

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI/SAE 304 POR GMAW-P.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el **Br. Adrian A. Hurtado C.**
Para optar al título de
INGENIERO METALÚRGICO

Caracas, Noviembre 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI/SAE 304 POR GMAW-P.

TUTOR ACADÉMICO: Ing. Vicente Ignoto.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el **Br. Adrian A. Hurtado C.**
Para optar al título de
INGENIERO METALÚRGICO

Caracas, Noviembre 2004



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
Ciudad Universitaria de Caracas – Patrimonio Cultural de la Humanidad
Telef. 6051027/1033 - Fax. 6051515 www.ucv.ve/metalurgia.htm Caracas-Venezuela

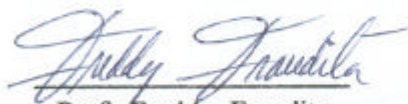


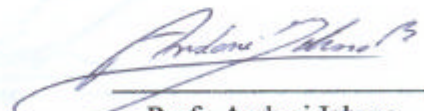
ACTA

Nosotros los abajo firmantes, miembros del jurado nombrado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el **Trabajo Especial de Grado** presentado por el Bachiller **Hurtado C., Adrián A. ; C.I. V-13.908.326**, el cual lleva por título:

“CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI/SAE 304 POR GMAW-P”.

Consideramos que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Metalúrgico, y acordamos, sin que ello signifique que nos hacemos solidarios de las ideas expuestas por el autor, lo declaramos **APROBADO**.


Prof. Freddy Fraudita
Jurado


Prof. Andoni Ichaso
Jurado


Prof. Vicente Ignoto.
Tutor



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES


Ciudad Universitaria de Caracas – Patrimonio Cultural de la Humanidad
Telef. 6051027/1033 - Fax. 6051515 www.ucv.ve/metalurgia.htm Caracas-Venezuela

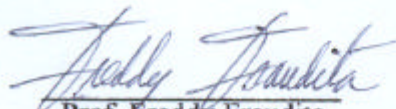


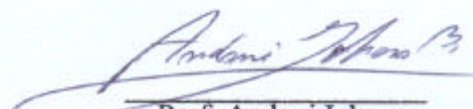
VEREDICTO

Los suscritos, miembros del jurado examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller **HURTADO CASTILLO ADRIAN ALEXEIS, C.I. V-13.908.326**, el cual lleva por título, **“CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI/SAE 304**, considerando que dicho trabajo constituye un aporte importante al estudio de la fabricación de uniones soldadas, y constituyendo un trabajo de excelente calidad, decidimos conferirle una **MENCIÓN HONORIFICA** como premio al esfuerzo realizado y estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de este trabajo de grado.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente acta en Caracas, a los tres días del mes de noviembre de 2004, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como coordinador del jurado el Prof. Vicente ignoto.


Prof. Vicente Ignoto
Tutor


Prof. Freddy Fraudita
Jurado


Prof. Andoni Ichaso
Jurado

RESUMEN
Hurtado C., Adrian A.

**“CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS DEL
ACERO INOXIDABLE AISI/SAE 304 POR GMAW-P”.**

Tutor Académico: Prof. Dr. Vicente Ignoto.
**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y
Ciencia de los Materiales. Año 2004, 120 páginas.**

Palabras Claves: Soldadura, GMAW-P, Transferencia pulsada, Zona Paramétrica.

El presente trabajo tiene como finalidad conseguir los parámetros óptimos del modo de transferencia metálica pulsada (una gota por pulso) definida como “Zona Paramétrica”, basándose en los criterios desarrollados por Amin, utilizando el proceso de soldaduras GMAW-P y empleando alambres macizos ER308L-Si con protección gaseosa (Argón con 2% de Oxígeno), para la unión a tope en posición plana de laminas de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 con un espesor de 8 mm y junta en V de 60°.

Para conseguir el desprendimiento de una gota por pulso se basa en el Criterio de Burnoff, Transferencia Metálica y en la Estabilidad del Arco, propuestos por Amin. Se Construye la Zona Paramétrica y de ella se obtienen los parámetros óptimos del pulso; Uno de los cuales puede ser: $I_p = 398$ A, $I_b = 63$ A, $T_p = 2,4$ ms, $T_b = 7,6$ ms, con una corriente media de 146,48 A, y velocidad de alimentación de 5 m/min, a un flujo de gas protector de 16 L/min.

Con la finalidad de caracterizar las juntas soldadas con los parámetros óptimos del modo de transferencia metálica pulsado, se realizan Ensayos No Destructivos (Inspección Visual y Líquidos Penetrantes), y Destructivos (Análisis Químico, Contenido de Ferrita, Evaluación Metalográfica, Dureza, Tracción y Dobleza) en conformidad con lo establecido por el código ASME sección IX, para luego realizar el Registro de Calificación de Procedimiento (RCP). Obteniendo como resultado La Evaluación del Procedimiento de Soldadura GMAW-P para la unión a tope (un pase) del Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 de espesor 8 mm, el cual califica según el Código ASME sección IX.

DEDICATORIA

A mi familia. En especial a mis padres, hermano y amigos, quienes me apoyaron durante este largo camino que significó crecer como persona y profesional. De corazón les digo, Muchas Gracias por estar a mi lado en este logro.

Adrian Alexeis, Hurtado Castillo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso.

A mis padres y a mi hermano, quienes me apoyaron desde el momento que emprendí este reto. Sin su apoyo no lo hubiera logrado.

A la Universidad Central de Venezuela, patrimonio cultural de la humanidad, por brindarme la oportunidad de estudiar y crecer, en especial a las Escuelas de Ingeniería Metalúrgica y en Ciencia de los Materiales.

Agradezco especialmente al Dr. Ing. Vicente Ignoto, tutor de este trabajo, por sus valiosos aportes y orientación.

Al personal que labora en el Centro Venezolano de Soldadura y demás centros de investigación de la Escuelas de Ingeniería Metalúrgica y en Ciencia de los Materiales por el aporte realizado a este trabajo especial de grado.

A mis tíos Pedro y Haydee Rojas que me brindaron un hogar y me alentaron en los momentos difíciles.

A los amigos que en todo momento estuvieron al lado mío.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron en hacer esta meta una realidad.

.....gracias a todos.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN

1.- FUNDAMENTO TEÓRICO	1
1.1.- Aceros Inoxidables	1
1.2.- Clasificación de los Aceros Inoxidables	1
1.2.1.- Aceros Inoxidables Austeníticos.	3
1.3.- Propiedades de los Aceros Inoxidables Austeníticos	4
1.3.1.- Resistencia a la Corrosión.	4
1.3.2.- Propiedades Mecánicas de los Aceros Inoxidables Austeníticos.	4
1.4.- Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304	5
1.5.- Soldabilidad de los Aceros Inoxidables	6
1.5.1.- Factores de Importancia en la Soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos.	6
1.5.1.1.- Propiedades físicas.	7
1.5.1.2.- Pre calentamiento y tratamiento térmico de los conjuntos soldados.	7
1.5.1.3.- Elección del metal de aporte y el proceso de soldadura.	7
1.5.1.4.- Contenido de ferrita.	8
1.6.- Estimación del Contenido de Ferrita	8
1.6.1.- Diagrama de Schaeffler.	9
1.6.2.- Diagrama de DeLong.	10
1.6.3.- Diagrama WRC – 1992.	12
1.6.4.- Métodos Magnéticos.	13
1.7.- Proceso de Soldadura GMAW	14
1.7.1.- Descripción del Proceso	14
1.7.2.- Ventajas y Limitaciones del Proceso de Soldadura GMAW..	15
1.7.3.- Equipos Utilizados en la Soldadura GMAW.	16
1.8.- Electrodo Utilizados en el Proceso GMAW	17
1.9.- Gases de Protección	18
1.10.- Variables que Intervienen en el Proceso GMAW	20
1.11.- Transferencia Metálica en el Proceso GMAW	24
1.11.1.- Transferencia por Cortocircuito.	24
1.11.2.- Transferencia Globular.	25
1.11.3.- Transferencia por Spray.	26
1.11.4.- Transferencia por Arco Pulsado.	26

1.12.- Parámetros de la Transferencia Metálica por Arco Pulsado	27
1.12.1.- Determinación de los Parámetros de la Transferencia por Arco Pulsado.	30
1.12.2.- Criterio de Burnoff.	30
1.12.3.- Criterio de la Transferencia Metálica.	33
1.12.4.- Limitación de la Corriente Pico y Corriente de Base	34
1.12.5.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento de Gota (Kv).	36
1.12.6.- Criterio de Estabilidad del Arco.	40
1.13.- Inspección y Calidad de la Soldadura	41
1.14.- Especificación del Procedimiento de Soldadura (EPS)	41
1.15.- Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)	42
2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	43
2.1.- Caracterización de los Materiales Base y Aporte	43
2.1.1.- Análisis Químico.	43
2.1.2.- Metalografía.	45
2.2.- Contenido de Ferrita en el Material Base	45
2.2.1.- Método Metalográfico.	45
2.2.2.- Método Químico.	46
2.2.3.- Método Magnético.	46
2.2.4.- Ensayos de Dureza.	46
2.3.- Preparación del Proceso de Soldadura	47
2.3.1.- Diseño y Preparación de las Juntas.	47
2.3.2.- Preparación de la Mesa de Trabajo.	48
2.3.3.- Fuente de Energía.	48
2.3.4.- Registro de los Oscilogramas y Parámetros de soldadura.	49
2.3.5.- Preparación y Limpieza del Material Base.	49
2.4.- Determinación de los Parámetros en la Soldadura	50
2.4.1.- Criterio de Burnoff.	50
2.4.2.- Criterio de Transferencia Metálica.	51
2.4.2.1.- Limitación de la Corriente Pico (Ip) y Tiempo Pico (Tp).	51
2.4.2.2.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento (Kv).	51
2.4.3.- Criterio de Estabilidad del Arco.	52
2.4.4.- Construcción de la Zona Paramétrica.	52
2.4.5.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana.	53
2.5.- Realización de la Soldadura en una Unión a Tope	53
2.5.1.- Calor Aportado y Potencia del Arco Eléctrico.	54
2.5.2.- Eficiencia del Proceso.	54
2.6.- Elaboración de las Probetas	55
2.7.- Ensayos No Destructivos	55
2.7.1.- Inspección Visual.	56
2.7.2.- Líquidos Penetrantes.	56

2.8.- Ensayos Destructivos	57
2.8.1.- Análisis Químico.	57
2.8.2.- Evaluación Metalográfica.	57
2.8.3.- Ensayo de Dureza.	59
2.8.4.- Medición de la Ferrita.	60
2.8.5.- Ensayos de Tracción.	60
2.8.6.- Ensayos de Dobleza.	62
2.9.- Registro de Calificación de Procedimiento	64
3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	65
3.1.- Caracterización de los Materiales	65
3.1.1.- Caracterización Química del Material Base y Aporte.	65
3.1.2.- Caracterización Metalográfica del Metal Base.	65
3.1.3.- Contenido de Ferrita en el Metal Base.	66
3.1.3.1.- Método Metalográfico.	66
3.1.3.2.- Método Químico.	67
3.1.4.- Caracterización Mecánica del Material Base.	69
3.2.- Determinación de los Parámetros en la Soldadura GMAW-P	70
3.2.1.- Criterio de Burnoff.	70
3.2.2.- Criterio de Transferencia Metálica.	71
3.2.3.- Criterio de Estabilidad del Arco.	80
3.2.4.- Restricción de la Zona Paramétrica.	80
3.2.5.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana.	88
3.4.- Ensayos No Destructivos	91
3.4.1.- Inspección Visual.	91
3.4.2.- Líquidos Penetrantes.	91
3.5.- Ensayos Destructivos	91
3.5.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura.	91
3.5.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura.	91
3.6.- Medición del Contenido de Ferrita	95
3.6.1.- Método Metalográfico.	95
3.6.2.- Método Químico.	95
3.7.- Ensayo de dureza	97
3.8.- Ensayo de Tracción	99
3.9.- Ensayo de Dobleza	102
3.10.- Elaboración del Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)	102
4.- ANALISIS DE RESULTADOS	105
4.1- Caracterización de los Materiales	105
4.1.1- Caracterización Química del Material Base y Aporte.	105
4.1.2.- Caracterización Metalográfica del Metal Base.	105

4.1.3.- Contenido de Ferrita en el Metal Base.	106
4.1.4.- Ensayo de Dureza en el Metal Base.	106
4.2.- Determinación de los Parámetros en la Soldadura GMAW-P	107
4.2.1.- Criterio de Burnoff.	107
4.2.2.- Criterio de Transferencia Metálica.	107
4.2.3.- Criterio de Estabilidad del Arco.	109
4.2.4.- Acotamiento de la Zona Paramétrica.	109
4.2.5.- Caracterización de Cordones sobre chapa plana.	111
4.3.- Diseño y Elaboración de la junta	112
4.4.- Ensayos No Destructivos en el Cordón de Soldadura	112
4.5.- Ensayos Destructivos en el Cordón de Soldadura	113
4.5.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura.	113
4.5.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura.	114
4.5.3.- Contenido de Ferrita en el Cordón de Soldadura.	115
4.5.4.- Dureza en el Cordón de Soldadura.	116
4.5.5.- Ensayo de Tracción.	116
4.5.6.- Ensayos de Dobleces.	117
5.- COCLUSIONES	118
6.- RECOMENDACIONES	119
7.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	120
8.- ANEXOS	124

INDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
Figura 1.1.-	Desarrollo del Acero Inoxidable AISI/SAE 304.	5
Figura 1.2.-	Diagrama de Schaeffler para determinar el contenido de ferrita en el cordón.	10
Figura 1.3.-	Diagrama de DeLong para determinar el contenido de ferrita en el cordón.	11
Figura 1.4.-	Diagrama WRC - 1992 para determinar el contenido de ferrita del metal depositado.	13
Figura 1.5.-	Diagrama del equipo para soldadura por arco de metal y gas.	16
Figura 1.6.-	Transferencia por Corto Circuito.	25
Figura 1.7.-	Transferencia tipo Globular.	25
Figura 1.8.-	Transferencia por Spray.	26
Figura 1.9.-	(A) Forma de las gotas desprendidas por este tipo de transferencia. (B) Esquema del ciclo de corriente que presenta la transferencia por arco pulsado.	27
Figura 1.10.-	Variables del arco y su energía aportada.	29
Figura 1.11.-	Grafico del Criterio de Burnoff para soldadura corto circuito y por arco pulsado.	31
Figura 1.12.-	Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff.	33
Figura 1.13.-	Oscilograma típico de corriente y voltaje representando separación de los picos de corriente entre cada pulso, produciendo una gota por pulso.	34
Figura 1.14.-	Oscilograma típico de corriente y voltaje representando separación de los picos de corriente entre cada pulso, produciendo dos gotas por pulso.	35
Figura 1.15.-	Relación entre I_p y T_p para diferentes tipos de separación de gota por pulso	35
Figura 1.16.-	Corriente y voltaje del arco empleando arco de soldadura convencional.	37
Figura 1.17.-	Histograma de distribución de frecuencia para los intervalos de tiempo a unas determinadas condiciones de soldadura.	37
Figura 1.18.-	Relación entre los niveles de corriente y volumen de modalidad de gota	38
Figura 1.19.-	Relación entre volumen de modalidad de gota y tiempo de modalidad de desprendimiento de gota.	38
Figura 1.20.-	Imposición de la curva paramétrica de separación (curva B) sobre la zona predicha por el Criterio de Burnoff.	39
Figura 1.21.-	Zona Paramétrica de Pulso estable. Donde A = Líneas radiales indicando el T_p , B = Curva de Potencia constante $I_p^{m} T_p = K_v$, C = Corriente de base limite, D = Zona estable predicha, F = Zona Paramétrica de pulso estable, G = Corriente de transición para Spray, H = $I_p = I_b = I_m$.	40
Figura 2.0.-	Esquema del procedimiento experimental.	44
Figura 2.1.-	Microscopio Óptico Olympus BX60 junto a la cámara digital Olympus DP12.	45
Figura 2.2.-	Ferritoscopio marca FISHER con sus respectivas muestras de calibración.	46
Figura 2.3.-	Diseño seleccionado para la fabricación de la junta a tope.	47
Figura 2.4.-	Esquema y medidas de la junta a tope.	47
Figura 2.5.-	Mesa de trabajo utilizada en la elaboración del cupón de prueba.	48
Figura 2.6.-	Equipo de soldadura MTE DIGITEC 450 con su sistema de alimentación y control.	48
Figura 2.7.-	Equipo Periféricos de recolección de datos, marca IMC, modelos MVA-1 y TC-1.	49
Figura 2.8.-	(A) Esquema que muestra los Parámetros Geométricos tomados de cordones depositados sobre chapa plana, (B) Relaciones de área para calcular la dilución	

	del cordón depositado sobre chapa plana.	53
Figura 2.9.-	Distribución de las probetas requeridas para los diversos ensayos en el cupón de prueba (medidas en mm).	55
Figura 2.10.-	Dimensiones de las probetas utilizadas para realizar metalografía y dureza.	58
Figura 2.11.-	Parámetros geométricos del cordón de soldadura.	58
Figura 2.11a.-	Esquema general utilizado para el cálculo de las relaciones de áreas, penetración y dilución en los cordones de soldadura.	59
Figura 2.12.-	Esquema representativo de los lugares en los que se medirá la dureza.	59
Figura 2.13.-	(a) Máquina universal de ensayos INSTRON modelo 8502.	
	(b) Acercamiento de la mordaza sujetando un probeta de tracción.	61
Figura 2.14.-	Diseño de probeta para ensayo de tracción de la junta soldada según la regla QW 462.1(a) del Código ASME sección IX.	62
Figura 2.15.-	Diseño de probeta para ensayo de DobleZ (cara y / o raíz) de la junta soldada de acuerdo a la regla QW-462.3(a) del Código ASME sección IX.	62
Figura 2.16.-	Máquina universal “LOSENHAUSEN”, modelo UHP 20, utilizada en los ensayos de doblez de la junta soldada.	63
Figura 2.17.-	Disposición y dimensiones de los rodillos utilizados para el ensayo de doblez, de acuerdo a lo especificado en QW- 466.2 del Código ASME sección IX.	63
Figura 3.1.-	Microestructura del material base en dirección A) longitudinal; B) transversal al sentido de laminación. En todas las micrografías la matriz clara representa la Austenita y el área oscura representa la Ferrita.	66
Figura 3.2.-	Fotomicrografía del material base indicando las distintas fases presente: ferrita (área oscura) en matriz de austenita (área clara). Atacadas con una solución electrolítica (10g de ácido oxálico en 100ml de agua) durante 15s a 23V.	67
Figura 3.3.-	Diagrama de Schaeffler, donde (A) indica el % de Ferrita del Material Base. (B) indica el % de Ferrita del Material de Aporte.	68
Figura 3.4.-	Diagrama de DeLong, donde A indica el % de ferrita y el Número de Ferrita del material base, y B el % de ferrita y el Número de Ferrita del material de aporte.	69
Figura 3.5.-	Relación entre I_m vs W_F para soldadura con corriente constante y pulsada usando un aporte ER 308L-Si de diámetro 1,2 mm.	70
Figura 3.6.-	Zona Paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff, para: $W_F = 5$ m/min; $I_m = 146,8$ A y $T = 9,6$ ms	72
Figura 3.7.-	Relación exponencial entre I_p y T_p para la condición de una gota promedio por pulso para un volumen de gota desprendida de $0,905$ mm ³ de material de aporte ER 308L-Si.	73
Figura 3.8.-	Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 5$ m/min; $I_m = 133$ A; $V_m = 28,88$ V).	74
Figura 3.9.-	Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 6$ m/min; $I_m = 207$ A; $V_m = 28,34$ V).	74
Figura 3.10.-	Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 7$ m/min; $I_m = 227$ A; $V_m = 28,19$ V).	75
Figura 3.11.-	Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 8$ m/min; $I_m = 232$ A; $V_m = 28,13$ V).	75
Figura 3.12.-	Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 9$ m/min; $I_m = 257$ A; $V_m = 27,96$ V).	76
Figura 3.13.-	Histograma $T_{dm} = 0,7$ ms ($W_F = 5$ m/min; $I_m = 133$ A; $V_m = 28,88$ V).	77

Figura 3.14.-	Histograma $T_{dm} = 1,3$ ms ($W_F = 6$ m/min; $I_m = 207$ A; $V_m = 28,34$ V).	77
Figura 3.15.-	Histograma $T_{dm} = 1,6$ ms ($W_F = 7$ m/min; $I_m = 227$ A; $V_m = 28,19$ V).	78
Figura 3.16.-	Histograma $T_{dm} = 1,9$ ms ($W_F = 8$ m/min; $I_m = 232$ A; $V_m = 28,13$ V).	78
Figura 3.17.-	Histograma $T_{dm} = 2,1$ ms ($W_F = 9$ m/min; $I_m = 257$ A; $V_m = 27,96$ V).	78
Figura 3.18.-	Gráfica $\text{Log}(V_{dm})$ vs. I_m para el intervalo de velocidades de alimentación ensayadas.	79
Figura 3.19.-	Gráfica T_{dm} vs. $\text{Log}(V_{dm})$ para el intervalo de velocidades de alimentación ensayadas.	80
Figura 3.20.-	Oscilograma del ensayo E2.2-2, cuyas condiciones son: $I_p = 385$; $I_b = 76$; $T_p = 2,2$; $T_b = 7,4$.	83
Figura 3.21.-	Oscilograma del ensayo E2.4-1, cuyas condiciones son: $I_p = 398$; $I_b = 63$; $T_p = 2,4$; $T_b = 7,2$.	83
Figura 3.22.-	Oscilograma del ensayo E2.7-1, cuyas condiciones son: $I_p = 361$; $I_b = 63$; $T_p = 2,7$; $T_b = 6,9$.	84
Figura 3.23.-	Oscilograma del ensayo E1.8-2, cuyas condiciones son: $I_p = 397$; $I_b = 89$; $T_p = 1,8$; $T_b = 7,8$.	84
Figura 3.24.-	Oscilograma del ensayo E2.4-1, cuyas condiciones son: $I_p = 424$; $I_b = 95$; $T_p = 1,5$; $T_b = 8,1$.	85
Figura 3.25.-	Oscilograma del ensayo E1.2-1, cuyas condiciones son: $I_p = 415$; $I_b = 108$; $T_p = 1,2$; $T_b = 8,4$.	85
Figura 3.26.-	Oscilograma del ensayo E1.8-3, cuyas condiciones son: $I_p = 426$; $I_b = 82$; $T_p = 1,8$; $T_b = 7,8$.	86
Figura 3.27.-	Oscilograma del ensayo E1.7-3, cuyas condiciones son: $I_p = 446$; $I_b = 82$; $T_p = 1,7$; $T_b = 7,9$.	86
Figura 3.28.-	Oscilograma del ensayo E1.4-2, cuyas condiciones son: $I_p = 448$; $I_b = 95$; $T_p = 1,4$; $T_b = 8,2$.	87
Figura 3.29.-	Oscilograma del ensayo E2.8-1, cuyas condiciones son: $I_p = 350$; $I_b = 63$; $T_p = 2,8$; $T_b = 6,8$	87
Figura 3.30.-	Oscilograma del ensayo E2.3-1, cuyas condiciones son: $I_p = 371$; $I_b = 76$; $T_p = 2,3$; $T_b = 7,3$.	88
Figura 3.31.-	Oscilograma del ensayo E2.4-1, cuyas condiciones son: $I_p = 366$; $I_b = 69$; $T_p = 2,5$; $T_b = 7,1$.	88
Figura 3.32.-	Cortes transversales de los cordones depositados sobre chapa plana para las condiciones E2.2-2, E2.4-1 y E2.7-1, respectivamente, indicando los perfiles geométricos.	89
Figura 3.33.-	Zona Paramétrica, encerrada en el ovalo gris se encuentra la zona de una gota por pulso (UGP). Las cruces azules indican los mejores parámetros para UGP, los encerrados en rojo son aquellos seleccionados para ensayar. Los rombos verdes y marrones indican algunos parámetros que ofrecen desprendimiento en la base y varias gotas por pulso, respectivamente.	90
Figura 3.34.-		
Figura 3.35.-	Macrografía de un Acero Inoxidable AISI/SAE 304 soldado con un electrodo ER308L-Si, y atacada con una solución electrolítica (10 g de ácido oxálico en 100 mL de agua) durante 30 s con una tensión de 23 V.	93
Figura 3.36.-	Evaluación micrográfica y macrográfica indicando la fase ferrita (zona oscura) en la matriz austenítica de las juntas soldadas con transferencia metálica por arco pulsado usando Argón con 2 % de Oxígeno como gas de protección.	95

Figura 3.37.-	Diagrama de Schaeffler indicando el % de ferrita del cordón de soldadura.	97
Figura 3.38.-	Diagrama de DeLong, donde se indica el % de ferrita y el Número de Ferrita del cordón de soldadura.	98
Figura 3.39.-	Valores de dureza Vicker obtenidos y representados por zonas del cordón de soldadura.	99
Figura 3.40.-	Probetas para el ensayo de tracción de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldadas con un electrodo ER308L-Si.	100
Figura 3.41.-	Curvas de Tracción Esfuerzo vs. Deformación para tres probetas del material base de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 soldadas con un electrodo ER308L-Si.	101
Figura 3.42.-	Ensayo de doblez de cuatro probetas de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldadas con un electrodo ER308L-Si.	103
Figura 4.1.-	Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica.	109
Figura 4.2.-	Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica y por el Criterio de Estabilidad del Arco.	110
Figura 4.3.-	Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica y por el Criterio de Estabilidad del Arco, y por las recomendaciones hechas por Avesta Welding (recuadro azul).	111
Figura 4.4.-	Aspecto superficial de las vistas de cara y raíz del cordón de soldadura realizado en un modo de transferencia metálica pulsado con las siguientes condiciones: Ip: 398 A; Ib: 63 A; tp: 2,4 ms; tb: 7,2 ms.	114

INDICE DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
Tabla 1.1.-	Clasificación de los Aceros Inoxidables según la AISI/SAE.	2
Tabla 1.2.-	Composición y propiedades de los diferentes tipos de aceros inoxidables.	2
Tabla 1.3.-	Propiedades mecánicas de la familia de Aceros Inoxidables Austeníticos 304.	5
Tabla 1.4.-	Relación Cromo/Níquel equivalente para los Aceros Inoxidables Austeníticos.	9
Tabla 1.5.-	Contenido de N ₂ relacionado con el proceso.	11
Tabla 1.6.-	Metales de Aporte para Aceros Inoxidables Austeníticos.	18
Tabla 1.7.-	Gases y mezclas de gases protectores para la soldadura GMAW.	19
Tabla 1.8.-	Características de los gases usados en la soldadura de aceros inoxidables.	23
Tabla 2.0.-	Parámetros fijos de las pruebas de Soldadura GMAW-P realizadas.	50
Tabla 3.1.-	Composición Química del Material Base AISI/SAE 304 (% en peso).	65
Tabla 3.2.-	Composición Química del Material de Aporte ER308L-Si.	65
Tabla 3.3.-	Fotomicrografía del material base indicando las distintas fases presente: ferrita (área oscura) en matriz de austenita (área clara). Atacadas con una solución electrolítica (10g de ácido oxálico en 100ml de agua) durante 15s a 23V.	67
Tabla 3.4.-	Contenido de Ferrita en el Material Base y en el Material de Aporte de Acuerdo al Método Químico.	68
Tabla 3.5.-	Valores reportados de Dureza Vickers (HVN ₂₀) del material base.	69
Tabla 3.6.-	Datos de la gráfica que representa el Criterio de Burnoff para el material de aporte ER308L-Si.	70
Tabla 3.7.-	Parámetros (Ip – Tp) que ofrecen una gota por pulso para W _F = 5,0 m/min.	71
Tabla 3.8.-	Parámetros de Soldadura con corriente constante y transferencia tipo spray.	74
Tabla 3.9.-	Valores de I _{dc} , T _{dm} y V _{dm} obtenidos a partir de las pruebas realizadas con transferencia tipo spray.	79
Tabla 3.10.-	Parámetros que forman la zona de Una Gota por Pulso dentro de la zona paramétrica para W _F = 5 m/min, I _m = 148 A, T = 9,6 ms. En rojo se muestran los ensayos seleccionados para caracterizar por ofrecer una gota por pulso.	81
Tabla 3.11.-	Parámetros fijados para la elaboración de la junta mediante el proceso GMAW-P.	91
Tabla 3.12.-	Valores de calor aportado, calor absorbido y eficiencia.	91
Tabla 3.13.-	Análisis Químico realizado al cordón de soldadura.	92
Tabla 3.14.-	Parámetros geométricos (promedio) del Cordón de soldadura del cupón de prueba. Medidas en (mm).	93
Tabla 3.15.-	Valores de porcentaje de ferrita obtenidos con el analizador de imagen Digital Micrograph ver. 3.4.2.	96
Tabla 3.16.-	Contenido de Ferrita en el material Base y en el Material de Aporte de acuerdo al método Químico.	96
Tabla 3.17.-	Contenido de Ferrita (%) dentro del cordón de soldadura utilizando diferentes métodos: Metalográfico, Químico y Magnético.	98
Tabla 3.18.-	Valores reportados de Dureza Vickers (HVN ₂₀) del material base.	99
Tabla 3.19.-	Valores de esfuerzo obtenidos de los ensayos de tracción de un Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 soldadas con un electrodo ER308L-Si	102
Tabla 4.1.-	Porcentaje de Ferrita (%) en Material Base y Aporte de acuerdo al método Metalográfico y Químico.	107

Tabla 4.2.-	Resumen de la Caracterización Geométrica de los Cordones depositados sobre chapa plana.	112
Tabla 4.3.-	Análisis Químico del Cordón, Metal Base y Aporte.	114
Tabla 4.4.-	Contenido de Ferrita (%) dentro del Metal Base, Aporte y Cordón de soldadura utilizando diferentes métodos: Metalográfico y Químico.	116
Tabla 4.5.-	Probetas para el ensayo de tracción de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldadas con un electrodo ER308L-Si.	117

INTRODUCCIÓN

Los Aceros Inoxidables fueron introducidos por primera vez en 1912 y desde entonces su volumen de producción y área de aplicación se ha multiplicado y diversificado, estableciéndose como aleaciones indispensables en muchos ramos de la industria especialmente en la industria petrolera, petroquímica, nuclear, naval, hogar, medicina y en la industria alimenticia entre otras. Estos vienen definidos como una aleación ferrosa que contienen básicamente hierro, carbono y cromo. Los dos primeros son elementos intrínsecos de cualquier acero y el cromo es el elemento que por encima de un 12% les proporciona pasividad frente a medios oxidantes y corrosivos a través de la formación de una película estable de óxido de cromo. Los Aceros Inoxidables pueden clasificarse según su contenido de elementos aleantes (composición química) o microestructura. Los grandes grupos en que se dividen los aceros inoxidable son: Aceros Inoxidables Austeníticos, Aceros Inoxidables Ferríticos, Aceros Inoxidables Martensíticos, los denominados Aceros Inoxidables (Austeníticos-Ferríticos) o Aceros Inoxidables Dúplex, y los Aceros Inoxidables Endurecidos por Precipitación PH.

En la década de 1940 se otorgó una patente de un proceso para alimentar un electrodo de alambre en forma continua a través de un arco protegido con gas. Este fue el principio del proceso MIG (metal y gas inerte), que ahora tiene la denominación oficial de la AWS Soldadura con Gas y Arco de Metal (GMAW). Este tipo de soldadura con arco se ha perfeccionado y agilizado desde sus primeros días, además se han creado procesos relacionados. Todos los metales de importancia comercial pueden ser soldados en cualquier posición con este proceso escogiendo el gas protector, electrodo y variables de soldadura apropiados.

En este trabajo se ha realizado una investigación con la finalidad de determinar el conjunto de parámetros en el proceso GMAW-P (I_p , I_b , T_p , T_b), para la unión del Acero Inoxidable AISI/SAE 304, de espesor 8 mm, usando como material de aporte un electrodo ER308L-Si, basándose en los criterios desarrollados por Amin para obtener parámetros de pulso estables con protección gaseosa. Igualmente se evaluará y calificará el procedimiento de soldadura, mediante la elaboración de una Especificación de Procedimiento de Soldadura (EPS) y calificación a través de un Registro de Calificación de Procedimiento (RCP).

1.- FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1.- Aceros Inoxidables

Según Zbigniew^[1] los aceros inoxidables vienen definidos como una aleación ferrosa que contienen básicamente hierro, carbono y cromo. Los dos primeros son elementos intrínsecos de cualquier acero y el cromo es el elemento que por encima de un 12% les proporciona pasividad frente a medios oxidantes y corrosivos a través de la formación de una película estable de óxido de cromo^[2]. Los aceros inoxidables también pueden contener elementos de aleación tales como el Si, Mn, P, S, Ni, Mo, Cu, Ti, Nb, N, B, W, Se y Te.

De acuerdo con la ASM^[2] todos estos elementos de aleación tienen una influencia más o menos acentuada sobre cada una de las fases cristalinas que nos van a determinar la estructura metalúrgica y, por consiguiente, el tipo de acero inoxidable. Los aceros inoxidables fueron introducidos por primera vez en 1912, su volumen de producción y área de aplicación se ha multiplicado y diversificado, estableciéndose como aleaciones indispensables en muchos ramos de la industria especialmente en la industria petrolera, petroquímica, nuclear, naval, hogar, medicina y en la industria alimenticia entre otras.

1.2.- Clasificación de los Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables pueden clasificarse según su contenido de elementos aleantes (composición química) o microestructura. La microestructura depende de la composición química del acero (particularmente el cromo y el níquel) y del tratamiento térmico al cual es sometido el acero. Los grandes grupos en que se dividen los aceros inoxidables son: Aceros Inoxidables Austeníticos, Aceros Inoxidables Ferríticos, Aceros Inoxidables Martensíticos, los denominados Aceros Inoxidables (Austeníticos-Ferríticos) o Aceros Inoxidables Dúplex, y los Aceros Inoxidables Endurecidos por Precipitación^[3] o PH.

En la tabla 1.1 se presenta la clasificación de los Aceros Inoxidables según lo indicado por la American Iron and Steel Institute (AISI/SAE)^[3] con sus respectivos elementos químicos de importancia como el Cromo y el Níquel.

Tabla 1.1.- Clasificación de los Aceros Inoxidables según la AISI/SAE.

Clasificación según AISI/SAE	Elementos químicos
2XX	Cromo - Níquel - Manganeso
3XX	Cromo – Níquel
4XX	Cromo

Según A. Sidney^[4] la Ferrita y la Austenita son las microestructuras o fases principales de los aceros inoxidables, pudiendo estar presente también la Martensita. La presencia de estas depende de los elementos de aleación y del tratamiento térmico empleado: por ejemplo el níquel favorece la presencia de la Austenita y un temple favorece la presencia de la Martensita. La Ferrita en general es blanda y con baja resistencia mecánica, la Austenita se caracteriza por su gran tenacidad y la Martensita por su dureza y resistencia mecánica, así como por su fragilidad. En relación con esto, los Aceros Inoxidables presentan un comportamiento característico según sea el contenido y porcentaje de las fases presentes. D. Reyna^[5] representa en la tabla 1.2 cuatro familias o grupos de aceros inoxidables comparando sus contenidos en cromo y níquel, así como, también menciona algunas de sus propiedades.

Tabla 1.2.- Composición y propiedades de los diferentes tipos de aceros inoxidables.

Acero Inoxidable	%C	%Cr	%Ni	Estructura	Propiedades
Austenítico	0,03/0,2	17 a 27	6 - 20	Austenita	Son los más usados y conocidos. No magnéticos. Dúctiles, tenaces y buena resistencia a la corrosión. Buena soldabilidad.
Ferrítico	0,1/0,3	15 a 30	--	Ferrita	Son magnéticos, de baja resistencia mecánica. Presentan fragilidad en la ZAT. Buena resistencia a la corrosión, sobre todo los de alto cromo.
Martensítico	0,1/1,2	13 a 18	--	Martensita	Son magnéticos. Resistentes y de alta dureza. Baja resistencia a la corrosión. Mala Soldabilidad y tenacidad.
Austenítico/ Ferrítico	0,05/0,08	18 a 19	3 - 8	Dúplex (Austenita y Ferrita)	Son magnéticos. Excelente resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas y buena soldabilidad.

La simbolización más extendida de los aceros inoxidable es la clasificación según el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI)^[4], la cual generalmente se compone de tres cifras seguidas en ocasiones de una o más letras. Winkler et al.^[6] basados en sus estudios expresan que los Aceros Inoxidables Austeníticos son el grupo más utilizado, este debido a sus buenas propiedades de resiliencia y unos relativamente bajos valores en el límite elástico, en general por sus excelentes propiedades tanto mecánicas como de resistencia a la corrosión.

1.2.1.- Aceros Inoxidables Austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos^[4] son aleaciones de hierro, carbono, cromo y níquel. En donde el contenido de carbono está comprendido entre el 0,02% y el 0,2% C, el cromo está comprendido entre el 16% y el 26%Cr y el de níquel entre el 6% y el 26%Ni. Siendo el níquel, en este tipo de acero, el que le proporciona la estructura austenítica.

Pender Jamaes^[7] ofrece como características principales de este grupo de Aceros Inoxidables de estructura austenítica que no son templables, no ofrecen respuesta magnética, presentan una buena ductilidad y son fácilmente soldables. Estas dos últimas cualidades se presentan más acusadas cuanto menor es el contenido en carbono. Es el grupo más generalizado y el que reúne mejores condiciones de inoxidable y ductilidad.

La resistencia, resiliencia, alargamiento y en general todas las propiedades mecánicas dependen del estado del material, es decir del tratamiento mecánico o térmico realizado, pero se pueden dar los siguientes valores como típicos en un acero inoxidable austenítico: carga de rotura de 65 kg/mm^2 , alargamiento del 40%, la resiliencia y el alargamiento son elevados^[7].

Los tipos más usuales de acuerdo con la ASM^[4] son los AISI/SAE 304, 316, 308, 309 y 310. Los aceros inoxidables de calidad “L” se caracterizan por su bajo contenido en carbono. Otra variante de la familia austenítica son los aceros inoxidables estabilizados. Este tipo de aceros posee contenidos bajos de niobio o de titanio, del orden de 0.8%. Con estas adiciones se evita o disminuye la corrosión intergranular. A este tipo de Aceros Inoxidables pertenecen los tipos AISI/SAE 321 y 347.

1.3.- Propiedades de los Aceros Inoxidables Austeníticos

1.3.1.- Resistencia a la Corrosión

La formación en la superficie del metal de una capa de óxido de cromo es lo que hace que el acero sea inoxidable, esta película o capa se denomina capa pasivante. Es una capa de óxido que no se desprende y protege al acero de la oxidación. Este sistema de protección es parecido al que se utiliza al pintar las superficies, o recubrirlas con cinc o níquel. La diferencia es que en los inoxidables esta capa pasivante la genera la propia aleación. Cuando esta capa se rompe sólo hace falta el contacto con el ambiente para hacer crecer de nuevo la película pasivante y el material volverá a tener la misma resistencia a la corrosión que antes de romperse la película. Se podría decir que tienen la propiedad de reparación automática. Según H. Uhlig^[8] una mejor resistencia a la corrosión general se obtiene con los aceros inoxidable austeníticos a medida que aumenta el contenido de cromo. Para obtener la resistencia óptima a la corrosión las aleaciones austeníticas deben ser calentadas a 1050 – 1100 °C y enfriadas rápidamente en agua o en chorro de aire. Las aleaciones austeníticas que contienen Mo (316, 316L, 317) poseen una mejor corrosión en los medios que contienen cloruros, medios ácidos no oxidantes diluidos y a la corrosión en ranuras. El efecto beneficioso del Mo en estos aspectos no se extiende a los aceros inoxidables exentos de Ni.

1.3.2.- Propiedades Mecánicas de los Aceros Inoxidables Austeníticos

Al ser la austenita una forma de cristalización del hierro con elevada densidad atómica (FCC), se endurece considerablemente cuando se somete a deformación en frío. Esto explica porque los aceros austeníticos solo se endurecen por deformación. En general los aceros inoxidables austeníticos exhiben moderada resistencia y excelente tenacidad y ductilidad. Son estas propiedades las que hacen que en la soldadura, materiales de aporte austeníticos sean frecuentemente usados en combinaciones disímiles con aceros al carbono, Aceros Inoxidables Ferríticos y Aceros Inoxidables Martensíticos^[9]. En la tabla 1.3 se muestra algunos valores característicos de los Aceros Inoxidables Austeníticos de la familia 304.

Tabla 1.3.- Propiedades mecánicas de la familia de Aceros Inoxidables Austeníticos 304.

AISI/SAE	Esfuerzo de Máximo (MPa)/(Ksi)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)/(Ksi)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
304 (A, C)	515/75	205/30	40	50
304 (B, C)	620/90	310/45	30	40
304 (25% deformado)	860/125	515/75	10	--
304 (50% deformado)	1035/150	760/110	7	--
304L C	480/70	170/25	35	50
304L (A, C)	480/70	170/25	40	50
304L (B)	620/90	310/45	30	40
304B4	515/75	205/30	30	16-27

(A) Trabajado en caliente, (B) trabajado en frío, y (C) recocido

1.4.- Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304

El acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304^[4], surge de la necesidad de conseguir un material con una alta resistencia a la corrosión, esto se consigue disminuyendo el contenido de carbono de la aleación AISI/SAE 302, luego se le realizan modificaciones para disminuir la cantidad de carburos de cromo que precipitan en el momento de soldar estos materiales alterando la resistencia mecánica. En la figura 1.1 se muestra un diagrama de la evolución de los Aceros Inoxidables Austeníticos en donde se muestra las reformas realizadas al acero 302 hasta conseguir las distintas variaciones.

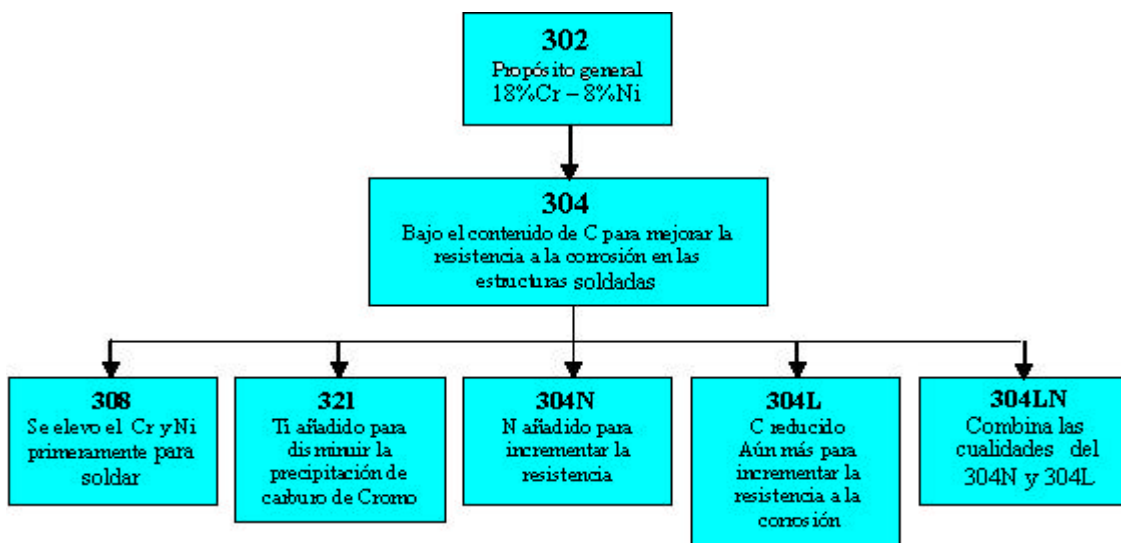


Figura 1.1.- Desarrollo del Acero Inoxidable AISI/SAE 304.

1.5.- Soldabilidad de los Aceros Inoxidables

Reyna^[5] y Brooks^[9], dicen que la soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos, en general, es buena al igual que sus propiedades físicas. Es notoria la diferencia en soldabilidad que presentan los Aceros Inoxidables Austeníticos frente a los Aceros Inoxidables Ferríticos, Aceros Inoxidables Martensíticos y Aceros Inoxidables Dúplex. Como ejemplo de estas diferencias tenemos que la conductividad térmica de los Aceros Inoxidables Austeníticos es aproximadamente la mitad que la de los Aceros Inoxidables Ferríticos, lo cual se traduce en una reducción de la energía necesaria para realizar una soldadura de igual penetración en ambos materiales. También, el pozo de soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos es más viscoso que el de los Aceros Inoxidables Ferríticos y Aceros Inoxidables Martensíticos, lo cual reduce el riesgo por falta de fusión. Estas son algunas de las características por las cuales la soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos es mejor que la de los otros aceros de esta familia.

La unión de los Aceros Inoxidables Austeníticos puede ser realizada sin ningún problema por un gran número de métodos, siendo los más utilizados la Soldadura por Arco de Metal y Gas (GMAW), por Arco de Tungsteno y Gas (GTAW), por Arco con Núcleo de Fundente (FCAW), y por Arco Manual Metálico Protegido (SMAW)^[10]. Los Aceros Inoxidables son aleaciones complejas en las que intervienen un buen número de elementos químicos. Para conseguir una aceptable soldabilidad, el metal aportado y zonas adyacentes deben presentar propiedades lo más semejantes posible a las del material de base, tanto desde el punto de vista mecánico como de resistencia a la corrosión, factor este último que constituye una de las razones fundamentales por la cual se seleccionan estos materiales.

