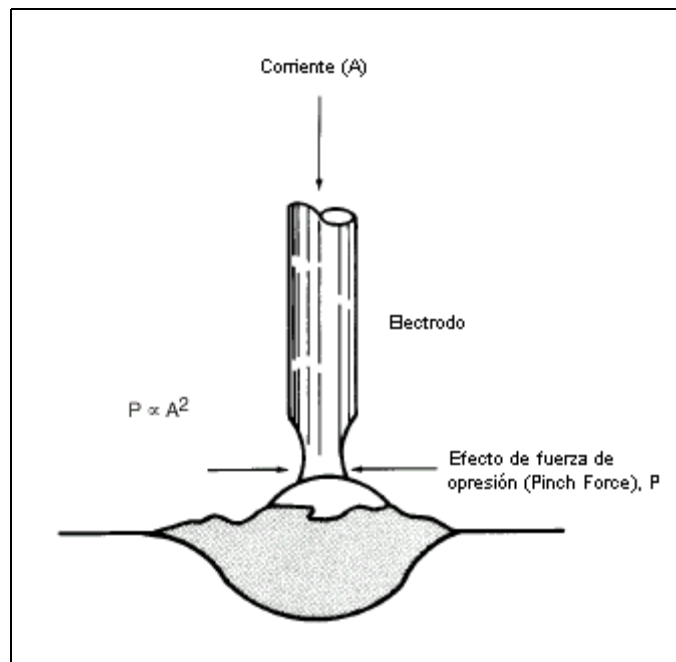


Figura 3. Modelo de transferencia metálica según la teoría de la opresión inestable^[11]

1.3.4.1. Transferencia Cortocircuito

Según Choi *et al*^[15] la transferencia metálica durante el modo cortocircuito tiene lugar cuando la gota hace contacto con el charco de soldadura a un nivel bajo de corriente. En este modo de transferencia, las características de la fuente de energía controlan la relación entre el establecimiento intermitente de un arco y el cortocircuito del electrodo con la pieza (véase figura 4) lo que hace al proceso inherentemente inestable. Debido al bajo aporte calórico, el modo cortocircuito es particularmente adaptable a la soldadura de chapas delgadas y se debe prestar especial atención cuando se soldan secciones de gran espesor para evitar la falta de penetración. Sin embargo, estas características permiten la soldadura en todas las posiciones.

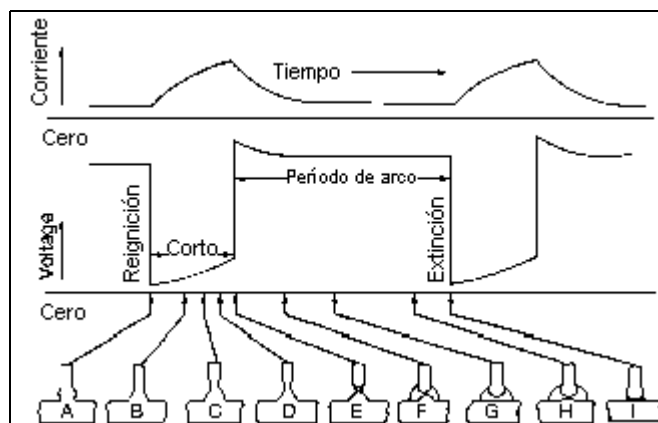


Figura 4. Oscilogramas y sketches de transferencia en modo cortocircuito^[11]

1.3.4.2. Transferencia Globular

Se obtiene al usar CO_2 o helio como gas protector. La transferencia del metal se realiza en forma de glóbulos irregulares dirigidos aleatoriamente a través del arco y a hacia la pieza de trabajo de manera no uniforme y principalmente por acción de su propio peso (véase figura 5). Según Choi et al^[16] en el modo globular, el diámetro de la gota que se desprende es mucho mayor que el diámetro del electrodo y la frecuencia de transferencia es relativamente baja, dando como resultado una cantidad considerable de salpicadura, que puede ser reducida mediante el uso de CO_2 como gas protector y ajustando las condiciones de soldadura de modo que la punta del electrodo esté debajo de la superficie del charco de soldadura y dentro de una cavidad generada por la fuerza del arco. El arco de CO_2 es generalmente de naturaleza inestable y se caracteriza por un sonido de “craqueo”. Produce un cordón de soldadura con una superficie de aspecto corrugado

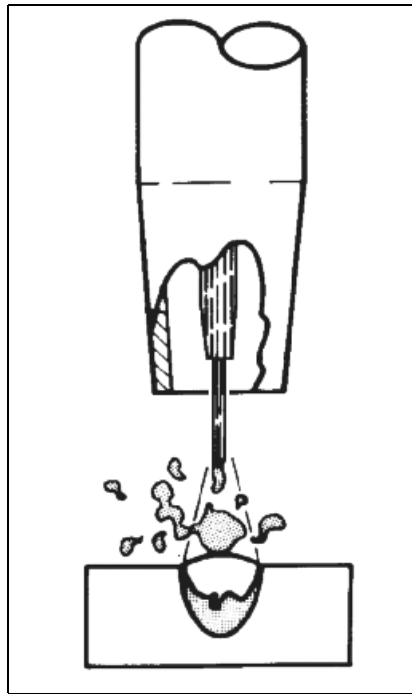


Figura 5. *Transferencia Globular*

Puesto que la mayoría de la energía del arco se dirige hacia abajo y por debajo de la superficie del metal fundido, el perfil del cordón de soldadura exhibe una penetración extremadamente profunda con una acción de “lavado” en sus extremidades, la cual es menor que la que se obtiene en el modo de transferencia spray. Cuando se utilizan mezclas de gas ricas en helio, se produce un cordón de soldadura más amplio con una penetración similar a la del argón, pero con un perfil más deseable.

1.3.4.3. Transferencia Spray

Al aumentar la corriente de soldadura, el modo de transferencia metálica cambia de globular a spray, dando lugar a una transferencia metálica a través del arco en forma de pequeñas gotas de diámetro igual o menor que el diámetro del electrodo las cuales se dirigen axialmente y en línea recta del electrodo al charco de soldadura. El arco es uniforme y estable. El resultado es poca salpicadura y un cordón de soldadura de superficie relativamente lisa. La energía del arco (plasma) se difunde siguiendo un patrón cónico, lo que da lugar a buenas características de “lavado” en las extremidades del cordón de

soldadura pero a expensas de una muy baja penetración (profundidad por fusión superficial). La penetración es más profunda que la obtenida con la soldadura metálica por arco protegido (SMAW) pero menor que aquella que pudiese lograrse mediante la transferencia globular GMAW en modo de alta energía.

El modo de transferencia spray establece un nivel mínimo de corriente para un diámetro dado de electrodo (densidad corriente). Este nivel de corriente generalmente se le denomina como *corriente de transición* (figura 6). Una corriente de transición bien definida tiene lugar sólo al usar gas protector con un mínimo de 80 % de Argón. A niveles de corriente por debajo de la corriente de transición el tamaño de la gota aumenta (mayor que el diámetro del electrodo) y las características del arco se tornan absolutamente inestables.

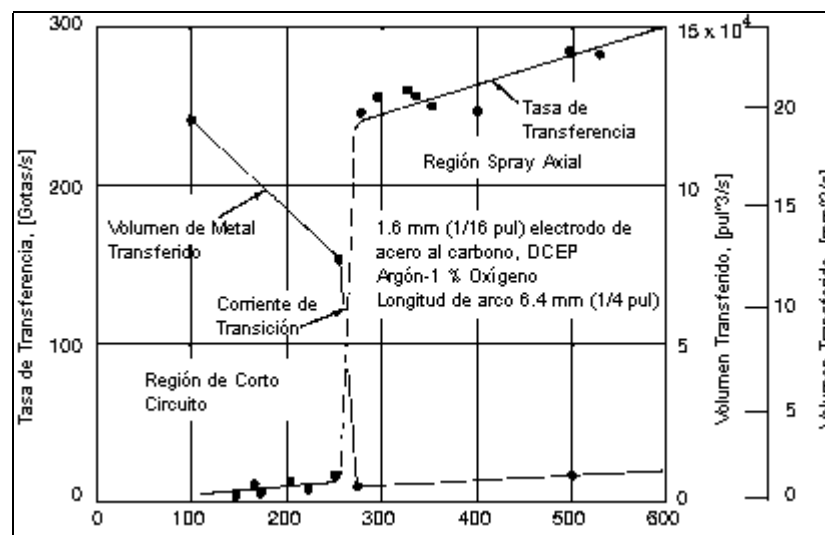


Figura 6. Variación en volumen y tasa de transferencia de gotas para un acero al carbono^[11]

1.3.4.4. Transferencia por Tensión Superficial (STT)

STT es un proceso de transferencia corto circuito de corriente controlada. Las dos principales diferencias entre el STT y el corto circuito tradicional son:

- La corriente de soldadura se basa en los requerimientos instantáneos del arco eléctrico.
- La velocidad de alimentación del alambre es independiente de la corriente de soldadura y viceversa.
- La corriente se controla de manera lógica según la fase del ciclo cortocircuito que se esté llevando a cabo. (véase figura 7).

En relación a la figura 7, se observa que la corriente se reduce para minimizar la salpicadura justo antes de que el alambre haga cortocircuito con la pieza de trabajo (T1-T2) y el material fundido se separe del alambre (T3-T5). Luego la corriente se incrementa enormemente, para lograr el encuellamiento del metal fundido (T2-T3), reiniciar el arco, reestablecer apropiadamente su longitud y promover una buena fusión (T5-T6); durante el resto del ciclo la corriente se reduce gradualmente (T6-T7) y se mantiene a un nivel óptimo para poder controlar la cantidad total de calor suministrada a la soldadura.

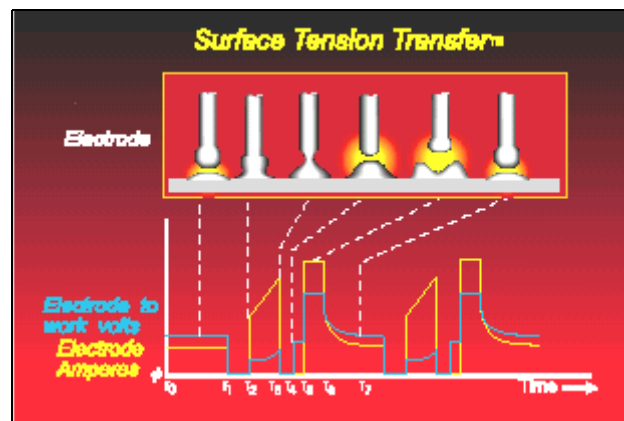


Figura 7. Corriente en el electrodo y formas de onda de tensión para un ciclo típico de soldadura^[11]

1.3.4.5. Transferencia Pulsada (GMAW-P)

Este proceso consiste en una variación del modo tradicional de transferencia spray, la fuente de energía pulsa rápidamente entre una corriente pico (I_p) y una base (I_b) para un período fijo de tiempo (T).

Según *Rajasekaran et al*^[17] este modo de transferencia se obtiene a corrientes promedio bajas, lo que proporciona un mayor control de la transferencia metálica y permite soldar en todas las posiciones en un nivel de energía más alto que el cortocircuito. El spray pulsado también posee mejor estabilidad del arco a altas velocidades de alimentación del alambre. La mayoría de las fuentes de energía capaces de suministrar una corriente pulsada, funcionan más bien como unidades de corriente constante (CC) que como unidades de voltaje constante (CV).

- **Parámetros de pulso**

Durante el modo de transferencia por arco pulsado se introducen parámetros operacionales adicionales: corriente pico (I_p), corriente base (I_b), tiempo pico (T_p) y tiempo base (T_b), los cuales en conjunto con las variables del proceso de soldadura DC: longitud libre del alambre, corriente y tensión de soldeo, determinan las características del cordón de soldadura. Los tiempos pico y base también definen la frecuencia de pulso (F) y el ciclo de trabajo (D), además debe ajustarse correctamente una velocidad de alimentación del alambre (W_F), de manera que ésta se balancee con la tasa de consumo del electrodo generada por los parámetros de pulso, como se muestra en la figura 8 para varios diámetros de electrodo.

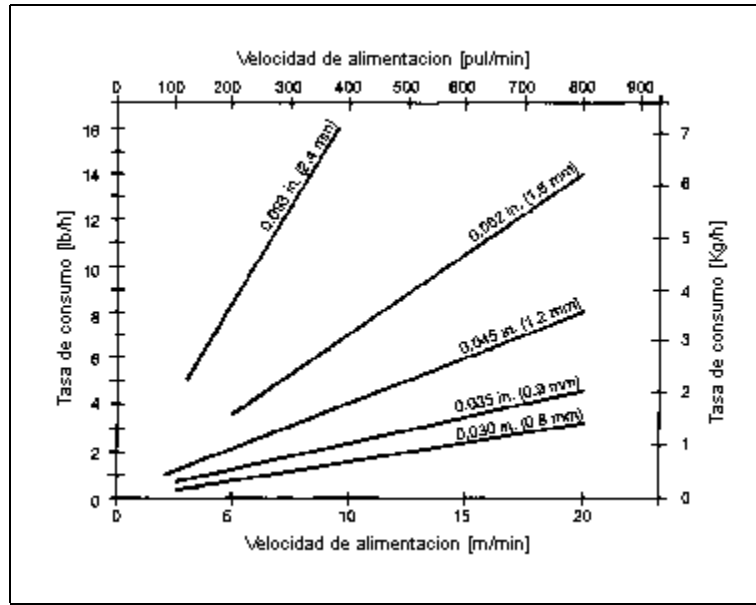


Figura 8. Tasa de consumo típicas para electrodos de aluminio empleando GMAW^[11]

En la figura 9 se puede observar la forma de onda típica generada por una operación con corriente pulsada, el área bajo la curva representa el aporte calórico a la pieza de trabajo, dado por los valores de $I_p T_p$ e $I_b T_b$, los cuales pueden calcularse por las ecuaciones^[18]:

$$I_p T_p = \int I_p(t) \cdot dt \quad (1)$$

$$I_b T_b = \int I_b(t) \cdot dt \quad (2)$$

$I_p(t)$ e $I_b(t)$ son los valores instantáneos de corriente en un intervalo de tiempo infinitesimal dt durante un ciclo de pulso.

- **Corriente Pico (I_p)**

El valor de la corriente pico determina la proyección de la gota de metal fundido hacia la pieza de trabajo, ya que la energía aportada a la gota depende de la combinación de los parámetros $I_p T_p$. *Subramaniam et al*^[18, 19] empleó la siguiente ecuación en varios de sus trabajos:

$$I_p T_p = 496.1 \cdot (1 - e^{-0.003 \cdot I_b T_b}) + \frac{270.1}{\frac{(I_b T_b - 182.2)^2}{8423.5} + 1} \quad (3)$$

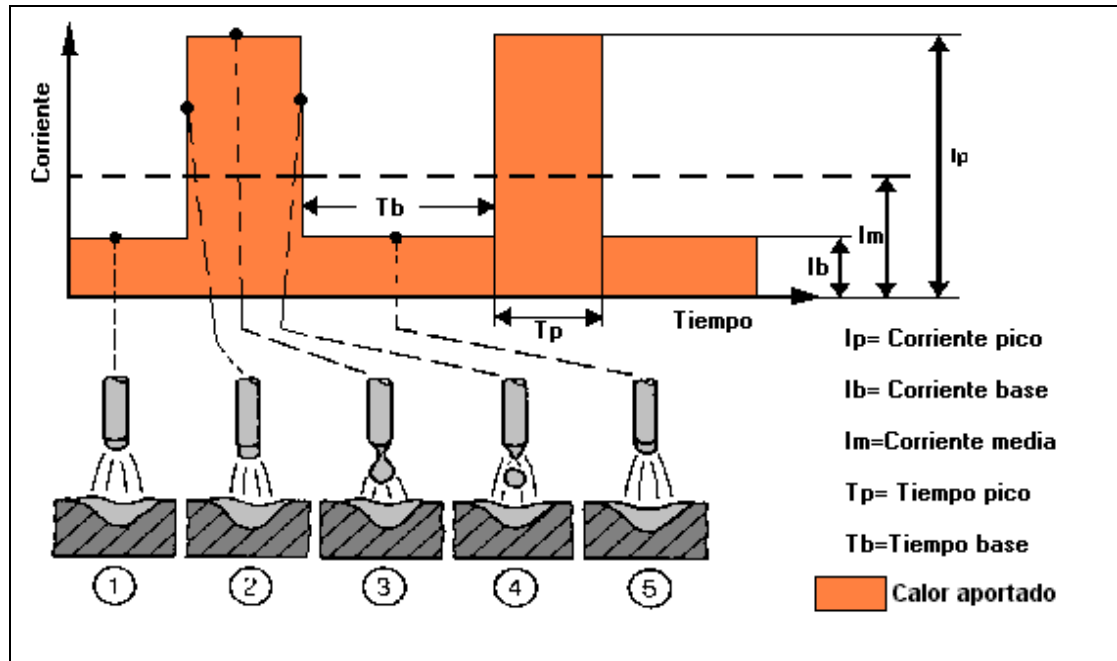


Figura 9. Curva voltio-ampere para corriente pulsada

La ecuación 3 representa la función que mejor se ajusta a una región hallada experimentalmente, y que corresponde a una transferencia de una gota por pulso (ODPP); según el citado autor, se cree que si una gota se desprende en cada pulso, se tendrá un mejor control del proceso y se producirá una soldadura con mínimos defectos y salpicaduras.

La combinación $I_p T_p$ depende de los siguientes límites:

1. I_p máxima y T_p mínimo: este límite viene impuesto por la capacidad del equipo de soldadura para generar la máxima corriente.
2. I_p mínima y T_p máximo: este límite está condicionado por la frecuencia de trabajo, ya que para frecuencias altas, el tiempo de base disminuye y por lo tanto, el tiempo de pico podría hacer desaparecer el estado bajo.

- **Tiempo Pico (T_p)**

El tiempo pico es un factor determinante en definir el número de gotas por pulso. Según *Subramaniam et al*^[19], cuando el tiempo pico es muy largo se observan múltiples desprendimientos de gota por pulso. Por lo tanto, partiendo de que la condición óptima de transferencia es aquella donde sólo una gota se desprende en cada pulso, si T_p es menor que el mínimo tiempo para desprender una gota (T_{pmin}), debido a la alta frecuencia se producirán grandes gotas. Sin embargo cuando se alcanza el valor de T_{pmin} , se da una rápida transición de modo globular a pulsado spray, con una frecuencia de goteo igual a la frecuencia de pulso.

- **Corriente Base (I_b)**

La corriente base, a veces denominada intensidad de fondo, actúa en todo momento, y tiene la función de precalentar y acondicionar el alambre que se alimenta continuamente, pero sin fundirlo, además es la responsable mantener el arco encendido entre pulsaciones. *Subramaniam*^[20] afirma en su trabajo que la transferencia por goteo y la tasa de consumo del electrodo pueden ser significativamente afectadas por la magnitud y la duración de la corriente base. Así pues, si su valor es demasiado bajo, puede darse el caso de que se extinga el arco; por el contrario, si su valor es demasiado alto, elevaría innecesariamente la intensidad media.

- **Tiempo Base (T_b)**

Kim^[21] determina el efecto de la corriente y del tiempo base para un rango limitado de condiciones, presentando la siguiente ecuación para el desprendimiento de gota durante la fase base en la soldadura del aluminio:

$$T_b \geq \frac{1.3 \times 10^{12} \cdot R_w^{3.278}}{I_b^{1.556}} \quad (4)$$

donde R_w es el radio del alambre.

- **Frecuencia de Pulso (F)**

La frecuencia de pulso está definida por el número de gotas transferidas a la pieza de trabajo en un pulso y es estrictamente una función de la relación entre el tiempo en la fase de corriente pico y el tiempo de pulso (T), dado por la sumatoria de T_p y T_b , es decir:

$$F = \frac{T_p}{T_p + T_b} \quad (5)$$

asumiendo que $I_b T_b \ll I_p T_p$.

La frecuencia de pulso afecta la tasa de deposición, debido a que controla el número de veces, para un determinado intervalo de tiempo, en el cual estas gotas son transferidas. Los equipos de soldeo actuales poseen microprocesadores de alta velocidad que controlan sistemas de inversión capaces de alternar de condiciones pico a base con frecuencias mayores a 40 KHz.

1.3.5. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE PULSO MEDIANTE EL MÉTODO DE LA ZONA PARAMÉTRICA

La determinación de los parámetros de pulso (I_p , T_p , I_b , T_b), se basa en el trabajo de investigación realizado por *Amin*^[22] considerando las respectivas correcciones realizadas por *Rajasekaran et al*^[17]. El método de obtención de dichos parámetros consiste en la construcción de una zona paramétrica que debe satisfacer los siguientes requerimientos:

1. La velocidad de alimentación del alambre (W_F) debe estar balanceada con la tasa de consumo del electrodo, de manera tal que la longitud del arco se mantenga constante (Criterio de Burnoff).
2. Es deseable que se produzca transferencia metálica tipo spray a cualquier velocidad de alimentación del alambre, incluso a velocidades de alimentación y tensiones bajas, que son las características de una transferencia metálica tipo globular (Criterio de la Transferencia Metálica).

3. La corriente base (I_b) no debe exceder un límite mínimo inferior para garantizar un arco estable (Criterio de la Estabilidad del Arco).

El tipo de transferencia metálica más adecuada se determina en base a la uniformidad de longitud del arco eléctrico, uniformidad en el desprendimiento de gota y uniformidad en la superficie del cordón de soldadura. A su vez, las características del desprendimiento de gota se definen por el tamaño de las gotas, instancia y duración a la cual el desprendimiento tiene lugar y número de desprendimientos de gota por pulso.

1.3.5.1. Criterio de Burnoff

Mientras que la corriente varía con el tiempo en GMAW-P, es esencial que la corriente promedio, la cual determina la tasa de consumo del electrodo, se balancee con la velocidad de alimentación del alambre, de manera de mantener una longitud de arco constante. Para poder satisfacer este criterio se hace uso de una relación funcional que representa todas las condiciones de pulso factibles (I_p , I_b , T_p , T_b) pertenecientes a una corriente media específica (I_M).

Esta relación debe constituir un área de trabajo que abarcará todas las posibles combinaciones de parámetros, y que se denominará Zona Paramétrica. Para la construcción de esta Zona, en primer lugar, se debe graficar una relación entre la corriente media (I_M) y la velocidad de alimentación (W_F), obtenida al realizar soldaduras por ensayo y error tomando en cuenta todas las variables y parámetros de pulso que proporcionen mayor estabilidad del arco. Este procedimiento se realiza empleando GMAW-P y GMAW convencional en cada caso, como lo sugirió *Rajasekaran et al*^[17], con el objetivo de lograr un punto de intersección entre ambas rectas (figura 10), el cual representa el valor de I_M y W_F por encima de los cuales se obtiene transferencia tipo spray.

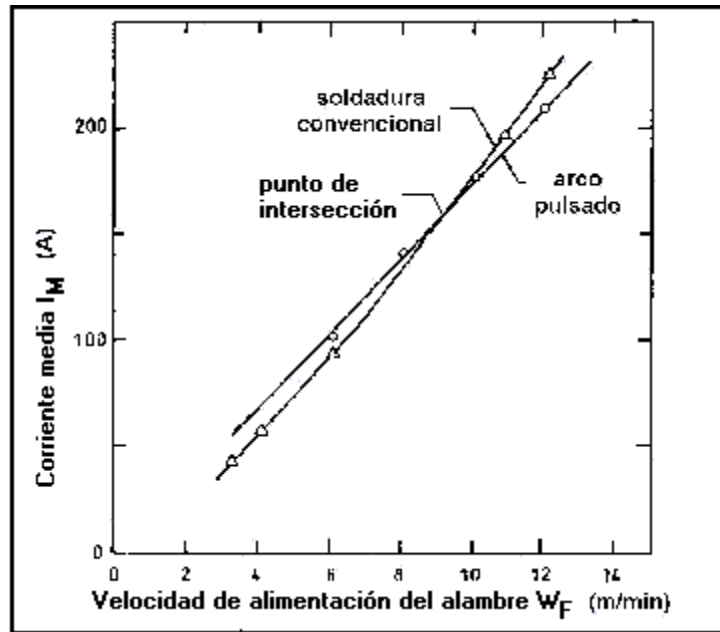


Figura 10. Gráfica del Criterio de Burnoff para soldadura convencional y por arco pulsado

La corriente media puede calcularse por la siguiente ecuación, usando los parámetros registrados de cada soldadura:

$$I_M = \frac{T_p \cdot I_p + T_b \cdot I_b}{T_p + T_b} \quad (6)$$

Debe señalarse que $A_{min}^{[22]}$ en su investigación, no asume un diámetro de gota igual al diámetro del alambre usado como material de aporte, por lo que el volumen de gota (V_D) varía según el tamaño del aporte utilizado. *Rajasekaran et al*^[17], si asume un diámetro de gota igual al diámetro del electrodo (gota esférica), ya que, según se ha reportado, provee de una buena transferencia metálica y soldaduras de alta calidad, por otra parte, asegura que al trabajar con volúmenes de gotas mayores al diámetro del alambre se favorece la transferencia corto circuito y por lo tanto las salpicaduras. Basándose en esta última suposición, se tiene que:

$$V_D = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (7)$$

donde r = radio del material de aporte (mm)

V_D = volumen de la gota (mm³)

El tiempo de ciclo de pulso se calcula para producir una gota por pulso a diferentes velocidades W_F usando la siguiente expresión:

$$T = \frac{240.V_D}{\pi.d^2.W_F} \quad (8)$$

donde: T = tiempo de ciclo (ms)

d = diámetro del alambre (mm)

Además se conoce que:

$$T = T_p + T_b \quad (9)$$

Como la relación de la figura 10 es lineal podemos tomar la ecuación de una recta para describir su comportamiento:

$$I_M = m \cdot W_F + K \quad (10)$$

donde: m = pendiente de la recta

K = intersección con la ordenada

A partir de la ecuación 6 se puede despejar:

$$I_p = \left(\frac{T_p + T_b}{T_p} \right) I_M - \left(\frac{T_b}{T_p} \right) I_b \quad (11)$$

Sutituyendo la ecuación 9 en la 11 y operando adecuadamente, se obtiene:

$$I_p = \left(\frac{T}{T_p} \right) I_M - \left(\frac{T}{T_p} - 1 \right) I_b \quad (12)$$

Esta ecuación define la relación entre I_p e I_b para una I_M ó W_F determinada. Con un T_p específico y a partir de esta relación podemos definir una Zona Paramétrica para un rango entero de valores de T_p como se muestra en la gráfica de la figura 11.

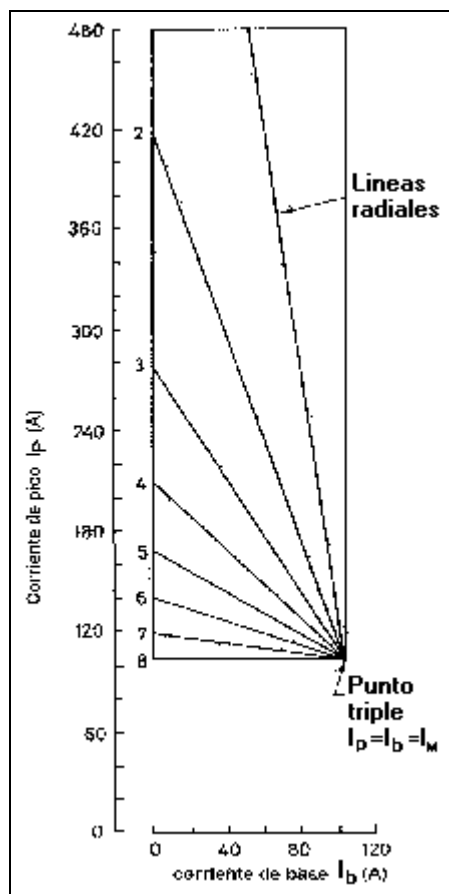


Figura 11. Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff

Dentro de esta zona paramétrica, para un determinado I_M , existe una relación lineal entre la corriente de pico (I_p) y la corriente de base (I_b), en la cual, I_p disminuye con un incremento de la corriente de base. El mínimo valor posible de I_b es limitado por la intersección con el eje de la ordenada donde se hace cero, dado que los valores negativos del mismo carecen de sentido físico. El mínimo valor posible de I_p es el punto común $I_b = I_M = I_p$. De esta manera se puede variar T_p con una combinación de I_p e I_b alrededor del punto común $I_b = I_M = I_p$ desde la vertical hasta la horizontal, es decir, desde una pendiente (∞) a $T_p = 0$, hasta una pendiente igual a 0 a $T_p = T$, respectivamente.

Como resultado se obtiene una combinación única de I_b , I_p y T_p dentro de esta Zona Paramétrica, que representa los posibles valores potenciales de condiciones de pulso para un valor único de I_M con los cuales podemos garantizar el Criterio de Burnoff.

1.3.5.2. Criterio de Transferencia Metálica

A pesar de que todas las combinaciones I_p , T_p , I_b y T_b que se muestran en la Zona Paramétrica de la figura 11 podrían satisfacer el Criterio de Burnoff, combinaciones insuficientes de I_p y T_p podrían no producir transferencia metálica tipo spray, ya que para una W_F dada, tanto I_p como T_p deben ajustarse de manera que se produzca una gota por pulso y si esta combinación no provee suficiente energía, no se desprenderá una gota por pulso y el proceso se tornará inestable; de manera que la Zona Paramétrica debe ser adicionalmente limitada para lograr satisfacer el desprendimiento de la gota durante I_p .

- **Limitación de la corriente pico y tiempo pico**

El paso inicial para la limitación de la corriente pico y tiempo pico es llevar a cabo una serie de experimentos fijando los valores de I_b , T_b y W , de manera de establecer una relación entre I_p y T_p para distintos tipos de transferencia metálica, es decir desprendimiento de gota durante corriente base, una gota por pulso, dos gotas por pulso y tres gotas por pulso, respectivamente; los tipos de desprendimiento se pueden identificar mediante los oscilogramas registrados durante el proceso de soldadura empleando los parámetros señalados.

El número de gotas que se desprende por pulso puede observarse en la forma de onda del tensión y esta representado por los picos que se presenten en la misma (figura 12). El único requisito que deben satisfacer los parámetros de soldadura usados es que deben estar por encima de la transferencia spray, es decir, con valores de $I_M(W)$ iguales o superiores a la corriente de transición. Para esta parte del estudio no podemos asumir un tamaño de gota igual al diámetro del alambre dado que los parámetros tomados son al azar dentro de la Zona Paramétrica.

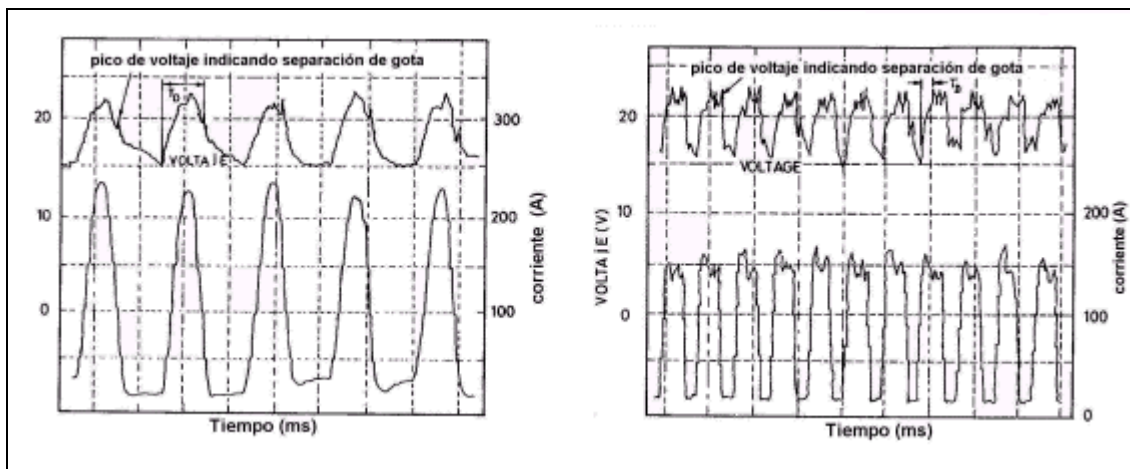


Figura 12. Oscilogramas típicos de corriente y tensión representando separación de una gota por pulso (izquierda) y más de una gota por pulso (derecha).

Los valores de I_p y T_p se agrupan de acuerdo al número de gotas que se desprenden por pulso y se grafican en escala logarítmica como se muestra en la figura 13. Las rectas que se obtienen son de pendiente negativa y sus valores deberían coincidir entre sí. Según se ha reportado, la pendiente varía dependiendo de la composición química y diámetro del alambre.

La relación entre I_p y T_p puede expresarse por:

$$I_p^m \cdot T_p = K_v \quad (12)$$

donde m es la pendiente de las rectas agrupadas por número de gotas desprendidas y K_v es una constante llamada Parámetro de Desprendimiento. Los valores de esta constante varían dependiendo del volumen de la gota desprendida, según el tipo y diámetro del material de aporte y su determinación es esencial para la limitación de I_p y T_p .

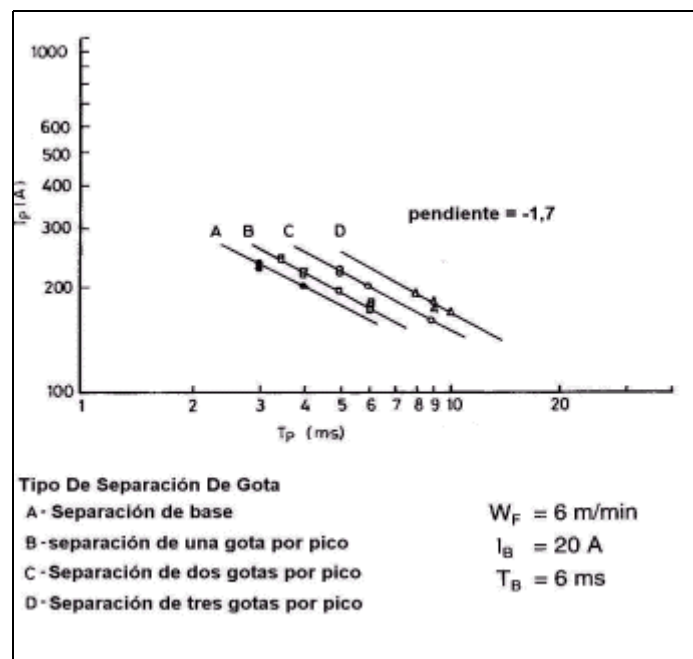


Figura 13. Relación entre I_p y T_p para diferentes tipos de separación de gota por pulso

• Determinación del Parámetro de Desprendimiento (K_V)

Los valores de la constante K_V para cualquier requisito de volumen de gota se estiman de los datos y oscilogramas registrados a partir de soldaduras usando arco convencional con valores de W que garanticen transferencia spray. Para cada ensayo la velocidad de alimentación y la tensión se ajustan de manera tal que se logre mantener una longitud de arco constante. Durante los experimentos, tanto la corriente como la tensión del arco se registran sobre un oscilograma, a partir del cual también se determinan el tiempo de desprendimiento de gota (T_{DC}), volumen de gota y nivel de corriente (I_{DC}). Los oscilogramas tipo se muestran en la figura 14 donde los desprendimientos de gota nuevamente se observan en los picos que se forman sobre la forma de onda del voltaje. Aunque el intervalo de tiempo entre sucesivas gotas varía de desprendimiento en desprendimiento, el intervalo de tiempo promedio es aproximadamente constante, el cual puede ser tomado como una aproximación al tiempo de desprendimiento de gota (T_{DC}). Sin embargo, una mejor estimación está dada por el tiempo modal de desprendimiento de gota (T_{MD}) el cual se obtiene del histograma de frecuencia (figura 15).

