

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE UNIONES DISIMILES DE ACERO  
INOXIDABLE AISI/SAE 304 Y ASTM A 569 SOLDADAS  
MEDIANTE EL PROCESO GMAW-P**

Presentado por el Bachiller:

**Saavedra R Edward F.**

Ante la Universidad Central de  
Venezuela, para optar al Título de  
“Ingeniero Mecánico”

Caracas, 2009

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE UNIONES DISIMILES DE ACERO  
INOXIDABLE AISI/SAE 304 Y ASTM A 569 SOLDADAS  
MEDIANTE EL PROCESO GMAW-P**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Vicente Ignoto.

Presentado por el Bachiller:

**Saavedra R Edward F.**

Ante la Universidad Central de  
Venezuela, para optar al Título de  
“Ingeniero Mecánico”

Caracas, 2009

- Saavedra R., EDWARD F., 2009  
Depósito Legal N°:

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



Caracas, 12 de mayo de 2.009

## ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:

**EDWARD SAAVEDRA**

*Titulado:*

**“EVALUACIÓN DE UNIONES DISIMILES DE ACERO INOXIDABLE AISI/SAE 304 Y ASTM A 569 SOLDADAS MEDIANTE EL PROCESO GMAW-P”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Crisanto Villalobos**  
Jurado



  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Víctor Othman Falcón**  
Jurado

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Vicente Ignoto**  
Tutor



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION

Caracas, 12 de Mayo de 2.009

Ciudadano  
**Prof. GERARDO RAMÍREZ**  
Jefe de División de Control de Estudios

Presente.-

Quienes suscriben Miembros del Jurado Examinador, designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted, con la finalidad de informarle se ha decidido otorgar al Bachiller

**EDWARD SAAVEDRA**  
C.I.V.- 15.698.534

## “MENCIÓN HONORÍFICA”

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado titulado:

**“EVALUACIÓN DE UNIONES DISIMILES DE ACERO INOXIDABLE  
AIS1/SAE 304 Y ASTM A 569 SOLDADAS MEDIANTE EL PROCESO  
GMAW-P”**

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,

Prof. Crisanto Villalobos  
Jurado



Prof. Vicente Ignoto  
Tutor

Prof. Victor Othman Falcón  
Jurado

“Hacia el 50<sup>a</sup> Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante”

## **DEDICATORIA**

*A mi familia. En especial a mis padres y hermana por su amor y comprensión, quienes me apoyaron durante este largo camino que significó crecer como persona y profesional. Además de enseñarme que con esfuerzo, perseverancia y voluntad podemos alcanzar todas nuestras metas. De corazón les digo, Muchas Gracias por estar a mi lado en este logro.*

***Edward Fernando, Saavedra Ramírez.***

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios Todopoderoso.*

*A mis padres y a mi hermana, quienes me apoyaron desde el momento que emprendí este reto. Sin su apoyo y palabras de aliento, sobre todo en los momentos difíciles, 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 la Escuela de Ingeniería Mecánica.*

*Agradezco especialmente al Dr. Ing. Vicente Ignoto, tutor de este trabajo, por darme la oportunidad de poder trabajar en este su proyecto, además de brindarme sus sabios consejos y ayuda durante la ejecución de este trabajo.*

*Al personal que labora en el Centro Venezolano de Soldadura y demás centros de investigación de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y en Ciencia de los Materiales por el aporte realizado a este trabajo especial de grado. A Isis, Maribel y Rómulo, por sus ayudas, consejos y por ser grandes compañeros de trabajo.*

*A todos los profesores y compañeros de estudio de la escuela de Ingeniería Mecánica, con los cuales curse materias y a la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales los cuales contribuyeron en mi formación académica.*

*A mis amigos que en todo momento estuvieron a mi lado.*

**.....gracias a todos.**

**Saavedra R, Edward F.**  
**“EVALUACIÓN DE UNIONES DÍSIMILES DE ACERO  
INOXIDABLE AISI/SAE 304 Y ASTM A569 SOLDADAS  
MEDIANTE EL PROCESO GMAW-P”**

*Tutor Académico: Prof. Vicente Ignoto.*

*Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.*

*Año 2009, 165 páginas.*

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

**RESUMEN**

*Este trabajo tiene como finalidad determinar los parámetros óptimos del modo de transferencia metálica pulsada (una gota por pulso) en el proceso GMAW-P ( $I_p$ ,  $I_b$ ,  $T_p$ ,  $T_b$ ), pertenecientes a una “Zona Paramétrica”, basándose en los criterios desarrollados por Amin: criterio de Burnoff, de Transferencia Metálica y de Estabilidad del Arco. Se aplica el proceso de soldadura GMAW-P con alambre macizo ER309L con diámetro de 1,2 mm y protección gaseosa (98% Ar + 2% O<sub>2</sub>), para la unión disímil a tope con ranura cuadrada en posición plana de láminas de Acero de Bajo Carbono ASTM A569 y Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, ambas de espesor de 4 mm. Se construye la zona paramétrica y a partir de ella se obtiene el conjunto óptimo de parámetros de soldadura. El conjunto óptimo es de:  $I_p = 360$  A,  $I_b = 105,29$  A,  $T_p = 2,8$  ms,  $T_b = 5,2$  ms, con una corriente media de 194,44 A, y velocidad de alimentación de 6 m/min, a un flujo de gas protector de 15 L/min. Con la finalidad de caracterizar la junta soldada con dichos parámetros se realizan Ensayos No Destructivos (Inspección Visual, Líquidos Penetrantes e inspección radiográfica) y Destructivos (Análisis Químico, Contenido de Ferrita, Evaluación Metalográfica, Dureza, Tracción y Doblez) en conformidad con lo establecido por el Código ASME, Sección IX, para finalmente realizar el Registro de Calificación de Procedimiento (RCP).*



**Saavedra R, Edward F.**

**"EVALUATION OF STAINLESS STEEL JOINTS DISSIMILAR AISI / SAE  
304 ASTM A569 WELDED AND THROUGH THE PROCESS GMAW-P"**

*Academic Tutor: Prof. Vicente Ignoto.*

*Thesis. Caracas, U.C.V. Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering.*

*2009, 165 pages.*

*Keywords: dissimilar welding, GMAW-P, Pulsed Transfer, Parametric Zone.*

**ABSTRACT**

*This paper aims to determine the optimal parameters of pulsed metal transfer mode (one drop per pulse) in the GMAW-P ( $I_p$ ,  $I_b$ ,  $T_p$ ,  $T_b$ ), belonging to a "Zone Settings", based on criteria developed by Amin: Burnoff test of Metal Transfer and Stability of Arc. Applies the process of welding with GMAW-P ER309L solid wire with a diameter of 1.2 mm and protective gas (98% Ar + 2% O<sub>2</sub>), for joining dissimilar to groove ceiling with square flat sheet steel ASTM A569 Low Carbon and Austenitic Stainless Steel AISI / SAE 304, both 4 mm thick. Parametric area is constructed and from it you get the optimum set of welding parameters. The optimal set is:  $I_p = 360$  A,  $I_b = 105.29$  A,  $T_p = 2.8$  ms,  $T_b = 5.2$  ms, with a current average of 194.44 A, and feed rate of 6 m / min, a flow of protective gas of 15 L / min. Order to characterize the weld parameters are made with non-destructive testing (visual inspection, radiographic inspection and Liquid Penetrant) and destructive (Chemical Analysis, ferrite content, Evaluation metallographic, hardness, strength and Fold) in accordance with by the ASME Code, Section IX, to finally realize the Procedure Qualification Record (PQR).*

## **INDICE GENERAL**

### **INTRODUCCIÓN**

<b>CAPITULO I</b>	<b>1</b>
<b>1.- Fundamento Teórico</b>	<b>2</b>
<b>1.1.- Clasificación de los Aceros</b>	<b>2</b>
<b>1.2.- Aceros al Carbono y su Clasificación</b>	<b>3</b>
<b>1.3.- Propiedades de los Aceros al Carbono</b>	<b>5</b>
<b>1.4.- Acero al Carbono ASTM A569</b>	<b>6</b>
<b>1.5.- Soldabilidad de los Aceros de Bajo Carbono</b>	<b>6</b>
<b>1.6.- Aceros Inoxidables y su Clasificación</b>	<b>7</b>
<b>1.7.- Aceros Inoxidables Austeníticos</b>	<b>8</b>
<b>1.8.- Propiedades de los Aceros Inoxidables Austeníticos</b>	<b>9</b>
1.8.1.- Resistencia a la Corrosión.	9
1.8.2.- Propiedades Mecánicas de los Aceros Inoxidables Austeníticos.	10
<b>1.9.- Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304</b>	<b>10</b>
<b>1.10.- Soldabilidad de los Aceros Inoxidables</b>	<b>11</b>
<b>1.11.- Estimación del Contenido de Ferrita</b>	<b>12</b>
1.11.1.- Diagrama de Schaeffler.	13
1.11.2.- Diagrama de DeLong.	14
1.11.3.- Diagrama WRC – 1992.	15
<b>1.12.- Soldadura Heterogenia o Disímil</b>	<b>16</b>
1.12.1.- Selección del Metal de Aporte para Uniones Inoxidables y entre Aceros al Carbono y Aceros Inoxidables	17
1.12.2.- Predicción del Contenido de Ferrita en Soldadura Disímil	17
1.12.3.- Coeficiente o Porcentaje de Dilución en Soldaduras Heterogenias o de Materiales Disímiles	20
<b>1.13.- Proceso de Soldadura GMAW</b>	<b>21</b>
1.13.1.- Descripción del Proceso	21

1.13.2.- Ventajas y Limitaciones del Proceso de Soldadura GMAW.	22
1.13.3.- Equipos Utilizados en la Soldadura GMAW.	23
<b>1.14.- Electrodos Utilizados en el Proceso GMAW</b>	24
<b>1.15.- Gases de Protección</b>	26
<b>1.16.- Variables que Intervienen en el Proceso GMAW</b>	27
<b>1.17.- Transferencia Metálica en el Proceso GMAW</b>	31
1.17.1.- Transferencia por Cortocircuito.	32
1.17.2.- Transferencia Globular.	32
1.17.3.- Transferencia por Spray.	33
1.17.4.- Transferencia por Arco Pulsado.	33
<b>1.18.- Parámetros de la Transferencia Metálica por Arco Pulsado</b>	34
<b>1.19.- Predicción de los Parámetros de Corriente Pulsada</b>	37
1.19.1.- Criterio de Burnoff.	38
1.19.2.- Criterio de la Transferencia Metálica.	43
1.19.2.1.- Limitación de la Corriente Pico y Corriente de Base	43
1.19.2.2.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento de Gota (Kv).	44
1.19.2.3.- Curva de Potencia Constante.	48
1.19.3.- Criterio de Estabilidad del Arco.	48
<b>1.20.- Inspección y Calidad de la Soldadura</b>	50
<b>1.21.- Especificación del Procedimiento de Soldadura (EPS)</b>	50
<b>1.22.- Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)</b>	51
<b>CAPITULO II</b>	54
<b>2.- Procedimiento Experimental</b>	55
<b>2.1.- Caracterización Química de los Materiales Base y Material de Aporte</b>	56
2.1.1.- Análisis Químico.	56
<b>2.2.- Caracterización Metalográfica de los Materiales Base</b>	57
<b>2.3.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base y Aporte</b>	57

2.3.1.- Método Metalográfico.	57
2.3.2.- Método Químico.	58
<b>2.4.- Caracterización Mecánica de los Materiales Base</b>	<b>58</b>
2.4.1.- Ensayos de Dureza.	58
2.4.2.- Ensayos de Tracción.	59
<b>2.5.- Preparación del Proceso de Soldadura</b>	<b>62</b>
2.5.1.- Diseño y Preparación de las Juntas.	62
2.5.2.- Preparación de la Mesa de Trabajo.	64
2.5.3.- Fuente de Energía.	64
2.5.4.- Registro de Oscilogramas y Equipos Auxiliares.	65
2.5.5.- Preparación y Limpieza de los Materiales Base.	66
<b>2.6.- Determinación de los Parámetros del Proceso de Soldadura</b>	<b>66</b>
2.6.1.- Criterio de Burnoff.	67
2.6.2.- Criterio de Transferencia Metálica.	68
2.6.2.1.- Limitación de la Corriente Pico (Ip) y Tiempo Pico (Tp).	68
2.6.2.2.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento (Kv).	69
2.6.3.- Curva de Potencia Constante.	69
2.6.4.- Criterio de Estabilidad del Arco.	69
2.6.5.- Acotamiento de la Zona Paramétrica.	70
2.6.6.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana.	70
<b>2.7.- Realización de la Soldadura en una Unión a Tope</b>	<b>71</b>
2.7.1.- Calor Aportado y Potencia del Arco Eléctrico.	71
<b>2.8.- Corte y Preparación de las Probetas</b>	<b>72</b>
<b>2.9.- Ensayos No Destructivos</b>	<b>73</b>
2.9.1.- Inspección Visual.	73
2.9.2.- Inspección por Líquidos Penetrantes.	74
2.9.2.- Inspección Radiográfica.	75
<b>2.10.- Ensayos Destructivos</b>	<b>76</b>

2.10.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura.	77
2.10.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura.	77
2.10.2.1.- Análisis Micrográfico.	77
2.10.2.2.- Análisis Macrográfico y Dilución.	78
2.10.3.- Medición del Contenido de Ferrita	79
2.10.3.1.- Método Metalográfico.	79
2.10.3.2.- Método Químico.	80
2.10.4.- Ensayo de Dureza.	80
2.10.4.1.- Microdureza	80
2.10.5.- Ensayo de Tracción.	81
2.10.6.- Ensayo de DobleZ.	83
<b>2.11.- Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)</b>	<b>85</b>
<b>CAPITULO III</b>	<b>86</b>
<b>3.- Resultados Experimentales</b>	<b>87</b>
<b>3.1.- Caracterización Química de los Materiales Base y Material de Aporte</b>	<b>87</b>
<b>3.2.- Caracterización Metalográfica de los Materiales Base</b>	<b>88</b>
<b>3.3.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base y Aporte</b>	<b>91</b>
3.3.1.- Método Metalográfico.	91
3.3.2.- Método Químico.	91
<b>3.4.- Caracterización Mecánica de los Materiales Base</b>	<b>93</b>
3.4.1.- Ensayos de Dureza	93
3.4.2.- Ensayos de Tracción	93
<b>3.5.- Determinación de los Parámetros del Proceso de Soldadura GMAW-P</b>	<b>95</b>
3.5.1.- Criterio de Burnoff.	95
3.5.2.- Criterio de Transferencia Metálica.	99
3.5.2.1.- Limitación de la Corriente Pico (Ip) y Tiempo Pico (Tp).	99
3.5.2.2.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento (Kv).	100
3.5.2.3.- Curva de Potencia Constante.	107

3.5.3.- Criterio de Estabilidad del Arco.

3.5.4.- Acotamiento de la Zona Paramétrica.

3.5.5.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana.

### **3.6.- Realización de la Soldadura en una Unión a Tope**

#### **3.7.- Ensayos No Destructivos**

3.7.1.- Inspección Visual.

3.7.2.- Inspección por Líquidos Penetrantes.

3.7.3.- Inspección Radiográfica.

#### **3.8.- Ensayos Destructivos**

3.8.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura.

3.8.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura.

3.8.2.1.- Análisis Micrográfico.

3.8.2.2.- Análisis Macrográfico y Dilución.

3.8.3.- Medición del Contenido de Ferrita

3.8.3.1.- Método Metalográfico

3.8.3.2.- Método Químico.

3.8.4.- Ensayo de dureza.

3.8.4.1.- Microdureza.

3.8.5.- Ensayo de Tracción

3.8.6.- Ensayo de Doblez

### **3.9.- Elaboración del Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)**

## **CAPITULO IV**

### **4.- Análisis de Resultados**

#### **4.1- Caracterización de los Materiales Base y Aporte**

4.1.1- Caracterización Química de los Materiales Base y Aporte.

4.1.2.- Caracterización Metalográfica de los Materiales Base.

4.1.3.- Contenido de Ferrita en los Metales Base.

4.1.4.- Caracterización Mecánica de los Materiales Base

4.1.4.1.- Ensayo de Dureza en los Materiales Base.	136
4.1.4.2.- Ensayo de Tracción de los Materiales Base.	136
<b>4.2.- Determinación de los Parámetros del Proceso de Soldadura GMAW-P</b>	<b>137</b>
4.2.1.- Criterio de Burnoff.	137
4.2.2.- Criterio de Transferencia Metálica.	138
4.2.3.- Criterio de Estabilidad del Arco.	139
4.2.4.- Acotamiento de la Zona Paramétrica.	139
4.2.5.- Caracterización de Cordones sobre chapa plana.	141
<b>4.3.- Realización de la Soldadura en una Unión a Tope</b>	<b>142</b>
<b>4.4.- Ensayos No Destructivos realizados al Cupón Soldado</b>	<b>142</b>
<b>4.5.- Ensayos Destructivos realizados al Cupón Soldado</b>	<b>143</b>
4.5.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura.	143
4.5.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura.	144
4.5.3.- Contenido de Ferrita en el Cordón de Soldadura.	145
4.5.4.- Dureza en el Cordón de Soldadura.	146
4.5.5.- Ensayo de Tracción.	147
4.5.6.- Ensayos de Doblez.	148
<b>4.6.- Registro de Calificación del Procedimiento (RCP)</b>	<b>150</b>
<b>CAPITULO V</b>	<b>151</b>
5.1.- Conclusiones.	152
<b>CAPITULO VI</b>	<b>153</b>
6.1.- Recomendaciones.	154
<b>CAPITULO VII</b>	<b>156</b>
7.1.- Referencias Bibliográficas.	157
<b>CAPITULO VIII</b>	<b>161</b>
8.1.- Anexos.	162

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>		<b>PÁGINA</b>
Figura 1.1.-	Clasificación de los Aceros.	3
Figura 1.2.-	Desarrollo del Acero Inoxidable AISI/SAE 304.	11
Figura 1.3.-	Diagrama de Schaeffler, para evaluar el porcentaje de ferrita.	14
Figura 1.4.-	Diagrama de DeLong, empleado para evaluar (%Ferrita) y (NF).	15
Figura 1.5.-	Diagrama WRC – 92.	16
Figura 1.6.-	Diagrama de Schaeffler, mostrando las zonas para evitar problemas al seleccionar adecuadamente el metal de aporte.	18
Figura 1.7.-	Calculo de Porcentaje de dilución y ejemplos.	20
Figura 1.8.-	Fundamento del proceso de soldadura eléctrica al arco GMAW.	21
Figura 1.9.-	Proceso de Soldadura GMAW o MIG/MAG indicando sus partes.	23
Figura 1.10.-	Terminología del proceso de soldadura GMAW	28
Figura 1.11.-	Corrientes de soldadura típicas vs. Velocidad de alimentación para electrodos usados en aceros al carbono.	29
Figura 1.12.-	Transferencia metálica por Cortocircuito (A); Globular (B); Spray (C) y Pulsado (D).	31
Figura 1.13.-	Parámetros que intervienen en el arco pulsado y la energía aportada en la soldadura.	36
Figura 1.14.-	Característica de quemado para un diámetro de alambre definido con corriente pulsada y corriente uniforme.	39
Figura 1.15.-	Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff.	42
Figura 1.16.-	Relación entre $I_p$ y $T_p$ para diferentes tipos de separación de gota por pulso.	44
Figura 1.17.-	Corriente y voltaje del arco empleando arco de soldadura convencional.	45
Figura 1.18.-	Histograma de distribución de frecuencia para los intervalos de tiempo a unas determinadas condiciones de soldadura.	46
Figura 1.19.-	Relación entre los niveles de corriente y volumen de modalidad de gota.	47
Figura 1.20.-	Relación entre volumen de modalidad de gota y tiempo de modalidad de desprendimiento de gota.	47
Figura 1.21.-	Zona paramétrica predicha por el criterio de Burnoff. Donde, A son las líneas radiales indicando el $T_p$ , B es la curva de potencia constante, C es la corriente de base límite y D es la zona estable.	49
Figura 1.22.-	Registro de Calificación de Procedimiento (RCP). Hoja 1/2.	52
Figura 1.23.-	Registro de Calificación de Procedimiento (RCP). Hoja 2/2.	53
Figura 2.1.-	Esquema del procedimiento experimental.	55
Figura 2.2.-	Microscopio Óptico Olympus PMG 3 con el panel de control de imagen respectivo.	57
Figura 2.3.-	Durómetro Wilson Rockwell Hardness Tester Series 500.	59
Figura 2.4.-	Conjunto de probetas de los materiales base ASTM A569 y AISI/SAE 304 para el ensayo de tracción.	60
Figura 2.5.-	Máquina Universal de Ensayos BALDWIN Tate-Emery Load Indicator.	60
Figura 2.6.-	Diseño de probeta para el ensayo de tracción de los materiales base ASTM A569 y AISI/SAE 304, según la norma ASTM A370.	61
Figura 2.7.-	Diseño para la fabricación de la junta a tope.	63
Figura 2.8.-	Esquema de la junta a tope.	63



Figura 2.9.-	Mesa de trabajo para la elaboración del cupón de prueba.	64
Figura 2.10.-	Fuente de energía MTE DIGITEC 450, con su panel de control y sistema de alimentación.	65
Figura 2.11.-	Equipos auxiliares. Equipo TC-1, para medición de voltaje, corriente media y eficaz. Equipo MVA-1, para medición de velocidad de alimentación del alambre.	66
Figura 2.12.-	Cupón de prueba y distribución de las probetas para los ensayos requeridos.	73
Figura 2.13.-	Kit de líquidos penetrantes.	75
Figura 2.14.-	Montaje para la toma radiográfica al cupón soldado.	76
Figura 2.15.-	Parámetros geométricos del cordón de soldadura.	79
Figura 2.16.-	Esquema general utilizado para el cálculo de las relaciones de áreas, penetración y dilución en el cordón de soldadura.	79
Figura 2.17.-	Esquema del barrido de microindentaciones realizado en la junta soldada.	80
Figura 2.18.-	Microdurómetro marca Leitz Wetzlar, modelo 7520 Metallux, utilizado en el ensayo de microdureza de la junta soldada.	81
Figura 2.19.-	Diseño de probeta para ensayo de tracción de la junta soldada según norma AWS B2.1:1998.	82
Figura 2.20.-	Probetas de tracción utilizadas en el ensayo de tracción de junta soldada.	82
Figura 2.21.-	Diseño de probeta para ensayo de doblez (cara y/o raíz) de la junta soldada según QW-462.3(a) del Código ASME, Sección IX.	83
Figura 2.22.-	Probetas utilizadas en el ensayo de doblez de cara y raíz de la junta soldada según QW-462.3(a) del Código ASME, Sección IX.	84
Figura 2.23.-	Máquina Universal de Ensayos BALDWIN Tate-Emery Load Indicator, utilizada en los ensayos de doblez de la junta soldada.	84
Figura 2.24.-	Arriba. Rodillos de la Máquina Universal de Ensayos BALDWIN, utilizada en los ensayos de doblez de la junta soldada. Abajo, dimensiones de los rodillos utilizados para el ensayo de doblez, según lo especificado en QW- 466.1 del Código ASME, Sección IX.	85
Figura 3.1.-	Microestructura del material base ASTM A569 en: A.- Dirección transversal al sentido de laminación. B.- Longitudinal. En todas las micrografías la matriz clara representa la Ferrita y el área y líneas oscuras representa la Perlita.	89
Figura 3.2.-	Microestructura del material base AISI/SAE 304 en: A.- Dirección transversal al sentido de laminación. B.- Longitudinal. En las micrografías A y B, la matriz clara representa la Austenita y el área oscura representa la Ferrita.	90
Figura 3.3.-	Diagrama de Schaeffler, donde A indica el % de Ferrita del material base ASTM A569, B indica el % de Ferrita del material base AISI/SAE 304, y C el % de Ferrita del material de aporte ER309L.	92
Figura 3.4.-	Curvas de esfuerzo (S) vs deformación (e) para tres pruebas del material base de Acero al Carbono ASTM A569.	94
Figura 3.5.-	Curvas de esfuerzo (S) vs deformación (e) para tres pruebas del material base de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304.	95
Figura 3.6.-	Relación entre $I_m$ vs $W_F$ para soldadura con corriente constante y	96

	pulsada usando un aporte ER309L de diámetro 1,2 mm.	
Figura 3.7.-	Zona paramétrica preliminar según el Criterio de Burnoff para condiciones de $W_F = 6$ m/min.; $I_m = 194,4403$ A; $T_C = 8$ ms.	98
Figura 3.8.-	Relación potencial 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 <sup>3</sup> de material de aporte ER309L.	100
Figura 3.9.-	Oscilograma ( $W_F = 4$ m/min; $I_m = 173,96$ A; $V_m = 30$ V; $K_s = K_d = 15$ ).	101
Figura 3.10.-	Oscilograma ( $W_F = 6$ m/min; $I_m = 220,70$ A; $V_m = 31$ V; $K_s = K_d = 15$ ).	102
Figura 3.11.-	Oscilograma ( $W_F = 8$ m/min; $I_m = 261,15$ A; $V_m = 32$ V; $K_s = K_d = 15$ ).	102
Figura 3.12.-	Oscilograma ( $W_F = 10$ m/min; $I_m = 297,17$ A; $V_m = 33$ V; $K_s = K_d = 15$ ).	103
Figura 3.13.-	Histograma $T_{dm} = 7,996$ ms ( $W_F = 4$ m/min; $I_m = A$ ; $V_m = 30$ V).	104
Figura 3.14.-	Histograma $T_{dm} = 5,050$ ms ( $W_F = 6$ m/min; $I_m = A$ ; $V_m = 32$ V).	104
Figura 3.15.-	Histograma $T_{dm} = 3,082$ ms ( $W_F = 8$ m/min; $I_m = A$ ; $V_m = 32$ V).	105
Figura 3.16.-	Histograma $T_{dm} = 2,000$ ms ( $W_F = 10$ m/min; $I_m = A$ ; $V_m = 33$ V).	105
Figura 3.17.-	Relación entre $I_{dc}$ y $\log(V_{dm})$ .	106
Figura 3.18.-	Relación entre $T_{dm}$ y $V_{dm}$ .	107
Figura 3.19.-	Zona Paramétrica preliminar según el Criterio de Burnoff limitada por la curva de potencia constante y criterio de estabilidad de arco. $W_F = 6$ m/min.; $I_m = 216,5$ A; $T_C = 8$ ms.	109
Figura 3.20.-	Oscilograma E-3 UGP. ( $I_p = 365$ A; $I_b = 112,32$ A; $T_p = 2,6$ ms; $T_b = 5,4$ ms).	111
Figura 3.21.-	Oscilograma E-11 UGP. ( $I_p = 360$ A; $I_b = 105,29$ A; $T_p = 2,8$ ms; $T_b = 5,2$ ms).	112
Figura 3.22.-	Oscilograma E-18 UGP. ( $I_p = 335$ A; $I_b = 100,73$ A; $T_p = 3,2$ ms; $T_b = 4,8$ ms).	112
Figura 3.23.-	Oscilograma E-1 DGP. ( $I_p = 375$ A; $I_b = 86,10$ A; $T_p = 3$ ms; $T_b = 5$ ms).	113
Figura 3.24.-	Oscilograma E-23 DGP. ( $I_p = 355$ A; $I_b = 49,17$ A; $T_p = 3,8$ ms; $T_b = 4,2$ ms).	113
Figura 3.25.-	Oscilograma E-25 TGP. ( $I_p = 305$ A; $I_b = 65,95$ A; $T_p = 4,3$ ms; $T_b = 3,7$ ms).	114
Figura 3.26.-	Oscilograma E-29 TGP. ( $I_p = 305$ A; $I_b = 112,72$ A; $T_p = 3,4$ ms; $T_b = 4,6$ ms).	114
Figura 3.27.-	Cordones depositados sobre chapa plana para las condiciones E-3, E-11 y E-18, evidenciando la ausencia de defectos superficiales; y sus respectivos cortes transversales indicando los perfiles geométricos.	115
Figura 3.28.-	Parámetros que forman la zona de Una Gota por Pulso (UGP) dentro de la zona paramétrica en rojo. $W_F = 6$ m/min; $I_m = 194,44$ A; $T_C = 8$ ms. Los encerrados en círculo son aquellos seleccionados para ensayar. Los puntos verdes y azules indican algunos parámetros que ofrecen dos gotas y tres gotas por pulso, respectivamente.	116
Figura 3.29.-	A.- Limpieza con Removedor del cupón soldado. B.- aplicación del	119