1.5.1.- Factores de Importancia en la Soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos

Pese a ser buena la soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos, para la obtención de un óptimo resultado en la soldadura, es necesario realizar correctamente el soldeo^[5] y tenerse en cuenta la influencia de los siguientes factores:

1. Propiedades físicas.
2. Pre calentamiento y tratamiento térmico del conjunto soldado.
3. Elección del material de aporte y del proceso de soldeo.
4. Contenido de ferrita.

1.5.1.1.- Propiedades físicas: Los Aceros Inoxidables Austeníticos tienen un coeficiente de dilatación aproximadamente de 50% a 70% más elevado que los aceros al carbono, mientras que la conductividad térmica es aproximadamente un 40% inferior, por lo que la ZAT será más estrecha que la resultante de la soldadura de otros tipos de aceros. La contracción de las juntas soldadas será, pues, considerablemente mayor, y la soldadura deberá realizarse prestando una atención especial al riesgo de posibles distorsiones o deformaciones del conjunto soldado. Por lo que es recomendable:

- Realizar el soldeo con baja aportación de calor, para lo cual es indispensable seleccionar el método adecuado de soldadura.
- Distribuir el calor de forma equilibrada, lo que se consigue gracias a una planificación previa de las distintas etapas de soldadura y efectuándola lo más simétricamente posible.
- Procurar que el nivel de embridamiento del conjunto soldado sea el más bajo posible.

1.5.1.2.- Pre calentamiento y tratamiento térmico de los conjuntos soldados: Este tipo de práctica se realiza únicamente cuando se trabaja con espesores de chapa gruesa, o por razones químicas en donde el material está en contacto con un medio agresivo, el cual implica un riesgo de corrosión bajo tensión. En ambos casos se acostumbra realizar un tratamiento térmico de alivio de tensiones. Fuera de estos casos particulares, ninguna operación de soldadura de un Acero Inoxidable Austenítico requiere un pre calentamiento o un tratamiento térmico.

1.5.1.3.- Elección del metal de aporte y el proceso de soldadura: Es fundamental seleccionar adecuadamente, tanto el material de aporte como el proceso de soldadura a utilizar, ya que el agrietamiento en caliente es un inconveniente típico en la soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos.

Las grietas en los cordones son debidas a una acumulación de impurezas, provenientes del metal de aporte. En aquellas zonas donde el metal solidifica de último pueden formarse superficies débiles, propensas a romperse y generar grietas bajo la influencia de la propia tensión de contracción de la soldadura. Como solución a este problema se sugiere reducir las tensiones mecánicas, eliminar las impurezas (principalmente de S y P). La elección del proceso de soldadura debe realizarse sobre la base de los siguientes criterios:

- aporte y distribución de calor
- operatividad
- velocidad de soldeo
- inconvenientes de resistencia a la corrosión del metal depositado.
- disponibilidad comercial y costo.

1.5.1.4.- Contenido de ferrita: La ferrita es capaz de disolver elementos tales como el azufre y el fósforo que de otro modo segregarían, por tal motivo una cierta cantidad de esta fase en la soldadura tiene una influencia favorable en la reducción del agrietamiento en caliente. Además su presencia es positiva al incrementar las propiedades mecánicas de la unión, pero al mismo tiempo, es desfavorable por disminuir la resistencia a la corrosión frente a ácidos oxidantes calientes.

En sus investigaciones Rabenstiener^[12] considera óptimo el contenido de ferrita entre 5 y 15% para beneficiarse con las ventajas de esta fase y reducir en gran medida los inconvenientes en la solidificación. El porcentaje de ferrita requerido en la unión soldada se consigue seleccionando adecuadamente tanto el material de aporte como los parámetros en el proceso de soldadura. Gretoft y Karisson^[13], encuentran en sus investigaciones que la distribución de las tensiones durante la solidificación es uno de los factores que contribuye a que sea beneficiosa la presencia de la fase. Ellos establecen desde el punto de vista de la soldadura, que los mejores resultados se obtienen cuando la secuencia de solidificación comienza con la fase ferrítica y posteriormente la transformación de fase a austenita en estado sólido.

1.6.- Estimación del Contenido de Ferrita

La determinación del contenido de ferrita en un Acero Inoxidable puede llevarse a cabo por métodos químicos (diagramas de Schaeffler, DeLong y WRC), magnéticos y metalográficos. Más de 40 años han pasado desde que un gran número de investigadores se han volcado a la tarea de formular cantidades de relaciones empíricas con el fin de estimar el contenido de ferrita en el depósito de soldadura partiendo de la composición química de los materiales, la tabla 1.4 muestra de manera cronológica a algunos investigadores con sus modelos empíricos.

Tabla 1.4.- Relación Cromo/Níquel equivalente para los Aceros Inoxidables Austeníticos.

AUTOR	AÑO	RELACIONES EMPIRICAS
Schaffler	1949	$Cr_{EQ} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$ $Ni_{EQ} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$
De Long	1956	$Cr_{EQ} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$ $Ni_{EQ} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn + 30\%N$
Hull	1973	$Cr_{EQ} = \%Cr + 1,21\%Mo + 0,48\%Si + 0,14\%Nb + 2,27\%V + 0,72\%W + 2,2\%Ti + 0,21\%Ta + 2,48\%Al$ $Ni_{EQ} = \%Ni + 2,45\%C + 0,11\%Mn - 0,0086\%Mn^2 + \%14,2\%N + 0,41\%Co + 0,44\%Cu$
Hammer-Svenson	1979	$Cr_{EQ} = \%Cr + 1,37\%Mo + 1,5\%Si + 2\%Nb + 3\%Ti$ $Ni_{EQ} = \%Ni + 30\%C + 0,3\%Mn + 14,2\%N + \%Cu$
Espy	1982	$Cr_{EQ} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb + 5\%V + 3\%Al$ $Ni_{EQ} = \%Ni + 30\%C + 0,87\%Mn + 0,33\%Cu + A(\%N - 0,045)$ Donde $A=30$ si $N<0,2$; $A=22$ si $0,21 < N < 0,25$; $A=2$ si $0,25 < N < 0,35$
McCowan, Siewert y Olson (WRC-1988)	1988	$Cr_{EQ} = \%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb$ $Ni_{EQ} = \%Ni + 35\%C + 20\%N$
Kotecki y Siewert (WRC-1992)	1992	$Cr_{EQ} = \%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb$ $Ni_{EQ} = \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0,25\%Cu$

1.6.1.- Diagrama de Schaeffler

De estos investigadores, el primero, y de gran importancia es Schaeffler^[14] ya que determinó el porcentaje de ferrita utilizando medios metalográficos. En la figura 1.2 se muestra el diagrama utilizado en sus investigaciones. Él establece que el contenido de ferrita del metal depositado es función de diversos factores, tales como:

- Proceso (longitud de arco y contaminación atmosférica, especialmente de N_2).
- La forma y solape al realizar el depósito.
- La velocidad de enfriamiento del cordón.
- Los parámetros de soldeo.
- El grado de dilución del metal base.

En las aplicaciones en las que el contenido de ferrita en el metal aportado sea crítico, el procedimiento de soldadura debe controlarse rigurosamente. Las variaciones de nitrógeno y cromo afectan significativamente al contenido de ferrita. Una técnica inadecuada puede

producir contaminaciones por nitrógeno (N_2) debidas al exceso en la longitud del arco y a la pérdida de cromo por oxidación. El resultado puede ser una unión con un contenido de ferrita menor a la especificada.

Niquel Equivalente = $\%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$

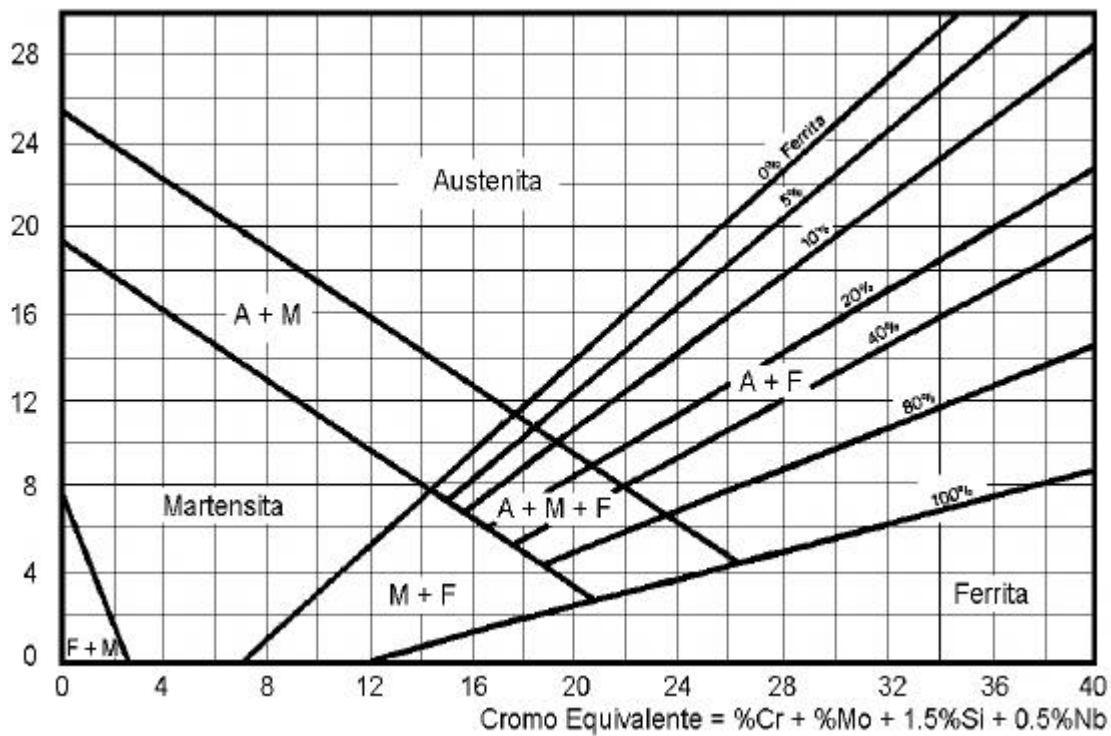


Figura 1.2.- Diagrama de Schaeffler para determinar el contenido de ferrita en el cordón.

1.6.2.- Diagrama de DeLong

El diagrama de DeLong^[15] fue publicado en 1974 incorporando el concepto de Número de Ferrita (FN) al diagrama, posteriormente este concepto fue estandarizado en la norma A4.2 de la AISI/AWS^[16]. W.T. DeLong^[15] reconoció en 1956 el efecto del nitrógeno en la promoción de la austenita a expensa de la ferrita, por lo que realizó un nuevo diagrama que abarca un intervalo de composiciones más estrictas e incluye el efecto del nitrógeno. La determinación del N_2 presenta algunas dificultades al requerir un análisis de este gas. En consecuencia Brooks^[9] recomienda en ausencia de este dato emplear los siguientes valores (tabla 1.5) aproximados en función del proceso de soldeo:

Tabla 1.5.- Contenido de N₂ relacionado con el proceso.

PROCESO	N ₂ en el metal depositado
SMAW	0,060
GTAW	0,045
GMAW (hilo tubular)	0,090
GMAW	0,140

En la práctica se evidencia que estos valores de N₂ para el proceso GMAW, en la investigación realizada por Ignoto^[17] se encontraron valores entre 169 – 194 ppm N₂ en depósitos de soldadura trabajando con un acero inoxidable 316L. El diagrama modificado por DeLong es mostrado en la figura 1.3.

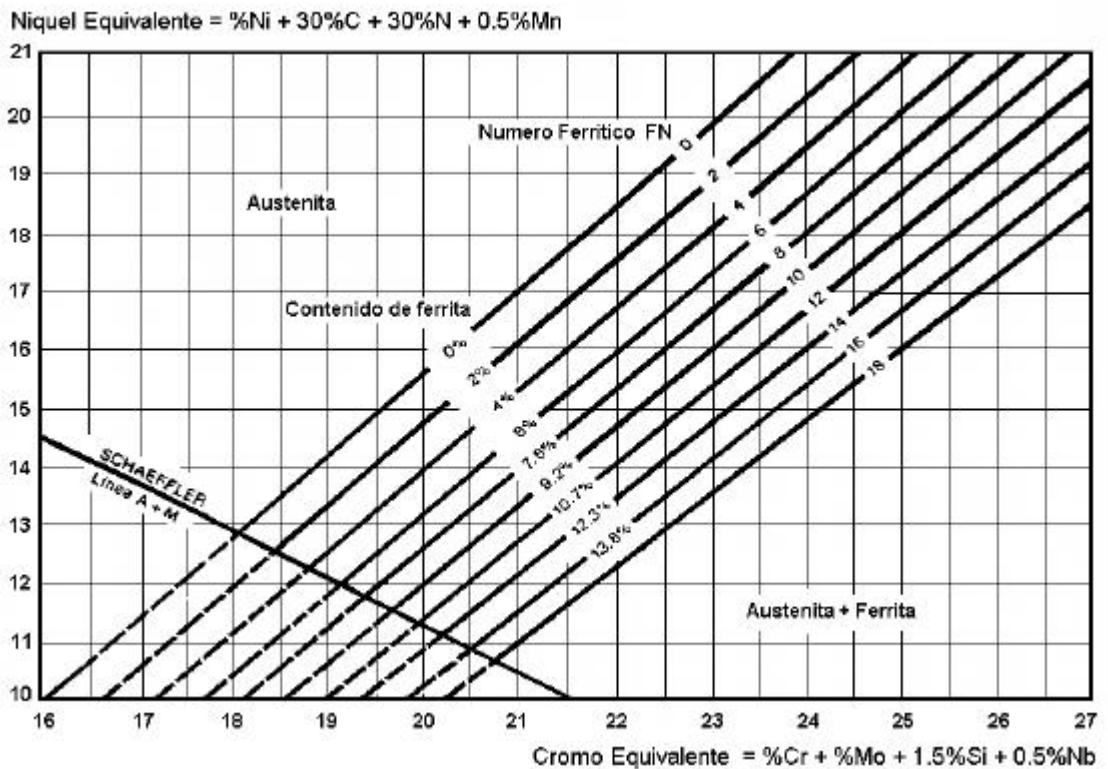


Figura 1.3.- Diagrama de DeLong para determinar el contenido de ferrita en el cordón.

Los diagramas más conocidos y utilizados son el Schaeffler y el de DeLong y ambos tienen los mismos principios de ejecución y uso. En el eje de las ordenadas presentan la suma de porcentajes de elementos formadores de austenita, multiplicados por unos coeficientes que son función de la influencia austenitizante del elemento de aleación. Esta suma se expresa en

forma de equivalente de níquel, como elemento más representativo de la formación de austenita. Y en el eje de las abscisas tenemos, la suma de porcentajes de elementos formadores de ferrita asimismo multiplicados por coeficientes que representan su influencia ferritizante. En este caso la suma se expresa en forma de cromo equivalente, que es el elemento básico formador de ferrita. Ambos diagramas difieren en los elementos tomados en consideración para determinar los equivalentes de níquel y de cromo, y, en los coeficientes aplicados a estos elementos.

1.6.3.- Diagrama WRC - 1992

Este diagrama soportado por la Welding Research Council (WRC) indica la más reciente actualización desde que en 1988 Siewert^[18] desarrolla un diagrama de mayor exactitud utilizando recursos electrónicos. Posteriormente McCowan y Siewert^[19] continuaron estudiando la mejor manera de representar el diagrama, hasta que en 1992 Kotecki y Siewert^[20] presentan el diagrama WRC – 1992, mostrado en la figura 1.4. Este diagrama presenta una mejora respecto al diagrama de DeLong al expandir el término de cromo equivalente incluyendo un mayor número de metales para la soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos y Dúplex. De este diagrama se nota que los factores equivalentes para el manganeso y silicio han sido eliminados y el factor multiplicador para el carbono, nitrógeno y niobio han sido alterado. Este diagrama muestra los diferentes modos de solidificación posibles en estos dos grupos de aceros inoxidables nombrados.

En función de los materiales involucrados en la soldadura y el proceso de soldadura, se puede seleccionar el diagrama que mejor se ajuste a la práctica realizada. Es importante determinar el número de ferrita (FN) ya que este, según la norma ANSI/AWS A4.2^[16] implantada por la AWS en 1991, tiene como finalidad reducir las grandes variaciones de niveles de ferrita determinados sobre un espécimen dado, usando diferentes técnicas de medidas por diferentes laboratorios. El Número de Ferrita (FN) es aproximadamente igual al porcentaje en volumen de ferrita, a niveles por debajo de 8 FN. Por encima de este valor, ocurre una desviación, donde el valor de FN excede el porcentaje en volumen de ferrita. Por ejemplo, un metal de soldadura con 16 FN contiene aproximadamente 13,8 % volumen.

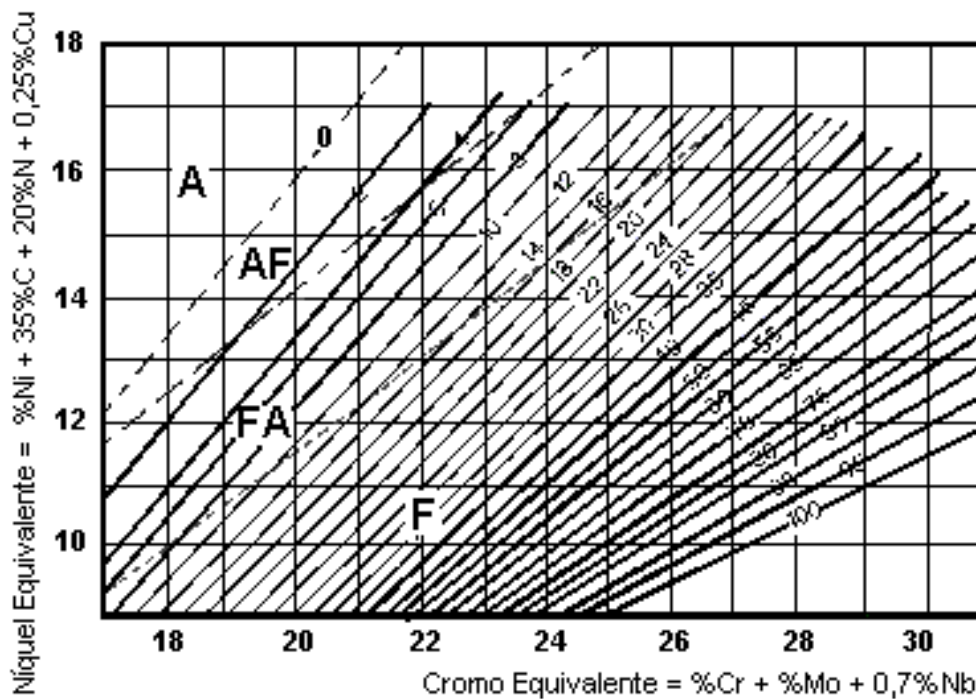


Figura 1.4.- Diagrama WRC - 1992 para determinar el contenido de ferrita del metal depositado.

1.6.4.- Métodos Magnéticos

Debido a las propiedades magnéticas de la ferrita, su contenido puede ser medido, a temperatura ambiente, usando un método aprobado por la WRC en donde se reportan valores del Número de Ferrita (FN), de esta manera se hacen más precisas y económicas las mediciones. Para tal fin existe un instrumento que proporciona una respuesta confiable sobre el contenido de ferrita en las juntas soldadas, estos instrumentos de medición o “ferritómetros” calibrados de acuerdo con los estándares de ANSI/AWS A4.2 1997^[16] son los más utilizados hoy en día. La reproducibilidad del método es ± 1 FN, si esta está en el intervalo de 0 FN 28, lo que supera la posibilidad de los demás métodos utilizados para determinar el contenido de ferrita. El método magnético para la medición del contenido de ferrita se aplica a lo largo de la línea central de los cordones, con acabado liso y sin tratamiento térmico. Lefebvre et al.^[21] concuerdan en que el FN no sólo depende de la composición del aporte puro, sino de la relación entre el aporte y el metal depositado en la junta (dilución), así como también de la longitud de arco y de la energía.

Las características químicas y metalográficas tienen baja reproducibilidad, son ensayos destructivos y poco indicados para la evaluación de las juntas soldadas, por eso los dispositivos de medición magnética son de mayor utilidad; sin embargo, deben considerarse como procedimientos de medida de carácter auxiliar^[23]. Por ello, se ha establecido un número arbitrario normalizado de ferrita (FN). A niveles bajos el número de ferrita y el porcentaje de esta son idénticos. Sin embargo, estos dos valores difieren sustancialmente cuando se presentan grandes cantidades de ferrita en los Aceros Inoxidables. Lefebvre et al.^[21] establecen que el límite inferior de la ferrita, considerado entre 3 y 4, es apropiado para los Aceros Inoxidables Austeníticos que no presentan servicio a temperaturas extremas, ni están sometidos a ambientes corrosivos que ataquen la ferrita.

1.7.- Proceso de Soldadura GMAW

1.7.1.- Descripción del Proceso

La soldadura por arco de metal y gas (Gas Metal Arc Welding, GMAW) es definida por la AWS^[24] como un proceso de soldadura por arco que emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gas suministrado externamente y sin aplicación de presión. Una vez que el operador ha hecho los ajustes iniciales, el equipo puede regular automáticamente las características eléctricas del arco. Por todo esto, en efecto, los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad y dirección del desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola. En la década de 1940 se otorgó una patente de un proceso para alimentar un electrodo de alambre en forma continua a través de un arco protegido con gas. Este fue el principio del proceso MIG (metal y gas inerte), que ahora tiene la denominación oficial de AWS Soldadura con Gas y Arco de Metal (GMAW). Este tipo de soldadura con arco se ha perfeccionado y agilizado desde sus primeros días, además se han creado procesos relacionados^[7]. En algunos de ellos se emplea un electrodo de alambre desnudo, protegido con un gas inerte. En otros se emplea un electrodo fundente similar a los convencionales para soldadura con arco. En determinados procesos se hace uso de una combinación de electrodo con núcleo de fundente y un gas protector^[25].

El proceso GMAW puede operar en modalidades mecanizada, semiautomática o automática. Todos los metales de importancia comercial, como el acero al carbono, el acero de baja aleación y de alta resistencia mecánica, el acero inoxidable, el aluminio, el cobre, el titanio y las aleaciones de níquel se pueden soldar en cualquier posición con este proceso escogiendo el gas protector, electrodo y variables de soldadura apropiados^[24].

1.7.2.- Ventajas y Limitaciones del Proceso de Soldadura GMAW

Los usos del proceso GMAW, desde luego, están regidos por sus ventajas; sin embargo, como en cualquier proceso de soldadura, hay ciertas limitaciones que restringen el uso de la soldadura por arco de metal y gas^[5,24]. A continuación se presentan una serie de ventajas y limitaciones del proceso.

VENTAJAS

- Es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- GMAW no tiene la restricción de tamaño de electrodo limitado que se presenta con la soldadura por arco de metal protegido.
- Puede soldarse en todas las posiciones, algo que no es posible con la soldadura por arco sumergido.
- Se logran tasas de deposición bastante mas altas que con la soldadura por arco de metal protegido.
- Las velocidades de soldadura son más altas que con soldadura por arco de metal protegido gracias a la alimentación continua del electrodo y a las mayores tasas de deposición del metal de aporte.
- Como la alimentación de alambre es continua, es posible depositar soldaduras largas sin parar o volver a comenzar.
- Cuando se utiliza transferencia por aspersion, es posible lograr mayor penetración que con la soldadura por arco de metal protegido, lo que puede permitir el uso de soldaduras de filete más pequeñas para obtener una resistencia mecánica equivalente.
- Casi no se requiere limpieza después de la soldadura porque no se produce mucha escoria.

LIMITACIONES

- El equipo de soldadura es más complejo, más costoso y menos transportable que el de SMAW.
- GMAW es más difícil de usar en lugares de difícil acceso porque la pistola soldadora es más grande que un porta-electrodos de arco de metal protegido, y la pistola debe estar cerca de la unión para asegurar que el metal de soldadura esté bien protegido.
- El arco de soldadura debe protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector. Esto limita las aplicaciones en exteriores a menos que se coloquen barreras protectoras alrededor del área de soldadura.
- Los niveles relativamente altos de calor radiado y la intensidad del arco pueden hacer que los operadores se resistan a utilizar el proceso.

1.7.3.- Equipos Utilizados en la Soldadura GMAW

El equipo necesario para GMAW se muestra en la figura 1.5. Los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola soldadora y cables, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia y la fuente de gas protector^[24].

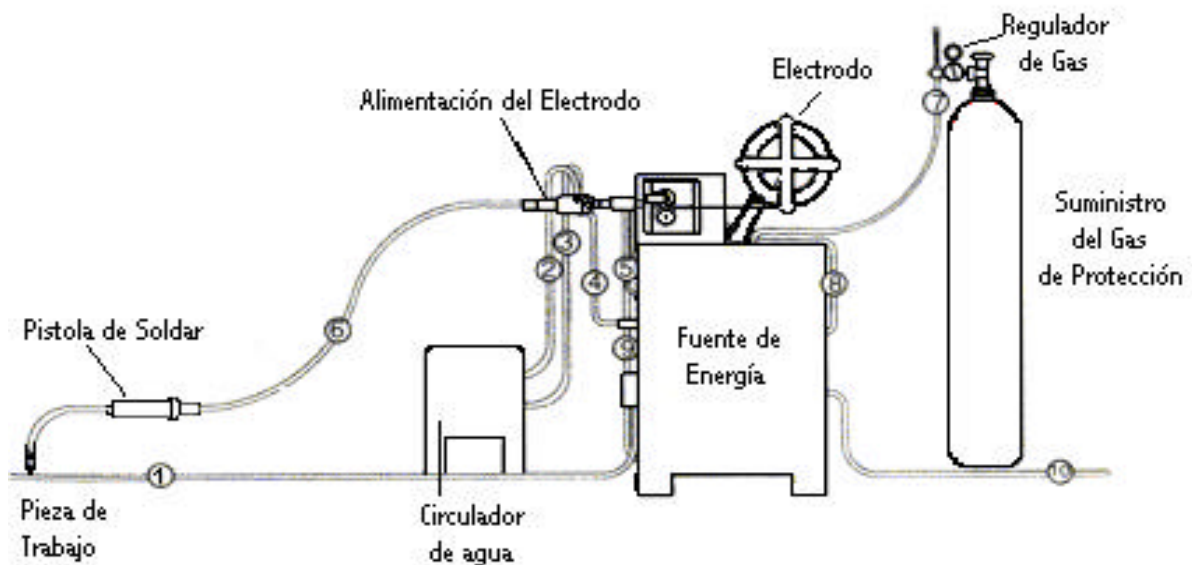


Figura 1.5.- Diagrama del equipo para soldadura por arco de metal y gas.

Riesco Hernandez^[25] indica que la pistola guía el electrodo consumible y conduce la corriente eléctrica y el gas protector al trabajo, de modo que proporciona la energía para establecer y mantener el arco, fundir el electrodo, y proporcionar la protección necesaria contra la atmósfera del entorno.

Se emplean dos combinaciones de unidad de alimentación de electrodo y fuente de potencia para lograr la autorregulación de la longitud del arco que se desea. Generalmente, esta regulación se efectúa con una fuente de potencia de voltaje (potencial) constante en conjunción con una unidad de alimentación de electrodo de velocidad constante. Como alternativa, una fuente de potencia de corriente constante proporciona una curva volt-ampere de caída, y la unidad de alimentación del electrodo se controla por medio del voltaje del arco.

1.8.- Electrodo Utilizados en el Proceso GMAW

La American Welding Society^[24] establece que el electrodo a seleccionar debe satisfacer ciertas demandas del proceso en cuanto a estabilidad del arco, comportamiento de transferencia de metal y características de solidificación. También debe producir un depósito de soldadura compatible en gran medida con las características del metal base (composición química, resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad entre otras), además de proporcionar una unión libre de discontinuidades.

Es preciso considerar también otras propiedades como la resistencia a la corrosión, la respuesta al tratamiento térmico, la resistencia al desgaste. Sin embargo, todas estas consideraciones tienen importancia secundaria en comparación con la compatibilidad metalúrgica del metal base y el metal de aporte. En la tabla 1.6 se indican los metales de aportación recomendados para varios tipos de acero inoxidable austenítico. Se ha utilizado la designación AWS por ser la más utilizada. Consiste en los mismos números de designación

del material base (según AISI/SAE), la letra E indica electrodo, R varilla y T electrodo tubular.

Tabla 1.6.- Metales de Aporte para Aceros Inoxidables Austeníticos.

TIPO DE ACERO INOXIDABLE	ELECTRODO RECOMENDADO
201, 202	ER209, E219, E308
301, 302, 304, 305	ER308
304L	ER308, ER347
309	ER309
309S	ER309L
310, 314	ER310
310S	ER310
316	ER316
316L	ER316L
316H	ER16-8-2, ER316H
317	ER317
317L	ER317L
321	ER321
330	ER330
347, 348	ER347

1.9.- Gases de Protección

El gas protector que se emplea para el proceso de arco de metal y gas puede ser inerte (argón o helio), reactivo (CO_2) o una mezcla de ambos tipos. Se puede agregar un poco de oxígeno y en ocasiones de hidrógeno a fin de lograr otras características de arco y geometría de franja de soldadura deseadas. La selección del mejor gas protector se basa en la consideración del material que se va a soldar y del tipo de transferencia de metal que se empleara para la transferencia.

La función primaria del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales, al calentarse hasta su punto de fusión en aire, presentan una marcada tendencia a formar óxidos y, en menor grado, nitruros. Además, el oxígeno reacciona con el carbono del acero fundido para formar monóxido y dióxido de carbono. Estos diversos productos de reacción pueden

causar deficiencias de la soldadura, como escoria atrapada, porosidad y pérdida de ductilidad del metal de soldadura. Los productos de reacción mencionados se forman con facilidad en la atmósfera si no se toman precauciones para excluir el oxígeno y el nitrógeno^[26].

De lo expuesto en este punto hay que definir que los gases activos son aquellos que reaccionen químicamente con el baño, y por consecuencia que los gases inertes son aquellos que se mantienen inalterables durante el proceso. Cabe destacar que en las mezclas al ser uno de los componentes activos se considera la mezcla de gases como un gas protector activo. En la tabla 1.7 se muestran los principales gases que se usan con GMAW. Casi todas son mezclas de gases inertes que también pueden contener pequeñas cantidades de oxígeno o el empleo de nitrógeno al soldar cobre es una excepción^[7].

Annelise y Macedo^[27] evaluaron los aspectos metalúrgicos en la soldadura de un Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldado con un electrodo ER308L – Si, utilizando el proceso GMAW – P, en donde los gases de protección Argón/Oxígeno mostraron una influencia sobre la calidad de los depósitos, el oxígeno genera menos ferrita y mayor penetración. En los ensayos de tracción de las juntas se reportaron valores superiores al 95% del metal base.

Tabla 1.7.- Gases y mezclas de gases protectores para la soldadura GMAW.

GAS PROTECTOR	ACCIÓN QUÍMICA	OBSERVACIÓN
Argón (Ar)	Inerte	Para soldar la mayoría de los metales, excepto acero.
Helio (He)	Inerte	En aleaciones de Al y Cu para un máximo calor y minimizar la porosidad.
Ar + He (20-80 a 50-50%)	Inerte	En aleaciones de Al y Cu para un máximo calor y minimizar la porosidad. Arco más silencioso y estable.
Ar y Cloro (Cl)	Esencialmente inerte	Todas las aleaciones, para minimizar la porosidad.
Nitrógeno N ₂	Reductora	En el cobre, permite un arco muy potente; se usa más en Europa.
Ar + 25-30% N ₂	Reductora	En cobre, un arco mas potente y suave, de control mas fácil que solo con N ₂ .
Ar + 1-2% O ₂	Oxidantes	Aceros Inoxidables y de aleaciones, también para algunas aleaciones de cobre desoxidado.
Ar + 3-5% O ₂	Oxidantes	Aceros al carbono, aleaciones de acero y acero inoxidable, se requiere electrodo desoxidado.
Ar + 20-30% O ₂	Oxidantes	Diversos aceros, se usa principalmente con arco en

		corto circuito.
Ar + 5% O ₂ + CO ₂	Oxidantes	Diversos aceros, requiere electrodo desoxidado.
CO ₂	Oxidantes	Aceros al carbono y de baja aleación.

Cortesía de The Lincoln Electric Company

1.10.- Variables que Intervienen en el Proceso GMAW

La selección de los parámetros del proceso (amperaje, voltaje, velocidad de desplazamiento, tasa de flujo del gas, extensión del electrodo, etc.) requiere una estrategia de prueba y error para determinar un conjunto de condiciones aceptable. Esto se dificulta aún más por la interdependencia de muchas de las variables; sin embargo, el conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir consistentemente soldaduras de buena calidad. Estas variables no son del todo independientes, y cuando se modifica una casi siempre es necesario modificar una o más de las otras. Para obtener los resultados que se buscan se requiere considerable habilidad y experiencia en seleccionar los valores óptimos para cada aplicación. Estos valores óptimos son afectados por interrelación de las variables, las cuales son seguidamente mencionadas y explicadas brevemente^[5,24].

• Corriente de soldadura

Si todas las demás variables se mantienen constantes, el amperaje de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o con la rapidez de fusión siguiendo una relación no lineal. Al variarse la velocidad de alimentación, el amperaje de soldadura varía de manera similar si se emplea una fuente de potencia de voltaje constante.

• Polaridad

El término polaridad describe la conexión eléctrica de la pistola soldadora en relación con los terminales de una fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de potencia de la pistola se conecta a la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo positivo (CCEP), y se le ha dado arbitrariamente el nombre de “polaridad inversa”. Cuando la pistola se conecta a la terminal negativa, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo negativo (CCEN), que originalmente se llamó “polaridad directa”. Casi todas las aplicaciones de GMAW emplean corriente continua con el electrodo positivo (CCEP). Esta condición produce un arco estable, una transferencia de metal uniforme,

relativamente pocas salpicaduras, buenas características de la franja de soldadura y profundidad máxima de penetración para una amplia gama de corrientes de soldadura.

- **Voltaje del arco y Longitud del arco**

Son términos que con frecuencia se usan indistintamente. Pese a ello, cabe señalar que si bien están relacionados entre sí, son diferentes. En GMAW, la longitud del arco es una variable crítica que debe controlarse cuidadosamente. Por ejemplo, en la modalidad de arco de rocío con escudo de argón, un arco que es demasiado corto experimenta cortocircuitos momentáneos que causan fluctuaciones de la presión, mismas que bombean aire hacia el chorro del arco y producen porosidad, pérdida de ductilidad y absorción de nitrógeno. Si el arco es demasiado largo, tiende a un movimiento lateral aleatorio que afecta tanto la penetración como el perfil de la superficie de la franja. Además, un arco largo puede romper el escudo de gas. En el caso de arcos enterrados con escudo de dióxido de carbono, un arco largo produce salpicaduras excesivas y también porosidad; si el arco es demasiado corto, la punta del electrodo hará cortocircuito con el charco de soldadura, causando inestabilidad. El voltaje del arco, en caso de que todas las variables se mantienen constantes, se relaciona directamente con la longitud del arco. Aunque la variable que interesa y que debe controlarse es la longitud del arco, es más fácil vigilar el voltaje. Por esta razón, y por el requisito normal de que en el procedimiento de soldadura se especifique el voltaje del arco, éste es el término que se usa con mayor frecuencia.

- **Velocidad del Recorrido**

En algunas aplicaciones, la velocidad de avance se define como un objetivo, y las demás variables se seleccionan de modo que se logre la configuración de soldadura deseada a esa velocidad. En otros casos, la velocidad podría ser una variable dependiente, elegida de modo que se obtenga una soldadura con la calidad y uniformidad deseada en las mejores condiciones posibles con la combinación de las demás variables. Si todas las demás condiciones se mantienen constantes, la penetración de la soldadura es máxima a una velocidad de recorrido intermedia. Cuando se reduce la velocidad de recorrido, se incrementa la deposición del metal de aporte por unidad de longitud. A velocidades muy bajas, el arco actúa sobre el charco de

soldadura no sobre el metal base, con lo que se reduce la penetración efectiva. Otra consecuencia es una franja de soldadura ancha.

- **Extensión del Electrodo**

La extensión del electrodo es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo. Un aumento en la extensión del electrodo produce un aumento en su resistencia eléctrica. El calentamiento por resistencia, a su vez, hace que se eleve la temperatura del electrodo, lo que aumenta ligeramente la tasa de fusión del electrodo. La mayor resistencia eléctrica hace que aumente la caída de voltaje entre el tubo de contacto y el trabajo, cosa que es detectada por la fuente de potencia, la cual compensa este aumento reduciendo la corriente. Esto de inmediato reduce la tasa de fusión del electrodo y permite que se acorte la longitud física del arco. En consecuencia, a menos que haya un incremento de voltaje en la máquina soldadora, el metal de aporte se depositará en una franja de soldadura angosta y de corona alta. La extensión de electrodo deseable generalmente está entre 6 y 13 mm (1/4 y 1/2 pulg) para la transferencia en cortocircuito y entre 13 y 25 mm (1/2 y 1 pulg) para los demás tipos de transferencia de metal^[30,31].

- **Orientación del Electrodo**

Como en todos los procesos de soldadura por área, la orientación del electrodo con respecto a la unión a soldar afecta la forma y la penetración de la franja de soldadura, y este efecto sobre la franja es mayor que el del voltaje del arco o el de la velocidad de recorrido. Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, la técnica se denomina “soldadura de revés con ángulo de arrastre”. Cuando el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, la técnica es “soldadura de derecha con ángulo de ataque”. La anchura y la penetración de la soldadura depende del tipo de método utilizado, por ejemplo cuando se utiliza la técnica de soldeo hacia adelante disminuye la penetración y el cordón se hace más ancho y plano, por lo que se recomienda para el soldeo de pequeños espesores. La máxima penetración se obtiene con el soldeo hacia atrás con un ángulo de 25°.

- **Posición de Soldadura**

Casi todas las soldaduras con GMAW en la modalidad de aspersion se efectúan en las posiciones plana u horizontal, pero si el nivel de energía es baja, la GMAW a pulsos y en cortocircuito se puede usar en todas las posiciones. A fin de vencer la atracción de la gravedad sobre el metal de soldadura al soldar en las posiciones vertical y cenital, para la regular se usan electrodos de diámetro pequeño, con transferencia de metal en cortocircuito o bien por aspersion con corriente continua a pulsos. Los electrodos con diámetros de 1.14 mm (0.045 pulgadas) son los mas apropiados para soldar fuera de posición plana. El bajo aporte de calor permite al charco de soldadura solidificarse rápidamente Cuando se suelda lámina en la posición vertical, la dirección de soldadura más efectiva casi siempre es hacia abajo. Si se suelda en la posición "plana", la inclinación del eje de soldadura respecto al plano horizontal influirá en la forma de la franja de soldadura, en la penetración y en la velocidad de recorrido.

- **Tamaño del Electrodo**

El tamaño (diámetro) del electrodo influye en la configuración de la franja de soldadura. Un electrodo de mayor tamaño requiere una corriente mínima más alta que un electrodo pequeño con las mismas características de transferencia de metal. Las corrientes altas, a su vez, producen mayor fusión del electrodo y por consiguiente depósitos de soldadura más grandes y fluidos. Otra consecuencia de las corrientes altas es el aumento en la tasa de deposición. No obstante, la soldadura en posición vertical o cenital por lo regular se efectúa con electrodos de menor diámetro y con corrientes más bajas.

- **Gas Protector**

La escogencia del gas protector al igual que la del electrodo depende, del tipo de material que se va a soldar y del proceso que se va a utilizar^[16]. Para seleccionar o realizar algún tipo de recomendación en cuanto a gases de protección según el tipo de acero inoxidable a soldar, se debe estar basado en los efectos particulares que los gases generan en la soldadura. La tabla 1.8 muestra las características de los gases usados en la soldadura de aceros inoxidables:

Tabla 1.8.- Características de los gases usados en la soldadura de aceros inoxidables.

GASES DE PROTECCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Argón	Gas inerte de elevada densidad (1,4 veces más denso que el aire). Proporciona un arco estable, es efectivo en posición plana, el plasma del arco genera un núcleo de alta energía (penetración tipo dedo). Baja conductividad térmica y potencial de ionización, también es usado en soldadura de materiales ferrosos.
Helio	Gas inerte con alta conductividad térmica, baja densidad y elevado potencial de ionización, produce cordones anchos y con menos penetración que con argón. Es apropiado cuando se requiere un incremento en la velocidad de soldadura.
Argón/Helio	Mezcla usado en transferencia por corto circuito para mejorar el aporte calorífico y las características de fusión. En ocasiones se utilizan mezclas ternarias Ar/He/CO ₂ para mejorar la penetración.
Argón/Oxígeno	El oxígeno mejora la estabilidad del arco y la transferencia metálica, produce un charco de soldadura fluido y controlable, disminuyendo la tensión superficial (mojabilidad), mejora la forma y el aspecto de los cordones (penetración), así como la velocidad de soldadura, y minimiza el socavamiento.
Ar/O ₂ /CO ₂	Mezcla de argón, hasta 5%O ₂ y 10%CO ₂ son versátiles pero poco utilizadas por problemas metalúrgicos como la oxidación. Proporciona una protección adecuada y características de arco deseable en la transferencia por corto circuito. Aumenta la penetración y la velocidad de soldadura.

1.11.- Transferencia Metálica en el Proceso GMAW

La mejor forma de describir las características del proceso GMAW es en términos de cuatro mecanismos básicos empleados para transferir metal del electrodo a la pieza a soldar^[5].

- 1.- Transferencia por cortocircuito.
- 2.- Transferencia globular.
- 3.- Transferencia por aspersión.
- 4.- Transferencia por arco pulsado.

El tipo de transferencia conseguida en la soldadura es el resultado de la interacción y el compromiso de varios factores, tales como: magnitud y tipo de la corriente de soldadura, tensión de soldeo, diámetro del electrodo, composición del electrodo, extensión del electrodo, gas protector; Siendo los de mayor influencia los dos primeros.

1.11.1.- Transferencia por Cortocircuito

La transferencia por cortocircuito se produce por contacto del alambre con el metal depositado (figura 1.6). Se obtiene este tipo de transferencia cuando la intensidad y la tensión de soldeo son bajas. Se utiliza este tipo de transferencia para el soldeo en posición vertical bajo techo. Parámetros típicos: Voltaje 16 a 22 V; Intensidad 50 a 150 A. Se reconoce porque el arco es corto, suele haber proyecciones y hay un zumbido característico. Este tipo de transferencia se obtiene fácilmente con dióxido de carbono.

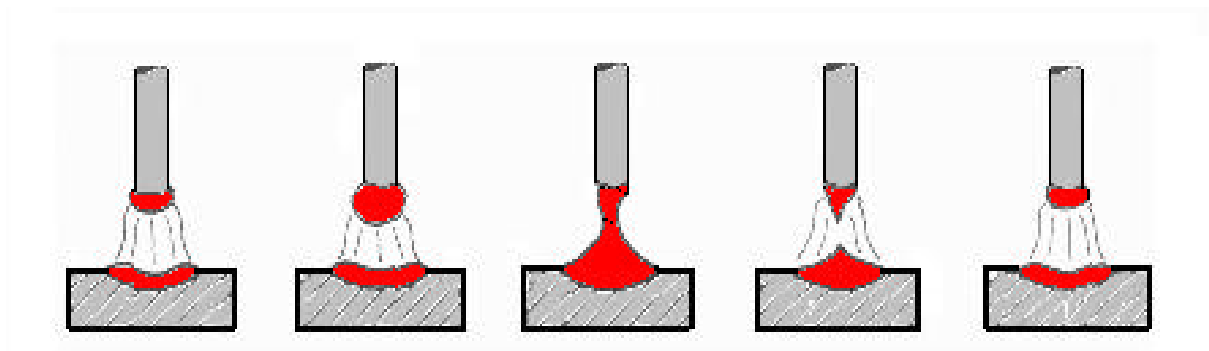


Figura 1.6.- Transferencia por Corto Circuito.

1.11.2.- Transferencia Globular

La transferencia globular se caracteriza por la formación de una gota relativamente grande de metal fundido en el extremo del alambre (figura 1.7). Ésta se va formando hasta que cae al baño fundido por su propio peso. Este tipo de transferencia no suele tener aplicaciones tecnológicas por la dificultad de controlar adecuadamente el metal de aportación y porque suele provocar faltas de penetración y sobre espesores elevados. Parámetros típicos: Voltaje de 20 a 35 V; Intensidad 70 a 255 A.