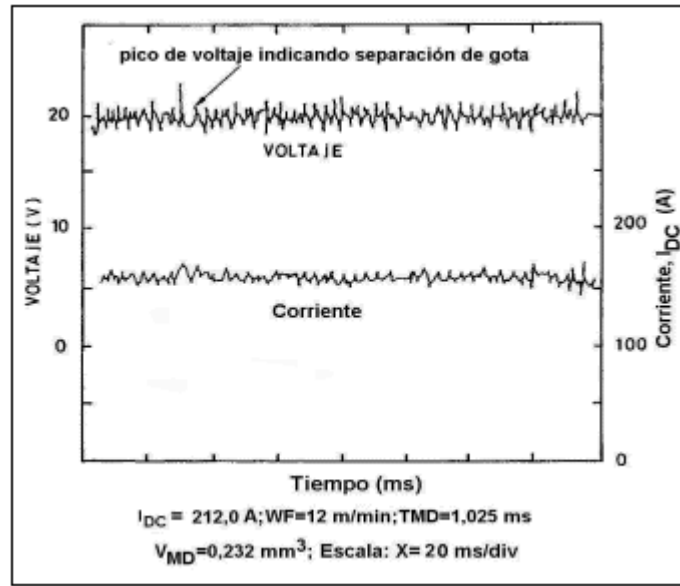


Figura 14. Corriente y voltaje del arco empleando soldadura convencional

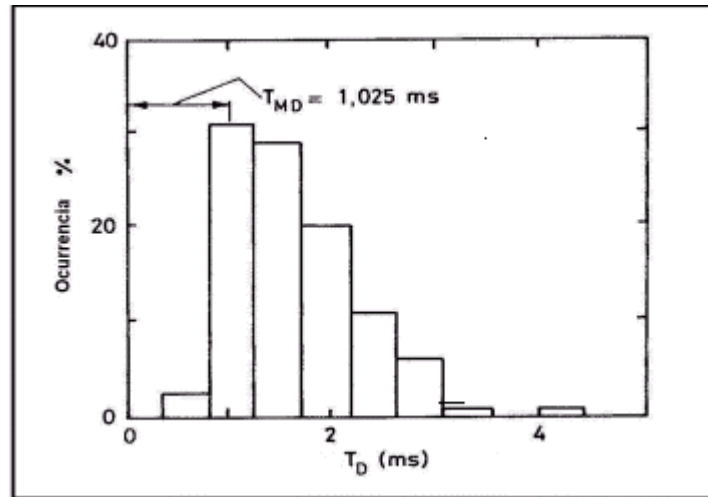


Figura 15. Histograma de frecuencia para los intervalos de tiempo con parámetros dados

Los valores de T_{MD} determinados experimentalmente fueron requeridos para calcular el volumen modal de gota (V_{MD}) mediante la siguiente expresión:

$$V_{MD} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot W_F \cdot T_{MD}}{240} \quad [\text{mm}^3] \quad (13)$$

Donde:

d = diámetro del alambre

W_F = velocidad de alimentación

Es relevante señalar que *Amin*^[22] en su investigación, usa como valor modal, el punto final (el mayor) del intervalo de clase de máxima frecuencia, mientras que *Rajasekaran et al*^[17], usa el punto medio del intervalo de clase, lo cual se considera una mejor práctica por los estadistas.

Los niveles de corriente de las soldaduras usadas (I_{DC}) igualmente se obtienen de los oscilogramas. A partir de todo este conjunto de valores T_{MD} , V_{MD} e I_{DC} obtenidos por cada velocidad de alimentación se obtiene la relación de I_{DC} vs. V_{MD} y además se obtiene la relación V_{MD} vs. T_{MD} como se muestra en la figura 16.

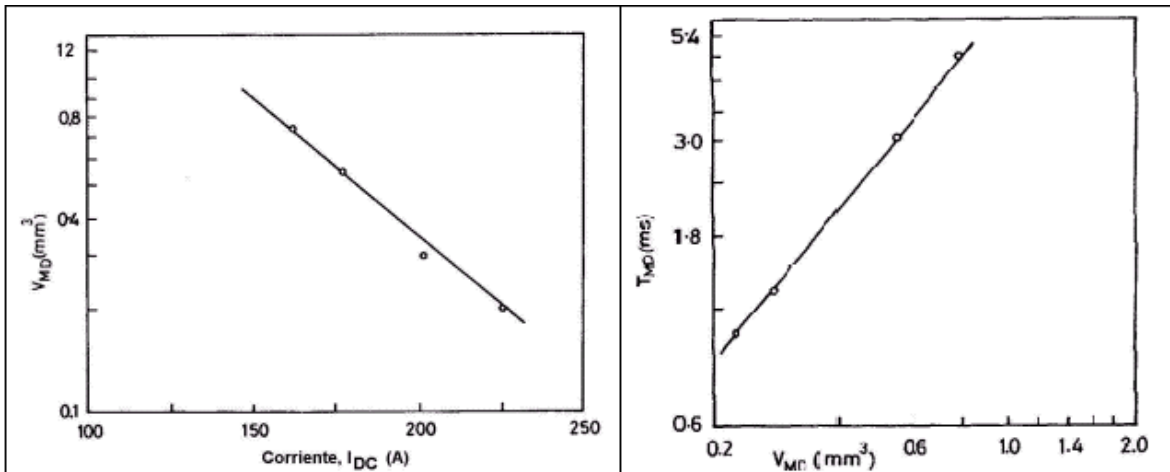


Figura. 16. Relación entre los niveles de corriente y volumen modal de gota (izquierda); Relación entre tiempo modal de desprendimiento de gota y volumen modal de gota (derecha).

De estos valores se espera satisfacer el criterio de la transferencia metálica al obtener finalmente los valores K_V a partir de la siguiente ecuación:

$$I_{DC}^m \cdot T_{MD} = K_V \quad [A^m \cdot s] \quad (14)$$

• Curva Paramétrica de Separación

El valor de K_V se sustituye en la ecuación 12 definiendo una curva paramétrica de separación, que al superponerse a la figura 11, como se muestra en la figura 17, limita las condiciones de pulso predichas por el criterio de Burnoff a aquellas que también satisfacen el criterio de la transferencia metálica, es decir que sólo la combinación de parámetros de corriente pulsada por encima de la curva paramétrica de separación podrá satisfacer el criterio de transferencia metálica.

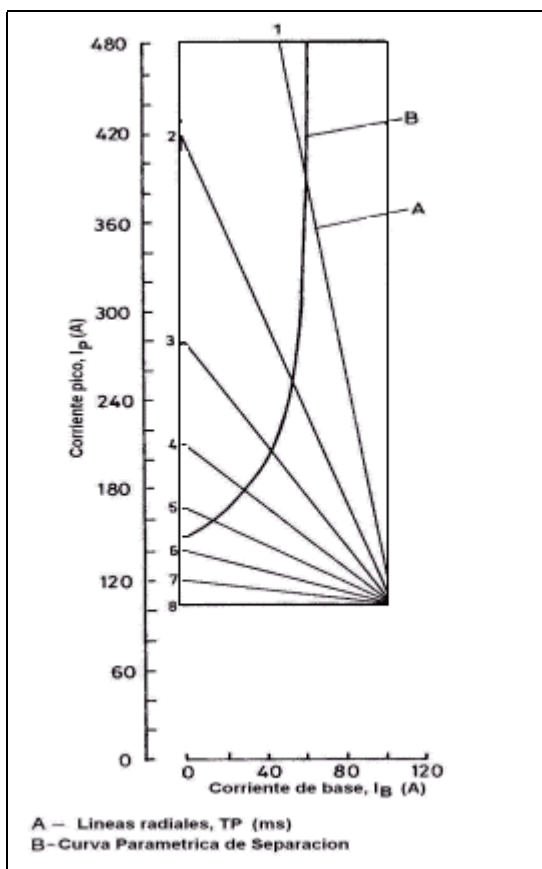


Figura 17. Imposición de la curva paramétrica de separación (curva B) sobre la zona predicha por el Criterio de Burnoff

1.3.5.3. Criterio de Estabilidad del Arco

Las condiciones de pulso o las combinaciones paramétricas están también limitadas por el requerimiento de la corriente base de no exceder un valor mínimo debido a que el arco eléctrico a bajas corriente base se torna inestable.

Esta limitante puede ser expresada por

$$I_b > C \quad (15)$$

Donde C es la corriente base límite para un arco estable

La zona paramétrica resultante (figura 18), está incluida entre la curva paramétrica de separación y la curva límite de I_b , esto representa el conjunto de valores para cada uno de los parámetros de corriente pulsada que satisface la combinación de los criterios de Burnoff, transferencia metálica y estabilidad del arco.

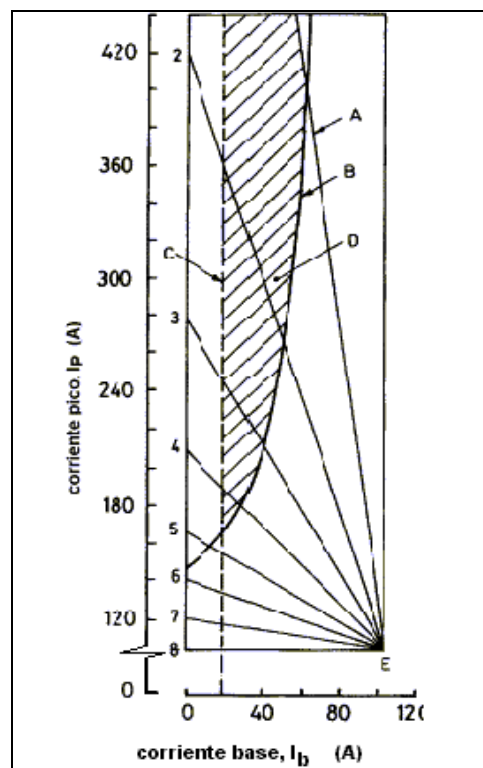


Figura 18. Límite de corriente base (C), junto con la curva paramétrica de separación (B), superpuestas sobre la zona paramétrica predicha por el criterio de burnoff.

1.4. CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA

Como lo indican *Dallam et al*^[23] en su artículo las soldaduras pueden ser caracterizadas de acuerdo a una cantidad de criterios, entre los que están: el proceso de soldadura utilizado, altura, forma, propiedades mecánicas, composición química, etc. Los métodos apropiados de caracterización dependen de la función de soldadura y el grupo de propiedades particulares requeridas para la aplicación. En algunos casos, el comportamiento de una soldadura puede deberse a la caracterización de su tamaño o forma, en otros, es importante caracterizar factores metalúrgicos tales como la composición del metal de soldadura y la microestructura. En general, la finalidad de la caracterización de soldaduras es lograr que una soldadura tenga la capacidad de cumplir con su función, documentar profusamente una soldadura y un procedimiento que han demostrado ser adecuados, o determinar por qué una soldadura no cumplió su función.

La caracterización de una soldadura puede ser dividida en tres niveles:

- **Ensayos No Destructivos:** información que puede ser obtenida mediante inspección visual directa y medición de la soldadura, seguido de una discusión acerca de la evaluación no destructiva. Esto abarca técnicas como radiografía, pruebas de ultrasonido e inspección mediante líquidos penetrantes, utilizadas para caracterizar la ubicación y la estructura de defectos internos y superficiales.
- **Ensayos Destructivos:** el análisis metalográfico incluye la caracterización macroestructural de una soldadura seccionada, abarca datos como el número de pases, altura, forma y homogeneidad del cordón de soldadura, y la orientación de dichos cordones en una soldadura de múltiples pases. Esto va seguido de un análisis microestructural que abarca microsegregación, tamaño de grano y su estructura, las fases que componen la soldadura y la composición.

1.4.1.1. Técnicas No Destructivas de Caracterización

- **Características Macroscópicas Observadas Externamente**

Algunos factores asociados con la producción y el desempeño de soldaduras son macroscópicos y fácilmente observables. Entre estos, los más obvios son la altura, la forma y la apariencia general de la soldadura. En gran parte, estos parámetros dependen de la geometría de la unión de soldadura y del proceso de soldadura seleccionado.

- **Métodos de Caracterización**

Las herramientas principales utilizadas en la macrocaracterización externa de una soldadura son la simple vista y lupas. En muchos casos, la presencia de defectos importantes tales como agrietamiento en caliente o porosidad también puede detectarse mediante inspección visual y fotografía. Ejemplos adicionales de factores que entran en juego en la apariencia general de los cordones de soldadura pueden ser la distorsión, decoloración gracias a una protección inadecuada o calor excesivo, socavadura, tamaño excesivo de cráter o espesor irregular de los cordones.

- **Defectos**

Defectos típicos hallados en soldaduras son: porosidad, socavadura, solapamiento, falta de penetración y falta de fusión, rechupes, agrietamiento de cráter, exceso de penetración, agrietamiento en caliente, inclusiones por retención de escoria, virutas del electrodo de tungsteno o defectos presentes en el material.

Un número de técnicas son ampliamente utilizadas para determinar la presencia de defectos superficiales o por debajo de la superficie en las soldaduras. La más común de estas es la inspección mediante líquidos penetrantes para grietas en la superficie, inspección con partículas magnéticas, radiografía con rayos X y ultrasonido.

1.4.1.2. Caracterización Interna Mediante Procedimientos Destructivos

- **Metalografía**

Abarca brevemente la caracterización y el análisis de la composición macroestructural y microestructural. Estos procedimientos son utilizados usualmente en una sección transversal de la soldadura. La sección transversal puede complementarse con una fotografía de vista superior, la sección longitudinal y la sección normal. En particular la fotografía de vista superior representará la apariencia general de la soldadura, ilustrando las irregularidades superficiales, salpicaduras o defectos macroscópicos como la fractura en caliente o la porosidad.

- **Macroestructura de la Soldadura**

Entre las características aparentes están el número de pases y número de capas, área de la zona de fusión, aspecto de la soldadura, penetración, ancho de la cara y del refuerzo y la curvatura del cordón superior. Una macrosección transversal también mostrará cualquier porosidad considerable o grandes inclusiones presentes en la soldadura y la extensión de la zona afectada por el calor (HAZ). Es importante notar que las mediciones cuantitativas de las características de la soldadura hechas en base una sección transversal serán precisas sólo si la sección se ha realizado correctamente.

1.4.1.3. Técnicas de Medición y Procedimientos

El método más usado para el análisis de la composición en soldaduras es la espectroscopía óptica de emisión, donde un punto de material (típicamente de 6mm de diámetro) de la superficie de la muestra es preparado mediante ablación y sus emisiones de luz son analizadas. En muchas soldaduras, un punto de este tamaño abarcaría varios pasos en una soldadura de múltiples pasos y por lo tanto también abarcaría metal de soldadura, HAZ y metal base en una soldadura de un solo paso. Una composición promedio sobre esta gran área no produciría efectos locales como aumento de la sensibilidad de aceros inoxidables hacia ciertos factores. Se utilizan frecuentemente la microscopía electrónica de barrido con sistemas de análisis mediante rayos X con dispersión de energía o longitud de onda, microsondas de electrones y técnicas de fluorescencia de rayos X. Usualmente, se

realizan un número de análisis poco espaciados a lo largo de una línea que atraviesa la soldadura. Estos datos podrían bien ser combinados posteriormente con datos provenientes de una prueba similar de microdureza y análisis microestructurales para caracterizar la variación a lo largo de la soldadura.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. EQUIPO DE SOLDADURA

Se utilizó una máquina para soldar modelo MTE DIGITEC (figura 19) desarrollada por LABSOLDA/UFSC (Brasil), la cual permite la operación con los siguientes procesos:

- MIG/MAG convencional (corriente constante).
- MIG/MAG pulsado con control de corriente.
- MIG/MAG pulsado con control mixto de tensión y corriente.
- MIG/MAG pulsado sinérgico.
- TIG con corriente constante o pulsada.
- Soldadura manual con electrodo revestido (SMAW)



Figura 19. Máquina de soldar MTE DIGITEC

La operación de éste equipo se realiza a través de un control remoto microprocesado con teclado y pantalla de cristal líquido (LCD) (figura 20), por medio del cual se realiza la selección de los procesos y el ajuste de las variables de forma simple y práctica.



Figura 20. Panel de control

Tabla 7. Especificaciones Técnicas de la máquina de soldar MTE DIGITEC

Tensión	220, 380 o 440 V Trifásica
Tensión en vacío	64 V
Corriente	Continua (constante o pulsada)
Corriente nominal	350 A @ FP = 100%
Corriente máxima	600 A
Dimensiones	0,5 x 0,6 x 0,9 m
Peso	140 Kg.
Factor de potencia	0,95

2.1.1. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El material de aporte se conectó con polaridad inversa (DCEP) a la máquina de soldar. La pistola se ajustó por medio de abrazaderas a un carro guía de cuatro ruedas y velocidad variable *ESAB ULTRALINE* cuyo desplazamiento era paralelo a la dirección de deposición de los cordones de soldadura en posición plana, como puede observarse en la figura 21. La pistola se mantuvo con un ángulo de 90° respecto a la chapa.

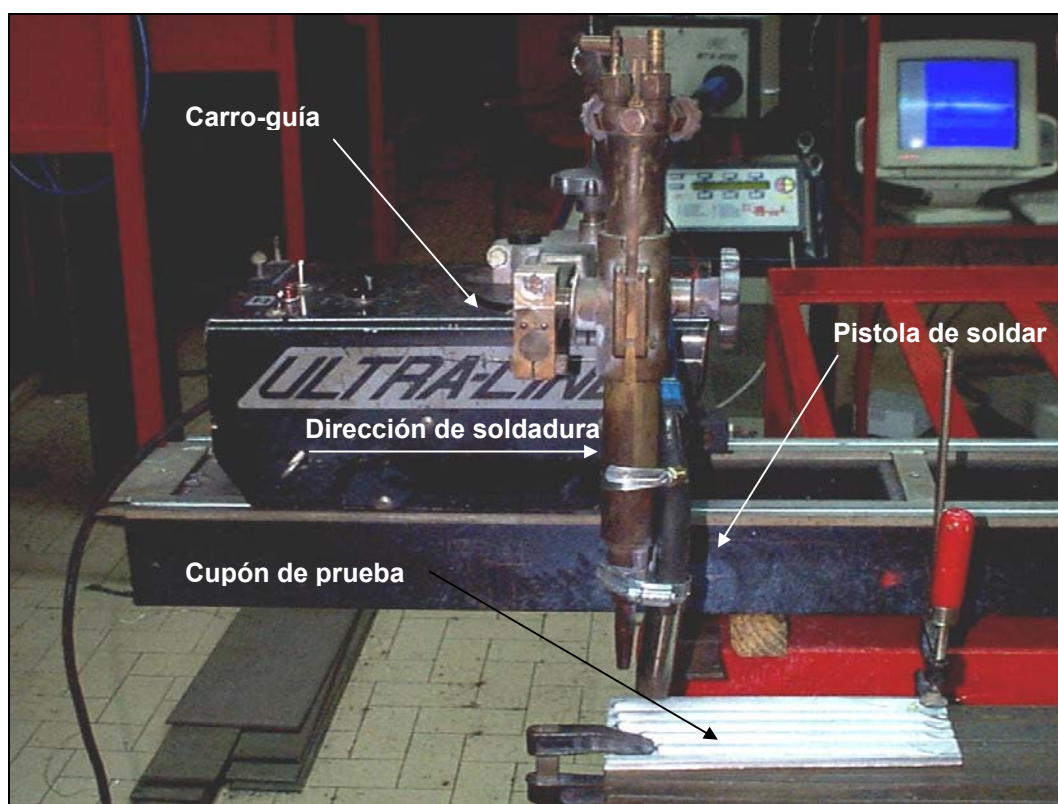


Figura 21. Carro guía para deposición de los cordones

La distancia entre la boquilla de contacto y la pieza de trabajo fue de 15 mm para ambos alambres, se utilizó Argón de pureza comercial como gas protector a un caudal de 15 l/min y 20 l/min para el aporte ER 4043 y para el ER 5356 respectivamente. La relación entre la velocidad de alimentación del alambre y la velocidad de avance fue 10, como lo

sugirió *Rajasekaram et al*^[17] en su trabajo con aporte ER 5356. Se propició la extensión total de la manguera de la pistola, mediante su sujeción desde el techo con cables, de manera de reducir la resistencia al avance del alambre dentro del conducto (figura 22).

Prevía deposición de cada cordón, se realizó una limpieza exhaustiva de la superficie del metal base con un cepillo de alambre de acero inoxidable con cerdas de 0.254 mm de diámetro, de manera de eliminar temporalmente la capa de óxido de aluminio.

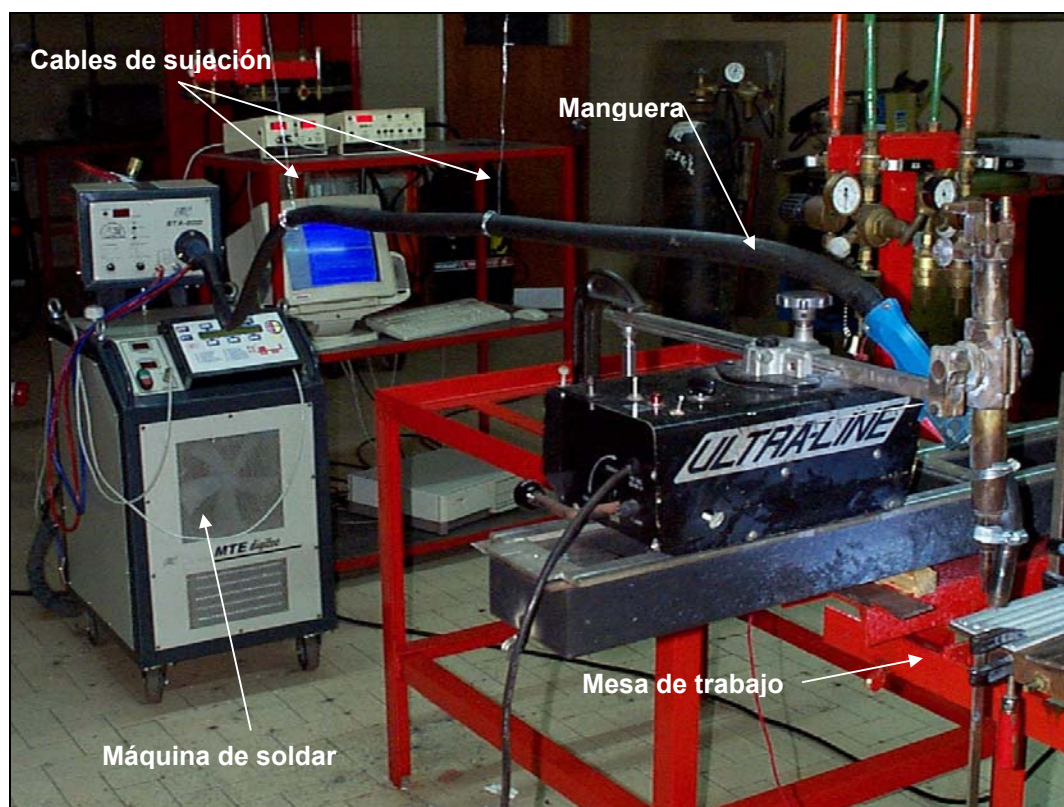


Figura 22. Disposición general del equipo

2.2. REGISTRO Y ANÁLISIS DE OSCIOGRAMAS

Para realizar el registro de las señales de corriente y tensión de cada cordón de soldadura, se empleó un software denominado Oscilos, el cual implementa un osciloscopio digital mediante la asistencia de un computador personal.

El equipo de soldadura usado incorpora ruido de alta frecuencia, que junto con las perturbaciones ocasionadas por el proceso, dificultan el estudio del fenómeno de desprendimiento de gota y la observación de los picos en el oscilograma de tensión. Debido a la carencia de filtros pasivos que permitan restringir las frecuencias inferiores a 5 KHz., se ha usado un programa de computación denominado Microcal Origin, versión 4.0^[24] (figura 23), que permite “suavizar” las gráficas de onda de corriente y tensión, mediante el uso de método matemáticos.

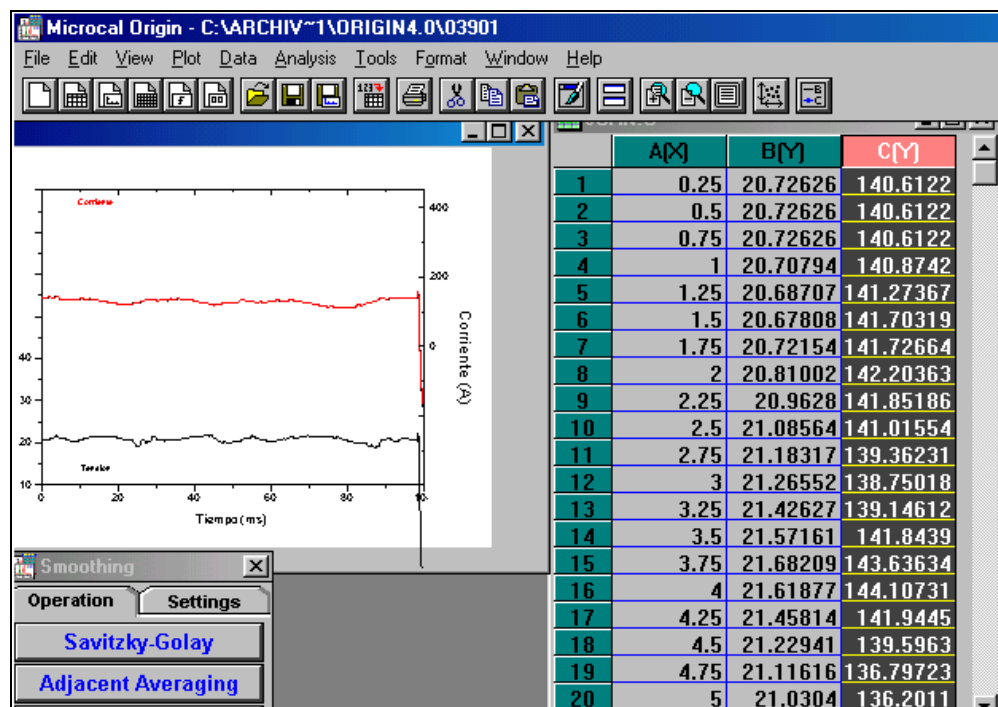


Figura 23. Pantalla de trabajo del software Microcal Origin 4.0

2.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE Y DE APORTE

La caracterización química del material utilizado consistió en determinar las cantidades en porcentaje en peso de los elementos aleantes contenidos en chapas de aleación de aluminio AA 1100 y AA 1200 y en rollos de alambre ER 4043 y ER 5356, de manera de poder verificar que los valores estén de acuerdo con las normativas *ANSI/AWS*^[12] (tabla 8). Las muestras tomadas se analizaron mediante el método de Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama, el cual fue realizado en el Laboratorio Químico Instrumental de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales y en las instalaciones de la compañía Arco Metal. Los resultados obtenidos se compararon con el certificado de análisis químico suministrado por el fabricante y con los datos de las normas *ANSI/AWS A5.10*^[12].

Tabla 8. Composición Química del metal base y aporte según ANSI/AWS A5.10^[12]

Designación de aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
1100	0.95 (Si+Fe)		0.05-0.20	0.05	.....	.....	0.10	.....	0.15	99.00
1200	1.00 (Si+Fe)		0.05	0.05	.....	.....	0.10	0.05	0.15	99.00
4043	4.5-6.0	0.80	0.30	0.05	0.05	.....	0.10	0.20	0.15	balance
5356	0.25	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	0.10	0.06-0.20	0.15	balance

La toma de muestras para el análisis químico se realizó como se indica a continuación:

- **Identificación:** Se tomaron placas de aleación de aluminio AA 1100 y AA 1200, de dimensiones 150 x 70 x 6 mm y se identificaron mediante los números “0” (cero) y “1” (uno) respectivamente, para lo cual se usaron matrices de estampado.

- **Limpieza:** Se utilizó acetona para eliminar residuos de pegamento, aceite, tinta, etc. sobre dichas placas. Luego se procedió a rebajar su superficie usando papel de lija N°80 de manera de eliminar posibles inclusiones y reducir el espesor en cierto grado para garantizar la pureza de la muestra. Nuevamente se limpiaron con acetona para eliminar la suciedad y los restos de las partículas del papel de lija que pudieron quedar en el metal. Para el material de aporte sólo se realizó la limpieza con acetona.
- **Toma de Muestras:** Se tomaron muestras de viruta de cada una de las placas, para lo cual se requirió de un taladro vertical y una broca HSS de 6 mm de diámetro. Se omitió el uso de refrigerantes como agua o aceite, ya que estos contaminarían la muestra provocando resultados erróneos en el análisis químico. Se utilizó una velocidad de avance muy lenta para evitar un calentamiento excesivo del metal y se tuvo sumo cuidado en la recolección de la viruta ya que residuos de elementos extraños, provenientes del mismo taladro o de los alrededores pudieran caer en la muestra y afectar los resultados. Para el material de aporte se cortaron pedazos de aproximadamente 5 mm de longitud hasta completar un peso de cerca de 10 gr, para cada alambre.
- **Homogeneidad en la Toma de Muestras:** Para el análisis químico es necesario tomar una muestra representativa del material que garantice su homogeneidad, ya que durante el proceso de fabricación del material del cual se toma la muestra, es posible que ciertas áreas contengan elementos concentrados o defectos que de alguna manera no representen la totalidad del material. Por esta razón se ha tratado de recoger la viruta en perforaciones realizadas en distintas zonas de la superficie del material base.

2.4. SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PULSO

2.4.1 CRITERIO DE BURNOFF

Se realizaron depósitos sobre chapas de aleación de aluminio AA 1100 y AA 1200 de 150 x 70 x 6 mm aproximadamente en posición plana. Para satisfacer el criterio de Burnoff, se realizaron cordones primero empleando GMAW-P y luego GMAW convencional (corriente no pulsada) para distintas velocidades de alimentación del alambre, los parámetros en cada caso se ajustaron adecuadamente hasta obtener un arco estable, condición que se evaluó mediante la constancia en el valor de la tensión y de la corriente media observados en el display de la máquina de soldar. Para cada velocidad de alimentación (W_F) se registró el valor de la corriente media (I_M) y se realizaron gráficas W_F vs. I_M .

A partir de las gráficas realizadas para cada material de aporte, se tomó el valor de corriente media correspondiente a una velocidad de alimentación de 6 m/min para el alambre ER 4043 y 8 m/min para el ER 5356, luego se construyeron las zonas paramétricas respectivas, según como se indica en el trabajo realizado por *Amin*^[22].

2.4.2 CRITERIO DE TRANSFERENCIA METÁLICA

2.4.2.1 Limitación de la corriente pico (I_p) y tiempo pico (T_p)

Para poder determinar las condiciones base mas apropiadas para establecer la relación I_p vs. T_p para los distintos tipos de transferencia metálica, se procedió a realizar depósitos sobre chapa usando las combinaciones de parámetros de pulso ubicados dentro de la zona paramétrica hallada por el criterio de Burnoff. Manteniendo fijo los valores de I_b y T_b hallados y la velocidad de alimentación del alambre, se realizaron nuevos depósitos variando tanto I_p como T_p . En este caso, se le permitió variar también al tiempo de ciclo T y los valores de corriente pico se mantuvieron por encima de la corriente de transición (punto de intersección), como lo sugiere en su trabajo *Rajasekaram et al*^[17].

Los oscilogramas correspondientes a las señales de corriente y tensión, se registraron en cada caso para posteriormente clasificar los ensayos por tipo de desprendimiento, es decir una gota por pulso, dos gotas por pulso, tres gotas por pulso y desprendimiento de gota en la condición base. El desprendimiento de gota puede observarse sobre el oscilograma de tensión, en el punto en el que ocurre un pico. Los valores de I_p y T_p correspondientes al desprendimiento de una gota por pulso se graficaron en escala logarítmica para obtener una recta; el valor de la pendiente corresponde al exponente de la ecuación 12.

2.4.2.2 Determinación del parámetro de desprendimiento (K_v)

Se realizaron depósitos sobre chapa usando GMAW convencional empleando velocidades de alimentación de 5, 5.5, 6 y 6.5 m/min para el aporte ER 4043 y 10, 10.5, 11, 11.5 y 12 m/min para el aporte ER 5356, estas velocidades se encuentran por encima del punto de transición, con lo cual se espera obtener transferencia tipo spray. Se registraron los valores de corriente media I_{DC} para cada velocidad de alimentación W_F , así como los oscilogramas correspondientes, a partir de los cuales, se obtuvieron los distintos tiempos entre sucesivos desprendimientos de gota T_D y posteriormente, con la construcción del histograma de frecuencias se obtuvo el valor del tiempo modal de gota T_{MD} .

Al evaluar T_{MD} en la ecuación 13 se obtiene el volumen modal de gota V_{MD} para cada velocidad de alimentación. Posteriormente se construyen las gráficas I_{DC} vs. V_{MD} y V_{MD} vs. T_{MD} de las cuales se obtiene el valor de la corriente I_{DC} y el tiempo modal de gota T_{MD} requeridos para que la transferencia se haga con una gota de igual tamaño que el electrodo ($V_{MD} = 0.905 \text{ mm}^3$). Con estos dos últimos valores se evalúa la ecuación 14 y se determina el parámetro de desprendimiento K_v . Este valor se sustituye en la ecuación 12 con lo cual queda definida y se procede a superponer la curva resultante sobre la zona paramétrica determinada por el Criterio de Burnoff.

2.4.3 CRITERIO DE ESTABILIDAD DEL ARCO

Para satisfacer este criterio, se realizaron soldaduras para cada material de aporte seleccionando aleatoriamente puntos dentro de la zona paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. Con el proceso en marcha se disminuyó progresivamente el valor de la corriente base I_b hasta observar la extinción del arco.

2.4.4 CONSTRUCCIÓN DE LA ZONA PARAMÉTRICA

Las curvas de potencia de arco constante obtenidas para cada aporte obtenidas junto con el límite de arco estable se superponen al área que satisface el criterio de Burnoff para definir la zona paramétrica resultante que presenta el conjunto de parámetros de pulso que satisface los tres criterios.