	Penetrante sobre el cupón soldado. C.- Aplicación del Revelador sobre el cupón soldado. (Lado del refuerzo de Cara).	
Figura 3.30.-	Radiografía del cupón soldado observada en la pantalla fluoroscópica.	119
Figura 3.31.-	Radiografía del cupón soldado.	120
Figura 3.32.-	Evaluación micrográfica en distintas zonas del cordón de soldadura, indicando la fase ferrita (zona oscura) en la matriz austenítica de la junta soldada con transferencia metálica por arco pulsado usando Argón con 2 % de Oxígeno como gas de protección.	121
Figura 3.33.-	Macrografía de la junta disímil AISI/SAE 304 y ASTM A569 soldado con un electrodo ER309L.	122
Figura 3.34.-	Diagrama de Schaeffler indicando el porcentaje (%) de ferrita del cordón de soldadura.	124
Figura 3.35.-	Gráfico de distribución de medidas de microdureza: En rojo barrido superior, en azul barrido inferior. (Los puntos resaltados pertenecen a la zona del cordón de soldadura)	126
Figura 3.36.-	Probetas luego del ensayo de tracción de unión disímil de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y Acero al Carbono ASTM A569 soldadas con un electrodo ER309L.	127
Figura 3.37.-	Curvas de Tracción. Esfuerzo vs. Deformación para dos probetas de unión disímil de los material base de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y ASTM A569 soldadas con un electrodo ER309L.	128
Figura 3.38.-	Ensayo de doblez de cuatro probetas de unión disímil de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y ASTM A569, soldadas con un electrodo ER309L (vista superior).	129
Figura 3.39.-	Conjunto de probetas de uniones disímiles de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y ASTM A569, soldadas con un electrodo ER309L (vista lateral).	130
Figura 3.40.-	Registro de Calificación de de Procedimiento completado (RCP) Hoja 1/2.	131
Figura 3.41.-	Registro de Calificación de de Procedimiento completado (RCP) Hoja 2/2.	132
Figura 4.1.-	Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica y por el Criterio de Estabilidad del Arco, Parámetros que forman la zona de Una Gota por Pulso (UGP) dentro de la zona paramétrica en rojo. Los puntos verdes y azules indican parámetros que ofrecen dos y tres gotas por pulso, respectivamente.	140
Figura 4.2.-	Probetas de tracción ensayadas de la unión disímil de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y Acero al Carbono ASTM A569, mostrando la fractura dúctil en el lado del Acero al Carbono típico de este tipo de material.	148
Figura 4.3.-	Montaje adecuado para ensayo de doblez guiado para uniones de materiales disímiles y/o con resistencias diferentes. Según Código ASME, Sección IX.	149
Figura 8.1.-	Reporte de resultados de análisis químicos. Hoja 1/2.	162
Figura 8.2.-	Reporte de resultados de análisis químicos. Hoja 2/2.	163
Figura 8.3.-	Certificado de Declaración de Conformidad para el Gas de Protección	164

AGAMIX 12 realizado por el fabricante.  
 Figura 8.4.- Curvas de Exposición para Aceros, utilizada para determinar los 165 parámetros radiográficos.

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabla 1.1.- Tipos de Aceros al Carbono.	4
Tabla 1.2.- Clasificación de los Aceros Inoxidables según AISI/SAE.	8
Tabla 1.3.- Relaciones de Cromo/Níquel equivalentes para Aceros Inoxidables Austeníticos.	12
Tabla 1.4.- Porcentajes de Dilución en Uniones Soldadas. Depende principalmente del proceso empleado.	19
Tabla 1.5.- Algunos porcentajes de dilución dependiendo del proceso y de su protección gaseosa.	20
Tabla 1.6.- Metales de Aporte para Aceros Inoxidables Austeníticos.	24
Tabla 1.7.- Gases y Mezclas de gases Protectores para la Soldadura GMAW.	26
Tabla 1.8.- Variables en el Proceso de Soldadura.	27
Tabla 2.1.- Parámetros fijos de las pruebas de Soldadura GMAW-P de cordones depositados sobre chapas planas de materiales base.	67
Tabla 3.1.- Composición Química del Material Base ASTM A569 (% en peso).	87
Tabla 3.2.- Composición Química del Material Base AISI/SAE 304 (% en peso).	87
Tabla 3.3.- Composición Química del Material de Aporte ER309L (% en peso).	87
Tabla 3.4.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base (Método Metalográfico).	91
Tabla 3.5.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base y Material de Aporte según el Método Químico.	92
Tabla 3.6.- Valores de Dureza Rockwell B (HRB) de los Materiales Base.	93
Tabla 3.7.- Resultados de los Ensayos de Tracción realizados a los Materiales Base AISI/SAE 304 y ASTM A569.	93
Tabla 3.8.- Datos de la grafica que representa el criterio de Burnoff para el material de aporte ER309L.	96
Tabla 3.9.- Parámetros (Ip - Tp) que ofrecen una gota por pulso para $W_F = 6,0$ m/min.	99
Tabla 3.10.- Parámetros de soldadura con corriente constante y transferencia tipo spray para la determinación de Kv.	101
Tabla 3.11.- Datos recolectados de los Oscilogramas e Histogramas para cada prueba.	106
Tabla 3.12.- Ensayos realizados dentro de la zona paramétrica para $W_F = 6$ m/min, $I_m = 144,44$ A; $T_C = 8$ ms. En rojo se muestran los ensayos que resultaron ser una gota por pulso (UGP), además se muestran los que resultaron ser de dos y tres gotas por pulso (DGP y TGP).	110
Tabla 3.13.- Parámetros fijados para la elaboración de la junta mediante el proceso GMAW-P.	117
Tabla 3.14.- Valores de Calor Aportado y Calor Absorbido.	117
Tabla 3.15.- Análisis Químico realizado al Cordón de Soldadura.	120
Tabla 3.16.- Parámetros geométricos (promedio) del Cordón de Soldadura del cupón de prueba.	122
Tabla 3.17.- Valores de porcentaje de ferrita en el cordón de soldadura obtenidos con	123

	el analizador de imagen Digital MicroGraph versión 3.4.2.	
Tabla 3.18.-	Contenido de Ferrita en el Cordón de Soldadura de acuerdo al método Químico.	123
Tabla 3.19.-	Contenido de Ferrita (%) dentro del cordón de soldadura utilizando diferentes métodos: Metalográfico y Químico.	124
Tabla 3.20.-	Valores de Microdureza Vickers ( $HV_{100}$ ) realizado en los barridos superior (perfil 1) e inferior (perfil 2) sobre la junta soldada.	125
Tabla 3.21.-	Valores de esfuerzo obtenidos de los ensayos de tracción de junta disímil de un Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y Acero al Carbono ASTM A569 soldadas con un electrodo ER309L.	128
Tabla 4.1.-	Porcentaje de (%) Ferrita en los Materiales Base (ASTM A569 y AISI/SAE 304) y Aporte de acuerdo al método Metalográfico y Químico.	136
Tabla 4.2.-	Resultados del ensayo de dureza de los materiales base y valores según sus normas respectivas.	136
Tabla 4.3.-	Resumen de las propiedades mecánicas de los materiales base, según los resultados de los ensayos realizados y normas respectivas.	137
Tabla 4.4.-	Resumen de la caracterización geométrica de los cordones depositados sobre chapa plana.	141
Tabla 4.5.-	Resultados de los Análisis Químicos en los Materiales base, Aporte y Cordón de Soldadura.	143
Tabla 4.6.-	Resultados promedios del ensayo de Microdureza representada por zonas de la Unión Disímil soldada con un electrodo ER309L.	146
Tabla 4.7.-	Resultados del Ensayo de Tracción de la Unión Disímil soldada con un electrodo ER309L.	147

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen miles de metales diferentes que sirven como materiales de construcción, los diseñadores pueden escoger el metal que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades particulares. Estos materiales difieren no solo de su composición sino también en la forma como han sido manufacturados, lo que los hace más o menos soldables, creándose la necesidad de evaluar a fondo las formas disponibles para su soldadura.

La unión de aceros disímiles mediante procesos de soldadura por arco eléctrico se hace necesaria por lo complejo de algunos equipos y máquinas (como calderas, turbinas, intercambiadores de calor, etc.) requeridos en la industria y es cada vez más frecuente las aplicaciones de este tipo de uniones. Las uniones más usuales se realizan entre aceros de baja aleación o no aleados, y aceros de alta aleación (por ejemplo los aceros inoxidable austeníticos). Lo anterior requiere que se elijan cuidadosamente los procesos, los metales de aporte y los métodos de aplicación de las soldaduras para que ésta quede lo más cercana posible a la naturaleza de los aceros a unir. Uno de los métodos que se emplea para lograr resultados adecuados en este tipo de uniones, es la utilización de diagramas como el de Schaeffler y otros. Esto lleva a la necesidad de investigar y ensayar cuidadosamente con el fin de descubrir las mejores condiciones bajo las cuales se deben efectuar dichas uniones. Este diagrama fue obtenido por Al Schaeffler de manera empírica y permite predecir la estructura de un cordón de soldadura en la unión de aceros inoxidable disímiles, o de aceros inoxidable con aceros al carbono, con o sin aleación, conociendo la composición química y partiendo del níquel y cromo equivalente tanto de los materiales base como de los materiales de aporte.

Adicionalmente, el diagrama indica posibles problemas que presentan determinadas estructuras, dependiendo de su ubicación en el diagrama y que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura. Este trabajo de investigación fue realizado, 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

disímil del Acero de Bajo Carbono ASTM A569 y el Acero Inoxidable AISI/SAE 304, de espesores 4 mm, usando como material de aporte un electrodo ER309L, 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).

# **FUNDAMENTO TEÓRICO**

## **CAPÍTULO I**



## **1.- FUNDAMENTO TEORICO**

### **1.1.- Clasificación de los Aceros**

Según la ASM<sup>(1)</sup>, los aceros constituyen la categoría más ampliamente utilizada de materiales metálicos, principalmente porque pueden ser relativamente fabricados a bajo costo y en grandes cantidades a especificaciones muy precisas. Sino que también proporcionan una amplia gama de propiedades mecánicas, resistencia de los niveles de rendimiento moderado, con excelente ductilidad para producir límites elásticos superiores a 1400 MPa (200 Ksi).

Los aceros se pueden clasificar por una variedad de sistemas diferentes en función de:

- La composición, tales como al carbono, de baja aleación o aceros inoxidables.
- Métodos de fabricación, el proceso básico de oxígeno, o métodos de horno eléctrico.
- Acabado de los métodos de fabricación, tales como la laminación en caliente o en frío.
- La forma del producto, tales como barras, placas, hojas, tiras, tubos, estructurales o de forma.
- La microestructura, como ferríticos, martensíticos y perlíticos.
- El nivel de esfuerzo necesario, tal como se especifica en las normas ASTM.
- El tratamiento térmico, tales como recocidos, temple y revenido y procesos termomecánicos.
- Descripciones de calidad, tales como calidad de forja y calidad comercial.

En la figura 1, se observa la esquematización de la clasificación de los aceros según la microestructura<sup>(1)</sup>.

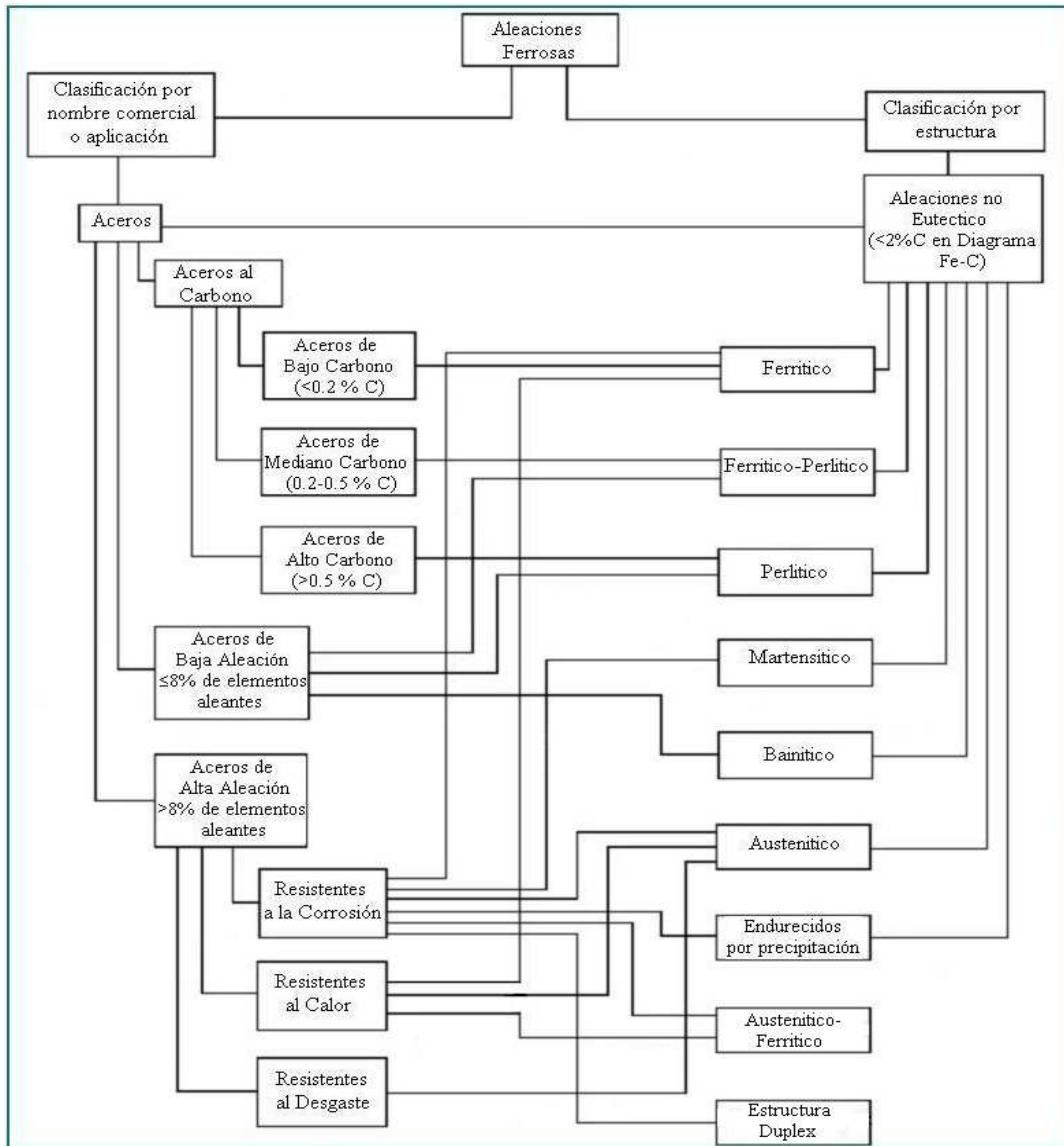


Figura 1.1.- Clasificación de los Aceros.

### 1.2.- Aceros al Carbono y su Clasificación

Los aceros al carbono son los más comúnmente utilizados, contienen principalmente hierro con unas pequeñas adiciones de carbono, manganeso fósforo, azufre y silicio. La cantidad de carbono presente tiene un gran efecto sobre las

propiedades del metal. La tabla 1, muestra algunos ejemplos de estos aceros y sus características.

Los aceros al carbono son aquellos en los cuales el carbono es el elemento de aleación que controla en forma esencial las propiedades de las aleaciones y en los cuales la cantidad de manganeso no puede exceder de 1,65% y los elementos de cobre y silicio deben ser cada uno menores a 0,60%. Los aceros al carbono pueden subdividirse en los que contienen entre 0,08% y 0,35% de carbono, los que contienen entre 0,35% y 0,50% de carbono y los que contienen mas de 0,50% de carbono. Estos se conocen respectivamente como aceros de bajo carbono, aceros de medio carbono y aceros de alto carbono<sup>(2)</sup>. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

Tabla 1.1.- Tipos de Aceros al Carbono.

<b>Nombre Común</b>	<b>% C</b>	<b>Usos</b>	<b>Soldabilidad</b>
Acero de Bajo Carbono	0,15% máximo	Electrodos para soldadura, laminas y chapas.	Excelente
Acero suave (mild steel)	0,15% - 0,30%	Perfiles y barras estructurales laminadas.	Buena
Acero de Medio Carbono	0,30% - 0,60%	Partes de maquinarias.	Poca (Precalentar y postcalentar)
Acero de Alto Carbono	0,60% - 1,00%	Resortes, troqueles, rieles de ferrocarril.	Poca (Difícil soldar sino se precalienta y postcalienta adecuadamente)

### 1.3.- Propiedades de los Aceros al Carbono

De acuerdo con las propiedades mecánicas, se establecen una serie de grupos de aceros ordenados por su resistencia a la tracción. Conocidos estos aceros como:

#### **Acero de Bajo Carbono, suave, de Medio Carbono y Acero de Alto Carbono**

- **Acero de Bajo Carbono:** El porcentaje de carbono en este acero es de 0,15%, tiene una resistencia mecánica de 38-48 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 110-135HB y prácticamente no adquiere temple. Es un acero fácilmente soldable y deformable. Aplicaciones: Elementos de maquinaria de gran tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes, etc.
- **Acero suave:** El porcentaje de carbono esta entre 0,15 - 0,30%, tiene una resistencia mecánica de 48-55 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 135-160HB. Se puede soldar con una técnica adecuada. Aplicaciones: Piezas de resistencia media de buena tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes, etc.
- **Acero de Medio Carbono:** El porcentaje de carbono es de 0,30 – 0,60%. Tiene una resistencia mecánica de 55-70 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de hasta 200HB. Se temple bien, alcanzando una resistencia de 80 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 215-245HB. Aplicaciones: Ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, herrajes, cilindros de motores de explosión, transmisiones, etc.
- **Acero de Alto Carbono:** El porcentaje de carbono es de 0,45%. Tiene una resistencia mecánica de 62-75kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de hasta 220HB. Se temple bien, alcanzando una resistencia de 90 kg/mm<sup>2</sup>, aunque hay que tener en cuenta las deformaciones. Aplicaciones: Ejes, transmisiones, tensores y piezas regularmente cargadas y de espesores no muy elevados

#### **1.4.- Acero al Carbono ASTM A569**

Específicamente los aceros que se encuentran en la clasificación ASTM A569 son provenientes de láminas o tiras laminadas en caliente, que se encuentran comercialmente disponibles en las designaciones de “aceros comerciales” CS tipos A, B y C, y los “aceros para formado” denominados DS y de tipos A, B y C, tienen grado SAE 1006, 1008, 1010<sup>(4)</sup>. Esta especificación estándar fue recientemente sustituida por la ASTM A1011 la cual además incluye aceros de baja aleación y alta resistencia mejorados en la formabilidad del material<sup>(5)</sup>. Las aplicaciones típicas son: partes para automóviles, fabricación de rieles de ferrocarril, tubos de acero para conducción de fluidos, andamiaje y herrería, elaboración de tanques y contenedores y una de sus principales aplicaciones, es servir como base para la fabricación de mallas de metal expandido.

#### **1.5.- Soldabilidad de los Aceros de Bajo Carbono**

Según ASM<sup>(6)</sup>, los aceros de bajo contenido de carbono se utilizan principalmente en aplicaciones estructurales. Los aceros con menos de 0,15% C puede endurecer de 30 a 40 HRC. Aceros al carbono que contiene menos de 0,30% C y 0,05% S pueden soldarse fácilmente por la mayoría de los métodos con poca necesidad especial de medidas, para prevenir grietas en la soldadura. La soldadura de las secciones que son más de 25 mm (1 pulgadas) de espesor, especialmente si el contenido de carbono del metal supera el 0,22%, podrá exigir que el acero sea precalentado a unos 525 a 675 ° C (100 a 1250 ° F).

En aceros de bajo carbono, se recomienda un aporte de baja aleación, para cumplir con requerimientos de propiedades mecánicas. El procedimiento general es para que coincida el metal de aporte con el metal base en términos de fuerza o para metales base disímiles.

A menudo, sin embargo, altos esfuerzos de metal soldado, puede llegar a exigir una suave HAZ a someterse a una gran cantidad de tensión relativa, cuando el conjunto se somete a temperatura ambiente cerca de la deformación.

Sin embargo, un metal de aporte de bajo esfuerzo, no debe ser utilizado indiscriminadamente como un remedio para problemas de grietas.

### **1.6.- Aceros Inoxidables y su Clasificación**

Se define al acero inoxidable como, aleaciones ferrosas (base hierro) complejas en las que intervienen un conjunto importante de elementos químicos, donde el principal es el Cromo, cuyo contenido debe ser mayor al 12% en peso. Este constituyente garantiza que se forme en la superficie una capa pasiva extremadamente fina y estable de óxido de cromo, confiriéndole resistencia al ataque de sustancias químicas y a la oxidación<sup>(7)</sup>.

Los aceros inoxidables se pueden clasificar de acuerdo a su microestructura, esta depende de la influencia de los elementos aleantes, particularmente el Cromo y el Níquel y del tratamiento térmico al cual es sometido el acero. Cualquier otro elemento de aleación que pueda ser añadido, le confiere ciertas propiedades que se asemejan a las ejercidas por el Cromo o por el Níquel en su influencia metalúrgica sobre la microestructura y el tipo de acero inoxidable. Según el manual de la ASM<sup>(7)</sup>, los aceros inoxidables de acuerdo a su microestructura se pueden clasificar en tres tipos comunes y cuatro tipos especiales:

- **Martensíticos**
- **Ferríticos**
- **Austeníticos**
- **Cuatro tipos especiales:**
  - ✓ Endurecidos por Precipitación
  - ✓ Superausteníticos
  - ✓ Superferríticos
  - ✓ Ferrítico-Austeníticos (Dúplex y Súper dúplex)

El Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI)<sup>(9)</sup>, clasifica y simboliza los aceros inoxidable la cual se compone de tres cifras, seguidas de una o varias letras, como se muestra en la tabla 1.2, son sus respectivos elementos químicos de importancia como el Cromo y Níquel.

Tabla 1.2.- Clasificación de los Aceros Inoxidable según AISI/SAE.

<b>Clasificación AISI/SAE</b>	<b>Elementos Principal</b>	<b>Grupo Metalúrgico</b>
2XX	Cromo – Níquel - Manganeso	Austenítico
3XX	Cromo - Níquel	Austenítico
4XX	Cromo	Martensítico
4XX	Cromo	Ferrítico

### 1.7.- Aceros Inoxidable Austeníticos.

Los aceros inoxidable Austeníticos, son aleaciones ferrosas, cuyos principales aleantes son: Cromo (11-26) % y Níquel (7-35) %, éste es el grupo de los aceros inoxidable más importante y de mayor campo de aplicación<sup>(10)</sup>. A temperatura ambiente presentan una microestructura austenítica, estabilizada por varios elementos de aleación gamágenos tales como (Ni, Mn, C y N), pero en muchos casos estos aceros contienen algo de ferrita por la presencia de elementos alfégenos como (Cr, Mo y Si), donde la microestructura sería austenítica/ferrítica.

Estos aceros austeníticos son ampliamente utilizados en aplicaciones especiales de resistencia a la corrosión, a temperaturas extremas (calor y/o frío); y al desgaste. En dichos casos el principal papel del Carbono es garantizar la resistencia mecánica y la resistente al desgaste, este grupo de aceros inoxidable ofrece como características principales, una estructura austenítica, no son templables, no ofrecen respuesta magnética, presentan una buena ductilidad y son fácilmente soldables. Estas dos últimas cualidades se presentan más atribuidas cuanto menor es el contenido en carbono.

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<sup>2</sup>, alargamiento del 40%, la resiliencia y el alargamiento son elevados<sup>(11)</sup>. Los más usuales son los AISI/SAE 304, 308, 316, 319 y 310, y los aceros de calidad “L” se caracterizan por su bajo contenido de carbono<sup>(10)</sup>.

### **1.8.- Propiedades de los Aceros Inoxidables Austeníticos**

Los Aceros Inoxidables Austeníticos pueden ser clasificados dependiendo del tipo de aplicación y por sus propiedades como se muestra a continuación:

#### **1.8.1.- Resistentes a la Corrosión**

En los Aceros Inoxidables, 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 llama capa pasivante. Es una capa de óxido que no se desprende y protege al acero de la oxidación y la genera la propia aleación. Cuando esta capa se rompe solo 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 tenía la película. Los Aceros Inoxidables Austeníticos Fe-Cr-Ni de la serie 300, donde el cromo es utilizado en tenores mínimo de 16% para garantizar la resistencia a la corrosión y el níquel es utilizado en tenores mínimo de 6% para estabilizar la estructura austenítica. El Carbono varía para los casos estándares, grado H (Alto Carbono mayor a 0.08% C) y grado L (Bajo Carbono menor a 0.03% C). La resistencia a la corrosión, se obtiene estabilizando el acero con Cr, Nb y Ti ó reduciendo el contenido de Carbono. Para obtener la resistencia óptima a la corrosión las aleaciones austeníticas deben ser calentadas a 1050 – 1100 °C y enfriadas rápidamente en agua o chorros. Para aleaciones que contienen Molibdeno mayor a 4% (316L, 316, 317), mejora la resistencia a la corrosión por picaduras, por



hendiduras y a la fisuración por corrosión bajo tensión, mientras que el Níquel aumenta la resistencia a la corrosión bajo tensiones, particularmente en medios clorhídricos.

### **1.8.2.- Propiedades Mecánicas de los Aceros Inoxidables Austeníticos**

Como lo señala la ASM<sup>(12)</sup>, dependiendo de las aplicaciones a que se destinan, los Aceros Inoxidables Austeníticos pueden presentar una variada composición química. Además, algunas aleaciones no son totalmente austeníticas, por lo tanto sus propiedades varían mucho. 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, es decir; solo endurecen por deformación.