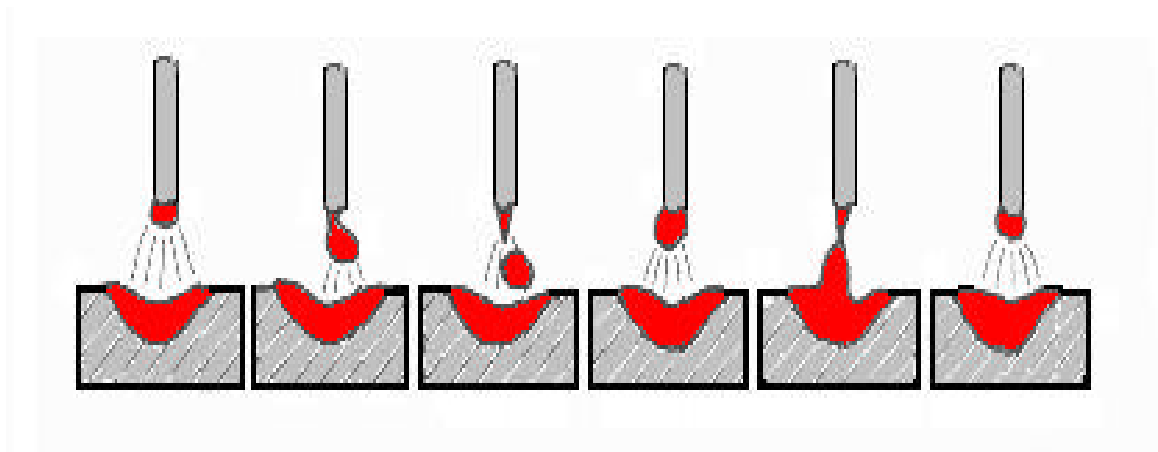


Figura 1.7.- Transferencia tipo Globular.

1.11.3.- Transferencia por Spray

En la transferencia por arco-spray las gotas son iguales o menores que el diámetro de alambre y su transferencia se realiza desde el extremo del alambre al baño fundido en forma de una corriente axial de gotas finas (corriente centrada con respecto al alambre). Se obtiene este tipo de transferencia con altas intensidades y altos voltajes, intensidades de 150 a 500A y voltajes de 24 a 40 V. Los gases inertes favorecen este tipo de transferencia (ver figura 1.8). La transferencia en spray se puede aplicar para cualquier material base pero no se puede utilizar en espesores muy finos porque la corriente de soldeo es muy alta. Se consiguen grandes tasas de deposición y rentabilidad.

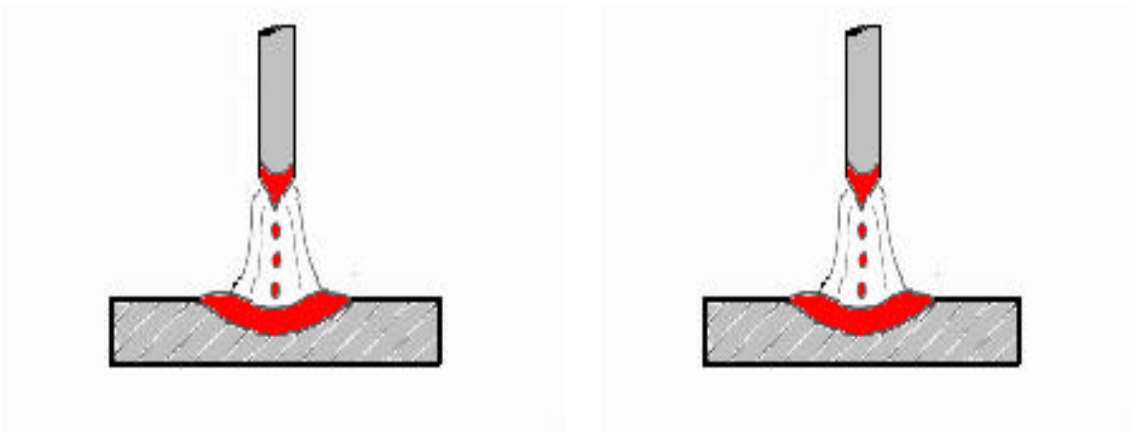
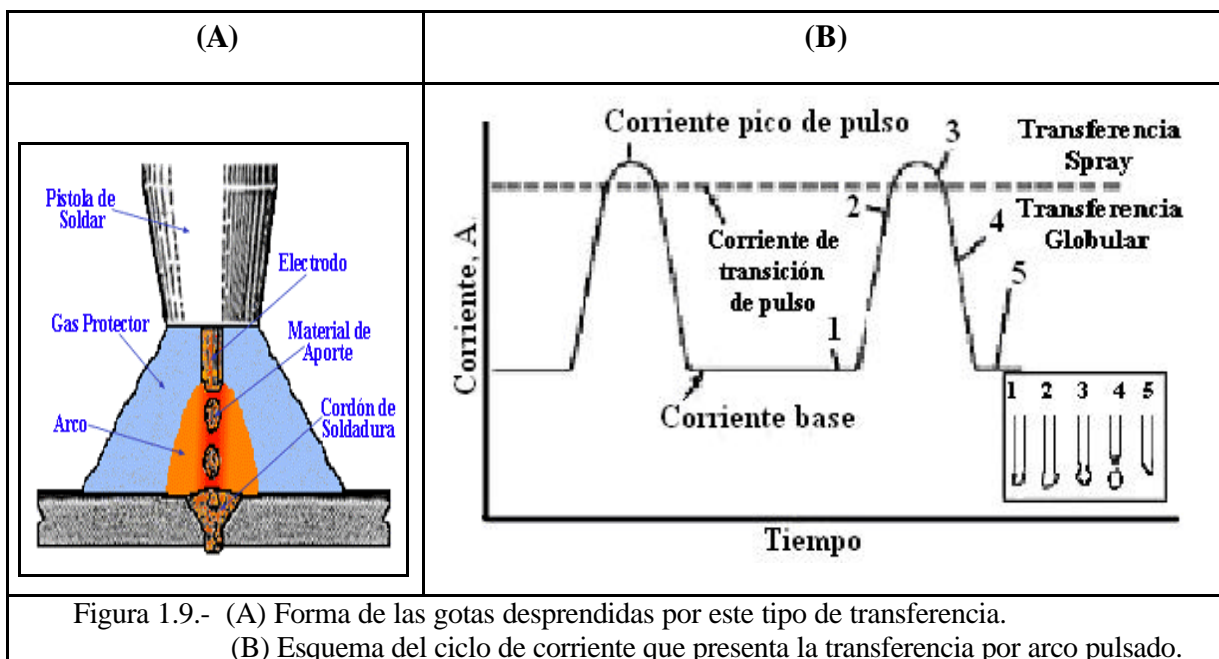


Figura 1.8.- Transferencia por Spray.

1.11.4.- Transferencia por Arco Pulsado

La transferencia por arco pulsado es una modalidad del tipo spray, que se produce por pulsos a intervalos regularmente espaciados, en lugar de suceder al azar como ocurre en el arco-spray. Este tipo de transferencia se obtiene cuando se utiliza una corriente pulsada, que es la composición de una corriente de baja intensidad, que existe en todo momento (es constante) y se denomina corriente base, y un conjunto de pulsos de intensidad elevada denominada corriente de pico (ver figura 1.9). La intensidad de fondo sirve para precalentar y acondicionar el alambre que va avanzando continuamente. La gota saltará cuando se aplique una corriente de pico.

Pender Jamaes^[7] explica que la ventaja fundamental de este método es la importante reducción de calor aplicado que se produce con respecto al método arco-spray, lo cual se traduce en la posibilidad de soldar en spray secciones menores, obtener menores deformaciones y soldar en todas la posiciones, también se pueden utilizar diámetros de alambre mayores y se reducen las proyecciones.



1.12.- Parámetros de la Transferencia Metálica por Arco Pulsado

Para que exista transferencia metálica por este tipo, es preciso que la intensidad de corriente conmute entre dos niveles, uno inferior y otro superior. En el nivel inferior, denominado corriente de base (I_b), se aporta una energía que no funde material, pero que consigue mantener el arco activo entre el nivel superior. Durante el nivel superior, denominado corriente de pico (I_p), se proporciona la energía capaz de fundir una porción de material de aporte y depositarlo sobre el baño de fusión^[24]. Según Gomez R.^[32] y Amin M.^[337] los parámetros que caracterizan una soldadura con transferencia metálica por arco pulsado, son los siguientes: tiempo de pulso o de pico (T_p), intensidad de pulso o de pico (I_p), intensidad de base (I_b) y frecuencia (f).

- **Tiempo de Pico (T_p)**

Se refiere al tiempo por el cual es mantenida la intensidad pico (I_p), teniendo en cuenta que una soldadura óptima debe desprender una gota por pulso, un tiempo de pico inferior o superior a este generará una energía de pulsación insuficiente para formar y desprender una gota o la proyección de varias gotas por pulso respectivamente, cualquiera sea el caso se le restará calidad a la soldadura.

- **Corriente de Pico (I_p)**

Es la intensidad del pulso que en combinación con el tiempo pico suministran la energía transferida al material para la formación y proyección de la gota. Por tal motivo existen múltiples combinaciones para conseguir un mismo resultado, por ejemplo, si trabajamos con un equipo cuya I_p no puede ser elevada entonces se incrementa el tiempo de pulso.

- **Corriente Base (I_b)**

La intensidad de base (I_b) tiene como objetivo mantener el arco encendido entre pulsaciones, pero sin fundir material. Si este valor es elevado aumenta de manera innecesaria la intensidad media, por el contrario si este valor es bajo el arco pierde estabilidad y puede extinguirse.

- **Frecuencia del Pulso (f) y Tiempo Base (T_b)**

Una variación de la frecuencia del pulso (f), supone una variación del tiempo de base (T_b), de este modo si se aumenta la frecuencia, aumentan los pulsos por unidad de tiempo o lo que es lo mismo, las gotas de material de aporte. Esta demanda de material se traduce en un aumento en la velocidad de alimentación del alambre. Del mismo modo, una disminución de la frecuencia exigirá una disminución de dicha velocidad. En la figura 1.10 se esquematizan todas las variables del modo de transferencia pulsado, según el oscilograma que representa el mismo, además de la energía aportada la cual se representa como el área bajo la curva.

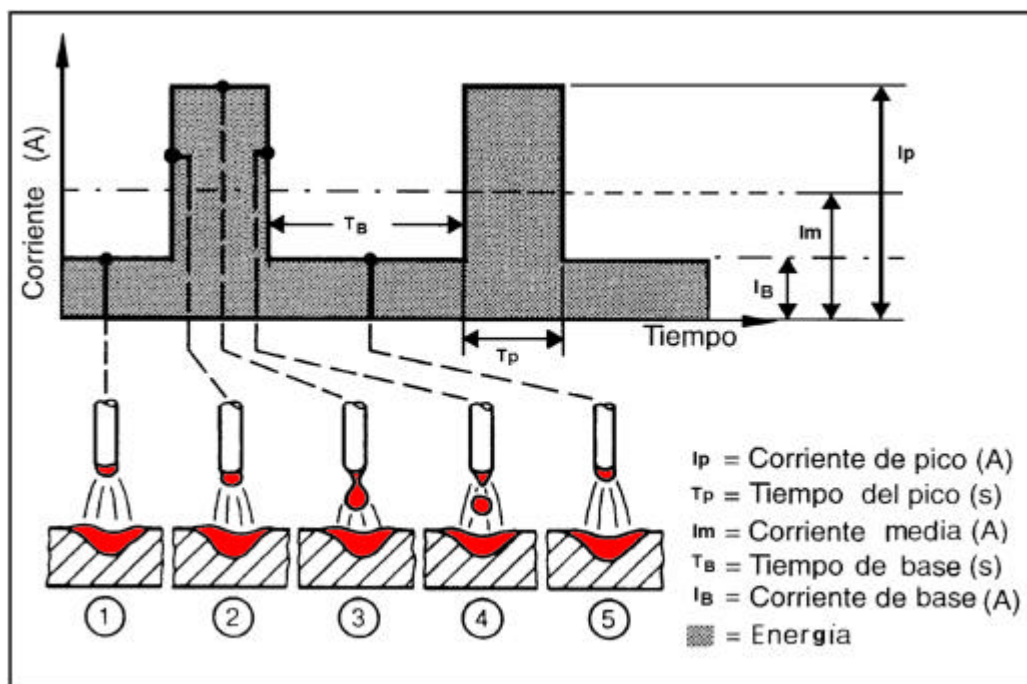


Figura 1.10.- Variables del arco y su energía aportada.

A partir de lo expresado por Y. Kim.^[34] Se establecen dos condiciones para garantizar la ausencia total de proyecciones o salpicaduras:

1. Sólo debe desprenderse una gota de material por pulso. El momento en que se desprende la gota debe ser durante el tiempo de base (T_b). Para cumplir con esta condición, es necesario que la energía aportada al material durante el pulso, sea la justa y necesaria.

2. El volumen de la gota debe ser equivalente al diámetro del electrodo utilizado. El tamaño de la gota depende de la relación entre la velocidad de avance del hilo y la frecuencia de los impulsos. Para conseguir el tamaño de gota adecuado y mantener el sincronismo con la velocidad de avance, es preciso que la frecuencia sea variable de forma continua, y proporcional a la velocidad de avance del electrodo. En efecto, la cantidad de material depositado en el metal base, es el producto del volumen (V) de la gota, por la frecuencia de pulso (f), o lo que es lo mismo, el producto del área de la sección transversal del electrodo (s) por su velocidad (v). Es decir:

$$V.F = S.V \quad (1)$$

Admitiendo que la gota desprendida es esférica, su volumen vendrá dado por la expresión:

$$V = (4/3).\pi.r^3 \quad (2)$$

Por otra parte, el área de la sección transversal del electrodo es:

$$S = \pi.r^2 \quad (3)$$

Sustituyendo:

$$(4/3).\pi.r^3.f = \pi.r^2.v \quad (4)$$

y colocando el diámetro en función del radio, se obtiene finalmente:

$$V = (2/3).d.f \quad (5)$$

Esta expresión proporciona el valor de la velocidad de avance del electrodo en función de su diámetro y la frecuencia de pulsación. Puede verse que, para un determinado diámetro de hilo, a medida que la frecuencia aumenta, también debe hacerlo la velocidad de avance del hilo.

1.12.1.- Determinación de los Parámetros de la Transferencia por Arco Pulsado

La determinación de los parámetros de soldadura (I_p , T_p , I_b , T_b) empleando modo de transferencia metálica por arco pulsado, se basa en el trabajo de investigación realizado por M.

Amin^[33] considerando las respectivas correcciones realizadas por S. Rajasekaran, S. D. Kulkarni, U. D. Mallya y R. C. Chaturvedi^[35]. La determinación de los parámetros de la transferencia por arco pulsado esta basada en tres requerimientos fundamentales utilizando GMAW-P con alambre macizo, dichos requerimientos se explican brevemente a continuación.

1.12.2.- Criterio de Burnoff

Este consiste en la construcción de una relación funcional que represente todas las posibles condiciones de los parámetros del pulso (I_p, I_b, T_p, T_b) asociados a una corriente media específica (I_m). Esta relación debe abarcar un área de trabajo que incluya todas las posibles combinaciones de parámetros, la cual se representará en una región denominada Zona Paramétrica. Para la construcción de esta Zona se debe hallar, como primer paso, una función que relacione la corriente media (I_m) y la velocidad de alimentación (W_f) empleando GMAW-P y usando parámetros experimentales. Esta función se logra al realizar soldaduras por ensayo y error tomando en cuenta todas las variables de las mismas, las cuales se seleccionan escogiendo las de mayor estabilidad del arco y con una longitud de arco aproximadamente constantes. Una vez seleccionadas las mejores combinaciones, los valores obtenidos de intensidad media (I_m) se grafican con sus respectivas velocidades de alimentación, obteniéndose una relación como representada en la figura 1.11, solo con GMAW -P. La corriente media puede ser calculada según la siguiente ecuación usando los parámetros registrados de cada soldadura:

$$I_m = (T_p \cdot I_p + T_b \cdot I_b) \cdot (T_p + T_b) \quad (6)$$

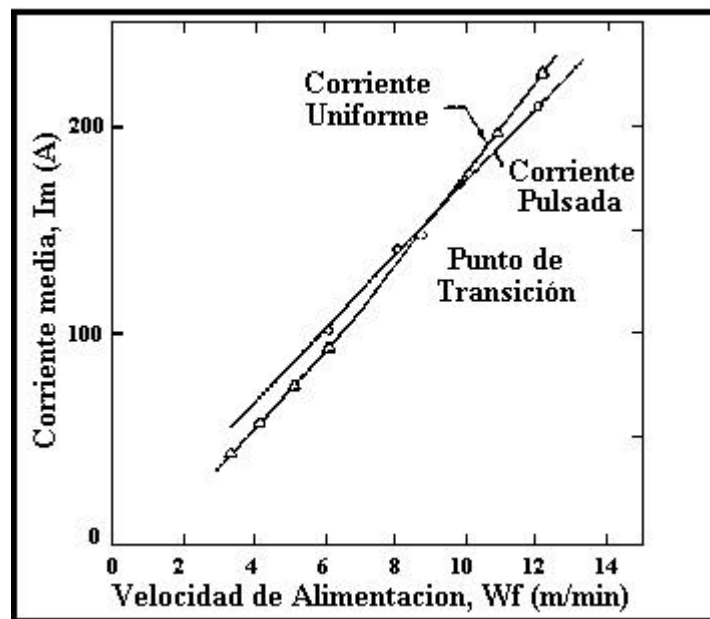


Figura 1.11.- Gráfico del Criterio de Burnoff para soldadura corto circuito y por arco pulsado.

En los trabajos realizados por Rajasekaran^[35] se establece con el objetivo de encontrar un valor que indique la transición entre una transferencia corto circuito y una transferencia tipo spray, que se debe elaborar un gráfico similar al construido por Amin M.^[33] (Im vs. Wf) pero empleando un arco convencional. El punto de intersección de ambas rectas indicará entonces la transición en la transferencia metálica. Este punto puede ser apreciado en el gráfico de la figura 1.11. En sus investigaciones Rajasekaran^[35] considera el volumen de la gota igual al producido por una esfera de diámetro similar al diámetro del electrodo, argumentando que al trabajar con volúmenes de gotas mayores al diámetro del alambre se puede favorecer la transferencia corto circuito y salpicaduras. Dicha consideración se traduce en la siguiente ecuación:

$$V_D = (4/3).\pi.r^3 \quad (7)$$

En donde r = radio del alambre (mm) y V_D = Volumen de la gota (mm^3)

De igual manera se asume que el tiempo del ciclo debe ser tal que produzca una gota por pulso en relación con la velocidad del alambre (Wf) que se emplee, produciendo la siguiente expresión:

$$T_C = 240.V_D / \delta.d^2.Wf \quad (8)$$

Donde: T_C = tiempo de ciclo (ms) y d = diámetro del alambre (mm)

Considerando el tiempo del ciclo T_C como la suma del tiempo pico y del tiempo base, y que la intensidad media puede ser descrita por la ecuación de una recta, tenemos que:

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

$$I_m = m.Wf + K \quad (10)$$

En donde: m = pendiente de la recta y K = intersección con la ordenada.

Relacionando con la ecuación (6) se obtiene que:

$$I_p = (T_C/T_p).I_m - ((T_C/T_p) - 1).I_b \quad (11)$$

Para un tiempo pico (T_C) específico esta ecuación establece la relación entre la intensidad pico (I_p) y la intensidad base (I_b) para una intensidad media (I_m) determinada. Con dicha relación puede ser construida una grafica como la que se muestra en la figura 1.12, en donde se presenta una Zona Paramétrica, dentro de esta zona existe una relación lineal entre I_p e I_b , y siendo el valor mínimo posible el punto en común $I_m = I_p = I_b$. Esta zona presenta las múltiples combinaciones entre I_p , I_b y T_p para una I_m determinada con lo cual se garantiza una condición de pulso que cumplen con el Criterio de Burnoff.

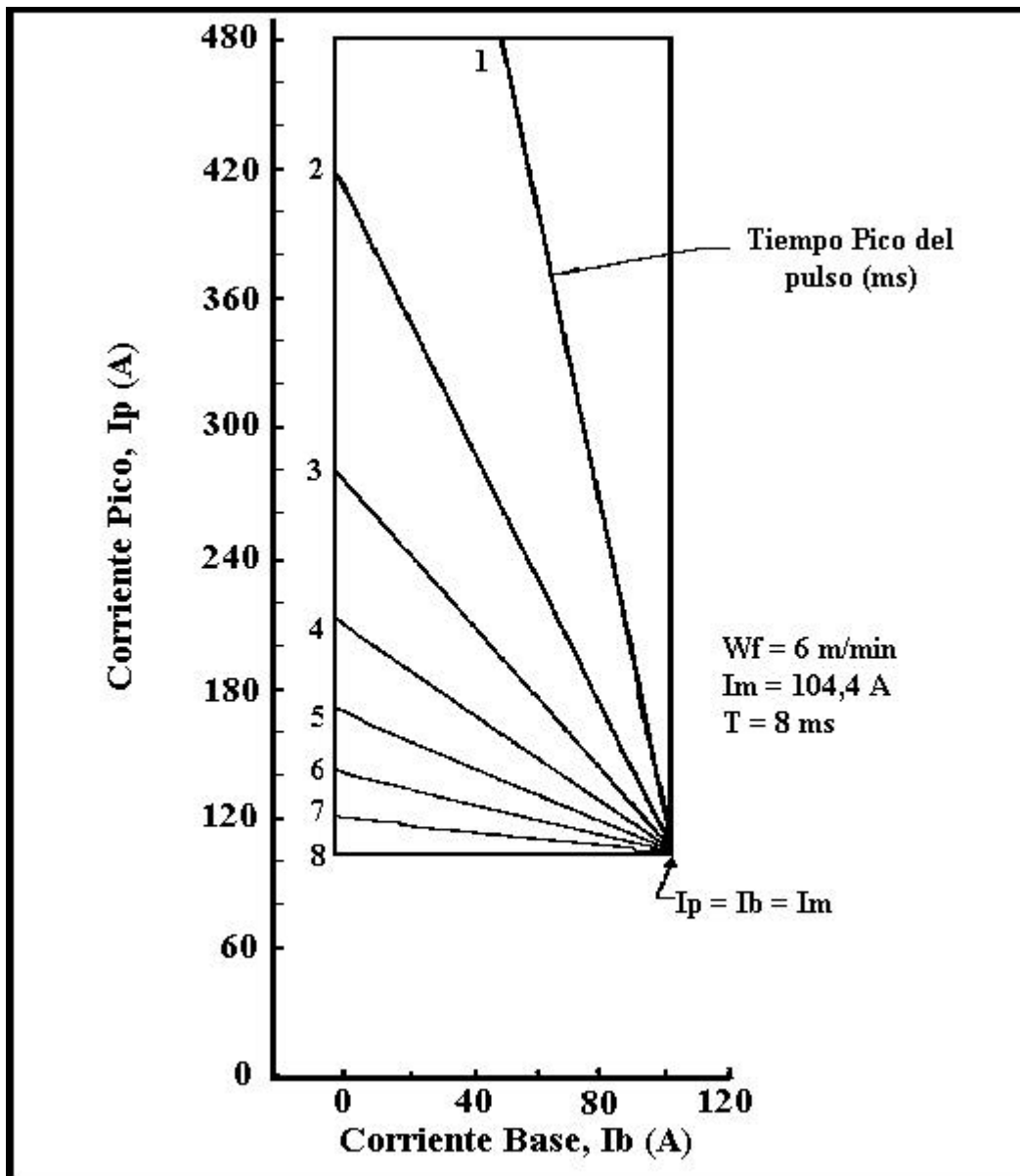


Figura 1.12.- Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff.

1.12.3.- Criterio de la Transferencia Metálica

La ecuación 10 si bien cumple con el Criterio de Burnoff, no necesariamente todas las combinaciones producen una transferencia metálica tipo spray, por lo que esta zona tiene que se delimitada para cumplir con dicho criterio, es por esta razón que se toman en consideración dos restricciones.

1.12.4.- Limitación de la Corriente Pico y Corriente de Base

Se deben realizar las soldaduras tanteando dentro de la zona Paramétrica y los datos de cada una de ellas se deben registrar usando oscilogramas de manera tal de poder distinguir los diferentes tipos de desprendimiento de gotas por pulso, es decir una gota, dos gotas, tres gotas o gota de desprendimiento por pulso, según se ejemplifica en las figuras 1.13 y 1.14. El número de gotas que se desprende por pulso se observa en la escala del voltaje y esta representado por los picos que se presentan en la misma. 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 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.

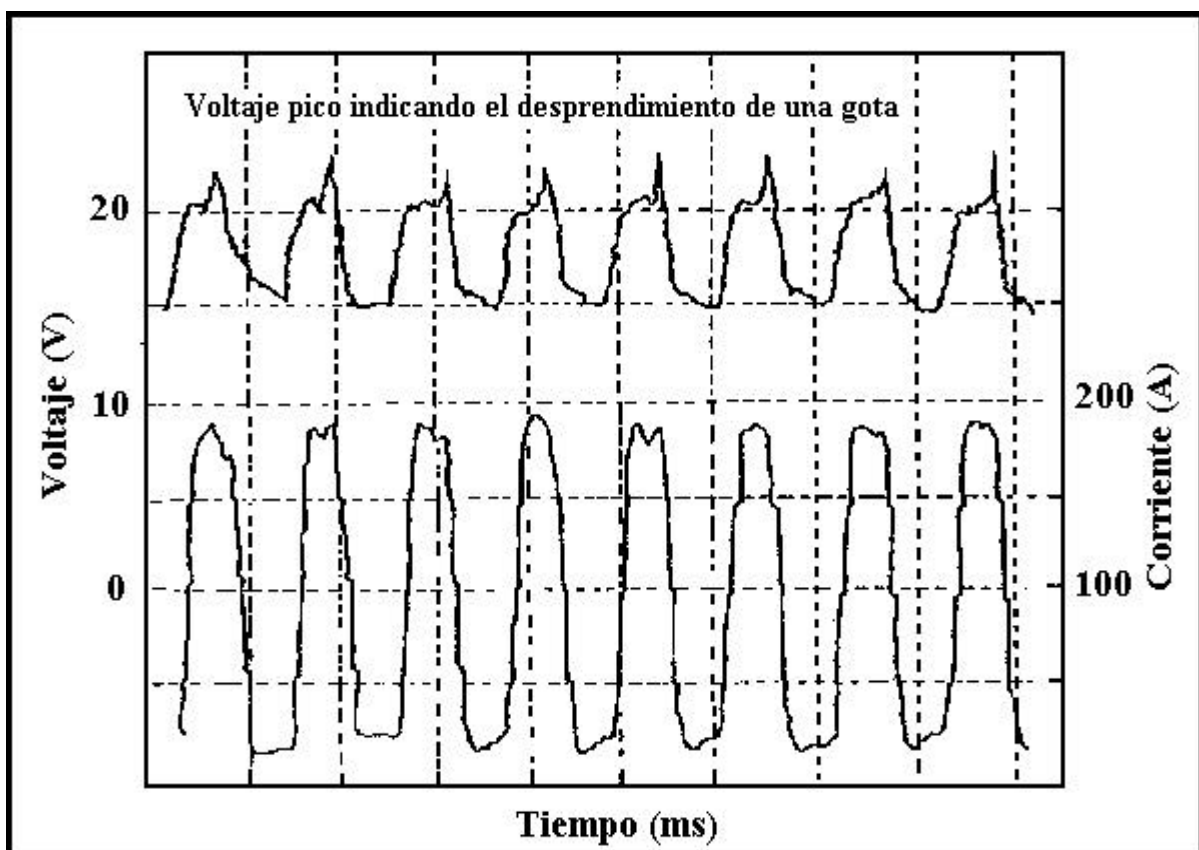


Figura 1.13.- Oscilograma típico de corriente y voltaje representando separación de los picos de corriente entre cada pulso, produciendo una gota por pulso.

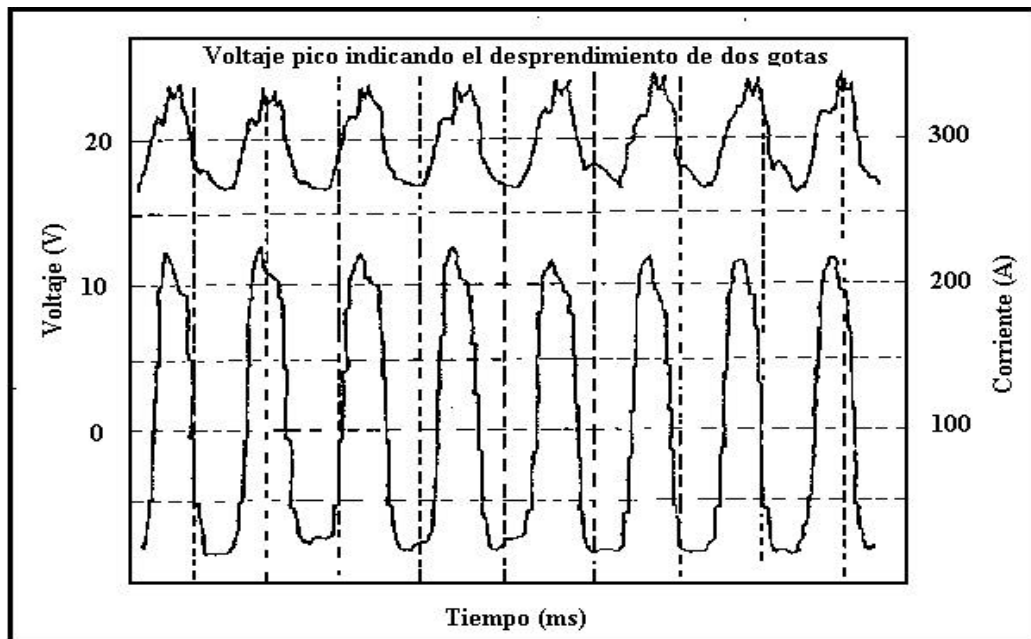


Figura 1.14.- Oscilograma típico de corriente y voltaje representando separación de los picos de corriente entre cada pulso, produciendo dos gotas por pulso.

De la data obtenida al realizar la soldadura se deben agrupar los valores de I_p e I_b tomando en consideración el número de gotas desprendidas por pulso, estos datos se grafican (I_p vs. T_p) en escala logarítmica para cada uno de los grupos de desprendimientos (1 gota, 2 gotas, etc.). Estas graficas deben tener el comportamiento de una recta en la cual la pendiente debe ser igual para los diferentes grupos, esto es representado en la figura 1.15. Lo expresado anteriormente permite establecer la siguiente ecuación:

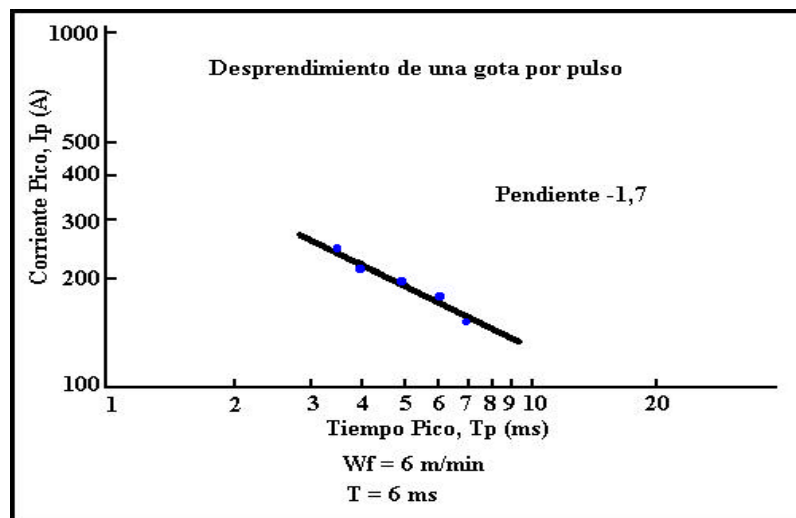


Figura 1.15.- Relación entre I_p y T_p para diferentes tipos de separación de gota por pulso.

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

Donde m es la pendiente de la recta y K_v es una constante denominada Parámetro de Desprendimiento (la cual se explicará posteriormente). Estos valores dependen del volumen de la gota y a su vez del diámetro del metal de aporte.

1.12.5.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento de Gota (K_v)

La determinación de esta constante para distintos volúmenes de gotas se realiza a partir de los datos obtenidos al tratar los oscilogramas registrados soldando con un arco convencional a valores de W_f que aseguren la transferencia tipo spray. Para la obtención de esta data se debe trabajar con una relación de Velocidad de Alimentación vs. Voltaje que mantenga una longitud de arco constante. Un oscilograma modelo se presenta en la figura 1.16 en donde se determinan valores de tiempo de desprendimiento de gota (T_{DC}), volumen de las gotas con su respectivo nivel de intensidad (I_{DC}). Si bien los oscilogramas no muestran un intervalo de tiempo constante entre los desprendimientos, el promedio del tiempo si lo es. Una manera práctica y precisa de estimar esto es con ayuda de un histograma de frecuencia, el cual es mostrado en la figura 1.17. El valor del tiempo que se obtiene de dicho histograma es denominado tiempo de modalidad de desprendimiento de gota (T_{MD}), el cual es requerido para el cálculo de un nuevo parámetro que se denomina volumen de modalidad de gota (V_{MD}), el cual se obtiene mediante la expresión:

$$V_{MD} = \delta \cdot d^2 \cdot W_f \cdot T_{DM} / 24 \quad (13)$$

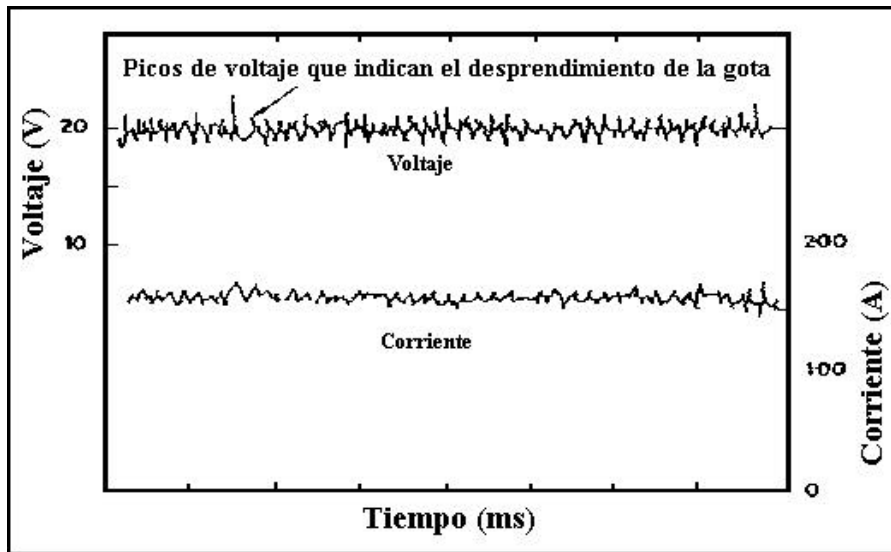


Figura 1.16.- Corriente y voltaje del arco empleando arco de soldadura convencional.

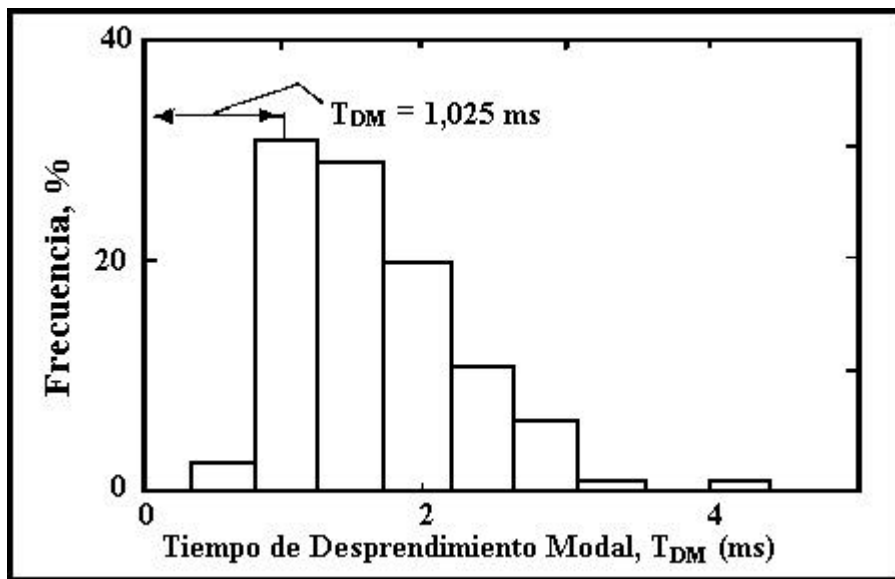


Figura 1.17.- Histograma de distribución de frecuencia para los intervalos de tiempo a unas determinadas condiciones de soldadura.

A partir de este conjunto de valores T_{MD} , V_{MD} e I_{DC} obtenidos para cada velocidad de alimentación se obtiene la relación de I_{DC} vs V_{MD} como se muestra en la figura 1.18 y además se obtiene la relación V_{MD} vs T_{MD} figura 1.19.

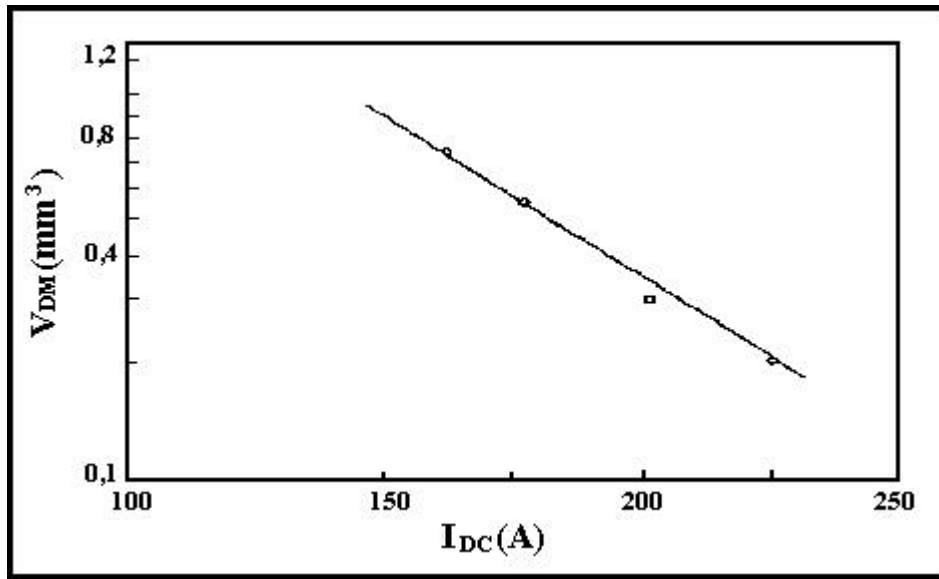


Figura 1.18.- Relación entre los niveles de corriente y volumen de modalidad de gota.

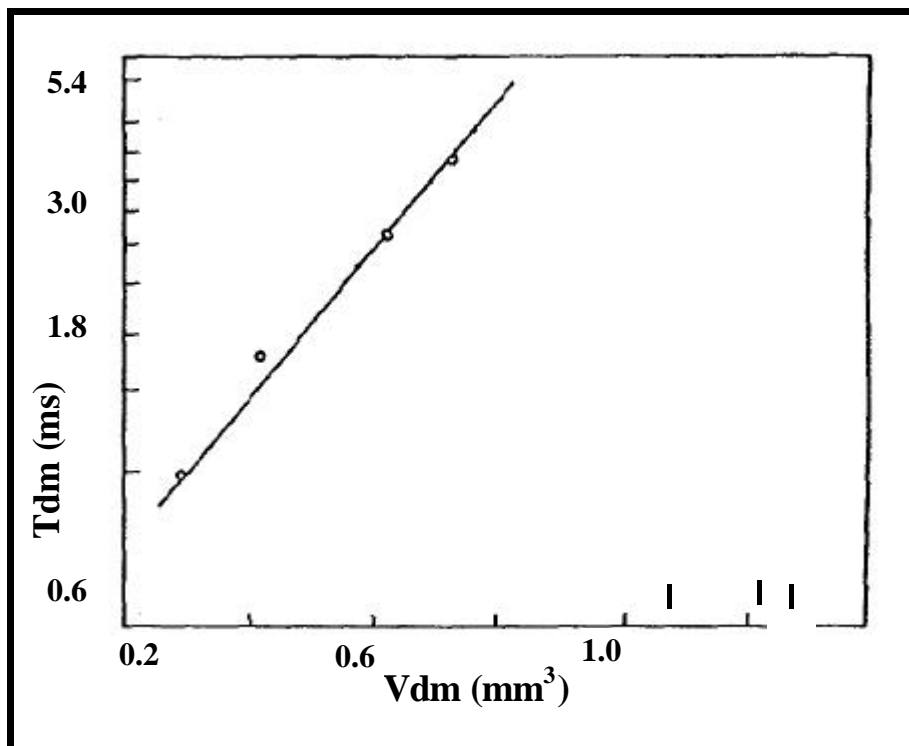


Figura 1.19.- Relación entre volumen de modalidad de gota y tiempo de modalidad de desprendimiento de gota.

Con el fin de satisfacer el Criterio de la Transferencia Metálica se obtienen los valores de Kv para las distintas condiciones de desprendimiento, esto se logra con ayuda de una ecuación copia de la ecuación 12

$$I_{DC}^{-m} \cdot T_{MD} = Kv \tag{14}$$

Esta ecuación define a la Curva Paramétrica de Separación la cual delimita los niveles de corriente para una determinada duración del pulso, esto quiere decir que se impone una limitación de los valores obtenidos en base al Criterio de Burnoff (Zona Paramétrica) para así lograr satisfacer el criterio de la transferencia metálica según se observa en la figura 1.20, curva B, cual representa un valor de Kv en función de Ip y Tp.

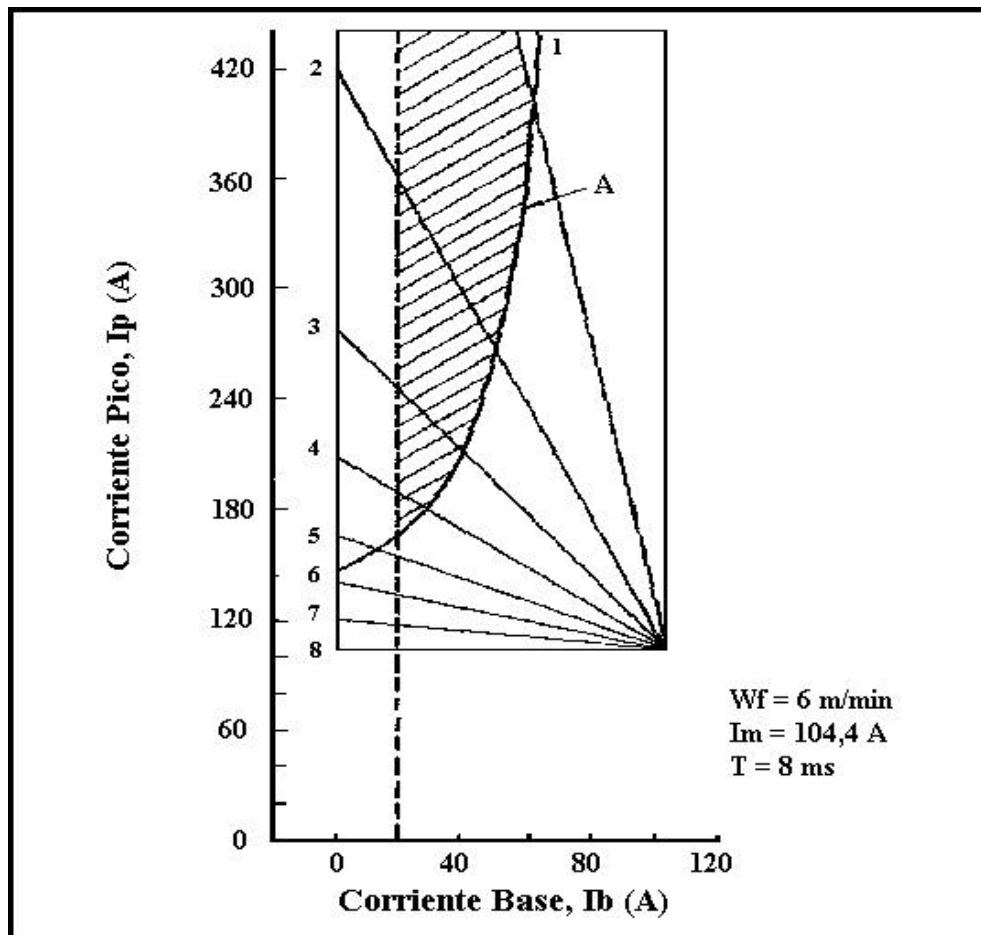


Figura 1.20.- Imposición de la curva paramétrica de separación (curva B) sobre la zona predicha por el Criterio de Burnoff.

1.12.6.- Criterio de Estabilidad del Arco

Se basa en la necesidad de limitar la corriente base dada su inestabilidad de arco con algunas combinaciones, sobre todo en los valores más bajos. Esta limitante puede ser expresada por:

$$I_b > C \tag{15}$$

Donde C es la corriente base limitante para mantener un arco estable.

Una vez que se logra satisfacer los tres criterios se consigue un área contenedora de un gran número de posibilidades, esta área que se muestra rallada dentro de la figura 1.21 no implica que todos sus puntos ofrecen una calidad de soldadura excelente, pero si puede ser utilizada como una buena referencia para establecer una o varias combinaciones optimas de los parámetros de soldadura GMAW-P.