Puesto que los puntos dentro de esta zona no garantizan la combinación de parámetros de pulso más adecuada para producir arcos estables y buenas características de forma del cordón tales como penetración, aspecto superficial, etc., fue necesario realizar combinaciones adicionales de parámetros de pulso y evaluar su estabilidad. Estos puntos se graficaron sobre las zonas paramétricas correspondientes.

Todos los puntos que no cortocircuitaron o se comportaron inestablemente se unieron con una curva para definir un área de comportamiento estable, de dimensiones mucho mas pequeñas que la anterior.. Dentro de cada una de estas áreas se tomaron tres combinaciones distintas de parámetros de pulso con los cuales se realizaron cupones de prueba.

2.4.5 PREPARACIÓN METALGRÁFICA

Cada cupón de prueba se identificó adecuadamente usando matrices de estampado y luego se cortó en secciones transversales al cordón de soldadura empleando una sierra manual (figura 24).

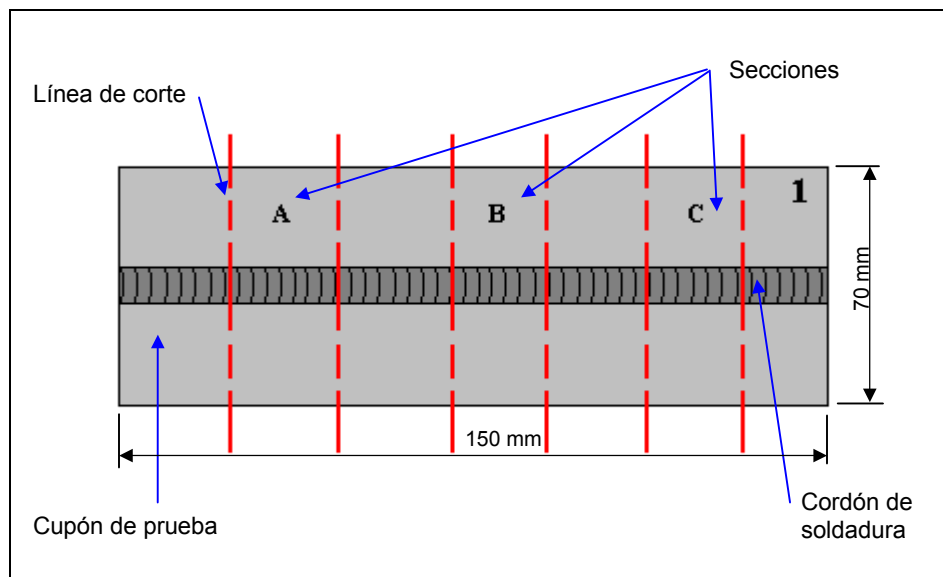


Figura 24. Corte de los cupones de prueba

Los cortes se realizaron en tres zonas bien espaciadas a lo largo del cordón de soldadura, con el fin de que las muestras manifiesten la reproducibilidad de la condición geométrica (figura 25).



Figura 25. Secciones del cupón de prueba

Posteriormente, cada sección del cupón de prueba se dimensionó adecuadamente con una sierra esmeril BUEHLER Abrasimet 2 (figura 26) para permitir su montaje en cilindros de polvo transóptico de 1" de diámetro, para ello se empleó una prensa de montaje BUEHLER Simplimet 3 (figura 27). Esto se realizó con el objetivo de facilitar la manipulación de las probetas durante el pulido metálico y el control del área de superficie durante el ataque químico.



Figura 26. Sierra de esmeril BUEHLER Abrasimet 2

Las probetas fueron identificadas usando un grabador eléctrico Vibro-Graver marca BURGESS. El pulido mecánico se realizó con ayuda de un equipo lijador-pulidor de dos velocidades BUEHLER Ecomet 5 (figura 28) utilizando papel abrasivo con la siguiente secuencia de grano 120 – 240 – 320 – 400 – 600 – 800 – 1200. Por último, las probetas se pasaron por el paño rojo húmedo con solución de alúmina de 1 μm y luego de 0,3 μm .



Figura 27. Prensa de montaje BUEHLER Simplimet 3



Figura 28. Lijador-pulidor de dos velocidades BUEHLER Ecomet 5

El pulido final se realizó en una máquina BUEHLER Vibramet 2 (figura 29), en la cual se montaron las probetas durante un tiempo de aproximadamente una hora, para poder lograr el acabado especular necesario para el análisis metalográfico.



Figura 29. Pulidora BUEHLER Vibramet 2

2.4.5.1 Macrografía

Las probetas soldadas con ER 4043 se atacaron químicamente sumergiéndolas y agitando por un tiempo de aproximadamente 20 segundos en un vaso precipitado de plástico con reactivo Keller (2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃, 190 ml H₂O)^[25]. Luego se lavaron con agua corriente para eliminar el exceso del reactivo y se secaron con un secador eléctrico agregando un poco de alcohol a la superficie tratada.

2.4.5.2 Micrografía

Para revelar la microestructura de las muestras soldadas se construyó una celda de ataque electrolítico, compuesta por la probeta (ánodo), una barra de acero inoxidable 316L (cátodo) y una solución de ácido fluorhídrico (HF) diluido al 5 % (electrolito) como se

muestra en la figura 30. El circuito eléctrico se alimentó con 22 voltios provenientes de una fuente de poder DC VOLT GP-303A. La probeta debió perforarse con un pequeño taladro DREMEL Moto-Tool modelo 395 para poder introducir un tornillo en ella y establecer el contacto con el metal por la parte no atacada. La reacción se llevó a cabo al introducir y agitar la probeta en la solución ácida durante 25 segundos. Luego se lavó con agua corriente para eliminar el exceso del reactivo y se secó con un secador eléctrico agregando un poco de alcohol a la superficie tratada.

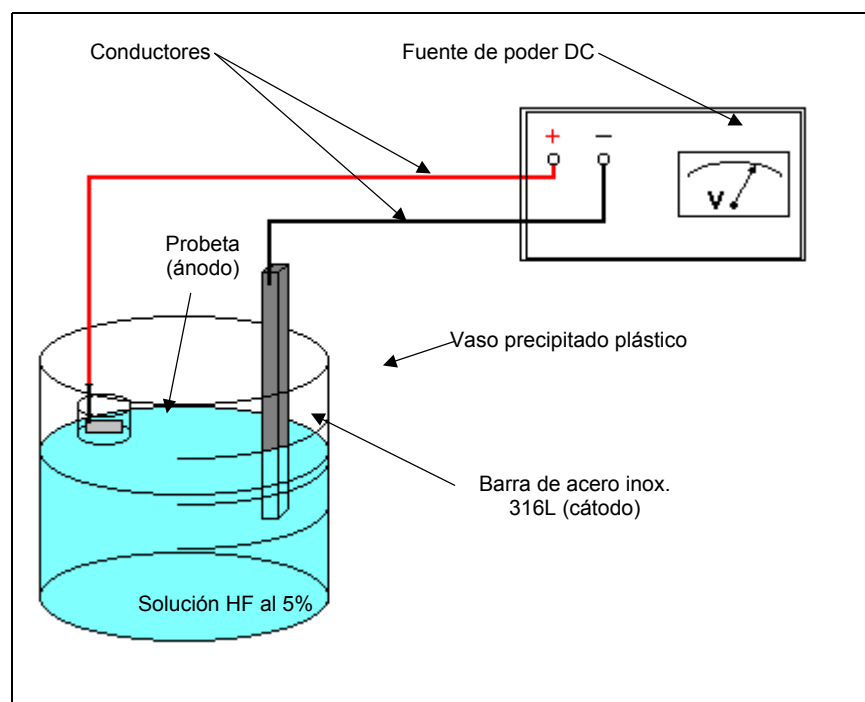


Figura 30. Celda de ataque electroquímico

2.4.6 MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS DEPÓSITOS

Las macrografías correspondientes a cada condición de soldadura fueron procesadas digitalmente mediante un sistema analizador de imágenes marca LECO IA-3001. Se contó con dos macrografías para cada una de las tres condiciones de soldadura correspondientes a cada uno de los materiales de aporte, sobre las cuales se realizaron mediciones de altura de refuerzo, penetración, ancho de cordón, área transversal de refuerzo, área transversal de penetración y área transversal total del depósito.

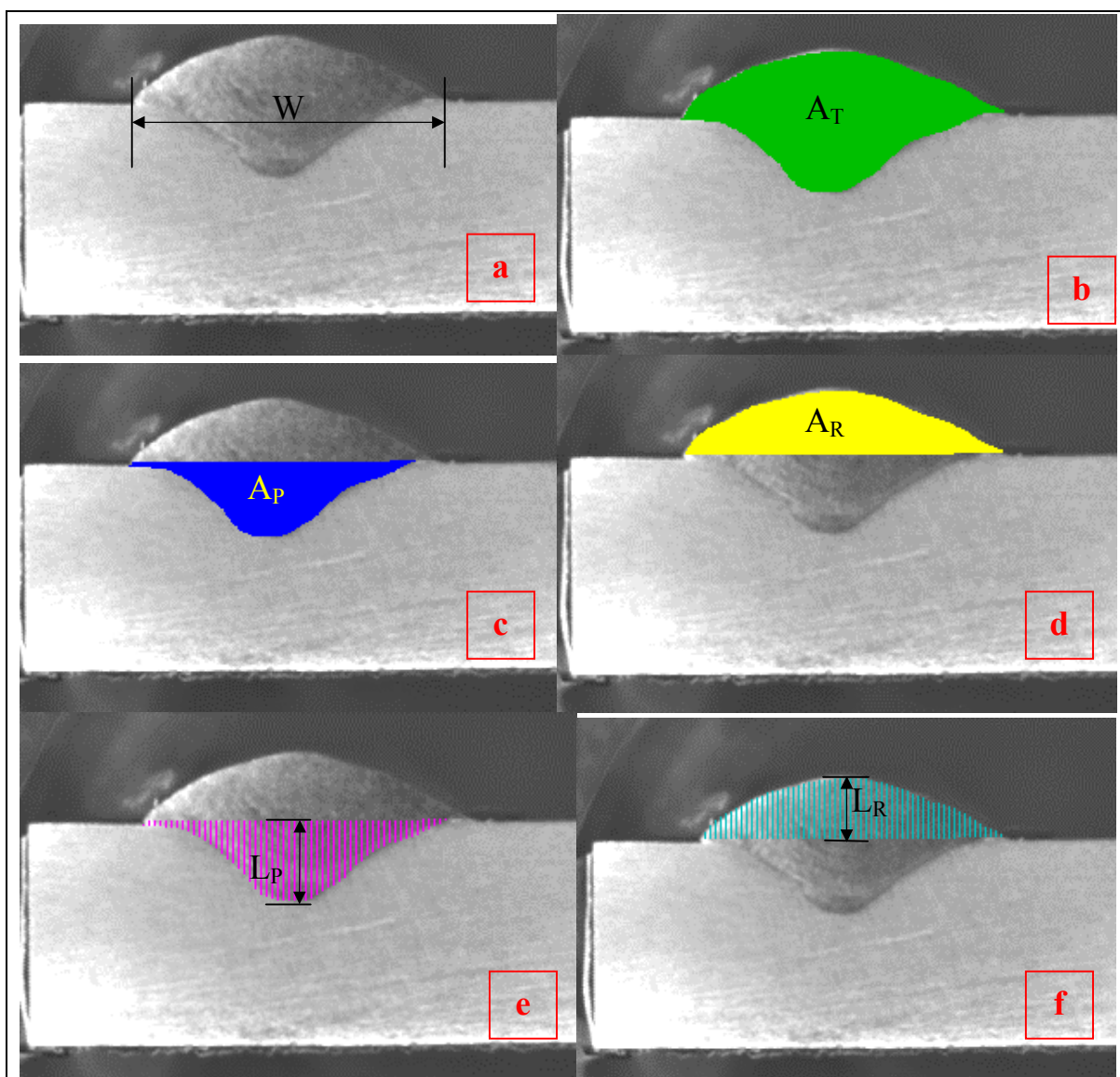


Figura 31. Medición de la geometría del depósito

En la figura 31 se muestran las dimensiones del depósito determinadas a partir de la macrografía original por el sistema analizador de imágenes. En base al área transversal total del depósito (A_T) (figura 31-b), definida por la suma algebraica de las áreas transversales de penetración (A_P) (figura 31-c) y de refuerzo (A_R) (figura 31-d), se calculó el porcentaje de dilución (%D), el cual viene definido por la siguiente ecuación reportada por el texto *Soldadura para Ingenieros*^[4]:

$$\%Dilución = \frac{A_P}{A_T} \times 100 \quad (16)$$

Es relevante resaltar que la determinación de la penetración (L_P) (figura 31-e) y altura de refuerzo (L_R) (figura 31-f), se ha realizado en base a la medición de un cierto número de diferenciales de altura, de los cuales el valor máximo corresponde al requerido. La figura 31-a hace referencia al ancho de cordón denotado por la letra W.

Con todos los valores hallados se procedió a construir gráficas para cada material de aporte relacionando las magnitudes W, L_P , L_R , W/ L_P , W/ L_R y %D con cada una de las combinaciones de parámetros usadas.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL

3.1.1. MATERIAL BASE

La tabla 9 muestra la composición química del material base analizado en el Laboratorio Químico Instrumental (LQI) de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V. se puede apreciar que los valores se encuentran por debajo de los máximos reportados por las normas ANSI/AWS A5.10-92 ^[23], lo que garantiza que el material utilizado corresponde al especificado.

Tabla 9. Composición química del material base

Fuente	Designación de aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Otros elementos	Al min.
ANSI/AWS	1100	0.95 (Si+Fe)		0.05-0.20	0.05	0.10	.....	0.15	99.00
LQI	1100	0.07	0.55	0.03	0.002	0.004	.....	.....	balance
ANSI/AWS	1200	1.00 (Si+Fe)		0.05	0.05	0.10	0.05	0.15	99.00
LQI	1200	0.11	0.68	0.006	0.009	0.004	.....	.....	balance

3.1.2. MATERIAL DE APORTE

La tabla 10 expone la composición química del material de aporte reportada por el Laboratorio Químico Instrumental (LQI) de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V y el laboratorio de la compañía Arco Metal. Se puede observar que los resultados de los laboratorios no coinciden con los valores reportados por el fabricante, pero que todos ellos están por debajo de los máximos señalados por las normas *ANSI/AWS A5.10-92*^[12], por lo cual se garantiza que se trabajó con el material especificado.

Tabla 10. Composición química del material de aporte

Fuente	Designación de aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al min.
ANSI/AWS	ER 4043	4.5-6.0	0.80	0.30	0.05	0.05	.....	0.10	0.20	0.15	Balance
FABRICANTE	ER 4043	5.17	0.20	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.0001	Balance
LQI	ER 4043	ND	0.05	0.003	0.003	0.007	0.003	0.02	.....	.....	Balance
ANSI/AWS	ER 5356	0.25	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	0.10	0.06-0.20	0.15	Balance
FABRICANTE	ER 5356	0.070	0.08	0.004	0.12	4.77	0.13	0.001	0.1	0.0005	balance
LQI	ER 5356	0.10	0.10	0.003	0.008	2.67	0.14	0.003	0.11	.....	balance

3.1.3. CORDÓN DE SOLDADURA

La tabla 11 expone los resultados obtenidos del análisis químico de los depósitos realizado por la compañía Arco Metal.

Tabla 11. Composición química de los depósitos

Fuente	Depósitos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
ARCO METAL	ER 4043 vs. AA 1100	4.8	0.401	0.079	0.005	0.002	....	0.01	0.011	Balance
ARCO METAL	ER 5356 vs. AA 1200	0.04	0.035	0.098	0.109	2.088	0.1	0.001	0.76	Balance

3.2. SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PULSO

El proceso de selección de los parámetros de pulso se basa en la determinación de la zona paramétrica inicial, la cual debe satisfacer los siguientes criterios. Las probetas realizadas han sido denotadas con una nomenclatura especial para diferenciar las soldaduras realizadas entre un aporte y otro. Las probetas realizadas empleando aporte Al-Si ER 4043 han sido denotadas con la letra S (de silicio) mientras que las realizadas empleando aporte Al-Mg ER 5356 se han denotado con una letra M (de magnesio). Cada letra va seguida de un número, que indica el número de ensayo realizado, por ejemplo, la probeta S.1 corresponde al ensayo número 1 utilizando alambre de aleación de silicio ER 4043.

3.2.1. CRITERIO DE BURNOFF

Según como lo indica *Rajasekaran et al*^[17] en su trabajo, la corriente media (I_M) debe balancearse con la velocidad de alimentación del alambre (W_F) para producir un arco estable. En la tabla 12 se reportan la combinación de parámetros de pulso necesaria para lograr un arco estable con el aporte ER 4043 a velocidades de alimentación de 4.4, 5.4 y 7.8 m/min; de igual manera la tabla 13 muestra los valores de corriente media necesarios para balancear velocidades de alimentación del alambre de 5.3, 6, 6.9 y 7.6 m/min, usando corriente constante.

Tabla 12. Parámetros de arco estable con GMAW-P. ER 4043

Nº	I_p (A)	I_b (A)	T_p (ms)	T_b (ms)	V (volts)	W_F (m/min)	I_M (A)
S.1	400	70	0.7	1.7	23	7.8	163
S.2	370	100	0.4	4.1	21.1	5.4	121
S.3	280	70	0.4	2.2	19.5	4.4	105

Tabla 13. *Parámetros de arco estable con GMAW convencional. ER 4043*

N°	V (volts)	W_F (m/min)	I_M (A)
S.4	22	5.3	133
S.5	23	6	150
S.6	24	6.9	172
S.7	25	7.6	184
S.8	26	7.8	196

Los valores de corriente media son únicos para cada velocidad de alimentación, tanto en el caso de corriente pulsada como con corriente constante, lo cual permite la construcción de la gráfica que se muestra en la figura 32. A partir de esta gráfica se pueden obtener los valores de corriente media necesarios para equilibrar la tasa de consumo del electrodo y de esta manera proporcionar un proceso estable desde el punto de vista del arco eléctrico. Observe que para este material de aporte, es necesario usar valores mas altos de corriente para fundir el electrodo cuando se emplea el proceso GMAW convencional (corriente constante) que cuando se usa GMAW-P (corriente pulsada). Esto, sin lugar a dudas, representa la gran ventaja del proceso con corriente pulsada en la soldadura de chapas delgadas, ya que permite el uso de modos de transferencia que garantizan una mejor calidad del depósito de soldadura con corrientes medias más bajas.

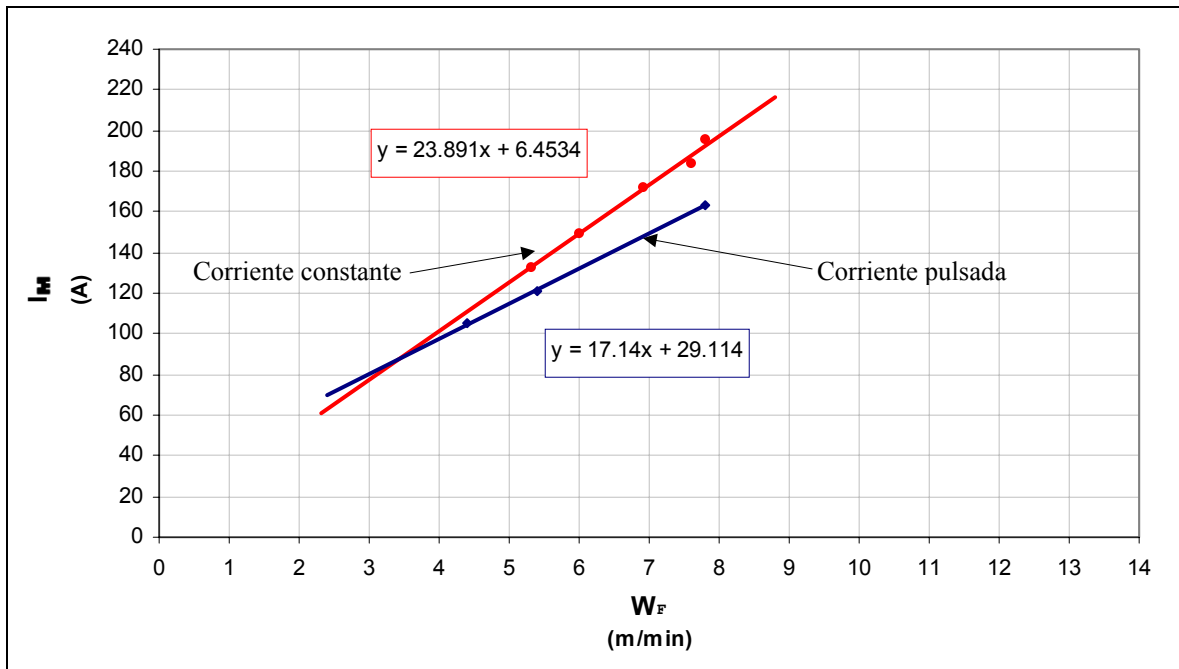


Figura 32. Características de Burnoff para corriente constante y corriente pulsada usado aporte ER 4043 de diámetro 1.2 mm

La intersección de ambas rectas representa el punto de transición a partir del cual se obtiene transferencia en modo spray (en el sentido de aumento de W_F), este punto está dado por las coordenadas: ($W_F = 3.35$ m/min, $I_M = 86.5$ A)

Y se obtiene al igualar las ecuaciones de las rectas

$$I_M = 23.891 \cdot W_F + 6.4534 \quad (\text{corriente constante}) \quad (16)$$

$$I_M = 17.14 \cdot W_F + 29.114 \quad (\text{corriente pulsada}) \quad (17)$$

La construcción de la zona paramétrica para el aporte ER 4043 se realizó para una velocidad de alimentación de 6 m/min, debido a que se encuentra por encima del punto de transición ($W_F = 3.35$ m/min) con lo cual se pretende obtener transferencia en modo spray y una corriente media inferior a la necesaria en el proceso con corriente constante.

El criterio de Burnoff se aplicó de manera análoga al aporte Al-Mg ER 5356. La tabla 14 reporta la combinación de parámetros de pulso que fue requerida para balancear las velocidades de alimentación de 5.8, 6.5, 8.9, 10.1 y 10.4 m/min con las respectivas

corrientes medias. En la soldadura con corriente constante se utilizaron velocidades de alimentación de 7.8, 8.4, 9.2, 11.7 y 12.3 m/min, las corrientes medias correspondientes se muestran en la tabla 15. Es necesario señalar que la condición de arco estable se consiguió mediante el ajuste de los parámetros de soldadura hasta lograr que los valores de corriente media I_M y tensión V , indicados por la fuente de soldadura se mantuvieran mas o menos constantes.

Tabla 14. Parámetros de arco estable con GMAW-P. ER 5356

N°	I_p (A)	I_b (A)	T_p (ms)	T_b (ms)	V (volts)	W_F (m/min)	I_M (A)
M.1	290	30	1.4	5.1	19.4	5.8	90
M.2	340	100	1.5	3	26.1	10.1	177
M.3	295	100	1.4	2.8	24.8	8.9	165
M.4	220	40	3.3	4.6	22.3	6.5	116
M.5	350	140	1	3	27.1	10.4	189

Tabla 15. Parámetros de arco estable con GMAW convencional. ER 5356

N°	V (volts)	W_F (m/min)	I_M (A)
M.6	25	9.2	170
M.7	25	7.8	148
M.7	23	8.4	156
M.8	25.8	11.7	205
M.9	26.9	12.3	216

Al graficar en plano coordenado los valores de velocidad de alimentación (W_F) y corriente media (I_M) reportados por las tablas 14 y 15, se obtuvieron las rectas para corriente pulsada y corriente constante que se muestran en la figura 33.

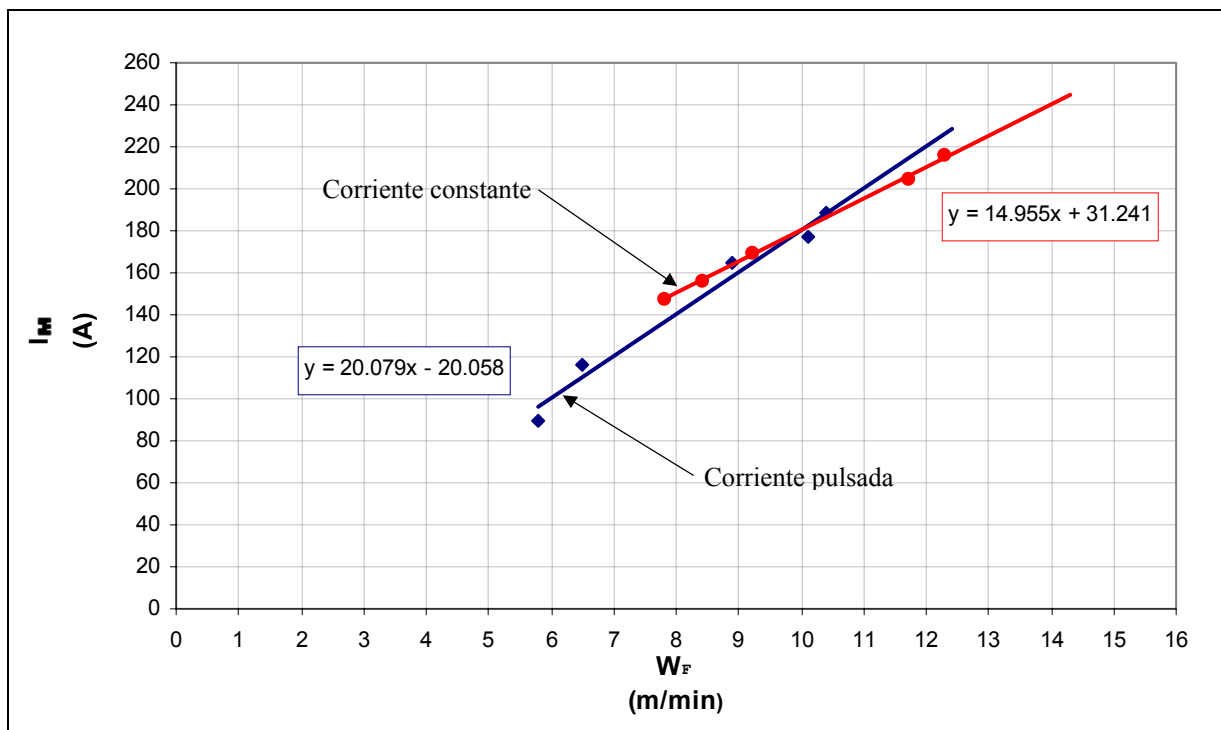


Figura 33. Características de Burnoff para corriente constante y corriente pulsada usado aporte ER 5356 de diámetro 1.2 mm

Observe que al soldar con el aporte ER 5356, se requiere mayor corriente cuando se emplea el proceso pulsado que cuando se usa el modo con corriente constante, para velocidades de alimentación mayores a 10 m/min. Una relación similar a esta fue obtenida por Rajasekaran^[26] usando el mismo aporte pero con Al-Mg AA 5083 como material base. Por debajo del punto transición ($W_F = 10$ m/min, $I_M = 181.14$ A), la tasa de fusión del electrodo es mayor al soldar con el proceso convencional que cuando se usa GMAW-P, por lo que, en este último caso, las corrientes son menores.

El punto de intersección entre las rectas de la figura 33 corresponde al nivel de corriente media (o velocidad de alimentación) a partir del cual se obtiene transferencia en modo spray (en el sentido de aumento de W_F). Las ecuaciones de las rectas son:

$$I_M = 14.955 \cdot W_F + 31.241 \text{ (corriente constante)} \quad (18)$$

$$I_M = 20.079 \cdot W_F - 20.058 \text{ (corriente pulsada)} \quad (19)$$

Para poder obtener las mencionadas ventajas que proporciona el modo pulsado y mantener el aporte calórico por debajo del conseguido con el modo convencional, se procedió a construir la zona paramétrica para una velocidad de alimentación de 8m/min.

Con el fin de obtener combinaciones de parámetros que proporcionen transferencia metálica de una gota por pulso, para cada velocidad de alimentación se calcula un tiempo de ciclo que permita la formación de una gota esférica de igual diámetro que el alambre. Este volumen está dado por la ecuación 7, al evaluar con $r = 0.6 \text{ mm}$ se obtiene:

$$\boxed{V_D = 0.905 \text{ mm}^3}$$

Luego al sustituir en la ecuación 8 este valor y el de las velocidades W_F , se obtiene:

$$\boxed{T = 8.00 \text{ ms}} \text{ para } W_F = 6 \text{ m/min}$$

$$\boxed{T = 6.00 \text{ ms}} \text{ para } W_F = 8 \text{ m/min}$$

A partir de estos dos últimos valores se construyen las zonas paramétricas que satisfacen el criterio de Burnoff.

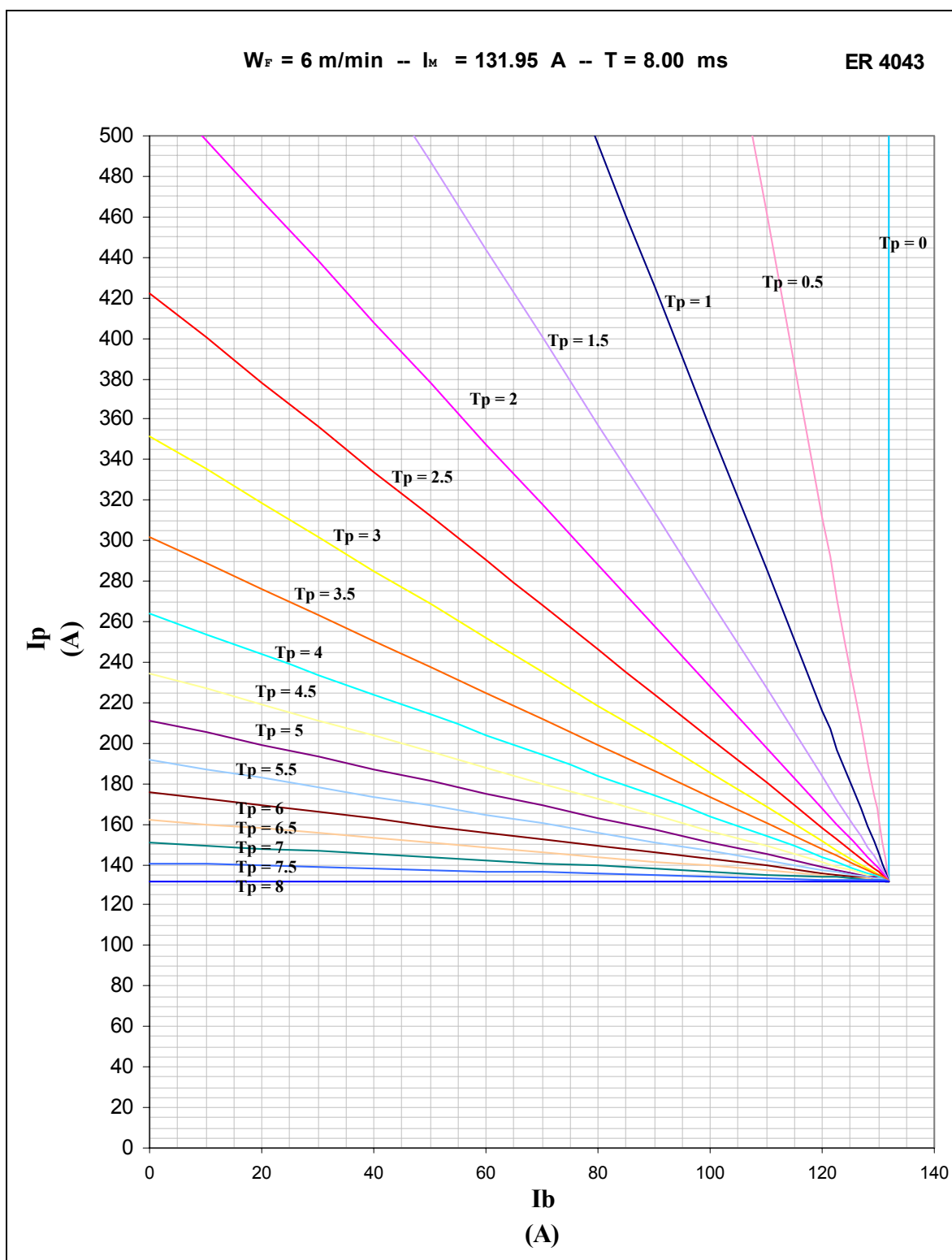


Figura 34. Zona Paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 4043

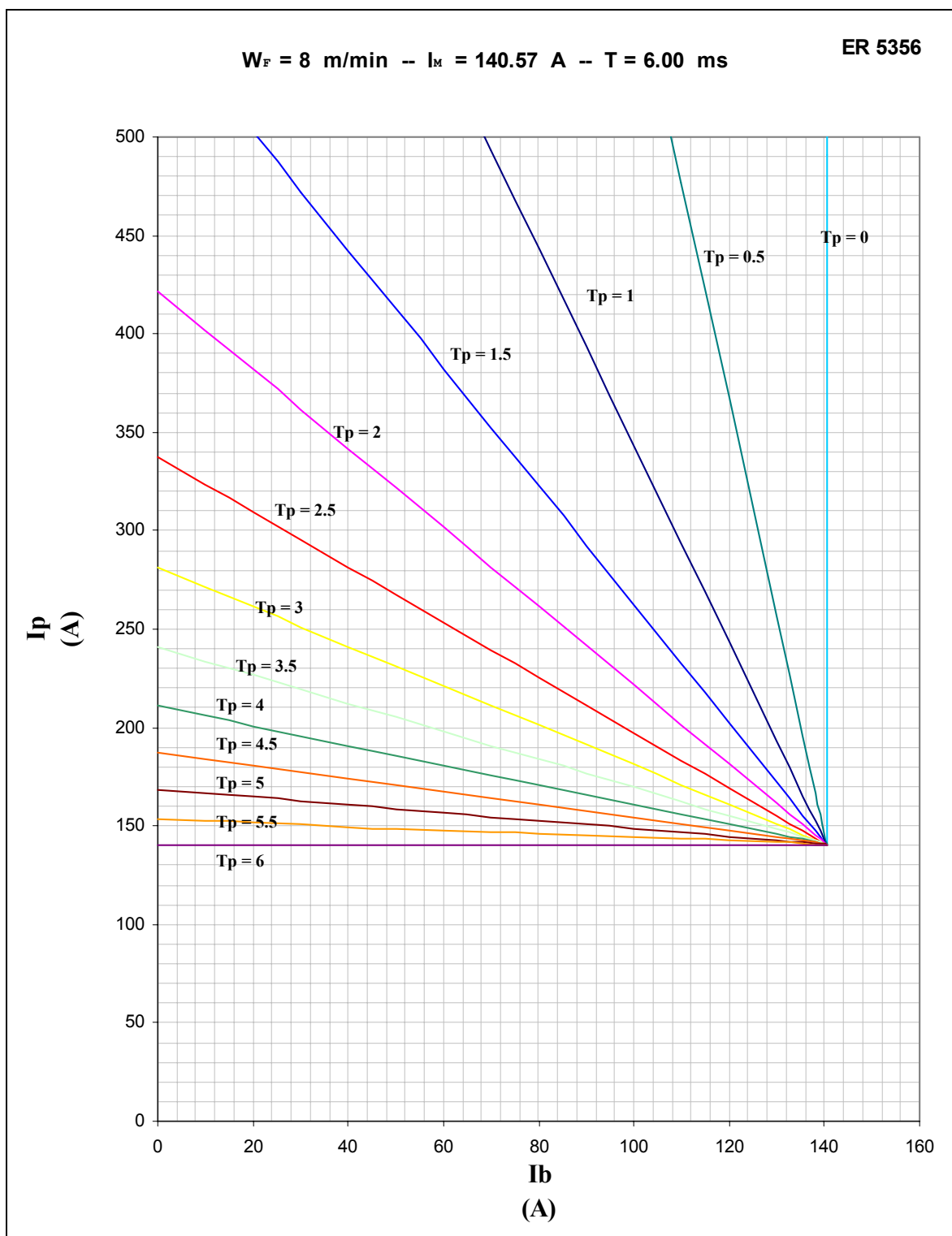


Figura 35. Zona Paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 5356

La figura 34 muestra la zona paramétrica del aporte ER 4043, determinada en base al criterio de Burnoff para una velocidad de alimentación de 6 m/min y un tiempo de ciclo de 8 ms. La zona representa la combinación mas adecuada de I_p , I_b y T_p para obtener un arco estable. Observe que el tiempo pico T_p se ha variado desde 0 hasta 8 ms. Los detalles de su construcción pueden encontrarse en el trabajo de Amin ^[22].