Los aceros inoxidables austeníticos, presentan una estructura austenítica, no son magnéticos ni templables. No presentan envejecimiento en la zona afectada por el calor (ZAC), ni ocurre crecimiento de grano, presentan excelente resistencia a la corrosión y poseen una buena tenacidad y ductilidad; así mismo presentan endurecimiento por deformación en frío o en caliente, y excelente soldabilidad, estas características hacen que en soldadura, materiales de aporte austeníticos sean frecuentemente usados en combinaciones disímiles con aceros al carbono, aceros inoxidables ferríticos y aceros inoxidables martensíticos. Pero si el procedimiento de soldadura es inadecuado, puede producir problemas tanto en el material base como en metal de soldadura (cordón) ya que las propiedades específicas de estos aceros pueden ser deterioradas por la soldadura.

### **1.9.- Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304**

El acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304<sup>(10)</sup>, 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 1.2 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.

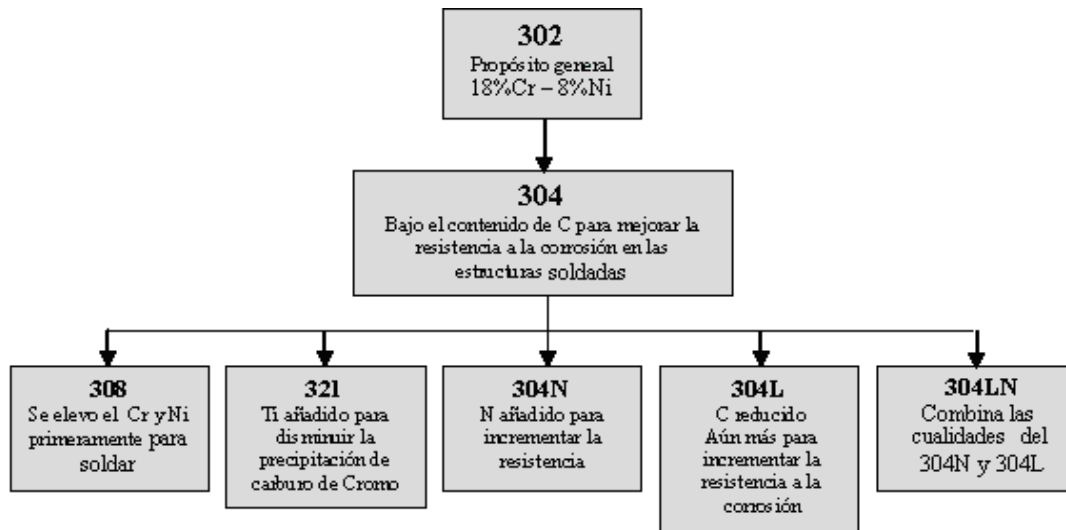


Figura 1.2.- Desarrollo del Acero Inoxidable AISI/SAE 304.

### 1.10.- Soldabilidad de los Aceros Inoxidables

La soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos, es excelente al igual que sus propiedades físicas, estos no presentan ninguna transformación de fase desde la temperatura de fusión hasta la temperatura ambiente, e incluso, en la mayoría de los casos, hasta muy bajas temperaturas (-200°C). Es de notar la diferencia en soldabilidad que presentan los aceros inoxidables austeníticos frente a los ferríticos, martensíticos y duplex. Una diferencia se tiene como la conductividad térmica, en los aceros 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. El pozo de soldadura de los aceros inoxidables austeníticos es más viscoso que el de los aceros inoxidables ferríticos, martensíticos, lo cual reduce el riesgo por falta de fusión. Para conseguir una aceptable soldabilidad, el metal aportado y zonas adyacentes deben presentar

propiedades lo mas semejantes posible a las del material base o materiales bases para el caso de soldaduras disímiles, tanto desde el punto de vista mecánico, como de resistencia a la corrosión, factor de este último que constituye una de las razones fundamentales por la cual se seleccionan estos materiales<sup>(12)</sup>.

La unión de estos aceros inoxidable austeníticos puede ser realizada sin ningún problema por varios métodos, siendo los más usados 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).

### 1.11.- Estimación del Contenido de Ferrita

Durante aproximadamente 50 años un grupo de investigadores como; Schaeffler, DeLong, Kotecki entre otros, han manifestado que una cierta cantidad de ferrita en el metal de soldadura de aceros inoxidable totalmente austeníticos proporciona un considerable grado de seguridad para que el cordón esté libre de grietas en caliente y de microfisuras. La determinación del contenido de ferrita en un acero inoxidable puede llevarse a cabo por métodos químicos (diagrama de Schaeffler, DeLong y WRC), magnéticos y metalográficos. La tabla 1.3, muestra de manera cronológica a algunos investigadores con sus modelos empíricos.

Tabla 1.3.- Relaciones de Cromo/Níquel equivalentes para Aceros Inoxidables Austeníticos.

Autor	Año	RELACIONES EMPÍRICAS
		Cromo Equivalente ( $Cr_{eq}$ ) y Níquel Equivalente ( $Ni_{eq}$ )
Schaeffler	1949	$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$ $Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$
DeLong	1956	$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb$ $Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$
Hull	1973	$Cr_{eq} = \%Cr + 1.21\%Mo + 0.48\%Si + 0.14\%Nb + 2.27\%V + 0.72\%W$ $+ 2.2\%Ti + 0.21\%Ta + 2.48\%Al$

		$\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 24.5\% \text{C} + 0.11\% \text{Mn} - 0.0086\% \text{Mn}^2 + 14.2\% \text{N} + 0.41\% \text{CO} + 0.44\% \text{Cu}$
Hammer y Svenson	1979	$\text{Cr}_{\text{eq}} = \% \text{Cr} + 1.37\% \text{Mo} + 1.5\% \text{Si} + 2\% \text{Nb} + 3\% \text{Ti}$ $\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 0.31\% \text{Mn} + 22\% \text{C} + 14.2\% \text{N} + \% \text{Cu}$
Espy	1982	$\text{Cr}_{\text{eq}} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5\% \text{Si} + 0.5\% \text{Nb} + 5\% \text{V} + 3\% \text{Al}$ $\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 30\% \text{C} + 0.87\% \text{Mn} + 0.33\% \text{Cu} + \text{A}(\% \text{N} - 0.045)$ donde A = 30 si $\% \text{N} < 0.2$ ; A = 22 si $0.21 \leq \% \text{N} \leq 0.25$ y A = 20 si $0.26 \leq \% \text{N} \leq 0.35$
McCowan, Siewert y Olson (WRC- 1998)	1988	$\text{Cr}_{\text{eq}} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 0.7\% \text{Nb}$ $\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 35\% \text{C} + 20\% \text{N}$
Kotecki y Siewert (WRC – 1992)	1992	$\text{Cr}_{\text{eq}} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 0.7\% \text{Nb}$ $\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 35\% \text{C} + 20\% \text{N} + 0.25\% \text{Cu}$

### 1.11.1.- Diagrama de Schaeffler

De estos investigadores, el primero, y de gran importancia es Al Schaeffler<sup>(13)</sup>, el cual publicó en 1949, su diagrama donde se pueden predecir las microestructuras o fases presentes y el contenido de ferrita (en términos de porcentaje de ferrita) tanto para el metal base, metal de aporte y del cordón de soldadura de los aceros inoxidable y materiales disímiles. Así mismo el diagrama indica que es imprescindible disponer de un porcentaje adecuado de ferrita en el metal de soldadura (situado entre 0 y 18%) para reducir al mínimo los problemas de figuración en caliente. Schaeffler<sup>(13)</sup> determinó el porcentaje de ferrita, utilizando los modelos empíricos, el cual tiene una precisión de más o menos 4% de ferrita. El diagrama de Schaeffler no considera los efectos del nitrógeno en la formación de austenita, y es incorrecto en el tratamiento de manganeso. El manganeso no promueve la formación de austenita a altas temperaturas como predice el diagrama, aunque estabiliza a la

austenita en su transformación a baja temperatura.

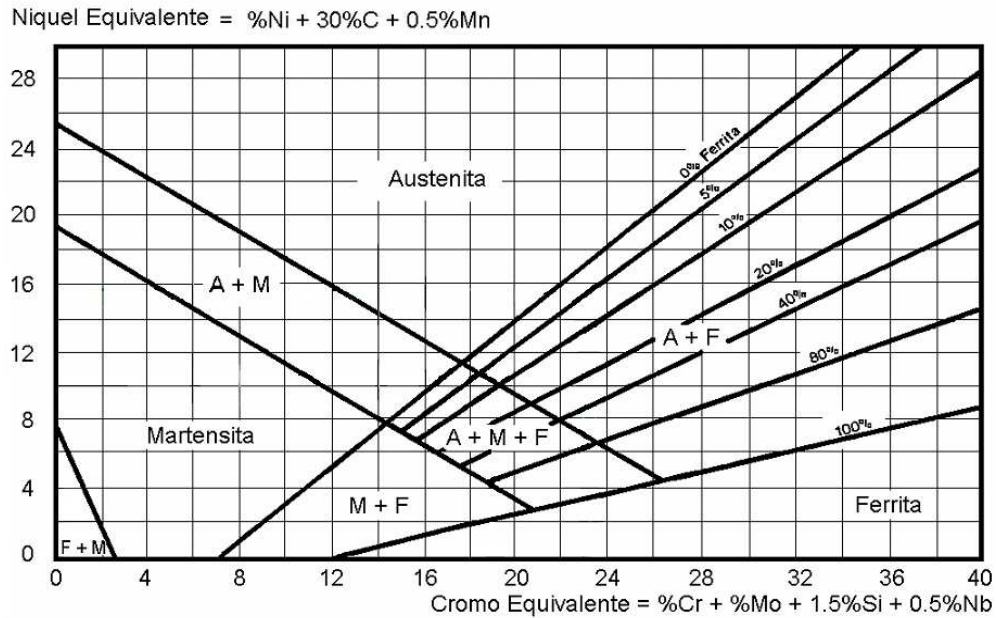


Figura 1.3.- Diagrama de Schaeffler, para evaluar el porcentaje de ferrita.

### 1.11.2.- Diagrama de DeLong

El diagrama de DeLong<sup>(14)</sup> publicado en 1974, modifica el diagrama de Schaeffler, introduce un coeficiente para el Nitrógeno en la escala del Níquel Equivalente ( $Ni_{eq}$ ) y determina su influencia sobre el contenido de ferrita. El Nitrógeno constituye un elemento altamente austenizante, está presente en determinados aceros inoxidables y puede ser absorbido durante la soldadura si la protección gaseosa es inadecuada. DeLong<sup>(14)</sup> establece una escala de ferrita llamada FN, que es la utilizada para designar el contenido de ferrita en la soldadura, y que oscila entre 0 y 18 FN, con una precisión de más o menos 3 FN. Sin embargo, estos dos valores difieren sustancialmente cuando se presentan grandes cantidades de ferrita en los aceros inoxidables. Los diagramas de Schaeffler y DeLong determinan

el contenido de ferrita del metal depositado basándose en la composición química del metal base y del aporte, no consideran la energía térmica aportada por el proceso de soldadura y por lo tanto su influencia sobre la velocidad de enfriamiento y solidificación, que también juega un papel importante en la cantidad de ferrita delta presente. Sin embargo en otras investigaciones, Olson<sup>(15)</sup> ha encontrado una sobreestimación en el FN en aceros de alto contenido de aleación, tal como el AISI 309 y en juntas de metales disímiles.

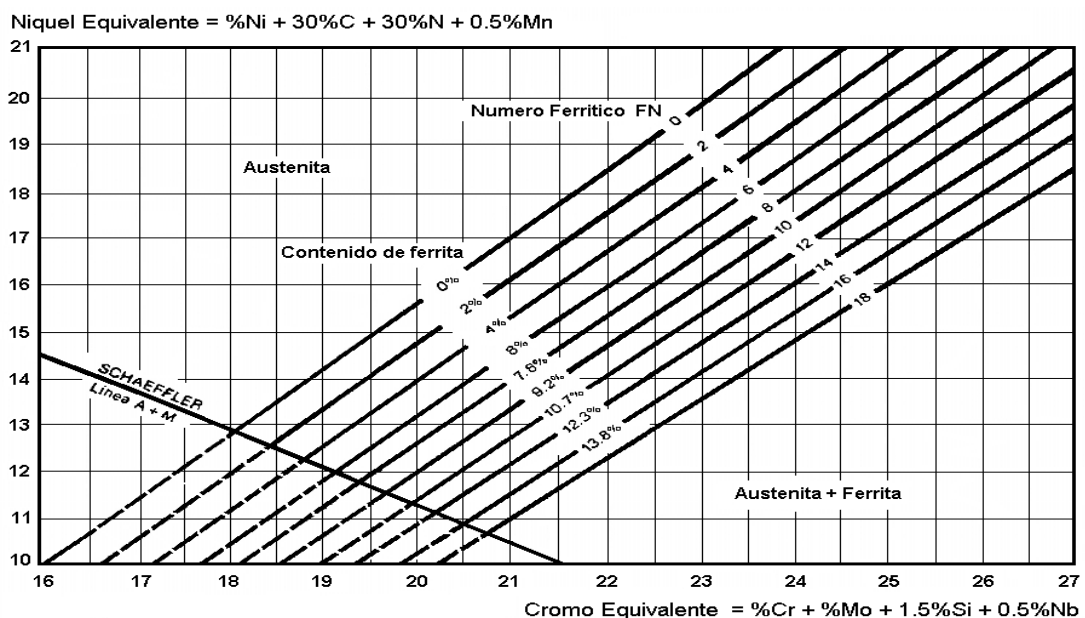


Figura 1.4.- Diagrama de DeLong, empleado para evaluar (%Ferrita) y (NF).

### 1.11.3.- Diagrama WRC – 92

Estudios realizados por Siewert<sup>(15)</sup> y Kotecki<sup>(16)</sup>, en aceros inoxidable con límite superior de ferrita, tales como los aceros inoxidable dúplex, el cual, desarrollaron en el Welding Research Council WRC el diagrama WRC-92 que se indica en la figura 1.5. Este diagrama prevé un valor de FN con más precisión para aceros que contienen Cobre, en cantidades significativas (2% en peso), cuya

influencia sobre la ferrita es reportada por este diagrama e incluido en la escala del Níquel Equivalente; Por otra parte, ofrece una zona más limitada del Cromo Equivalente (17-31%) y del Níquel Equivalente (9-17%). La extensión de los ejes del diagrama WRC mejora la previsión del FN en depósitos de soldadura y aleaciones con bajo nivel de cromo y níquel equivalentes, en junta disímil y revestimientos. El diagrama WRC-92 predice un FN más bajo y preciso que el diagrama de DeLong.

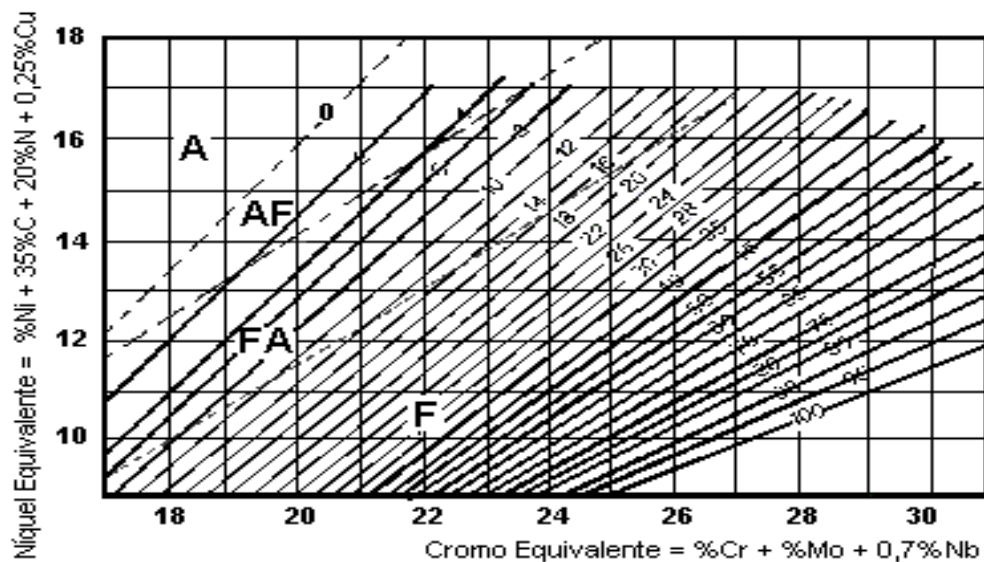


Figura 1.5.- Diagrama WRC – 92.

### 1.12.- Soldadura Heterogenia o Disímil

En la actualidad existen miles de metales diferentes que sirven como materiales de construcción; los diseñadores pueden escoger el metal que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades particulares. Estos materiales difieren no solo en su composición sino también en la forma como han sido manufacturados; lo que los hace más o menos soldables creándose, la necesidad de evaluar a fondo las formas disponibles para su soldadura.

En la fabricación de equipos y máquinas destinados a la transformación de energía, es cada vez mas frecuente las aplicaciones de soldaduras en aceros disímiles.

Esto lleva a que se tenga que investigar y ensayar cuidadosamente con el fin de descubrir las mejores condiciones bajo las cuales se deban efectuar dichas uniones.

Además de las recomendaciones que se encuentran en los catálogos de fabricantes de metal de aporte, que son muy funcionales cuando las soldaduras son entre materiales similares, es necesario hacer un mejor análisis cuando de materiales disímiles se trata y en especial de aceros inoxidable. Para los aceros, de este análisis parte del estudio e interpretación del diagrama de Schaeffler<sup>(13)</sup>, con el cual, partiendo del níquel y cromo equivalente del material base o de los materiales base y del material de aporte, es posible predecir la estructura del metal de soldadura depositado en una unión de aceros inoxidable disímiles, o de aceros inoxidable con aceros al carbono, con o sin aleación<sup>(18), (19)</sup>.

Es de notar que para saber la composición química de un metal de aporte depositado, y de la composición química de los materiales base, es necesario acudir a las normas o códigos que los clasifican (Ejemplo: SAE, AISI, ASTM, ASME, AWS, etc.).

### **1.12.1.- Selección del Metal de Aporte para Uniones entre Aceros Inoxidable y entre Aceros al Carbono y Aceros Inoxidable**

Como una ley fundamental, el metal de aporte para una soldadura debe ser igual o de mayor aleación al metal base o a los metales base. Así, aceros al carbono pueden ser soldados con un metal de aporte inoxidable como por ejemplo tipo 316, mientras que, un acero inoxidable no puede ser soldable con un metal de aporte de acero al carbono como el tipo E60XX. Por lo anterior, veremos que para la soldadura entre un acero al carbono aleado o no aleado, y un acero inoxidable, se seleccionará siempre un metal de aporte cuyo depósito es un acero inoxidable<sup>(17)</sup>.

### **1.12.2.- Predicción del Contenido de Ferrita en Soldadura Disímil**

El diagrama de Schaeffler, se usa principalmente para predecir la estructura del metal de soldadura obtenido en la unión de aceros inoxidable disímiles, o de



aceros inoxidables con aceros al carbono, con o sin aleación. Este diagrama fue obtenido por Al Schaeffler de manera empírica y permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición.

Este diagrama es válido únicamente cuando los elementos se encuentran en proporciones no mayores a: C máx 0,2%, Mn máx 1,0%, Si máx 1,0%, Mo máx 3,0%, Nb máx 1,5%. Adicionalmente se indican problemas que presentan determinadas estructuras al soldar, dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura<sup>(18), (19)</sup>.

Para su empleo se parte del cromo y níquel equivalente del metal base y del metal de aporte. Estos se calculan a partir de las ecuaciones dadas a continuación, para luego graficarlas en el diagrama de Schaeffler.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb \quad [1]$$

$$Ni_{equ} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn \quad [2]$$

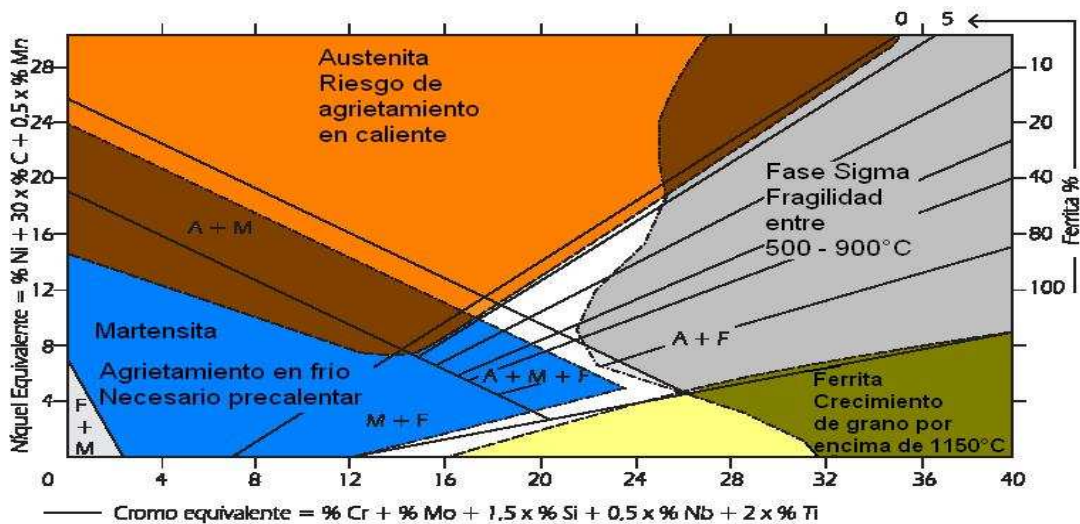


Figura 1.6.- Diagrama de Schaeffler, mostrando las zonas para evitar problemas al seleccionar adecuadamente el metal de aporte.

Cuando se trata de unir materiales de la misma composición química, el punto correspondiente al metal depositado se encontrará entre la recta trazada por los puntos correspondientes al metal base y al metal de aporte. Su ubicación específica, dependerá del grado de dilución con que se trabaje.

En el proceso de arco manual (SMAW) el valor típico es de 30%. La tabla 1.4, muestra algunos porcentajes de dilución por proceso de soldadura, obtenidos experimentalmente<sup>(17)</sup>. Cabe acotar que los porcentajes de dilución varían con el amperaje utilizado, pero los promedios tabulados están dentro del rango de amperaje recomendado para cada aplicación.

Tabla 1.4.- Porcentajes de dilución en uniones soldadas. Depende principalmente del proceso empleado.

<b>PROCESO</b>	<b>DILUCIÓN</b>
SMAW	20 – 30 %
SAW	25 –50 %
MIG - Corto Circuito	15 – 30 %
MIG – Spray	25 – 50 %
TIG – Con Aporte	20 – 40 %
TIG – Sin Aporte	100 %

En el caso de materiales disímiles se grafican los puntos correspondientes al cromo y al níquel equivalente de ambos materiales base. Se obtiene el punto medio de la recta trazado entre ambos puntos (siempre y cuando los materiales participen en la misma proporción). Después se une este punto con el punto correspondiente al material de aporte. La composición del material depositado se encontrará dentro de esta recta y dependerá del porcentaje de dilución.

Tabla 1.5.- Algunos porcentajes de dilución dependiendo del proceso y de su protección gaseosa.

PROCESO	GAS DE PROTECCION (%)	DILUCIÓN %
SMAW	NINGUNO	30
GMAW	Ar:81 + He:18 + CO <sub>2</sub> :1	36,5
GMAW	Ar:98 + O <sub>2</sub> :2	42,8
GMAW	Ar:43 + He:55 + CO <sub>2</sub> :2	43,7
GMAW	Ar:98 + CO <sub>2</sub> :2	39,7
GMAW	Ar:100	39,7
GMAW	Ar:98 + O <sub>2</sub> :2	44,1
GTAW	Ar:95 + He:5	43,6

**1.12.3.- Coeficiente o Porcentaje de Dilución en Soldaduras Heterogéneas o de Materiales Disímiles**

Se llaman así a toda soldadura realizada entre aceros diferentes y dentro de ellas, el recargue de aceros inoxidable (por soldadura) sobre aceros al carbono o microaleados. En estos casos se debe evaluar el coeficiente de dilución, el cual se define como el porcentaje de metal base fundido e incorporado al metal de soldadura o cordón. En otras palabras, es el peso con que el metal base contribuye a la composición del cordón. El cordón de soldadura esta formado por el metal base y el aporte que se funden en el arco<sup>(19)</sup>.

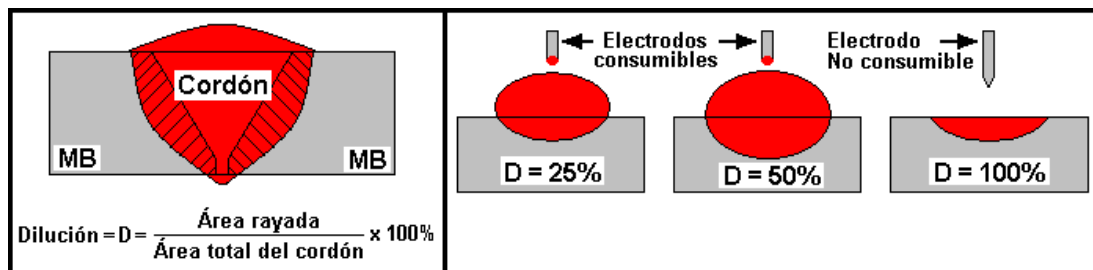


Figura 1.7.- Cálculo de Porcentaje de dilución y ejemplos.

### 1.13.- Proceso de Soldadura GMAW

#### 1.13.1.- Descripción del Proceso

Según Ignoto<sup>(7)</sup> y la sociedad americana de soldadura AWS<sup>(20)</sup>, (American Welding Society) designa al proceso de soldadura al arco con protección gaseosa y electrodo consumible en forma de alambre, “GMAW”, Gas Metal Arc Welding ó Microwire (ANSI/AWS A 3.0). Además también se conoce como soldadura MIG (Metal Inerte Gas) o soldadura MAG (Metal Active Gas), según el tipo o mezclas de gases que se emplean en la protección del arco eléctrico. En el proceso GMAW, la transferencia del metal de aporte se realiza a través del arco eléctrico al baño fundido, desde un alambre alimentado en forma continua y seleccionando adecuadamente el gas de protección (atmósfera protectora que cubre al arco eléctrico y al metal fundido a fin de evitar el contacto con el aire), el fundamento del proceso se indica en la figura 1.8.