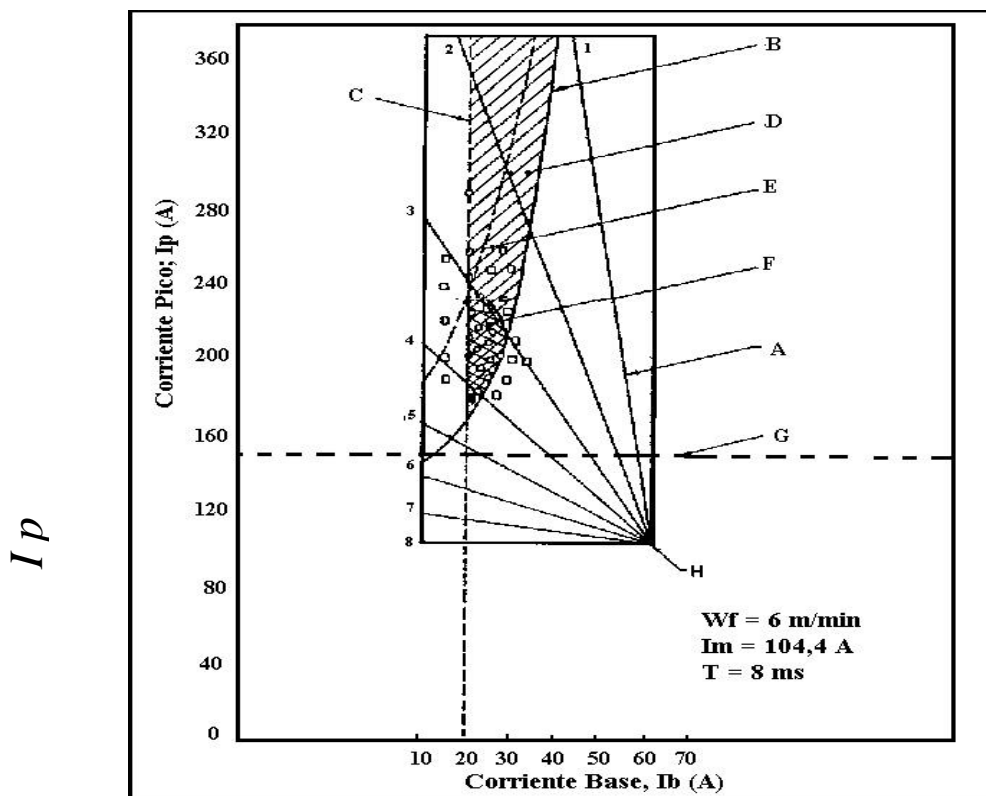


Figura 1.21.- Zona Paramétrica de Pulso estable. Donde A = Líneas radiales indicando el T_p , B = Curva de Potencia constante $I_p^{m} T_p = K_v$, C = Corriente de base limite, D = Zona estable predicha, F = Zona Paramétrica de pulso estable, G = Corriente de transición para Spray, H = $I_p = I_b = I_m$.

1.13.- Inspección y Calidad de la Soldadura

Los procedimientos de control de calidad para las uniones de GMAW son muy similares a los que se usan para otros procesos. De acuerdo con las especificaciones aplicables, los procedimientos de inspección deberán servir para determinar si es apropiado el desempeño del soldador o del operador, para calificar un procedimiento de soldadura satisfactorio y para realizar un examen completo del producto final soldado^[24]. La inspección de la soldadura del producto terminado se limita a los métodos de examen no destructivos como la inspección visual, con líquido penetrante, con partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido. Las pruebas destructivas (de tensión, corte, fatiga, impacto, flexión, fractura, sección transversal o dureza) por lo regular se limitan al desarrollo de ingeniería, la calificación de procedimientos de soldadura y la calificación del rendimiento de los soldadores y operadores.

1.14.- Especificación del Procedimiento de Soldadura (EPS)

M. Benzo y A. Capodicasa^[36] establecen que una EPS es un procedimiento de soldadura calificado que proporciona las directrices para elaborar una soldadura de producción y/o reparación, según los requerimientos. Una especificación del procedimiento de soldadura, debe considerar todas las variables esenciales, no esenciales y en algunos casos, las variables esenciales suplementarias, para cada proceso de soldadura. Los cambios pueden ser hechos en variables no esenciales de un EPS, sin la necesidad de un reclasificar, mientras que una modificación de las variables esenciales o esenciales suplementarias requiere reclasificación del EPS. La información dada en la EPS puede estar en cualquier formato, que satisfaga las necesidades de cada fabricante.

Una EPS esta disponible en el sitio de fabricación para consultar y revisión por el personal autorizado. Esta debe describir todas las variables esenciales, no esenciales y cuando sea necesario, las variables esenciales suplementarias para cada proceso de soldadura dado en la EPS. Según el Código ASME^[37] sección IX, las variables esencial son aquellas en las cuales un cambio como se describe en las variables específicas, es considerado que afecta las propiedades mecánicas de la soldadura y debe requerir de la recalificación de la EPS. Algunas de estas son: espesor del metal base, contenido de ferrita y austenita, tratamientos térmicos

post-soldadura, etc. Por otra parte las variables no esenciales son aquellas en las cuales un cambio, como se describe en las variables específicas, pueden ser hechos en la EPS sin necesidad de recalificación. Ejemplo de estas son: el tipo de Ranura, posición de soldadura, montaje del sistema, etc.

1.15.- Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)

Un RCP es un registro de la calificación de procedimiento de los datos de soldadura usados para la elaboración del cupón de prueba, y de los resultados de los ensayos aplicados a las diferentes probetas. El RCP debe documentar todas las variables esenciales, tales como materiales y dimensiones utilizados, velocidad de alimentación del alambre, velocidad de desplazamiento de la soldadura, posición de la soldadura, proceso de soldadura y variables seleccionadas, diseño de la junta, número de pases, dirección del cordón. Y todos aquellos resultados obtenidos de los ensayos realizados.

Los cambios al RCP no son permitidos, ya que el RCP es un registro de la que ocurrió durante una prueba particular de la soldadura. Son permitidas correcciones en la parte editorial. La información requerida para estar en el RCP, puede estar en cualquier formato que satisfaga las necesidades de cada fabricante. También debe ser enlistado los tipos números y resultados de los ensayos aplicados a las probetas. Los RCP usados para soportar los EPS deben estar a la disposición, bajo solicitud, para ser revisados por el personal autorizado, no es necesario que este disponible para el soldador.

En los anexos 1a y 1b se presentan los formatos elaborados por el Centro venezolano de Soldadura que sirven para realizar en Registro de Calificación del procedimiento (RCP), este puede ser tan extenso como sea requerido para plasmar en el todos los datos antes mencionados.

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la figura 2.0 se muestra el diagrama de flujo que describe el procedimiento experimental empleado en esta investigación. En dicho procedimiento experimental se destacan cuatro etapas principales, a saber: Caracterización de los materiales (Base y Aporte); Preparación del proceso de soldadura; Determinación de los parámetros de soldadura; Realización de la junta a tope y Elaboración de los cupones de prueba con los parámetros de soldadura determinados previamente y por último se procede con la caracterización de las soldaduras empleando los ensayos no destructivos (Inspección Visual, Líquidos Penetrantes y Radiografía), así como, los ensayos destructivos (Análisis Químicos, Metalográficos, Medición de Ferrita, Dureza, Tracción y Doblez) a objeto de caracterizar la influencia sobre la calidad y las propiedades de juntas soldadas a tope de Acero Inoxidable AISI/SAE 304.

2.1.- Caracterización de los Materiales Base y Aporte

El material base, usado para la realización de los cupones de prueba, es el Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, en forma de lámina o chapa con dimensiones de 1200 x 125 x 8mm, y como material de aporte se utilizó un alambre sólido AISI/SAE 308L-Si con un diámetro de 1,2mm. Con sus respectivos certificados de análisis químicos, que se indican en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente. Además, fueron caracterizados en función de la composición química, metalográfica y propiedades mecánicas (dureza, tracción y doblez), a fin de verificar si cumplen con las características indicadas por el fabricante y por lo que reporta o indica la norma AWS A-5.9 aplicable en dichos materiales.

2.1.1.- Análisis Químico

La caracterización de los materiales (Base y Aporte) desde el punto de vista químico se realizó con objeto de verificar el porcentaje en peso de los elementos presentes tales como: Carbono, Manganeso, Azufre y Fósforo. Se tomaron aproximadamente 10g de cada material para efectuar el análisis químico por el Método de Absorción Atómica por Espectrofotometría de Llama en el Laboratorio Químico Instrumental de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV. La viruta se obtuvo por medio de un taladro de banco y para el material de aporte se cortaron pequeños trozos del electrodo con una pinza cortadora de alambre.

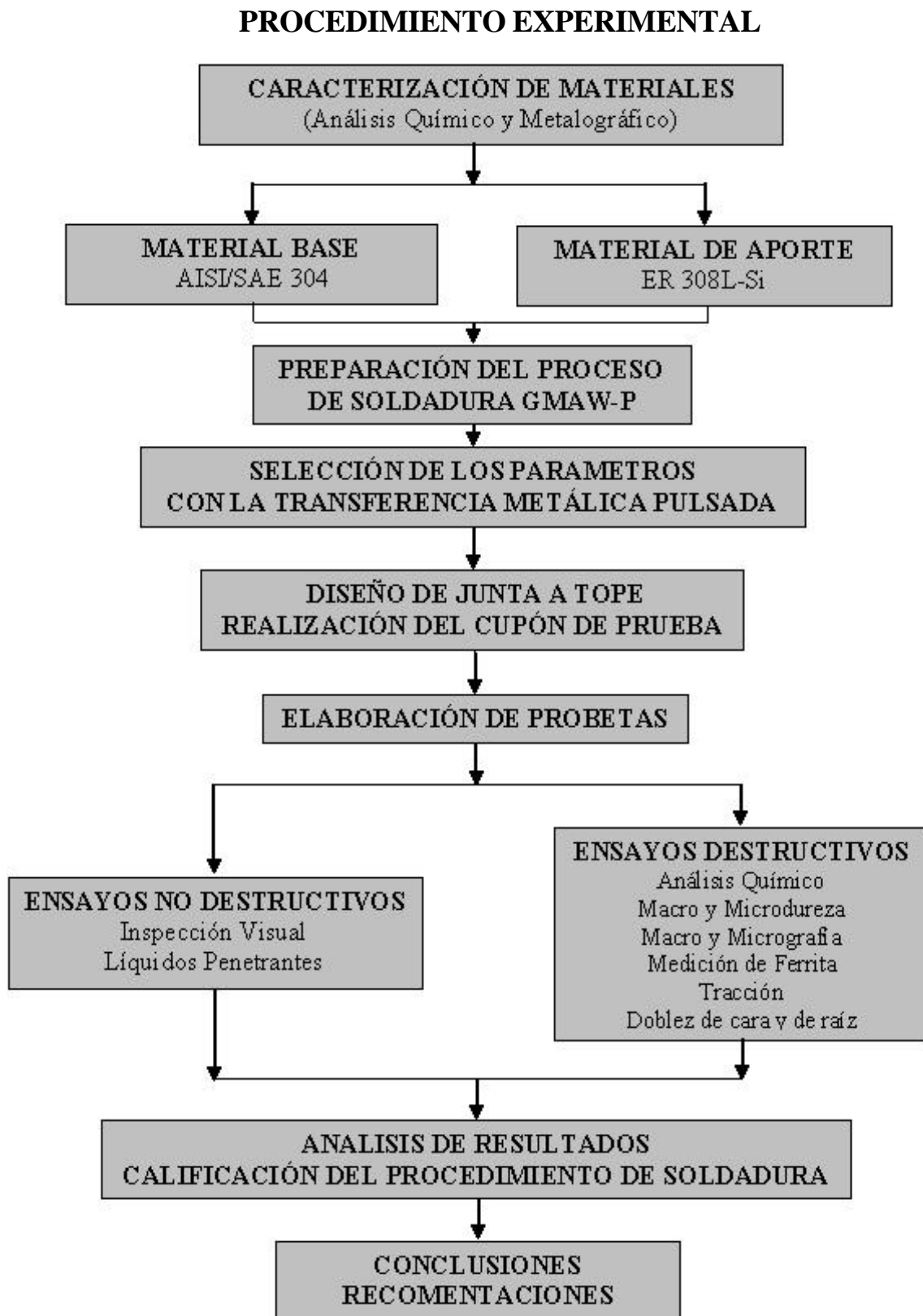


Figura 2.0.- Esquema del procedimiento experimental.

2.1.2.- Metalografía

Para la evaluación metalográfica del material base se seccionó una muestra del mismo en sentido longitudinal y transversal al de laminación, se cortaron por medio de una cortadora de disco refrigerada. Todas las muestras fueron desbastadas con una secuencia de lija 80, 120, 180, 320, 400, 500 y 600. La secuencia de pulido fue: lona con alúmina de $1\mu\text{m}$, paño verde con alúmina de $0,3\mu\text{m}$ y paño rojo con alúmina de $0,05\mu\text{m}$. Las probetas ya pulidas fueron atacadas con una solución electrolítica^[42] de ácido oxálico (10 g de ácido en 100 cc de agua) en condiciones de 23V durante 15 segundos, para las micrografías, y con una solución de 2ml de metanol, 4ml de ácido clorhídrico y 4ml de ácido nítrico, para las macrografías, luego las micrografías fueron observadas y fotografiadas a un aumento de 200X con ayuda del microscopio óptico Olympus BX60 en conjunto a una pantalla digital marca Olympus DP12. Por otra parte las macrografías se tomaron con ayuda de una cámara digital FujiFilm FinePix 4900 Zoon. El equipo utilizado junto con sus accesorios puede ser observado en la figura 2.1.



Figura 2.1.- Microscopio Óptico Olympus BX60 junto a la cámara digital Olympus DP12.

2.2.- Contenido de Ferrita en el Material Base

2.2.1.- Método Metalográfico

Utilizando un programa analizador de imagen se analizó una fotomicrografía a 200X de una muestra de material base atacada con una solución electrolítica^[42] de ácido oxálico (10 g de ácido en 100 cc de agua) en condiciones de 23V durante 15 segundos. El programa empleado es el Digital MicroGraph versión 3.4.2, calcula el número de pixels de la imagen que abarca las áreas oscura (ferrita), realizando lo propio con las áreas clara de la fase restante (austenita). De esta forma, se procede a una relación entre pixels que revela directamente una relación porcentual entre las distintas fases presentes en la fotomicrografía analizada.

2.2.2.- Método Químico

Con las composiciones químicas de los materiales base y de aporte se determinaron los contenidos de ferrita, empleando los diagramas de Schaeffler y DeLong. Para ello se calcula el Níquel Equivalente (Ni_{eq}) y el Cromo Equivalente (Cr_{eq}) presente en cada material de acuerdo a las formulas indicadas donde los elementos son expresando en porcentajes en peso.

Diagrama de Schaeffler $Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$$

Diagrama de DeLong $Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 30\%N + 0,5\%Mn$$

2.2.4.- Ensayos de Dureza

Para medir la dureza del material base se tomaron dos muestras y en cada una de ellas se realizaron 6 mediciones, tal como lo recomienda la norma ASTM E-384^[43], estas mediciones se realizaron con un durómetro universal marca OTTO WOLPERT-WERKE, tipo 2RC W-testor, usando una carga de 20 Kp y un indentador de forma piramidal (Vickers) con base cuadrada y ángulo entre las caras de 136°. Sus resultados se reportan en la tabla 3.5, donde se presentan los valores promedios de Dureza Vickers con su desviación estándar (DE).

2.3.- Preparación del Proceso de Soldadura

2.3.1.- Diseño y Preparación de las Juntas

Las juntas a tope, cuyas medidas son de 1.200 mm de largo, 125 mm de ancho y 8 mm de espesor, fueron primero biseladas a 30° respecto a la vertical, como se ilustra en la figura 2.3 y luego estas fueron lijadas con lija N° 80 para eliminar las irregularidades superficiales.

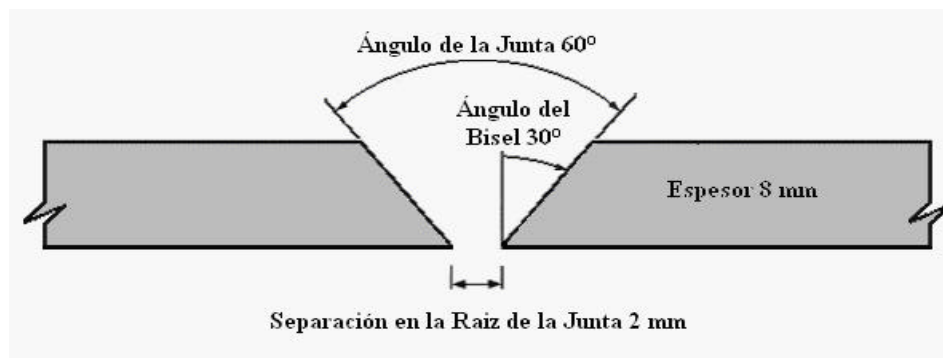


Figura 2.3.- Diseño seleccionado para la fabricación de la junta a tope.

Luego dichas juntas fueron punteadas en los extremos a unas pequeñas chapas de acero al carbono para realizar los cupones de prueba, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 2.4. Esto se hizo para minimizar tanto el movimiento de las placas como la dilatación debida al calor aportado durante la soldadura, asegurando así que la separación de 2 mm entre las placas sea constante. Debido a la longitud de la junta es necesario puntearla en el centro para minimizar la distorsión durante la soldadura en el proceso automático.

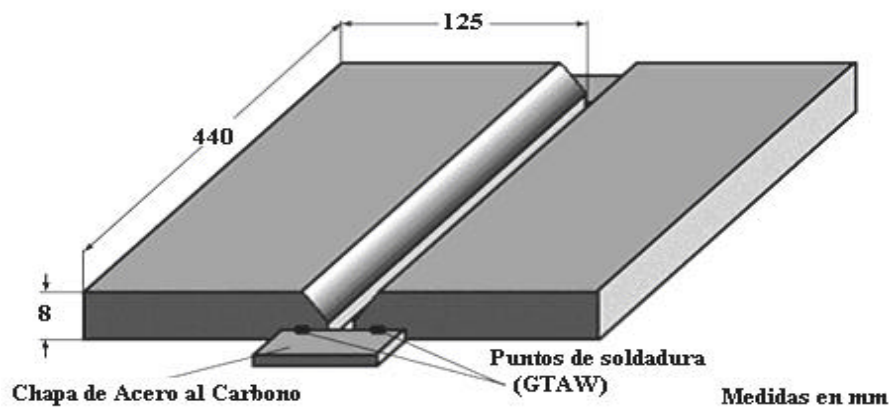


Figura 2.4.- Esquema y medidas de la junta a tope.

2.3.2.- Preparación de la Mesa de Trabajo

Para efectos de realizar la soldadura se preparó una mesa de trabajo que funcionara como soporte de las piezas de trabajo, ver figura 2.5. Para la deposición de los cordones se utilizó un sistema de traslación automático al cual fue fijada la pistola de soldadura, pudiendo de esta manera predeterminar una velocidad constante a la cual se realizará la soldadura.

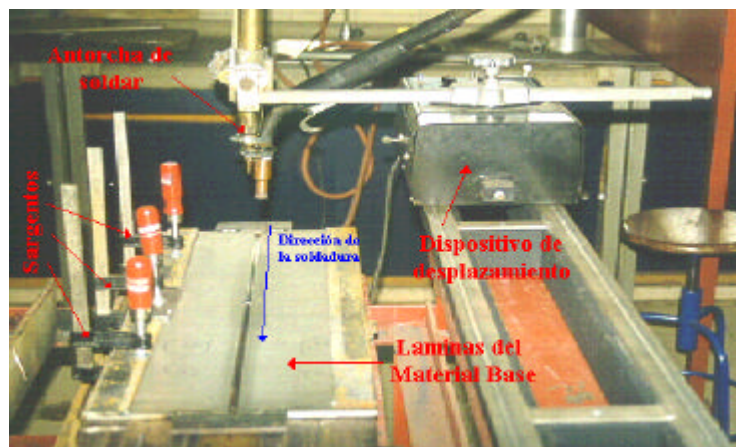


Figura 2.5.- Mesa de trabajo utilizada en la elaboración del cupón de prueba.

2.3.3.- Fuente de Energía

Se empleó una fuente multiproceso de soldadura MTE DIGITEC 450. En la figura 2.6 se muestra a la izquierda la fuente, a la derecha el sistema de alimentación del alambre y el panel de control. Esta fuente de soldadura al arco está diseñada para operar con transferencia metálica pulsada.



Figura 2.6.- Equipo de soldadura MTE DIGITEC 450 con su sistema de alimentación y control.

2.3.4.- Registro de los Oscilogramas y Parámetros de soldadura

Para la adquisición y almacenaje de los parámetros de soldadura con transferencia pulsada usados dentro de esta investigación se empleó un programa denominado OSCILOS versión 4.0, que simula un osciloscopio digital dentro de una computadora. Para la recolección de esta data se utiliza una tarjeta de adquisición instalada en la tarjeta madre del computador, y a su vez a esta se instalan sensores electrónicos que permiten registrar la corriente, voltaje, velocidad de alimentación del alambre y flujo de gas. A través de los registros la computadora muestra en la pantalla el oscilograma del proceso, con lo cual se

puede analizar el fenómeno físico que está ocurriendo en el proceso de soldadura gracias a las condiciones que fueron predeterminadas en el equipo.

Con el fin de corroborar si las lecturas mostradas por el programa eran correctas en orden de magnitud, fueron instalados dos equipos periféricos que mostraban en tiempo real las magnitudes de voltaje y corriente, y también podían mostrar la velocidad de la alimentación del electrodo al proceso de soldadura, se muestran en la figura 2.7.



Figura 2.7.- Equipo Periféricos de recolección de datos, marca IMC, modelos MVA-1 y TC-1

2.3.5.- Preparación y Limpieza del Material Base

Antes de depositar los cordones de soldadura, las superficies de las laminas de Acero Inoxidable Austenítico fueron limpiadas cuidadosamente mediante cepillo de alambre, lijas y gasolina a fin de eliminar posibles residuos de grasa, aceite o cualquier otro tipo de contaminante presente en la superficie.

2.4.- Determinación de los Parámetros en la Soldadura

A fin de determinar los parámetros de soldadura por transferencia metálica pulsada (I_p , I_b , T_p , y T_b) se empleó la metodología desarrollada por Amín^[33]. En la tabla 2.1 se resume todas las consideraciones asumidas para las pruebas de soldadura necesarias para determinar la zona Paramétrica para la velocidad de alimentación del alambre seleccionada.

Tabla 2.1.- Parámetros fijos de las pruebas de Soldadura GMAW-P realizadas.

Modo de Transferencia Metálica	Pulsado
Material de Aporte	ER 308L-Si, diámetro 1,2 mm
Gas de Protección	Argón + 2% O ₂
Velocidad de Alimentación (W_F)	5 m/min.
Polaridad	Corriente Directa (CD); Electrodo (+)
Distancia Boquilla/Pieza	16 mm
Posición de Soldadura	Plana (1G); Orientación del electrodo 90°
Flujo de Gas Protector	16 L/min.

2.4.1.- Criterio de Burnoff

Para establecer la tasa de quemado y con esto un equilibrio entre la velocidad de alimentación del alambre (W_F) y la tasa de fusión del alambre; se procedió a establecer una relación entre la corriente media (I_M) y la velocidad de alimentación del alambre (W_F). Para esto se realizaron depósitos sobre una chapa plana. Buscando 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 . Al igual que en trabajos anteriores se asumió una gota de diámetro igual al del alambre de aporte, y utilizando la ecuación 2, se calculó el volumen de gota desprendida V_D . Este valor se utilizó junto a la ecuación 8 para calcular el tiempo del ciclo T para una velocidad de alimentación estudiada. Luego utilizando la gráfica I_M vs. W_F (de corriente pulsada), con la velocidad de alimentación

estudiada se procedió a determinar su correspondiente I_m . Por último, utilizando la ecuación 11 se logró la realización de la zona paramétrica para una velocidad de 5 (m/min).

2.4.2.- Criterio de Transferencia Metálica

No todas las condiciones de pulso expresadas por la ecuación 11 satisfacen el criterio de Burnoff, existen algunas combinaciones de (I_p , T_p , I_b , y T_b) que no producirán una transferencia metálica tipo spray. Por tal motivo es necesario limitar la Zona Paramétrica con una relación entre I_p y T_p .

2.4.2.1.- Limitación de la Corriente Pico (I_p) y Tiempo Pico (T_p)

Para poder determinar las condiciones base más 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^[35]. 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 2, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 m/min para un aporte ER 308L-Si buscando siempre obtener un modo de transferencia tipo spray. Se registraron los valores de corriente media I_C 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

La corriente base fue bajada sucesivamente hasta que se acordó que en 40 A era la mínima corriente que soportaba el montaje antes de extinguir el arco eléctrico. Una vez establecida la corriente mínima ($I_b > 40 \text{ A}$) fue limitada por segunda vez la zona Paramétrica.

2.4.4.- Construcción de la Zona Paramétrica

Las curvas de potencia de arco constante obtenidas para cada aporte 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 más 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.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana

A fin de seleccionar las mejores condiciones para realizar una soldadura con un modo de transferencia pulsada con una gota por pulso, se pre-seleccionaron de entre las mejores condiciones obtenidas en los ensayos de transferencia metálica, tres condiciones por su comportamiento, el cual fue medido en primera instancia con los oscilogramas obtenidos en los ensayos. Luego se realiza la deposición sobre una chapa plana, de dichas soldaduras se extrajo una probeta (por condición) las cuales se prepararon metalográficamente. Partiendo de las características superficiales (aspecto del cordón, penetración, dilución, refuerzo de cara y anchura del cordón) y a las características de uniformidad en el desprendimiento de la gota así como la estabilidad del arco, se procedió a seleccionar el conjunto de parámetros adecuado para realizar la soldadura pulsada en las junta a tope del acero AISI/SAE 304.

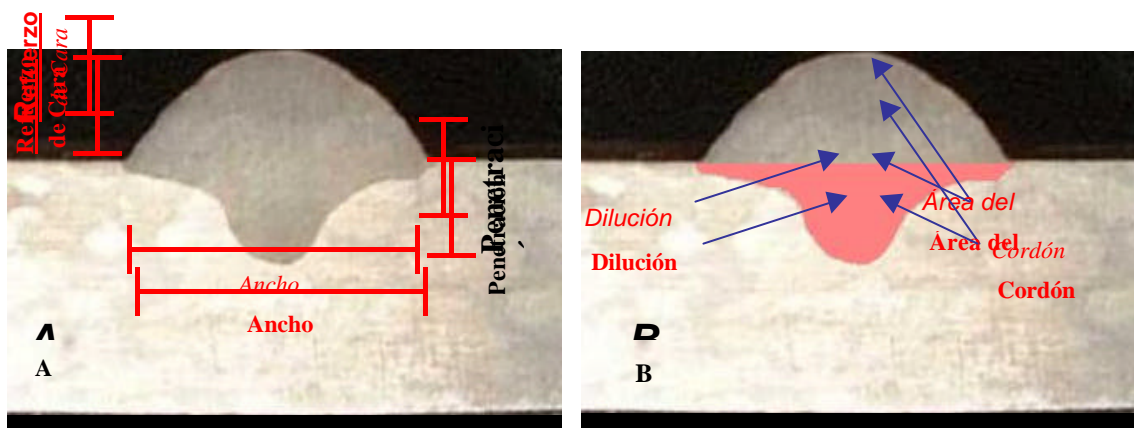


Figura 2.8.- (A) Esquema que muestra los Parámetros Geométricos tomados de cordones depositados sobre chapa plana, (B) Relaciones de área para calcular la dilución del cordón depositado sobre chapa plana.

2.5.- Realización de la Soldadura en una Unión a Tope

Una vez determinada el cordón que presento las mejores condiciones de soldadura, se procedió a la fabricación del cupón de prueba necesario para la calificación del procedimiento de soldadura. Para esto el material base fue preparado como se establece en el punto de diseño y preparación de juntas. La soldadura fue realizada en posición 1G (Plana Horizontal), con una orientación de pistola de 90° respecto al plano de soldadura y la distancia de trabajo en 16 mm, las laminas fueron sujetadas sobre un bloque de aluminio (por medio de sargentos) el cual tenia una ranura que coincidía con la raíz de la soldadura, este bloque inducía un enfriamiento del montaje más rápido.

2.5.1.- Calor Aportado y Potencia del Arco Eléctrico

La Energía Bruta Aportada por el proceso de soldadura (EBA) y la Energía Neta Absorbida (ENA) durante la soldadura por arco eléctrico “GMAW”, se calcula aplicando las siguientes ecuaciones.

$$EBA = \frac{I V 60}{V_s} \quad (16)$$

$$ENA = \rho \times EBA \quad (17)$$

En donde:

V_s = Velocidad de soldadura (mm/min)
 I = Corriente media del proceso (A) ρ = Eficiencia térmica del proceso (0,70 para GMAW)
 V = Voltaje medio del proceso (V) EBA y ENA: (julios/mm)

La Energía Neta Absorbida (ENA) toma en cuenta la corriente y la tensión eficaz o efectiva del arco, la velocidad de soldadura y la eficiencia del proceso; que según la AWS^[10] y ASM^[39] oscila entre (0.7 y 0.8) para los modos de transferencia metálica cortocircuito y pulsado respectivamente.

2.5.2.- Rendimiento del Aporte

Para calcular la eficiencia del aporte de soldadura de las variables fijadas, se trabajaron con tres muestras que reproducían a escala menor, las condiciones de diseño de juntas seleccionadas. De esta forma se determina que porcentaje de material de aporte se pierde en polvillo, salpicadura o se volatiliza durante el proceso de soldadura. La ecuación utilizada para determinar la eficiencia es la siguiente.

$$\text{Rendimiento (\%)} = (P_{om} - P_{fm}) / (P_{oa} - P_{fa}) \quad (18)$$

Donde: P_{om} = Peso inicial de la muestra.

P_{fm} = Peso final de la muestra.

P_{oa} = Peso inicial del aporte.

P_{fa} = Peso final del aporte.

2.6.- Elaboración de las Probetas

La evaluación tanto destructiva como no destructiva realizadas se aplicaron en función de los ensayos exigidos por la sección IX del código ASME y otros ensayos que fueron convenientes para una completa calificación del proceso. Para realizar estos ensayos se sacaron una serie de probetas del cupón de prueba de acuerdo con lo establecido en la sección IX del código ASME^[37] párrafo QW-463.1(a). La figura 2.9 muestra de manera esquemática como fueron cortados los cupones de prueba a fin de obtener las muestras necesarias para fabricar las probetas a ser utilizadas en los ensayos destructivos realizados para caracterizar las soldaduras. Estos ensayos fueron: análisis químico de los depósitos, evaluación metalográfica (macrografía y micrografía), medición de dureza, ensayos de tracción y doblez.

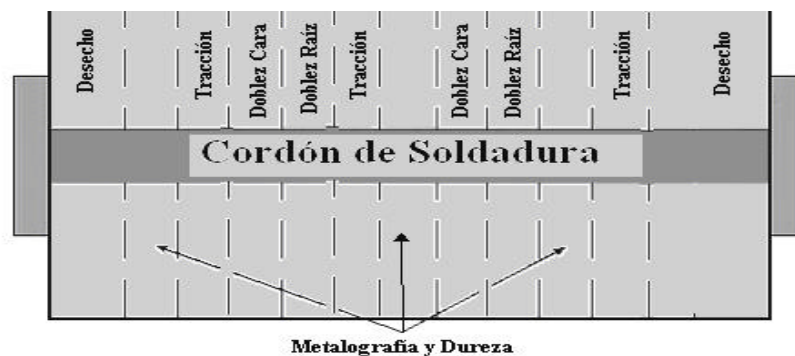


Figura 2.9.- Distribución de las probetas requeridas para los diversos ensayos en el cupón de prueba (medidas en mm).

2.7.- Ensayos No Destructivos

En la sección IX del código ASME^[37], se establecen una serie de ensayos obligatorios sobre el cupón de prueba para su calificación, los cuales son especificadas en el párrafo QW-150. Estos ensayos son los no destructivos (inspección visual y líquidos penetrantes) y los destructivos (doblez de cara y raíz, y el ensayo de tracción). Para determinar la condición de los cupones de prueba, previo a la elaboración de las probetas a utilizar en los diferentes

ensayos destructivos, estos fueron evaluados empleando técnicas no destructivas tales como inspección visual y líquidos penetrantes.

2.7.1.- Inspección Visual

La inspección visual se realizó antes, durante y después del proceso de soldadura al cupón de prueba, de esta manera se aseguró que las dimensiones de la junta fuesen uniformes y que su superficie estuviese libre de irregularidades, así como de óxido y grasas. De igual manera se verificó la continuidad del depósito de soldadura durante el proceso y, después de soldada, se buscó evidencia de defectos superficiales tales como porosidades, salpicaduras, grietas, falta de penetración y falta de fusión en los cupones de prueba.

2.7.2.- Líquidos Penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes permite determinar la presencia de posibles grietas o cualquier otro defecto superficial que afecte la calidad de la unión con mayor precisión que una inspección visual. En esta inspección se emplea un líquido humectante que hace visible el lugar donde se encuentra una imperfección. A continuación se indica la manera en que se realizó este ensayo “líquidos penetrantes”.

A.- Limpieza Previa de la superficie

- Se limpió el cupón de prueba con un cepillo de alambre y un trapo humedecido de gasolina para así remover la presencia de cualquier óxido o suciedad
- Se aplicó el aerosol removedor de suciedad Tecnoend, marca polimeter sobre el cordón y material base para la limpieza profunda de óxidos, grasas, o cualquier otro tipo de suciedad sobre la misma. Posteriormente el líquido se dejó actuar por 5 minutos y se removió mediante el uso de papel absorbente y un trapo limpio y seco.

B.- Aplicación del Penetrante

Una vez limpia y seca la superficie del cordón y material base, se aplicó una película uniforme de líquido penetrante en aerosol Tecnoend, manteniendo una distancia de aplicación de aproximadamente 30 cm de la superficie. Se dejó transcurrir un tiempo de acción de 10 min.

C.- Aplicación del Revelador

Después de transcurrido el tiempo de acción del penetrador se aplicó una película fina y uniforme del aerosol revelador Tecnoend, sobre la superficie cubierta con el penetrador

manteniendo nuevamente una distancia de 30 cm (aproximadamente). Se dejó actuar el revelador por 10 min. Para posteriormente realizar la inspección, en donde se tomó una fotografía del montaje para luego reportar el resultado de esta inspección.

2.8.- Ensayos Destructivos

El conjunto de evaluaciones que comprenden los ensayos destructivos realizados al cupón de prueba para su caracterización fueron: Análisis químico del cordón, evaluación metalográfica (macrografía, micrografía, dilución), medición de ferrita, medición de la dureza (micro y macrodureza), ensayos de doblez de cara y raíz y ensayos de tracción.

2.8.1.- Análisis Químico

Para realizar la caracterización química de los depósitos de soldadura se extrajeron aproximadamente 10 gramos de material en forma de virutas, por cada mezcla gaseosa de protección utilizada. La extracción se realizó en la dirección transversal al cordón de soldadura, por medio de un taladro de banco. Este material fue analizado por el método de Absorción Atómica de Espectrofotometría de Llama, es decir, el mismo método utilizado en el análisis químico del material base, en el Laboratorio Químico Instrumental de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV.

2.8.2.- Evaluación Metalográfica

La evaluación metalográfica de los depósitos de soldadura incluye un análisis macrográfico y uno micrográfico. La preparación de las probetas para el análisis metalográfico se realizó, en forma general, de la siguiente manera:

1. Se tomaron dos muestras del cupón de prueba (Fig. 2.9), y fueron llevadas a las medidas que se muestran en la figura 2.10 para facilitar su manipulación.
2. El primer paso para mejorar la calidad superficial consiste en desbastar con lijas la superficie de la probeta, empezando con un desbaste grueso de grano N° 80 hasta eliminar todas las irregularidades de la sierra de vaivén y posteriormente afinando sucesivamente hasta llegar al grano N° 600.

3. El pulido final se hizo utilizando primero lona con alúmina de $1\mu\text{m}$, seguido por el paño verde con alúmina de $0,3\mu\text{m}$ y paño rojo con alúmina de $0,05\mu\text{m}$.
4. La probeta se atacó con una solución electrolítica de ácido oxálico (10 g de ácido en 100 cc de agua) en condiciones de 23V durante 30 segundos para revelar las distintas zonas de la junta soldada.

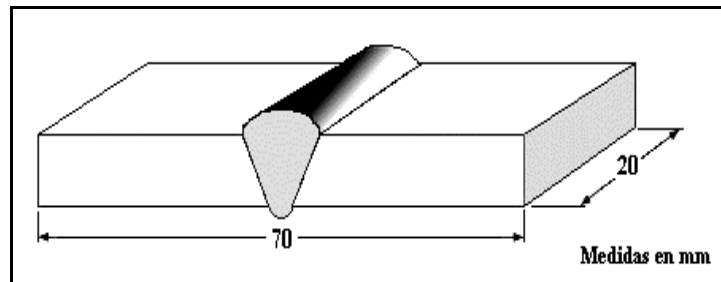


Figura 2.10.- Dimensiones de las probetas utilizadas para realizar metalografía y dureza.

Análisis Macrográfico

El análisis macrográfico se realizó con objeto de identificar la zona del cordón, la zona afectada térmicamente, la penetración lateral, ancho y altura de cara y raíz, y el porcentaje de dilución, así como determinar su forma, tamaño y apariencia general que dependen de la geometría y del proceso de soldadura, la figura 2.11 muestra de manera esquemática la forma del análisis micrográfico y el esquema utilizado para realizar los cálculos correspondientes.

Análisis Micrográfico

El análisis micrográfico se realizó a fin de verificar la microestructura y fases presentes, así como la presencia de micro poros y micro fisuras en el cordón de soldadura y en la zona afectada térmicamente, haciendo especial énfasis en la zona de transición entre el cordón y la zona afectada térmicamente. Las micrografías fueron tomadas con un microscopio óptico Olympus GX60 y una cámara digital Olympus DP12.

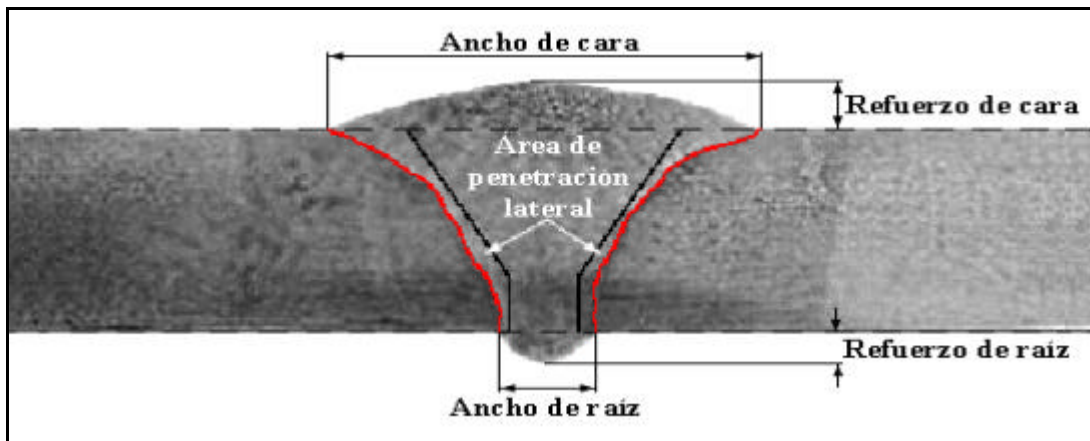


Figura 2.11.- Parámetros geométricos del cordón de soldadura.

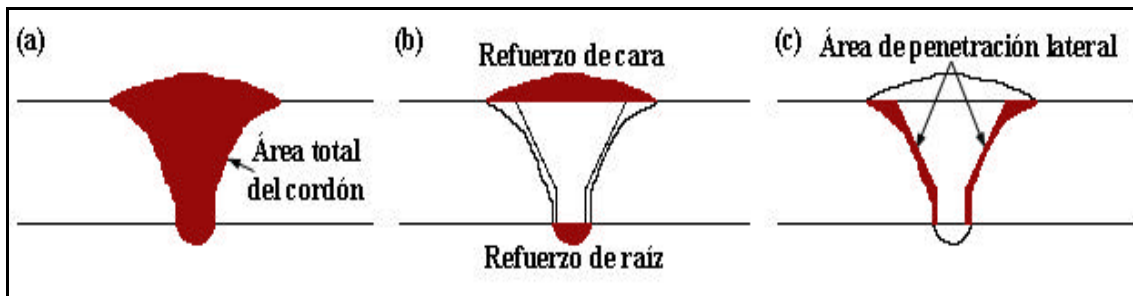


Figura 2.11a.- Esquema general utilizado para el cálculo de las relaciones de áreas, penetración y dilución en los cordones de soldadura.

2.8.3.- Ensayo de Dureza

Una vez realizada la evaluación metalográfica, fueron utilizadas las mismas probetas para determinar un perfil de dureza superficial de las soldaduras. Esto se realizó según la norma ASTM E 384^[43]. La figura 2.12 muestra el barrido hecho sobre la probeta, se realizó un primer barrido sobre el cordón de soldadura para obtener un valor más estadístico, también se realizaron dos perfiles horizontales de dureza. Se practicaron un total de 29 mediciones, con una separación aproximada de 2 milímetro entre dos mediciones consecutivas. Esto se llevó a cabo con un durómetro universal marca OTTO WOLPERT-WERKE, tipo 2RC W-testor, usando una carga de 20 Kp y un indentador de forma piramidal (Vickers) con base cuadrada y ángulo entre las caras de 136°. Ubicado en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV.



Figura 2.12.- Esquema representativo de los lugares en los que se medirá la dureza.

2.8.4.- Medición de la Ferrita

Método Metalográfico

Al igual que con el Material Base se utilizó el programa analizador de imagen Digital MicroGraph ver 3.4.2, se analizaron 2 fotomicrografía a 200X ubicadas en la línea central del cordón de soldadura, la probeta fue atacada con una solución electrolítica de ácido oxálico (10 g de ácido en 100 cc de agua) en condiciones de 23V durante 30 segundos. El programa calculó el número de pixels de la imagen que abarca las áreas oscura (ferrita), realizando lo propio con las áreas clara de la fase restante (austenita). De esta forma, se procede a una relación entre pixels que revela directamente una relación porcentual entre las distintas fases presentes en la fotomicrografía analizada.

Método Químico

Debido a la importancia del contenido de ferrita delta sobre el agrietamiento en caliente, en los cordones de soldadura, de los Aceros Inoxidables Austeníticos, también su contenido fue evaluado empleando un método químico. Este análisis fue realizado de igual modo que en el punto 2.2.2, con la diferencia que aquí se analiza el cordón de soldadura en vez del material base. Posteriormente con las relaciones planteadas por DeLong^[15] se calcula los porcentajes de ferrita delta (%Ferrita) y el Número Ferrítico (FN) una vez representado estos valores en el diagrama presentado por DeLong.

2.8.5.- Ensayos de Tracción

Para analizar la resistencia de la junta soldada a las cargas axiales de tensión se realizaron tres ensayos de tracción a las juntas soldadas a fin de determinar propiedades mecánicas tales como el esfuerzo de fluencia (σ_y), y el esfuerzo real a carga máxima (σ_{max}), la deformación (ϵ). Estos ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos marca INSTRON modelo 8502 con capacidad de 25 toneladas y desplazamiento máximo de 100 cm (figura 2.13), la cual está ubicada en el Laboratorio Nacional de Referencia para la Evaluación de Propiedades Mecánicas, Desgaste y Corrosión de Materiales en la unidad de Ensayos Mecánicos de la UCV. Este equipo registra de las mediciones realizadas por el sistema de adquisición de datos durante el tiempo en que se está efectuando el ensayo. Dicho datos son usados luego para la construcción de las curvas de tracción.

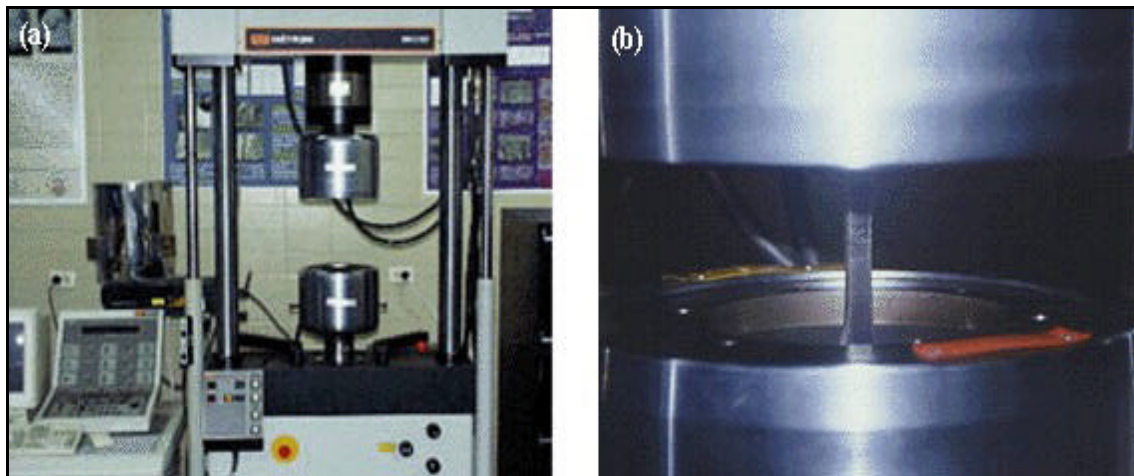


Figura 2.13.- (a) Máquina universal de ensayos INSTRON modelo 8502.
(b) Acercamiento de la mordaza sujetando una probeta de tracción.