La zona paramétrica predicha por el criterio de Burnoff correspondiente al aporte ER 5356, se observa en la figura 35. Al igual que en la figura 34, los puntos sobre ella representan la combinación de parámetros de pulso que proporcionan un arco estable. Su construcción se ha basado en una velocidad de alimentación de 8 m/min y un tiempo de ciclo de 6 ms. Se puede apreciar que el tiempo pico se ha variado entre 0 y 6 ms, instante en el cual la corriente pico adquiere el valor de la corriente media.

3.2.2. CRITERIO DE TRANSFERENCIA METÁLICA

El criterio de transferencia metálica permite que se produzca transferencia en modo spray a cualquier velocidad de alimentación. Adicionalmente garantiza que al menos una gota sea desprendida en cada pulso, si la velocidad de alimentación permanece constante. Según el criterio, esto se logra mediante el ajuste de la energía pico $I_p T_p$, responsable del desprendimiento de la gota de metal fundido. Para poder encontrar la relación existente entre estos dos últimos parámetros deben fijarse las condiciones base I_b y T_b , por lo cual fue necesario llevar acabo una serie de ensayos utilizando combinaciones de parámetros dentro de la zona paramétrica predicha por el criterio de Burnoff; los parámetros base que proporcionaron mayor estabilidad de arco fueron seleccionados para establecer la relación entre I_p y T_p , ellos se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Condiciones base para obtener la relación I_p vs T_p

Material de aporte	I_b (A)	T_b (ms)
ER 4043	60	6
ER 5356	40	4

Con los parámetros reportados en la tabla 16, se procedió a establecer la relación entre la corriente y el tiempo pico para cada material de aporte, esto se llevó a cabo experimentalmente, mediante los ensayos que se indican en las tablas 17 y 18. Nótese que los valores presentados en ambas tablas producen una gota por pulso, esto es muy importante ya que como lo señala *Rajasekaran et al*^[17] en su trabajo, la relación es única para cada velocidad de alimentación y es dependiente del tipo de desprendimiento de gota.

Tabla 17. Relación I_p vs T_p para ER 4043. ($I_b = 60$ A, $T_b = 6$ ms)

Nº	I_p (A)	T_p (ms)	Gotas Por Pulso
S.9	345	2	1
S.10	290	2.5	1
S.11	345	2.2	1
S.12	315	2	1
S.13	317	2.3	1
S.14	320	1.7	1
S.15	440	1.5	1
S.16	350	1.6	1

Tabla 18. Relación I_p vs T_p para ER 5356. ($I_b = 40$ A, $T_b = 4$ ms)

Nº	I_p (A)	T_p (ms)	Gotas por Pulso
M.10	410	2.4	1
M.11	370	2.7	1
M.12	300	2.6	1
M.13	390	2.5	1
M.14	280	3	1

Para este estudio no se fijó el tiempo de ciclo T , ya que si esto ocurriera el valor de T_p también debería fijarse. La clasificación por tipo de desprendimiento de gota se hizo mediante el análisis de los oscilogramas registrados para cada ensayo, entre los cuales los más representativos fueron los siguientes:

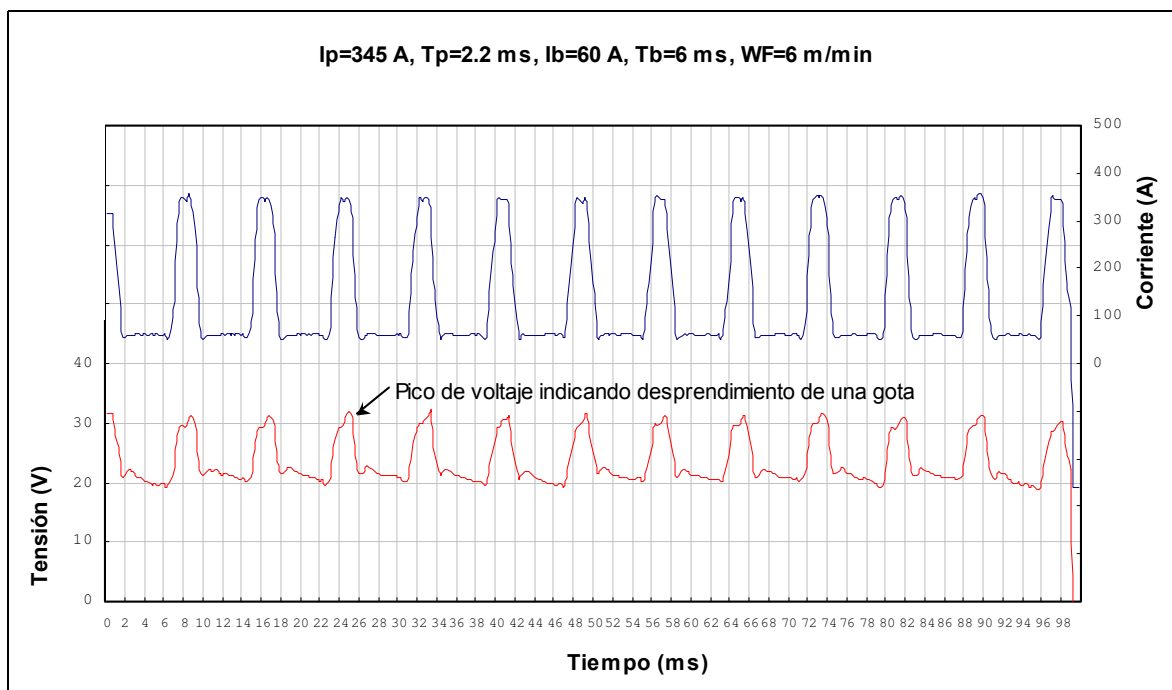


Figura 36. Oscilograma S.11 indicando una gota por pulso. ER 4043

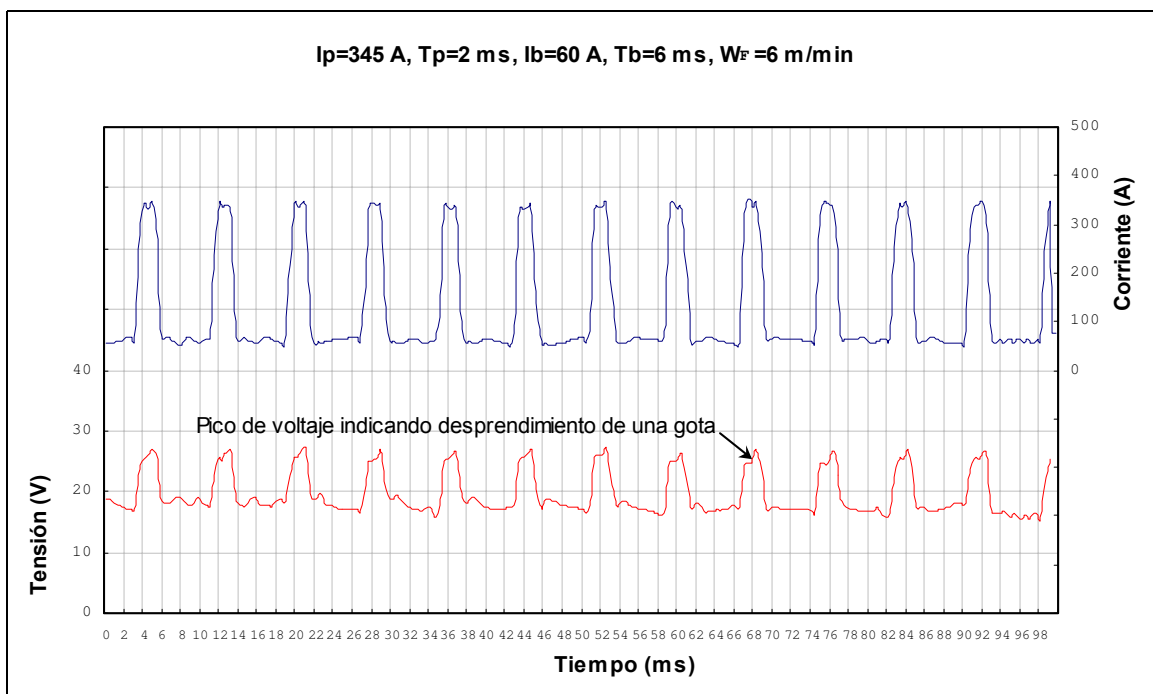


Figura 37. Oscilograma S.9 indicando una gota por pulso. ER 4043

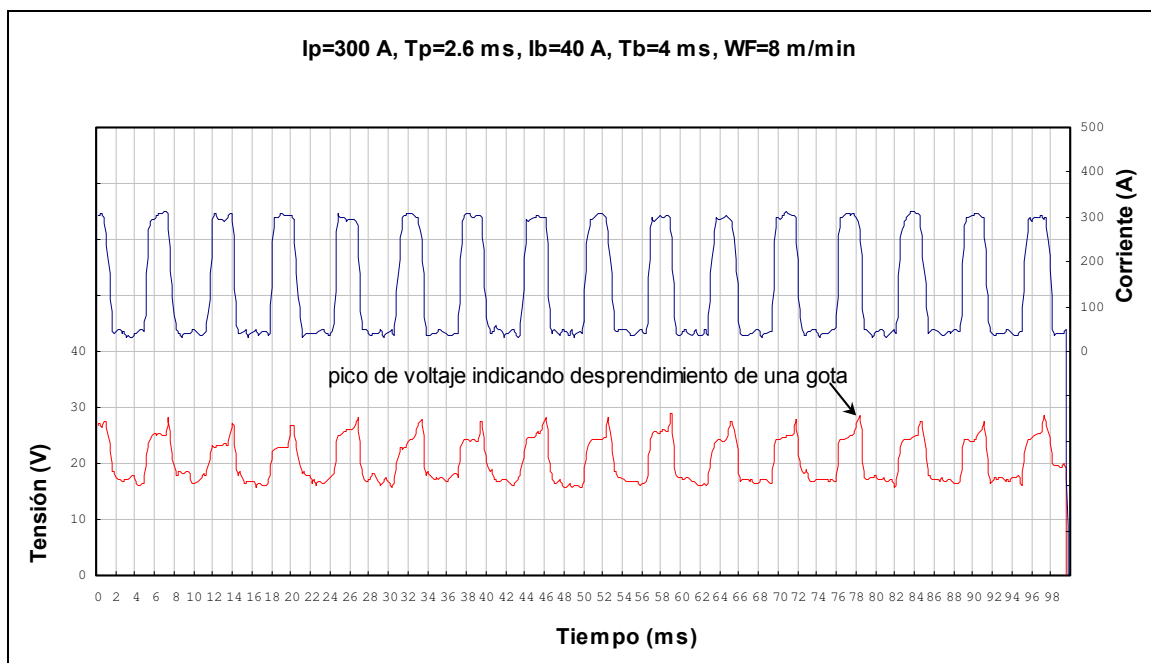


Figura 38. Oscilograma M.12 indicando una gota por pulso. ER 5356

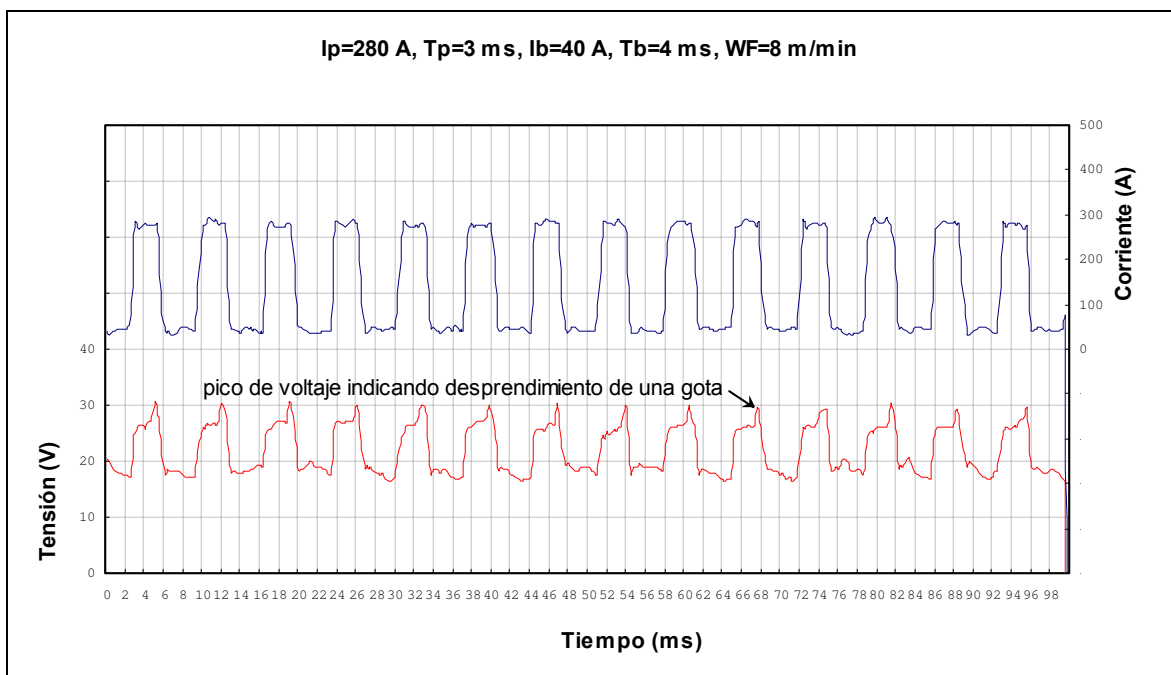


Figura 39. Oscilograma M.14 indicando una gota por pulso. ER 5356

Para finalmente definir la relación existente entre I_p y T_p , se procedió a graficar los valores de los parámetros indicados en las tablas 17 y 18. Esto se realizó en escala logarítmica de modo de obtener relaciones lineales. Aunque en este trabajo sólo se trabajó con desprendimientos de gota de una gota por pulso, *Amin*^[22] advierte que al graficar los parámetros se obtendrán rectas de similar pendiente. La figuras 40 y 41 muestran las rectas obtenidas para el aporte ER 4043 y el material ER 5356, las ecuaciones correspondientes son respectivamente:

$$y = -1.8578 \cdot x + 3.1732 \quad (20)$$

$$y = -1.5835 \cdot x + 3.2049 \quad (21)$$

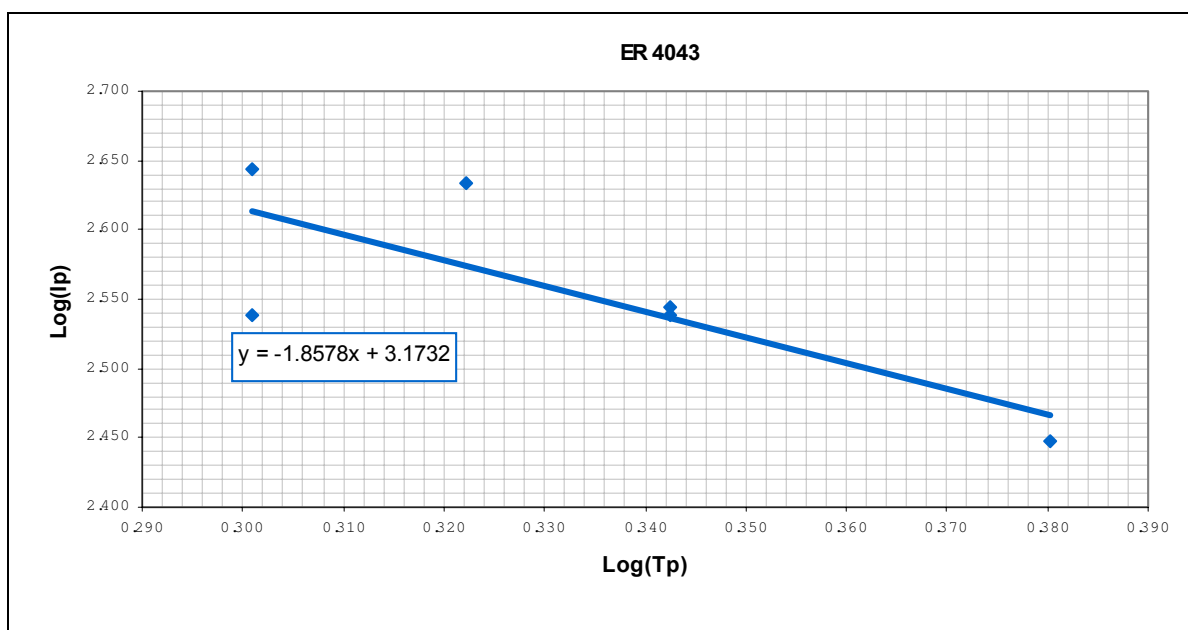


Figura 40. Relación I_p vs T_p para desprendimiento de una gota por pulso. ER 4043

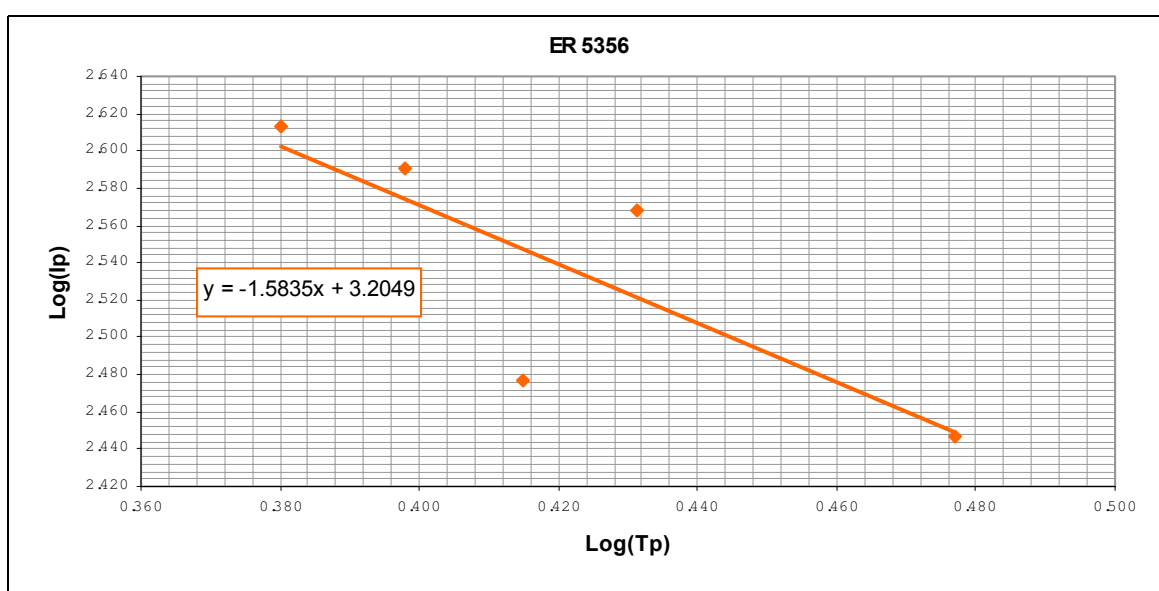


Figura 41. Relación I_p vs T_p para desprendimiento de una gota por pulso. ER 5356

A partir de las gráficas de las figuras 40 y 41 se obtiene una relación del tipo $T_p \propto I_p^{-m}$, en la cual m representa la pendiente de las rectas. *Trindade y Allurn*^[27] encontraron una pendiente de -2.0 para un alambre de $\varnothing 1.2$ mm de aluminio puro mientras que *Araya et al*^[28] hallaron una pendiente de -1.54 para un aporte de aleación 4043 de $\varnothing 1.6$ mm, esto demuestra que la pendiente depende de la composición química y diámetro del material de aporte. La tabla 19, expone los valores de las pendientes obtenidas para cada uno de los materiales de aporte.

Tabla 19. Pendientes de la relación I_p vs T_p

Material de aporte	Pendiente (m)
ER 4043	1.86
ER 5356	1.6

3.2.2.1. Determinación del Parámetro de Desprendimiento K_V

Este parámetro regula el número de gotas que se desprenden por pulso, siendo de interés en este trabajo el desprendimiento de una gota por pulso. El valor de K_V para cualquier requisito de volumen de gota, se determina experimentalmente realizando ensayos con corriente constante (I_{DC}) para distintas velocidades de alimentación por encima del punto de transición, en donde se espera que ocurra transferencia en modo spray. Para cada experimento, se fijó la velocidad de alimentación del alambre y se ajustó la tensión hasta lograr mantener la longitud de arco requerida. La tabla 20 reporta los valores obtenidos para velocidades de alimentación entre 5 y 6.5 m/min usando ER 4043.

Tabla 20. Parámetros de corriente constante para obtener el parámetro K_V . ER 4043.

Nº	W_F (m/min)	I_{DC} (A)	V (volts)
S.17	5	130	23
S.18	5.5	144	23
S.19	6	154	24
S.20	6.5	164	24

Análogamente, la tabla 21, presenta los valores de tensión necesarios para lograr estabilizar el arco a velocidades de alimentación entre 10 y 12 m/min usando aporte ER 5356.

Tabla 21. *Parámetros de corriente constante para obtener el parámetro K_V . ER 5356.*

Nº	W_F (m/min)	I_{DC} (A)	V (volts)
M.15	10	180	24
M.16	10.5	186	26
M.17	11	192	27
M.18	11.5	198	27
M.19	12	206	28

Los oscilogramas de los ensayos que se indican en las tablas 20 y 21, fueron registrados mediante el software Oscilos, con el fin de encontrar el tiempo de desprendimiento de gota (T_D). Este valor reporta el lapso de tiempo necesario para que una gota pueda transferirse al metal base para una determinada velocidad de alimentación del alambre. Con esto se pretende adecuar los fenómenos de desprendimiento de gota del proceso con corriente constante al proceso con corriente pulsada y permitir finalmente que una gota pueda desprenderse en cada pulso. El tiempo de desprendimiento de gota se determinó en base a la medición de los intervalos de tiempo entre sucesivas gotas en los oscilogramas de tensión. Aunque este intervalo varía durante todo el rango estudiado, su promedio puede ser tomado como constante, lo que permite la construcción de histogramas de frecuencia cuya moda es la mejor estimación de T_D y se conoce como tiempo modal de gota T_{MD} .

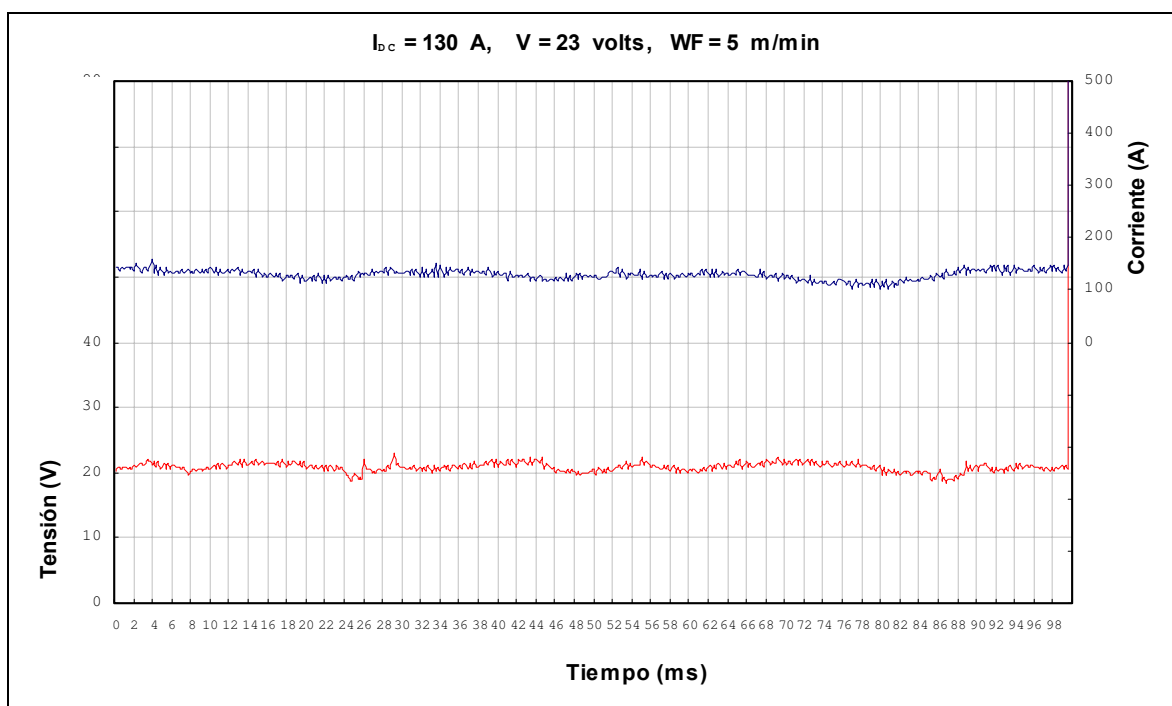


Figura 42. Oscilograma S.17. ER 4043

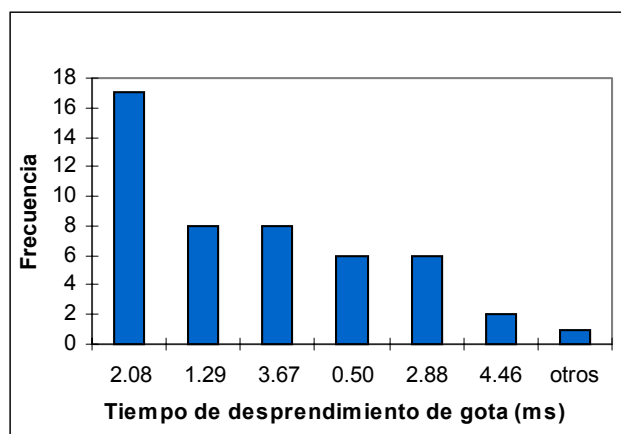


Figura 43. Histograma correspondiente al ensayo S.17 indicando un $T_{MD}=2.08 \text{ ms}$. ER 4043

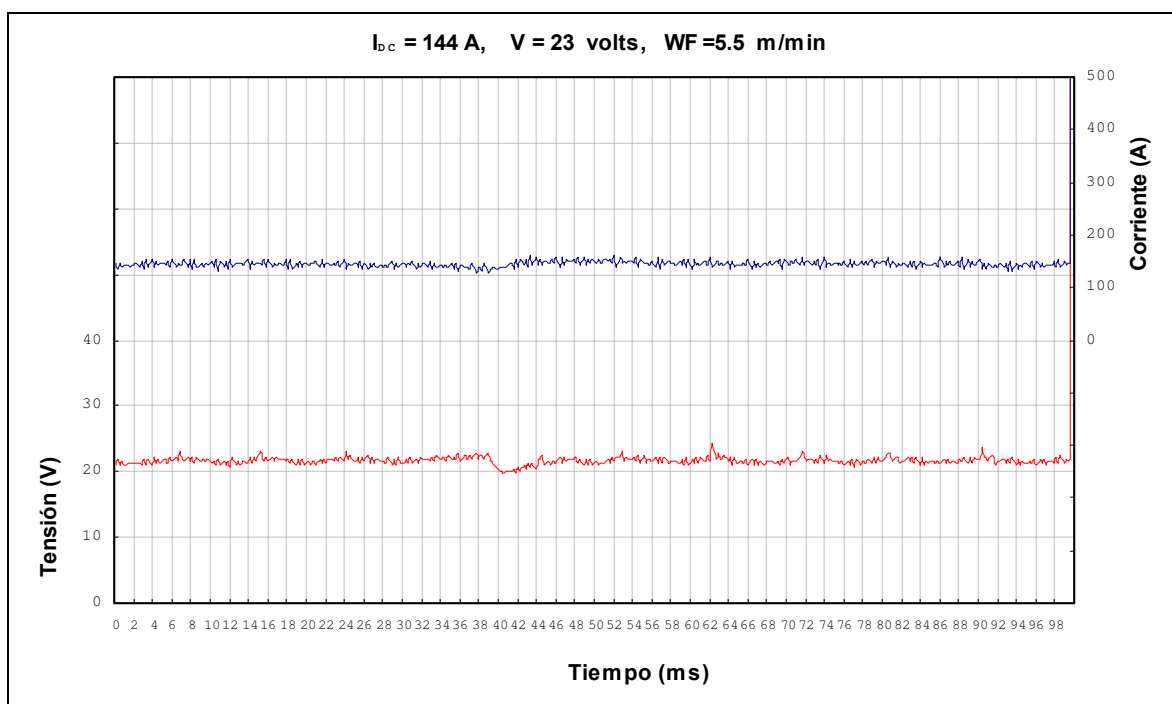


Figura 44. Oscilograma S.18. ER 4043

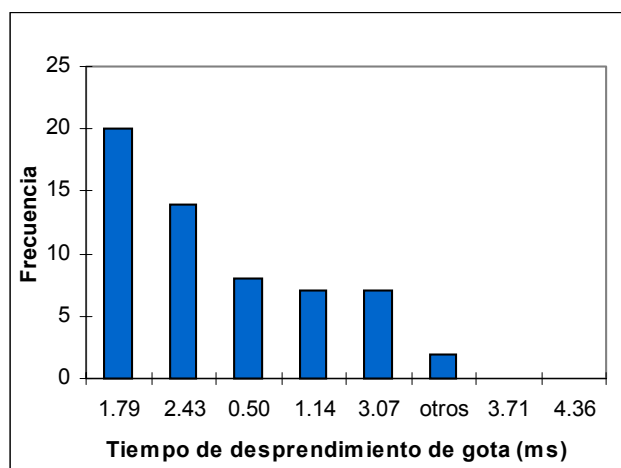


Figura 45. Histograma correspondiente al ensayo S.18 indicando un $T_{MD}=1.79 \text{ ms}$. ER 4043

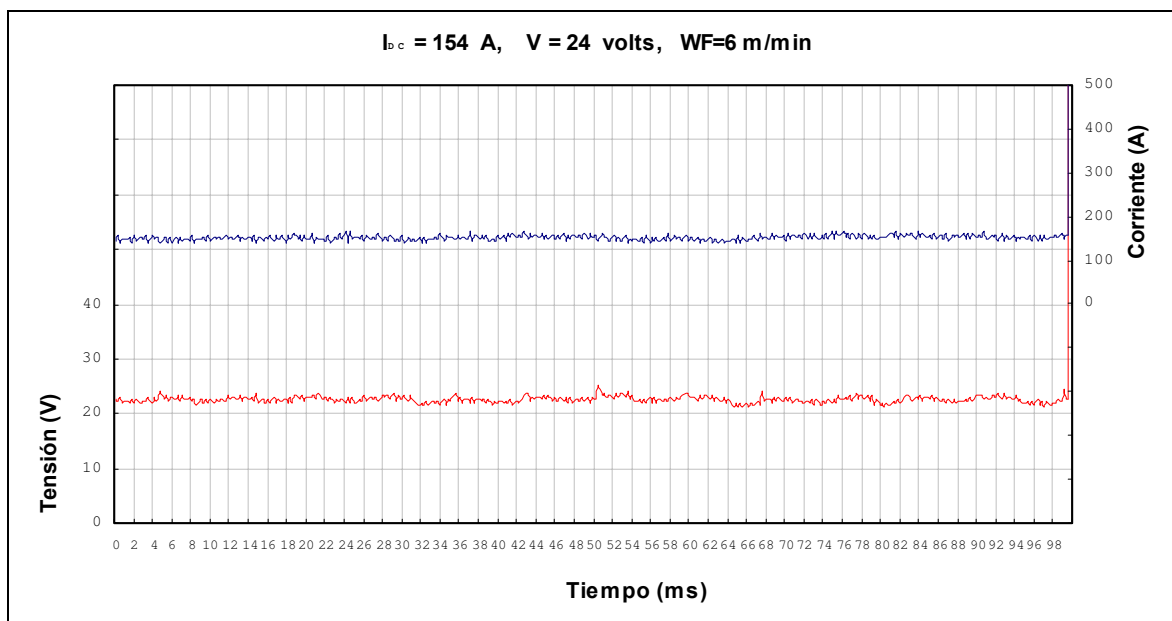


Figura 46. Oscilograma S.19. ER 4043

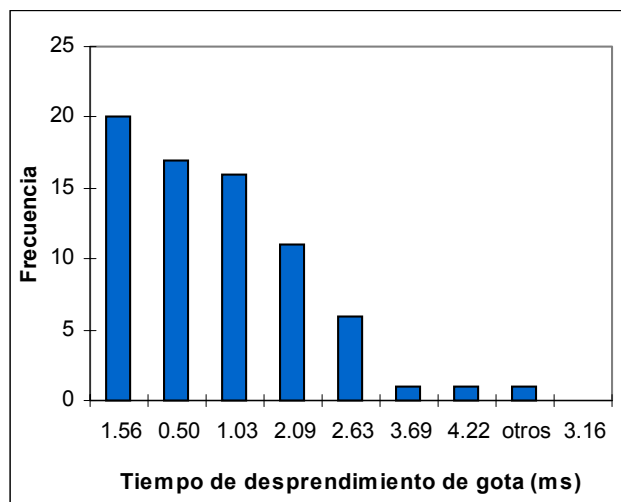


Figura 47. Histograma correspondiente al ensayo S.19 indicando un $T_{MD}=1.56 \text{ ms}$. ER 4043