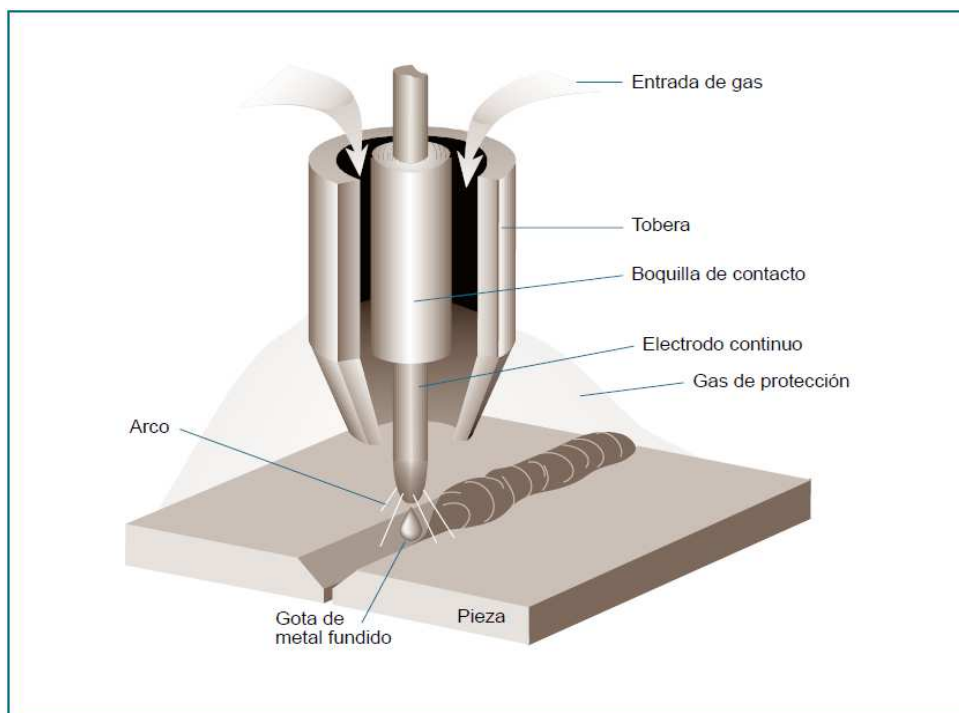


Figura 1.8.- Fundamento del proceso de soldadura eléctrica al arco GMAW.

### **1.13.2.- Ventajas y limitaciones del proceso de soldadura GMAW**

El proceso de soldadura GMAW ó MIG/MAG, tiene sus respectivas ventajas y limitaciones, siendo las más importantes según AWS<sup>(20)</sup> las siguientes:

#### **Ventajas**

- Es el único proceso de electrodo consumible que permite soldar una amplia gama de metales y aleaciones comerciales con buena calidad y alto rendimiento.
- La soldadura puede ser realizada en cualquier posición con el adecuado modo de transferencia del metal.
- El suministro del electrodo es continuo y puede ser automatizado, con lo que el material de aporte proporciona altas tasas de deposición, aumentando la productividad y la tasa de deposición, reduce las pausas en el proceso y los costos de operación.
- La ausencia de escoria reduce la limpieza posterior al proceso de soldadura.
- Se puede realizar soldaduras largas sin que existan empalmes entre cordones y en cualquier posición con el adecuado modo de transferencia del metal de aporte. Muy versátil para soldar láminas delgadas, raíz de tubos y otras operaciones.
- Con el proceso GMAW se puede soldar sobre acero desde 0,6 mm de espesor.
- El proceso GMAW ofrece versatilidad y eficiente operación en la unión de muchos metales y de diferentes espesores.
- Buena seguridad e higiene con poca producción de humos, polvos y salpicaduras.

#### **Limitaciones**

- Es difícil de utilizar en espacios restringidos, requiere conducciones de gas y de agua de refrigeración, tuberías, botellas de gas de protección, por lo que no puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- Debido a que el gas protector puede ser dispersado por corrientes de aire, debe soldarse en ambientes tranquilos para evitar la formación de porosidades.

- Debido al pequeño diámetro del alambre y el bajo suministro de calor hacia la placa, puede provocar una falta de fusión bajo ciertas condiciones (solapamiento).
- Debido al nivel de la radiación luminosa, calor e intensidad producida por el arco algunos operadores se sienten incómodos, sobre todo en áreas aisladas.
- Hay limitaciones en los materiales de aporte, el equipo es más difícil de transportarse complejo y costoso.

### 1.13.3.- Equipos Utilizados en la Soldadura GMAW

Los equipos y/o componentes que se utilizan en el proceso de soldadura GMAW se muestran en la figura 1.9.

El sistema MIG requiere del siguiente equipo:

1. Una máquina soldadora
2. Un alimentador que controla el avance del alambre a la velocidad requerida.
3. Una pistola de soldar para dirigir directamente el alambre al área de soldadura.
4. Un gas protector, para evitar la contaminación del baño de soldadura.
5. Un carrete de alambre de tipo y diámetro específico.

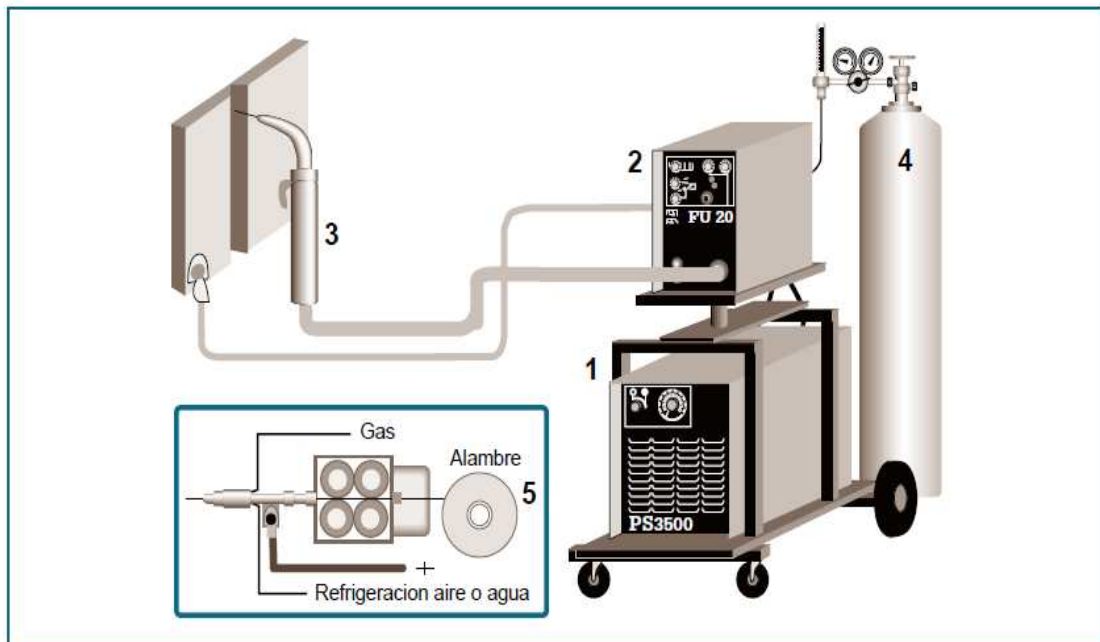


Figura 1.9.- Proceso de Soldadura GMAW o MIG/MAG indicando sus partes.

### 1.14.- Electrodo utilizados en el proceso GMAW

La American Welding Society<sup>(20)</sup> 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.

<b>Tipo de Acero Inoxidable</b>	<b>Electrodo Recomendado</b>
201, 202	ER209, E219, E308
301, 302, 304, 305	ER308, ER309
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

Para determinar el tipo de electrodo a utilizar, se deben tener en cuenta ciertos factores como lo son: el material base, las propiedades que debe tener el metal de soldadura, la condición y limpieza del material base, la posición de soldadura y la modalidad de transferencia de metal. La composición del electrodo debe ser compatible con una o más características (Química, Resistencia Mecánica, Ductilidad, Tenacidad) del material base<sup>(7)</sup>.

El electrodo escogido debe ser el ideal para así obtener un cordón de soldadura lo más estrechamente ligado a las propiedades mecánicas, así como a las características físicas del metal base, dando como resultado un cordón libre de discontinuidades y defectos.

La composición nominal del electrodo ER 309, (peso %) de esta clasificación es 24% Cr y 13 % Ni. Los metales de relleno de esta clasificación son comúnmente usados para soldaduras de aleaciones similares en formas de fundición o forjado. Ocasionalmente, se usan para soldadura tipo 304 y metales base similares, donde existan condiciones de corrosión severa que requieran mayor aleación de metal de soldadura. También son utilizados en soldadura de metales disímiles, tales como 304 a unirse tipo de acero al carbono, revestido lado de soldadura tipo 304 de acero revestido acero inoxidable y la aplicación de hoja de forros de los depósitos de aceros al carbono.

Mientras que la composición nominal (peso %) del electrodo ER309L, es la misma que ER309 excepto por el contenido en carbono. Bajo carbono (0,03 por ciento máximo) en este metal reduce la posibilidad de precipitación de carburo intergranular. Esto aumenta la resistencia a la corrosión intergranular sin el uso de estabilizadores como Colombio (Niobio) o titanio. La resistencia de esta aleación con



bajo contenido de carbono, no es tan grande a temperaturas elevadas que la del colombio (Niobio) estabilizado o aleaciones ER309<sup>(18), (21)</sup>.

### 1.15.- Gases de protección

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<sup>(22)</sup>.

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<sup>(11)</sup>.

Tabla 1.7.- Gases y Mezclas de gases Protectores para la Soldadura GMAW<sup>(23)</sup>.

<b>Gas Protector</b>	<b>Acción Química</b>	<b>Aplicación</b>
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 <sub>2</sub>	Reductora	En el cobre, permite un arco muy potente; se usa más en Europa.
Ar + 25-30% N <sub>2</sub>	Reductora	En cobre, un arco mas potente y suave, de control mas fácil que solo con N <sub>2</sub> .
Ar + 1-2% O <sub>2</sub>	Oxidantes	Aceros Inoxidables y de aleaciones, también para algunas aleaciones de cobre desoxidado.
Ar + 3-5% O <sub>2</sub>	Oxidantes	Aceros al carbono, aleaciones de acero y acero inoxidable, se requiere electrodo desoxidado.
Ar + 20-30% O <sub>2</sub>	Oxidantes	Diversos aceros, se usa principalmente con arco en corto circuito.
Ar + 5% O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	Oxidantes	Diversos aceros, requiere electrodo desoxidado.
CO <sub>2</sub>	Oxidantes	Aceros al carbono y de baja aleación.

### 1.16.- Variables que intervienen en el proceso GMAW

El proceso de soldadura GMAW es controlado por dichos parámetros dependientes del equipo y del operador. Muchos metales puede ser soldados por este proceso en forma manual o automático, al proceso manual se le denomina también semiautomático, seleccionando los diferentes parámetros y variables que intervienes en el proceso de soldadura.

Tabla 1.8.- Variables en el Proceso de Soldadura.

Dependientes del Equipo	Dependientes del Operador
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensión o longitud de arco</li> <li>• Velocidad de alimentación del alambre               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inductancia</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de avance</li> <li>• Tipo de gas protector</li> <li>• Inclinación de la pistola</li> <li>• Longitud libre del alambre</li> </ul>

El conocimiento y control de estas variables son esenciales para producir soldaduras satisfactorias. Estos parámetros no son completamente independientes y cambian de acuerdo a los requerimientos de las otras variables. La combinación entre ellas proporciona los diferentes modos de transferencia.

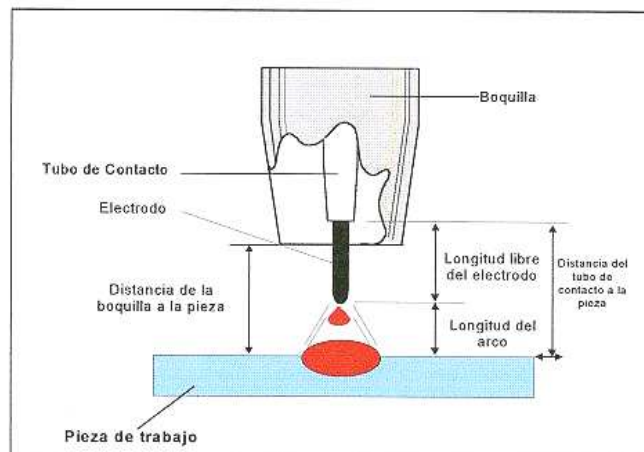


Figura 1.10.- Terminología del proceso de soldadura GMAW.

El control de las variables es importante para lograr una soldadura de calidad. Los valores óptimos en el proceso se ven afectados por el metal base, la composición química del electrodo, la posición de soldadura, y las especificaciones de soldadura. Por estas razones no hay un único grupo de variables que produzca los resultados óptimos<sup>(7), (20)</sup>.

#### • Voltaje del Arco (Tensión)

Dejando todas las variables constantes, el voltaje del arco está estrechamente relacionado con la longitud del arco. Los valores establecidos del voltaje del arco varían según el material, el modo de transferencia y el gas de protección. De esta forma la tensión será mayor mientras mayor sea la longitud del arco.

### • Velocidad de Alimentación del Electrodo

Esta velocidad está relacionada con la velocidad de alimentación del electrodo, así que cuanto mayor es la velocidad de alimentación, mayor es la corriente de soldadura; igualmente la cantidad de depósito depende de la corriente. En la figura 1.11 se muestra la corriente de soldadura vs velocidad de alimentación para electrodos utilizados en aceros al carbono.

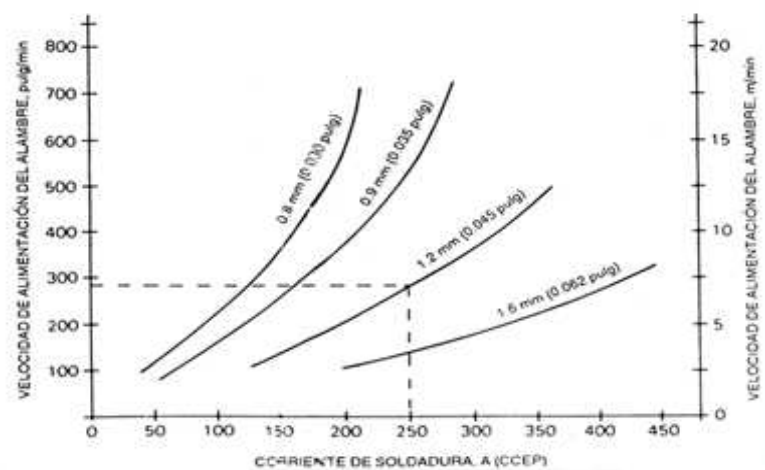


Figura 1.11.- Corrientes de soldadura típicas vs. Velocidad de alimentación para electrodos usados en aceros al carbono.

### • Longitud visible del Electrodo o Extensión

Es la distancia que hay entre el tubo de contacto y el extremo del electrodo y se relaciona estrechamente con la distancia desde la pieza a soldar hasta el tubo de contacto. Esta variable hay que considerarla ya que al aumentar el extremo libre del alambre, la penetración se hace más débil y aumenta la cantidad de salpicadura. La mayoría de los fabricantes recomiendan longitudes entre 5 y 10 mm según el modo de transferencia. La figura 1.10, ilustra la longitud visible del electrodo.

- **Velocidad de avance de la soldadura**

Manteniendo todas las variables constantes, se logrará mayor penetración cuanto menor sea la velocidad de soldadura, por otro lado, mientras mayor sea la velocidad, la soldadura será más irregular.

- **Polaridad**

Este término describe la conexión eléctrica de la pistola soldadora en relación con las terminales de una fuente de potencia de corriente continua. La mayoría de las aplicaciones en GMAW utilizan polaridad inversa ya que se obtiene una buena transferencia metálica, un arco estable, un cordón con buenas características y penetración y pocas proyecciones.

- **Angulo de Inclinación de la Pistola**

La forma y penetración del cordón de soldadura se ven directamente afectados por la orientación del electrodo con respecto a la unión a soldar. Cuando se mantienen todas las variables constantes y se saca de su perpendicularidad al electrodo, la penetración disminuye y el cordón de soldadura se hace más plano y ancho.

- **Diámetro del Electrodo**

El diámetro del electrodo influye en gran medida en la configuración del cordón de soldadura. De esta forma un electrodo con un diámetro mayor requiere una corriente mínima más alta que un electrodo pequeño con las mismas características de transferencia de metal. Otra consecuencia de las corrientes altas es el aumento en la tasa de deposición.

- **Gas Protector**

La escogencia del gas de protección óptimo está determinado por el material base y el modo de transferencia a utilizar. En la tabla 1.17, se ilustran las condiciones

necesarias típicas para la soldadura por arco de metal y gas de aceros al carbono, en la posición plana recomendada por AWS<sup>(3)</sup>.

### 1.17.- Transferencia Metálica en el Proceso GMAW

Existen diferentes modos de transferencia metálica en el proceso GMAW los cuales son; la transferencia metálica por cortocircuito, por arco-spray, globular, y la transferencia metálica pulsada, las cuales se pueden observar en la figura 1.12.

El modo de transferencia metálica determina una serie de factores que influyen en la soldabilidad tales como; la generación de salpicaduras, forma del cordón, soldadura en diversas posiciones, velocidad de fusión, penetración y la energía transferida que puede generar transformaciones en el estado sólido<sup>(7)</sup>.

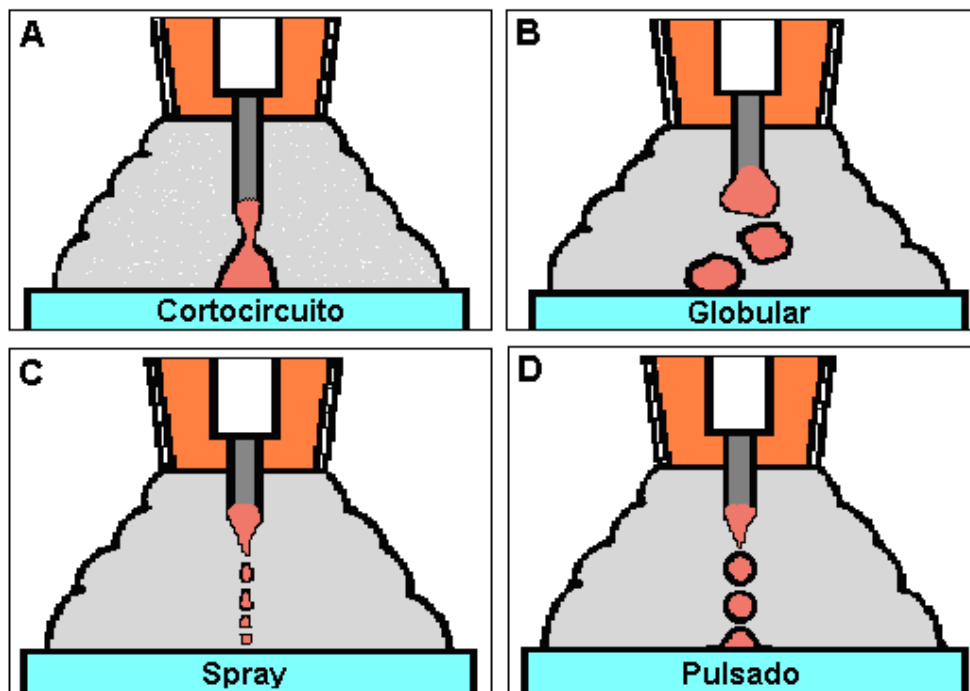


Figura 1.12.- Transferencia metálica por Cortocircuito (A); Globular (B); Spray (C) y Pulsado (D).

### **1.17.1.- Transferencia por Cortocircuito o Arco Corto**

En este modo de transferencia, el extremo del alambre se funde formando una gota que se va alargando hasta el momento en que toca al metal base, a causa de la tensión superficial, se corta la unión con el alambre, de esta forma se produce un cortocircuito originando un aumento de corriente. Para que un arco se comporte de ésta forma es necesario que el alambre se encuentre conectado al polo positivo (polaridad inversa), la corriente y la tensión de arco sean bajas y que el gas de protección sea una mezcla de Argón con un gas activo ( $O_2$ ,  $CO_2$ ).

El metal es transferido del electrodo a la pieza solo durante el período cuando el electrodo está en contacto con el “charco” de soldadura. Este tipo de transferencia por cortocircuito, puede usarse en todas las posiciones, para unir secciones delgadas de metal en posiciones vertical, horizontal y sobre cabeza, para rellenar aberturas de raíz grande y en aplicaciones de metales ferrosos y no ferrosos. Los parámetros más utilizados de voltaje varían entre 16 y 22 V y la corriente entre los 50 a 150 A.

### **1.17.2.- Transferencia por Arco Globular**

En el modo de transferencia globular, el alambre se va fundiendo y van generándose gotas gruesas, de un diámetro hasta tres veces mayor que el del electrodo. Al mismo tiempo, la gota al desprenderse oscila de un lado para otro y es fácilmente atraída por la fuerza de gravedad. El arco es inestable, de poca penetración, produce numerosas proyecciones o salpicaduras cuando se encuentra conectado al polo negativo (polaridad directa), la corriente es inferior al arco spray y está limitado a soldadura de posición plana. La transferencia globular tiene lugar cuando la corriente es relativamente baja, siendo indiferente al tipo de gas de protección. Sin embargo, con dióxido de carbono y helio, este tipo de transferencia tiene lugar en todas las corrientes de soldaduras. En este modo la transferencia la forma de la gota o glóbulo es de gran tamaño y provoca gran cantidad de

salpicaduras, que pueden ser reducidas mediante el uso de CO<sub>2</sub> como gas de protección. Parámetros típicos: voltaje 20 a 35,5 V, intensidad 70 a 255 A.

### **1.17.3.- Transferencia por Arco de Rociado ó “Spray”**

La transferencia del metal por arco de rociado o spray, se caracteriza por gotas muy finas, con un tamaño menor que el diámetro del alambre o electrodo. Las gotas son dirigidas axialmente en línea recta del electrodo al “charco” de soldadura. El arco es muy estable y suave, genera pocas salpicaduras y cordones con superficies relativamente lisas. Para que un arco se comporte de esta forma también es necesario que el hilo se encuentre conectado al polo positivo CD (+) o polaridad inversa, que la tensión de arco sea relativamente alta y con una elevada densidad de corriente. La penetración que se consigue es buena, por lo que se recomienda para soldar piezas de mediano espesor. El baño de fusión resulta relativamente grande y fluido, por lo que no se controla con facilidad en posiciones difíciles. Este modo “Spray” puede ser usado para soldar casi cualquier metal o aleación por las características inertes de la protección de argón, pero la aplicación de este proceso a láminas delgadas se hace difícil por las altas corrientes (150 a 500 A) y voltaje (24 a 40 V) necesarios para producir un arco spray. Las fuerzas resultantes pueden fundir las láminas en vez de soldarlas. Los gases inertes favorecen este tipo de transferencia metálica y se consiguen grandes tasas de deposición y rentabilidad.

### **1.17.4.- Transferencia por Arco Pulsado**

La transferencia por arco pulsado es una variante del modo de transferencia “Spray”, formando gotas del tamaño del diámetro del electrodo. En este modo de transferencia es necesario mantener constante la longitud del arco, la cual se alcanza ajustando la velocidad de alimentación con la tasa de fusión. Para lograr este modo de transferencia la corriente directa DC se divide en dos niveles que se alternan sin interrumpirse, una de baja intensidad llamada corriente de base, cuyo objetivo es mantener el arco y otra de elevada intensidad llamada corriente pico o de pulso, la



cual proporciona al alambre la energía necesaria para su fusión y proyección de la gota hacia el metal fundido sin generar salpicaduras. Cuando se suelda con corriente pulsada el arco puede operar con menores valores de corriente y como consecuencia la energía aportada a la pieza durante la soldadura es menor. En la corriente pulsada, se debe obtener una correlación entre todas las variables del pulso, así como, la corriente y el tiempo del pulso, la corriente y el tiempo de base, para establecer el equilibrio entre las velocidades de alimentación y la velocidad de fusión del alambre con el objeto de generar una gota por pulso y garantizar estabilidad en el arco<sup>(7)</sup>.

Amin<sup>(24)</sup>, resalta la reducción de calor aplicado que se produce en la transferencia pulsada con respecto a la transferencia spray, sin embargo, la interdependencia de todas las variables involucradas en la corriente pulsada crean un temor a un difícil ajuste de parámetros, los cuales al no ser los correctos causan defectos en la soldadura.

### **1.18.- Parámetros de la Transferencia Metálica por Arco Pulsado**

La transferencia metálica de este tipo, se rige por la intensidad de corriente la cual este comprendida entre dos niveles, uno inferior llamado corriente base, la cual existe energía que no funde material manteniendo el arco activo y el superior, denominado corriente pico, este proporciona la energía necesaria para fundir una porción de material de aporte y depositarlo. Las variables que caracterizan una soldadura con transferencia metálica por arco pulsado son: Corriente de Pulso o de Pico ( $I_p$ ); Tiempo de Pulso o de Pico ( $T_p$ ); Tiempo de Base ( $T_b$ ); Corriente de Base ( $I_b$ ); Frecuencia de Pulso ( $f$ )<sup>(7), (24)</sup>.

- **Tiempo Pico ( $T_p$ )**

Se refiere al tiempo en el cual la intensidad pico ( $I_p$ ) es mantenida, tomando en cuenta que una soldadura óptima debe desprender una gota por pulso, un tiempo de pulso 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, esta irregularidad le restará calidad a la soldadura.

- **Corriente Pico ( $I_p$ )**

Es la intensidad de pulso y en combinación con el tiempo pico proporcionan la energía transferida al material para la formación y proyección de la gota. De esta forma existen múltiples combinaciones  $I_p$  y  $T_p$  capaces de garantizar el desprendimiento de una gota por pulso, ejemplo de esto se puede decir, que al trabajar con un equipo cuyo  $I_p$  no puede ser alto entonces, se acrecienta el tiempo de pulso.

- **Corriente Base ( $I_b$ )**

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

- **Frecuencia de 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 de la velocidad de alimentación del alambre. Del mismo modo, una disminución de la frecuencia exigirá una disminución de dicha velocidad. Grandes períodos, implicarán bajas frecuencias y velocidades de alimentación, mientras que pequeños períodos, implicarán altas frecuencias y altas velocidades de alimentación.

En la figura 1.13, se esquematizan todas las variables del modo de transferencia pulsado, según el oscilograma que representa el mismo, además de la energía aportada la cual representa el área bajo la curva.

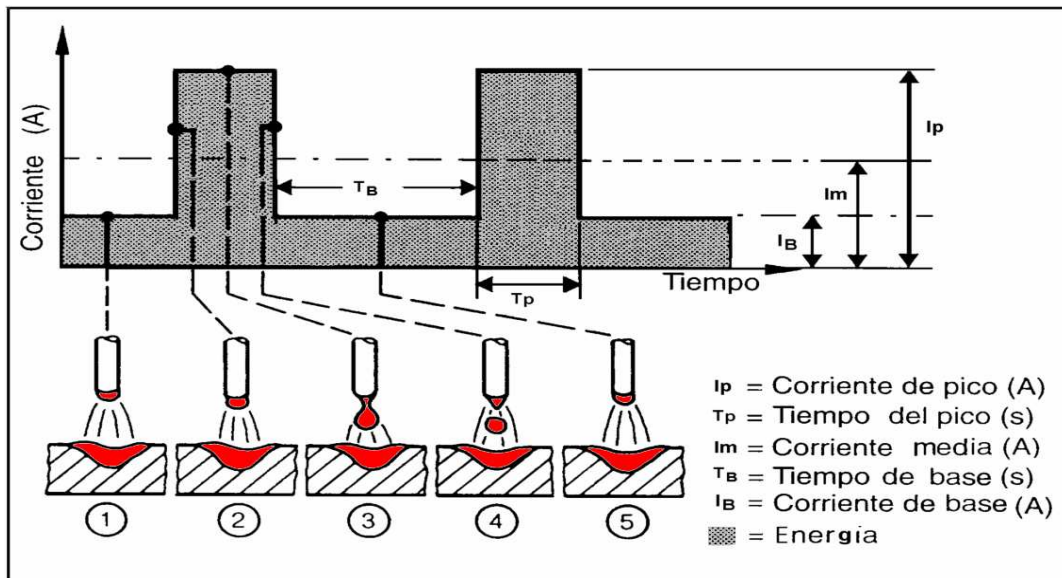


Figura 1.13.- Parámetros que intervienen en el arco pulsado y la energía aportada en la soldadura.