El proceso de fabricación de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción de las juntas soldadas, se realizó llevando a cabo los siguientes pasos.

1. Corte de los cupones de prueba con una sierra de vaivén de acuerdo a lo indicado en el esquema de la figura 2.10 (cupón de prueba).
2. Maquinado y rectificado de los refuerzos de cara y raíz del cordón de soldadura hasta dejarlos al ras con el material base. Esto se hizo en dos etapas, la primera se realizó utilizando un esmeril manual, con el que se disminuyó la altura de los refuerzos hasta un valor aproximado de un milímetro. La segunda, se llevó a cabo con una máquina de esmerilado plano para esmerilado frontal que posee un sistema de sujeción magnético.
3. Para que las probetas cumpliesen con las medidas de la regla QW 462.1(a) del código ASME sección IX, las cuales se muestran en la figura 2.14, se procedió a mecanizarla.
4. Por último las probetas fueron lijadas empezando con un grano 80 y afinando sucesivamente hasta grano 600 en dirección axial, con el fin de eliminar cualquier posible concentrador de esfuerzos.

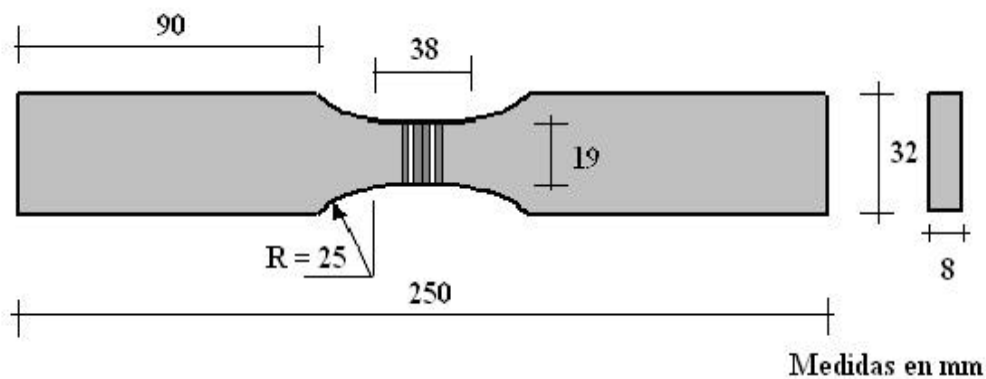


Figura 2.14.- Diseño de probeta para ensayo de tracción de la junta soldada según la regla QW 462.1(a) del Código ASME sección IX.

2.8.6.- Ensayos de Dobleces

Los ensayos de dobleces guiados son utilizados para determinar el grado de solidez y ductilidad de las juntas soldadas en ranura. Para la realización de este tipo de ensayo se elaboraron cuatro probetas según la regla QW-462.3(a) del código ASME sección IX, esta regla contempla como medidas las señaladas en la figura 2.15. La preparación de estas probetas fue similar a la utilizada en la evaluación mecánica del metal base.

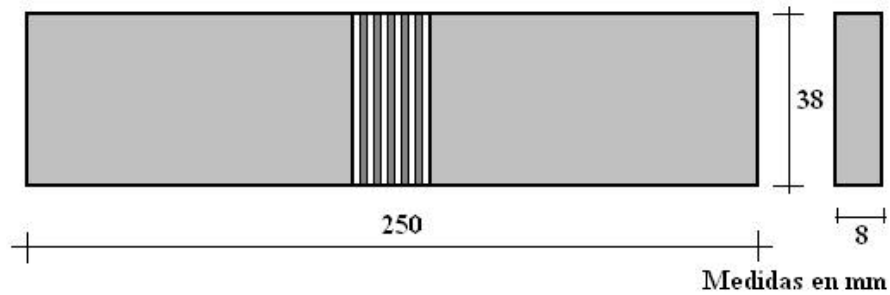


Figura 2.15.- Diseño de probeta para ensayo de Dobleza (cara y / o raíz) de la junta soldada de acuerdo a la regla QW-462.3(a) del Código ASME sección IX.

De las cuatro probetas elaboradas, dos fueron destinadas para doblado transversal de cara, mientras que las otras dos para la realización del doblado transversal de raíz. El equipo usado para llevar a cabo estos ensayos fue una máquina universal de ensayos estáticos de 20 toneladas “LOSENHAUSEN”, modelo UHP 20 ubicada en la Escuela de Ingeniería Mecánica UCV.



Figura 2.16.- Máquina universal “LOSENHAUSEN”, modelo UHP 20, utilizada en los ensayos de doblado de la junta soldada.

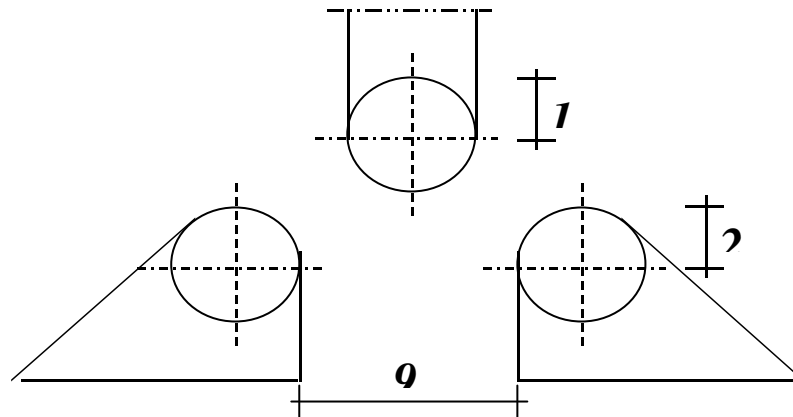


Figura 2.17.- Disposición y dimensiones de los rodillos utilizados para el ensayo de doblado, de acuerdo a lo especificado en QW- 466.2 del Código ASME sección IX.

2.9.- Registro de Calificación de Procedimiento

Una vez realizado los ensayos requeridos para caracterizar la junta soldada del Acero Inoxidable AISI/SAE 304 se procederá a realizar el registro de calificación de procedimiento en donde se reportarán las condiciones generales y específicas del procedimiento, tales como materiales y dimensiones utilizados, velocidad de alimentación del alambre, velocidad de desplazamiento de la soldadura, posición de la soldadura, proceso de soldadura y variables seleccionadas, entre otros. El mismo se formalizará sobre los formatos elaborados por el Centro Venezolano de Soldadura, mostrados en los anexos 1a y 1b.

3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1.- Caracterización de los Materiales

3.1.1.- Caracterización Química del Material Base y Aporte

En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos del análisis químico realizados al metal base AISI/SAE 304 y su composición nominal según AISI/SAE^[28].

Tabla 3.1.- Composición Química del Material Base AISI/SAE 304 (% en peso).

Elementos	%C	%Cr	%Ni	%Si	%Mn	%S
Material Base	0,05	18,10	8,20	0,30	2,00	0,009
AISI/SAE 304	0,08	18-20	8-10,5	0,75max	2,00	0,03

En la tabla 3.2 se reporta el análisis químico nominal del material de aporte (ER 308L-Si) según lo especificado por el fabricante, que se rige por la norma AWS^[40] A5.9, y según AISI/SAE^[28].

Tabla 3.2.- Composición Química del Material de Aporte ER308L-Si.

Elementos	%C	%Cr	%Ni	%Si	%Mn	%S
Material de Aporte	0,03	20	10	0,9	1,75	0,03
AISI/SAE 308L-Si	0,03	19,5-22	9-11	0,65-1	1-2,50	0,03

3.1.2.- Caracterización Metalográfica del Metal Base

En la figura 3.1 con un aumento de 200X se muestra la caracterización metalográfica del material base en sentido transversal y longitudinal a la dirección de laminación, aquí se evidencia la presencia de granos austeníticos (áreas blancas) bordeado por ferrita (áreas y líneas oscuras), las cuales identifican las fases típicas del acero AISI/SAE 304.

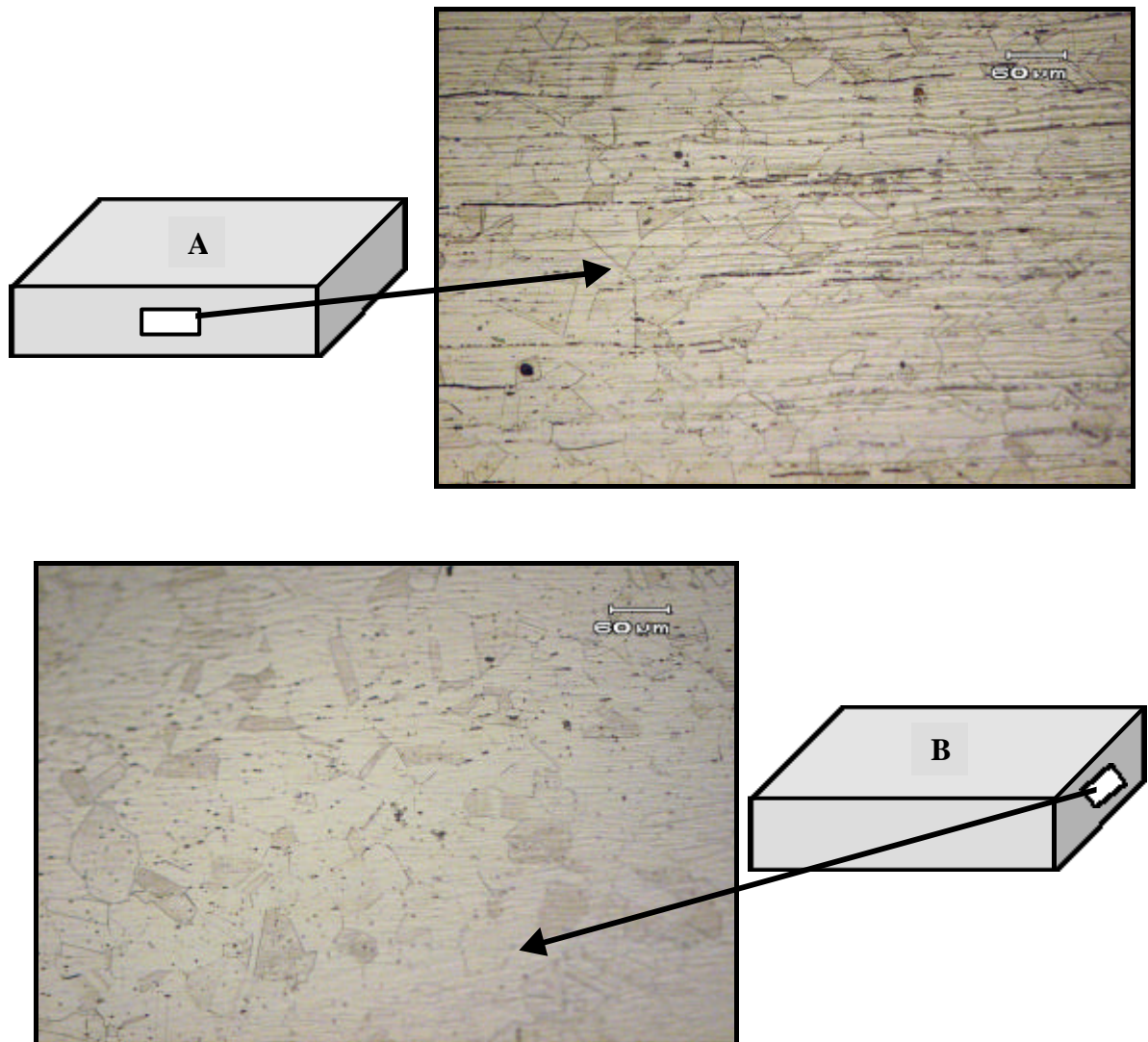


Figura 3.1.- Microestructura del material base en dirección A) longitudinal; B) transversal al sentido de laminación. En todas las micrografías la matriz clara representa la Austenita y el área oscura representa la Ferrita.

3.1.3.- Contenido de Ferrita en el Metal Base

3.1.3.1.- Método Metalográfico

Para determinar el contenido de ferrita del metal base se utilizó la fotomicrografía mostrada en la figura 3.2. y los valores obtenidos se presentan en la tabla 3.3.

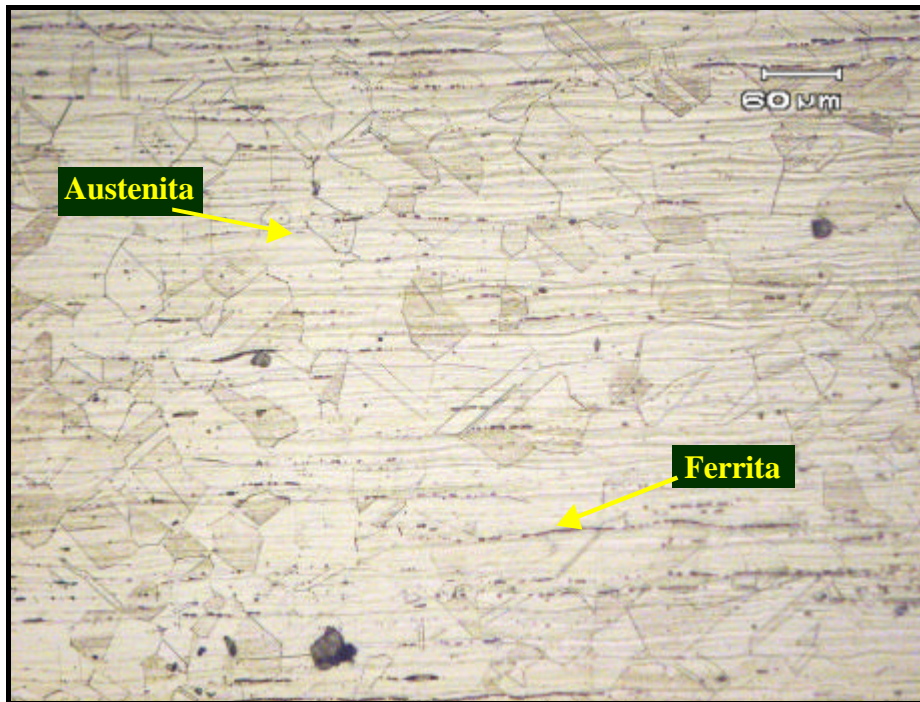


Figura 3.2.- Fotomicrografía del material base indicando las distintas fases presente: ferrita (área oscura) en matriz de austenita (área clara). Atacadas con una solución electrolítica (10g de ácido oxálico en 100ml de agua) durante 15s a 23V.

Tabla 3.3.- Contenido de Ferrita en el Material Base (Método Metalográfico).

Material Base	Contenido de Ferrita
	(%)
Medida 1	7,83
Medida 2	7,67
Medida 3	7,74
Promedio	7,75
Desviación Estándar	0,08

3.1.3.2.- Método Químico

Partiendo de los análisis químicos se evaluó el contenido de ferrita en el material base y aporte, los resultados son reportados en la tabla 3.4, indicándose en la figura 3.3 y figura 3.4 (gráficos de Schaeffler y DeLong respectivamente). Estos valores concuerdan con los reportados por AISI/SAE^[28] para el material base, y por el fabricante^[40] para el material de aporte.

Tabla 3.4.- Contenido de Ferrita en el Material Base y en el Material de Aporte de Acuerdo al Método Químico.

Diagramas/Materiales		Material Base	Material de Aporte
Diagrama de Schaeffler	Cr _{eq} (%)	18,55	21,35
	Ni _{eq} (%)	10,70	11,77
	Ferrita (%)	5 – 10	10
Diagrama de DeLong	Cr _{eq} (%)	18,55	21,35
	Ni _{eq} (%)	10,70	11,77
	Ferrita (%)	7,6	> 13,8
	Número de Ferrita (FN)	8	16-18

Niquel Equivalente = %Ni + 30%C + 0.5%Mn

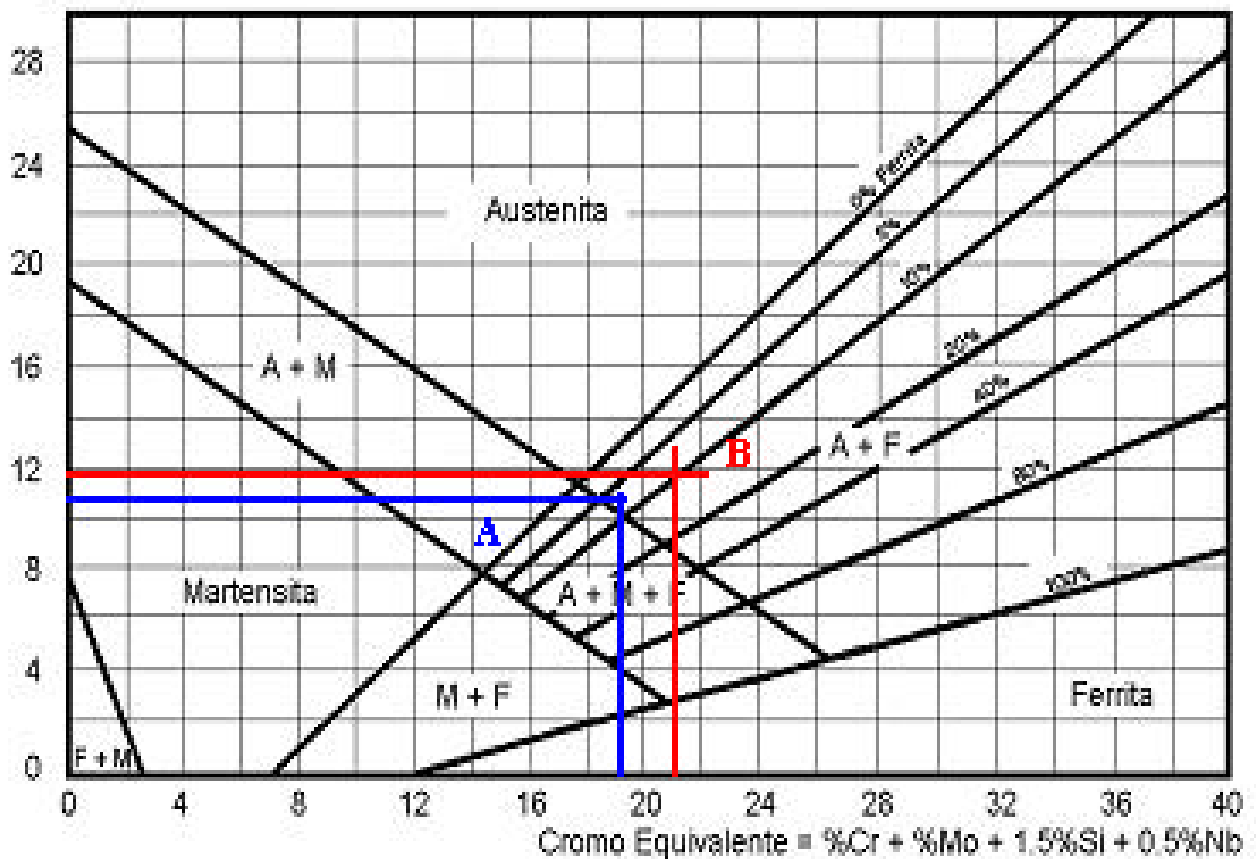


Figura 3.3.- Diagrama de Schaeffler, donde (A) indica el % de Ferrita del Material Base. (B) indica el % de Ferrita del Material de Aporte.

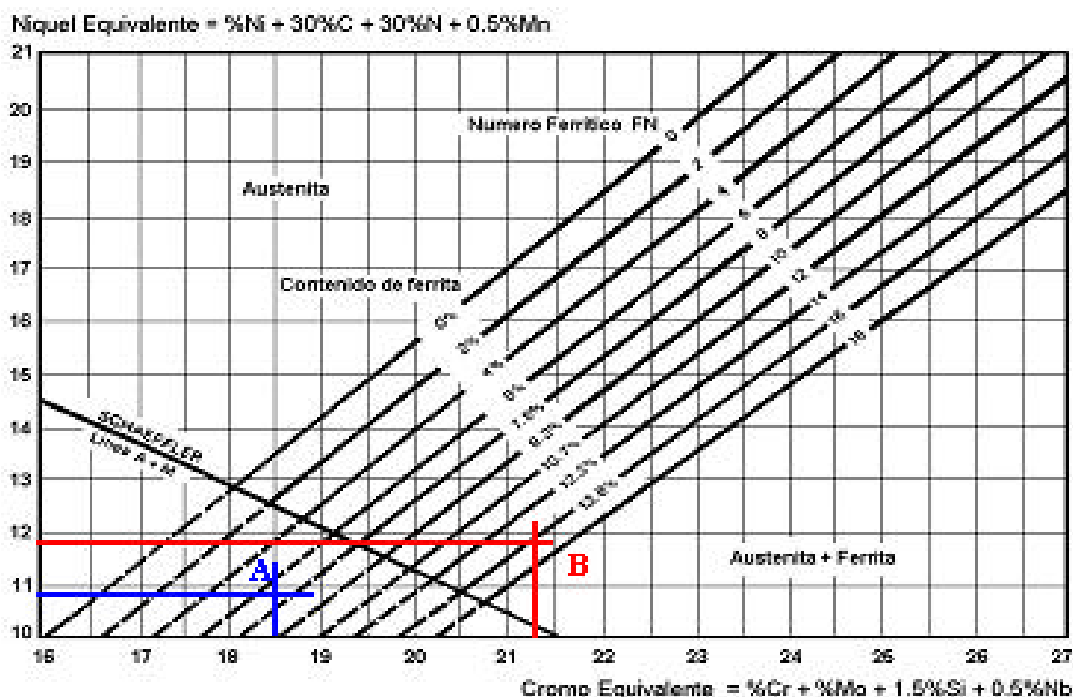


Figura 3.4.- Diagrama de DeLong, donde A indica el % de ferrita y el Número de Ferrita del material base, y B el % de ferrita y el Número de Ferrita del material de aporte.

3.1.4.- Caracterización Mecánica del Material Base

Ensayo de Dureza

Para medir la dureza del material base se toma una muestra transversal y otra longitudinal, en cada una de ellas se realizaron 6 mediciones, estas mediciones se realizaron con un durómetro universal marca OTTO WOLPERT-WERKE, tipo 2RC W-testor, usando una carga de 20 Kp y un indentador de forma piramidal (Vickers) con base cuadrada y ángulo entre las caras de 136°. Los resultados del ensayo de dureza son reportados en la tabla 3.5, aquí puede ser observado que el valor promedio de dureza Vickers obtenida para el material base fue de $162,5 \pm 2,48$ HVN₂₀.

Tabla 3.5.- Valores reportados de Dureza Vickers (HVN₂₀) del material base.

Probeta	Valores de Dureza Vickers						Promedio	Desviación Estándar
Transversal	159,2	160,4	164,1	166,5	164,1	159,8	162,5	± 2,48
Longitudinal	160,2	159,3	164,2	163,8	164	166,5		

3.2.- Determinación de los Parámetros en la Soldadura GMAW-P

3.2.1.- Criterio de Burnoff

A partir de los ensayos de soldadura con modo de transferencia pulsada y transferencia corto circuito se obtuvieron los datos que se muestran la tabla 3.6, en función de los cuales se construyó la gráfica representada en la figura 3.5.

Tabla 3.6.- Datos de la gráfica que representa el Criterio de Burnoff para el material de aporte ER308L-Si.

Velocidad de Alimentación del Alambre (W_F) (m/min)	Soldadura con Corriente Cortocircuito Corriente Media (I_m) (A)	Soldadura con Corriente Pulsada Corriente Media (I_m) (A)
2	80	73
3	121	102
5	179	149
7	212	201
9	243	279
10	255	309

Criterio de Burnoff

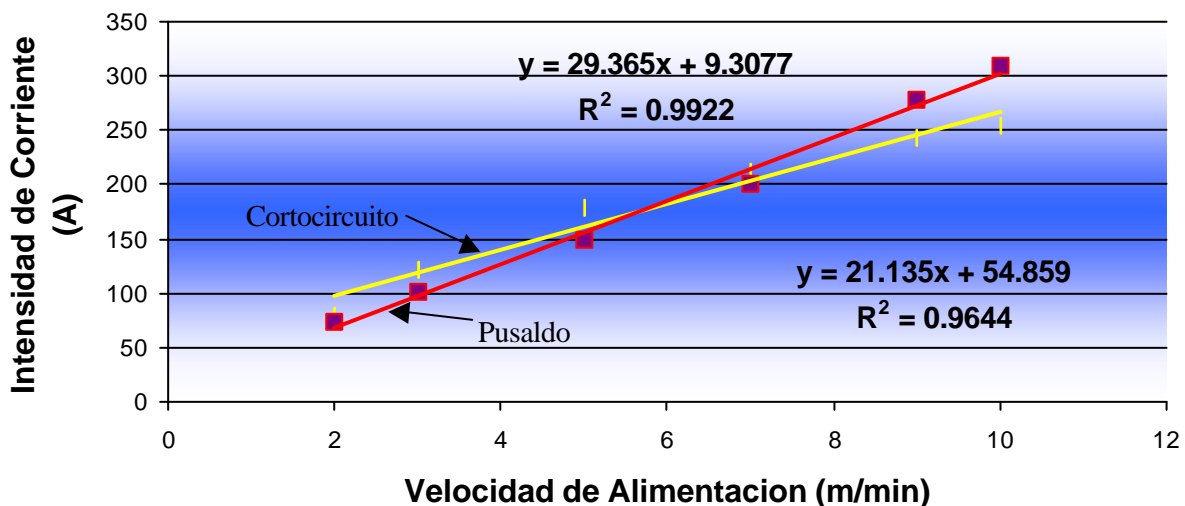


Figura 3.5.- Relación entre I_m vs. W_F para soldadura con corriente constante y pulsada usando un aporte ER 308L-Si de diámetro 1,2 mm.

El punto de corte de las dos rectas representadas en la figura 3.5, ocurre en $W_F = 5,53$ m/min el cual representa el valor de la corriente de transición para este tipo de material de aporte. Las ecuaciones para las rectas obtenidas son: la ecuación 18 para arco pulsado y la ecuación 19 para arco convencional respectivamente:

$$Y = 29,365X + 9,3077 \quad (19)$$

$$Y = 21,135X + 54,859 \quad (20)$$

Usando la ecuación 8 con $W_F = 5$ m/min, obtenemos $T_c = 9,6$ ms. Aplicando la ecuación 10 obtenemos la pendiente $m = 29,4$ y $K = 9,31$. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en investigaciones anteriores^[38] y por conseguir con esta condición de velocidad de alimentación del electrodo una transferencia metálica tipo spray se toma como parámetro fijo (base de estudio) la velocidad de alimentación del electrodo en un valor de 5 m/min. Usando la ecuación 11 y tomando el valor de $T_c = 9,6$ ms, $W_F = 5$ m/min e $IM = 147$ A, se obtiene la Zona Paramétrica representada en la figura 3.6.

3.2.2.- Criterio de Transferencia Metálica

Limitación de la Corriente Pico (I_p) y Tiempo Pico (T_p)

Los parámetros cuya combinaciones I_p vs. T_p ofrecen el desprendimiento de una gota por pulso (para una $W_F = 5$ m/min) se ilustran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7.- Parámetros ($I_p - T_p$) que ofrecen una gota por pulso para $W_F = 5,0$ m/min.

$W_F = 5$ m/min			
T_p (ms)	T_b (ms)	I_p (A)	I_b (A)
2,2	7,4	385	76
2,2	7,4	407	69
2,4	7,2	398	63
2,7	6,9	361	63
2,7	6,9	378	56
2,7	6,9	394	50
2,8	6,8	366	56
3,0	6,6	360	50

Zona Paramétrica Im147A

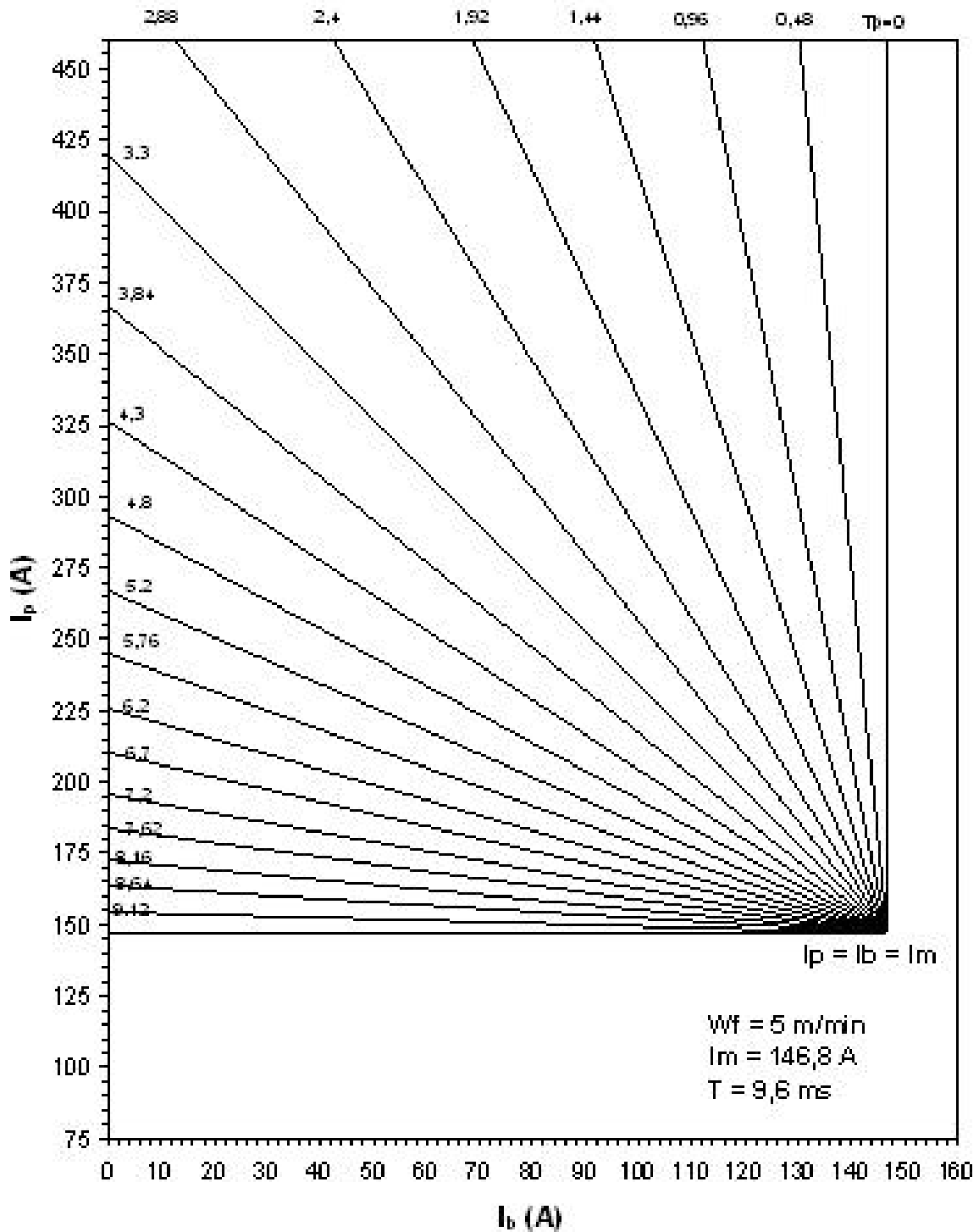


Figura 3.6.- Zona Paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff, para: $W_F = 5 \text{ m/min}$; $I_m = 146,8 \text{ A}$ y $T = 9,6 \text{ ms}$

La relación potencial existente se expresa en la figura 3.7 con sus respectivas ecuaciones de ajuste. El volumen de gota calculado por la ecuación 2 arrojó como resultado $V = 0,905 \text{ mm}^3$, utilizando un diámetro de electrodo de 1,2 mm. De donde se obtiene que el valor del exponente es (-2,58) por lo que la ecuación 12 queda expresada de la siguiente manera:

$$I_p^{-2,58} T_p = K_v \quad (20)$$

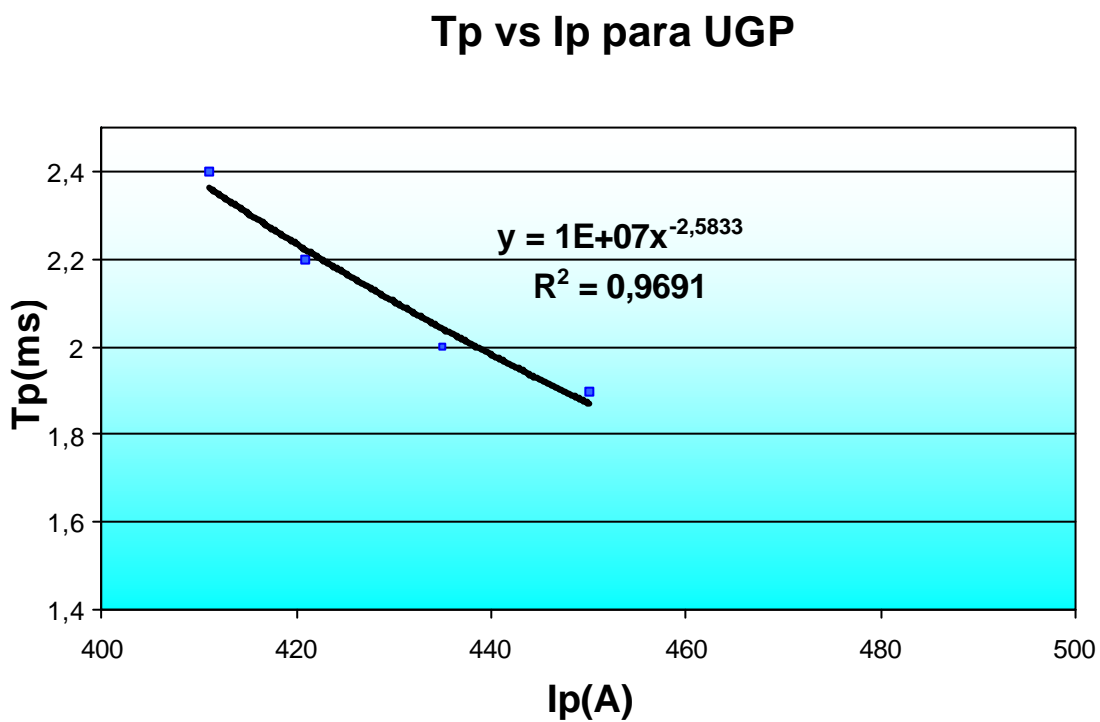


Figura 3.7.- Relación exponencial entre I_p y T_p para la condición de una gota promedio por pulso para un volumen de gota desprendida de $0,905 \text{ mm}^3$ de material de aporte ER 308L-Si.

Determinación del Parámetro de Desprendimiento (K_v)

Los parámetros que aseguran una transferencia tipo spray en corriente constante para un barrido de W_F están representados en la tabla 3.8. Mientras que las figuras 3.8 a la figura 3.12 muestran los oscilogramas correspondientes a las distintas velocidades de alimentación, los cuales son típicos para este tipo de soldadura. Los valores asumidos de inductancia, tanto de subida (K_s) como de descenso (K_d), se fijaron en un valor de 15 para transferencia en Spray.

Tabla 3.8.- Parámetros de Soldadura con corriente constante y transferencia tipo spray.

W_F (m/min.)	Corriente Media (I_m) (A)	Voltaje (V)
5	133	28,88
6	207	28,36
7	227	28,19
8	232	28,13
9	257	27,96

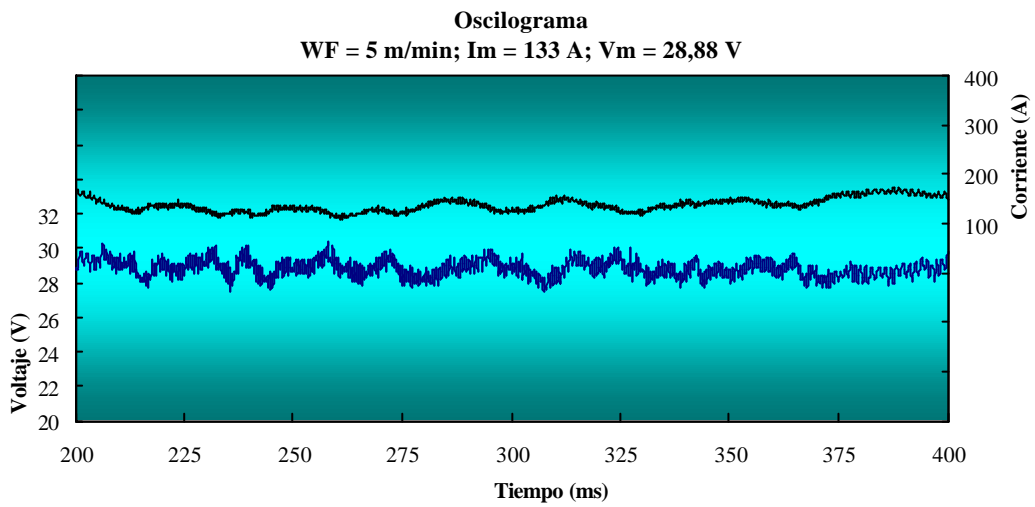


Figura 3.8.- Oscilograma con transferencia tipo spray (W_F = 5 m/min; I_m = 133 A; V_m = 28,88 V).

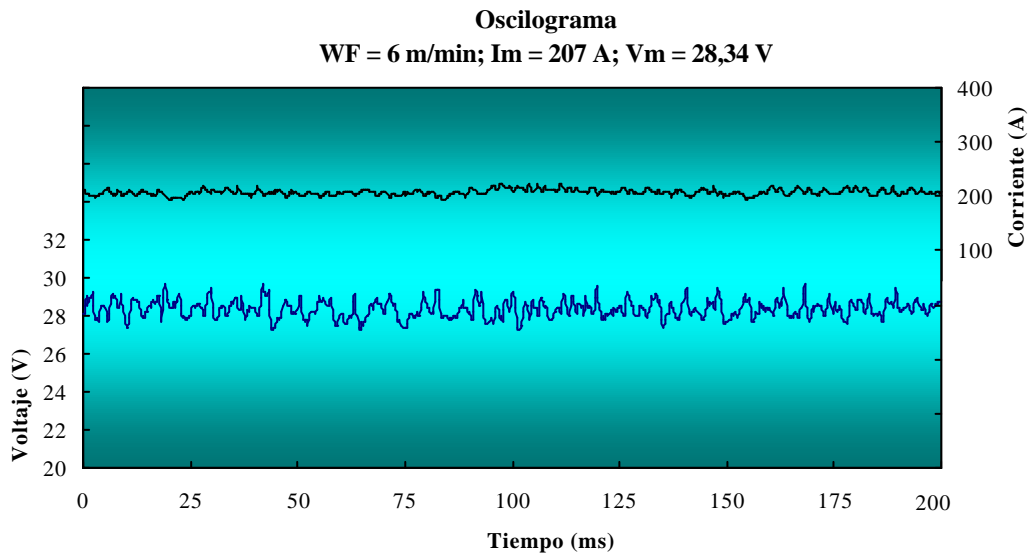


Figura 3.9.- Oscilograma con transferencia tipo spray (W_F = 6 m/min; I_m = 207 A; V_m = 28,34 V).

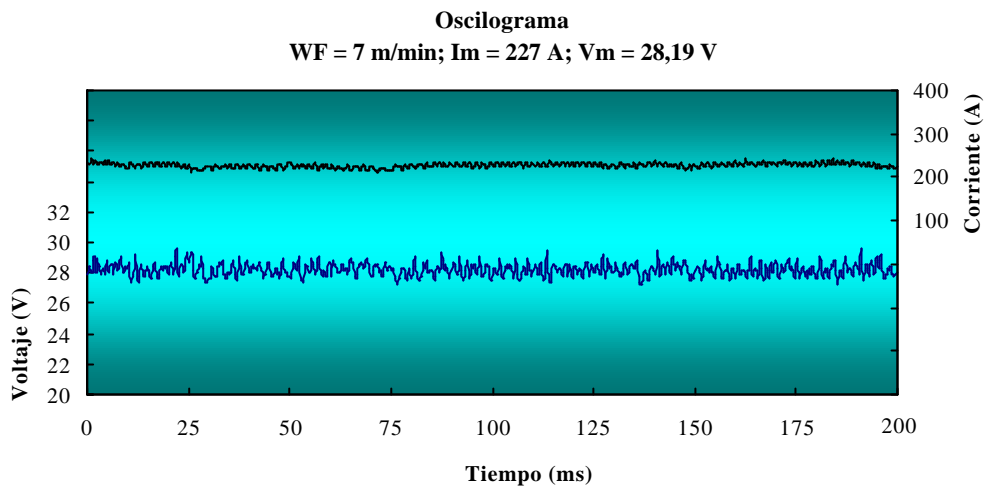


Figura 3.10.- Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 7$ m/min; $I_m = 227$ A; $V_m = 28,19$ V).

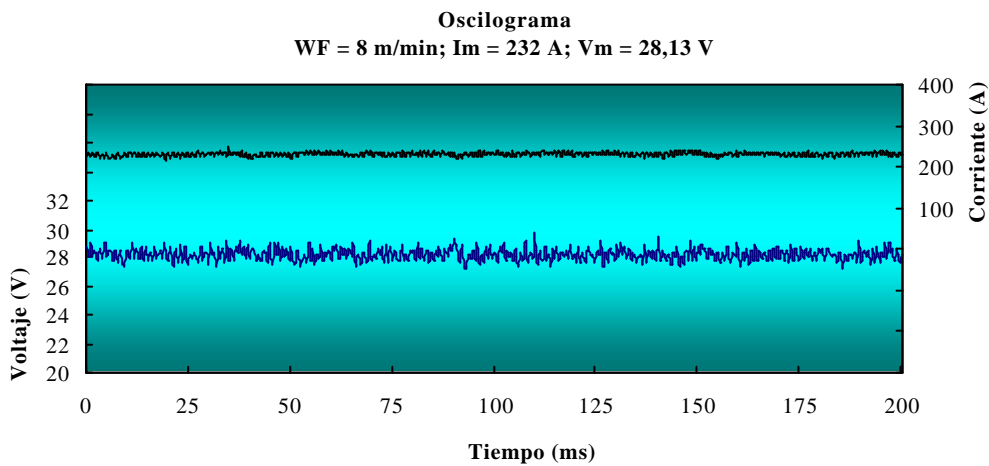


Figura 3.11.- Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 8$ m/min; $I_m = 232$ A; $V_m = 28,13$ V).

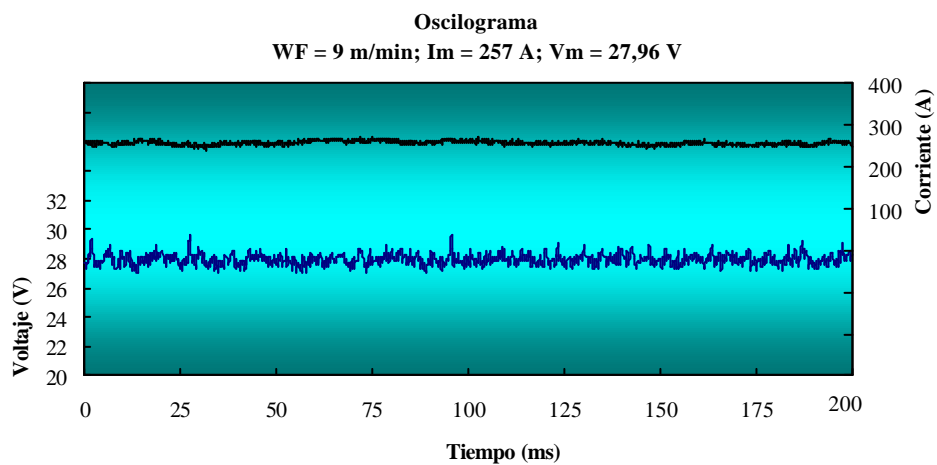


Figura 3.12.- Oscilograma con transferencia tipo spray ($W_F = 9$ m/min; $I_m = 257$ A; $V_m = 27,96$ V).

Los valores obtenidos de (I_{dc}) se extraen a partir de los oscilogramas anteriores, para obtener los valores de tiempo de desprendimiento modal (T_{dm}) se analizan los histogramas representados en las figuras 3.13 – 3.17; por último, como se conoce el tiempo de desprendimiento modal (T_{dm}), se obtiene por medio de la ecuación 8 el valor de V_{dm} para cada W_F .