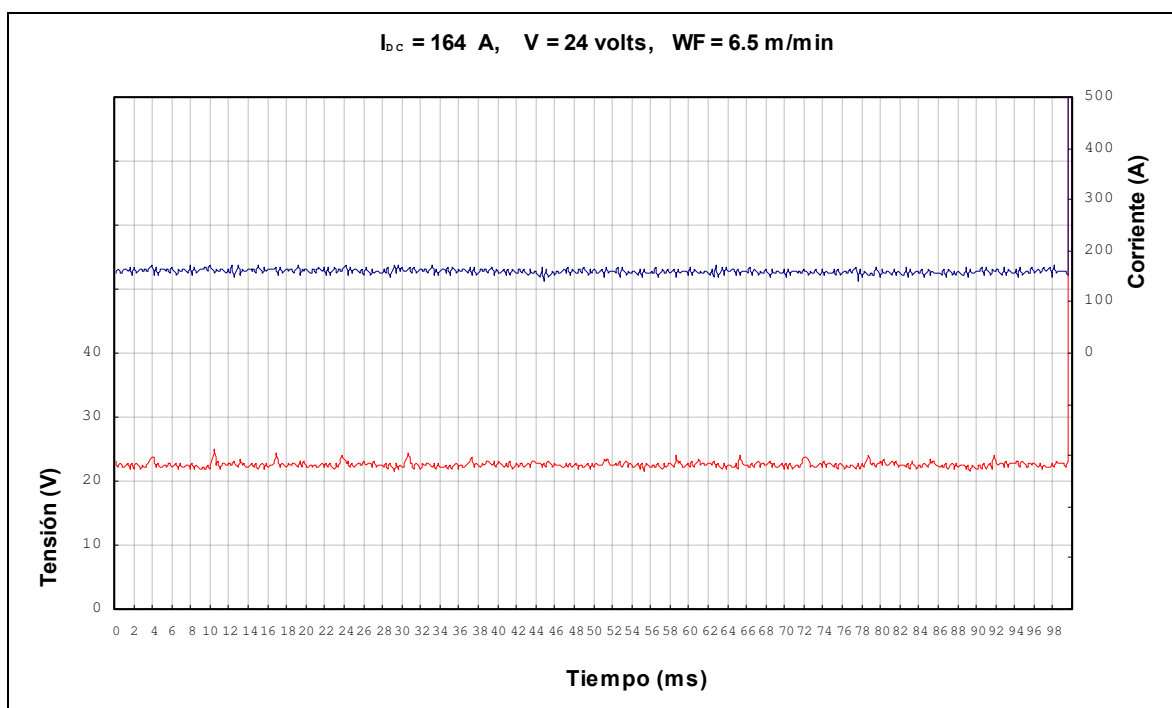


Figura 48. Oscilograma S.20. ER 4043

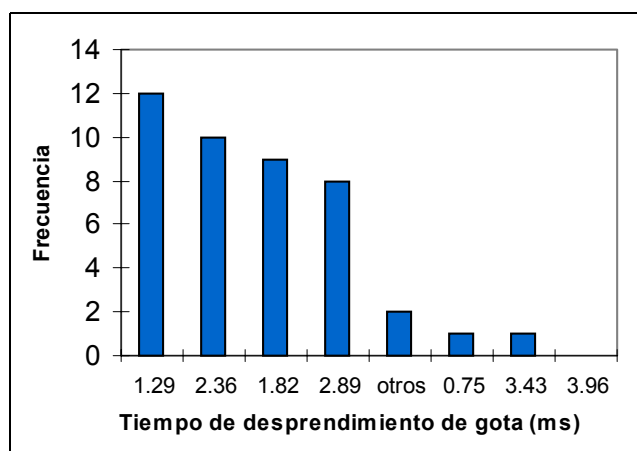


Figura 49. Histograma correspondiente al ensayo S.20 indicando un $T_{MD} = 1.29 \text{ ms}$. ER 4043

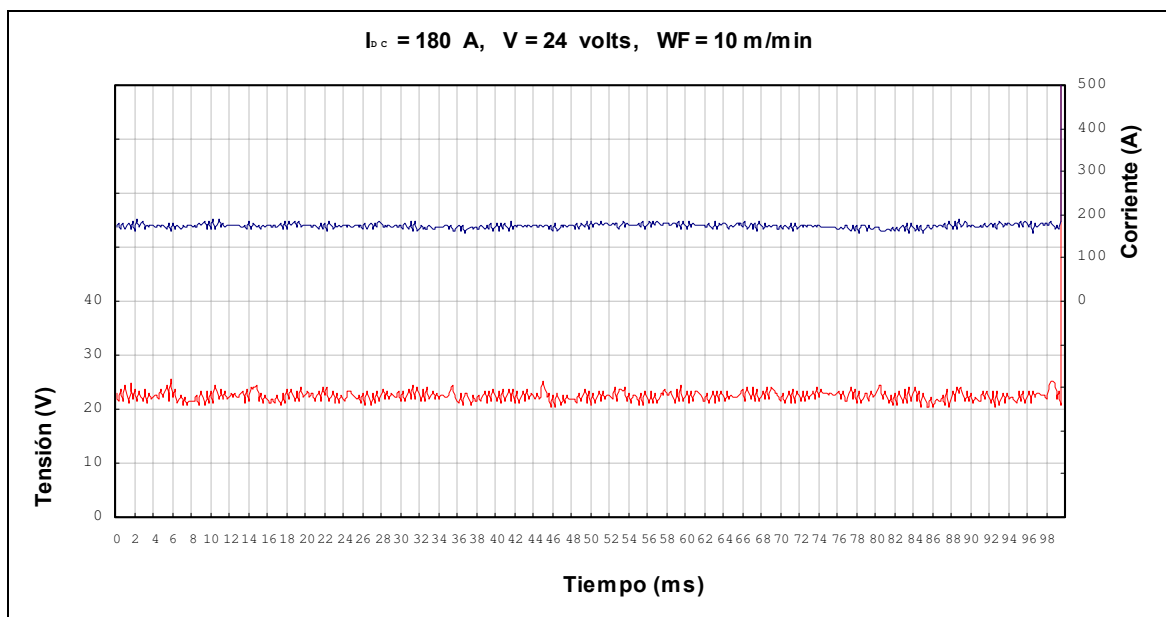


Figura 50. Oscilograma M.15. ER 5356

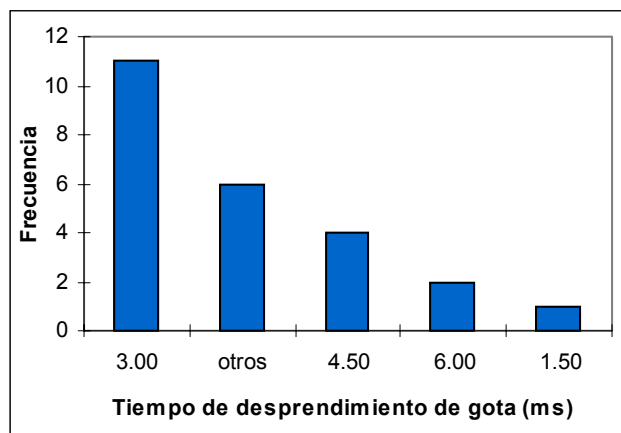


Figura 51. Histograma correspondiente al ensayo M.15 indicando un $T_{MD} = 3.00 \text{ ms}$. ER 5356

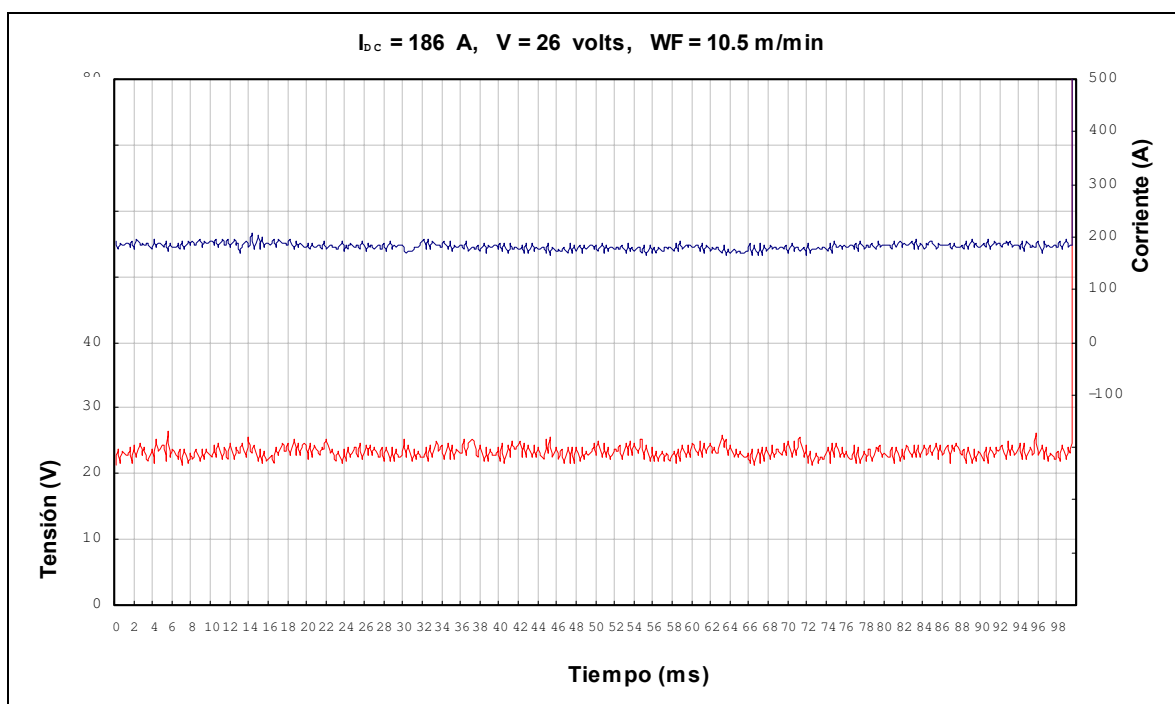


Figura 52. Oscilograma M.16. ER 5356

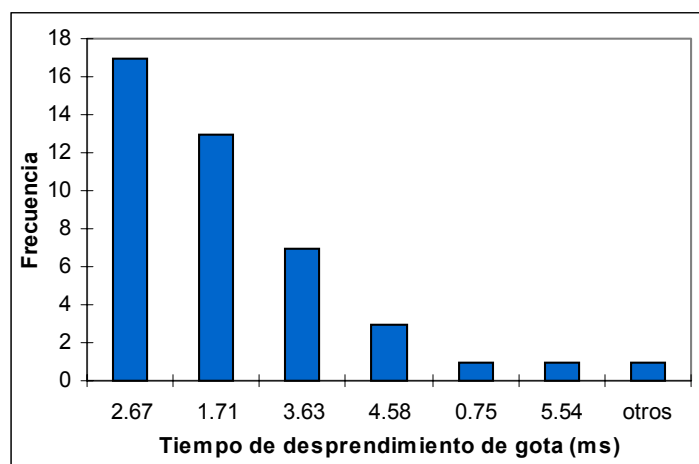


Figura 53. Histograma correspondiente a ensayo M.16 indicando un $T_{MD} = 2.6667 \text{ ms}$. ER 5356

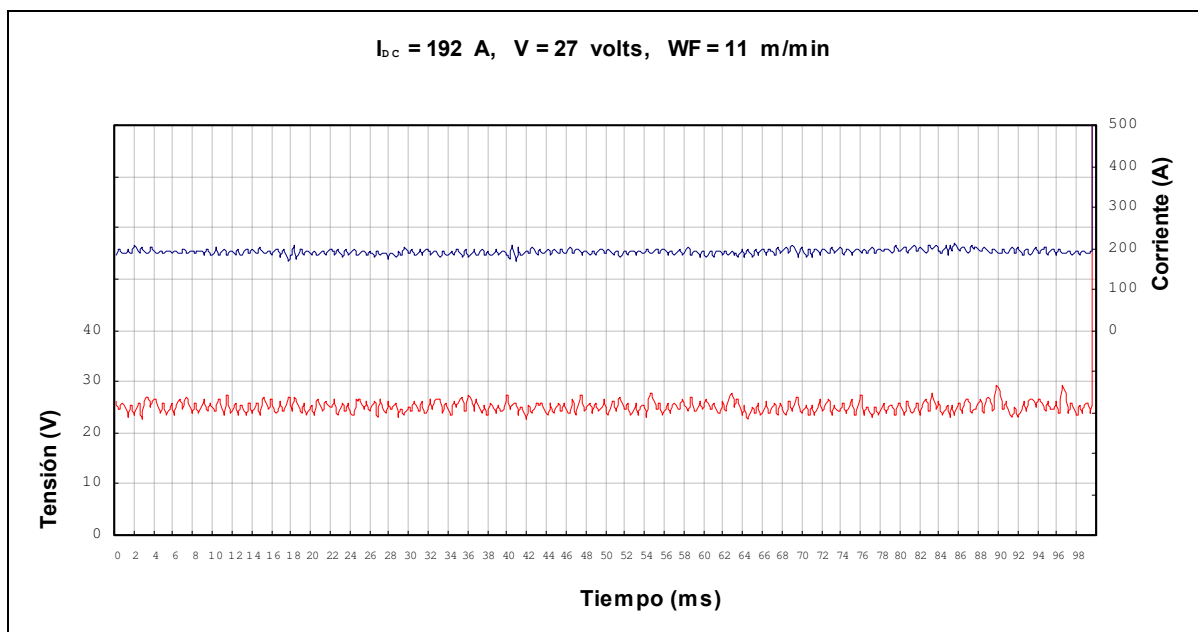


Figura 54. Oscilograma M.17. ER 5356

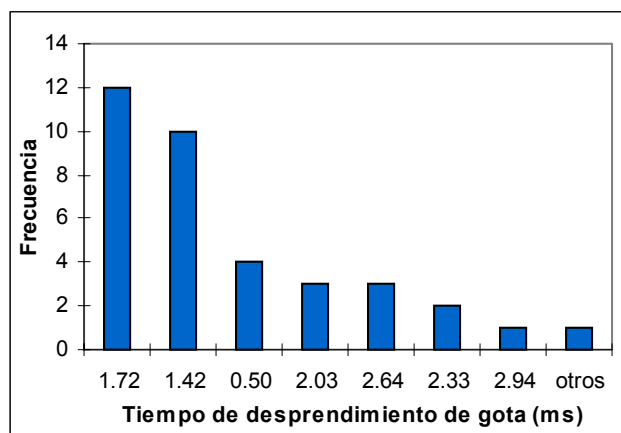


Figura 55. Histograma correspondiente a ensayo M.17 indicando un $T_{MD} = 1.72 \text{ ms}$. ER 5356

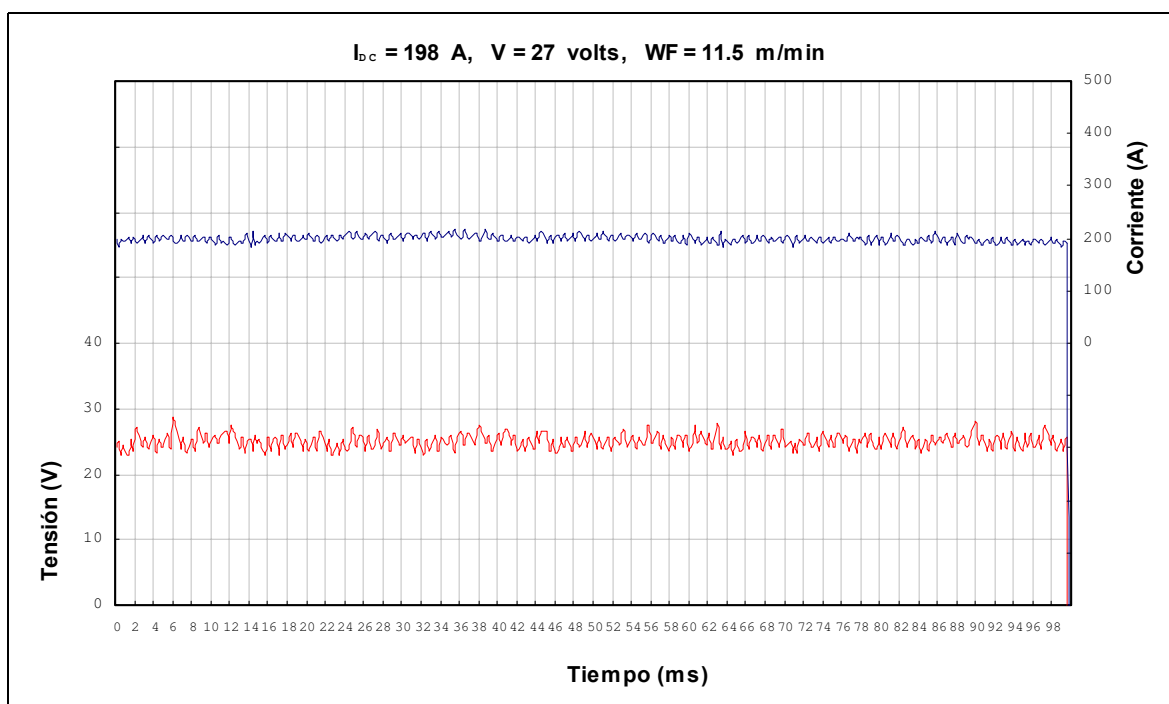


Figura 56. Oscilograma M.18. ER 5356

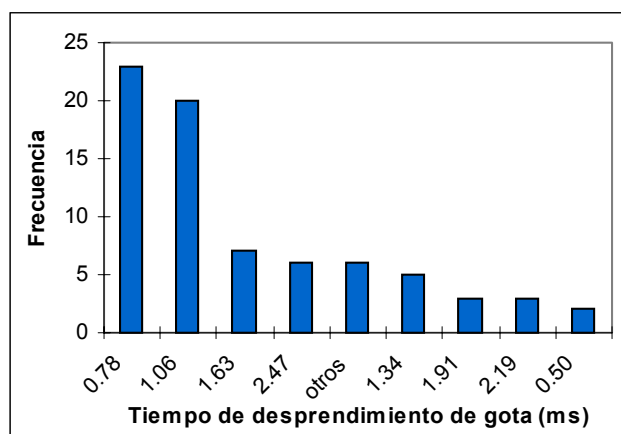


Figura 57. Histograma correspondiente al ensayo M.18 indicando un $T_{MD} = 0.78 \text{ ms}$. ER 5356

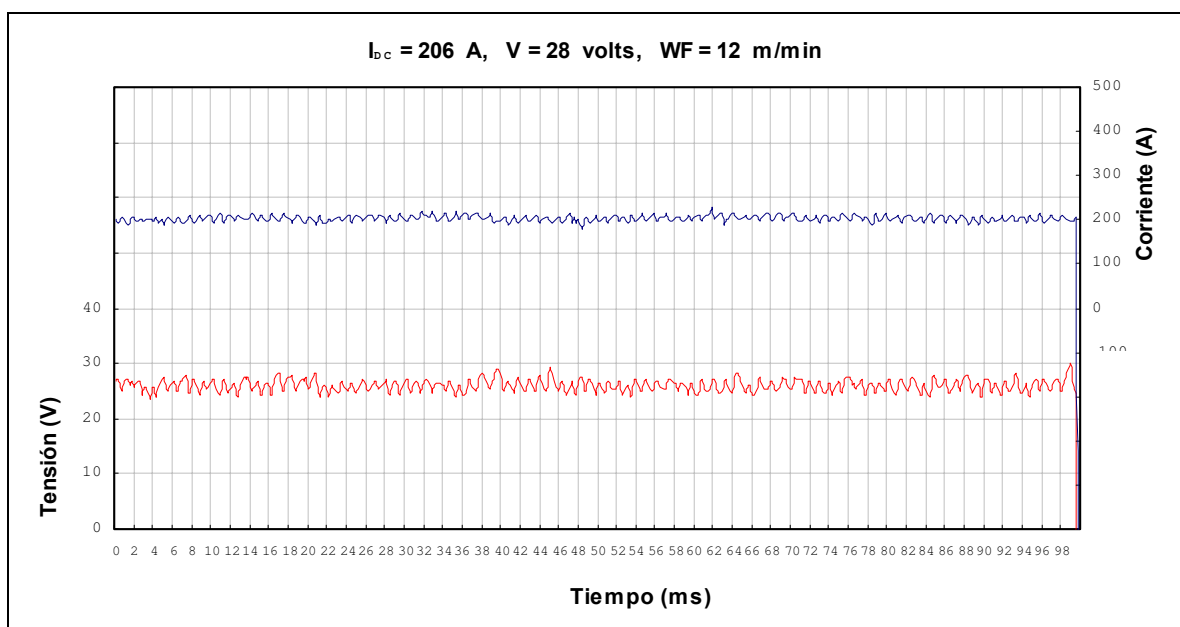


Figura 58. Oscilograma M.19. ER 5356

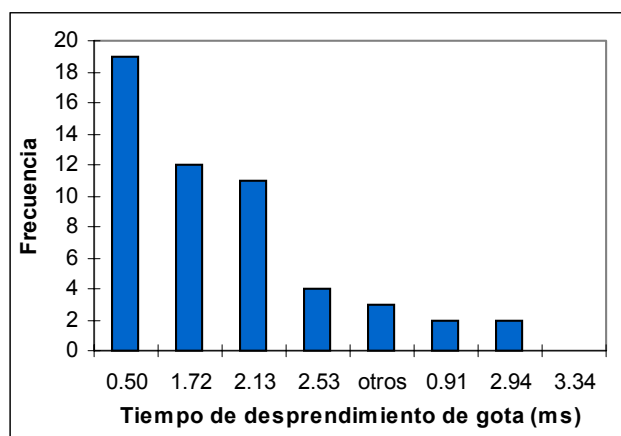


Figura 59. Histograma correspondiente al ensayo M.19 indicando un $T_{MD} = 0.50 \text{ ms}$. ER 5356

Con los datos del tiempo modal de gota T_{MD} y de la velocidad de alimentación W_F se calcula el volumen modal de gota V_{MD} mediante la ecuación 13. Las tablas 22 y 23 reportan los resultados obtenidos al evaluar esta ecuación para cada uno de los ensayos y materiales de aporte. Observe que a medida que se incrementa la velocidad de alimentación tanto T_{MD} como V_{MD} disminuyen.

Tabla 22. Tiempo modal de gota y volumen modal de gota. ER 4043.

Nº	W_F (m/min)	T_{MD} (ms)	V_{MD} (mm ³)
S.17	5	2.08	0.79
S.18	5.5	1.79	0.74
S.19	6	1.56	0.71
S.20	6.5	1.29	0.63

Tabla 23. Tiempo modal de gota y volumen modal de gota. ER 5356.

Nº	W_F (m/min)	T_{MD} (ms)	V_{MD} (mm ³)
M.15	10	3.00	0.57
M.16	10.5	2.67	0.53
M.17	11	1.72	0.36
M.18	11.5	0.78	0.17
M.19	12	0.50	0.11

Para poder observar mejor el comportamiento del tiempo y el volumen modal gota en función de la variación de la velocidad o corriente, se construyeron las gráficas I_{DC} vs. V_{MD} y T_{MD} vs. V_{MD} , a partir de las cuales puede obtenerse los valores de corriente I_{DC} y tiempo modal de gota T_{MD} , para cualquier requisito de volumen de gota. Esto quiere decir que podremos obtener valores de K_V para el volumen de gota que se desee.

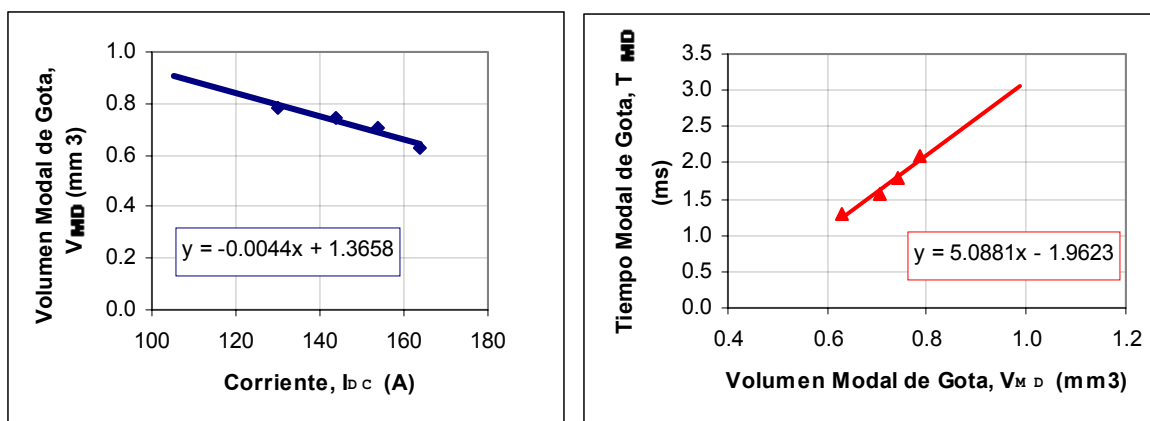


Figura 60 y 61. Relación entre volumen modal de gota y corriente continua (izquierda). Relación entre tiempo modal de gota y corriente continua (derecha).ER 4043

Las figuras 60 y 61 muestran la relación entre el volumen modal de gota y la corriente I_{DC} y entre esta y el tiempo modal de gota, para el aporte ER 4043. Se puede apreciar que a medida que aumentamos la corriente (producto de una mayor velocidad de alimentación), el volumen modal de gota disminuye. Esto ocurre debido a que una mayor cantidad de calor es concentrada en una misma área (sección transversal del alambre) y aunque la cantidad de material suministrado por unidad de tiempo también aumente, la energía neta es cada vez mayor por lo que las gotas de metal fundido son mas pequeñas.

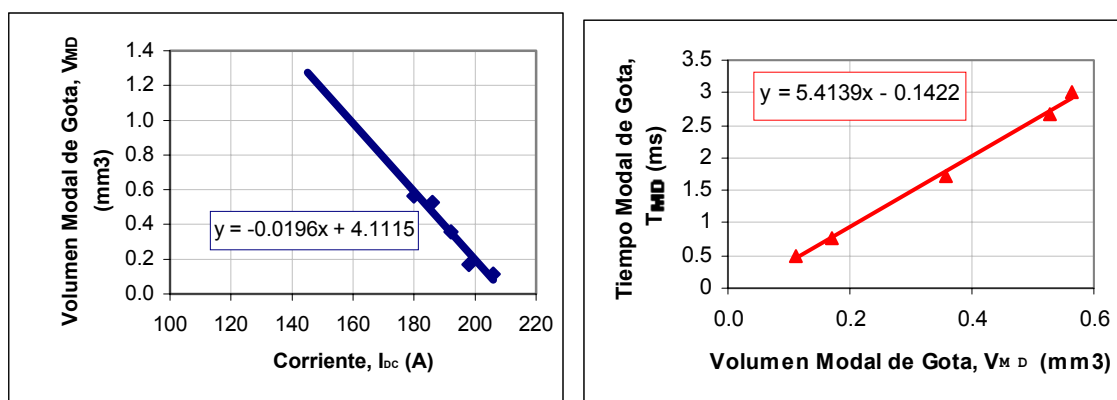


Figura 62 y 63. Relación entre volumen modal de gota y corriente continua (izquierda). Relación entre tiempo modal de gota y corriente continua (derecha).ER 5356

El comportamiento es análogo para ambos materiales de aporte, aunque se puede observar en la figura 62 (izquierda), que para el caso del alambre de aleación Al-Mg, el decrecimiento del volumen modal de gota es mucho mayor que con el aporte a base de silicio. En cuanto a la relación T_{MD} vs. V_{MD} , al comparar las figuras 61 y 63 (derecha), se observa un comportamiento muy similar en el que el volumen de gota aumenta con el incremento del tiempo, claro está que durante la formación de la gota en la punta del electrodo esta tendrá un mayor tamaño conforme mas tiempo transcurra recibiendo corriente para fundirse.

Como se ha mencionado anteriormente, los parámetros de pulso a seleccionar deben proporcionar el tiempo y la corriente suficiente para permitir la formación de una gota de diámetro igual al del electrodo ($V_{MD} = 0.905 \text{ mm}^3$). Estos valores se extraen de las figuras 60, 61, 62 y 63 y se reportan en la tabla 24.

Tabla 24. Valores I_{DC} y T_{MD} para $V_{MD} = 0.905 \text{ mm}^3$

Material de aporte	I_{DC} (A)	T_{MD} (ms)
ER 4043	104.727	2.642
ER 5356	163.597	4.757

Con los datos de las tablas 19 y 24 se procedió a evaluar el parámetro de desprendimiento K_V sustituyendo los valores en la ecuación 14, con el cual queda definida la curva paramétrica de desprendimiento, dada por las siguientes funciones:

$$\text{ER 4043} \quad I_p^{1.86} \cdot T_p = 14.9 \quad [A^{1.86} \cdot s] \quad (22)$$

$$\text{ER 5356} \quad I_p^{1.6} \cdot T_p = 16.67 \quad [A^{1.6} \cdot s] \quad (23)$$

3.2.3. CRITERIO DE ESTABILIDAD DEL ARCO

Este es el último criterio necesario para delimitar la zona paramétrica y se basa en el principio del arco pulsado. Durante un ciclo de pulso la participación de las corrientes base y pico debe ser alterna, aunque la gota sólo se transfiere durante la fase pico, la corriente base es necesaria para mantener el arco encendido y permitir la transferencia en el siguiente pulso. Por lo tanto es necesario encontrar un valor mínimo de corriente base que pueda cumplir con este propósito. Para ello se realizaron ensayos con distintas combinaciones de parámetros ubicados dentro de las zonas paramétricas y con el proceso en marcha se procedió a disminuir progresivamente el valor de la corriente base hasta observar la extinción del arco. Los valores encontrados para satisfacer este criterio, se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Valores mínimos de corriente base

Material de aporte	I _b mín. (A)
ER 4043	25
ER 5356	25

Por lo cual para ambos alambre se cumple que

$$I_b \geq 25 \quad [A] \quad (24)$$

El valor de corriente de la ecuación anterior excede a propósito en cierto número a la corriente mínima necesaria para mantener el arco encendido, la cual osciló entre los 12 y 17 A para ambos casos. Al bajar progresivamente la corriente base, se observó que a partir de cierto punto el arco comienza a tornarse excesivamente inestable, provocando gran cantidad de salpicaduras y un cordón con notable falta de fusión, hasta que finalmente el arco no consigue la suficiente corriente para mantenerse encendido y se extingue. Por tal motivo, la zona paramétrica final debe comprender los parámetros de pulso que permitan un arco estable por lo que no se debe limitar justo con el valor de extinción del arco.

3.2.4. CONSTRUCCIÓN DE LA ZONA PARAMÉTRICA

La construcción de la zona paramétrica se realiza al superponer las curva paramétrica de desprendimiento junto con el límite de corriente base sobre la zona paramétrica preliminar predicha por el criterio de Burnoff. Los puntos que se encuentran dentro de esta zona producen arcos eléctricos estables así como una transferencia metálica constante. Esto quiere decir que para una determinada combinación de parámetros el numero de gotas que se desprende en cada pulso será constante.

Las figuras 64 y 65 muestran las zonas paramétricas obtenidas para cada uno de los materiales de aporte, el área útil es la que se muestra rayada en rojo. Como se puede observar, esta área es bastante extensa, y a pesar de que los puntos dentro de ella, satisfacen simultáneamente los criterios de Burnoff, transferencia metálica y estabilidad del arco, no garantizan la combinación de parámetros de pulso más adecuada para obtener depósitos con buenas características superficiales, penetración, etc.

Al comparar las figuras 64 y 65, se puede apreciar una pronunciada diferencia entre las curvas paramétricas de desprendimiento obtenidas para cada material de aporte. La curva paramétrica de separación correspondiente al alambre ER 4043, está definida por la ecuación 22 mientras que la curva obtenida para el alambre de base magnesio esta dada por la ecuación 23. La diferencia mas apreciable entre ellas es precisamente su forma, mientras que la primera (figura 64) crece hacia la izquierda, la segunda (figura 65) lo hace hacia la derecha, haciendo que la zona paramétrica resultante sea de menor área. Esto se debe simplemente a los valores que toman la pendiente m y el parámetro K_v en la ecuación 12.

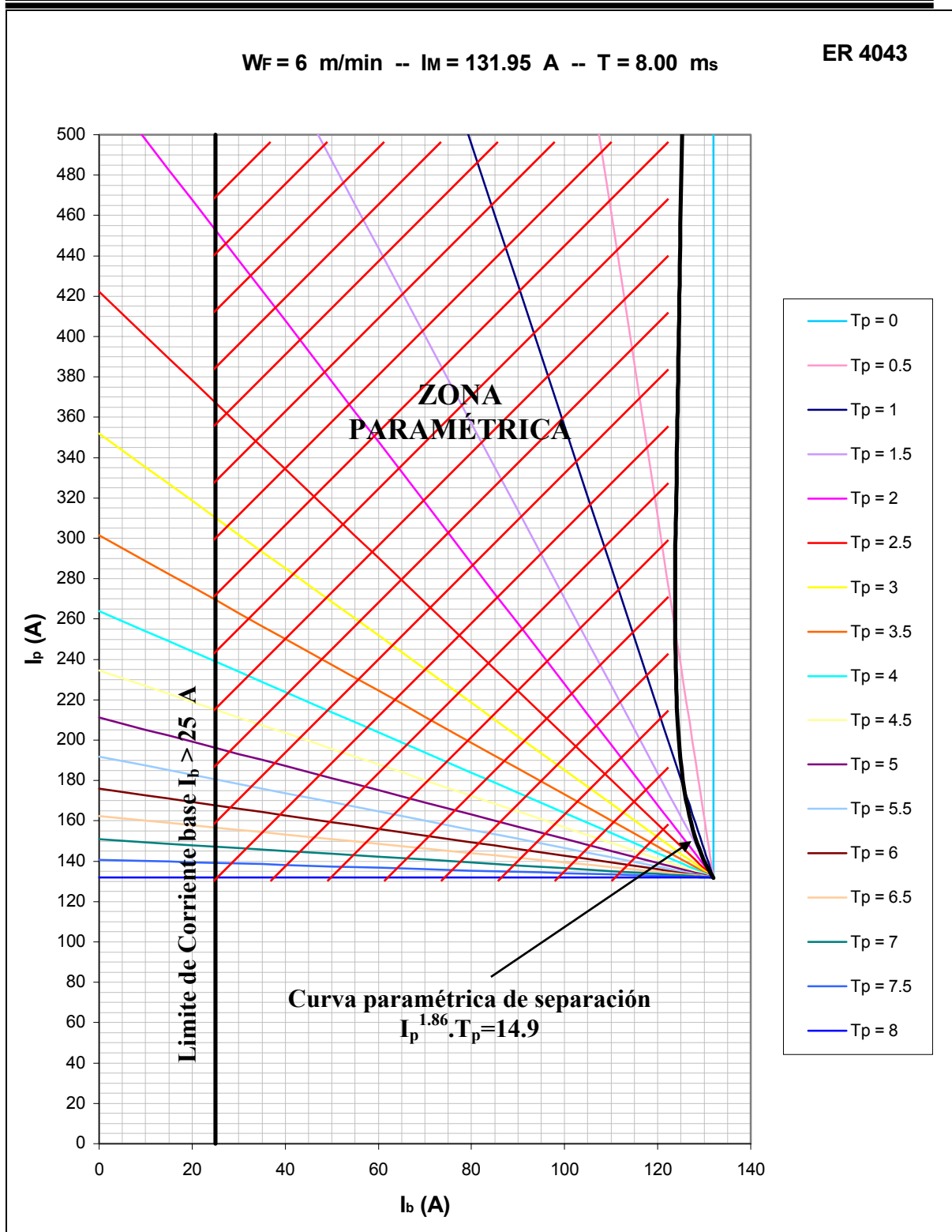


Figura 64. Limite de corriente base junto con curva paramétrica de separación superpuestas sobre la zona paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 4043.