Por su parte, Y. Kim<sup>(25)</sup>, establece dos condiciones para que se garantice la ausencia total de proyecciones o salpicaduras en la soldadura con transferencia metálica pulsada:

1º.- Solo debe desprenderse una gota de material por pulso. El momento en que la gota se desprende, debe ser durante el tiempo de base ( $T_b$ ). Para cumplir esto es necesario que la energía aportada al material durante el pulso sea la necesaria.

2º.- El volumen o tamaño de la gota debe ser equivalente al diámetro del alambre utilizado, este tamaño de la gota depende de la relación entre la velocidad de avance del alambre y la frecuencia del pulso. Para hallar el tamaño de gota adecuado, hay

que precisar que las gotas se desprendan en total sincronismo con la frecuencia y a su vez con la velocidad de avance, por lo tanto, la cantidad de material depositado es el producto del volumen de la gota ( $v$ ), por la frecuencia del pulso ( $f$ ) o a su vez, el producto del área transversal del electrodo ( $s$ ) por su velocidad ( $v$ ), es decir:

$$V \cdot f = s \cdot \bar{v} \quad [3]$$

Suponiendo la geometría de la gota como una esfera, su volumen será:

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \quad [4]$$

Área de la sección transversal del electrodo es; donde  $r$ : radio del electrodo.

$$s = \pi \cdot r^2 \quad [5]$$

Sustituyendo:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot f = \pi \cdot r^2 \cdot v \quad [6]$$

En función del diámetro y la frecuencia de pulsación, se tiene la velocidad de avance.

$$v = \frac{2 \cdot d \cdot f}{3} \quad [7]$$

### 1.19.- Predicción de los Parámetros de Corriente Pulsada

Rajasekaran<sup>(26)</sup> y otros, se dedicaron a determinar los parámetros de soldadura empleando modo de transferencia metálica por arco pulsado para GMAW-P, usando alambres macizos de diferentes materiales y mezclas de gases de protección, considerando respectivas correcciones a partir del trabajo de investigación realizado por Amim<sup>(24)</sup>, estos están fundamentados en el método de la zona paramétrica y se basan en los siguientes criterios:

1. La velocidad de alimentación del alambre ( $W_F$ ) debe estar balanceada con la tasa de fusión del electrodo, de manera tal que la longitud del arco se mantenga constante (Criterio de Burnoff).

2. Se debe producir transferencia metálica tipo “spray”, incluso a velocidades de alimentación y voltajes bajos, que son las características de una transferencia metálica tipo globular (Criterio de la Transferencia Metálica).
3. La corriente base ( $I_b$ ) no debe exceder un límite inferior (mínimo) para garantizar un arco estable (Criterio de la Estabilidad del Arco).

### 1.19.1.- Criterio de Burnoff

El Criterio de Burnoff, consiste en la elaboración de una relación funcional, y representar todas las posibles condiciones de pulso, por ejemplo, combinaciones de parámetros pulsados ( $I_p$ ,  $T_p$ ,  $I_b$ ,  $T_b$ ), para una corriente media (pulsada) específica ( $I_m$ ).

La relación debe construir un área de trabajo que abarcara todas las combinaciones pulsadas denominada Zona Paramétrica. Para la construcción de esta zona de debe hallar, como primer paso, una función que relacione la corriente media ( $I_m$ ) con la velocidad de alimentación ( $W_F$ ) empleando GMAW-P y usando parámetros experimentales. Esta función se logra realizando soldaduras por ensayo y error tomando en cuenta las variables de las mismas, las cuales se seleccionan escogiendo las de mayor estabilidad y longitud de arco constante. Luego, estas velocidades de alimentación, obteniéndose una relación como la representada en la figura 1.14. Al ser esta una relación lineal se puede tomar la ecuación de una recta para describir su comportamiento como:

$$I_m = mW_F + C \quad [8]$$

La corriente media puede ser calculada según la siguiente ecuación usando los parámetros registrados de cada soldadura:

$$I_m = \frac{(T_p \cdot I_p + T_b \cdot I_b)}{(T_p + T_b)} \quad [9]$$

Rajasekaran y et<sup>(26)</sup> adicionan al método de Amin<sup>(24)</sup>, una relación similar de corriente media ( $I_m$ ) vs velocidad de alimentación ( $W_F$ ) utilizando GMAW convencional (corriente uniforme). Según los autores, el objetivo es buscar la intercepción de las rectas y localizar el nivel de corriente a partir del cual se lograría con mayor facilidad la transferencia tipo Spray del material de aporte. La sugerencia de Rajasekaran<sup>(26)</sup> se aprecia en la figura 1.14.

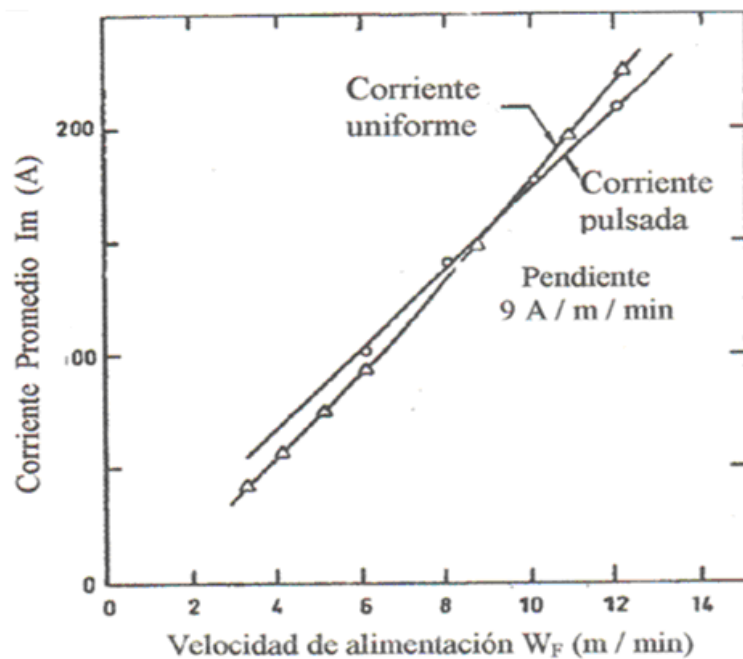


Figura 1.14.- Característica de quemado para un diámetro de alambre definido con corriente pulsada y corriente uniforme.

Amim<sup>(24)</sup> en su investigación, no asume un volumen de gota de diámetro producida en la soldadura igual al diámetro del alambre usado como material de aporte. En sus investigaciones Rajasekaran y otros<sup>(26)</sup>, recomiendan y consideran

trabajar 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 expresión:

$$V_D = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \quad [10]$$

Donde:

$r$  = radio del material de aporte (mm)

$V_D$  = volumen de la gota desprendida ( $\text{mm}^3$ )

El tiempo de ciclo  $T_C$  depende del volumen de gota desprendida y es calculable de forma tal que produzca una gota por pulso a diferentes velocidades de alimentación por medio de la siguiente expresión:

$$T_C = \frac{240 \cdot V_D}{\pi \cdot d^2 \cdot W_F} \quad [11]$$

Donde:

$T_C$  = tiempo de ciclo (ms)

$d$  = diámetro del alambre (mm)

$V_D$  = volumen de gota desprendida ( $\text{mm}^3$ )

$W_F$  = velocidad de alimentación

Además se sabe que:

$$T_C = T_p + T_b \quad [12]$$

Donde:

$T_C$  = tiempo de ciclo.

$T_p$  = tiempo pico.

$T_b$  = tiempo base.

Luego expresando  $I_p$  explícitamente de la ecuación [9] tenemos:

$$I_p = \left( \frac{T_c}{T_p} \right) \cdot I_m - \left( \frac{T_c}{T_p} - 1 \right) \cdot I_b \quad [13]$$

Donde:

$T_c$  = tiempo de ciclo.

$I_m$  = corriente media.

$I_p$  = corriente pico.

$T_p$  = tiempo pico.

$T_b$  = tiempo base.

$I_p$  = corriente pico.

Esta ecuación define la relación que existe entre la corriente de base ( $I_b$ ) y la corriente pulsada ( $I_p$ ) para alguna corriente media ( $I_m$ ). Así mismo, si se varían los parámetros de  $T_p$  desde 0 hasta T, se define una gama de rectas que cubren un área del gráfico la cual se conoce como Zona Paramétrica, la cual se ilustra en la figura 1.15.



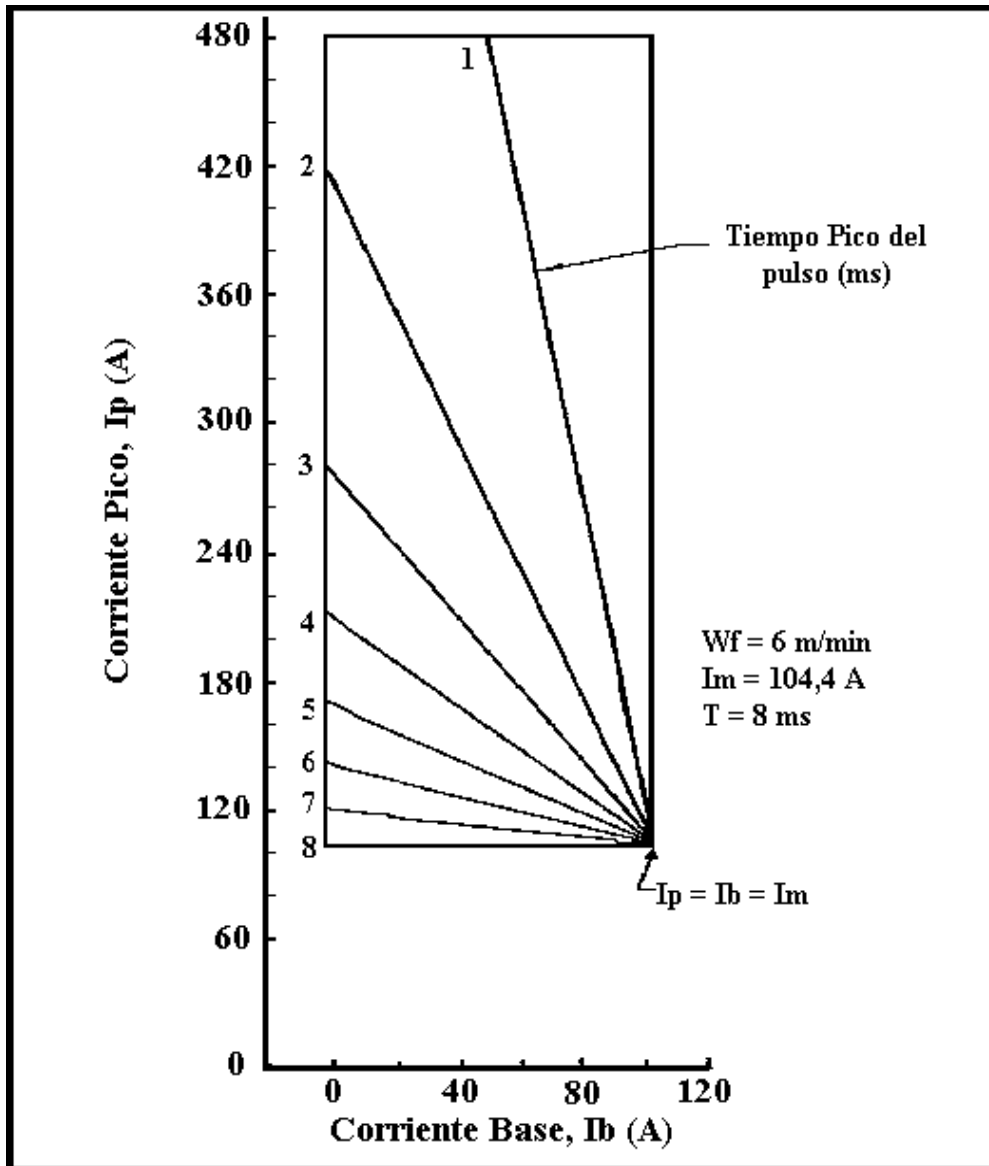


Figura 1.15.- Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff.

El efecto de variar  $T_p$  en la relación  $I_p$  vs  $I_b$ , consiste en generar rectas con pendientes que van desde  $\infty$  (recta vertical) para  $T_p = 0$ ; hasta una pendiente igual a cero (recta horizontal) para  $T_p = T_C$ . De esta forma la variación de  $T_p$  genera rectas que representan la relación  $I_p - I_b$  que giran alrededor de un punto en común  $I_p = I_b = I_m = I_m$  desde una vertical hasta una horizontal. Por lo tanto, 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 para una velocidad de alimentación de alambre ( $W_F$ ) dada.

### **1.19.2.- Criterio de la Transferencia Metálica**

Mientras todas las condiciones de pulso expresadas por la relación funcional [13] y representadas por la zona paramétrica, podrían satisfacer el Criterio de Burnoff, algunas combinaciones no producirán una transferencia metálica tipo Spray si  $I_p$  y  $T_p$ , son insuficiente para transferir el volumen de gota requerido. Por ello debe ser delimitada para lograr satisfacer el criterio de la transferencia metálica, a los requerimientos de desprendimiento de por lo menos una gota de alambre durante el tiempo de pulso. Este límite es definido por una expresión que vincula la  $I_p$  con su respectivo  $T_p$ . Es por esta razón que se toman en consideración las siguientes restricciones.

#### **1.19.2.1.- Limitación de la Corriente Pico y Corriente Base**

Según Amin<sup>(24)</sup>, existe una relación inversa entre  $I_p$  y  $T_p$  necesaria para el desprendimiento de un tamaño de gota dado desde la punta del alambre. Al realizar los ensayos de soldadura se deben agrupar los valores de  $I_p$  y  $T_p$  tomando en consideración para diferentes tipos de desprendimientos de gotas desprendidas por pulso. Esta relación al ser graficada en escalas logarítmica queda linealizada tal y como se observa en la figura 1.16, para un volumen de gota requerido de un diámetro y material específico; en donde la pendiente  $m$  es parte de la relación propuesta  $T_p \propto I_p^{-m}$ . Rajerekaran y otros investigadores<sup>(26)</sup>, concluyen que esta pendiente  $m$  varía dependiendo de la composición química y diámetro del material de aporte. Lo expresado anteriormente permite establecer la siguiente ecuación:

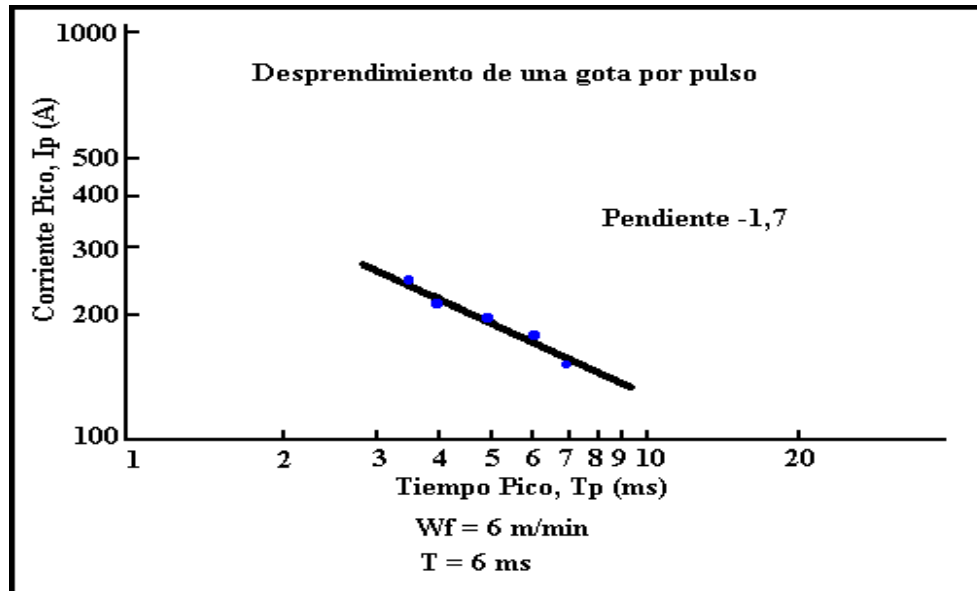


Figura 1.16.- Relación entre  $I_p$  y  $T_p$  para diferentes tipos de separación de gota por pulso.

$$I_p^{-m} \cdot T_p = K_v \quad [14]$$

Donde  $m$  es la pendiente de la recta y  $K_v$  es una constante denominada Parámetro de Desprendimiento y se expresa en  $A^m \cdot s$ . Es una constante para un volumen de gota específico a ser desprendida desde un diámetro y material de aporte dado, esta debe ser predeterminada para evaluación de la  $I_p$  para un  $T_p$  dado.

#### 1.19.2.2.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento de Gota ( $K_v$ )

El valor de  $K_v$  para un volumen de gota requerido es estimado de la data obtenida de varias pruebas de soldadura GMAW con corriente directa uniforme, sobre un rango de velocidades de alimentación de alambre que produzca transferencia spray. Para cada prueba, la velocidad de alimentación y el voltaje se ajustan de manera tal que se logre una longitud de arco constante. Durante la prueba, la corriente y voltaje de arco son registrados sobre oscilogramas.

La data extraída de cada prueba es el tiempo de desprendimiento de gota ( $T_d$ ), volumen de la gota ( $V_d$ ) y el nivel de corriente registrado ( $I_{dc}$ ), todos datos obtenidos de los oscilogramas. Los oscilogramas típicos se muestran en la figura 1.17, donde los desprendimientos de gotas se indican en los picos de la señal de voltaje<sup>(24), (26)</sup>.

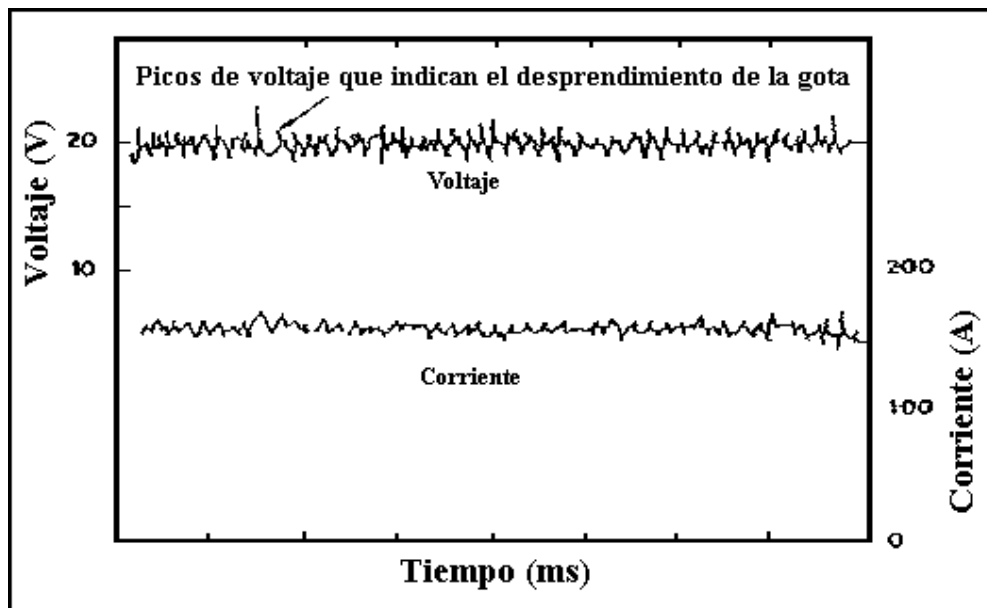


Figura 1.17.- Corriente y voltaje del arco empleando arco de soldadura convencional.

Aunque los intervalos de tiempo entre sucesivas gotas varían entre desprendimiento y desprendimiento, el promedio del intervalo de tiempo es aproximadamente constante, el cual no puede ser tomado como una aproximación al tiempo de desprendimiento de gota ( $T_d$ ).

No obstante, una mejor estimación es dada por un intervalo de tiempo dominante (modal) producto de una distribución de frecuencia (histograma). Por lo tanto, el valor de tiempo que se obtenga a partir del histograma se llamará Tiempo de Desprendimiento Modal ( $T_{dm}$ ).

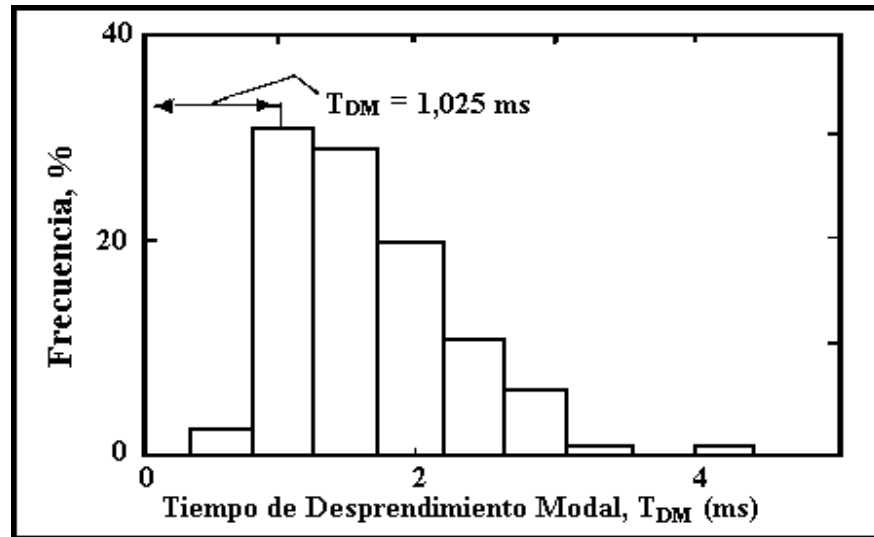


Figura 1.18.- Histograma de distribución de frecuencia para los intervalos de tiempo a unas determinadas condiciones de soldadura.

Para un tiempo de desprendimiento modal ( $T_{dm}$ ) determinado se le relaciona un volumen de desprendimiento modal ( $V_{dm}$ ), calculado según la siguiente expresión:

$$V_{dm} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot W_F \cdot T_{dm}}{24} \quad [15]$$

Donde:

$V_{dm}$  = volumen de desprendimiento modal ( $\text{mm}^3$ )

$T_{dm}$  = tiempo de desprendimiento modal (ms)

$d$  = diámetro del alambre de aporte (mm)

$W_F$  = velocidad de alimentación del alambre (m/min)

Los niveles de corriente de cada prueba de soldadura ( $I_{dc}$ ) se obtienen de los oscilogramas. Todo el conjunto de valores  $T_{dm}$ ,  $V_{dm}$  e  $I_{dc}$ , obtenidos para cada velocidad de alimentación sirven para construir relaciones entre  $V_{dm}$  vs  $I_{dc}$  como se muestran en la figura 1.19 y  $T_{dm}$  vs  $V_{dm}$  en la figura 1.20.

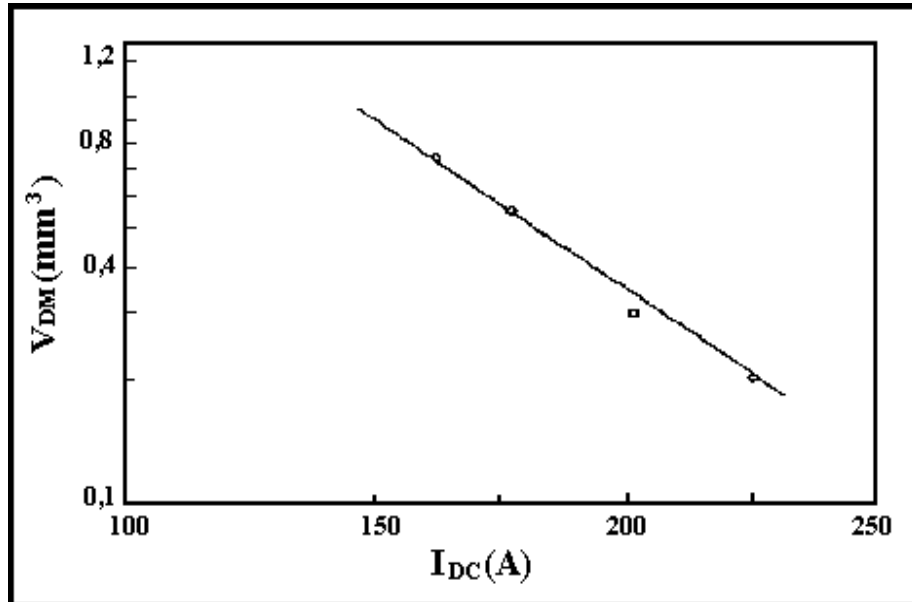


Figura 1.19.- Relación entre los niveles de corriente y volumen de modalidad de gota.

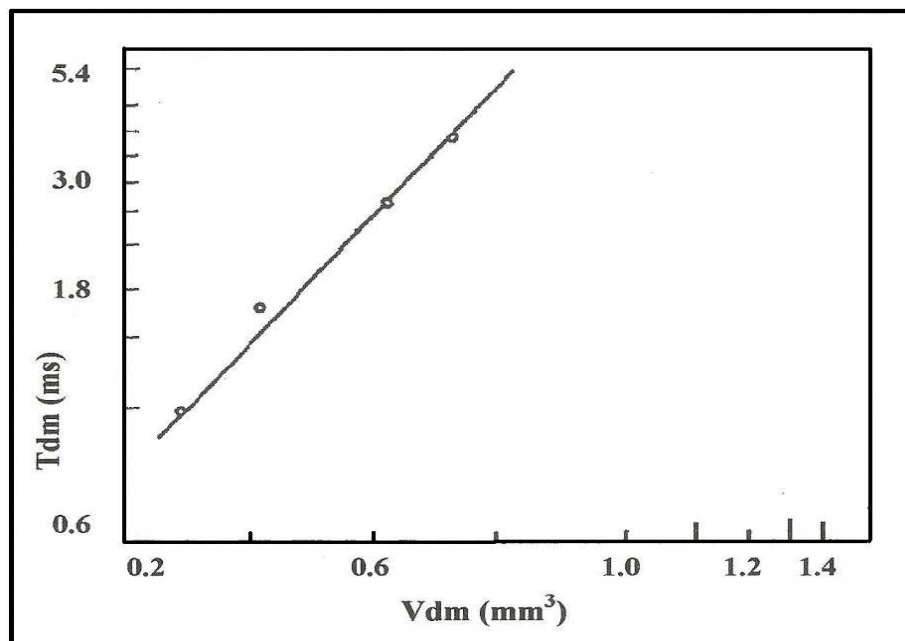


Figura 1.20.- Relación entre volumen de modalidad de gota y tiempo de modalidad de desprendimiento de gota.

Para un volumen de gota asumido que se desprende del aporte, se define una única combinación de  $I_{dc}$  y  $T_{dm}$  de la que se espera que satisfaga la transferencia metálica controlada durante el pulso. La combinación ( $I_{dc}$ ,  $T_{dm}$ ) son los utilizados para evaluar el valor de  $K_v$ :

$$K_v = I_{dc}^m \cdot T_{dm} \quad [16]$$

Donde:

$K_v$  = Constante llamada parámetro de desprendimiento y se expresa en  $A^m s$ .