Histograma con $W_f = 5 \text{ m/min}$

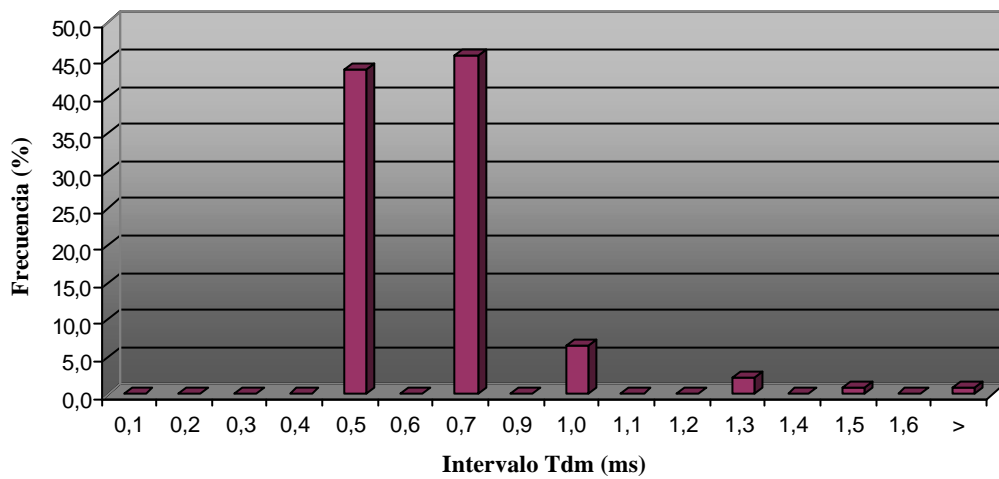


Figura 3.13.- Histograma $T_{dm} = 0,7 \text{ ms}$ ($W_F = 5 \text{ m/min}$; $I_m = 133 \text{ A}$; $V_m = 28,88 \text{ V}$).

Histograma con $W_f = 6 \text{ m/min}$

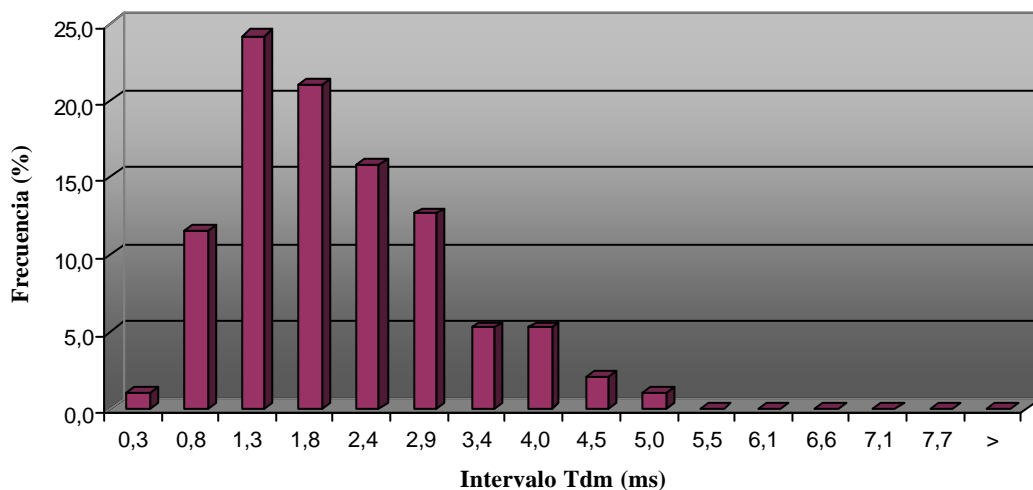


Figura 3.14.- Histograma $T_{dm} = 1,3 \text{ ms}$ ($W_F = 6 \text{ m/min}$; $I_m = 207 \text{ A}$; $V_m = 28,34 \text{ V}$).

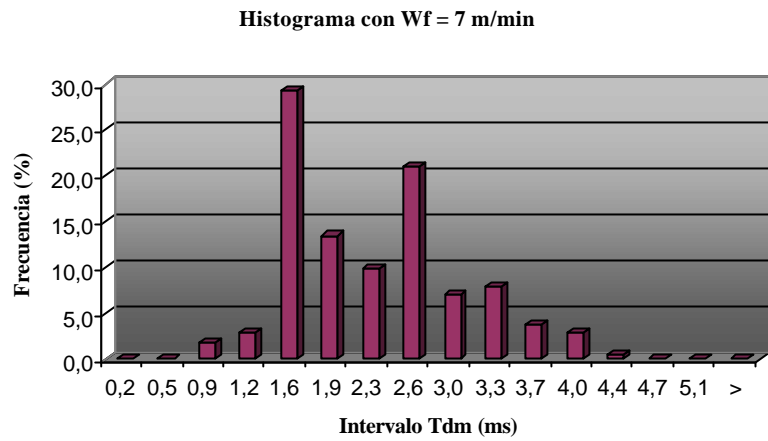


Figura 3.15.- Histograma Tdm = 1,6 ms ($W_F = 7$ m/min; $I_m = 227$ A; $V_m = 28,19$ V).

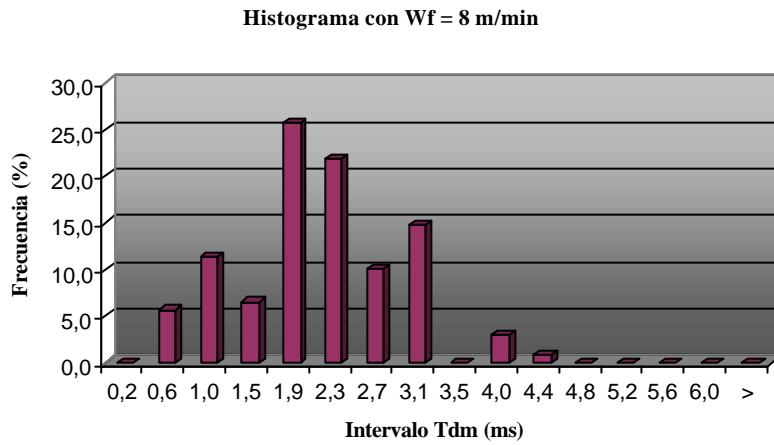


Figura 3.16.- Histograma Tdm = 1,9 ms ($W_F = 8$ m/min; $I_m = 232$ A; $V_m = 28,13$ V).

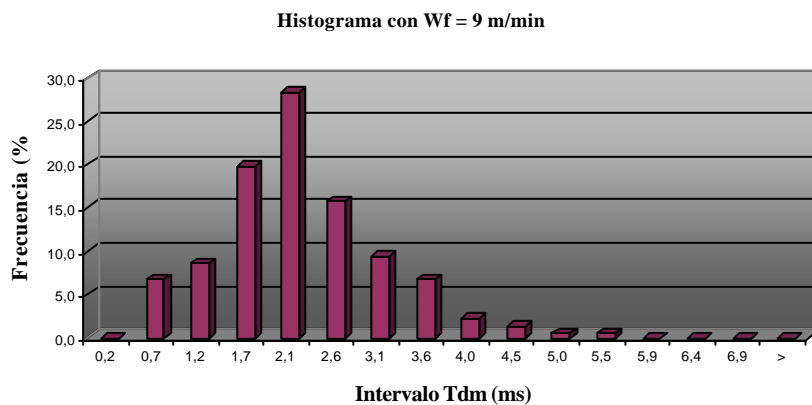


Figura 3.17.- Histograma Tdm = 2,1 ms ($W_F = 9$ m/min; $I_m = 257$ A; $V_m = 27,96$ V).

En la tabla 3.9 son reportados los valores obtenidos de los oscilogramas y de los histogramas realizados. Dichos valores servirán de base para la construcción de dos graficas, figura 3.18 y 3.19, que permitirán encontrar el valor de la constante de desprendimiento K_v .

Tabla 3.9.- Valores de I_{dc} , T_{dm} y V_{dm} obtenidos a partir de las pruebas realizadas con transferencia tipo spray.

W_F (m/min)	I_{DC} (A)	T_{DM} (ms)	V_{DM} (mm ³)
5	133	0,7	0,238
6	207	1,3	0,531
7	227	1,6	0,762
8	232	1,9	1,034
9	257	2,1	1,286

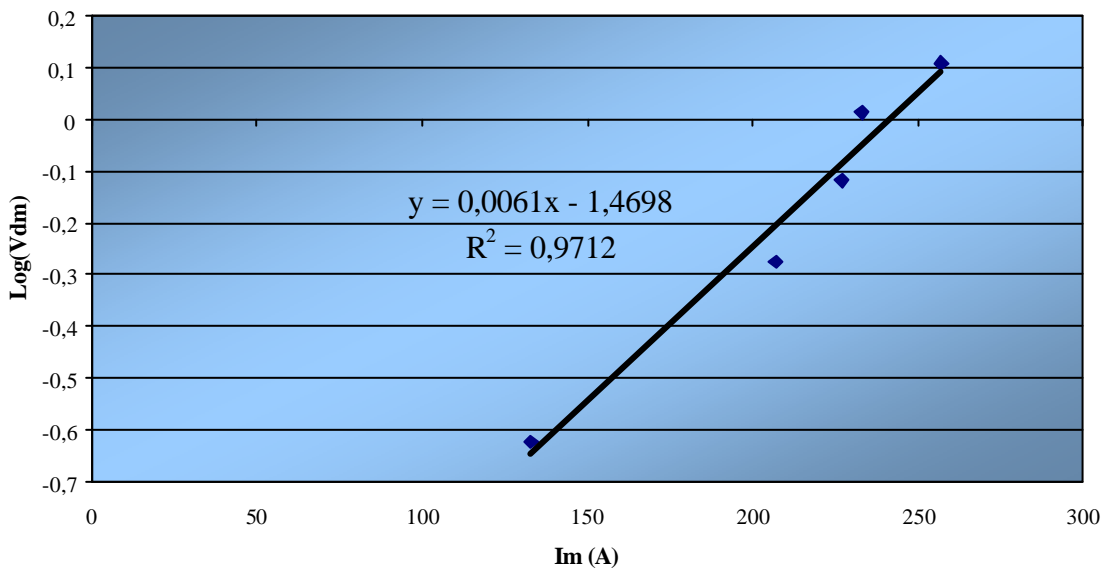


Figura 3.18.- Gráfica $\text{Log}(V_{dm})$ vs. I_m para el intervalo de velocidades de alimentación ensayadas.

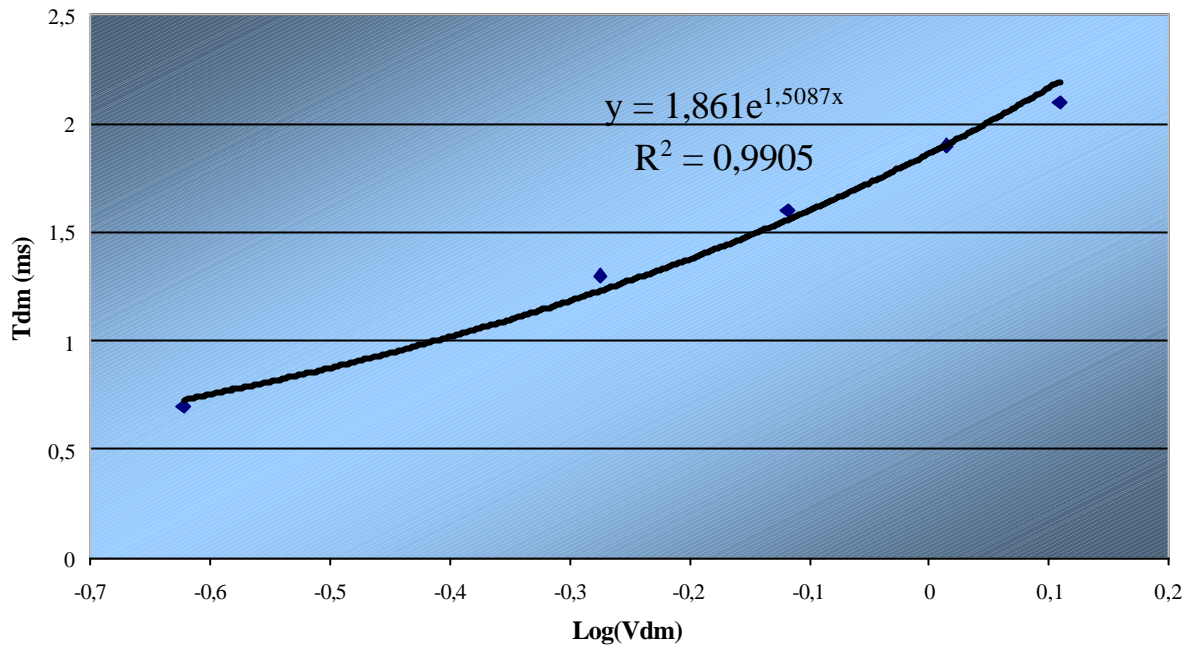


Figura 3.19.- Gráfica Tdm vs. Log (Vdm) para el intervalo de velocidades de alimentación ensayadas.

De esta forma, se obtienen las siguientes relaciones entre Vdm y Im, y, Tdm y Vdm.

$$\text{Log (Vdm)} = 0,0061\text{Im} - 1,4698 \quad (21)$$

$$\text{Tdm} = 1,861\text{exp} (1,5087\text{Log (Vdm)}) \quad (22)$$

Para el volumen de gota requerido en el desprendimiento $V = 0,90 \text{ mm}^3$ tenemos de las ecuaciones anteriores que, $\text{Im} = 233 \text{ A}$ y que $\text{Tdm} = 1,68 \text{ ms}$. Sustituyendo estos valores en la ecuación 10, encontramos que el valor de Kv es 2153,22.

Curva de Potencia Constante

Una vez encontrado el valor de Kv se sustituye en la ecuación 12 obteniendo de esta manera una relación que nos permite graficar una curva paramétrica de potencia constante característica de nuestro material.

$$\text{Ip}^{2,58} \cdot \text{Tp} = 2153,22 \text{ A}^{2,58} \text{ s} \quad (23)$$

3.2.3.- Criterio de Estabilidad del Arco

Para establecer la corriente base mínima posible antes de la extinción del arco con el objetivo de satisfacer el tercer criterio del método, se fijó el valor de I_b en 40 A. directamente a través de pruebas de soldadura bajando la corriente I_b hasta que se dejara de producir el arco eléctrico. Mediante el establecimiento de la corriente mínima en 40 A podemos limitar una parte de la zona paramétrica resultante y cumplir con el tercer criterio del método.

$$I_b > 40 \text{ A}$$

La zona predicha por los tres Criterios encontrados en la investigación de Amín⁽³³⁾, para la determinación de los parámetros pulsados, se encuentra limitada entre la corriente mínima de trabajo y la curva de potencia constante; sin embargo, esto no implica necesariamente que las diferentes combinaciones de valores dentro de esta región sean las únicas que produzcan soldaduras satisfactorias.

3.2.4.- Restricción de la Zona Paramétrica

En la tabla 3.10 se muestran una serie de ensayos que cumplen con las condiciones de estabilidad de arco y desprendimiento de una gota por pulso durante el tiempo pico, desprendimiento de una gota por pulso en la base, desprendimiento de mas de una gota por pulso, para una velocidad de alimentación de 5,0 m/min, una $I_m = 148 \text{ A}$; $T_c = 9,6 \text{ ms}$.

Tabla 3.1.- Ensayos realizados dentro de la zona paramétrica para $W_F = 5 \text{ m/min}$, $I_m = 148 \text{ A}$, $T = 9,6 \text{ ms}$. En rojo se muestran los ensayos seleccionados para caracterizar por ofrecer una gota por pulso.

ENSAYO N°	TP (MS)	TB (MS)	IP (A)	IB (A)	IM (A)	VM (V)	RESULTADO
E1-1	1	8,6	420	115	20,01	151,64	Cortocircuito
E1.1-1	1,1	8,5	393	115	20,36	154,18	Cortocircuito
E1.1-2	1,1	8,5	443	108	20,25	150,93	Cortocircuito
E1.2-1	1,2	8,4	415	108	20,25	150,93	Cortocircuito
E1.3-1	1,3	8,3	392	108	20,44	150,89	Cortocircuito
E1.3-2	1,3	8,3	433	102	20,66	147,73	Cortocircuito
E1.4-1	1,4	8,2	409	102	20,72	150,05	Cortocircuito
E1.4-2	1,4	8,2	448	95	21,22	141,18	Desprend. base
E1.5-1	1,5	8,1	389	102	20,41	154,18	Cortocircuito
E1.5-2	1,5	8,1	424	95	20,49	145,78	Cortocircuito
E1.6-1	1,6	8	371	102	20,57	148,45	Cortocircuito
E1.6-2	1,6	8	404	95	20,93	145,76	Desprend. base

E1.6-3	1,6	8	436	89	21	145,26	Desp. base y pico
E1.7-1	1,7	7,9	355	102	20,25	153,19	Cortocircuito
E1.7-2	1,7	7,9	385	96	20,41	148,25	Cortocircuito
E1.7-3	1,7	7,9	446	82	21,41	143	Desprend. base
E1.8-1	1,8	7,8	370	96	20,63	150,64	Cortocircuito
E1.8-2	1,8	7,8	397	89	20,62	151,19	Cortocircuito
E1.8-3	1,8	7,8	426	82	21,68	144,58	Desprend. base
E1.9-1	1,9	7,7	355	95	20,48	149,35	Cortocircuito
E1.9-2	1,9	7,7	381	89	21,17	146,24	Desprend. base
E1.9-3	1,9	7,7	408	82	22,15	144,74	Desp. base y pico
E1.9-4	1,9	7,7	434	76	20,81	144,59	Varias GP
E2-1	2	7,6	366	89	20,36	150,18	Cortocircuito
E2-2	2	7,6	392	82	20,90	146,24	UPG
E2-3	2	7,6	416	69	22,06	145,26	Desp. base y pico
E2-4	2	7,6	440	70	23,15	142,55	Desprend. base
E2.1-1	2,1	7,5	400	76	20,65	149,17	Cortocircuito
E2.1-2	2,1	7,5	423	69	20,40	146,41	Cortocircuito
E2.1-3	2,1	7,5	446	63	21,05	142,67	UPG
E2.2-1	2,2	7,4	364	82	148,37	20,59	Cortocircuito
E2.2-2	2,2	7,4	385	76	21,36	145,70	UPG
E2.2-3	2,2	7,4	407	69	21,32	145,95	UPG
E2.2-4	2,2	7,4	429	63	21,68	144,13	Desp. base y pico
E2.2-5	2,2	7,4	450	57	21,46	142,44	Desp. base y pico
E2.3-1	2,3	7,3	371	76	20,56	146,94	Varias GP
E2.3-2	2,3	7,3	392	70	21,54	145,19	Varias GP
E2.3-3	2,3	7,3	413	63	21,90	143,76	Desp. base y pico
E2.3-4	2,3	7,3	433	56	22,77	142,13	Desp. base y pico
E2.4-1	2,4	7,2	398	63	22,41	144,78	UPG
E2.4-2	2,4	7,2	437	50	21,72	145,18	Desp. base y pico
E2.5-1	2,5	7,1	366	69	20,78	145,39	Varias GP
E2.5-2	2,5	7,1	385	63	21,47	146,28	Desp. base y pico
E2.5-3	2,5	7,1	403	56	22,36	143,29	Varias GP
E2.5-4	2,5	7,1	421	50	22,80	143,98	Desp. base y pico
E2.7-1	2,7	6,9	361	63	22,25	146,09	UPG
E2.7-2	2,7	6,9	378	56	22,64	145,06	UPG
E2.7-3	2,7	6,9	394	50	22,79	143,74	Desp. base y pico
E2.8-1	2,8	6,8	350	63	20,92	145,72	Varias GP
E2.8-2	2,8	6,8	366	56	21,84	144,87	Desp. base y pico
E2.8-3	2,8	6,8	382	50	23,24	145,43	Desp. base y pico
E2.9-1	2,9	6,7	355	57	22,85	145,73	Varias GP
E2.9-2	2,9	6,7	370	50	23,6	145,26	Varias GP
E3-1	3	6,6	360	50	21,45	147,42	UPG

Donde desprend. Base es desprendimiento en la base, desp. Base y pico es desprendimiento en la base y en el pico, UPG es una gota por pulso, y Varias GP significa varias gotas por pulso.

Los oscilogramas de los parámetros seleccionados por ofrecer una gota por pulso, ensayados sobre chapa plana se ilustran en las figuras 3.20 a la 3.22, mientras que las figuras 3.23 a la 3.31, ilustran algunos ejemplos de oscilogramas cuyos parámetros están fuera de la

zona de UGP. Varias de estas condiciones ofrecían una transferencia por corto circuito, en algunos casos se producían más de una gota por pulso, y en otros el desprendimiento de la gota ocurría en la base seguida del pico de corriente.

E2.2-2

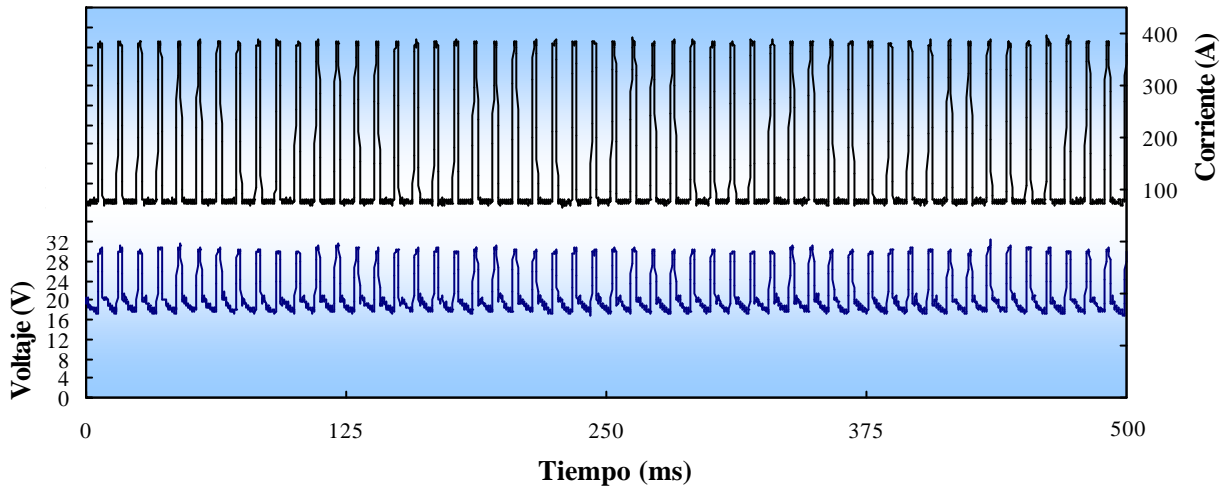


Figura 3.20.- Oscilograma del ensayo E2.2-2, cuyas condiciones son:
 $I_p = 385$; $I_b = 76$; $T_p = 2,2$; $T_b = 7,4$.

E2.4-1

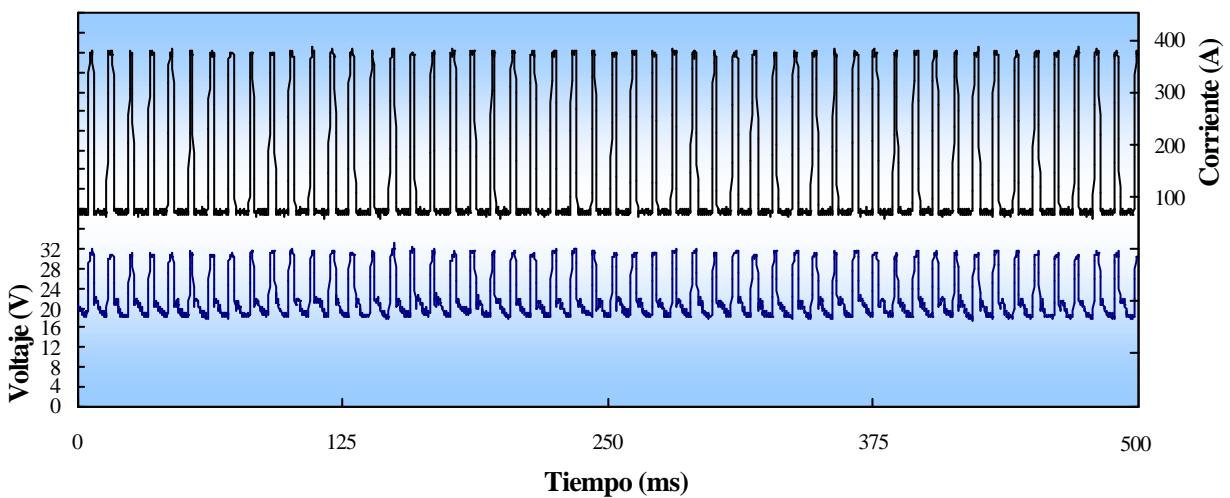


Figura 3.21.- Oscilograma del ensayo E2.4-1, cuyas condiciones son:
 $I_p = 398$; $I_b = 63$; $T_p = 2,4$; $T_b = 7,2$.

E2.7-1

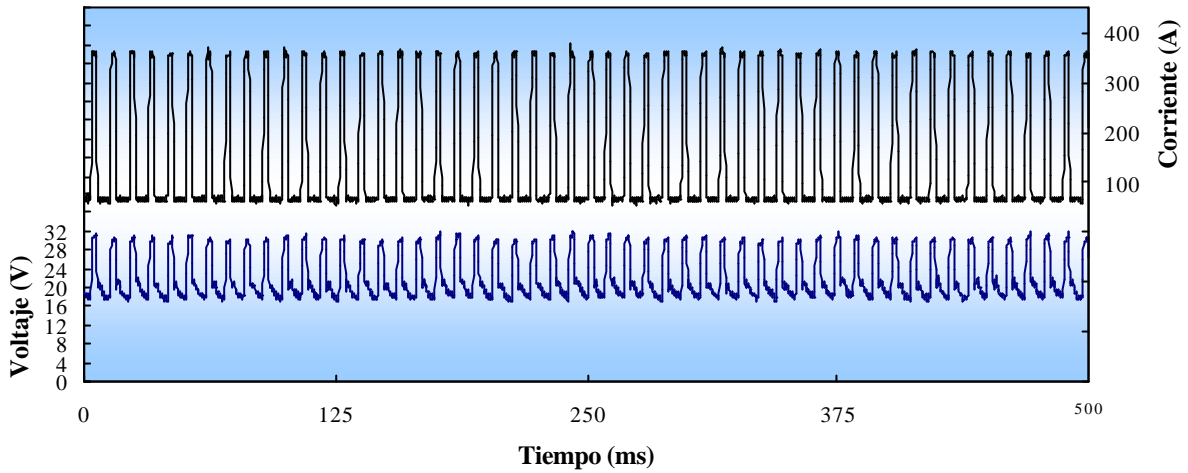


Figura 3.22.- Oscilograma del ensayo E2.7-1, cuyas condiciones son:
 $I_p = 361$; $I_b = 63$; $T_p = 2,7$; $T_b = 6,9$.

En las figura 3.23, figura 3.24 y figura 3.25 se presentan los oscilogramas característicos para el modo de transferencia metálica tipo cortocircuito.

E1.8-2

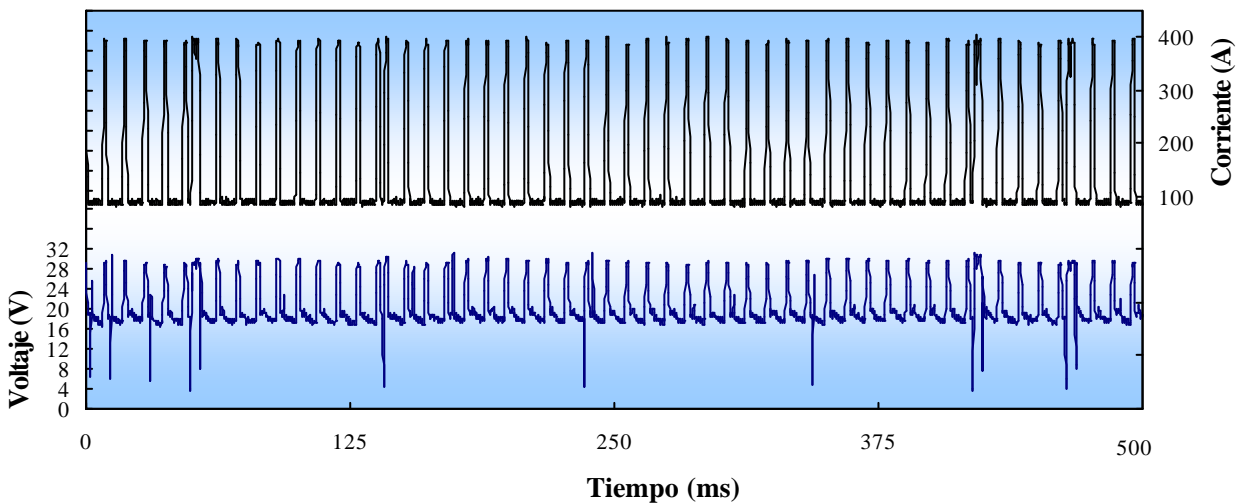


Figura 3.23.- Oscilograma del ensayo E1.8-2, cuyas condiciones son:
 $I_p = 397$; $I_b = 89$; $T_p = 1,8$; $T_b = 7,8$.

E1.5-2

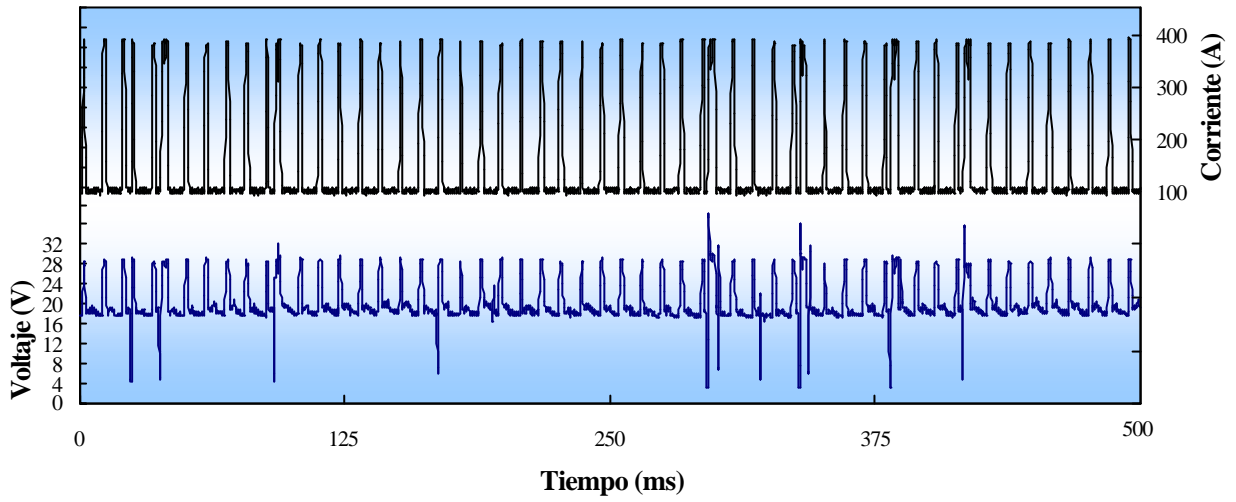


Figura 3.24.- Oscilograma del ensayo E2.4-1, cuyas condiciones son:
 $I_p = 424$; $I_b = 95$; $T_p = 1,5$; $T_b = 8,1$.

E1.2-1

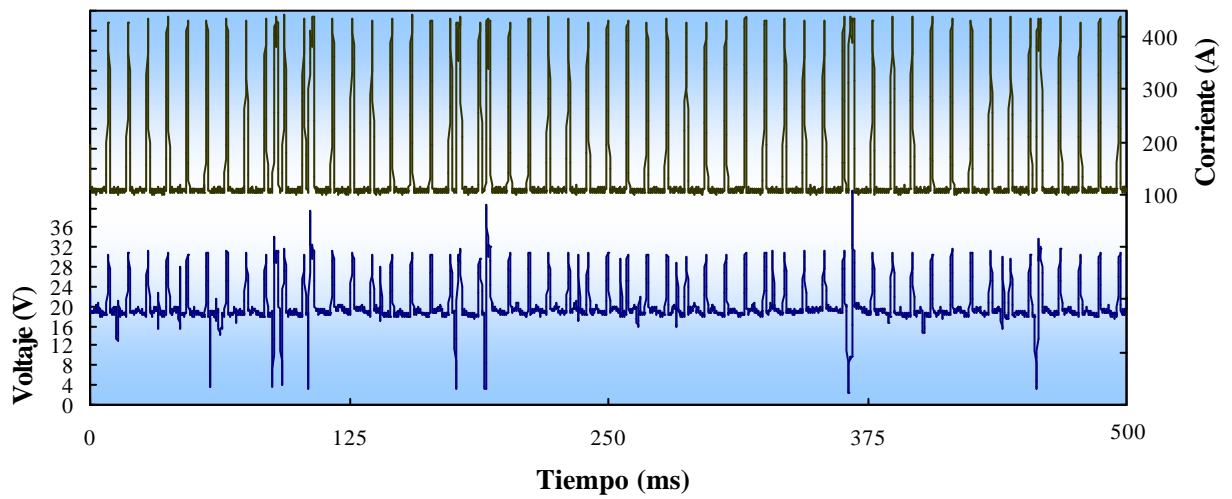


Figura 3.25.- Oscilograma del ensayo E1.2-1, cuyas condiciones son:
 $I_p = 415$; $I_b = 108$; $T_p = 1,2$; $T_b = 8,4$.

En las figuras 3.26 a figura 3.31 se muestran unos oscilogramas en donde puede apreciarse que el desprendimiento de la gota ocurre en la base, y otros en donde ocurren varios desprendimientos por pulso.

E1.8-3

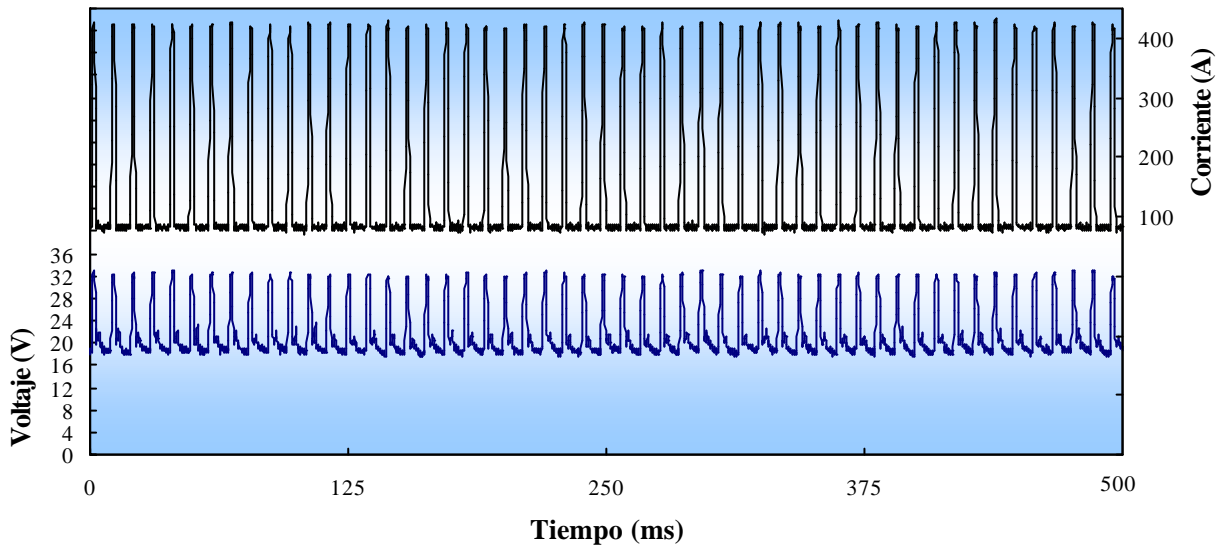


Figura 3.26.- Oscilograma del ensayo E1.8-3, cuyas condiciones son:
 $I_p = 426$; $I_b = 82$; $T_p = 1,8$; $T_b = 7,8$.

E1.7-3

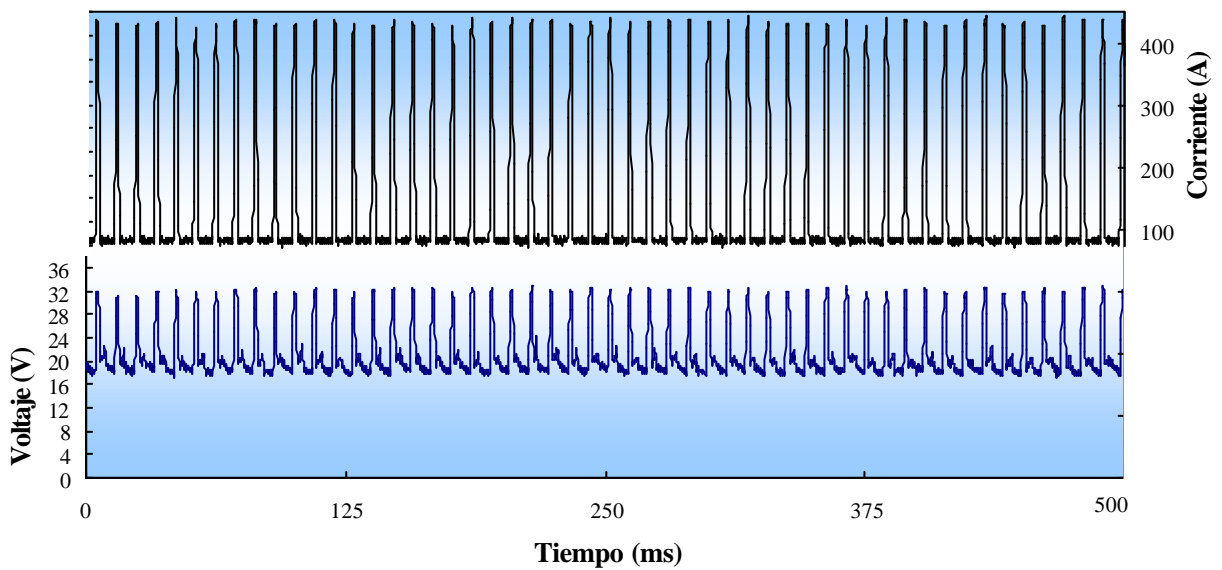


Figura 3.27.- Oscilograma del ensayo E1.7-3, cuyas condiciones son:
 $I_p = 446$; $I_b = 82$; $T_p = 1,7$; $T_b = 7,9$.

E1.4-2

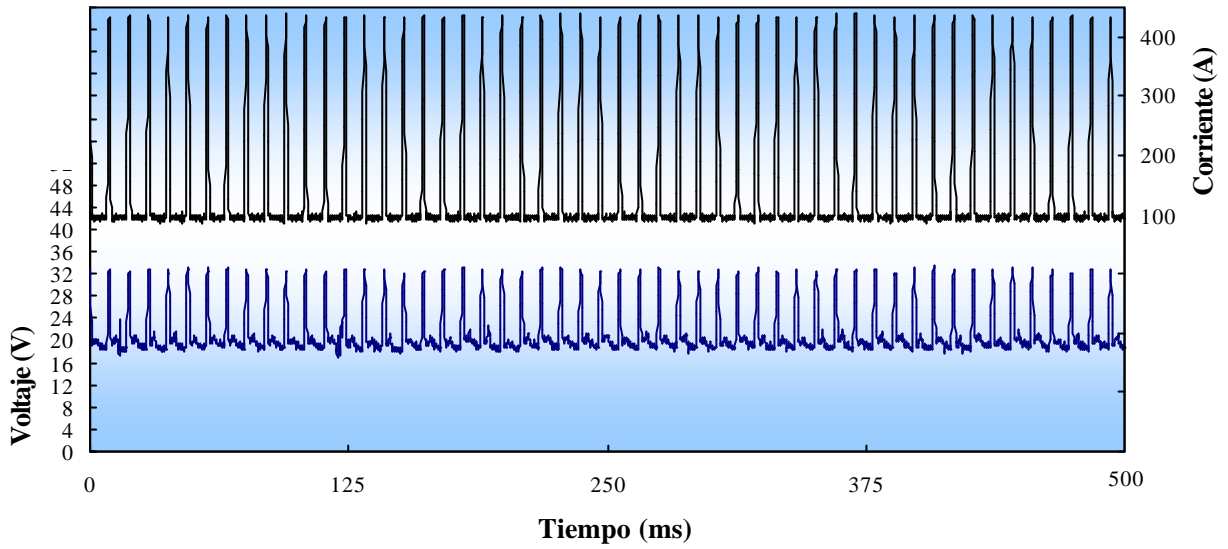


Figura 3.28.- Oscilograma del ensayo E1.4-2, cuyas condiciones son:
 $I_p = 448$; $I_b = 95$; $T_p = 1,4$; $T_b = 8,2$.

E2.8-1

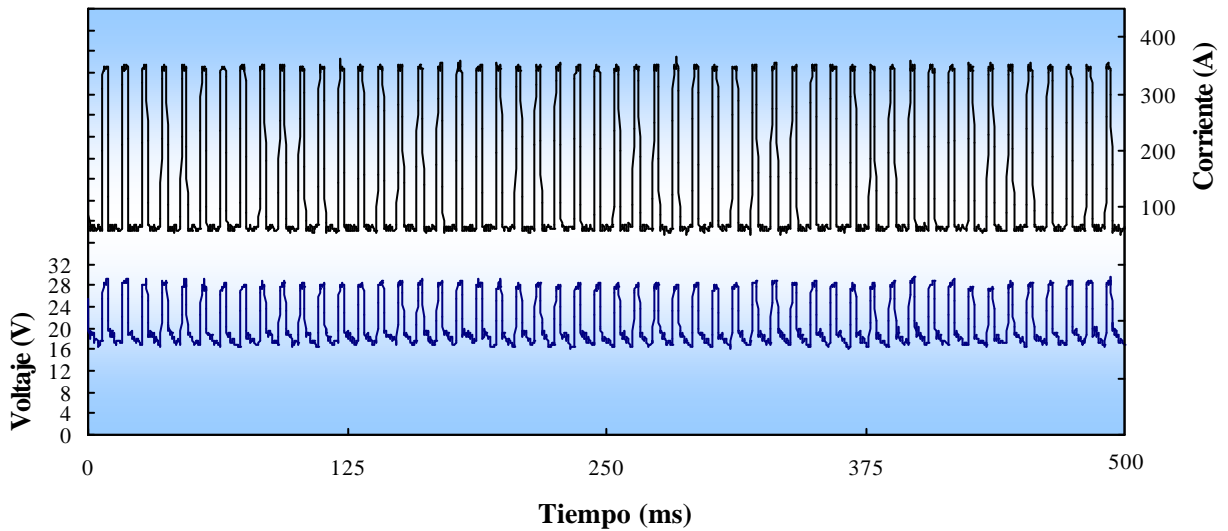


Figura 3.29.- Oscilograma del ensayo E2.8-1, cuyas condiciones son:
 $I_p = 350$; $I_b = 63$; $T_p = 2,8$; $T_b = 6,8$

E2.3-1

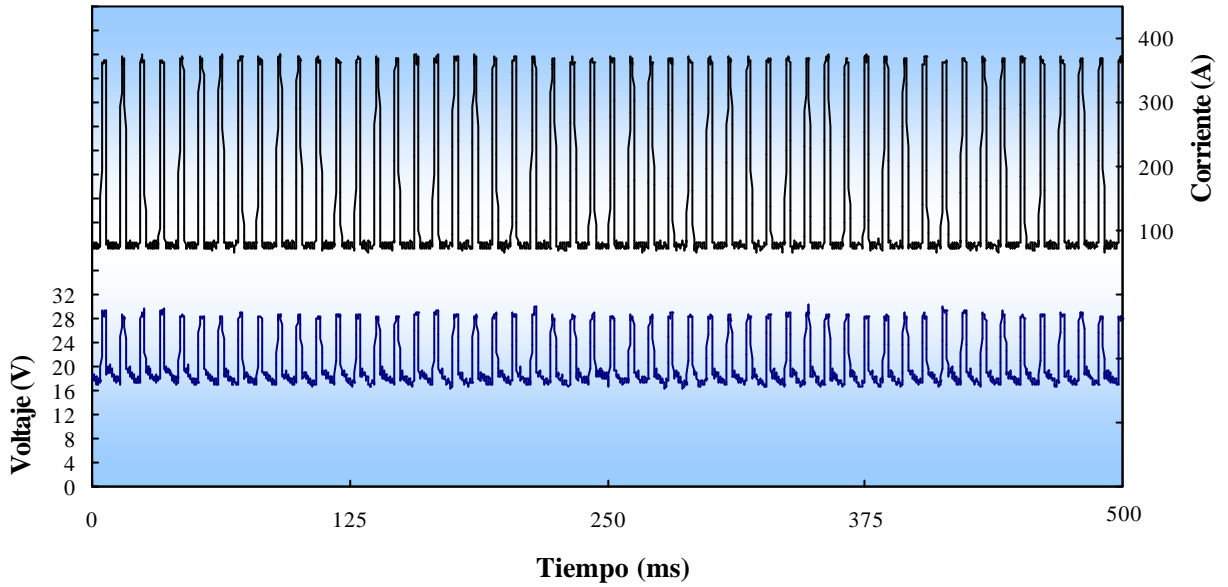


Figura 3.30.- Oscilograma del ensayo E2.3-1, cuyas condiciones son:
 $I_p = 371$; $I_b = 76$; $T_p = 2,3$; $T_b = 7,3$.