Tabla 26. *Parámetros de pulso para afinar la zona paramétrica. ER 4043*

Probeta N°	I_p (A)	I_b (A)	T_p (ms)	T_b (ms)	Condición de arco
S.21	360	43	2.2	5.8	Estable
S.22	364	55	2.0	6	Estable
S.23	395	58	1.8	6.2	Estable
S.24	422	55	1.7	6.3	Estable
S.25	347	60	2.0	6	Estable
S.26	360	90	1.2	6.8	Estable
S.27	380	97	1.0	7	Estable
S.28	410	45	1.9	6.1	Estable
S.29	310	45	2.6	5.4	Estable
S.30	320	63	2.1	5.9	Estable
S.31	385	50	2.0	6	Estable
S.32	302	30	3.0	5	Alto consumo
S.33	300	55	2.5	5.5	Alto consumo
S.34	320	70	2.0	6	Alto consumo
S.35	400	83	1.2	6.8	Inestable
S.36	360	82	1.4	6.6	Inestable
S.37	400	50	1.9	6.1	Inestable
S.38	380	63	1.7	6.3	Inestable
S.39	340	62	2.0	6	Inestable
S.40	400	70	1.5	6.5	Inestable
S.41	425	90	1.0	7	Inestable
S.42	340	37	2.5	5.5	Inestable

Como se mencionó anteriormente las zonas paramétricas de las figuras 64 y 65, satisfacen los tres criterios fundamentales, pero ello no garantiza que las soldaduras obtenidas con esas combinaciones de parámetros de pulso produzcan depósitos con buenas características geométricas. Para resolver este problema fue necesario efectuar ensayos adicionales, cuyos parámetros se reportan en las tablas 26 y 27.

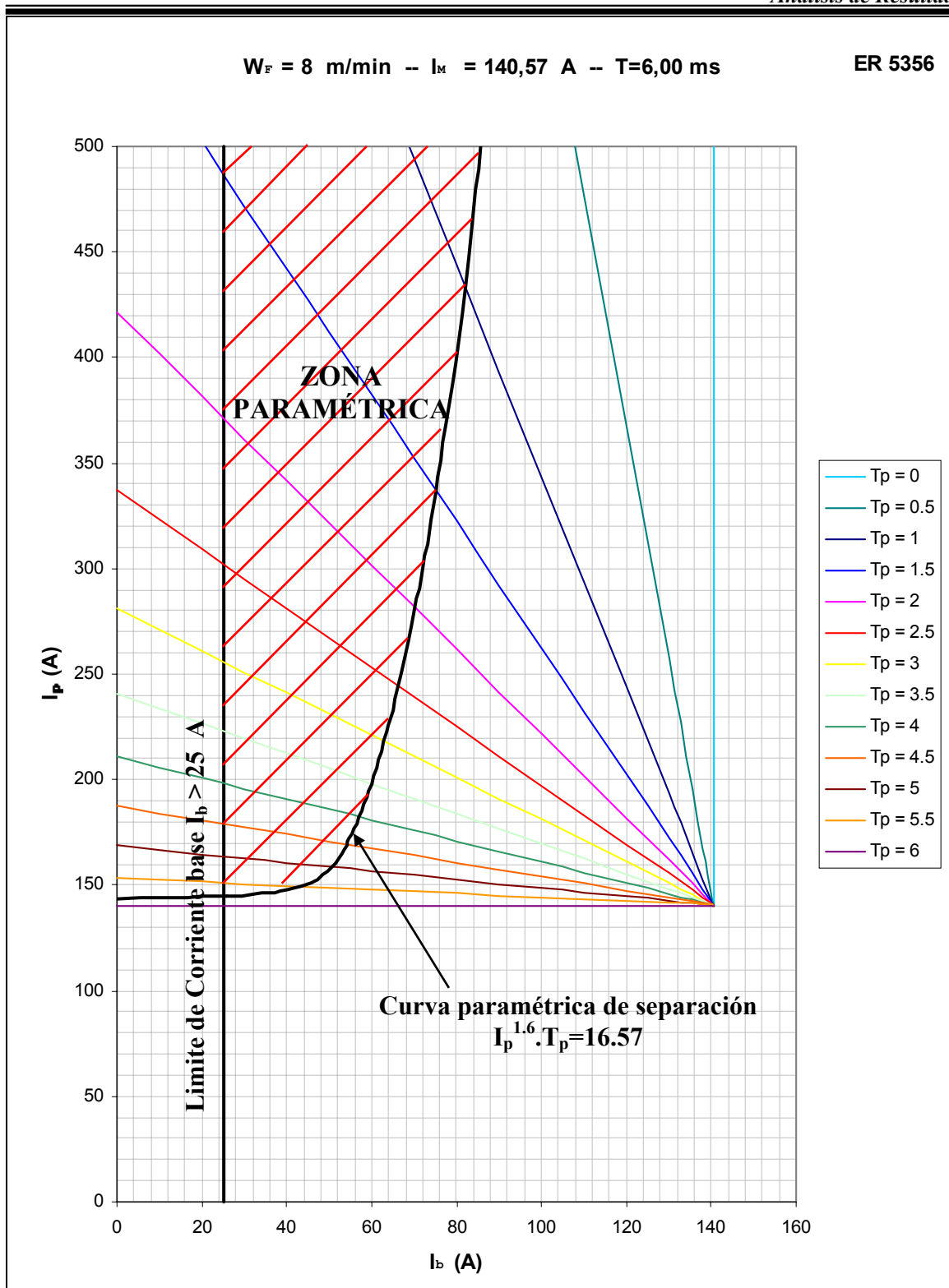


Figura 65. Límite de corriente base junto con curva paramétrica de desprendimiento superpuestas sobre la zona paramétrica predicha por el Criterio de Burnoff. ER 5356.

Como puede observarse, los ensayos de las tablas 26 y 27 han sido clasificados según la condición de estabilidad de arco eléctrico, se reportan también bajo el nombre de “Alto Consumo”, los parámetros que produjeron una tasa de fusión tan alta que la velocidad de alimentación no fue suficiente para balancearla. Esta condición se conoce en inglés con el término “Burnback” o Meltback” (ensayos S.32 a S.34, tabla 26). Así mismo la tabla 27 presenta los parámetros de los ensayos que por el contrario no produjeron arco, estos se clasificaron bajo la denominación de “No enciende”, ensayos M.27 a M.30.

Tabla 27. Parámetros de pulso para afinar la zona paramétrica. ER 5356

Probeta N°	I_p (A)	I_b (A)	T_p (ms)	T_b (ms)	Condición de arco
M.20	325	30	2.2	3.8	Estable
M.21	330	46	2.0	4	Estable
M.22	300	53	2.1	3.9	Estable
M.23	287	54	2.2	3.8	Estable
M.24	270	46	2.5	3.5	Estable
M.25	312	40	2.2	3.8	Estable
M.26	275	34	2.7	3.3	Estable
M.27	200	24	4.0	2	No enciende
M.28	172	44	4.5	1.5	No enciende
M.29	250	36	2.9	3.1	No enciende
M.30	250	64	2.5	3.5	No enciende
M.31	450	37	1.5	4.5	Inestable
M.32	450	60	1.2	4.8	Inestable
M.33	450	78	1.0	5	Inestable
M.34	400	36	1.7	4.3	Inestable
M.35	400	54	1.5	4.5	Inestable
M.36	400	73	1.2	4.8	Inestable
M.37	375	62	1.5	4.5	Inestable
M.38	350	72	1.5	4.5	Inestable
M.39	350	36	2.0	4	Inestable
M.40	300	24	2.5	3.5	Inestable
M.41	317	52	2.0	4	Inestable
M.42	302	60	2.0	4	Inestable

Los valores de los parámetros reportados en las tablas 26 y 27 se graficaron sobre las figuras 64 y 65. Aquellos puntos que se comportaron establemente y produjeron cordones que por simple inspección visual presentaban las mejores características superficiales se unieron entre sí para definir los límites de un área denominada zona paramétrica estable.

La figura 66 expone la zona paramétrica estable correspondiente al aporte ER 4043. Los puntos ubicados dentro de ella representan la combinación de parámetros de pulso mas adecuada para producir cordones con buenas características geométricas. Observe que el área se encuentra entre las líneas radiales de $T_p = 1.5$ ms y $T_p = 2.5$ ms, esto indica que las mejores condiciones se obtienen cuando los tiempos pico son menores que los base, específicamente cuando el tiempo base es de dos a cinco veces el tiempo pico.

En cuanto a la figura 67, la zona paramétrica estable presentada corresponde al aporte ER 5356, se encuentra ubicada entre $T_p = 2.0$ ms y $T_p = 3.0$ ms aproximadamente, lo cual indica que las mejores condiciones se obtienen, al igual que con el aporte ER 4043, para $T_b > T_p$, específicamente cuando el tiempo base es igual o el doble que el tiempo pico.

En ambas zonas paramétricas estables se observa que al alejarnos por encima de ella se encuentran puntos de comportamiento inestable, mientras que por debajo el comportamiento del arco es crítico, es decir, no enciende o consume demasiado material de aporte.

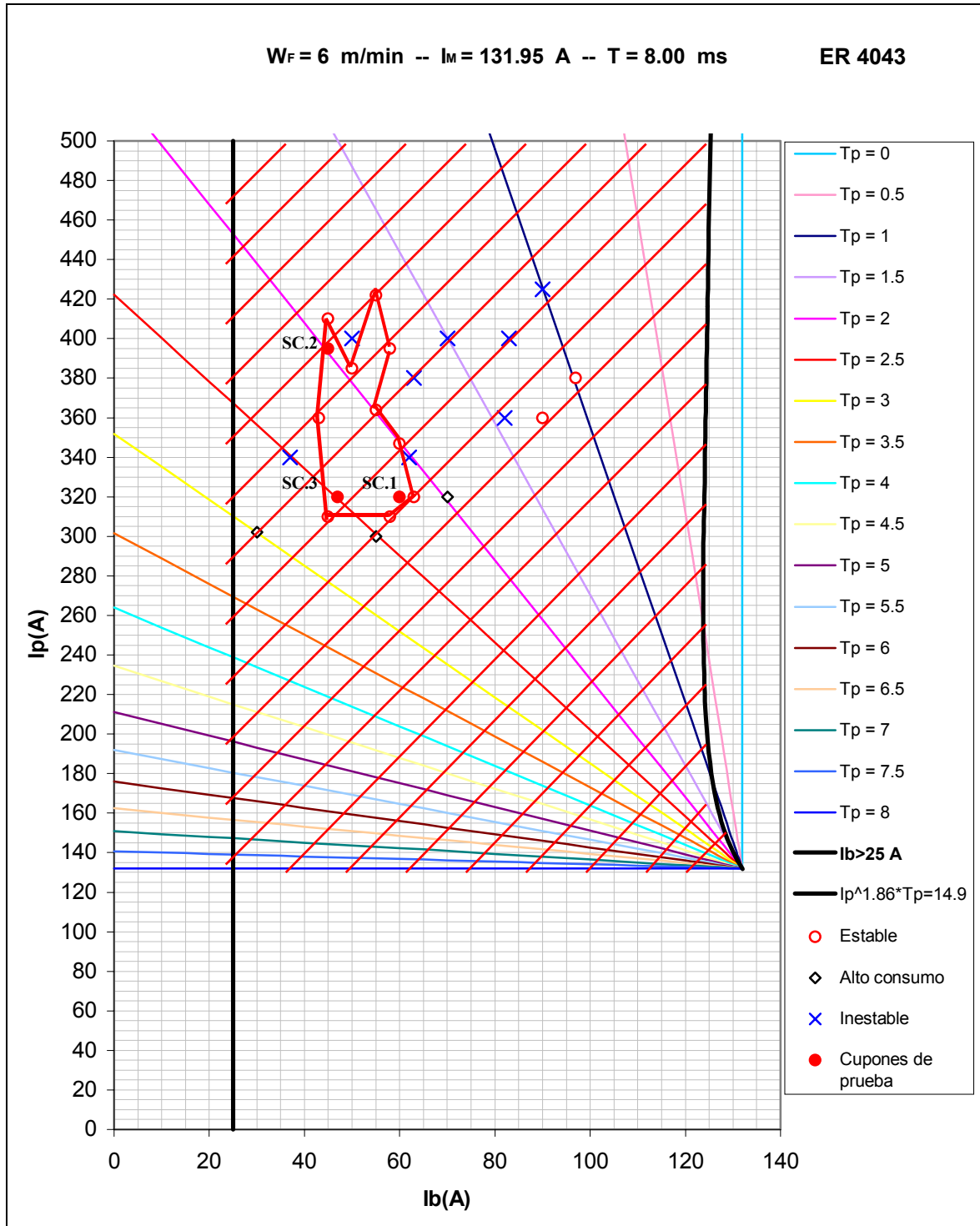


Figura 66. Zona paramétrica estable. ER 4043.

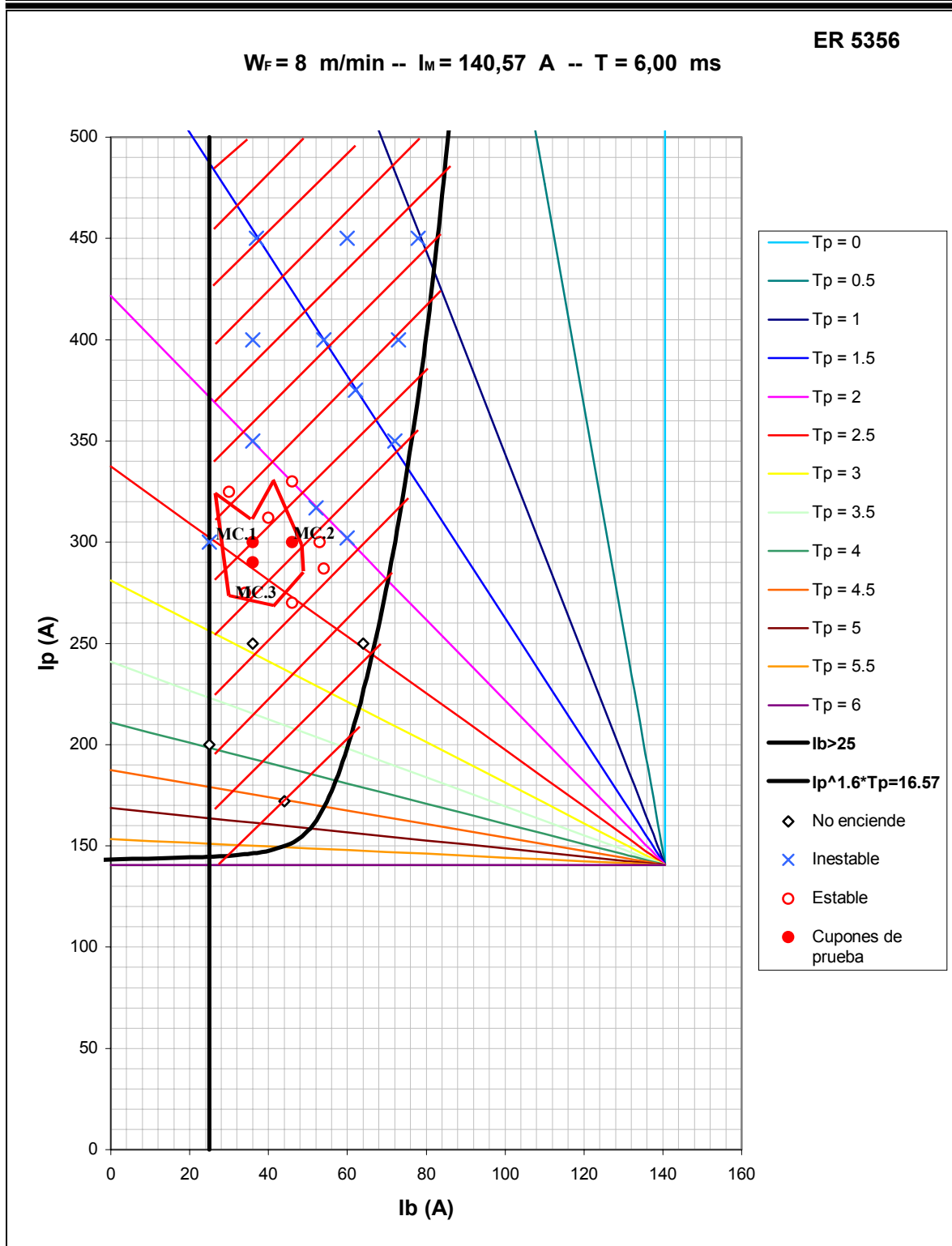


Figura 67. Zona paramétrica estable. ER 5356.

Con el fin de poder comprobar que las combinaciones de parámetros de pulso provistas por las zonas paramétricas estables encontradas producen soldaduras con buenas características geométricas, fue necesario realizar cupones de prueba para cada material de aporte y caracterizar los depósitos mediante inspección visual, análisis químico y metalografía. La nomenclatura usada para identificar las probetas es similar a la empleada en los primeros ensayos, una S para el aporte ER 4043 (Al-Si) y una M para el aporte ER 5356 (Al-Mg), a continuación de la primera letra se ha colocado una C para indicar que se trata de una condición seleccionada y por último un número indicando el ensayo realizado.

Las tablas 28 y 29, exponen los parámetros utilizados para realizar los cupones de prueba, observe que se reportan también los valores de corriente media suministrados por la fuente de soldadura y el calor aportado al material base Q_i , dado por la ecuación:

$$Q_i = \frac{V_M \cdot I_M}{V_a} \text{ [J/mm]} \quad (17)$$

donde V_M es el voltaje medio, I_M la corriente media y V_a la velocidad de avance, cuyo valor fue un décimo (1/10) de la velocidad de alimentación del alambre.

Tabla 28. Parámetros de pulso empleados para realizar los cupones de prueba con ER 4043. $V_a = 10 \text{ mm/s}$

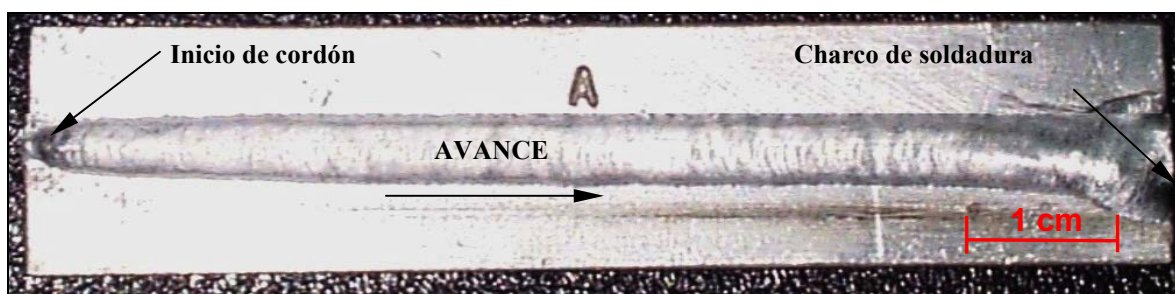
Probeta N°	I_p (A)	I_b (A)	T_p (ms)	T_b (ms)	I_M (A)	Q_i (J/mm)	Condición de arco
SC.1	320	60	2.3	5.7	134.75	292.57	Estable
SC.2	395	45	2.0	6	132.50	267.85	Estable
SC.3	320	47	2.5	5.5	132.31	286.32	Estable

Tabla 29. *Parámetros de pulso empleados para realizar los cupones de prueba con ER 5356. $V_a = 13.3\text{mm/s}$*

Probeta N°	I_p (A)	I_b (A)	T_p (ms)	T_b (ms)	I_M (A)	Q_i (J/mm)	Condición de arco
MC.1	300	36	2.4	3.6	141.60	207.33	Estable
MC.2	300	46	2.3	3.7	143.37	216.21	Estable
MC.3	290	36	2.5	3.5	141.83	189.40	Estable

En las figuras 68 a la 73, se pueden observar los depósitos realizados con los parámetros indicados en las tablas 28 y 29. El material base utilizado fue AA 1100 y AA 1200.

La figura 68 muestra el depósito correspondiente al punto SC.1. Se puede apreciar un cordón de aspecto superficial bastante liso, lo que indica que el aporte calórico (Q_i) fue el necesario para fundir completamente el material de aporte. En la tabla 28 se observa que este ensayo fue el de mayor calor aportado debido a su vez, a la mas alta corriente media alcanzada. El depósito también muestra continuidad durante la longitud de la chapa, producto de la estabilidad del arco eléctrico lograda durante el proceso.

**Figura 68.** *Cupón de prueba SC.1. $V_a = 10\text{ mm/s}$, $I_p = 320\text{ A}$, $T_p = 2.3\text{ ms}$, $I_b = 60\text{ A}$, $T_b = 5.7\text{ ms}$. ER 4043 vs. AA 1100.*

El depósito SC.2 se muestra en la figura 69, posee buena calidad superficial, continuidad y mínimas salpicaduras. Este depósito a pesar de poseer un menor aporte calórico que el alcanzado en el ensayo anterior (tabla 28), posee un ancho de cordón un tanto mas amplio. El charco de soldadura aparece en la parte izquierda de la fotografía. Si se detalla con cuidado, puede apreciarse que las ondas de metal solidificado tienden ligeramente hacia la parte baja de la página, provocando un desplazamiento del eje longitudinal del depósito, esto se debe a un ligero ángulo en la posición de la boquilla de la pistola, lo que ocasionó que el material se depositara mas de un lado que del otro.

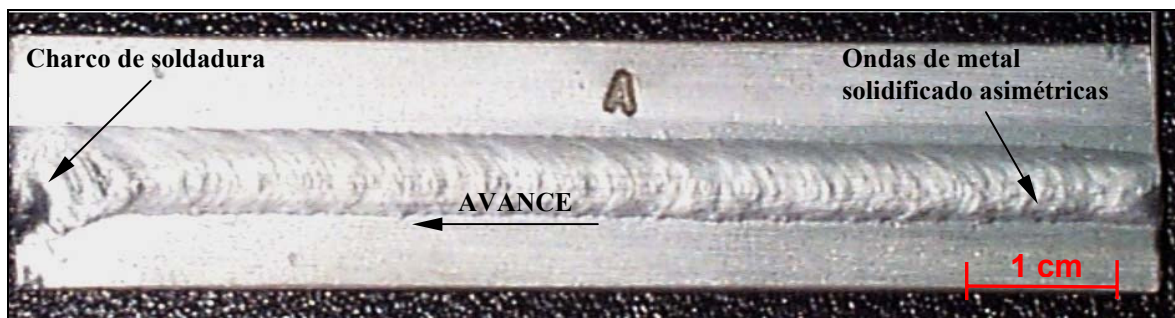


Figura 69. Cupón de prueba SC.2. $V_a = 10 \text{ mm/s}$, $I_p = 395 \text{ A}$, $T_p = 2 \text{ ms}$, $I_b = 45 \text{ A}$, $T_b = 6 \text{ ms}$.
ER 4043 vs. AA 1100.

El depósito correspondiente al ensayo SC.3, se muestra en la figura 70, se puede apreciar un aspecto superficial uniforme, gracias a la buena fusión y estabilidad del arco. Observe la simetría con que solidificó el charco de soldadura en la parte izquierda del cordón. En la parte baja de la fotografía se observa un ligero grado de falta de penetración lateral. Las marcas que aparecen sobre el metal base son golpes y rayas que tenía previamente antes de la deposición del cordón.

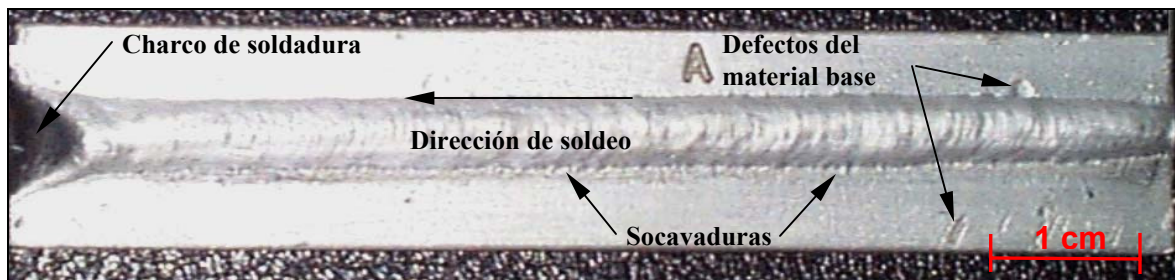


Figura 70. Cupón de prueba SC.3. $V_a = 10 \text{ mm/s}$, $I_p = 320 \text{ A}$, $T_p = 2.5 \text{ ms}$, $I_b = 47 \text{ A}$, $T_b = 5.5 \text{ ms}$.
ER 4043 vs. AA 1100.

La fotografía de la figura 71, revela el aspecto superficial del depósito logrado al emplear la combinación de parámetros de pulso del ensayo MC.1. Se nota de un ligero aumento del ancho cordón hacia el último tercio de derecha a izquierda, acompañado de un aspecto superficial un tanto poroso en el extremo izquierdo del depósito. Esto se debe al empleo de placas anexas a los cupones de prueba, sobre las cuales se inicio y se pago el arco eléctrico, en el caso del ensayo MC.1, se generó una inestabilidad temporal del arco eléctrico en la interface de las dos placas cuando se avanzaba de izquierda a derecha, esto acompañado de la detención del proceso cerca de ese punto provocó el defecto superficial mencionado.

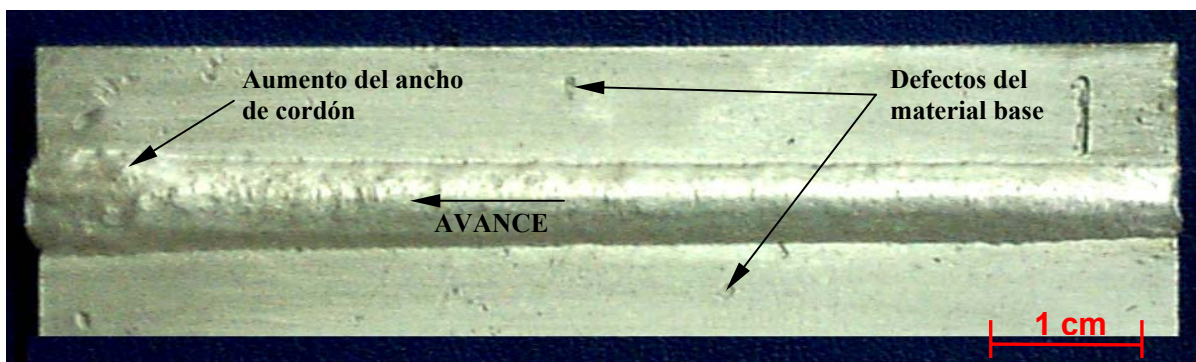


Figura 71. Cupón de prueba MC.1. $V_a = 13.33 \text{ mm/s}$, $I_p = 300 \text{ A}$, $T_p = 2.4 \text{ ms}$, $I_b = 36 \text{ A}$, $T_b = 3.6 \text{ ms}$.
ER 5356 vs. AA 1200.

Los depósitos mostrados en las figuras 71 y 72 poseen buen aspecto superficial, continuidad y estabilidad de arco. Esto se deduce por la constancia en el ancho de cordón durante toda su longitud. La inspección visual revela la ausencia de salpicaduras, poros u otras discontinuidades superficiales. La simetría del cordón es bastante buena así como la penetración lateral.

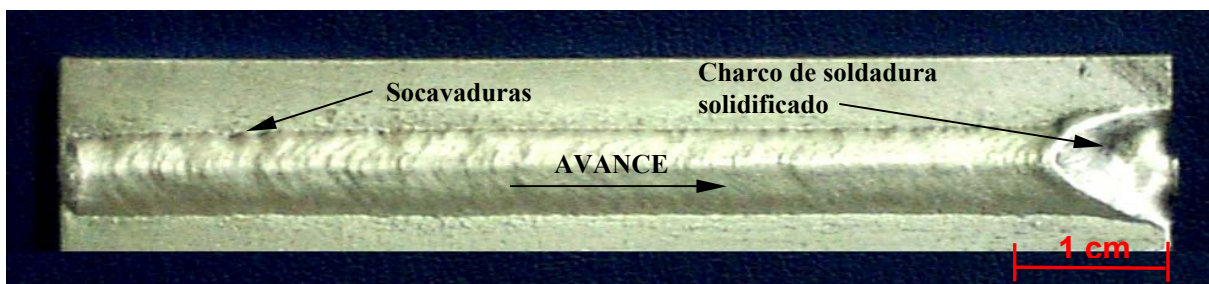


Figura 72. Cupón de prueba MC.2. $V_a = 13.33 \text{ mm/s}$, $I_p = 300 \text{ A}$, $T_p = 2.3 \text{ ms}$, $I_b = 46 \text{ A}$, $T_b = 3.7 \text{ ms}$. ER 5356 vs. AA 1100.

El depósito logrado con los parámetros del ensayo MC.3 que se muestra en la figura 73, revela cierta falta de penetración lateral observable hacia la parte alta de la fotografía. El ancho de cordón es prácticamente constante durante toda su longitud, la uniformidad y aspecto superficial son buenos. El material base presentaba algunos golpes y deformaciones que pueden llevar a pensar en defectos superficiales de soldadura.

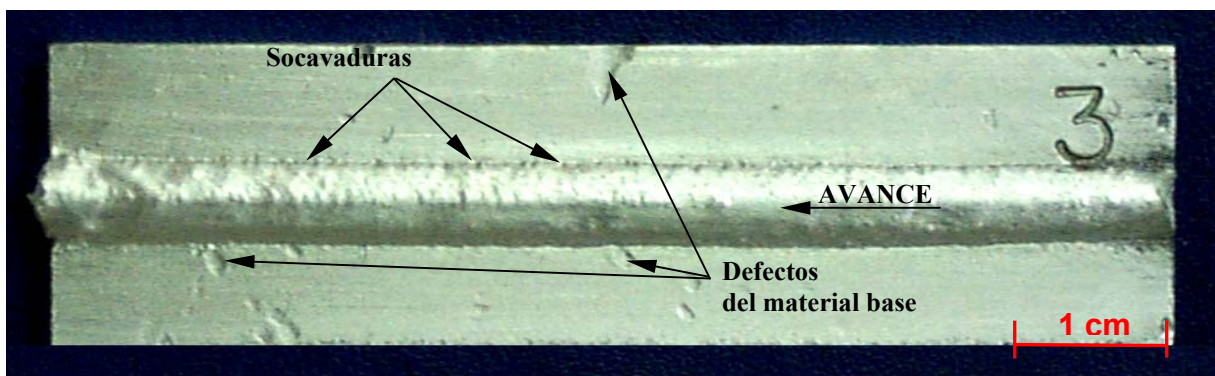


Figura 73. Cupón de prueba MC.3. $V_a = 13.33 \text{ mm/s}$, $I_p = 290 \text{ A}$, $T_p = 2.5 \text{ ms}$, $I_b = 36 \text{ A}$, $T_b = 3.5 \text{ ms}$. ER 5356 vs. AA 1200.

3.3. ESTUDIO METALOGRÁFICO

Los cupones de prueba realizados se cortaron en secciones transversales al cordón de soldadura, a partir de las cuales se prepararon probetas para realizar estudio macro y micrográfico.

3.3.1. MACROGRAFÍA

La caracterización macroestructural de una soldadura seccionada abarca datos como el número de pases, altura, forma y homogeneidad del cordón de soldadura, y la orientación de dichos cordones en una soldadura de múltiples pases. En este trabajo se hará hincapié en los aspectos geométricos del cordón con el fin de determinar la influencia que los parámetros de pulso tienen sobre estas dimensiones. En la figura 74, se muestra la geometría del depósito estudiada para cada una de los ensayos de las tablas 28 y 29, donde:

A_R = Área de sección transversal de refuerzo

A_P = Área de sección transversal de penetración

L_R = Altura de refuerzo

L_P = Profundidad de penetración

W = Ancho de cordón

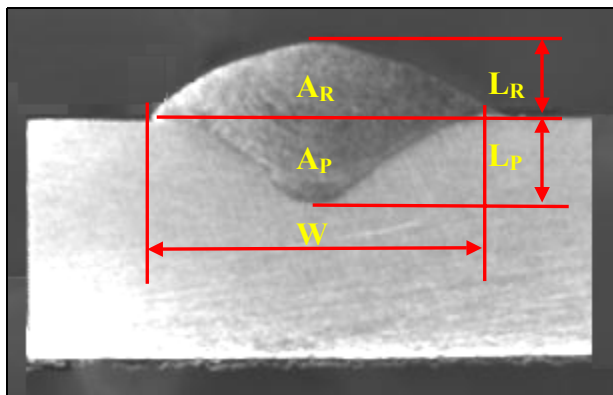


Figura 74. Geometría del depósito de soldadura

Para cada ensayo se cuenta con dos macrografías tomadas en distintas secciones a lo largo del cordón de soldadura. Esto se ha hecho con el objetivo de mantener la reproducibilidad de los datos y obtener una media aritmética de las dimensiones del depósito. Las figuras 75 a 80 muestran las macrografías tomadas a cada una de las secciones.

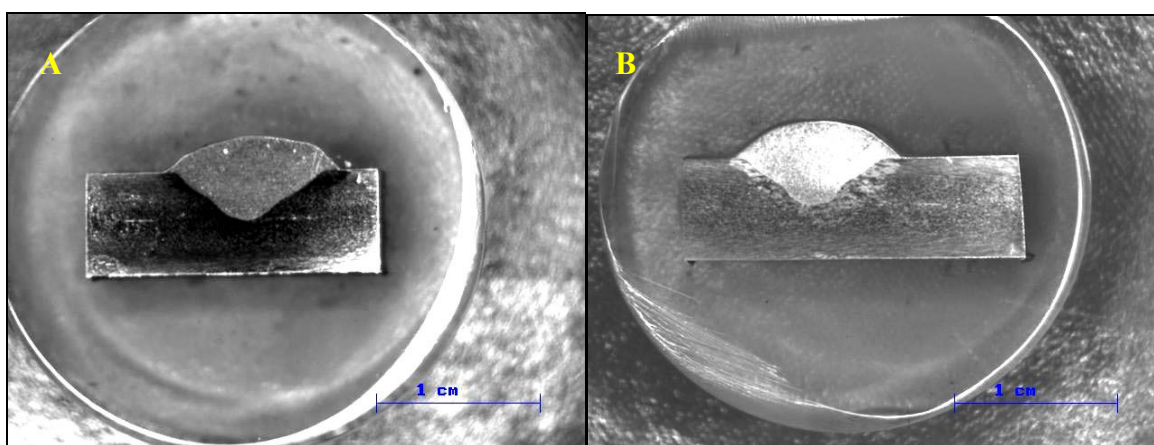


Figura 75. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta SC.1.