### 1.19.2.3.- Curva de Potencia Constante

La ecuación [14] define, según  $A_{min}^{(24)}$ , la curva paramétrica de desprendimiento, también conocida como curva paramétrica de potencia constante, la cual determina los niveles de corriente pico ( $I_p$ ) límites para un rango de tiempos pico ( $T_p$ ), dentro de un  $K_v$  (o volumen de gota dado) dado. De esta forma, la curva limita las condiciones pulsadas predichas al principio por el criterio de Burnoff, agregando como requisito extra al cumplimiento del criterio de transferencia metálica.

### 1.19.3.- Criterio de Estabilidad del Arco

Se basa en la necesidad de limitar la corriente base ( $I_b$ ) de las condiciones pulsadas o zona paramétrica, sobre todo en los valores más bajos con la finalidad de evitar la inestabilidad y extinción del arco. Esta limitante puede ser expresada por:

$$I_b > C \quad [17]$$

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

Finalmente, la superposición de los dos últimos criterios (Transferencia Metálica y Estabilidad del Arco) sobre la zona paramétrica propuesta por el criterio de Burnoff, encierran un área de trabajo, la cual se ilustra en la figura 1.21. Esta área comprende condiciones pulsadas que cumplen con los tres criterios de  $A_{min}^{(24)}$ ,

siendo estas condiciones posibles soldaduras de buena estabilidad de arco y alta calidad de soldadura.

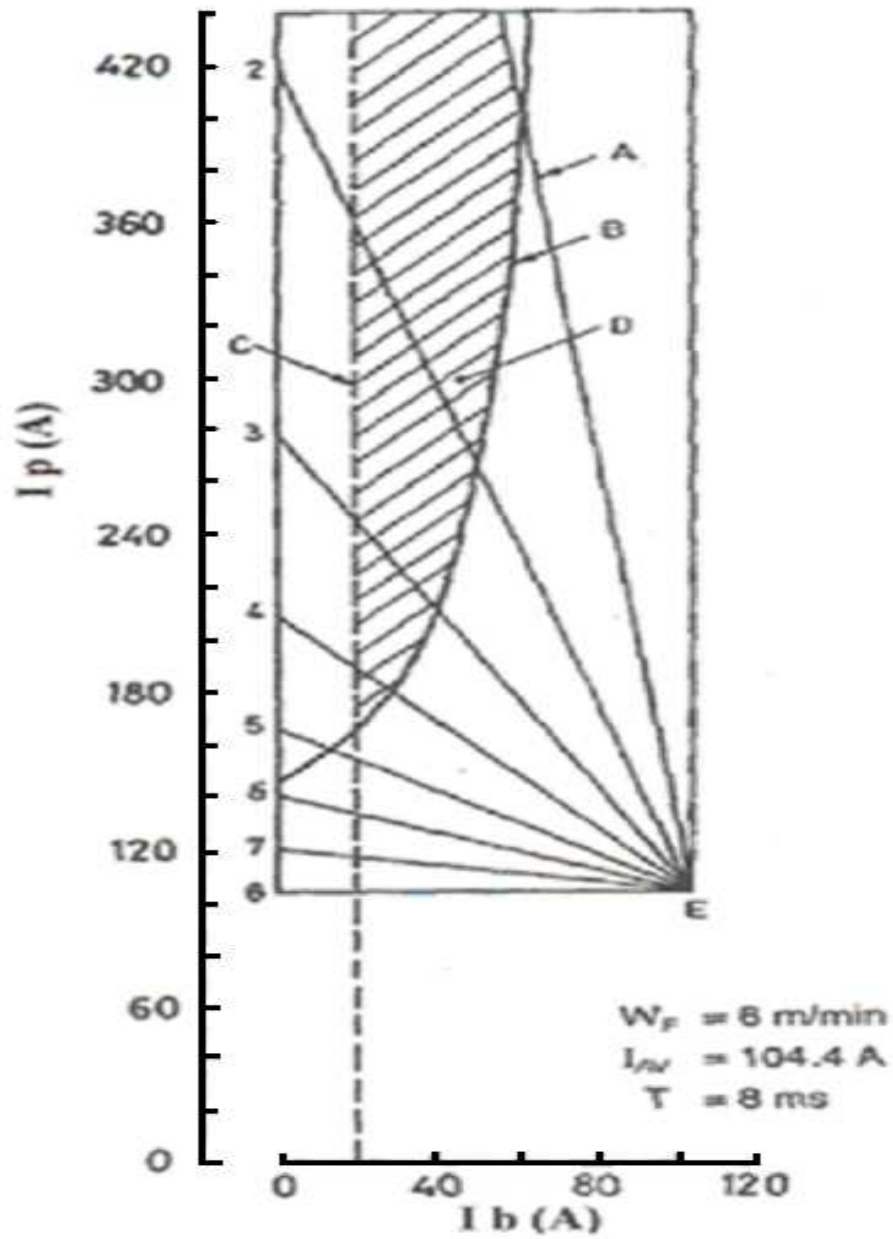


Figura 1.21.- Zona paramétrica predicha por el criterio de Burnoff. Donde, A son las líneas radiales indicando el  $T_p$ , B es la curva de potencia constante, C es la corriente de base límite y D es la zona estable.



### **1.20.- 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<sup>(20)</sup>. 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 ultrasónica. 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.

### **1.21.- Especificación del Procedimiento de Soldadura (EPS)**

El 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<sup>(27)</sup>.

Una EPS esta disponible en el sitio de fabricación para consulta 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<sup>(29)</sup>, Sección IX, las variables esenciales 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.

### **1.22.- 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 lo 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 las figuras 1.22 y 1.23, 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.


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

Figura 1.22.- Registro de Calificación de Procedimiento (RCP). Hoja 1/2.


 <p><b>CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.</b></p>	<p><b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b>                  ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA                  REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO  <b>RCP</b></p>						
RCP N°: EPS N°:	FECHA: CÓDIGO REF:						
NOMBRE SOLDADOR:	C.I.:	IDENTIFICACIÓN:	HOJA:				
<b>ENSAYO DE TRACCION</b>							
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tracción Ksi      MPa	Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones	
1							
2							
3							
<b>ENSAYOS DE DOBLEZ</b>							
Tipo de Doblez				Resultado			
<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO AL DEPOSITO</b>							
<b>Elementos</b>	<b>% C</b>	<b>% Cr</b>	<b>% Ni</b>	<b>% Mo</b>	<b>% Mn</b>	<b>% Si</b>	<b>% S</b>
<b>Cordón</b>							
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							
_____ Ing. Isis E. Plaza R. Inspectorá Certificada American Welding Society C.W.I.A.W.S. N° 99071311				_____ Ing. Vicente Ignoto Coordinador - C.V.S.			

Figura 1.23.- Registro de Calificación de Procedimiento (RCP). Hoja 2/2.

# **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

## **CAPÍTULO II**

## 2.- PROCEDIENDO EXPERIMENTAL

En la siguiente figura se muestra un esquema del procedimiento experimental empleado en la investigación.

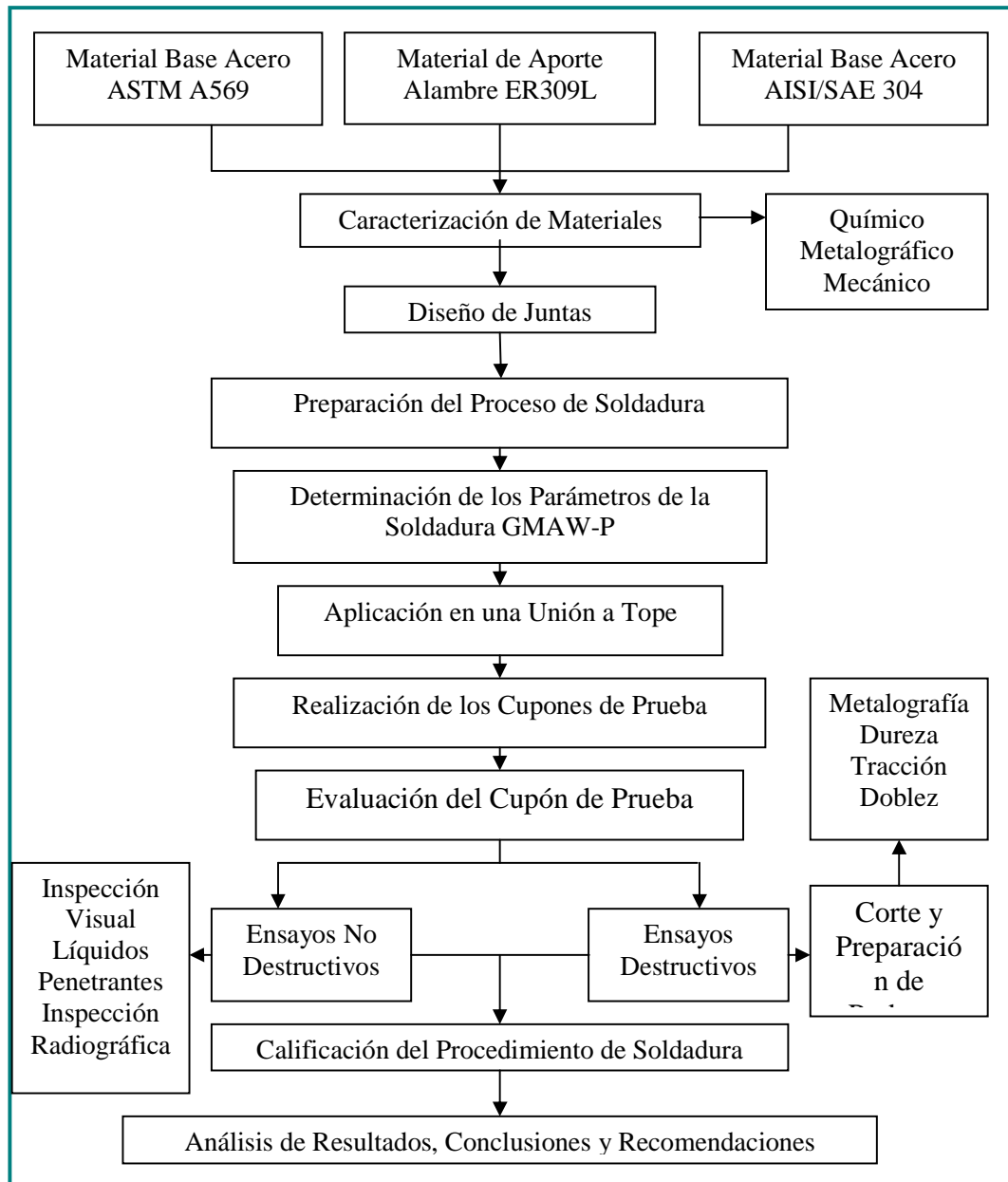


Figura 2.1.- Esquema del procedimiento experimental.

El esquema anterior corresponde al procedimiento experimental que se siguió para la realización de este estudio. A continuación se especifica con mayor detalle cada una de las etapas a desarrollar.

## **2.1.- Caracterización Química de los Materiales Base y Material de Aporte**

Los materiales base usados para la realización de los cupones de prueba de juntas disímiles fueron el Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y el acero al carbono ASTM A569, en forma de láminas o chapas con dimensiones de 1200 x 2400 x 4 mm, y como material de aporte se utilizó un alambre sólido ER309L con diámetro de 1,2 mm según su especificación AWS A5.9<sup>(21)</sup>. Ambos fueron caracterizados en función de la composición química, metalográfica y propiedades mecánicas (dureza y tracción), para verificar si cumplían con las características indicadas por el fabricante y por lo establecido en las normas.

### **2.1.1.-Análisis Químico**

La caracterización de los materiales base y aporte desde el punto de vista químico se realizó con el fin de verificar el porcentaje en peso de los elementos presentes en los materiales base y aporte. El método utilizado para la determinación de los porcentajes en peso de Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Silicio (Si), Níquel (Ni), Nitrógeno (N), Molibdeno (Mo), Fósforo (P), fue Espectroscopia de Absorción Atómica y el método Gasométrico se empleó para la determinación de los porcentajes en peso del carbono (C) y azufre (S). También se utilizó el método de Fluorescencia el cual determina sólo elementos mayoritarios en porcentaje de peso. Para realizar estos análisis se extrajeron 15g aproximadamente de virutas de los materiales base (chapa AISI/SAE 304 o su equivalente ASTM A240 y ASTM A569) con un taladro de banco y para el material de aporte ER309L, se cortaron pequeñas secciones del electrodo con una pinza cortadora de alambre. Los análisis se realizaron en el Laboratorio Químico Instrumental de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV.

## 2.2.- Caracterización Metalográfica de los Materiales Base

La evaluación metalográfica de los materiales base se realizó en el sentido de laminación y transversal a éste. Para tal evaluación, se cortaron dos muestras de cada uno de los materiales base, por medio de una cortadora de disco refrigerada con las dimensiones requeridas para la preparación de probetas metalográficas para luego ser embutidas en baquelita. Las secciones obtenidas fueron desbastadas con una secuencia de papel de lija de carburo de silicio 80, 180, 240, 320, 600 y 1200.

La secuencia de pulido fue lona y alúmina  $1\mu\text{m}$ , posteriormente paño verde con alúmina  $0,3\mu\text{m}$  y por último paño rojo con alúmina  $0,05\mu\text{m}$ . Para el caso del acero ASTM A569, las muestras pulidas fueron atacadas con una solución de Nital al 3% durante unos pocos segundos<sup>(29)</sup>, y para la muestra del acero AISI/SAE 304 fueron atacadas con una solución electrolítica de ácido oxálico (10 g de ácido oxálico en 100 mL de agua) en condiciones de 6V durante 15 segundos<sup>(29)</sup>. Luego fueron observadas y fotografiadas a un aumento de 200X a través de un microscopio óptico marca Olympus PMG 3 equipado con una pantalla digital marca JVC modelo TK-C13800. Este equipo puede observarse en la figura 2.2, junto a sus accesorios.



Figura 2.2.- Microscopio Óptico Olympus PMG 3 con el panel de control de imagen respectivo.

## 2.3.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base y Aporte

### 2.3.1.- Método Metalográfico

Mediante el empleo de un programa analizador de imágenes se utilizaron las fotomicrográficas tomadas en la caracterización metalográfica de los Materiales base



ASTM A569 y AISI/SAE 304. El programa empleado fue el Digital MicroGraph versión 3.4.2, el cual calcula el número de píxeles de la imagen que abarca las áreas oscuras (ferrita), realizando lo propio con las áreas claras de la fase restante (austenita) para el caso del Acero Inoxidable AISI/SAE 304 y para el caso del Acero al Carbono las áreas oscuras (perlita) y áreas claras (ferrita), realiza lo mismo. De esta forma, se procedió a cuantificar la cantidad de fases que proporciona directamente una relación porcentual entre las mismas presentes en la fotomicrografía analizada.

### 2.3.2.- Método Químico

Con las composiciones químicas de los materiales bases (ASTM A569 y AISI/SAE 304) y aporte (ER309L), se determinó el contenido de ferrita, empleando el diagrama de Schaeffler. Para ello se calculó el Níquel equivalente ( $N_{eq}$ ) y el Cromo equivalente ( $Cr_{eq}$ ) presentes en cada material de acuerdo a las formulas indicadas donde los elementos son expresados en porcentaje en peso.

$$Cr_{eq} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \times \% Si + 0,5 \times \% Nb \quad [18]$$

$$N_{eq} = \% Ni + 30\% \times C + 0,5 \times \% Mn \quad [19]$$

Posteriormente, los valores obtenidos se graficaron en el Diagrama de Schaeffler, obteniéndose el contenido aproximado de ferrita en la microestructura.

## 2.4.- Caracterización Mecánica de los Materiales Base

### 2.4.1.- Ensayo de Dureza

La dureza de los materiales base se evaluó según la norma ASTM A370<sup>(30)</sup> en la sección correspondiente al ensayo Rockwell B. Para ello se tomó una muestra de cada uno de los materiales base (AISI/SAE 304 y ASTM A569) en el sentido de laminación, en la cual se realizaron siete (7) mediciones con un durómetro universal marca WILSON ROCKWELL HARDNESS TESTER SERIES 500, modelo B504-T,

tal como se muestra en la figura 2.3, usando una precarga de 10 Kgf, y una carga de 100 Kgf, con un indentador tipo esfera de 1/16 pulg. (1,588 mm) de diámetro. Los resultados del ensayo se reportan en la tabla 3.6, donde se presentan los valores promedios de Dureza Rockwell B, con sus respectivas desviaciones estándar.

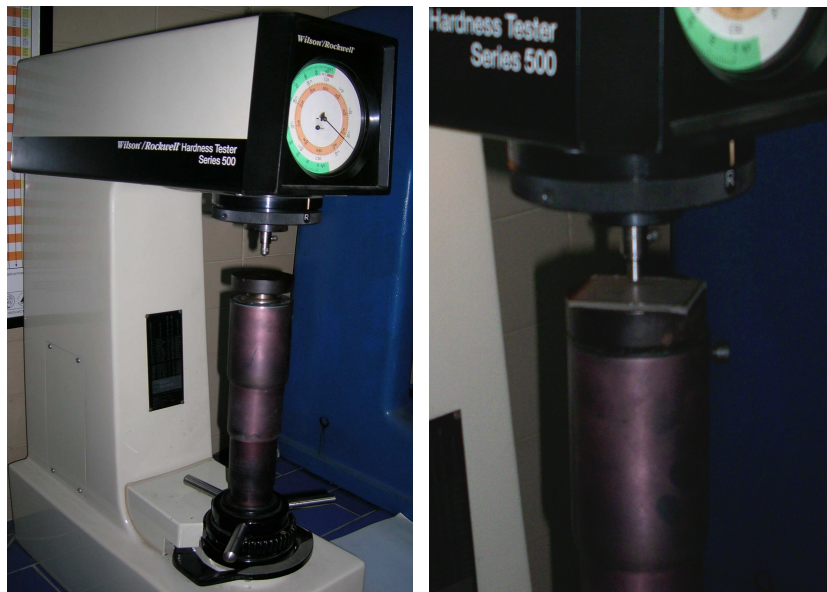


Figura 2.3.- Durómetro Wilson Rockwell Hardness Tester Series 500.

#### 2.4.2.- Ensayo de Tracción

Esta caracterización mecánica de los materiales base consistió en un ensayo de tracción realizado a tres probetas de cada material base, según la norma ASTM A370 <sup>[30]</sup>, (cantidad mínima para reportar un promedio de las propiedades mecánicas del material base). El conjunto de probetas se puede observar en la figura 2.4. Los ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos marca BALDWIN Tate – Emery Load Indicator como se ilustra en la figura 2.5.

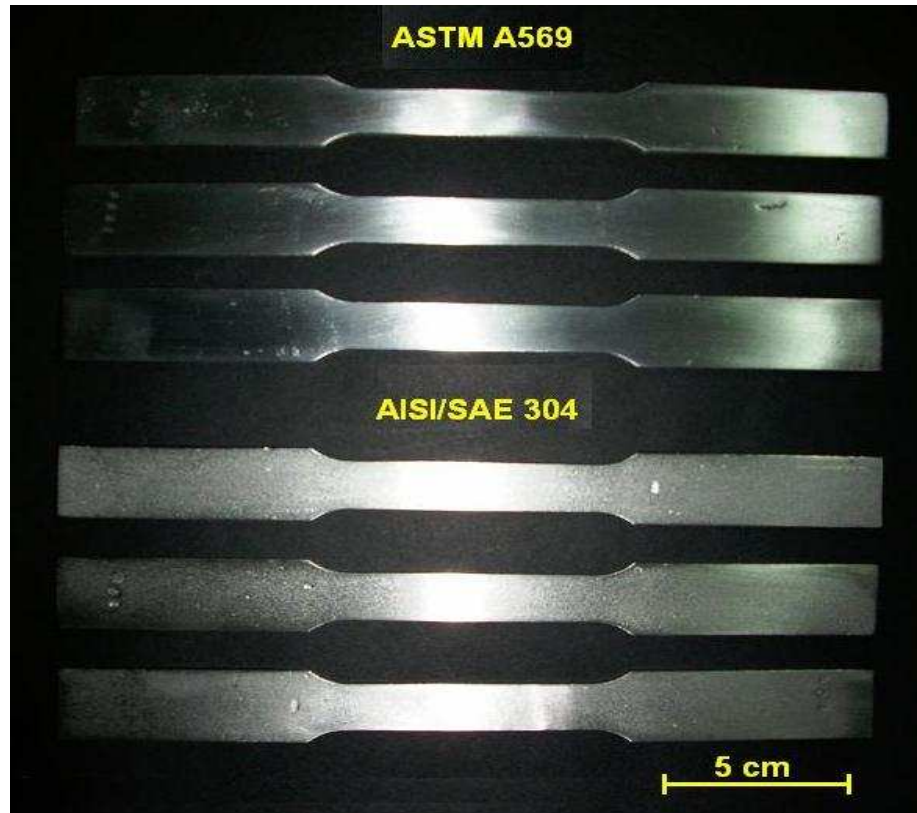


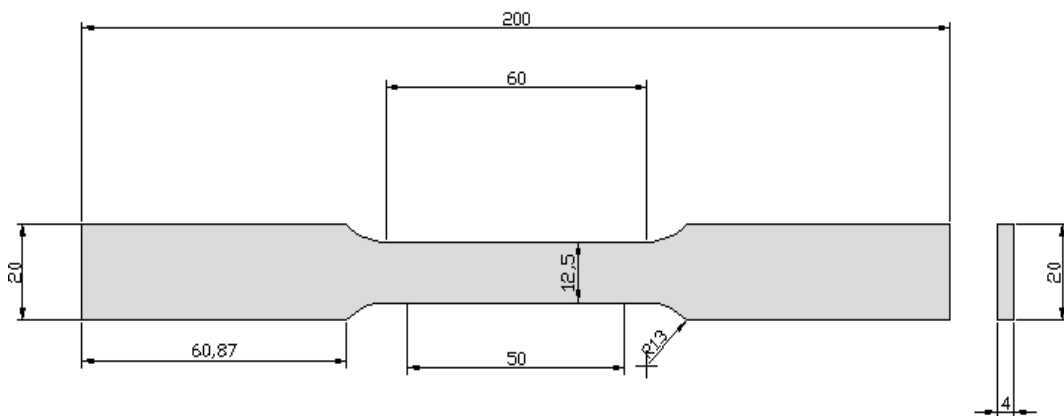
Figura 2.4.- Conjunto de probetas de los materiales base ASTM A569 y AISI/SAE 304 para el ensayo de tracción.



Figura 2.5.- Máquina Universal de Ensayos BALDWIN Tate-Emery Load Indicator.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la UCV. Las probetas fueron cortadas en tiras en la dirección de laminación de los materiales base y maquinadas en el Taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para luego ser desbastadas hasta papel de lija de carburo de silicio 600 en seco y pulidas.

Las dimensiones de las probetas se reportan en milímetros y se indican en la figura 2.6. Antes del ensayo se efectuó la medición de las áreas transversales iniciales ( $A_0$ ) de las probetas con un vernier. Los datos de alargamiento ( $\Delta L_i$ ) fueron tomados a partir de un extensómetro (marca AMSLER), colocado en la zona calibrada de 50 mm de la probeta y los valores de carga leídos desde la máquina universal de ensayos. Los datos de alargamiento y de carga se leyeron simultáneamente. Así se obtuvo un registro de la carga aplicada ( $F_i$ ), que junto con los valores  $\Delta L_i$  para cada estado de carga  $F_i$ , se utilizaron para la construcción de la gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril ( $S$  vs.  $e$ ) para cada ensayo aplicando las ecuaciones [20] y [21].



Medidas en milímetros. Diseño de Probeta para ensayo de tracción, ASTM A569 y AISI/SAE 304.

Figura 2.6.- Diseño de probeta para el ensayo de tracción de los materiales base ASTM A569 y AISI/SAE 304, según la norma ASTM A370.

$$e_i = \frac{\Delta l_i}{l_o} \quad [20]$$

$$S_i = \frac{F_i}{A_o} \quad [21]$$

Donde:

$e_i$  = Deformación nominal (mm/mm)

$S_i$  = Esfuerzo nominal (MPa)

$l_o$  = Longitud calibrada de la probeta (mm)

$A_o$  = Área transversal de la probeta antes del ensayo (mm<sup>2</sup>)

Aplicando estas ecuaciones se obtuvo, para cada probeta, el valor de esfuerzo de fluencia y el esfuerzo nominal a carga máxima o resistencia a la tracción. Finalmente se reportó la elongación máxima para la  $l_o$  de la probeta. Por último, se calculó el promedio de estos valores con su respectiva desviación estándar (DE).

## **2.5.- Preparación del Proceso de Soldadura**

### **2.5.1.- Diseño y Preparación de las Juntas**

El diseño de la junta fue a tope con ranura cuadrada. Las dimensiones de cada placa fueron 350 mm de largo, 150 mm de ancho y 4 mm de espesor, como se muestra en la figura 2.7. Estas dimensiones corresponden a las establecidas en la Sección IX del Código ASME para cupones utilizados en la calificación de procedimientos de soldadura.

Estas placas fueron rectificadas con lija N° 80 para eliminar las irregularidades superficiales.

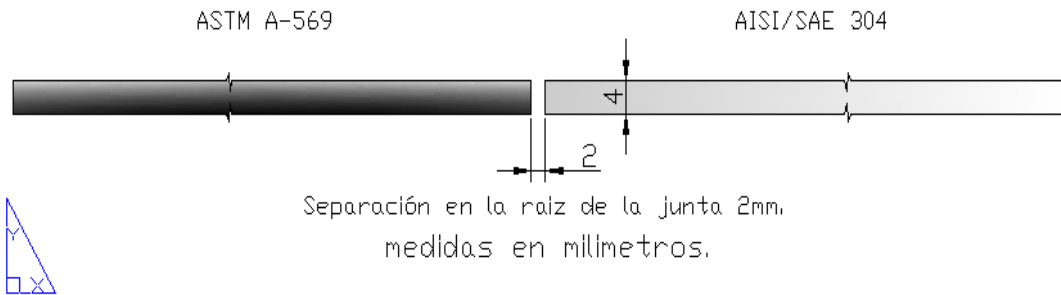


Figura 2.7.- Diseño para la fabricación de la junta a tope.

Posteriormente las placas fueron punteadas en los extremos con sobrantes de chapas de acero al carbono tal como se muestra en la figura 2.8 para evitar el movimiento del cupón y mantener la separación constante (2mm) entre las placas, así como para minimizar la distorsión debida al calor aportado durante el proceso de soldadura.