E2.5-1

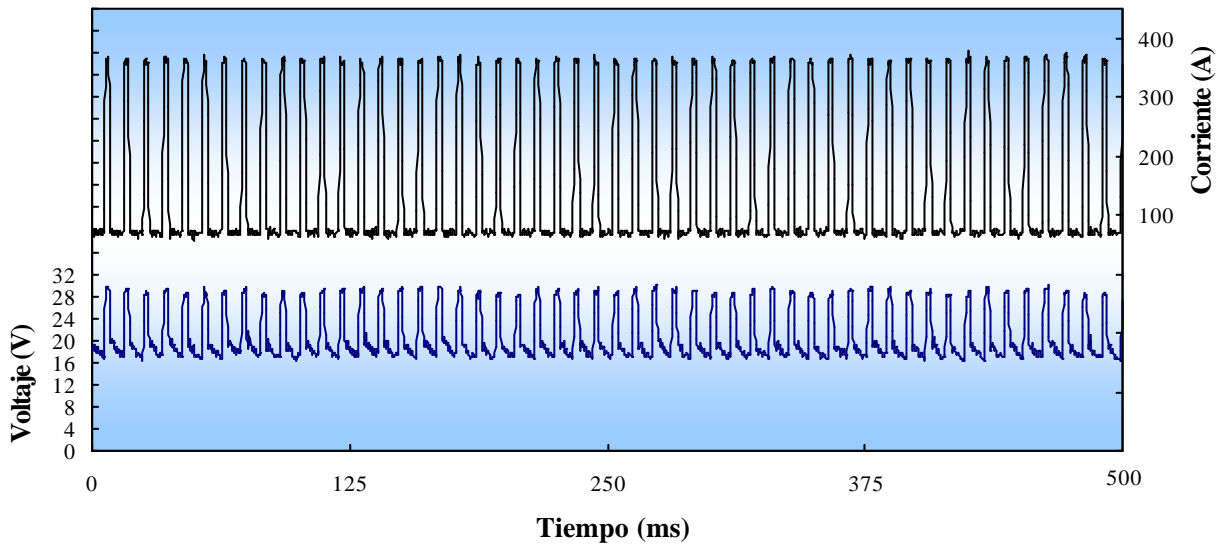


Figura 3.31.- Oscilograma del ensayo E2.4-1, cuyas condiciones son: $I_p = 366$; $I_b = 69$;
 $T_p = 2,5$; $T_b = 7,1$.

3.2.5.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana

Del conjunto de puntos ensayados y representados en la región de una gota por pulso fueron seleccionadas tres condiciones tanto por su modo de transferencia metálica como por el acabado superficial del cordón (textura). En la figuras 3.32 se observan las macrográficas tomadas a los cordones depositados sobre chapa plana de las tres condiciones seleccionadas. En la inspección visual se pudo observar la escasa presencia de salpicadura y de otros defectos superficiales.



Figura 3.32.- Cortes transversales de los cordones depositados sobre chapa plana para las condiciones E2.2-2, E2.4-1 y E2.7-1, respectivamente, indicando los perfiles geométricos.

Basándose en lo expuesto anteriormente se obtiene la zona paramétrica delimitada representada en la figura 3.33. Dentro de esta zona se encuentra un área interna (ovalo grisáceo) de trabajo la cual corresponde a las combinaciones de parámetros que producen el desprendimiento de una gota por pulso (cruces azules), las mejores condiciones de desprendimiento, también cruces rojas, se encuentran rodeadas de una círculo rojo. En la parte superior de la Zona Paramétrica se muestran rombos verdes y marrones, que corresponden a un modo de transferencia metálica pulsada con desprendimiento en la base y a un desprendimiento de varias gotas por pulso, respectivamente.

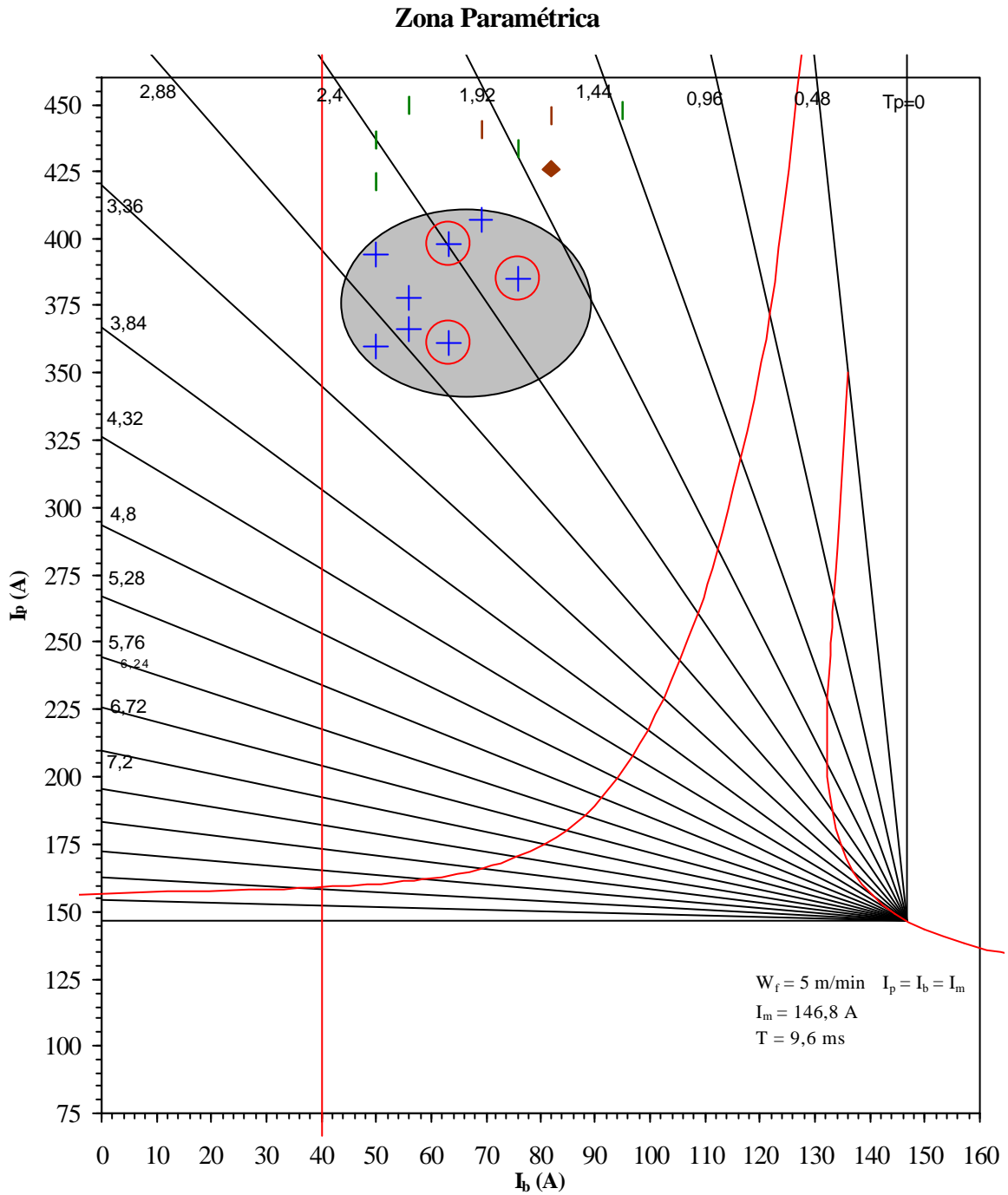


Figura 3.33.- Zona Paramétrica, encerrada en el ovalo gris se encuentra la zona de una gota por pulso (UGP). Las cruces azules indican los mejores parámetros para UGP, los encerrados en rojo son aquellos seleccionados para ensayar. Los rombos verdes y marrones indican algunos parámetros que ofrecen desprendimiento en la base y varias gotas por pulso, respectivamente.

Al ser determinado el parámetro de soldadura que ofrece las mejores condiciones para una transferencia tipo pulsada para el Acero Inoxidable AISI/SAE 304, se procedió a realizar la junta en un solo pase. En la tabla 3.11 se muestra el conjunto de parámetros fijados para realizar la junta.

Tabla 3.11.- Parámetros fijados para la elaboración de la junta mediante el proceso GMAW-P.

Modo De Transferencia	Pulsado
Material de aporte	ER 308L-Si, diámetro 1.2 mm
Gas de protección	Argón – 2% O ₂
Velocidad de Soldadura	28,6 cm /min
Velocidad de Alimentación	5,0 m/min
Corriente Pulsada	Ip = 398 A; Ib = 63 A; Tp = 2,4 ms; Tb = 7,2 ms .
Polaridad	Corriente Directa (CD); Electrodo (+)
Distancia Boquilla – Pieza	16 mm
Posición de Soldadura	Plana (1G); Orientación del electrodo 90°
Flujo de gas protector	16 L/min
Angulo de junta	60° (2 Biseles de 30°)
Separación de Raíz	2 mm (a tope), con talón de 2 mm
Respaldo	Aluminio

La tabla 3.12 muestra los valores de energía bruta aportada (EBA) o aporte calórico, la energía neta absorbida (ENA), y la eficiencia lograda durante el proceso de soldadura, los cuales se calcularon a partir de los parámetros mostrados en la tabla 3.11 y utilizando las ecuaciones 15, 16 y 17.

Tabla 3.12.- Valores de calor aportado, calor absorbido y eficiencia.

EBA (J/MM)	ENA (J/MM)	EFICIENCIA (%)
680,67	544,53	97,35

3.4.- Ensayos No Destructivos

3.4.1. -Inspección Visual

La inspección visual fue realizada sobre la junta soldada, una vez que la misma alcanzó la temperatura ambiente y se desmontó del embridamiento, presentó resultados satisfactorios los cuales se verifican con la excelente forma del cordón, no se encontró evidencia de discontinuidades superficiales poros y grietas, socavaduras, falta de relleno o penetración insuficiente de la cara. Por lo explicado anteriormente se asegura que la junta cumple con las condiciones de calidad especificadas en la regla QW-190 del código ASME sección IX.

3.4.2. Líquidos Penetrantes

En cuanto a la inspección por líquidos penetrantes, se determinó la inexistencia de socavaduras, grietas o defectos superficiales, salpicaduras en el metal base o a lo largo del cordón de soldadura, y confirmó el buen estado superficial de la junta. Tanto la inspección visual como realizada por líquidos penetrantes verifican la excelente forma de la junta soldada.

3.5.- Ensayos Destructivos

3.5.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura

En la tabla 3.13 se reportan los resultados del análisis químico realizado al cordón de soldadura.

Tabla 3.13.- Análisis Químico realizado al cordón de soldadura.

ELEMENTOS	%C	%Cr	%Ni	%Mn	%Si	%S
Cordón de Soldadura	0,04	19,03	9,20	2,05	0,72	0,15

3.5.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura

Macrografías

En la figura 3.34 se muestra la macrografía representativa del cordón de soldadura, la misma se hace con el fin de determinar la penetración, ancho y altura de los refuerzos de cara y de raíz, y el porcentaje de dilución, también es posible identificar fácilmente la zona fundida

o zona del cordón, la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base sin afectar. En el cordón de soldadura podemos observar la dirección del crecimiento de las columnas dendríticas, usuales en este tipo de solidificación, que nacen en el centro del cordón y crecen siguiendo la distribución del flujo de calor.

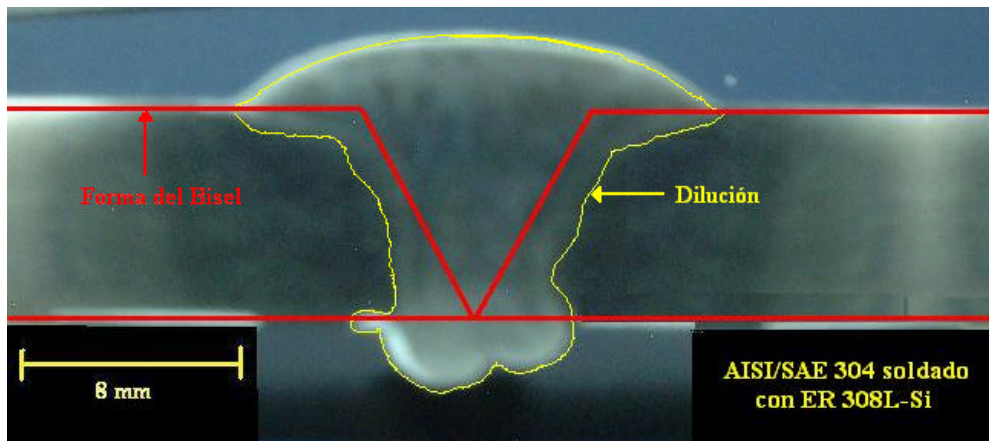


Figura 3.34.- Macrografía de un Acero Inoxidable AISI/SAE 304 soldado con un electrodo ER308L-Si, y atacada con una solución electrolítica (10 g de ácido oxálico en 100 mL de agua) durante 30 s con una tensión de 23 V.

La caracterización geométrica de los cordones del cupón de prueba se presenta en la tabla 3.14. Los valores reportados, dilución y la relación ancho/alto se encuentran dentro de las recomendaciones de Gretoft y Karlsson^[41], para evitar las fisuras en caliente. También se aprecia un buen refuerzo de raíz, y un buen refuerzo de cara, siendo estos valores no exagerados para una geometría de cordón.

Tabla 3.14.- Parámetros geométricos (promedio) del Cordón de soldadura del cupón de prueba. Medidas en mm.

Ancho Cara	Ancho Raíz	Refuerzo de Cara	Refuerzo de Raíz	Relación Ancho/Alto	Dilución (%)
17,3	6,9	2,3	2,4	1,4	28

Medidas en mm

Micrografías

La micrografía de la figura 3.35 (ataque con solución electrolítica de 10 g de ácido oxálico en 100 mL de agua, durante 30 s con una tensión de 23 V), detallan la presencia de la fase austenita (fase clara), junto la fase ferrita (fase oscura), muestra los granos austeníticos con tamaños similares desde el metal base hasta la zona de transición, confirmando de esta forma, la inexistencia de una zona afectada por el calor (ZAC) propiamente dicha. De todas las micrografías mostradas en la figura 3.35 el contenido de ferrita en el cordón es mayor que en el metal base o zona de transición (por así llamarla), siendo esto consecuencia de los elementos ferritizantes en el material de aporte los responsables de esto.

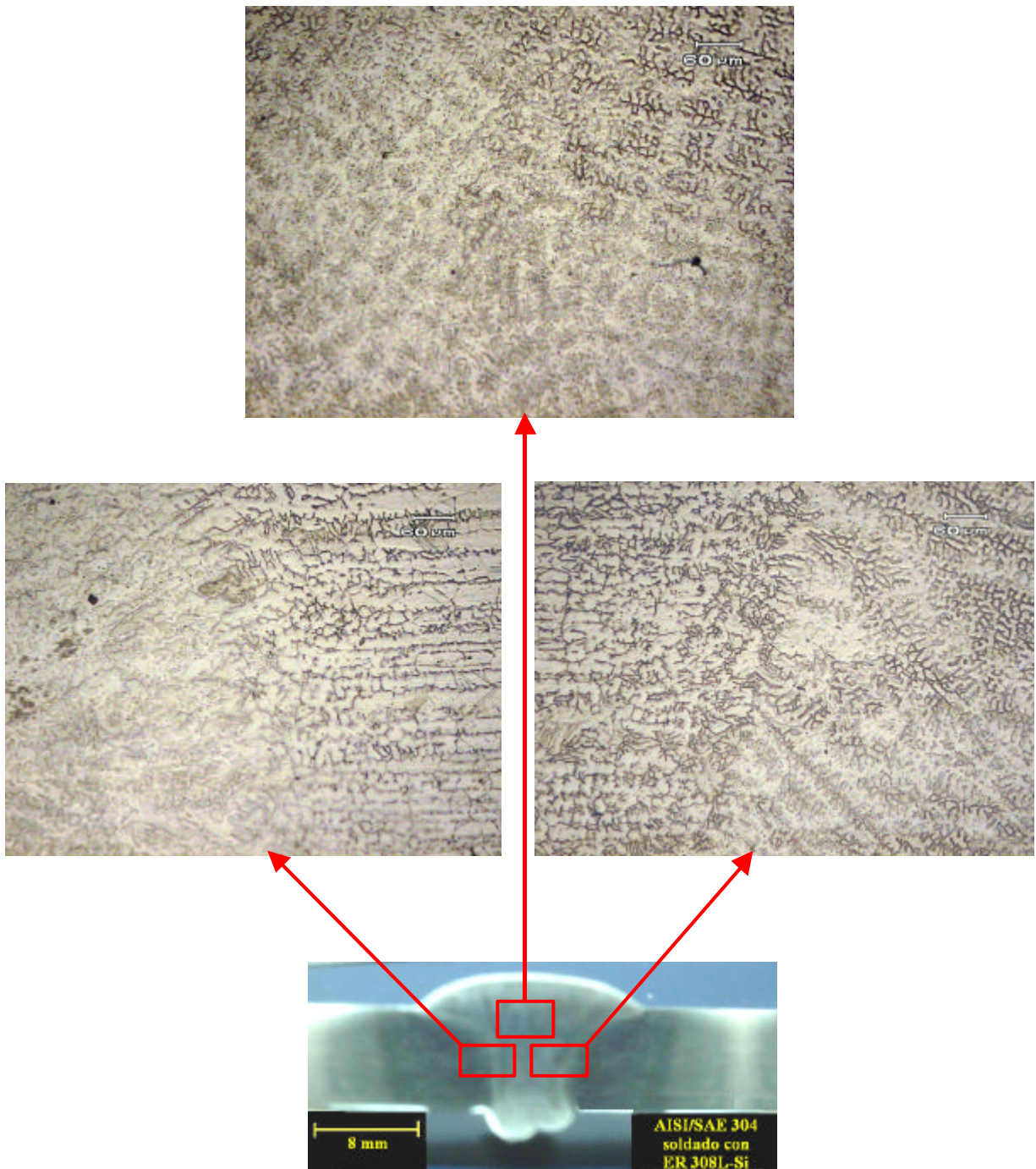


Tabla 3.35.- Evaluación micrográfica y macrográfica indicando la fase ferrita (zona oscura) en la matriz austenítica de las juntas soldadas con transferencia metálica por arco pulsado usando Argón con 2 % de Oxígeno como gas de protección.

3.6.- Medición del Contenido de Ferrita

3.6.1. Método Metalográfico

El cálculo se realizó con ayuda de un analizador de imagen Digital MicroGraph versión 3.4.2, el cual presenta los resultados de manera automática, el valor promedio fue de $10,01 \pm 0,44$ entre 10 mediciones (ver tabla 3.15). Para este análisis la fotomicrografía empleada se muestra en la figura 3.35 correspondiente a la zona central del cordón de soldadura tal como se indica en la figura 3.35.

Tabla 3.15.- Valores de porcentaje de ferrita obtenidos con el analizador de imagen Digital MicroGraph versión 3.4.2.

Medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Contenido de Ferrita (%)	9,98	9,90	9,78	9,25	9,86	10,15	11,04	10,11	9,90	10,10
Promedio	10,01									
Desviación Estándar	0,44									

3.6.2.- Método Químico

Este método se fundamenta en el cálculo del cromo equivalente (Cr_{eq}) y del níquel equivalente (Ni_{eq}) a partir de la composición química de los depósitos de soldadura, como ya fue explicado el capítulo I. en la tabla 3.16 se observan los valores de cromo equivalente, níquel equivalente, relación Cr_{eq}/Ni_{eq} , porcentaje de ferrita y número de ferrita (FN), utilizando la relación presentada por Schaeffler y DeLong en su investigación.

Tabla 3.16.- Contenido de Ferrita en el material Base y en el Material de Aporte de acuerdo al método Químico.

Diagramas	Schaeffler	DeLong	
Cordón de Soldadura	Cr_{eq} (%)	20,11	20,11
	Ni_{eq} (%)	11,42	11,42
	Ferrita (%)	10	10,2
	Número de Ferrita (FN)	-	12

La figura 3.36 muestra el diagrama de Schaeffler en donde se observa el porcentaje de ferrita presente en el cordón de soldadura, el mismo es calculado con las relaciones conseguidas en sus investigaciones; En la figura 3.37, se presenta el diagrama de DeLong, aquí se indica la región donde se encuentran los valores de cromo equivalente y níquel equivalente obtenidos en la deposición del cordón de soldadura, estas se obtienen con ayuda de las relaciones empíricas propuestas por DeLong. De ambos diagramas se consiguen valores aproximados del porcentaje de Ferrita en el cordón, y en el diagrama de DeLong se aprecia el Numero de Ferrita determinado para la junta soldada.

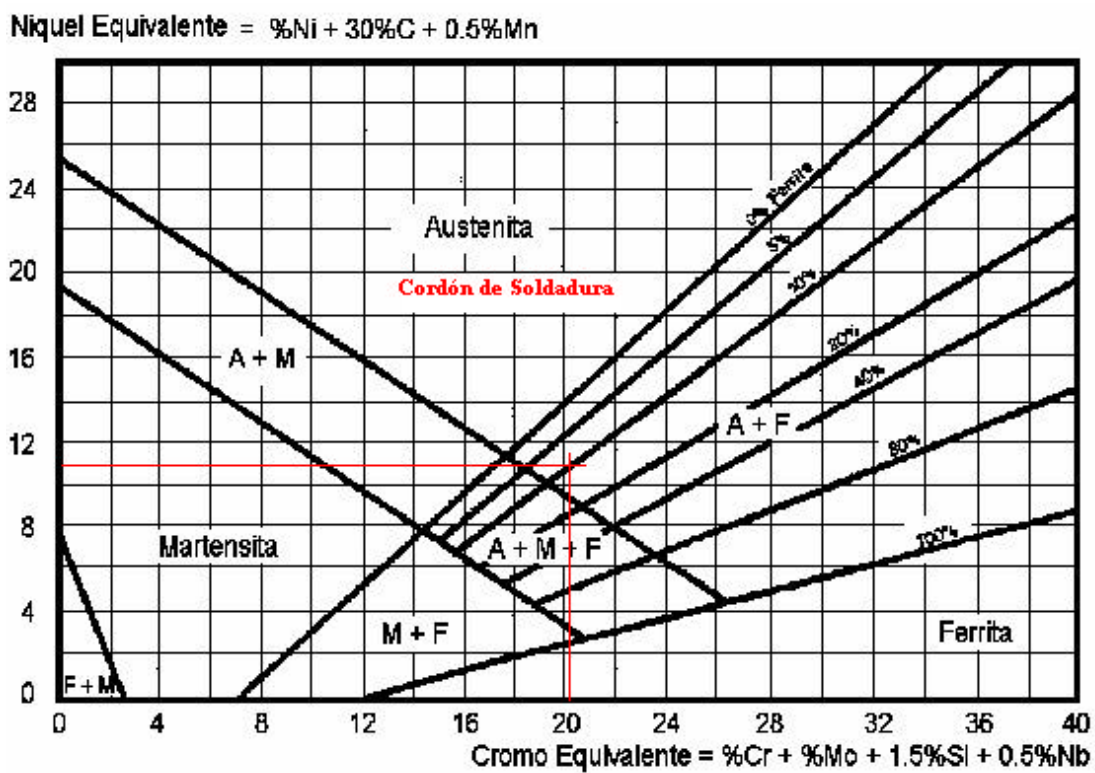


Figura 3.36.- Diagrama de Schaeffler indicando el % de ferrita del cordón de soldadura.

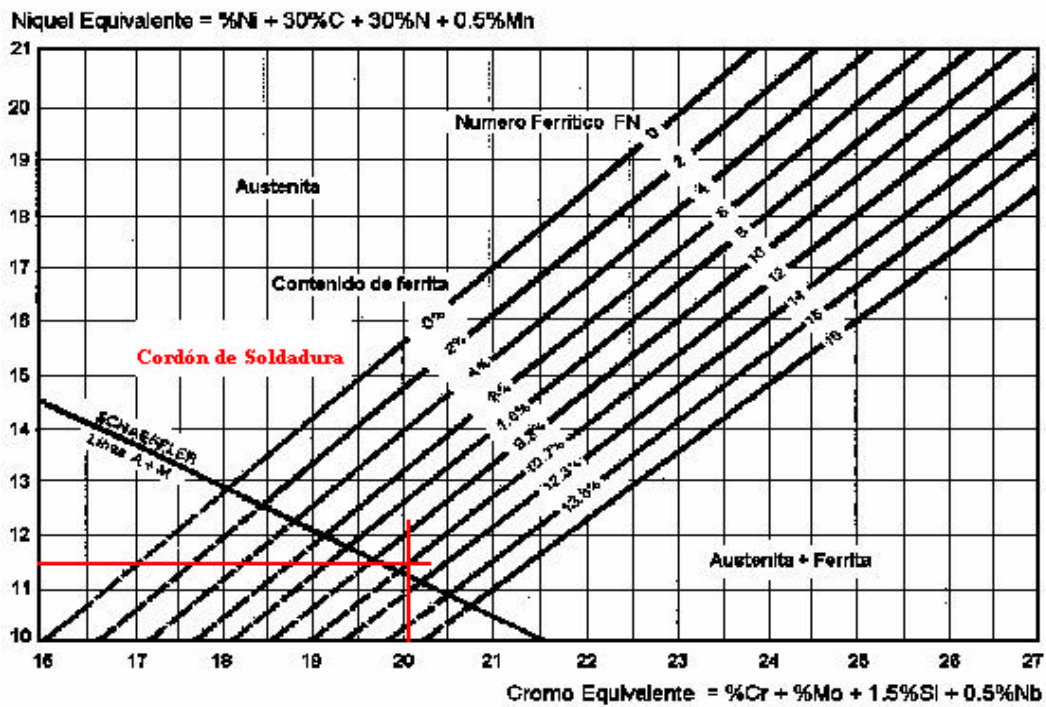


Figura 3.37.- Diagrama de DeLong, donde se indica el % de ferrita y el Número de Ferrita del cordón de soldadura.

En resumen el contenido de ferrita (%) en el cordón de soldadura, fue determinado utilizando métodos metalográficos, químicos y magnéticos. Las mediciones fueron realizadas en la línea central del cordón. En la tabla 3.17 se muestra el contenido de ferrita evaluado por los diferentes, observándose resultados similares. También puede apreciarse que en todos los métodos los resultados reportados se encuentran dentro del intervalo establecido anteriormente.

Tabla 3.17.- Contenido de Ferrita (%) dentro del cordón de soldadura utilizando diferentes métodos: Metalográfico, Químico y Magnético.

Métodos	Metalográfico	Químico	
		Schaeffler	DeLong
Cordón de Soldadura	10,01±0,44	10	10,2

3.7.- Ensayo de dureza

Al igual que las medidas realizadas al material base se utilizó un durómetro universal marca OTTO WOLPERT-WERKE, con las mismas especificaciones explicadas con anterioridad. Con el fin de simplificar el análisis, los datos obtenidos fueron agrupados por las zonas características de un cordón de soldadura (metal base, cordón y ZAT). Los resultados del ensayo de dureza son reportados en la tabla 3.18 aquí puede ser observado que el valor promedio de dureza Vickers obtenida en material base fue de $160,20 \pm 1,81 \text{HV}_{N20}$, en el cordón de soldadura fue de $161,70 \pm 3,20 \text{HV}_{N20}$ y en la ZAT fue de $165,72 \pm 2,36 \text{HV}_{N20}$. Tanto en la figura 3.38 como en la tabla se puede apreciar que los valores más altos de dureza corresponden a la zona afectada por el calor (ZAT), mientras que en el cordón de soldadura la dureza es ligeramente menor. Al comparar estos valores con los del material base (MB), se nota el alto grado de endurecimiento sufrido por el material debido a la soldadura.

Tabla 3.18.- Valores reportados de Dureza Vickers (HV_{N20}) del material base.

Dureza Vickers (HV_{N20})		
Zonas de la Soldadura	PERFIL 1	PERFIL 2
Material Base	160,84	157,42
	160,84	157,42
ZAC1	167,69	167,69
	165,98	160,84
Cordón de Soldadura	164,27	159,13
	162,55	157,42
	165,98	160,84
ZAC2	165,98	167,69
	165,98	163,92
Material Base	160,84	160,64
	162,55	163,92

Dureza Vickers

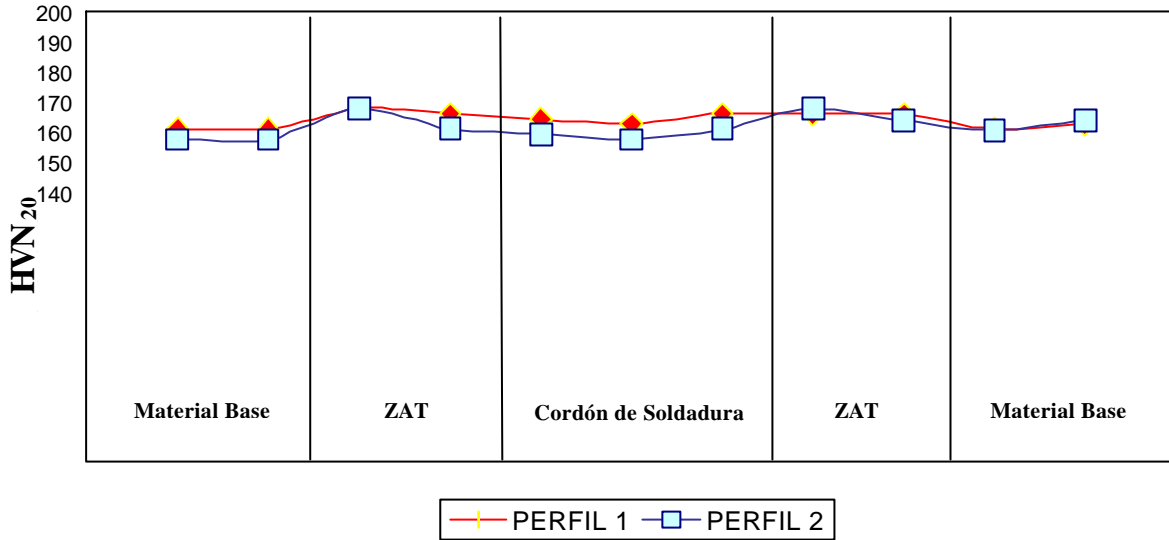


Figura 3.38.- Valores de dureza Vicker obtenidos y representados por zonas del cordón de soldadura.

3.8.- Ensayo de Tracción

Los ensayos de tracción se realizaron con la finalidad de determinar la máxima resistencia a la tracción de la junta soldada. Para realizar estos se elaboraron tres probetas según la norma ASTM A-370^[43], cantidad necesaria para reportar confiablemente las propiedades estáticas del material. Las probetas pueden ser apreciadas en la figura 3.39.

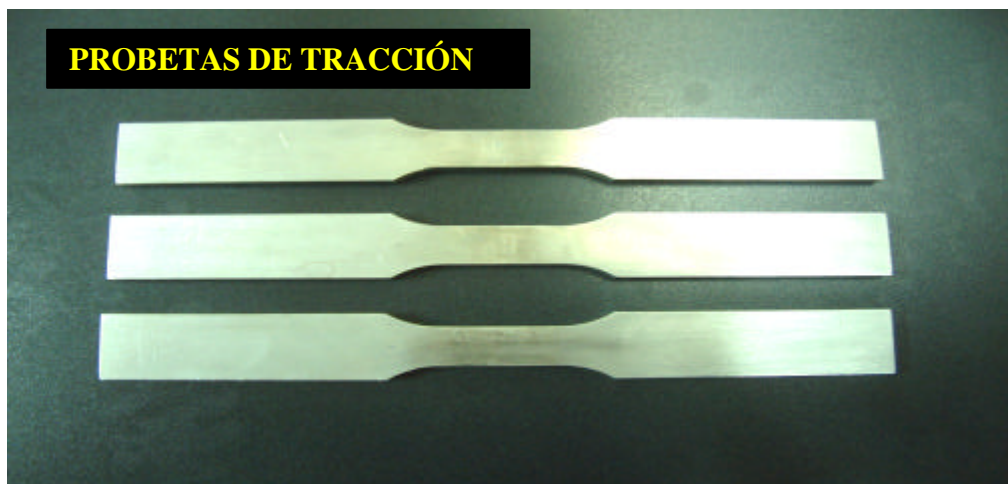


Figura 3.39.- Probetas para el ensayo de tracción de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldadas con un electrodo ER308L-Si.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos marca INSTRON modelo 8502, con una capacidad máxima de 25 toneladas y un desplazamiento máximo de 100 cm. Además, se encuentra provista de una consola procesadora que permite al usuario un control absoluto y digital del sistema de prueba. La carga se aplica mediante un sistema hidráulico en el transcurso del ensayo. El equipo está previsto por un software mediante el cual se controlan los ensayos, se obtiene un registro de la carga aplicada y el alargamiento de la probeta sin la corrección por la deformación elástica de los elementos mecánicos del equipo. Por lo tanto, los datos obtenidos en cada ensayo de tracción fueron procesados con la finalidad de eliminar el efecto de deformación elástica de los componentes de la máquina involucrados en el sistema de carga.

En la figura 3.40, se puede observar la gráfica de Esfuerzo vs. Deformación obtenida al ensayar las probetas, y en la tabla 3.19, reporta los resultados extraídos del ensayo, tales como resistencia máxima a la tracción (σ_{\max}) que fue en promedio de $942,2 \pm 22,6$ MPa, el esfuerzo de fluencia (σ_{ys}) con un valor de $495,0 \pm 2,5$ MPa. La máxima elongación fue en promedio 31,7 mm dentro de la zona calibrada.

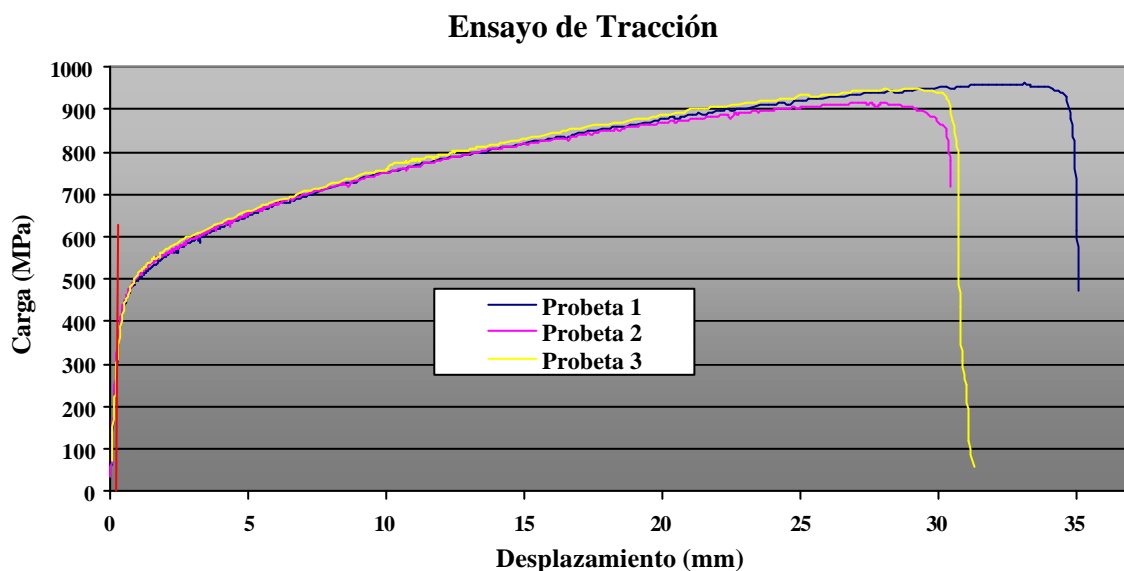


Figura 3.40.- Curvas de Tracción Esfuerzo vs. Deformación para tres probetas del material base de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 soldadas con un electrodo ER308L-Si.

Tabla 3.19.- Valores de esfuerzo obtenidos de los ensayos de tracción de un Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 soldadas con un electrodo ER308L-Si.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio	Desviación Estándar
σ_{\max} (MPa)	960,6	949,0	917,0	942,2	22,6
σ_{ys} (MPa)	492,7	497,7	494,6	495,0	2,50
Elongación (mm)	30,1	30,2	34,9	31,7	2,7

3.9.- Ensayo de Doblez

Para determinar el grado de solidez y ductilidad de la junta soldada se realizaron los ensayos de doblez guiado de cara y raíz. El mismo se realizó bajo las especificaciones escritas en QW 466.2 del código ASME sección IX, mientras que la probeta correspondía fue diseñada en concordancia a lo establecido en QW-462.3(a). En las figura 3.41 se observa que la superficie de las probetas ensayadas se encuentran libres de defectos superficiales, garantizando una soldadura de calidad, y cumpliendo con los criterios de aceptación establecidos en QW-163 del Código ASME, sección IX. De este modo, con los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados, se puede asegurar que la selección de los parámetros de pulsado para la realización de la junta de acero inoxidable AISI 304, fueron acertados, al no evidenciarse ningún defecto en la soldadura cumpliendo con las normas establecidas.

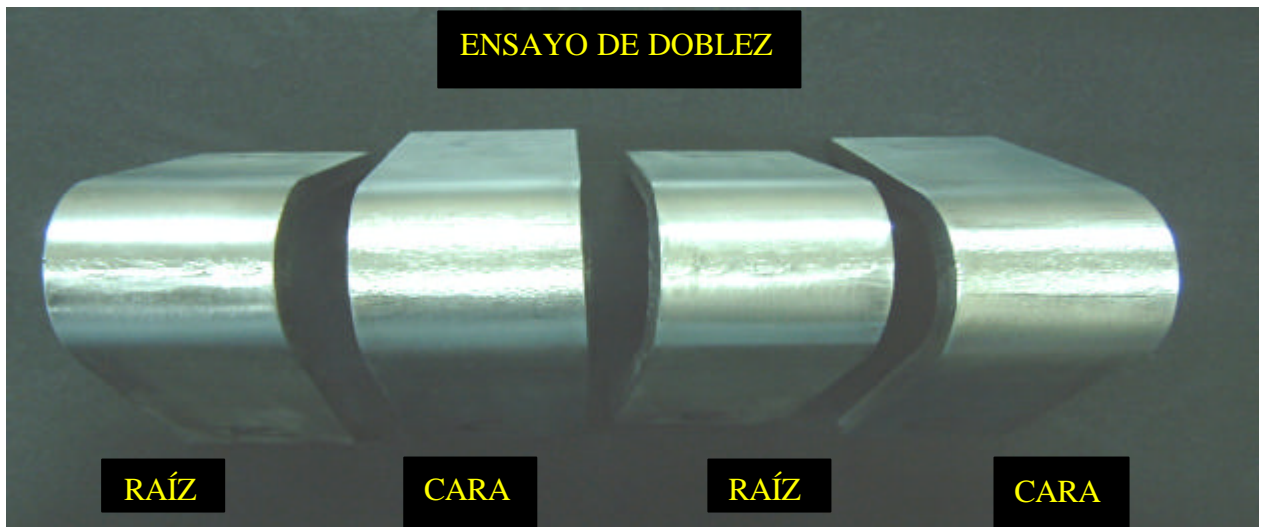

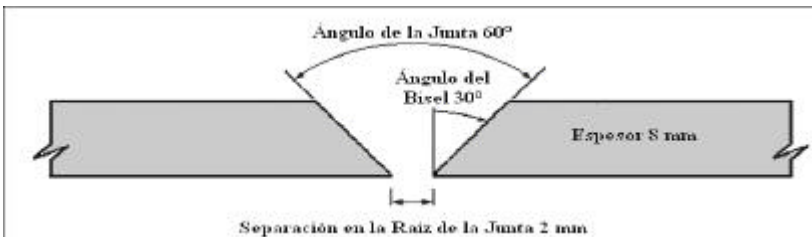



Figura 3.41.- Ensayo de doblez de cuatro probetas de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldadas con un electrodo ER308L-Si.

3.10.- Elaboración del Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)

En base a todo el procedimiento realizado y los resultados obtenidos se presenta a continuación el RCP correspondiente a la evaluación de procedimientos de soldadura para realizar una junta soldada aplicando GMAW pulsado con los cuales se puede garantizar la calidad de la unión mediante una certificación basada en normas y criterios de aceptación reconocidos a nivel mundial.

		UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO RCP											
CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.		RCP N°:			FECHA:								
		EPS N°:			CÓDIGO REF:								
NOMBRE SOLDADOR:			C.I.:	IDENTIFICACIÓN:		HOJA: 1/2							
PROCESO				TIPO									
OFW ()	GMAW (X)	SAW ()	()	(X)	()								
SMAW ()	GTAW ()	Otro ()		Manual	Semiautomático	Automático							
Procesos Especiales:													
DISENO DE JUNTA													
Tipo de Junta: Ranura Ranura (X) Filete () Otra:													
Respaldo: Si (X) No ()													
Material del Respaldo: Aluminio													
Espesor de Recargue: N.A.													
METAL BASE													
Especificación, Grado o Tipo:			a Especificación, Grado o Tipo:										
N° P: 8	N° Grupo: 1			a N° P: 8	N° Grupo: 1								
Plancha (X)	Espesor: 8 mm			Tubería ()	Espesor:	Diámetro:							
METAL DE APORTE													
	Aporte (A)	Aporte (B)	Aporte (C)	Aporte (D)									
Especificación Fabricante	308L-Si												
AWS (Clase)	308L-Si												
N° F	> 13,6												
Diámetro	1,2 mm												
Espesor Material Depositado	12,35 mm												
POSICION Y ALINEACIÓN DE LA JUNTA				TÉCNICA									
Posición: 1G				Cordón: Recto (X) Ondulado ()									
Progresión: Plana				Oscilación: N.A.									
N° de puntos: 1				Electrodo: Múltiple () Sencillo (X)									
Distancia entre puntos:				Pases por lado: Múltiples () Sencillo (x)									
PRECALENTAMIENTO				POST-CALENTAMIENTO									
Temperatura mín. precalentamiento:				Intervalo de temperatura:									
Temperatura máx. entre pases:				Tiempo de permanencia:									
Tiempo de permanencia:				Enfriamiento:									
Otros:				Otros:									
GAS				LIMPIEZA									
	Tipo	Composición	Flujo (Lts/min)										
Protección	Inerte	98% Ar + 2% O ₂	16	Inicial: papel abrasivo, cepillo de alambre y gasolina									
Arrastre													
Respaldo	-	-	-	Entre pases: N.A.									
Otros													
PARAMETROS ELÉCTRICOS (GMAW-P)													
Pase	Proceso	MAT. DE APORTE		CORRIENTE (A)					Voltaje (V)	Velocidad de Avance (cm/min)	Velocidad de Alimentación (m/min)		
		Clase AWS	φ [mm]	Tipo	Polaridad	I _p	I _b	T _p				T _b	I _m
1	GMAW	ER308L-Si	1,2	pulsada	Inversa	398	63	2,4	7,2	147	24 - 26	28,6	5,0
OBSERVACIONES:													
Penetración Completa													

 <p>CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.</p>	<p>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO RCP</p>			
	RCP N°: EPS N°:		FECHA: CÓDIGO REF:	
NOMBRE SOLDADOR:		C.I.:	IDENTIFICACIÓN:	HOJA: 2/2

ENSAYO DE TRACCION						
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Resistencia a la tracción (MPa)	Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones
1	1900	809	15371	9606	Dúctil - Interfase	Cumple con requerimiento
2	1906	818	15591	9490	Dúctil - Interfase	Cumple con requerimiento
3	1929	809	15605	9170	Dúctil - Interfase	Cumple con requerimiento

ENSAYOS DE DOBLEZ	
Tipo de DobleZ	Resultado
Cara N°1	Ninguna Fisura Observada
Cara N°2	Ninguna Fisura Observada
Raíz N°1	Ninguna Fisura Observada
Raíz N°2	Ninguna Fisura Observada

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO AI DEPOSITO	
	Elementos
	%C
	%Cr
	%Ni
	%Mn
	%Si
	%S
	Cordón
	0,04
	19,035
	9,20
	2,05
	0,72
	0,015

OBSERVACIONES:

OTROS ENSAYOS

Tipo de ensayo: Dureza

Observaciones: Los resultados de los ensayos cumplen satisfactoriamente con los valores exigidos para un acero AISI/SAE 304

Otros: Adicionalmente se realizó una inspección metalografía y medición del contenido de ferrita para verificar los constituyentes presentes en el depósito y material base. Los resultados de estos ensayos se consideran satisfactorios.

SE CERTIFICA QUE TODO LO INDICADO EN ESTE REGISTRO, ES CORRECTO Y QUE LAS PROBETAS FUERON SOLDADAS Y ENSAYADAS DE ACUERDO CON LOS REGISTROS DE LA SECCIÓN IX DEL CÓDIGO ASME

Elaborado por:
Br. Adrian A., Hurtado C.
C.I. 13.908.326

Ing. Vicente Ignoto
Coordinador – C.V.S.

4.- ANALISIS DE RESULTADOS

4.1- Caracterización del Material Base y Aporte

La caracterización de ambos materiales se realizó sobre la base de su análisis químico, contenido de ferrita, metalográfico y ensayos mecánicos (sólo en el material base), a objeto de verificar si cumple con las especificaciones indicadas por las normas y reportadas por el fabricante.