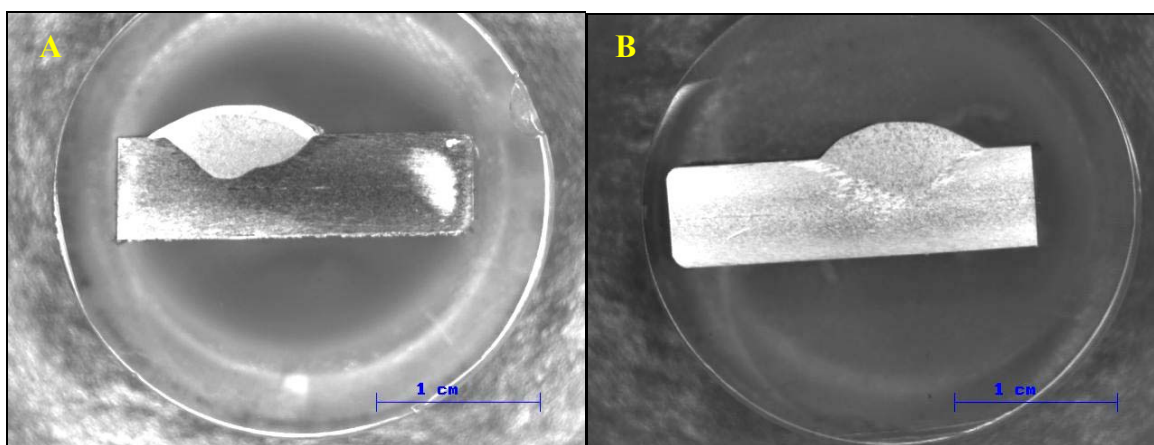


Figura 76. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta SC.2.

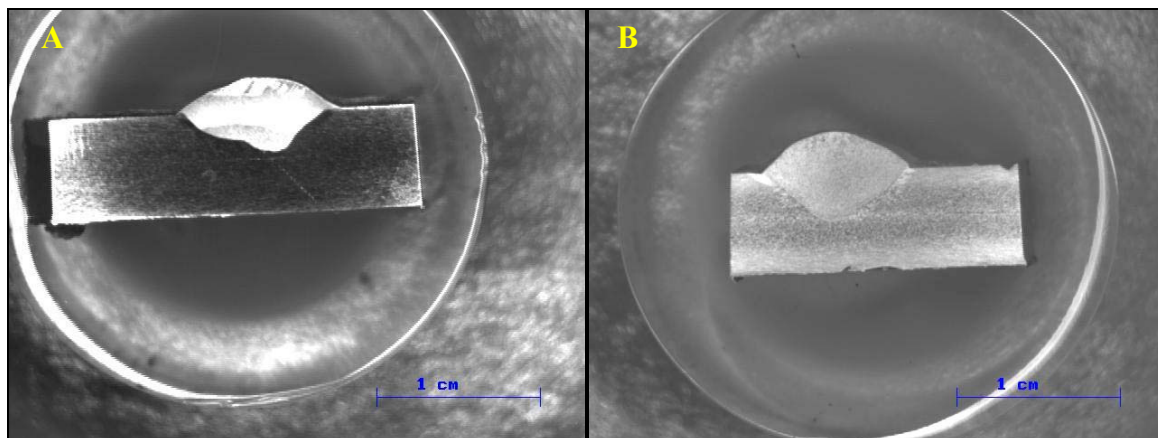


Figura 77. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta SC.3.

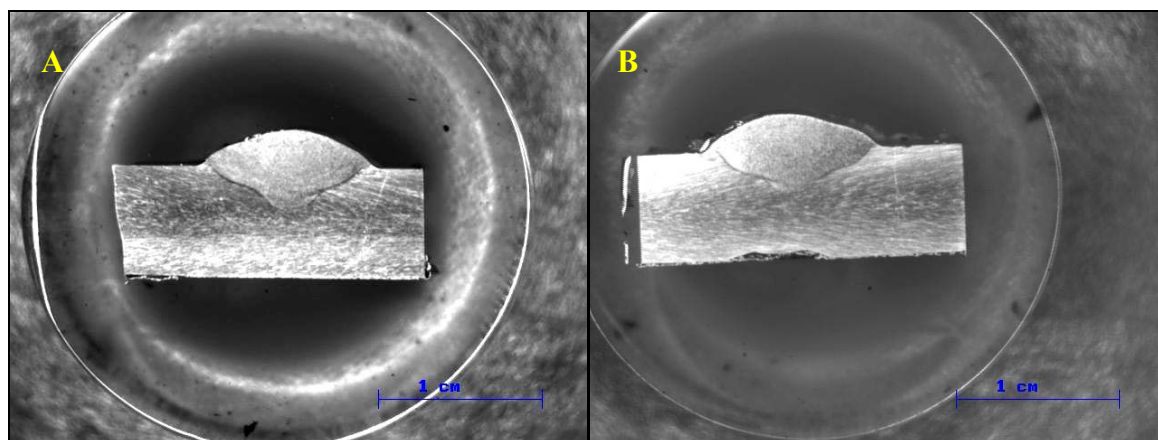


Figura 78. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta MC.1.

Al comparar las macrografías A y B de las figuras 75 a 80, observamos la similitud geométrica de los depósitos. Aunque se trata del mismo cordón de soldadura, la magnitud de las variaciones que puedan presentarse entre las secciones tomadas a lo largo de los distintos puntos de su longitud depende en gran medida de la estabilidad del proceso. En el caso particular de los ensayos SC.3 (figura 77) y MC.3 (figura 80) se observan ligeras variaciones en el refuerzo de cara y el ancho de cordón.

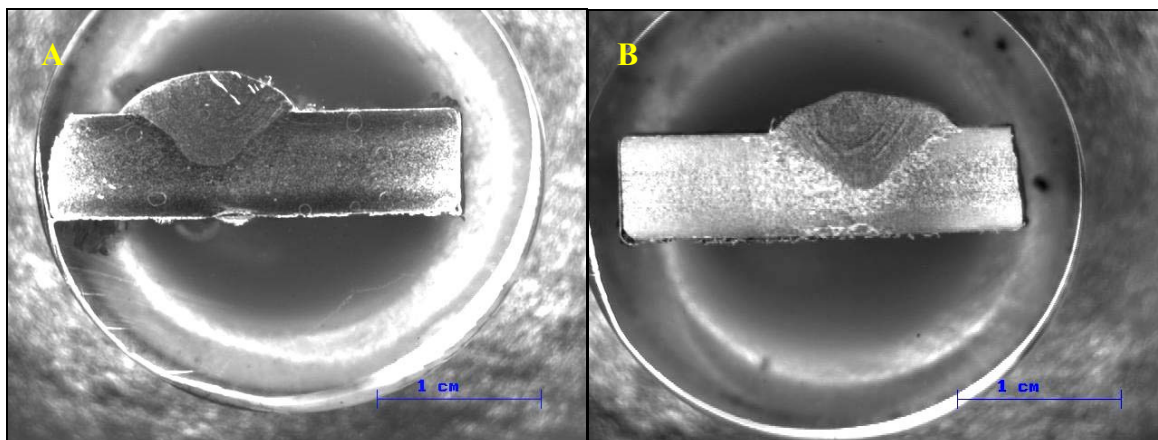


Figura 79. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta MC.2.

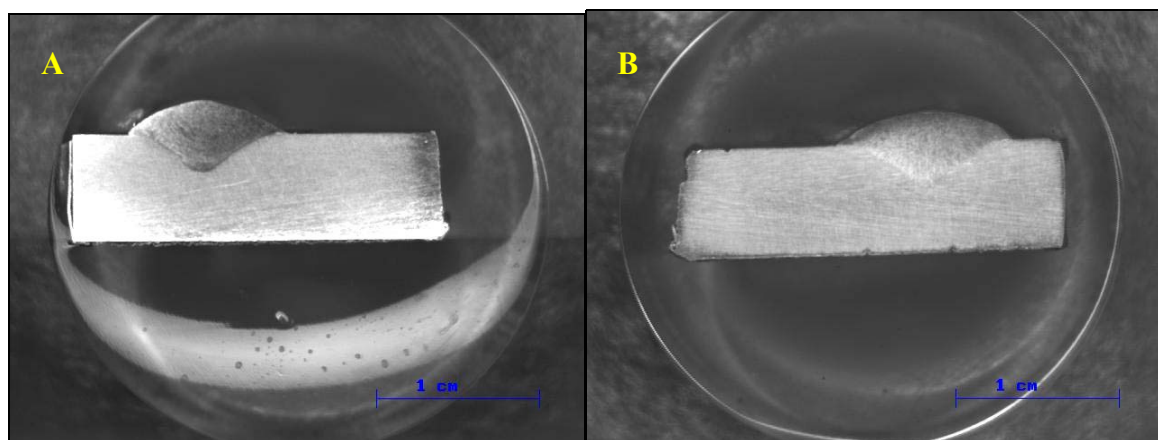


Figura 80. Macrografías correspondientes a las secciones A y B de la probeta MC.3.

Para poder establecer un mejor patrón de comparación entre las distintas condiciones de soldadura, en la tabla 30 se reportan los valores de las dimensiones del cordón señaladas en la figura 74.

Tabla 30. Geometría del depósito y relaciones de forma.

Ensayo	A_R (mm²)	A_P (mm²)	A_T (mm²)	D (%)	L_R (mm)	L_P (mm)	W (mm)	W/L_R	W/L_P	Q_i (J/mm)
SC.1A	16.24	16.16	32.40	49.87%	2.15	2.98	10.82	5.02	3.63	292.57
SC.1B	15.74	15.51	31.25	49.63%	2.21	3.09	10.49	4.75	3.39	292.57
SC.2A	14.62	15.78	30.41	51.91%	1.99	2.60	10.49	5.28	4.04	267.85
SC.2B	12.47	14.39	26.86	53.59%	1.88	2.76	10.22	5.44	3.70	267.85
SC.3A	14.44	13.59	28.03	48.49%	2.21	2.49	10.16	4.60	4.09	286.32
SC.3B	13.77	16.61	30.38	54.68%	2.32	3.09	9.12	3.93	2.95	286.32
MC.1A	15.77	14.75	30.52	48.33%	2.38	2.82	10.99	4.63	3.90	207.33
MC.1B	16.39	13.41	29.80	44.99%	2.27	2.10	11.21	4.95	5.34	207.33
MC.2A	19.74	16.83	36.58	46.02%	2.49	3.15	11.04	4.44	3.51	216.21
MC.2B	18.16	19.87	38.03	52.25%	2.43	3.59	11.65	4.79	3.24	216.21
MC.3A	12.51	10.36	22.87	45.31%	1.93	2.38	9.67	5.00	4.07	189.40
MC.3B	14.38	12.40	26.78	46.31%	1.99	2.49	10.77	5.41	4.33	189.40

Debido a que la tabla 30 reporta las dimensiones del depósito y las relaciones de forma para dos secciones distintas (A y B) de un mismo cordón de soldadura, es posible calcular la media aritmética entre los ensayos de cada condición reportada y obtener una mejor apreciación del efecto que los parámetros de pulso tienen sobre las magnitudes indicadas. Este promedio se muestra en la tabla 31.

Tabla 31. Geometría del depósito y relaciones de forma. Media aritmética.

Ensayo	A_R (mm²)	A_P (mm²)	A_T (mm²)	D (%)	L_R (mm)	L_P (mm)	W (mm)	W/L_R	W/L_P	Q_i (J/mm)
SC.1	15.99	15.83	31.83	49.75%	2.18	3.04	10.66	4.89	3.51	292.57
SC.2	13.54	15.09	28.63	52.75%	1.93	2.68	10.36	5.36	3.87	267.85
SC.3	14.10	15.10	29.20	51.58%	2.27	2.79	9.64	4.27	3.52	286.32
MC.1	16.08	14.08	30.16	46.66%	2.32	2.46	11.10	4.79	4.62	207.33
MC.2	18.95	18.35	37.30	49.14%	2.46	3.37	11.35	4.62	3.38	216.21
MC.3	13.44	11.38	24.82	45.81%	1.96	2.43	10.22	5.21	4.20	189.40

La tabla 31 muestra los valores del calor aportado al metal base, para cada uno de los depósitos realizados. Este valor puede ser usado como indicador de la magnitud de penetración, ya que como se observa, las mayores penetraciones se lograron para los valores mas altos de calor aportado (ensayos SC.1 y MC.2). Al comparar ambos materiales de aporte se aprecia que en general los ensayos SC.1, SC.2 y SC.3 correspondientes al aporte ER 4043 cuya corriente media fue del orden de 131.95 A, transfirieron una mayor cantidad de calor al metal base que los ensayos correspondientes al aporte ER 5356 ($I_M = 141.56$ A). Esto se debe a que la velocidad de avance para el aporte de aleación Al-Mg (13.33 mm/s) fue mayor que la utilizada con el aporte a base de silicio (10 mm/s) por lo cual la disipación de calor fue mas rápida en el primer caso que en el segundo.

A partir de los valores indicados en la tabla 31 correspondientes a las relaciones de forma W/L_R y W/L_P , porcentaje de dilución, refuerzo, penetración y ancho de cordón, se produjeron graficas en comparación con el calor aportado para cada uno de los materiales de aporte. Dichas gráficas pueden observarse en las siguientes figuras.

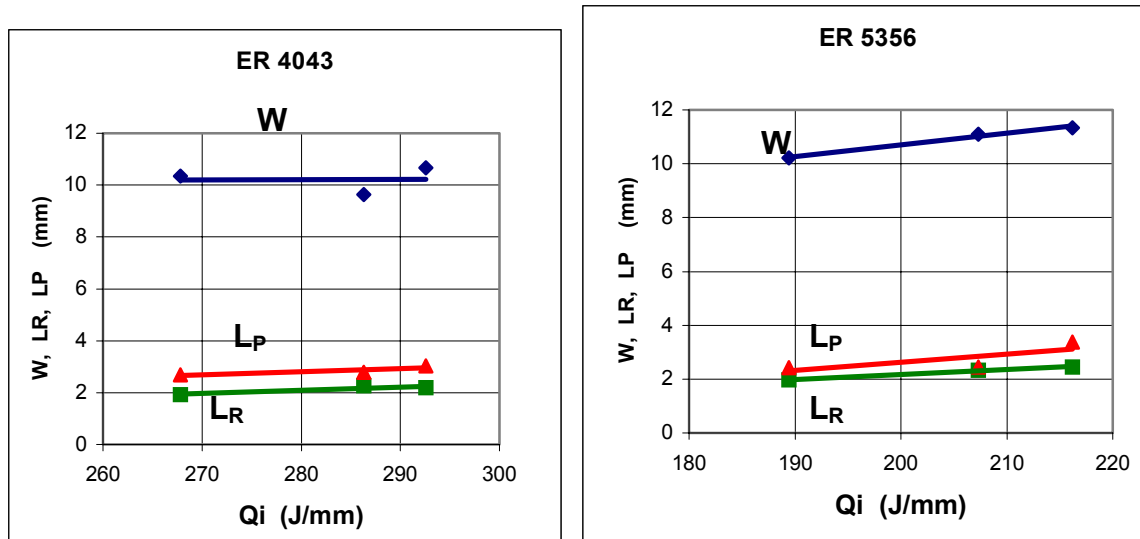


Figura 81. Efecto del calor aportado en la penetración (L_P), altura de refuerzo (L_R) y ancho de cordón (W) para una relación $W_F/V_a = 10$

La figura 81 muestra el efecto del calor aportado en la penetración, la altura de refuerzo y el ancho de cordón para una relación $W_F/V_a = 10$, esto quiere decir que la velocidad de avance empleada por los aportes ER 4043 y ER 5356 fue de 10 y 13.33 mm/s respectivamente. Observe que todas las dimensiones se incrementan en la medida que mayor cantidad de calor es aportado a la pieza de trabajo, este aumento se presenta con mayor intensidad para el aporte a base de magnesio, a pesar de que los valores de Q_i son menores que los empleados por el aporte ER 4043.

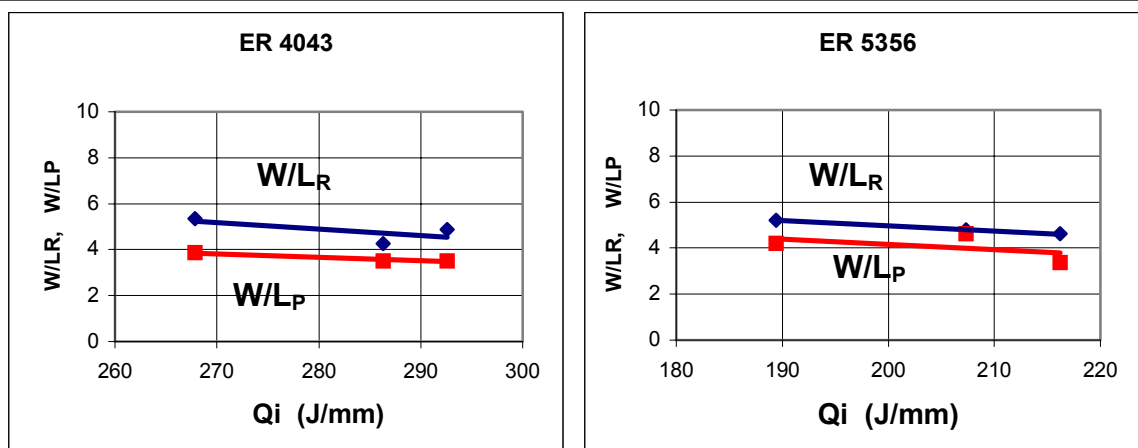


Figura 82. Efecto del calor aportado en las relaciones de forma W/L_R y W/L_P para una relación $W_F/V_a = 10$

En la figura 82 se puede observar el comportamiento de las rectas descritas por los parámetros de forma W/L_R y W/L_P ante el efecto del calor aportado a los depósitos para una relación $W_F/V_a = 10$. Se puede apreciar que a medida que el calor aportado aumenta las relaciones decrecen levemente su valor, esto indica un aumento en la penetración, ya que la variación del ancho de cordón es prácticamente constante, como se pudo observar en la figura 81.

En cuanto a la dilución, la figura 83 reporta valores entorno al 50 %, esto significa que tanto el material de aporte como el metal base contribuyeron en partes prácticamente iguales a la formación del cordón, por lo que se espera que la composición química del depósito sea un promedio de ambas partes. Al comparar los dos aportes, se observa que se obtuvieron valores mas altos de dilución (>50%) para el aporte ER 4043 que para el alambre ER 5356 (<50%). En este último caso también se aprecia una relación directamente proporcional entre el % de dilución y el aporte calórico.

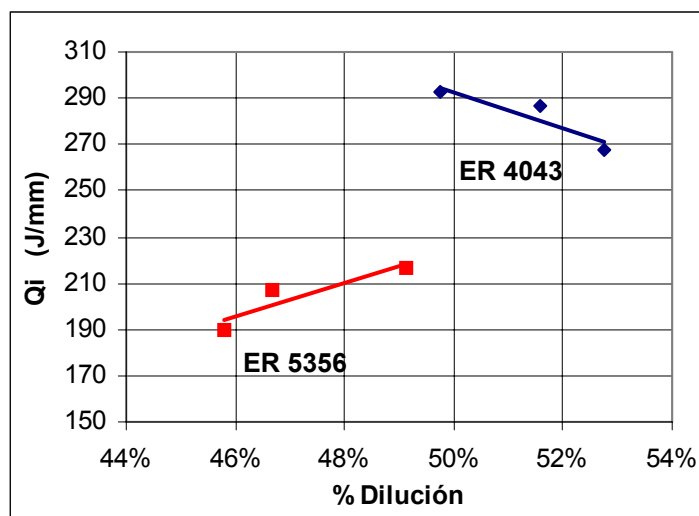


Figura 83. Efecto del calor aportado en el porcentaje de dilución para una relación $W_F/V_a = 10$

3.3.2. MICROGRAFÍA

La última fase de la caracterización metalográfica consistió en un análisis microestructural de los depósitos, basado en la observación de tres regiones fundamentales: una zona de fusión (material que se ha derretido), una zona afectada por calor ZAC (material que no se ha fundido pero cuya microestructura ha sido alterada) y el metal base. Las micrografías se fotografiaron con un aumento de $100\times$.

Las figuras que se muestran a continuación presentan las microestructuras típicas de los depósitos realizados con las condiciones de la tablas 28 y 29, para una mejor comprensión se ha trazado el mapa de ubicación de la micrografías sobre la foto macro, representadas por los cuadros en rojo y señaladas con las letras correspondientes.

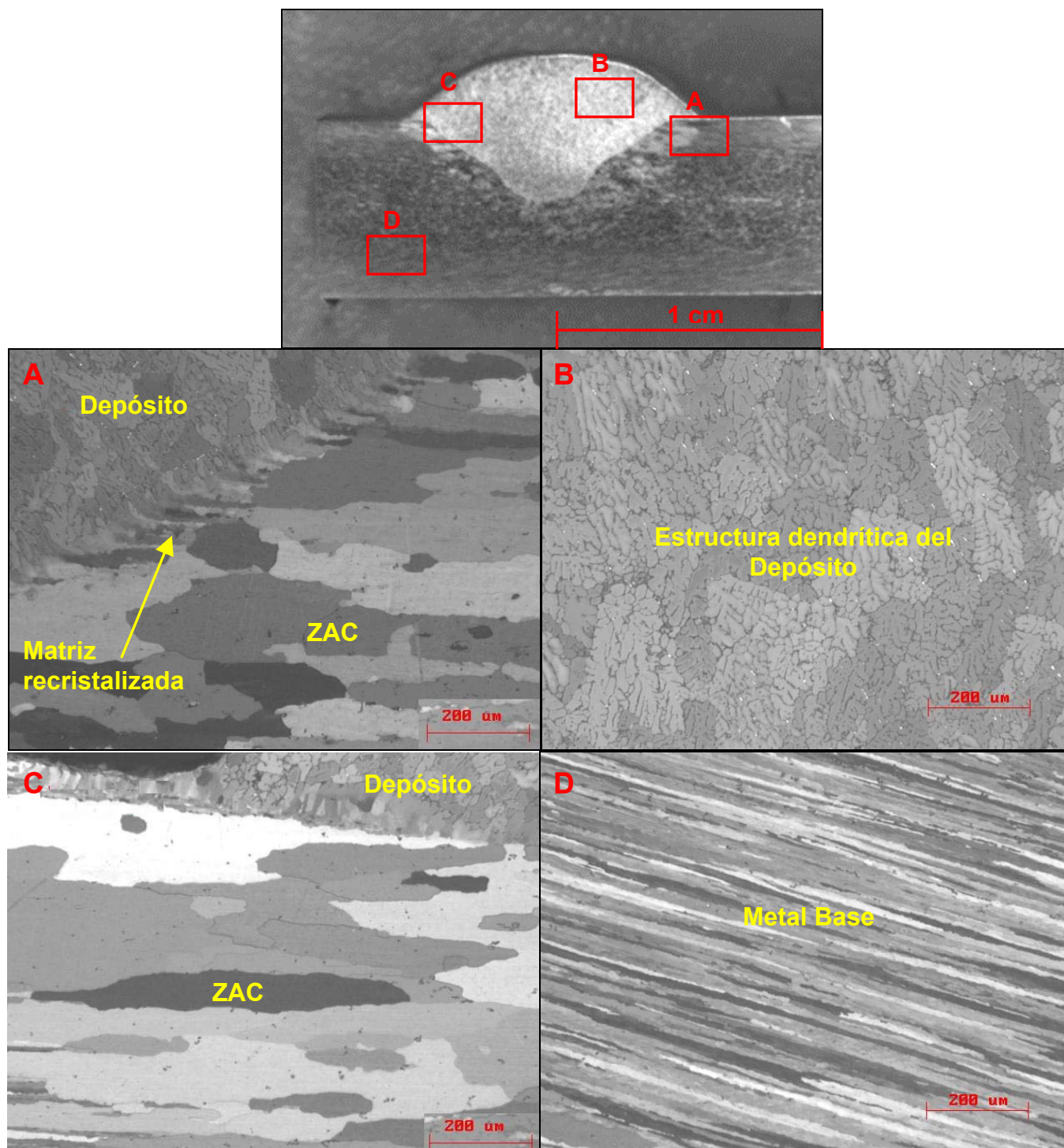


Figura 84. Microestructuras en distintas zonas del depósito SC.1.

En la figura 84 se pueden observar las microestructuras del depósito realizado con las condiciones del ensayo SC.1. La figura 84-B muestra la estructura dendrítica típica generada en el depósito de soldadura, de igual manera, se puede observar la forma equiaxial del grano.

En las fotomicrografías 84-A y 84-C, se puede apreciar la zona afectada por el calor observada a partir del límite o interfase con los granos que conforman el depósito. Observe que la estructura de grano altamente texturada del metal base (figura 84-D) producto de la deformación adquirida por la laminación de la chapa se ha transformado aparentemente en una matriz libre de deformación (ZAC), como consecuencia de los procesos térmicamente activados (posiblemente recuperación + recristalización + crecimiento de grano recristalizado) que ocurrieron durante el proceso de soldadura.

La figura 85, muestra las fotografías tomadas en distintas zonas del depósito SC.2 , las microestructuras observadas corresponden a las encontradas usualmente en una soldadura. La figura 85-A, muestra la transición de la zona afectada por el calor con la zona no afectada del metal base. Se puede apreciar el exagerado crecimiento del grano en la ZAC.

Las figuras 85-A y 85-C muestran la matriz del metal base altamente deformada producto del trabajo mecánico requerido para la laminación de la chapa, el calor del proceso de soldadura provocó el crecimiento de estos, conformando la zona que se ha denominado ZAC.

La figura 85-B corresponde a la transición entre los granos del depósito y los de la zona afectada por el calor, la figura 85-C, deja ver los tres tipos de granos generados de izquierda a derecha en el depósito, ZAC y metal base. La estructura dendrítica mostrada en las figuras 85-D y 85-E corresponde a la generada en el depósito de soldadura.

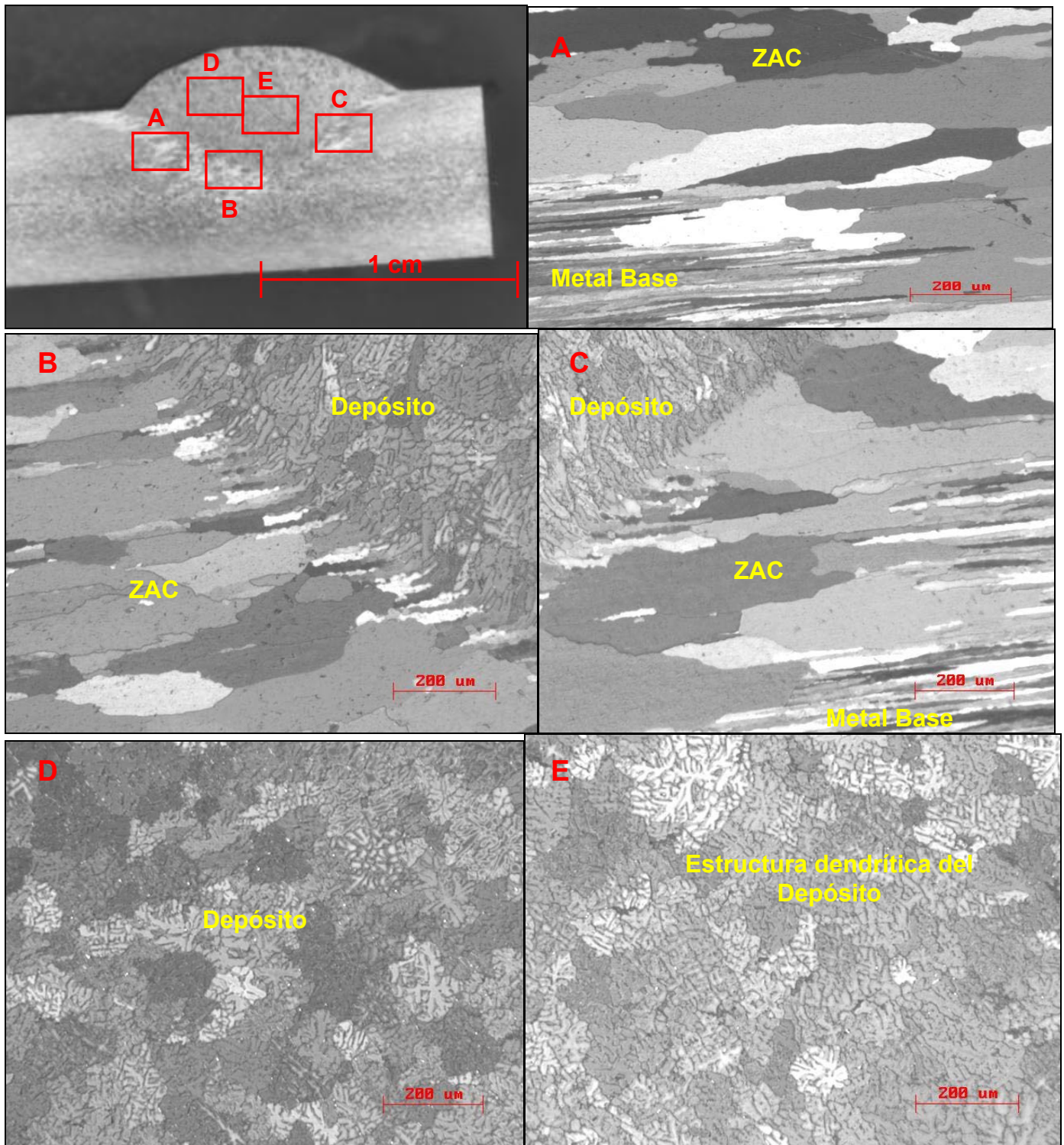


Figura 85. Microestructuras en distintas zonas del depósito SC.2

La figura 86 muestra las microestructuras generadas en distintas zonas de la probeta SC.3. Nuevamente se observa la estructura dendrítica generada en el depósito (figura 86-C), la matriz altamente texturada del material base (figura 86-A) y los granos recrystalizados y crecidos de la zona afectada térmicamente (ZAC) en la figura 86-B.

En la figura 86-D, se pueden apreciar dos subzonas cuyos granos se distinguen de las formas típicas encontradas en el material base, el depósito y la ZAC. La primera subzona está conformada por el grupo de granos ubicados en ambos extremos del ancho de cordón; ésta área fue la primera parte del depósito en solidificar, en primer lugar porque se encuentra más cercana al medio ambiente y segundo porque parte del calor contenido por el metal fundido se disipa a través del material base que se encuentra a mucho menor temperatura que el charco de soldadura; producto de ésta solidificación se generó una estructura dendrítica que más tarde fue disuelta por acción del calor transmitido por las sucesivas capas de metal fundido. La segunda subzona se puede observar de izquierda a derecha a partir de los granos de la ZAC. Los granos que conforman dicha subzona muestran una incipiente recrystalización debido a la presencia de pequeños núcleos o potenciales granos recrystalizados.

Las micrografías correspondientes a la probeta MC.1 se pueden observar en la figura 87. Se puede apreciar la matriz altamente deformada en la figura 87-B junto a los granos que recrystalizaron y crecieron en la ZAC. Las figuras 87-A y 87-C muestran la geometría de grano generada en el área del depósito. Observe que en la fotografía 87-A los granos han adquirido cierta forma columnar en la dirección de disipación térmica.