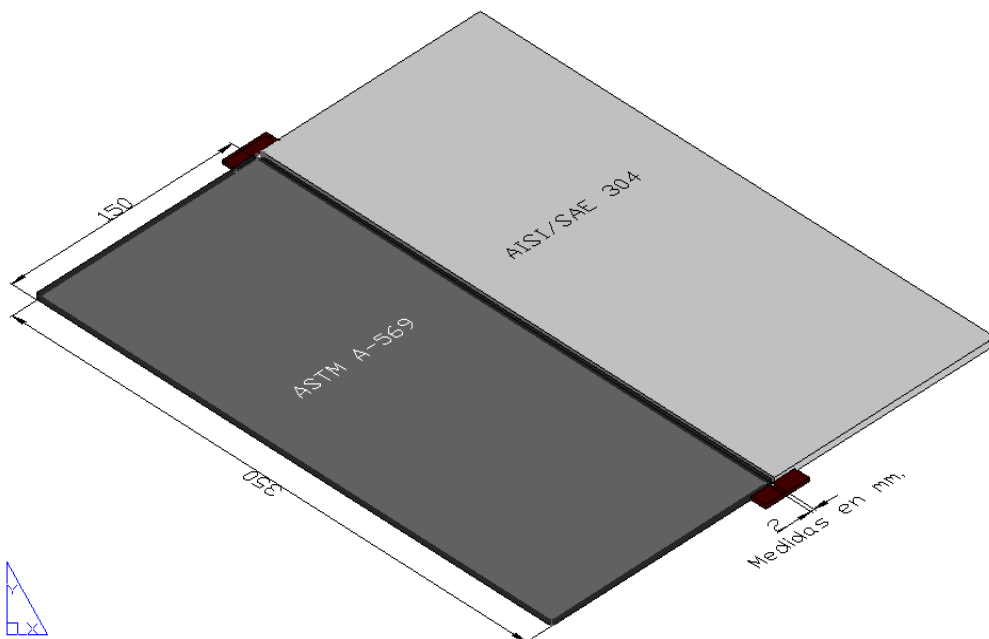


Figura 2.8.- Esquema de la junta a tope.

### 2.5.2.- Preparación de la Mesa de Trabajo

Se preparó una superficie de trabajo para realizar el proceso de soldadura que funcionó como soporte de las piezas de la junta a soldar. Para depositar los cordones se utilizó un dispositivo de traslación automático, en el cual fue instalada la pistola de soldadura tal como se muestra en la figura 2.9, para así lograr una velocidad constante de avance de la soldadura.

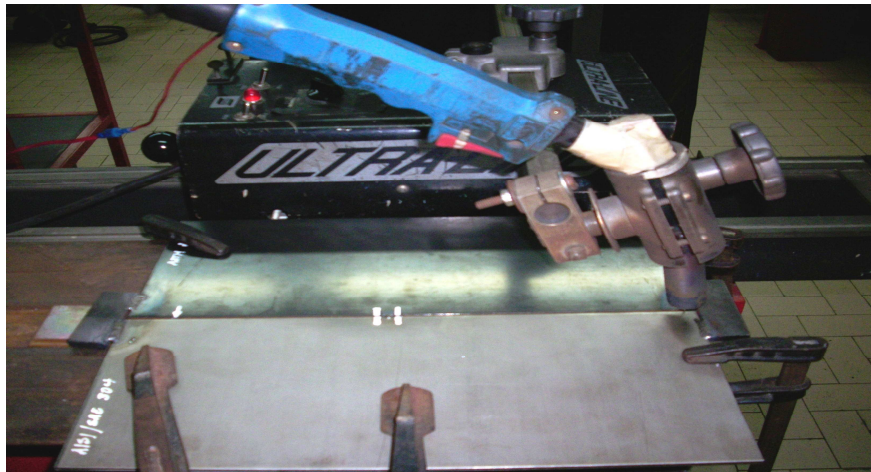


Figura 2.9.- Mesa de trabajo para la elaboración del cupón de prueba.

### 2.5.3.- Fuente de Energía

Se empleó una fuente multiproceso de soldadura MTE DIGITEC 450 diseñada para trabajar con el modo de transferencia metálica pulsada, la cual consta de una fuente de energía, sistema de alimentación del alambre y panel de control digital.



Figura 2.10.- Fuente de energía MTE DIGITEC 450, con su panel de control y sistema de alimentación.

#### **2.5.4.- Registro de Oscilogramas y Equipos Auxiliares**

Para la adquisición y registro de los parámetros de soldadura usados en esta investigación se empleó un software denominado OSCILOS versión 4.0, desarrollado por el Instituto de Mecatrónica de la Universidad Federal de Santa Catarina en Brasil (LABSOLDA), que simula un osciloscopio digital desde una computadora. Para la recolección de esta data se utilizó una tarjeta de adquisición conectada a la tarjeta madre del computador, y a su vez a esta se conectaron sensores que permiten registrar la corriente, voltaje, velocidad de alimentación y flujo de gas. A través de los registros, la computadora muestra en pantalla el oscilograma del proceso, con lo cual es posible analizar ciertas características del modo de transferencia (fenómeno físico) que ocurre durante el proceso de soldadura empleando las condiciones que fueron predeterminadas en el equipo.

Adicionalmente dos instrumentos auxiliares fueron utilizados para monitorear y controlar el proceso y verificar si las lecturas por parte de la fuente eran correctas, estas mostraban en tiempo real las magnitudes de voltaje y corriente, así como la velocidad de alimentación del electrodo en el proceso de soldadura.





Figura 2.11.- Equipos auxiliares. Equipo TC-1, para medición de voltaje, corriente media y eficaz. Equipo MVA-1, para medición de velocidad de alimentación del alambre.

### 2.5.5.- Preparación y Limpieza de los Materiales Base

Para preparar las placas de acero inoxidable AISI/SAE 304 y ASTM A569 que conformaban los cupones, se limpiaron cuidadosamente mediante cepillo de alambre, lija y solvente a fin de eliminar posibles residuos de grasa, aceite o cualquier otro tipo de contaminante en la superficie, esto antes de depositar los cordones de soldadura.

### 2.6.- Determinación de los Parámetros del Proceso de Soldadura

Se procedió a determinar los parámetros de soldadura por transferencia metálica pulsada ( $I_p$ ,  $I_b$ ,  $T_p$ ,  $T_b$ ) empleando la metodología desarrollada por Amin [24]. La finalidad fue determinar la zona paramétrica para una velocidad de alimentación ( $W_F$ ) determinada. Todas las pruebas de soldadura consistieron en cordones depositados sobre chapa de los materiales base en posición plana. En la tabla 2.1, se resumen todas las consideraciones establecidas para las pruebas de soldadura necesarias para determinar la zona paramétrica utilizando diferentes valores de velocidad de alimentación.

Tabla 2.1.- Parámetros fijos de las pruebas de Soldadura GMAW-P de cordones depositados sobres chapas planas de materiales base.

Modo de transferencia Metálica	Convencional / Pulsado
Material de Aporte	ER 309L diámetro 1,2 mm
Gas de Protección	Argón + 2% O <sub>2</sub>
Velocidad de Alimentación ( $W_F$ )	2 m/min. – 10 m/min.
Polaridad	Corriente Directa (CD), Electrodo (+)
Distancia Boquilla – Pieza	1,2 mm
Posición de Soldadura	Plana (1G); orientación del electrodo 90°
Flujo de Gas Protector	15 L/min.

### 2.6.1.- Criterio de Burnoff

Con la finalidad de establecer un equilibrio entre la velocidad de alimentación  $W_F$  y la tasa de fusión del alambre (Criterio de Burnoff), de tal manera que la longitud de arco se mantuviera estable; se procedió a determinar una relación entre la corriente media  $I_m$  y la velocidad de alimentación del alambre  $W_F$ .

Se realizaron cordones empleando GMAW-P primero y luego GMAW convencional por cortocircuito (corriente no pulsada) para distintas velocidades de alimentación del alambre: 2, 4, 6, 8 y 10 m/min, en varias combinaciones de parámetros, las cuales fueron seleccionadas por el método de ensayo y error hasta obtener un arco estable. Los valores de  $I_m$  obtenidos fueron graficados para cada  $W_F$ . La relación de  $I_m$  para cada prueba fue obtenida de la ecuación [9].

Al igual que en trabajos anteriores, se asumió una gota de diámetro igual al del alambre de aporte, y utilizando la ecuación [10], se calculó el volumen de gota desprendida  $V_D$ . Este valor se utilizó junto a la ecuación [11] para calcular el tiempo de ciclo  $T_C$  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 ultimo, utilizando la ecuación [13]

se logró establecer la zona paramétrica preliminar para una  $W_F$  seleccionada de 6 m/min.

### **2.6.2.- Criterio de Transferencia Metálica**

Todas las condiciones de pulso expresadas por la ecuación [13] y representadas en la zona paramétrica preliminar satisfacen el criterio de burnoff; sin embargo, existen algunas combinaciones de ( $I_p$ ,  $T_p$ ,  $I_b$  y  $T_b$ ) que no producirán una transferencia metálica tipo spray, y/o no podrán desprender por lo menos una gota de aporte en cada pulso. Por tal motivo, se hizo necesario establecer límites adicionales de la zona paramétrica preliminar utilizando una relación entre  $I_p$  y  $T_p$ .

#### **2.6.2.1.- Limitación de la Corriente Pico ( $I_p$ ) y Tiempo Pico ( $T_p$ )**

A fin de determinar las condiciones mas apropiadas para establecer la relación  $I_p$  vs  $T_p$ , se procedió a realizar numerosas pruebas. Éstas consistieron en depósitos de material de aporte usando combinaciones de parámetros de pulso ubicados dentro de la zona paramétrica preliminar. Se mantuvieron fijos los valores de tiempo de ciclo ( $T_C$ ) y velocidad de alimentación del alambre ( $W_F$ ) y se variaron los de  $T_p$  e  $I_p$ . Los valores de  $I_p$  se mantuvieron siempre por encima de la corriente de transición (punto de intersección), como lo sugiere en su trabajo Rajasekaram et al <sup>[26]</sup>.

Los oscilogramas correspondientes a las señales de corriente y tensión se registraron para clasificarlos posteriormente según el número de gotas desprendidas, 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  $T_p$  para una velocidad de alimentación de 6 m/min, correspondientes al desprendimiento de una gota por pulso se graficaron en escala logarítmica para obtener una relación potencial; el valor de la pendiente corresponde al exponente de la ecuación [14].

### **2.6.2.2.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento ( $K_V$ )**

Se realizaron pruebas depositando material de aporte ER309L, usando GMAW convencional empleando velocidades de alimentación de 4, 6, 8 y 10 m/min, con las cuales se buscaba un modo de transferencia tipo spray. Durante las pruebas los oscilogramas de corriente y voltaje fueron registrados a través del software OSCILOS 4.0. De estos oscilogramas se recolectaron los datos estimados de tiempo de desprendimiento ( $T_{dm}$ ) y nivel de corriente ( $I_{dc}$ ), para cada  $W_F$ . Los desprendimientos de gotas fueron observados en los picos que presentaba el oscilograma del voltaje. A través del software ORIGIN 4.0, se calcularon los distintos tiempos entre desprendimientos sucesivos, para luego ser representados en intervalos de tiempo de transferencia en una gráfica de distribución de frecuencias. Para cada histograma de frecuencias se determinó el tiempo de desprendimiento de gota modal ( $T_{dm}$ ). Al evaluar  $T_{dm}$  en la ecuación [15] se obtuvo el volumen modal de gota  $V_{dm}$  para cada velocidad de alimentación.

Posteriormente se procedió a la construcción de las graficas  $I_{dc}$  vs  $V_{dm}$  y  $V_{dm}$  vs  $T_{dm}$  de la cuales se obtuvo el valor de la corriente  $I_{dc}$  y el tiempo modal de gota  $T_{dm}$  requeridos para que la transferencia se realizara con una gota de diámetro igual al del electrodo ( $V_{dm} = 0,905 \text{ mm}^3$ ). Con estos dos últimos valores se evaluó la ecuación [16] y se determinó el parámetro de desprendimiento  $K_V$ .

### **2.6.3.- Curva de Potencia Constante**

Se procedió a sustituir el valor de  $K_V$  en la ecuación [14] obteniendo así una curva de potencia constante. De esta forma se procedió a superponer la curva resultante sobre la zona paramétrica preliminar.

### **2.6.4.- Criterio de Estabilidad del Arco**

Se realizó el ajuste de la corriente base mediante sucesivos decrementos hasta 40 A, valor mínimo utilizable en las pruebas de soldadura antes de extinguirse el arco eléctrico. Una vez establecida la corriente mínima ( $I_b > 40 \text{ A}$ ) mediante el

cumplimiento del tercer y último criterio de Amim<sup>(24)</sup>, fue limitada por segunda vez la zona paramétrica.

#### **2.6.5.- Acotamiento de la Zona Paramétrica**

En la zona paramétrica preliminar encontrada, limitada posteriormente por la curva de potencia constante y el criterio de estabilidad de arco, se procedió a través de pruebas realizadas por ensayo y error, a localizar el conjunto de parámetros cuyas combinaciones de  $I_p$ ,  $T_p$ ,  $I_b$  y  $T_b$ , proporcionaran un arco estable, uniformidad en el desprendimiento de gotas, y lo más importante, el desprendimiento de una gota por pulso durante el tiempo pico ( $T_p$ ). Además, se acordó que el conjunto de parámetros representaran oscilogramas libres de corto circuitos durante la transferencia pulsada.

El conjunto de puntos que cumplieron con las características, delimitaron un área pequeña de trabajo dentro de la zona paramétrica.

Con el objetivo de elegir las condiciones óptimas para realizar una soldadura con modo de transferencia pulsada de una gota por pulso, el paso final consistió en seleccionar las tres mejores condiciones de la nueva área reducida para la velocidad de alimentación de estudio ( $W_F = 6$  m/min), tomando como criterio la estabilidad del arco durante la soldadura, la uniformidad en el desprendimiento de gota y mediante inspección visual.

#### **2.6.6.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana**

Utilizando las condiciones seleccionadas en la etapa anterior se procedió a realizar la deposición de los cordones sobre una chapa plana. Posteriormente se extrajeron probetas (una por cada condición), las cuales se seccionaron transversalmente mediante una cortadora de disco refrigerada para su preparación metalográfica. Las secciones obtenidas fueron desbastadas con una secuencia de lijas 80, 180, 320, 600 y 1200, para ser macro atacadas con una solución 1:1 de HCl (50 ml) y H<sub>2</sub>O (50 ml), durante un tiempo aproximado de 15 minutos<sup>(31)</sup>. De esta forma se

revelaron las zonas límites entre el cordón de soldadura y el metal base utilizándose una cámara digital para la obtención de las macrográficas.

Finalmente, se procedió a seleccionar el conjunto óptimo de parámetros para realizar la junta a tope de los aceros ASTM A569 y AISI/SAE 304 con modo de transferencia pulsada, partiendo de la uniformidad en el desprendimiento de la gota, la estabilidad del arco y las características superficiales (aspecto del cordón, penetración, dilución, refuerzo de cara y ancho del cordón).

### **2.7.- Realización de la Soldadura en una Unión a Tope**

De las láminas originales de los dos materiales base, se extrajeron placas de 150 x 350 x 4 mm, con las cuales se fabricó el cupón de prueba necesario para la calificación del procedimiento de soldadura de acuerdo a la Sección IX del Código ASME. Para esto el material base fue preparado como se ilustra en la figura referente al diseño y preparación de juntas. La soldadura fue realizada en posición 1G (Plana), con una orientación de pistola de 90° respecto al plano de soldadura y la distancia de la boquilla a la pieza de trabajo en 12 mm. Las láminas fueron sujetadas sobre la mesa de trabajo (por medio de sargentos) y debajo de esta fue colocada como respaldo una pletina de cobre la cual tenía una ranura que coincidía con la raíz de la soldadura, esta pletina inducía un enfriamiento del montaje más rápido. Una vez realizado el montaje se procedió a realizar la soldadura de un solo pase con los parámetros del cordón que presentó las mejores condiciones de soldadura.

#### **2.7.1.- 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, tomadas del párrafo QW-409.26 del Código ASME Sección IX<sup>(28)</sup>.

$$EBA = \frac{I \cdot V \cdot 60}{V_s} \quad [22]$$

$$ENA = \rho \cdot EBA \quad [23]$$

En donde:

$V_s$  = velocidad de soldadura (mm/min)

$I$  = corriente media del proceso (A)

$V$  = voltaje medio del proceso

$\rho$  = eficiencia térmica del proceso (0,70 para GMAW)

EBA y ENA (Joules/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<sup>(20)</sup>, oscila entre 0,7 y 0,8 para los modos de transferencia metálica cortocircuito y pulsado respectivamente<sup>(7)</sup>.

## 2.8.- Corte y Preparación de las Probetas.

Las probetas utilizadas para realizar los ensayos se extrajeron luego de realizar el cordón de soldadura en el cupón de prueba, los cortes se hicieron en dirección transversal al cordón de soldadura en función de los ensayos exigidos por el código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX y ensayos adicionales que permitieron obtener información adicional. Para realizar estos ensayos se tomaron una serie de probetas del cupón de prueba de acuerdo con lo establecido en la Sección IX del Código ASME en su párrafo QW-463.1(a). En la figura 2.12, se muestra esquemáticamente 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.



Figura 2.12.- Cupón de prueba y distribución de las probetas para los ensayos requeridos.

### 2.9.- Ensayos No Destructivos

El Código ASME, en su Sección IX establece una serie de ensayos adicionales aplicables sobre el cupón de prueba de la junta soldada obtenida por el proceso de soldadura para calificarla, los cuales son especificadas en el párrafo QW-190. Estos ensayos son los no destructivos (inspección radiográfica, inspección visual y líquidos penetrantes, referidos a los párrafos QW-191, QW-194 y QW-195 respectivamente)<sup>(28)</sup>.

La evaluación no destructiva consistió en la realización de inspección visual, y aplicación de líquidos penetrantes, para determinar las condiciones superficiales del cupón de prueba y luego la realización de la inspección radiográfica para detectar posibles imperfecciones o discontinuidades internas de la soldadura. Estos ensayos se realizaron una vez que el cordón se enfrió, previo a la preparación de probetas a utilizar en los ensayos destructivos.

#### 2.9.1.- Inspección Visual

Se realizó durante la ejecución de la soldadura y después de haber finalizado la misma con el fin de determinar la presencia de discontinuidades superficiales tales



como salpicaduras, grietas, falta de penetración y porosidades tanto en el cordón como en los materiales base, igualmente asegurar que las dimensiones de la junta fuesen uniformes y la geometría del cordón fuese adecuada.

### **2.9.2.- Inspección por Líquidos Penetrantes**

La inspección por líquidos penetrantes permitió determinar la presencia de posibles grietas superficiales no apreciables a simple vista o cualquier otra discontinuidad superficial que afectara la calidad de la unión con mayor precisión que una inspección visual. En esta inspección se empleó un kit de marca Magnaflux Spotcheck como se ilustra en la figura 2.13, el cual cumple con la norma ASTM E165<sup>(32)</sup>, compuesto por un limpiador solvente (removedor), un penetrante y un revelador.

- **Limpieza Previa de la Superficie**

Se limpió el cupón de prueba con una tela humedecida con solvente, para así remover la presencia de cualquier óxido o suciedad, para luego ser aplicado el aerosol removedor (Cleaner / Remover SKC-S), sobre el cordón y materiales base adyacentes, asegurando así la eliminación de cualquier contaminante en la superficie. Se dejó actuar el solvente por 5 minutos siendo eliminado mediante papel absorbente y un trapo limpio y seco.

- **Aplicación del Penetrante**

Una vez limpia y seca la superficie del cordón y materiales base, se aplicó una película uniforme de líquido penetrante en aerosol (Penetrant SKL-SP), manteniendo una distancia de aplicación de aproximadamente 30 cm de la superficie. Se permitió el tiempo de acción del penetrante en 10 minutos. Después de transcurrido el tiempo se removió el exceso de penetrante sobre la superficie con paño limpio ligeramente humedecido con limpiador removedor.

- **Aplicación del Revelador**

Después de transcurrido el tiempo de acción del penetrante, se aplicó una película delgada y uniforme del aerosol revelador (Developer SKD-S2), sobre la superficie cubierta con el penetrante, manteniendo una distancia de aplicación de 30 cm. Una vez dejado actuar el revelador por 10 min, se procedió a la inspección del cupón con el fin de reportar el resultado de la misma.



Figura 2.13.- Kit de líquidos penetrantes.

### **2.9.3.- Inspección Radiográfica**

La inspección radiográfica permite determinar la presencia de fallas macroscópicas interiores, grietas, porosidades, penetración incompleta en la raíz y socavaduras. En este ensayo se empleó un tubo de rayos X, ubicado en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la UCV.

En función del material y espesor del cordón de soldadura y por medio del grafico que se ilustra en la figura 8.4 en el anexo, el cual relaciona el espesor del cordón de soldadura, el voltaje (Kv) y la intensidad de corriente por tiempo

(mA\*min), se calcula el tiempo de exposición y la corriente necesaria para realizar la radiografía, este tiempo de exposición depende en primer lugar de la sensibilidad, de la intensidad de la radiación y del espesor de la pieza a radiografiar.

Se colocó la película dentro de una funda negra, junto con la placa de plomo en el cuarto oscuro, seguidamente se identificó el cupón soldado a ser radiografiado colocando los Indicadores de Calidad de Imagen (ICI) con los hilos perpendiculares al cordón, a su vez este cupón se coloca debajo del tubo de rayos X y debajo de este la película en la zona de la raíz a lo largo del cordón, como se ilustra en la figura 2.14.

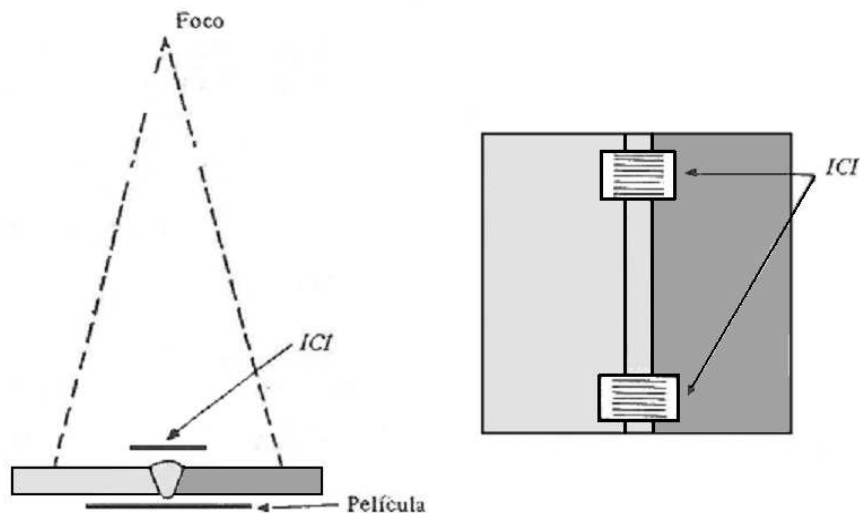


Figura 2.14.- Montaje para la toma radiográfica al cupón soldado.

### 2.10.- Ensayos Destructivos

El grupo de evaluaciones que comprenden los ensayos destructivos realizados al cupón de prueba para su caracterización fueron: análisis químico del cordón, evaluación metalográfica (macrografía, micrografía), medición de ferrita del cordón, dureza en el cordón, ensayo de tracción y ensayos de doblez tanto de cara como de raíz.

### **2.10.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura**

Para el análisis químico del cordón de soldadura, se extrajeron virutas del refuerzo de cara del cordón, por medio de un taladro de banco. La técnica de análisis químico utilizada fue idéntica a la empleada en el análisis químico de los materiales base y aporte (Espectroscopia de Absorción Atómica, Fluorescencia y Gasometría).

### **2.10.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura**

La evaluación metalográfica de los depósitos de soldadura incluye un análisis micrográfico y uno macrográfico realizados a través de microscopía óptica. Estas evaluaciones se efectuaron con la finalidad de determinar las características estructurales de la junta soldada así como el tamaño y distribución de fases que pudieran tener efecto sobre las propiedades mecánicas del conjunto soldado.

#### **2.10.2.1.- Análisis Micrográfico**

El análisis micrográfico se realizó a fin de verificar la microestructura y fases presentes en el cordón de soldadura y en la zona afectada térmicamente de los dos materiales base, haciendo especial énfasis en la zona de transición entre el cordón y las zonas afectadas térmicamente. Se utilizó una probeta preparada para metalografía, la cual fue desbastada y pulida siguiendo la metodología usada en la caracterización metalográfica de los materiales base.

Para la observación de la microestructura fue necesario realizar dos procedimientos por tratarse de una junta disímil:

- El material base correspondiente al acero al carbono se trató con una solución de Nital al 2% durante unos pocos segundos<sup>(29)</sup> para posteriormente realizar la fotomicrografía con un aumento de 50X en la interfase del material base (acero al carbono) y el cordón,
- El material base correspondiente al acero inoxidable AISI/SAE 304 y el cordón de soldadura, se trataron electrolíticamente con una solución de ácido

oxálico (10 g de ácido en 100 ml de agua) en condiciones de 6V durante 15 segundos<sup>(29)</sup>, para luego ser fotografiadas.

Todas las fotomicrografías fueron tomadas a través del microscopio óptico marca Olympus PMG 3 equipado con una pantalla digital marca JVC modelo TK-C13800.

#### **2.10.2.2.- Análisis Macrográfico y Dilución**

Con el objetivo de establecer e identificar visualmente, las diferentes zonas de la soldadura (materiales base, cordón de soldadura y zonas afectadas térmicamente), así como la ubicación del cordón con respecto al diseño de junta, la penetración lateral, ancho y altura tanto de cara como de raíz y el porcentaje de dilución, se realizó la macrografía a la junta soldada. La preparación de la probeta para macrografía se realizó de acuerdo al mismo procedimiento descrito para el estudio macrográfico de los depósitos seleccionados para la caracterización de los cordones sobre chapa plana. Las probetas, luego de su preparación, fueron fotografiadas mediante una cámara digital, para su posterior uso en la determinación de la dilución y demás características geométricas. El cálculo de estos parámetros geométricos tales como área del cordón, área de penetración lateral, refuerzo de cara y refuerzo de raíz se realizaron de acuerdo a lo indicado en las figura 2.15 y 2.16, las cuales muestran de manera esquemática la forma del análisis macrográfico y el esquema utilizado para realizar los cálculos correspondientes.

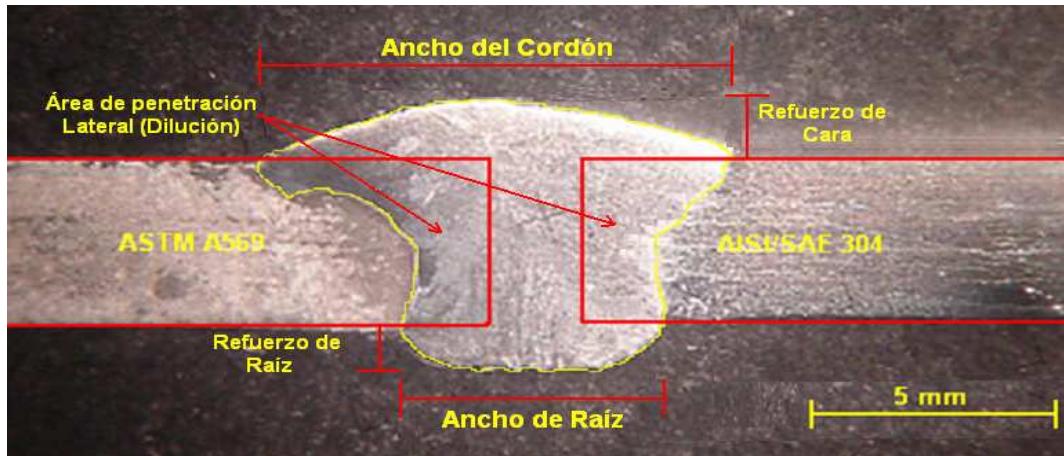


Figura 2.15.- Parámetros geométricos del cordón de soldadura.