4.1.1- Caracterización Química del Material Base y Aporte

En ambos análisis realizados (material base y aporte) se puede observar que las composiciones se encuentran dentro de los valores nominales especificados para estos tipo de acero por las normas respectivas; lo cual garantiza que el trabajo realizado fue hecho con el material especificado. En lo que respecta al material de aporte, las características reportadas provienen de la ficha técnica proporcionada por el fabricante, e igualmente se verificó el cumplimiento con la norma respectiva. Los resultados del análisis químico (mostrado en la tabla 3.1) cumple con las especificaciones de la norma AISI/SAE y ASTM A240, para el Aceros Inoxidables Austeníticos 304 y también para el electrodo ER 308L-Si.

4.1.2.- Caracterización Metalográfica del Material Base y Aporte

La importancia de conocer el estado inicial del material base mediante una micrografía radica en la necesidad de observar el cambio de tamaño de los granos durante la deposición del material de aporte en la fabricación de los cordones de soldadura, con respecto a la condición inicial del mismo, ya que la deposición de cordones de soldadura someten al material base a diferentes condiciones de calentamiento y enfriamiento que producen variaciones microestructurales dentro del mismo en función del calor aportado. La caracterización metalográfica se realizó en ambos sentidos, longitudinal y transversal al sentido de laminación (ver figura 3.1), se identificaron y cuantificaron las fases presentes: Austenita (matriz clara) y Ferrita (fase oscura) ubicada esta última entre los límites de los granos austeníticos.

4.1.3.- Contenido de Ferrita en el Metal Base

El contenido de Ferrita en el material base se determinó por dos métodos, el Método Metalográfico en el cual reportó un valor expresado en porcentaje de Ferrita de (%Ferrita = $7,75 \pm 0,08$) para el material base y por el Método Químico a través del uso de los diagramas de Schaeffler, en el que se obtuvo un valor entre (5-10 % Ferrita) para el material base y de (10 % Ferrita) para el material de aporte, y por otro lado utilizando el diagrama de DeLong se obtuvo un valor de (7,6 % Ferrita) para el material base y superior a (13,6 % Ferrita) para el material de aporte. Estos valores corresponden a lo reportado por los fabricantes de Aceros Inoxidables Austeníticos y sus respectivos electrodos. Sin embargo, de esto se observa que el contenido de Ferrita en el material de aporte ER 308L-Si es mayor en comparación con el calculado por el material base; este incremento (%Ferrita) asegura una mayor resistencia a la fisuración en caliente en el cordón de soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos.

Tabla 4.1.- Porcentaje de (%)Ferrita en Material Base y Aporte de acuerdo al método Metalográfico y Químico.

Materiales	Método Metalográfico	Método Químico	
		Diagrama de Schaeffler	Diagrama de DeLong
Base	$7,75 \pm 0,08$	5 - 10	8
Aporte	-	7,6	> 13,6

La similitud entre los valores obtenidos por los métodos metalográficos y químicos se debe a que tanto el diagrama de Schaeffler como el diagrama de DeLong, se basaron en métodos metalográficos para su construcción.

4.1.4.- Ensayo de Dureza en el Metal Base

Se determinó la dureza del material base de acuerdo a la norma ASTM E 384, los valores reportados de dureza para el metal base es de ($162,5 \pm 2,48$) HVN₂₀. Este resultado coincide con lo reportado en la norma ASM ya que cae dentro del intervalo de dureza de 156 a 214 HV reportado por las normas y fabricantes.

4.2.- Determinación de los Parámetros en la Soldadura GMAW-P

4.2.1.- Criterio de Burnoff

Este criterio establece que la relación de “quemado” del electrodo (relación I_m vs. W_F), para la cual utilizando tanto el modo de transferencia metálica pulsada como en cortocircuito se encuentra el punto de intersección cercano a 170 A, punto aproximado sobre el cual predomina la transferencia metálica modo “rociado”. La elaboración de la curva I_m vs. W_F en ambos casos se obtiene de manera similar a la investigación realizada por Amin, en donde encuentra una pendiente de valor $m = 29,9$. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en investigaciones anteriores^[38], además de asegurar una con esta condición de velocidad de alimentación del electrodo una transferencia metálica tipo spray, se toma como parámetro fijo (base de estudio) una velocidad de alimentación del electrodo en un valor de 5 m/min. Utilizando la ecuación 6, 8, 9 y 11, con la que se obtiene valores de $T_c = 9,6$ ms, $I_M = 146,8$ A, fijando una $W_F = 5$ m/min. se elabora la Zona Paramétrica representada en la figura 3.6.

A medida que aumenta la velocidad del alambre, aumenta también el área de la Zona Paramétrica relacionada y por consecuencia disminuye T_C aumentando la I_m (ecuaciones 8 y 10 respectivamente). Es importante saber que este criterio tiene como finalidad la obtención de una Zona Paramétrica en donde se mantenga el balance entre la cantidad de alambre alimentado y la rapidez con la cual este se funde, obteniendo con esto fijar la intensidad de corriente media (I_m) para un universo de condiciones de I_p , I_b , t_p y t_b , en los que se buscaran las mejores condiciones para el desprendimiento de una gota por pulso.

4.2.2.- Criterio de Transferencia Metálica

Con la ayuda de las relaciones I_p vs. T_p se determina el exponente “m” que garantice el desprendimiento de por lo menos una gota por pulso. Fijando el volumen de gota en $V = 0,905$ mm³, calculado por la ecuación 2 y utilizando un diámetro de electrodo de 1,2 mm. En la figura 3.7 se muestra la relación exponencial entre I_p y T_p para la condición de una gota por pulso para este volumen de gota, de donde se obtienen una valor aproximado de $m = -2,58$. En la tabla 3.8 se presentan los resultados obtenidos de I_m y V_m para una W_F determinada que

ofrecen un modo de transferencia metálica tipo rociado, con ayuda de los oscilogramas conseguidos se obtienen valores de I_{dc} , utilizando la estadística como herramienta (histogramas) y apoyándonos en las figuras 3.18 y 3.19 se obtiene un valor de $K_v = 2153,22 A^{1,6}.s$, para el volumen determinado $0,905 mm^3$. Para un volumen mayor el parámetro de desprendimiento será más grandes y viceversa.

Utilizado los valores obtenidos (m y K_v) se consigue la ecuación 23 con la que se puede acotar la Zona paramétrica conseguida por el criterio de Burnoff, esta ecuación (La curva de Potencia Constante), en la figura 4.1 se aprecia como acota la Curva de Potencia Constante a la Zona paramétrica. Valores mayores en el volumen de la gota producirían un desplazamiento de la curva hacia la izquierda de la zona, y viceversa, lo que produce una zona de estudio variable según sea el volumen de la gota utilizado.

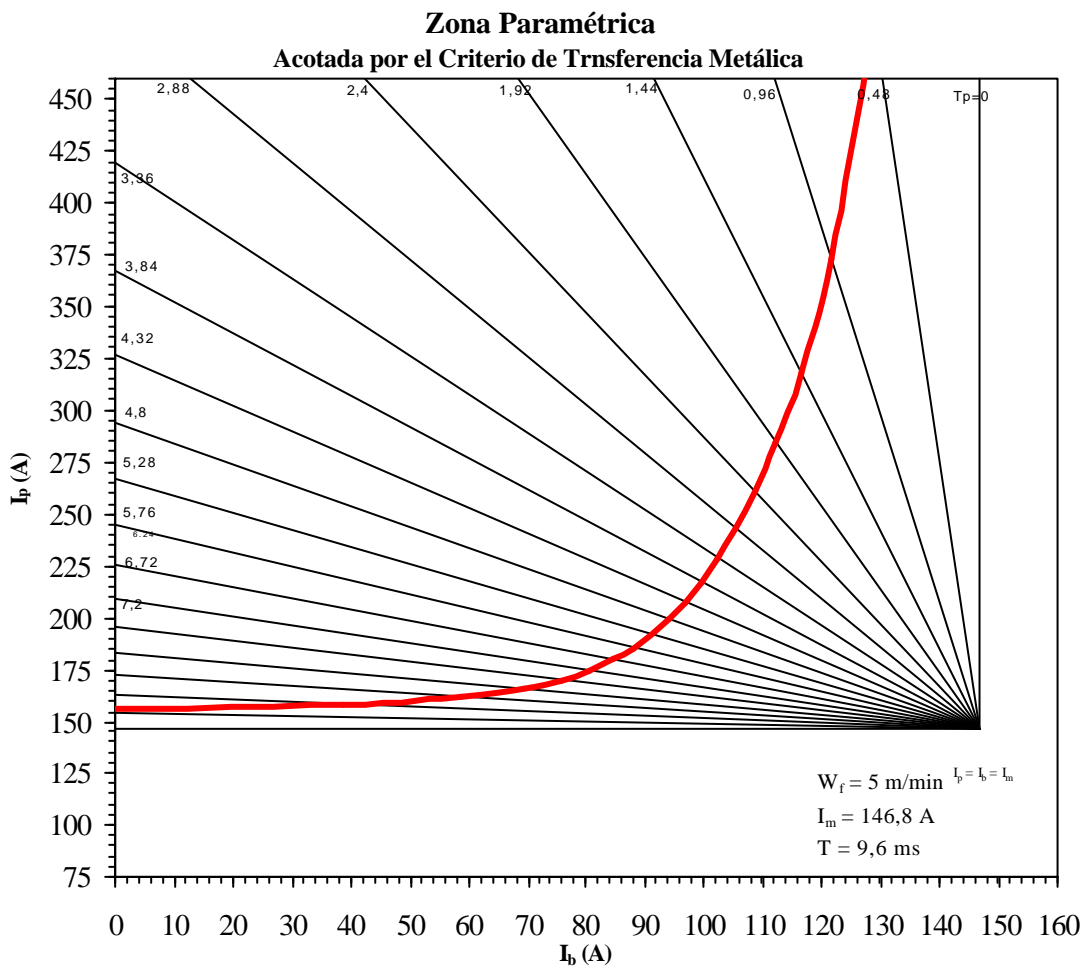


Figura 4.1. Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica.

4.2.3.- Criterio de Estabilidad del Arco

Con el fin de no extinguir el arco, se fija la corriente de base ($I_b = 30$ a 50 A). En este trabajo se acordó establecer en un valor de 40 A, con lo que se acota la Zona Paramétrica aún más. En la figura 4.2 se muestra de manera gráfica como queda la Zona Paramétrica.

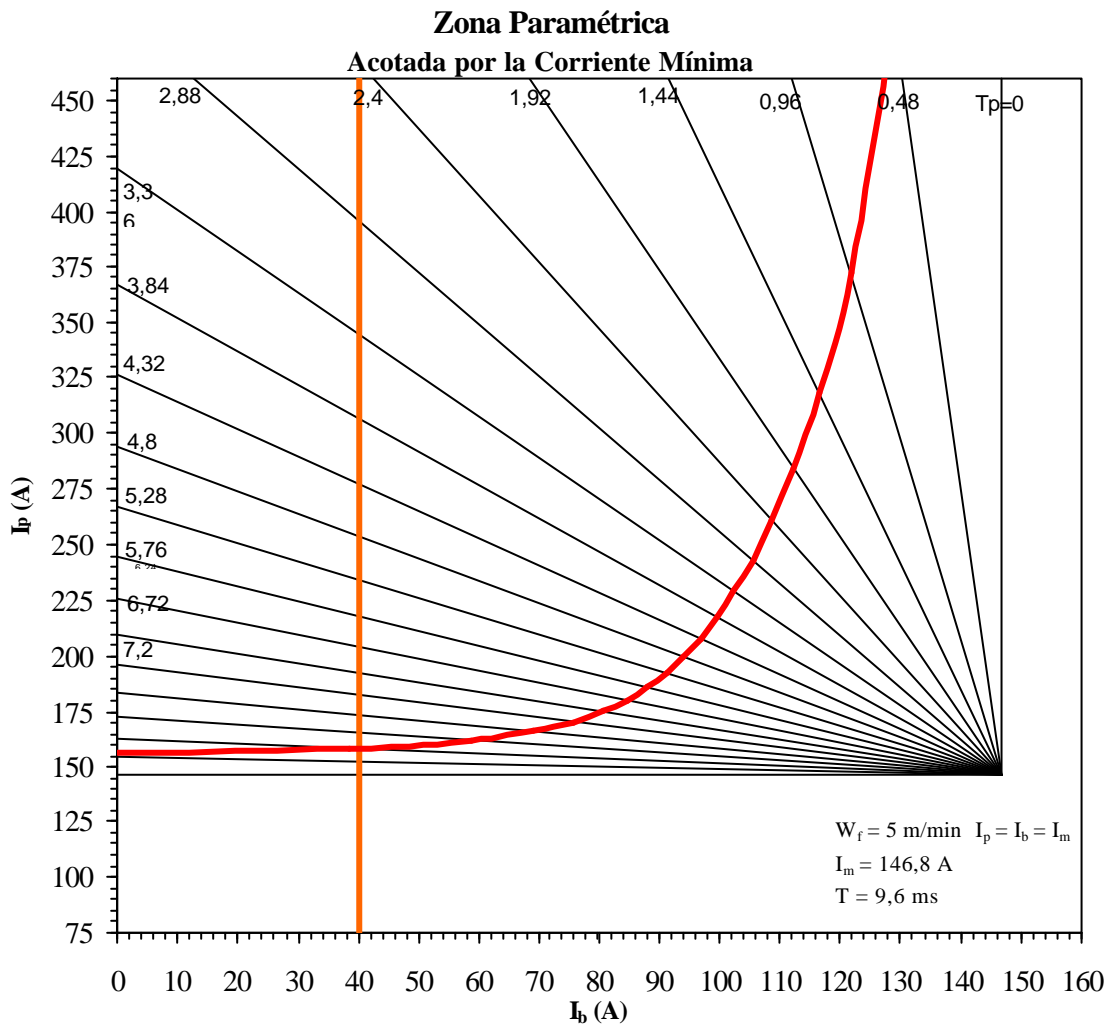


Figura 4.1. Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica y por el Criterio de Estabilidad del Arco.

4.2.4.- Acotamiento de la Zona Paramétrica

A pesar de haber reducido las posibles combinaciones de parámetros utilizando estos tres criterios el universo de posibilidades es todavía muy extenso, por lo que con ayuda de las

recomendaciones de Avesta Welding para la soldadura pulsada en este acero, que son de trabajar en una zona entre 350 y 450 A para una corriente pico y, entre 50 y 150 para una corriente base (esta zona se muestra en la figura 4.3). Se realizan pruebas al azar dentro de esta zona, consiguiendo un comportamiento en el cual las condiciones de desprendimiento de gota se agrupan de cierta maneras en pequeñas regiones dentro de la zona acotada, esto se puede apreciar en la figura 3.33 en donde se muestra como los puntos de una gota por pulso caen dentro del ovalo grisáceo, mientras que las condiciones para un desprendimiento en la base se agrupan en la parte superior izquierda, las condiciones de un desprendimiento de varias gotas por pulso se encuentran en la parte superior derecha (en su mayoría), gracias a este pseudo-comportamiento se pudo disminuir la cantidad de ensayos a unos 55 ensayos registrados.

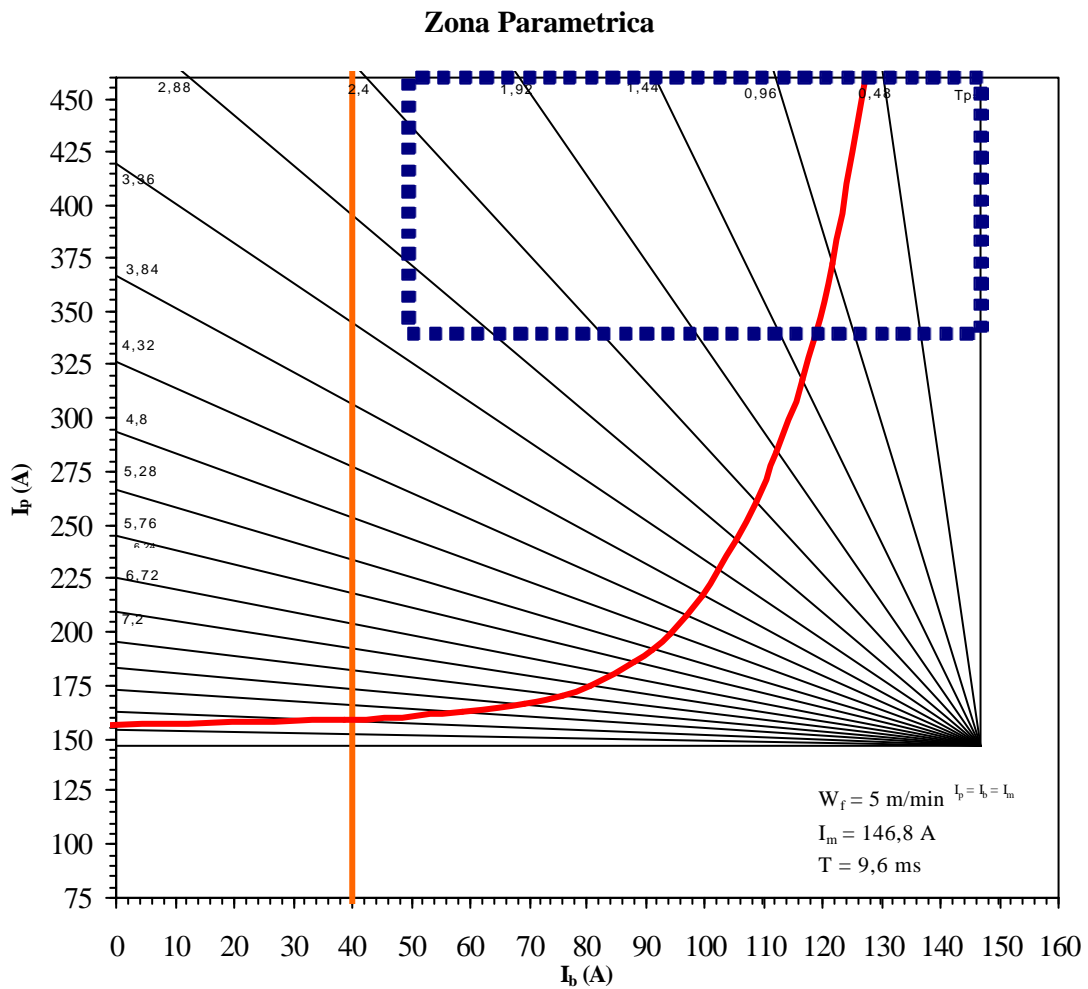


Figura 4.3. Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica y por el Criterio de

Estabilidad del Arco, y por las recomendaciones hechas por Avesta Welding (recuadro azul).

4.2.5.- Caracterización de cordones sobre chapa plana

De los 55 ensayos sólo 8 ofrecían las condiciones buscadas por la investigación (una gota por pulso), de estas condiciones fueron preseleccionadas 3 (E2.2-2, E2.4-1 y E2.7-1, presentados en las figuras 3.20 -3.22) por ofrecer los mejores comportamientos (analizado con ayuda de los oscilogramas) de transferencia metálica de una gota por cada pulso. Para la selección de una de estas condiciones se realizaron deposiciones sobre chapa plana y así poder estudiar su geometría a fin de tener otro criterio de selección. La figura muestra 3.32 las macrografías realizadas a las tres condiciones. En la inspección visual a los cordones depositados se detalla la escasa presencia de salpicadura, también es bueno mencionar que las tres condiciones seleccionadas mostraron una forma de cráter elíptica, lo cual, según la teoría, disminuye la posibilidad de fisuración de caliente. La condición E2.4-1 presenta un perfil del cordón bastante liso, mientras que la condición E2.2-2 y E2.7-1 presentan un perfil de menos liso y un poco escalonado de estas dos condiciones inducen a pensar la poca fluidez y mojabilidad del charco de soldadura. De acuerdo a lo indicado por la tabla 4.2, se puede interpretar que la condición E2.4-1 posee la mejor relación (Ancho/Altura = 1,7). Gretoft y Karlsson reportan relaciones similares y que estas evitan las fisuras en caliente. De acuerdo a estos investigadores el consumible se diluye entre un 20 a 40% en el metal base, por lo tanto, la dilución de la condición E2.4-1 (%Dilución = 23) se encuentra dentro de estos límites, mientras que las otras condiciones esta ligeramente por debajo del intervalo recomendado.

Tabla 4.2.- Resumen de la Caracterización Geométrica de los Cordones depositados sobre chapa plana.

Ensayo	Ancho (mm)	Refuerzo de Cara (mm)	Relación Ancho/Alto	Dilución (%)
E2.2-2	7,2	2,3	1,5	19
E2.4-1	8,4	2,3	1,7	23
E2.7-1	6,9	2,5	1,6	17

De las tres condiciones seleccionadas, es la condición E2.4-1 la que presentó un porcentaje de dilución óptimo, unido a un perfil de penetración adecuado (figura 3.32), lo que

nos lleva a seleccionar dicha condición como la definitiva para la realización del cupón de prueba y posterior Registro de Calificación de Procedimiento.

4.3.- Diseño y Elaboración de la junta

Al haber conseguido los parámetros de soldadura GMAW-P (de una gota por pulso) para el Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, se realizó la unión de las laminas en un solo pase, utilizando los parámetros reportados en la tabla 3.11.

La tabla 3.12 muestra los valores de la energía bruta aportada (EBA) o aporte calórico y la energía neta absorbida (ENA) durante el proceso de soldadura, los cuales se calcularon a partir de los parámetros corriente media del proceso (utilizando la ecuación 6), voltaje medio del proceso y velocidad de soldadura, que se reportan en la tabla 3.11.

Para el cálculo de la ENA se consideró una eficiencia térmica del proceso (η) de 0,70. Según Avesta el valor registrado en la tabla 3.12 se encuentra por debajo de las recomendaciones máximas de 2 KJ/mm, para el material de aporte, minimizando riesgos de agrietamiento y deformación, estando el voltaje medio (V_m) dentro del intervalo recomendado para transferencia en Spray (26 –30 v). La eficiencia calculada del proceso utilizando las condiciones presentadas en la tabla 3.11 es de 97,35 lo cual es alta para el proceso GMAW. Viendo lo anterior desde un punto de vista económico para un proceso de fabricación esto significa que sólo el 2,65 % del material de aporte es perdido, lo cual es de beneficio para este tipo de proceso de soldadura.

4.4.- Ensayos No Destructivos en el Cordón de Soldadura

Durante la inspección visual de las soldaduras, no se encontró evidencia de discontinuidades superficiales tales como poros y grietas, socavaduras, falta de penetración o relleno insuficiente en la cara del cordón. Una fotografía representativa del cordón de soldadura (tanto de cara como de raíz) se muestra en la figura 4.3. Por lo que se determinó que la superficie de la soldadura final cumplía con las condiciones de calidad especificadas en la regla QW-190, del Código ASME sección IX.

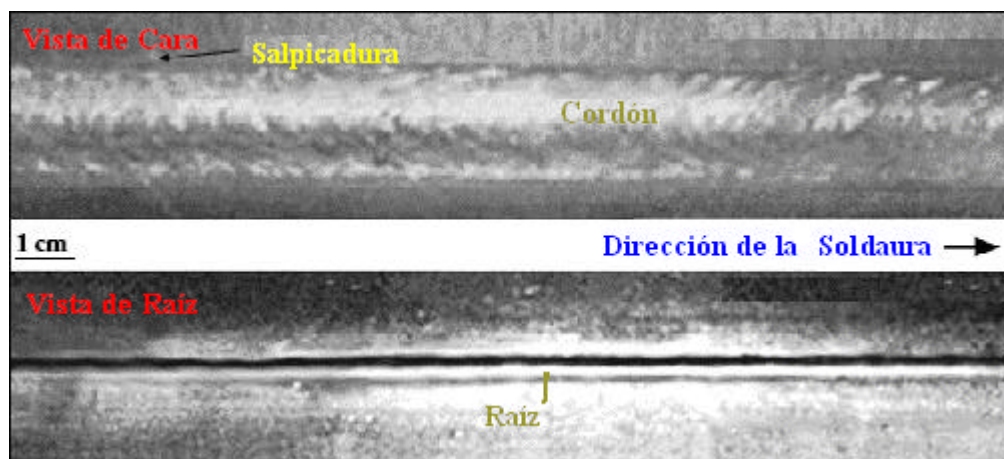


Figura 4.3.- Aspecto superficial de las vistas de cara y raíz del cordón de soldadura realizado en un modo de transferencia metálica pulsado con las siguientes condiciones:
Ip: 398 A; Ib: 63 A; tp: 2,4 ms; tb: 7,2 ms.

El ensayo de líquidos penetrantes, confirmó el buen acabado superficial, así como la inexistencia de grietas o defectos superficiales tanto en el metal base como a lo largo del cordón. De esta forma, ratifica la excelente textura de la soldadura.

4.5.- Ensayos Destructivos en el Cordón de Soldadura

Los ensayos destructivos realizados a los cupones de prueba para su caracterización tales como. Análisis Químico, Metalografía, Medición del contenido de ferrita; Dureza, y Tracción, permitieron determinar las propiedades mecánicas de la junta soldada con los parámetros determinados a lo largo de la investigación.

4.5.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura

Según la tabla 4.3, se representan los valores reportados por los análisis químicos del cordón en comparación con los del metal base y del material de aporte.

Tabla 4.3.- Análisis Químico del Cordón, Metal Base y Aporte.

ELEMENTOS	%C	%Cr	%Ni	%Mn	%Si	%S
Cordón de Soldadura	0,04	19,03	9,20	2,05	0,72	0,015
Metal Base	0,05	18,10	8,20	2,00	0,30	0,009
Aporte	0,03	20	10	1,75	0,9	0,03

En la tabla 4.3 se puede apreciar que la composición química del cordón corresponde a lo esperado de acuerdo a la dilución entre el metal base y el aporte, las posibles variaciones son debidas principalmente a la oxidación (Cr, Si, Ni) ya que la mezcla protectora del arco contiene Argón con 2% de oxígeno. Para controlar estas perdidas los aportes proporcionan valores más altos de estos elementos en comparación al metal base. Por otra parte el azufre, como elemento altamente perjudicial, por su formación de fisuras en caliente, se encuentra en un nivel bajo (0,015 %) en el cordón y (0,03 %) en el metal base. Lo que se traduce, en escasas posibilidades de formación de fases de bajo punto de fusión en el cordón de soldadura.

4.5.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura

Las evaluaciones metalográficas a escala macro se realizaron a fin de determinar los perfiles geométricos de los cordones de soldadura (penetración, ancho del refuerzo, altura del refuerzo, dilución, estructura y fases presentes, zona afectada por el calor, presencia de discontinuidades (inclusiones, poros, grietas) y especialmente la penetración lateral. La caracterización geométrica del cordón de soldadura se presenta en la tabla 3.14, estando los valores de dilución y la relación ancho/alto dentro de las recomendaciones de Grefott y Karlsson, para evitar las fisuras en caliente. En la figura 3.35 se puede observar una completa penetración del metal de aporte, dejando menor posibilidad a defectos en el interior del cordón que si la penetración fuese incompleta.

La dilución, evaluada como una relación porcentual de participación del metal base en el cordón de soldadura, se debe principalmente al aporte calórico generado por el modo de transferencia metálico pulsado, a medida que mayor sea el aporte calórico a el cordón de soldadura mayor mojabilidad, por ende mayor cantidad de metal base que pasa a formar parte del cordón de soldadura. En la figura 3.35 se observan los granos austeníticos con tamaños similares desde el metal base hasta la zona de transición, confirmando de esta forma, la inexistencia de una zona afectada por el calor (ZAC) propiamente formada. Era de esperarse que el contenido de Ferrita en el cordón sea mayor que en el metal base o zona de transición, siendo esto consecuencia de los elementos ferritizantes en el material de aporte.

La micrografía muestra la dirección de crecimiento de las columnas dendríticas en la zona fundida, típica de este modo de solidificación, observándose un crecimiento epitaxial de la fase ferrítica (morfología vermicular) que va desde la raíz al centro del cordón con una

orientación hacia la parte superior del cordón de soldadura, siguiendo la distribución de calor de la junta soldada.

4.5.3.- Contenido de Ferrita en el Cordón de Soldadura

Por ser la Ferrita una fase de alta ductilidad y un menor coeficiente de expansión térmica, un cierto contenido de esta fase, facilita la relajación térmica y una menor contracción durante el enfriamiento. Muchos investigadores tales como Schaeffler, DeLong, Lefebvre, Olson y Kotecki, han manifestado que la predicción y medida de la ferrita, proporciona un considerable grado de seguridad para que el cordón esté libre de grietas. Su presencia también puede incrementar las características mecánicas del cordón de soldadura, pero, al mismo tiempo, es desfavorable al disminuir la resistencia a la corrosión. Por tales motivos se requiere certificar un contenido de ferrita en un metal de soldadura. En esta investigación el contenido o porcentaje de ferrita calculado por el Método Químico ($10,01 \pm 0,44$) y por el Método Metalográfico por el diagrama de Schaeffler fue de 10, y por el diagrama de DeLong de 10,2. Por lo que puede considerarse beneficioso el contenido de ferrita en el cordón de soldadura, ya que de acuerdo con las investigaciones de Lefebvre, ellos consideran que el contenido de ferrita debe oscilar entre (4 y 15 %Ferrita) o (4 y 13 FN), para los Aceros Inoxidables Austeníticos.

En la tabla 4.4, se puede observar que el contenido de Ferrita se mantiene con poca variación entre el valor obtenidos por el Método Metalográfico y Método Químico, lo que nos indica que dicho valor se encuentra cercano a la realidad.

Tabla 4.4.- Contenido de Ferrita (%) dentro del Metal Base, Aporte y Cordón de soldadura utilizando diferentes métodos: Metalográfico y Químico.

Materiales	Método Metalográfico	Método Químico	
		Schaeffler	DeLong
Metal Base	$7,75 \pm 0,08$	5 - 10	8
Aporte	-	7,6	> 13,6
Cordón	10,01	10	10,2

4.5.4.- Dureza en el Cordón de Soldadura

Las mediciones de dureza fueron realizadas en cada una de las probetas soldadas usando la norma ASTM E384. Los resultados del ensayo de dureza son reportados en la tabla 3.18 aquí puede observarse que el valor de dureza Vickers promedio, obtenida en material base fue de $(160,20 \pm 1,81)$ HVN₂₀, en el cordón de soldadura fue de $(161,70 \pm 3,20)$ HVN₂₀ y en la ZAT fue de $(165,72 \pm 2,36)$ HVN₂₀. Esto indica que los mayores valores de dureza tienen lugar en la zona de transición (ZAT) entre el metal base y el cordón de soldadura. Este hecho era de esperarse en virtud de los efectos metalúrgicos derivados a consecuencia del proceso de soldadura. También se le atribuye el hecho, a los cambios de la composición química que induce el material de aporte, al refinamiento del grano por la presencia del Silicio y a las pérdidas de elementos aleantes que se producen durante la soldadura. Según lo indicado por Liu et al. y Ravi, estos valores de dureza son normales para estos aceros soldados por el proceso GMAW.

4.5.5.- Ensayo de Tracción

Los ensayos de tracción se realizaron con el objeto de determinar el esfuerzo real de fluencia (σ_y) y esfuerzo real a carga máxima (σ_{max}). Requisito indispensable para evaluar en la regla QW-153 del Código ASME sección IX, con un el diseño de probetas especificado en el párrafo QW-462 del mismo código. En la tabla 4.5, se presentan los resultados producto de los tres ensayos realizados. Aquí se observa que el valor promedio de carga máxima (σ_{max}) es de $(942,2 \pm 22,6)$ MPa, el esfuerzo de fluencia ($\sigma_{y,s}$) de $(205,0 \pm 2,5)$ MPa, y una máxima elongación de 31,7 mm en la zona calibrada.

Tabla 4.5.- Probetas para el ensayo de tracción de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldadas con un electrodo ER 308L-Si.

Materiales	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	Elongación (%)
ASTM A240	190 – 210	460 – 1100	40
Cordón	$205,0 \pm 2,5$	$942,2 \pm 22,6$	44 ± 4

Se aprecia que los valores recogidos por los ensayos cumplen con los valores mínimos establecidos por la norma ASTM A240 y los fabricantes. La diferencia entre los valores es despreciable y puede ser producto de discontinuidades presentes en el cordón

4.5.6.- Ensayos de DobleZ

Con el fin de determinar el grado de solidez y ductilidad de la junta soldada se realizaron los ensayos de doblez guiado de cara y raíz (dos de cada una). El ensayo fue realizado de acuerdo a las especificaciones en QW 466.2 del código ASME sección IX, mientras que el diseño de la probeta correspondía a lo establecido en QW-462.3(a). Los resultados pueden verse en la figura 4.4 en donde se observa que las superficies del cordón no presenta ningún defecto superficial, estas se encuentran libres de grietas, con lo que se puede afirmar que la soldadura tiene buena sanidad o calidad, por lo que concuerda con los criterios de aceptación establecidos en QW-163 del Código ASME, sección IX.



Figura 4.4.- Probetas obtenidas del ensayo de doblez de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, soldadas con un electrodo ER 308L-Si.

5.- CONCLUSIONES

- ✓ El conjunto de Criterios establecidos por Amin para la predicción y selección de los parámetros de corriente pulsada GMAW-P son aplicables al Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304.
- ✓ Uno de los parámetros óptimos para conseguir una soldadura GMAW-P para la unión del Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, en posición plana (1G), con espesor de 8 mm y junta en V a 60°, son: $I_p = 398$ A, $I_b = 63$ A, $T_p = 2,4$ ms, $T_b = 7,2$ ms, $I_m = 146,48$ A, $W_F = 5$ m/min, con un flujo de gas de protección de 16 L/min y un material de aporte ER 308L-Si de 1,2 mm de diámetro.
- ✓ Se considera una soldadura con buena calidad.
- ✓ Los resultados obtenidos en los Ensayos Destructivos cumplen con lo establecido por el código ASME sección IX y por las normas respectivas para el material.
- ✓ La junta presenta un alto grado de sanidad y solidez .
- ✓ El contenido de Ferrita de la junta es (10 %Ferrita), por lo que favorece la reducción de la fisuración en caliente.
- ✓ El Registro de Calificación de Procedimiento de Soldadura (RCP) efectuado según el Código ASME sección IX, para la junta muestra que la soldadura es aprobada y califica.

6.- RECOMENDACIONES

- ✓ Determinar la Zona Paramétrica para otros Aceros Inoxidables de carácter industrial.
- ✓ Realizar un estudio de las propiedades anticorrosivas de juntas elaboradas con las condiciones encontradas.
- ✓ Profundizar el estudio Metalográfico de las juntas utilizando técnicas de Microscopía Electrónica (Barrido y Transmisión).
- ✓ Caracterizar el comportamiento a Fatiga y al Impacto de las juntas.
- ✓ Realizar estudios para evaluar la influencia de las adiciones de otros.


7.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS


- 1 Zbigniew D. Jastrzebski. **Naturaleza y Propiedades de los Materiales para Ingeniería**. Interamericana, 2da Edición, México 1979. pp 323-327.
- 2 Kotecki D.J. **Welding of Stainless Steels**. ASM Handbook. Vol 6, 9th edition, 1995. pp. 677 - 707.
- 3 ASM Metals Handbook, vol 1, **Property and Selection Iron**. 10th Edition, 1998.
- 4 Avner Sydney. **Introducción a la Metalurgia Física**. McGraw-Hill, 1ra Edición, México 1975. pp 290-298.
- 5 Reyna, M. **Soldadura de los Aceros, Aplicaciones**. 2^{ed}. Madrid 1988. pp 343-373.
- 6 Winkler F., Schabereiter H., Rabensteiner G. y Tösch J. (Bohler Welding Technology), **Aspectos Metalúrgicos y Tecnológicos en el soldeo de aceros inoxidables**. Soldadura y Tecnologías de Unión, No. 27, 1994, pp 20-48.
- 7 Jamaes A. Pender. **Soldadura**. McGraw-Hill, 3ra edición, 1989, pp 175-190.
- 8 Herbert Uhlig. **Corrosión y Control de Corrosión**. URMO, Bilbao 1970. pp 290-320.
- 9 J.A. Brooks; J.C.Lippold. **Selection of Wrought Austenitic stainless Steels**. ASM Handbook. Vol 6, 9th edition, 1995. pp. 456 - 469.
- 10 AWS Welding Handbook. **Materials and Applications**, part 2, Vol 4. 8th ed. Miami 1998. pp. 234 - 296 (Stainless and Heat-Resisting Steels).
- 11 Vicente Ignoto. **Guía de Soldadura**. Caracas 2004. pp 1-43, 160-196, 351-400.
- 12 Rabensteiner G **Influencia del contenido de Cr y Ni en los Aceros Inoxidables Austeníticos**. Periodical "Technia", No. 15/16-88, 1995.
- 13 Gretoft B. y Karlsson L. (Laboratorio Metalográfico del Grupo ESAB), **Fisuración en Caliente durante la Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos**. Soldadura y Tecnologías de Unión, No. 6, 1990, pp 68-73.
- 14 Schaeffler A.L. **Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal**, Met. Prog, vol 56 (No. 11), 1949, pp 680-680B.
- 15 DeLong W.T. **Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal**, Welding Journal. vol 53 (No. 7), 1974, pp 273s-286s.

- 16 AWS. ANSI/AWS A4.2. **Standard Procedures for Calibrating Magnetic Instruments to Measure the Delta Ferrite Content of Austenitic and Duplex Austenitic Ferritic Stainless Steel Weld Metal.** Miami, 1991.
- 17 Ignoto, V. **Efecto del Oxígeno de la Mezcla Protectora y el Modo de Transferencia Metálica en la Soldadura del Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 316L utilizando el proceso GMAW.** UCV. Caracas 2002. pp. 146.
- 18 Siewert T.A., McCowan C.N. and Olson D.L., **Ferrite Number Prediction to 100 FN in Stainless Steel Weld Metal,** Welding Journal. vol 67 (No. 12), 1988, pp. 289s-298s.
- 19 McCowan C.N., Siewert T.A. and Olson D.L., **Stainless Steel Weld Metal: Prediction of Ferrite Content.** Welding Research Council Bulletin 342, WRC, 1989.
- 20 Kotecki D.J. and Siewert T.A. **WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: a Modification of the WRC-1988 Diagram,** Welding Journal. vol 71 (No. 5), 1992, p 171s-178s.
- 21 Lefebvre J. **Guidance on Specifications of Ferrite in Stainless Steel Welds Metal.** Welding in The World, vol 31(6) 1993, pp390-407.
- 22 TWI **Recommended Practice for Determining Volume Fraction ferrite in Duplex Stainless Steel Weldments by Systematic Point Count,** Doc 5632/18, 1993.
- 23 Kotecki D. J. **Standards and Industrial Methods for Ferrite Measurement,** Welding Journal, vol 77(5), mayo 1998, pp 49-51.
- 24 AWS Welding Handbook. **Tecnología y Procesos.** Vol 2. 8th ed. Miami 1998. pp 1 - 44. (Soldadura por Arco de Metal y Gas).
- 25 Hernández Riesco G. **Manual del Soldador.** 4^{ta} ed. Cesol. Madrid 1998.
- 26 Praxair Engineering. **GAS METAL ARC WELDING OF STAINLESS STEEL.** www.praxair.com. 2003.
- 27 Annelise Z., Macedo w. Y Torres R. **Avaliação Metalúrgica de juntas de Aço Inoxidável Austenítico Soldado por Arco Tubular com Proteção Gaseosa.** XXI ENTS-ABS, Caxias Do Sul, Brasil 1995, pp 597-610.
- 28 ASM HANDBOOK. **Welding, Brazing and Soldering,** Volume 6. Gas tungsten Arc welding, pp. 190-194, 208; Selection of Wrought Duplex Stainless Steel, pag. 471-481, 690.
- 29 Gerken J.M. and Kotecki D.J. **Stainless Steels,** Publication No. M250, The Lincoln Electric Company, 1990.

- 30 Avesta Polarit Welding. **Catalogo de Consumibles.** www.avestapolarit.com/welding, 2003.
- 31 Lincoln Electric Company. **MIG / MAG Welding Guide.** www.lincolnelectric.com. 1998.
- 32 Gómez R. **Algunas Referencias en la Soldadura por Arco Pulsado,** Soldadura y Tecnologías de Unión, No.36, 1995, pp 28-33.
- 33 Amin M. **Pulsed Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding,** Metal Construction 15 (5), 1983, pp 272-278.
- 34 Kim, Y. S., and Eager, T.W. **Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding.** Welding Journal, vol 72 (No. 7), 1993, pp 279s-287s.
- 35 Rajasekaran, S., Kulkarni, S. D., Mallya U. D., and Chaturvedi R.C. **Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gas metal arc welding process.** Welding Journal, vol 77 (No. 6), 1998, pp 254s-269s.
- 36 M. Benzo; A. Capodicasa. **Calificación de Procedimientos de Soldadura Tubo / Tubo Usados en Calderas.** 1995. Universidad Central de Venezuela, pp 75-77.
- 37 **Código ASME sección IX.** 2001, pp. 4 - 6, 152, 157.
- 38 Melo G., Pineda O. **Determinación de los parámetros en la soldadura GMAW pulsada de acero inoxidable 316L.** Caracas 2004.
- 39 ASM Metals Handbook. **Welding and Brazing.** vol. 8(8ª ed.), USA 1995. pp. 64-69 y 180-185.
- 40 AWS. ANSI/AWS A5.9 - 93 **Specifications for Base Stainless Steel Welding Electrodes on Rods,** 1990.
- 41 Gretoft B. y Karlsson L, **Fisuración en Caliente durante la Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos II.** Soldadura y Tecnologías de Unión, No. 8, 1991, p 1-12.
- 42 Kehl G. **Fundamentos de la Práctica Metalográfica.** 3^{ed}. Madrid 1954. pp. 407.
- 43 **ASTM Designation A 370 ó 384 – 96,** vol. 1(2), 1997, pp.175-227.
- 44 Liu S. and Indacochea J. **Weldability of Steels.** ASM Metals Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys. Vol. 1 (9th edition), 1990, pp. 603 – 613.
- 45 Ravi P. **Solid-State Transformations in Weldments.** ASM Metals Handbook. Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6 (9th edition), 1993, pp. 70 – 87.

8.- ANEXOS

		UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO RCP										
CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.				RCP Nº: EPS Nº:		FECHA: CÓDIGO REF:						
NOMBRE SOLDADOR:			C.I.:		IDENTIFICACIÓN:		HOJA: 1/2					
PROCESO						TIPO						
OFW ()		GMAW ()		SAW ()		() () () Manual Semiautomático Automático						
SMAW ()		GTAW ()		Otro ()								
Procesos Especiales:												
DISENO DE JUNTA												
Tipo de Junta: Ranura		Ranura ()		Filete ()		Otra:						
Respaldo:		Si ()		No ()		Material del Respaldo: Aluminio						
Espesor de Recargue:												
METAL BASE												
Especificación, Grado o Tipo: Nº P: Nº Grupo:				a Especificación, Grado o Tipo: a Nº P: Nº Grupo:								
Plancha () Espesor: mm				Tubería () Espesor: Diámetro:								
METAL DE APORTE												
		Aporte (A)		Aporte (B)		Aporte (C)		Aporte (D)				
Especificación Fabricante												
AWS (Clase)												
Nº F												
Diámetro												
Espesor Material Depositado												
POSICION Y ALINEACIÓN DE LA JUNTA					TÉCNICA							
Posición:					Cordón: Recto () Ondulado ()							
Progresión:					Oscilación:							
Nº de puntos:					Electrodo: Múltiple () Sencillo ()							
Distancia entre puntos:					Pases por lado: Múltiples () Sencillo ()							
PRECALENTAMIENTO					POST-CALENTAMIENTO							
Temperatura mín. precalentamiento:					Intervalo de temperatura:							
Temperatura máx. entre pases:					Tiempo de permanencia:							
Tiempo de permanencia:					Enfriamiento:							
Otros:					Otros:							
GAS					LIMPIEZA							
		Tipo		Composición		Flujo (Lts/min)			Inicial: papel abrasivo, cepillo de alambre y gasolina Entre pases.			
Protección												
Arrastre												
Respaldo												
Otros												
PARAMETROS ELÉCTRICOS (GMAW-P)												
Pase	Proceso	MAT. DE APORTE		CORRIENTE (A)						Voltaje (V)	Velocidad de Avance (cm/min)	Velocidad de Alimentación (m/min)
		Clase AWS	φ [mm]	Tipo	Polaridad	Ip	Ib	Tp	Tb			
OBSERVACIONES:												

		UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO RCP				
CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.		RCP N°: EPS N°:		FECHA: CÓDIGO REF:		
NOMBRE SOLDADOR:		C.I.:		IDENTIFICACIÓN:		
ENSAYO DE TRACCIÓN						
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Resistencia a la tracción (MPa)	Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones
ENSAYOS DE DOBLEZ						
Tipo de DobleZ			Resultado			

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO AI DEPOSITO

Elementos

OBSERVACIONES:

OTROS ENSAYOS

Tipo de ensayo:
Observaciones:
Otros:

SE CERTIFICA QUE TODO LO INDICADO EN ESTE REGISTRO, ES CORRECTO Y QUE LAS PROBETAS FUERON SOLDADAS Y ENSAYADAS DE ACUERDO CON LOS REGISTROS DE LA SECCIÓN IX DEL CÓDIGO ASME

Elaborado por:
Br. Adrian A., Hurtado C.
C.I. 13.908.326

Ing. Vicente Ignoto
Coordinador – C.V.S.