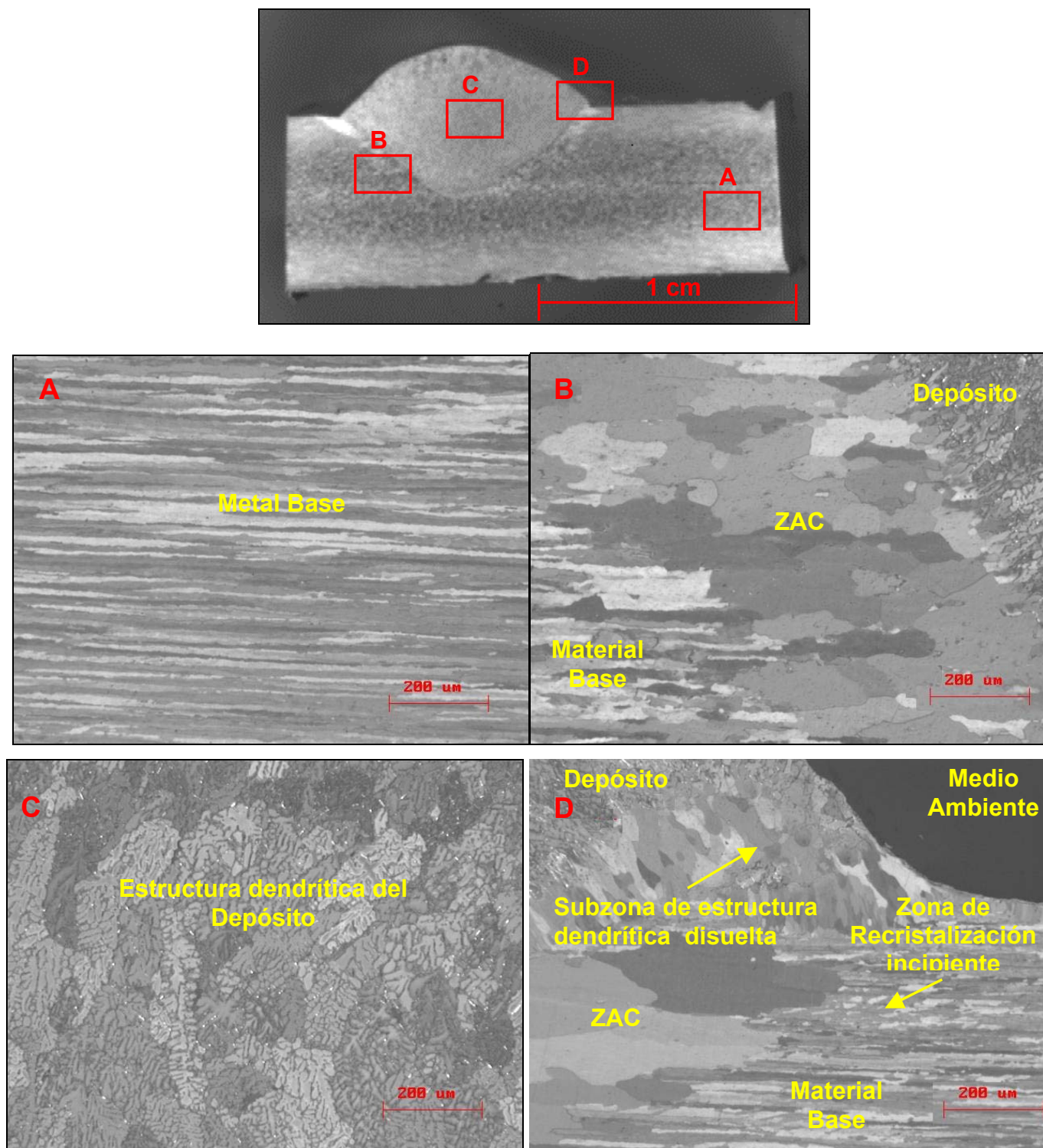


Figura 86. Microestructuras en distintas zonas del depósito SC.3

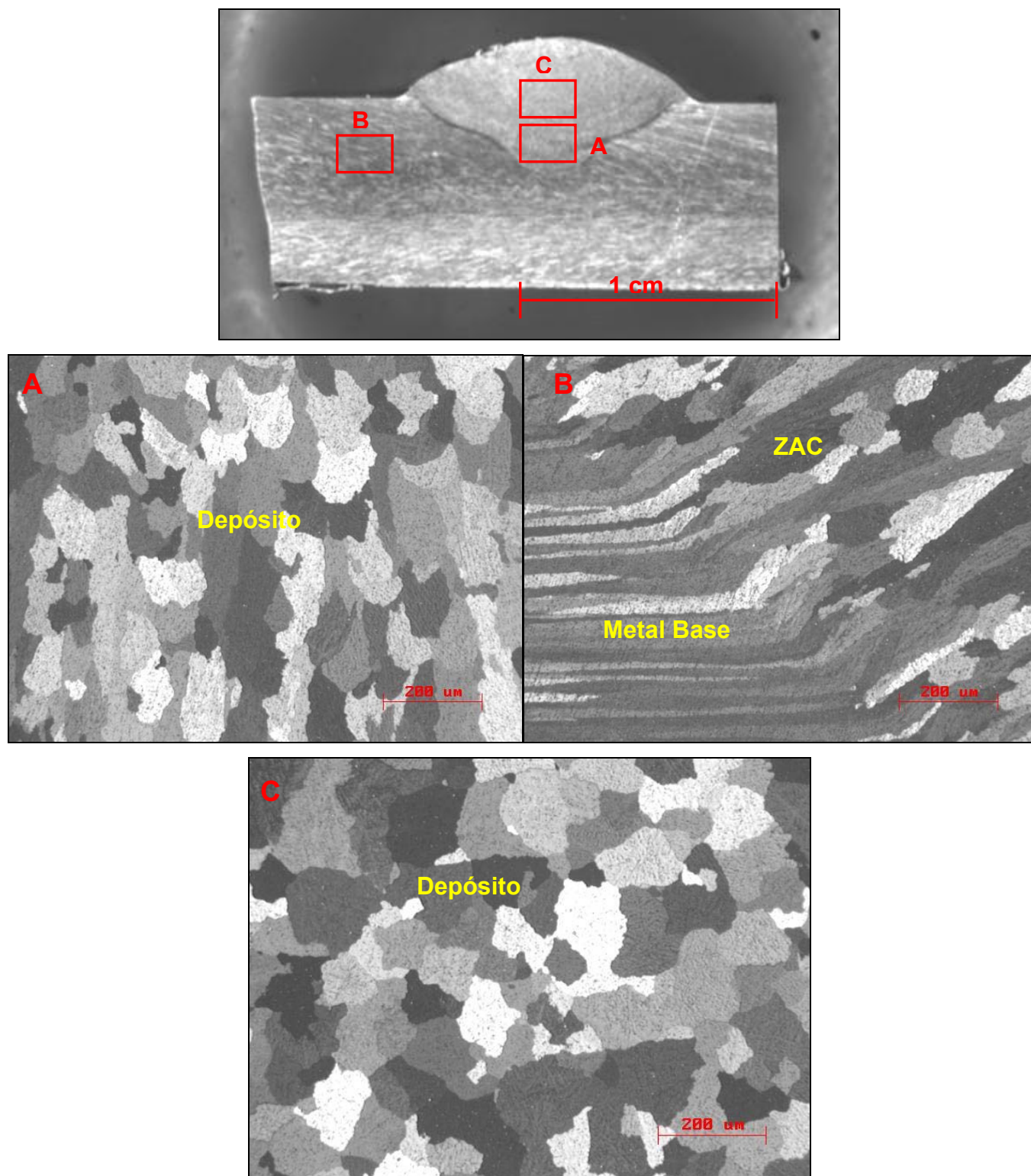


Figura 87. Microestructuras en distintas zonas del depósito MC.1.

La figura 88, muestra la morfología de grano obtenida durante el proceso de soldadura de la probeta MC.2. Observe la estructuras generadas en el depósito (figura 88-A) y en las interfaces entre el material base y el cordón de soldadura (figuras 88-B y 88-D). En cuanto al depósito, aprecie que en este caso no se revelan tan claramente las estructuras dendríticas como en el caso de las figuras 84-B y 86-C, debido a que el ataque de las probetas fue logrado en mayor grado, permitiendo que las capas de óxido crecieran completamente sobre la superficie del grano revelando las tonalidades grisáceas que se observan bajo la luz polarizada.

En la figura 88-C se observa una estructura de grano columnar en el material base, típica de una placa proveniente de colada continua a diferencia de las estructuras texturadas y alargadas del metal base (figura 84-D y 85-A) producto de la deformación adquirida por la laminación. En la figura 88-D se puede apreciar las subzonas de granos atípicos comentadas en la figura 86-D.

La figura 89-A muestra una estructura homogénea equiaxial en el depósito, sin embargo se aprecia una estructura de grano columnar en las fotomicrografías de las figuras 89-B y 89-C, esto se debe al proceso de disipación de calor en el depósito el cual puede llevar a pensar que fue más rápido en un caso que en el otro.

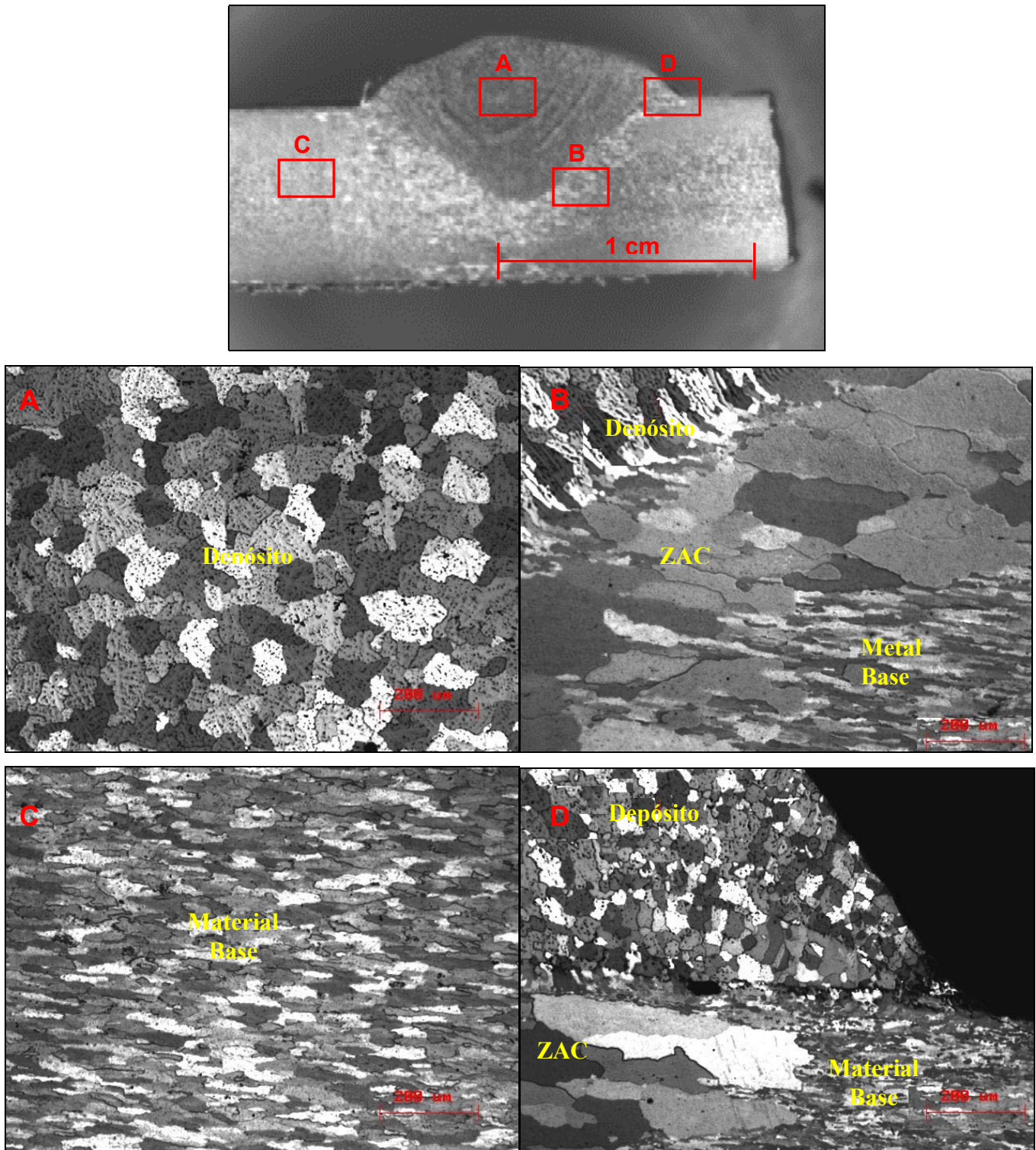


Figura 88. Microestructuras en distintas zonas del depósito MC.2

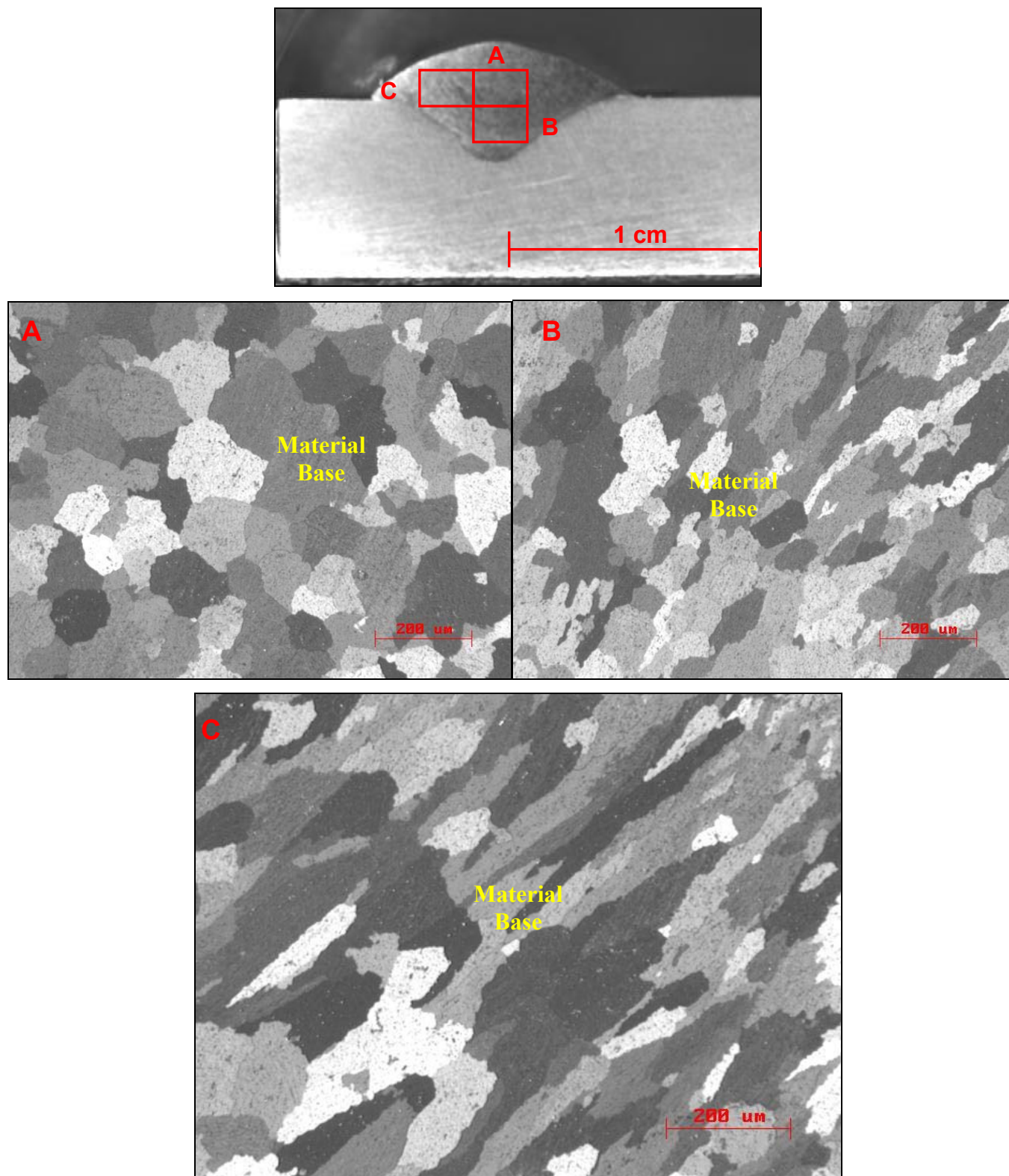


Figura 89. Microestructuras en distintas zonas del depósito MC.3.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES:

- La transferencia metálica de una gota por pulso brinda un mejor control del proceso GMAW pulsado garantizando depósitos de excelentes características superficiales y geométricas.
- El método de la Zona Paramétrica permite encontrar un conjunto de condiciones de soldadura entre las cuales se obtienen las combinaciones de parámetros de pulso mas adecuadas para realizar depósitos.
- Los parámetros de pulso requeridos en la soldadura GMAW- P del alambre Al-Si ER 4043 que proporcionan depósitos de excelentes características superficiales y geométricas así como un aporte calórico inferior al obtenido durante el proceso GMAW con corriente constante son: $I_p = 320$ A, $T_p = 2.3$ ms, $I_b = 60$ A, $T_b = 5.7$ ms, $W = 6$ m/min y $V_a = 10$ mm/s
- Los parámetros de pulso requeridos en la soldadura GMAW- P del alambre Al-Mg ER 5356 que proporcionan depósitos de excelentes características superficiales y geométricas así como un aporte calórico inferior al obtenido durante el proceso GMAW con corriente constante son: $I_p = 300$ A, $T_p = 2.3$ ms, $I_b = 46$ A, $T_b = 3.7$ ms, $W = 8$ m/min y $V_a = 13.33$ mm/s.

4.2. RECOMENDACIONES:

- Realizar juntas soldadas con GMAW-P empleando los parámetros de pulso hallados en este trabajo, de manera de poder evaluar las propiedades mecánicas logradas al aportar aleaciones Al-Si ER 4043 y Al-Mg ER 5356.
- Se recomienda el estudio de métodos alternativos para la selección de los parámetros de pulso en la soldadura de aleaciones de aluminio mediante el proceso GMAW, y la posterior calificación de las soldaduras producidas por estas condiciones mediante normas como el código ANSI/AWS D1.2-97 (Structural Welding Code-Aluminum) en el caso de soldaduras estructurales o el código ASME sección IX en el caso de recipientes a presión.

CAPÍTULO 5

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. THE ALUMINUM ASSOCIATION. Aluminum Alloys. Selection and Applications. 1998. U.S.A.
2. HATCH, J.E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, Ed. American Society for Metals. 1984, p 222.
3. THE ALUMINUM ASSOCIATION, INC. Aluminum Standards and Data. 1988, pp. 11.
4. IGNOTO, V. Soldadura para Ingenieros. C.V.S. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, 2001. U.C.V.
5. DICKERSON, P. & IRVING, B. 1992. Welding Aluminum: It's Not As Difficult As It Sounds. *Welding Journal* (4): 45 a 50.
6. DICKERSON, P. Welding of Aluminum Alloys. *Welding, Brazing and Soldering*. ASM Handbook Vol. 6. ASM International. 1993, pp. 722 -739.
7. MARTUKANITZ, R. P. Selection and Weldability of Heat-Treatable Aluminum Alloys. *Welding, Brazing and Soldering*. ASM Handbook Vol. 6. ASM International. 1993, pp. 529 - 536.
8. MARTUKANITZ, R. P. y MICHNUK, P. R. Sources of Porosity in Gas Metal Arc Welding of Aluminum. *Trends in Welding Research*. ASM International, 1982, pp. 315-330.
9. ASM INTERNATIONAL. Effects of Alloying Elements and Impurities on Properties. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. ASM, 1984.
10. ASM INTERNATIONAL. Welding, Brazing and Soldering. ASM Handbook. Vol. 6. 1993.
11. THE ALUMINUM ASSOCIATION. Welding Aluminum: Theory and Practice. Copyright Lincoln Electric Co. 3ª Ed. 1997. U.S.A.
12. ANSI/AWS A5.10-92. Specification for Bare Aluminum and Aluminum Alloy Welding Electrodes and Rods. AWS. Miami, 1992.

13. LESNEWICH, A. 1958. Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal arc welding: part – control of metal transfer. *Welding Journal* 37(9): 418-s a 425-s.
14. KIM, Y.-S. and EAGAR, T.W. 1993. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal* (6): 269-s a 278-s.
15. CHOI, S.K., YOO, C.D., and KIM, Y.-S. 1998. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW, Part 2: Short-Circuit Transfer Mode. *Welding Journal* (1): 45-s a 51-s.
16. CHOI, S.K., YOO, C.D., and KIM, Y.-S. 1998. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW, Part 1: Globular and Spray Transfer Modes. *Welding Journal* (1): 38-s a 44-s.
17. RAJASEKARAM, S., KULKARNI, S.D., MALLYA, U.D. and CHATURVEDI R.C. 1998. Droplet Detachment and Plate Fusion Characteristics in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal* (6): 254-s a 269-s.
18. SUBRAMANIAM, S., WHITE D.R., JONES J.E. & LYONS, D.W. 1999. Experimental Approach to Selection of Pulsing Parameters in Pulsed GMAW. *Welding Journal* (5): 166-s a 172-s.
19. SUBRAMANIAM, S., WHITE D.R., JONES J.E. & LYONS, D.W. 1998. Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum. *Welding Journal* (11): 458-s a 464-s.
20. SUBRAMANIAM, S. 1996. Process modelling and analysis for pulsed gas metal arc welding of an aluminium automotive spaceframe. Ph.D. dissertation. West Virginia University, Morgantown, W.Va.
21. KIM, Y.-S. 1989. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. Ph.D. dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
22. AMIN, M. 1983. Pulsed current parameters for arc stability and controlled metal transfer arc welding. *Metal Construction* 15(5): 272 - 278.
23. DALLAM C. B. & DAMKROGER B. K. Caracterización de Soldaduras. ASM Handbook. ASM International. 1993.

24. Microcal Origin version: 4.0. Copyright 1991-1995 Microcal Company, Inc. Ma. U.S.A.
25. JOHNSON, C. A. Metallography: Principles and Procedures. LECO Corporation. U.S.A.
26. RAJASEKARAM, S. 1999. Weld Bead Characteristics in Pulsed GMA Welding of Al-Mg Alloys. *Welding Journal* (12): 397-s a 407-s.
27. TRINDADE, E. N. & ALLURN, C. J. 1984. Characteristics in steady and pulsed current GMAW. *Welding and Metal Fabrication* 52 (8): 264 a 272.
28. ARAYA, T., ENDO, T., IMAMIYA, H. & SEJIMA, I. 1981. Transistor-controlled pulse MIG welding of aluminum alloys. *IIW Doc. XII-C-19-8* 1: 1-19.

Key Words — aluminum plate, castings,
dynamically loaded structures,
inspection, qualification, structural
details, statically loaded structures,
structural shapes, stud welding,
tubular structures

ANSI/AWS D1.2-97
An American National Standard

Approved by
American National Standards Institute
April 17, 1997

Structural Welding Code— **Aluminum**

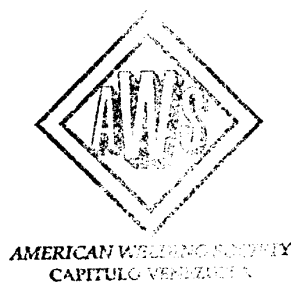
Third Edition

Superseding
ANSI/AWS D1.2-90

Prepared by
AWS Structural Welding Committee

Under the Direction of
AWS Technical Activities Committee

Approved by
AWS Board of Directors



Abstract

This code covers the welding requirements for any type of structure made from aluminum structural alloys, except for aluminum pressure vessels and fluid-carrying pipe lines. Sections 1 through 6 and 10 constitute a body of rules for the regulation of welding in aluminum construction. Sections 7, 8, and 9 contain additional rules applicable to specific types of structures, i.e., statically loaded structures, dynamically loaded structures, and tubular structures, respectively, and supplement the first six sections. A commentary on the code is also included with the document.



American Welding Society

550 N.W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126

Practical information for welders and others involved in welding and its allied processes.

Chemical Composition Requirements for Aluminum Electrodes and Rods

The bare aluminum and aluminum alloy electrodes in this table (classified ERXXXX), and the bare welding rods (classified RXXXX), are used with the gas metal arc (GMA), gas tungsten arc (GTA), oxyfuel gas (OF), and plasma arc (PA) welding processes.

The three covered electrodes (classified EXXXX) are used for shielded metal arc welding (SMAW).

Filler metal containing more than 0.0008% beryllium should not be used as a welding electrode.

The A5.3-91 Appendix notes that the many advantages of gas shielding are diminishing the use of covered electrodes for welding aluminum. Where corrosion resistance is of prime importance, select a composition of filler metal as close as practical to that of the base metal.

Chemical Composition Requirements for Aluminum Electrodes and Rods (Weight Percent)

AWS Class-ification	UNS Number	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other Elements Each	Total	Al
R ER1100	A91100	d	d	0.05-0.20	0.05	—	—	0.10	—	0.05*	0.15	99.0 min
R ER1188	A91188	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	—	0.03	0.01	0.01*	—	99.88 min
R ER2319	A92319	0.20	0.30	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02	—	0.10	0.10-0.20	0.05*	0.15	Remainder
R ER4043	A94043	4.5-6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	0.10	0.20	0.05*	0.15	Remainder
R ER4047	A94047	11.0-13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	—	0.20	—	0.05*	0.15	Remainder
R ER4145	A94145	9.3-10.7	0.8	3.3-4.7	0.15	0.15	—	0.20	—	0.05*	0.15	Remainder
R ER4643	A94643	3.6-4.6	0.8	0.10	0.05	0.10-0.30	0.15	0.20	—	0.05*	0.15	Remainder
R ER5183	A95183	0.40	0.40	0.10	0.50-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	0.15	0.05*	0.15	Remainder
R ER5356	A95356	0.25	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	0.10	0.06-0.20	0.05*	0.15	Remainder
R ER5554	A95554	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20	0.25	0.05-0.20	0.05*	0.15	Remainder
R ER5556	A95556	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	0.25	0.05-0.20	0.05*	0.15	Remainder
R ER5654	A95654	i	i	0.05	0.01	3.1-3.9	0.15-0.35	0.20	0.05-0.15	0.05*	0.15	Remainder
R-206.0	A02060	0.10	0.15	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35	—	0.10	0.15-0.30	0.05	0.15	Remainder
R-C355.0	A33550	4.5-5.5	0.20	1.0-1.5	0.10	0.40-0.6	—	0.10	0.20	0.05	0.15	Remainder
R-A356.0	A13560	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.25-0.45	—	0.10	0.20	0.05	0.15	Remainder
R-357.0	A03570	6.5-7.5	0.15	0.05	0.03	0.45-0.6	—	0.05	0.20	0.05	0.15	Remainder
R-A357.0	A13570	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.40-0.7	—	0.10	0.04-0.20	0.05*	0.15	Remainder
E1100	A91100	(d)	(d)	0.05-0.20	0.05	—	—	0.10	—	0.05*	0.15	99.00 min
E3003	A93003	0.6	0.7	0.05-0.20	1.0-1.5	—	—	0.10	—	0.05*	0.15	Remainder
E4043	A94043	4.5-6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	—	0.10	0.20	0.05*	0.15	Remainder

Notes:

- The filler metal of R and ER rods and electrodes, and the core wire of E-covered electrodes or the stock from which it is made, shall be analyzed for the specific elements for which values are shown in this table. If the presence of other elements is indicated in the course of this work, the amount of those elements shall be determined to ensure that they do not exceed the limits specified for "Other Elements."
- Single values are maximum, except where otherwise specified.
- SAE-ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys.
- Silicon plus iron shall not exceed 0.95 percent.
- Beryllium shall not exceed 0.0008 percent.
- The aluminum content for unalloyed aluminum is the difference between 100.00 percent and the sum of all other metallic elements present in amounts of 0.010 percent or more each, expressed to the second decimal before determining the sum.
- Vanadium 0.05 percent maximum. Gallium 0.03 percent maximum.
- Vanadium 0.05-0.15 percent. Zirconium 0.10-0.25 percent.
- Silicon plus iron shall not exceed 0.45 percent.
- Tin shall not exceed 0.03 percent. Nickel shall not exceed 0.05 percent.
- Beryllium 0.04-0.07 percent.

Excerpted from ANSI/AWS A5.10-88 and A5.3-91. Adapted by Hallock C. Campbell.

Datasheet 146b

This chart, from Appendix A of ANSI/AWS A5.10-88, updates Workbook Datasheet 36a, which Sam Corica adapted from Chapter 8 in the Welding Handbook, Vol. 4, 7th Edition, dated 1982. The new chart has over 60 revised

recommendations, inserted by the AWS Subcommittee on Aluminum and Aluminum Alloy Filler Metal. Footnote 2 has here been extended to cover SMAW electrodes recommended in the Appendix to ANSI/AWS A5.3-91.

Guide to the Choice of Filler Metal for General Purpose Aluminum Welding

Base Metal	201.0 206.0 224.0	319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0	356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 413.0, 443.0, A444.0	511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0	7004, 7005, 7039, 710.0, 712.0	6009 6010 6070	6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	5456	5454
1060, 1070, 1080, 1350	ER4145	ER4145	ER4043 ^a	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^{b,c}	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^a	ER4043 ^a
1100, 3003, Alclad 3003	ER4145	ER4145	ER4043 ^a	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^{b,c}	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^a	ER4043 ^a
2014, 2036	ER4145 ^a	ER4145 ^a	ER4145	—	—	ER4145	ER4145	—	—
2219	ER2319 ^a	ER4145 ^a	ER4145 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	—	ER4043 ^a
3004, Alclad 3004	—	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^a	ER5356 ^a
5005, 5050	—	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^a	ER5356 ^a
5052, 5652	—	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^a	ER5356 ^a
5083	—	—	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^b	ER5183 ^a	—	ER5356 ^a	ER5183 ^a	ER5356 ^a
5086	—	—	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^b	ER5356 ^b	—	ER5356 ^a	ER5356 ^a	ER5356 ^a
5154, 5254	—	—	ER4043 ^a	ER5356 ^b	ER5356 ^b	—	ER5356 ^a	ER5356 ^a	ER5356 ^a
5454	—	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER4043 ^a	ER5356 ^a	ER5356 ^a	ER5356 ^a
5456	—	—	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^b	ER5556 ^d	—	ER5356 ^a	ER5556 ^d	—
6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	ER4145	ER4145 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^b	ER5356 ^{b,c}	ER4043 ^a	ER4043 ^a	—	—
6009, 6010, 6070	ER4145	ER4145 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	—	—
7004, 7005, 7039 710.0, 712.0	—	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER5356 ^b	ER5356 ^b	—	—	—	—
511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0	—	—	ER4043 ^a	ER5356 ^b	—	—	—	—	—
356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 413.0, 443.0, A444.0	ER4145	ER4145 ^a	ER4043 ^a	—	—	—	—	—	—
319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0	ER4145 ^a	ER4145 ^a	—	—	—	—	—	—	—
201.0, 206.0, 224.0	ER2319 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—

NOTES

- Service conditions such as immersion in fresh or salt water, exposure to specific chemicals, or a sustained high temperature (over 150 F / 66 C) may limit the choice of filler metals. Filler metals ER5183, ER5356, ER5556, and ER5654 are not recommended for sustained elevated temperature service.
- Recommendations in this table apply to gas shielded arc welding processes. For pulse gas weld, only ER1100, ER1100, ER4043, ER4043, and ER4145 filler metals are ordinarily used. SMAW electrode E1100 may be used to weld 1100, 1350, ECI, and other commercially pure aluminum alloys E3003 to weld alloys 1100 and 3003, and E4043 to weld alloys 1100, 1350, ECI, 3003, series 5XXX (up to 2.5 percent Mg), series 6XXX, and Al-Si castings.
- Where no filler metal is listed, the base metal combination is not recommended for welding.

Base Metal	5154 5254	5086	5083	5052 5652	5005 5050	3004 Alclad 3004	2219	2014 2036	1100 3003 Alclad 3003	1060 1070 1080 1350
1060, 1070, 1080, 1350	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER4043 ^a	ER1100 ^a	ER4043 ^a	ER4145 ^a	ER4145	ER1100 ^a	ER1188 ^a
1100, 3003, Alclad 3003	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER4043 ^a	ER1100 ^a	ER4043 ^a	ER4145 ^a	ER4145	ER1100 ^a	—
2014, 2036	—	—	—	—	ER4145	ER4145	ER4145 ^a	ER4145 ^a	—	—
2219	ER4043 ^a	—	—	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER4043 ^a	ER2319 ^a	—	—	—
3004, Alclad 3004	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^b	ER5356 ^b	—	—	—	—
5005, 5050	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER5356 ^{b,c}	ER5356 ^b	—	—	—	—	—
5052, 5652	ER5356 ^b	ER5356 ^b	ER5356 ^b	—	—	—	—	—	—	—
5083	ER5356 ^b	ER5356 ^b	—	—	—	—	—	—	—	—
5086	ER5356 ^b	ER5356 ^b	—	—	—	—	—	—	—	—
5154, 5254	ER5654 ^d	—	—	—	—	—	—	—	—	—

a ER4145 may be used for some applications.

b ER4047 may be used for some applications.

c ER4043 may be used for some applications.

d ER5183, ER5356, or ER5556 may be used.

e ER2319 may be used for some applications. It can supply high strength when the weldment is postweld solution heat treated and aged.

f ER5183, ER5356, ER5554, ER5554, and ER5654 may be used. In some cases, they provide: (1) improved color match after anodizing treatment; (2) highest weld ductility; and (3) higher weld strength. ER5654 is suitable for sustained elevated temperature service.

g ER4643 will provide high strength (2 in. (12mm) and thicker groove welds in 6XXX alloys when postweld heat treated and aged.

h Filler metal with the same analysis as the base metal is sometimes used.

i Base metal alloys 5254 and 5652 are used for hydrogen peroxide service. ER5654 filler metal is used for welding both alloys for low temperature service (150 F / 66 C) and below.

j ER1100 may be used for some applications. See Note 2 above.

OMNI Products Company

1006 Red Bluff Road • Pasadena, Texas 77506 • (713) 477-0225

CERTIFICATE OF CHEMICAL ANALYSIS

SOLD TO:

DATE: 7-7-00

COMERCIAL CAMESUE
CARACAS

ORDER NO. FAX

PRODUCT: ER-5356

SIZE: 3/64"x15#

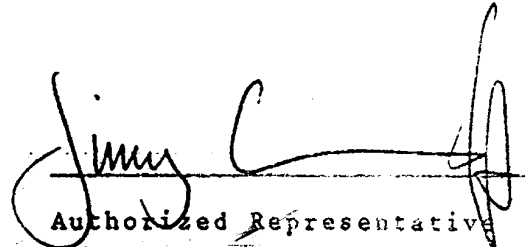
SPECIFICATION: AWS A5.10

HEAT/LOT: 14972-54077K

ACTUAL CHEMICAL ANALYSIS

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be
.070	.080	.004	.120	4.77	.130	.001	.100	.0005
Al								
Balance								

I/We certify that the chemical tests provided are correct and conform to the type and specification, as contained in the records of the company.


Authorized Representative

OMNI Products Company

1006 Red Bluff Road • Pasadena, Texas 77506 • (713) 461-1111

CERTIFICATE OF CHEMICAL ANALYSIS

SOLD TO:

COMERCIAL CAMESUR s.r.l.

DATE: 6-27-01

ORDER NO. FAX

PRODUCT: ER-4043

SIZE: 3/64x13.2#

SPECIFICATION: AWS A5.10

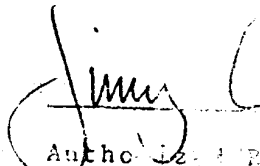
HEAT/LOT: 10184-479.0

ACTUAL CHEMICAL ANALYSIS

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	
5.17	.200	.010	.010	.020	.010	.020	.010	.005

Balance

I/We certify that the chemical tests provided are correct and conform to the type and specification, as contained in the records of the company.


Anthony J. R.



ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA
DE LOS MATERIALES
Teléfonos: 6051527-6051602/Teléfax: 6051515

REPORTE DE RESULTADOS

SOLICITANTE: Prof. Vicente Ignoto (CVS).

FECHA: 08/0807/01

TITULO: Análisis químico de Aleaciones de Aluminio.

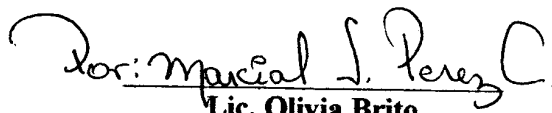
OBJETIVO: Determinar el contenido de Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), , Silicio (Si), Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Titanio (Ti) y Cromo (Cr).

PROCEDIMIENTO: Para la determinación de Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), , Silicio (Si), Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Titanio (Ti) y Cromo (Cr) se utilizó el método de Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama.

RESULTADOS:

Muestra	%Cu	%Fe	%Mn	%Cr	%Mg	%Zn	%Si	%Ti
ER 4043	0.003	0.05	0.003	0.003	0.007	0.02	--	ND
ER5356	0.003	0.10	0.008	0.14	2.67	0.003	0.10	0.11

ND: No se detecto


Lic. Olivia Brito
Jefe Lab. Químico Instrumental

NOTA: La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales garantiza los resultados reportados en este informe, pero no así la representatividad de la muestra, la cual fue suministrada por la parte interesada.



ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA
DE LOS MATERIALES
Teléfonos: 6051527-6051602/Telefax: 6051515

REPORTE DE RESULTADOS

SOLICITANTE: Ing. Isis Plaza

FECHA: 10/07/01

TITULO: Análisis químico de aleaciones de aluminio 1100 y 1200.

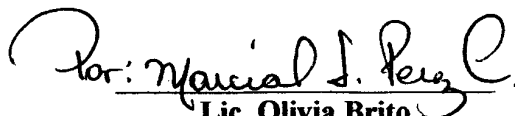
OBJETIVO: Determinar la composición química de una aleación de aluminio 1100 y 1200.

PROCEDIMIENTO: Para la determinación de Manganeso (Mn), Silicio (Si), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Hierro (Fe) y Titanio (Ti) se utilizó el método de Absorción Atómica por Espectrofotometría de Llama.

RESULTADOS:

Muestra	%Mn	%Cu	%Fe	%Zn	%Si	%Ti
1100	0.002	0.03	0.55	0.004	0.07	ND
1200	0.009	0.006	0.68	0.004	0.11	ND

ND= No se detecto


Lic. Olivia Brito
Jefe Lab. Químico Instrumental

NOTA: La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales garantiza los resultados reportados en este informe, pero no así la representatividad de la muestra, la cual fue suministrada por la parte interesada.