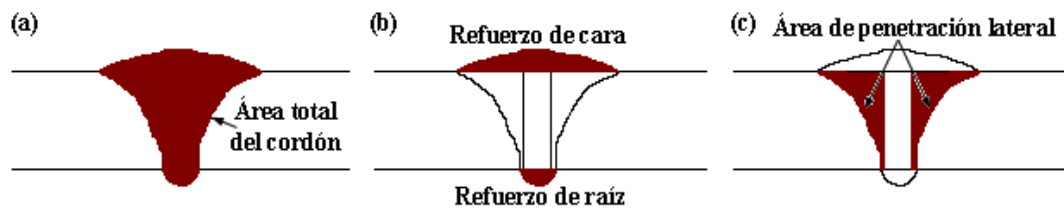


Figura 2.16.- Esquema general utilizado para el cálculo de las relaciones de áreas, penetración y dilución en el cordón de soldadura.

### 2.10.3.- Medición del Contenido de Ferrita

#### 2.10.3.1.- Método Metalográfico

Al igual que con los materiales base, se utilizó el programa analizador de imagen Digital MicroGraph Versión 3.4.2. Se analizó la fotomicrografía tomada a la zona central del cordón de soldadura (figura 3.33). La probeta fue atacada con una solución electrolítica de ácido oxálico (10 g de ácido en 100 ml de agua) en condiciones de 6V durante 15 segundos. El programa calculó el número de píxeles de la imagen que abarca las áreas oscuras (ferrita), se procede a una relación entre píxeles que revela directamente una relación porcentual entre las distintas fases presentes en la fotomicrografía analizada.

### 2.10.3.2.- Método Químico

Basándose en la caracterización química realizada al depósito o cordón de soldadura, se determinó el contenido de ferrita utilizando el diagrama de Schaeffler [13], con la metodología específica para la estimación de contenido de ferrita en el cordón de soldadura para soldadura disímil.

Este análisis fue realizado de igual modo que en el ítem 2.3.2, con la diferencia que aquí se analiza el cordón de soldadura en vez de los materiales base y aporte.

### 2.10.4.- Ensayo de Dureza

#### 2.10.4.1.- Microdureza

Este ensayo se realizó según la norma ASTM E384<sup>(34)</sup>. Se realizaron un total de sesenta y seis (66) mediciones de dureza sobre la probeta usada para la caracterización microestructural, repartidas en dos líneas rectas, es decir 33 indentaciones en cada barrido, con una separación de 0,70 mm entre indentación, empleando un Microdurómetro marca Leitz Wetzlar modelo 7520 Metallux, aplicando una carga de 100 gf, y un indentador de forma piramidal (Vickers), ubicado en el Laboratorio de Metrología de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV. La figura 2.17, representa la ubicación de las mediciones de dureza en la probeta.



Figura 2.17.- Esquema del barrido de microindentaciones realizado en la junta soldada.



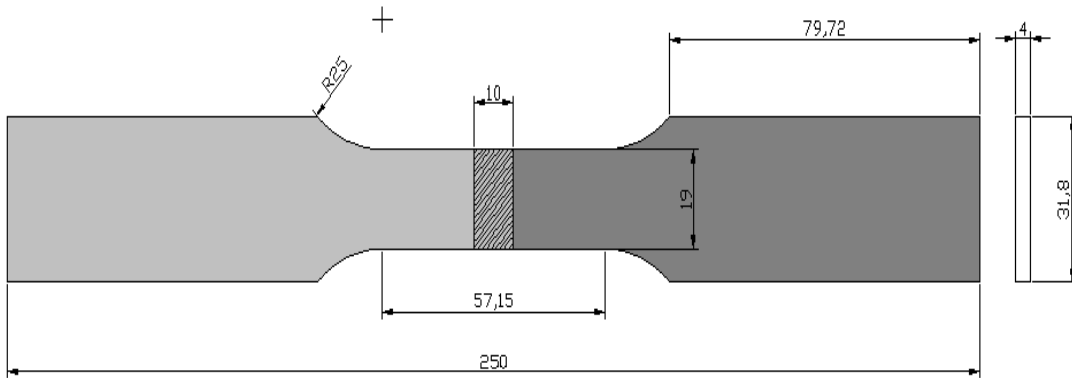
Figura 2.18.- Microdurómetro marca Leitz Wetzlar, modelo 7520 Metallux, utilizado en el ensayo de microdureza de la junta soldada.

#### **2.10.5.- Ensayo de Tracción**

Para la realización de los ensayos de tracción de la junta soldada se elaboraron dos probetas en el taller mecánico de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV. Los ensayos se realizaron en la maquina universal de ensayos del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la UCV, la misma utilizada para los ensayos de tracción de los materiales base.

Igualmente, la preparación de las probetas previo montaje en la máquina de tracción, fue la misma que se utilizó para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales base, diferenciándose sólo en las dimensiones de las probetas, tal y como se muestra en la figura 2.19, donde se observan las dimensiones de las probetas utilizadas para evaluar las propiedades mecánicas de la junta, según la norma AWS B2.1:1998<sup>(35)</sup>, referente a Especificación para Procedimiento de Soldadura y Resultados de Calificación. De igual manera, en la figura 2.20 se ilustran las probetas de tracción maquinadas y pulidas.





Probeta de Traccion (junta soldada), Medidas en milímetros (mm) Norma AWS B2.1:1998

Figura 2.19.- Diseño de probeta para ensayo de tracción de la junta soldada según norma AWS B2.1:1998.

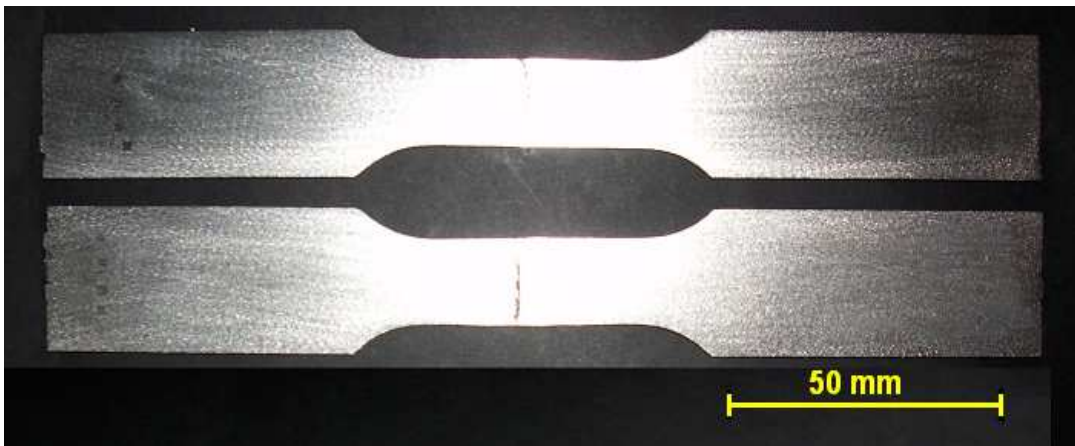
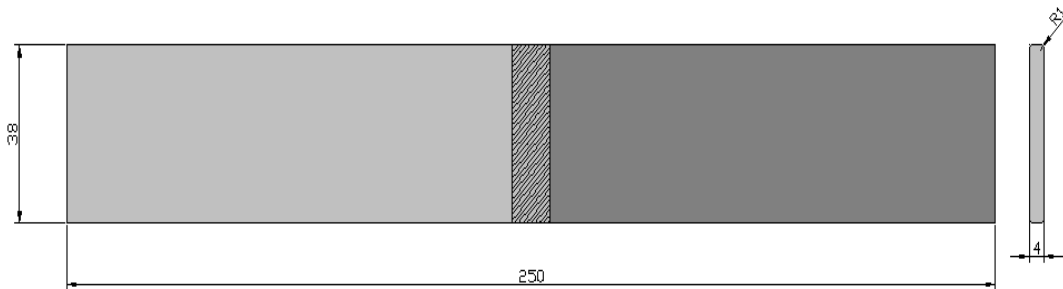


Figura 2.20.- Probetas de traccion utilizadas en el ensayo de tracción de junta soldada.

El ensayo tuvo como finalidad determinar para cada probeta los valores de esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ) definido a 0,2% de la deformación (0,002 mm/mm de deformación) y el esfuerzo nominal a carga máxima o resistencia a la tracción ( $S_{max}$ ). Finalmente se reportó la elongación máxima para el  $L_o$  de la probeta ( $L_o = 50$  mm). Por último, se calcularon los promedios de estos valores con su respectiva desviación estándar (DE).

### 2.10.6.- Ensayo de DobleZ

Para la realización de este ensayo se elaboraron cuatro probetas según el párrafo QW- 462.3(a) del Código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX, éste contempla como medidas la señaladas en la figura 2.21.



Probeta de DobleZ de Cara y Raíz (Junta soldada). Medidas en milímetros (mm). Norma Código ASME sección IX QW-462.3(a)

Figura 2.21.- Diseño de probeta para ensayo de doblez (cara y/o raíz) de la junta soldada según QW-462.3(a) del Código ASME, Sección IX.

De las cuatro probetas elaboradas, dos fueron destinadas para doblez transversal de cara, mientras que las otras dos para la realización del doblez transversal de raíz como se ilustra en la figura 2.22. El equipo usado para llevar a cabo estos ensayos fue una Máquina Universal de Ensayos BALDWIN Tate-Emery Load Indicator, la misma usada para los ensayos de tracción tanto de los materiales base como de junta soldada, pero esta vez acondicionada para dicho ensayo de doblez, ubicada en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la UCV.

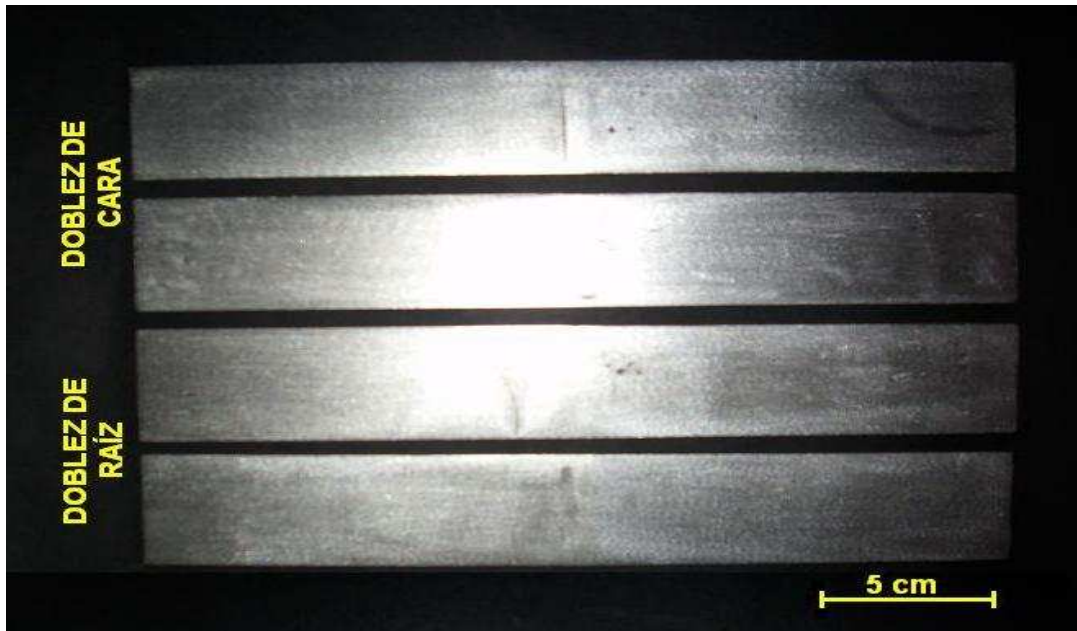


Figura 2.22.- Probetas utilizadas en el ensayo de doblez de cara y raíz de la junta soldada según QW-462.3(a) del Código ASME, Sección IX.



Figura 2.23.- Máquina Universal de Ensayos BALDWIN Tate-Emery Load Indicator, utilizada en los ensayos de doblez de la junta soldada.

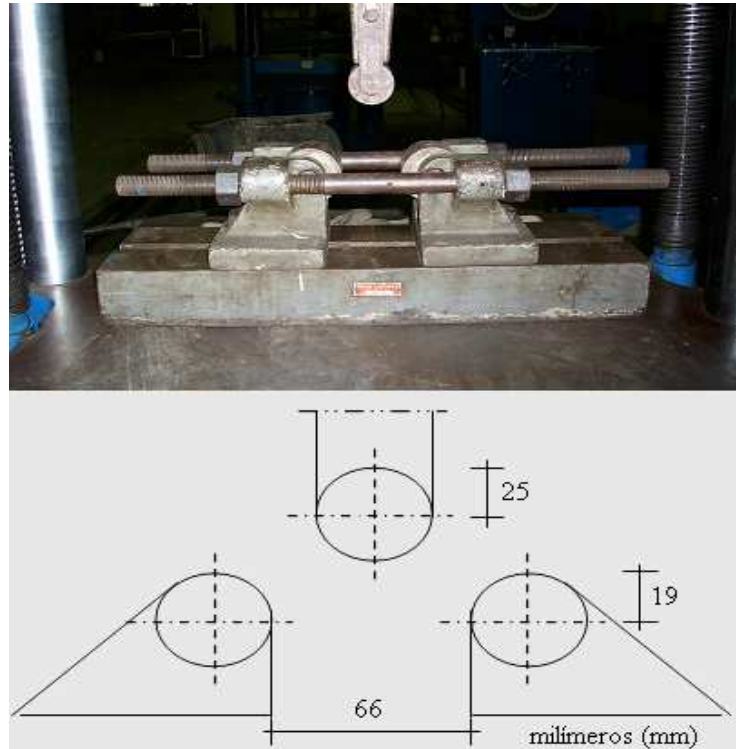


Figura 2.24.- Arriba. Rodillos de la Máquina Universal de Ensayos BALDWIN, utilizada en los ensayos de doblé de la junta soldada. Abajo, dimensiones de los rodillos utilizados para el ensayo de doblé, según lo especificado en QW- 466.1 del Código ASME, Sección IX.

### 2.11.- Registro de Calificación de Procedimiento (RCP)

Una vez realizados los ensayos requeridos para caracterizar la junta disímil soldada de aceros AISI/SAE 304 y ASTM A569, se procedió a realizar el Registro de Calificación de Procedimiento en donde se reportaron las variables esenciales del procedimiento utilizado, 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 otras. El mismo se formalizó sobre los formatos elaborados por el Centro Venezolano de Soldadura.

# **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

## **CAPÍTULO III**

### 3.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1.- Caracterización Química de los Materiales Base y Material de Aporte

En la tabla 3.1, se reportan los resultados obtenidos de los análisis químicos realizados al metal base ASTM A569 y su composición nominal según la norma ASTM A1011<sup>(5)</sup>. El Reporte del Laboratorio se incluye en el Anexo de las figuras 8.1 y 8.2.

Tabla 3.1.- Composición Química del Material Base ASTM A569 (% en peso).

ASTM A569	% C	% S	% Cr	% Ni	% Mn	% Cu	% Mo	% Si
Análisis Q	0,050	0,016	0,01	0,07	0,22	0,02	0,05	0,05
Norma	0,02-0,15	0,035	0,15	0,20	0,60	0,20	0,06	---

En la tabla 3.2, se muestran los resultados del análisis químico efectuado al metal AISI/SAE 304, con su composición nominal según la norma AISI/SAE ó su equivalente ASTM A240<sup>(37)</sup>.

Tabla 3.2.- Composición Química del Material Base AISI/SAE 304 (% en peso).

AISI 304	% C	% S	% Cr	% Ni	% Mn	% P	% Si	% N
Análisis Q	0,044	0,004	17,93	7,89	2,00	-	0,66	-
Norma	0,07	0,030	17,5 -19,5	8,0 -10,5	2,00	0,045	0,75	0,10

En la tabla 3.3 se reporta el análisis químico realizado y la composición nominal del material de aporte (ER309L), según lo detallado por el fabricante que rige la norma AWS A5.9<sup>(21)</sup>.

Tabla 3.3.- Composición Química del Material de Aporte ER309L (% en peso).

ER309L	% C	% S	% Cr	% Ni	% Mn	%Mo	% Si
Análisis Q	0,019	0,001	22,03	14,38	1,43	0,14	0,47
Norma	0,03	0,03	23,0-25,0	12,0-14,0	1,0 - 2,5	0,75	0,30 - 0,65

### **3.2.- Caracterización Metalográfica de los Materiales Base**

En la figura 3.1 se observan las fotomicrografías tomadas al material base ASTM A569 en sentido longitudinal (A) y en sentido transversal al de laminación (B), en las mismas se identifican las fases presentes típicas del acero al carbono, con una presencia de granos ferríticos (áreas claras) bordeados por perlita (líneas y áreas oscuras), atacadas con una solución de Nital al 2 %, el cual oscurece la perlita y revela los límites de grano de la ferrita.

Para la figura 3.2, se muestra la caracterización metalográfica del acero inoxidable AISI/SAE 304, en sentido transversal (A) y longitudinal (B) 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), estas muestras fueron atacadas con una solución electrolítica que oscureció la ferrita y reveló la austenita presente.

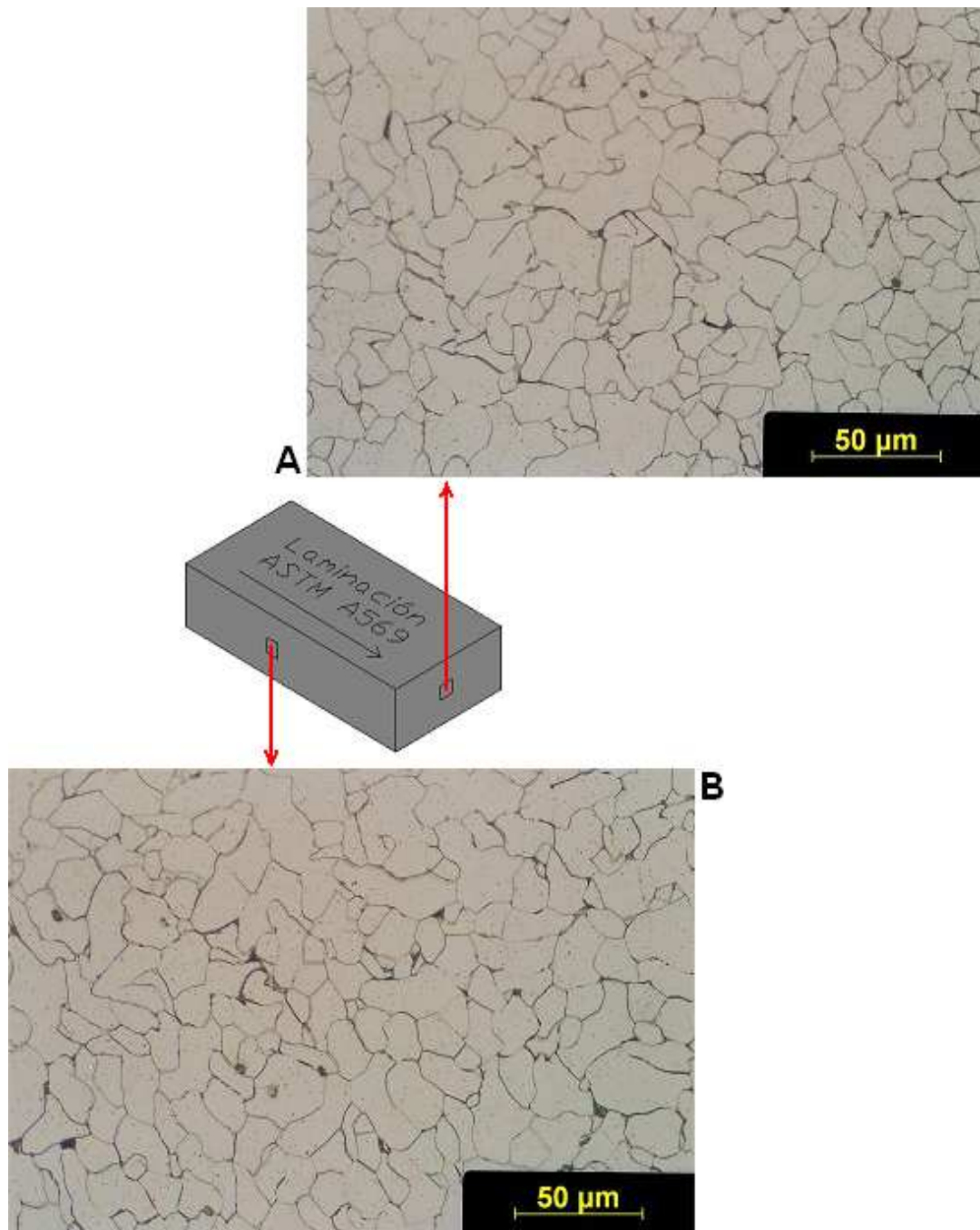


Figura 3.1.- Microestructura del material base ASTM A569 en: A.- Dirección transversal al sentido de laminación. B.- Longitudinal. En todas las micrografías la matriz clara representa la Ferrita y el área y líneas oscuras representa la Perlita.



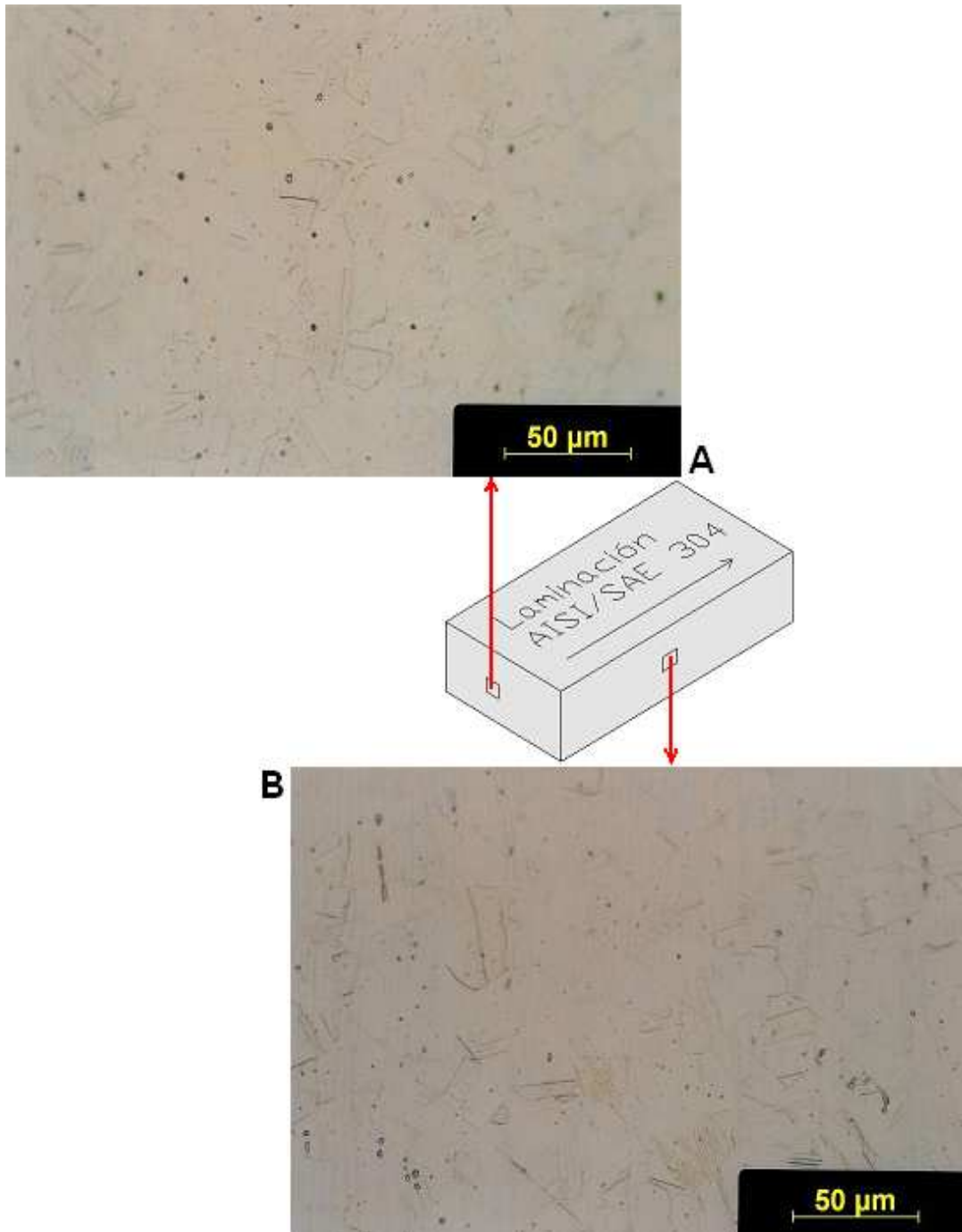


Figura 3.2.- Microestructura del material base AISI/SAE 304 en: A.- Dirección transversal al sentido de laminación. B.- Longitudinal. En las micrografías A y B, la matriz clara representa la Austenita y el área oscura representa la Ferrita.

### 3.3.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base y Aporte

#### 3.3.1.- Método Metalográfico

Para determinar el contenido de ferrita de los materiales base se utilizaron las fotomicrografías mostradas en las figuras 3.1 y 3.2, correspondientes a los materiales base AISI/SAE 304 y ASTM A569, los valores obtenidos se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base (Método Metalográfico).

	Medición	Contenido de Ferrita (%)
Material Base ASTM A569	Medida 1	79,84
	Medida 2	77,52
	Medida 3	81,36
	Promedio	82,90
	Desviación Estándar	± 5,63
Material Base AISI/SAE 304	Medida 1	6,80
	Medida 2	6,67
	Medida 3	7,11
	Promedio	6,86
	Desviación Estándar	± 0,16

#### 3.3.2.- Método Químico

Con las composiciones químicas de los materiales bases (ASTM A569 y AISI/SAE 304) y aporte (ER309L), se determinaron los contenidos de ferrita, empleando el diagrama de Schaeffler (figura 3.3). Para ello se calculó el Níquel equivalente ( $N_{eq}$ ) y el Cromo equivalente ( $Cr_{eq}$ ) presentes en cada material de acuerdo a las fórmulas indicadas, donde los elementos son expresados en porcentaje en peso.

Tabla 3.5.- Contenido de Ferrita en los Materiales Base y Material de Aporte según el Método Químico.

	Material Base ASTM A569	Material Base AISI/SAE 304	Material de Aporte ER309L
Diagrama de Schaeffler	$Cr_{eq}$ (%)	0,14	18,92
	$N_{eq}$ (%)	1,69	10,21
	Ferrita (%)	-	≈ 7

Datos tomados del Diagrama de Schaeffler, tal como se muestra a continuación.

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

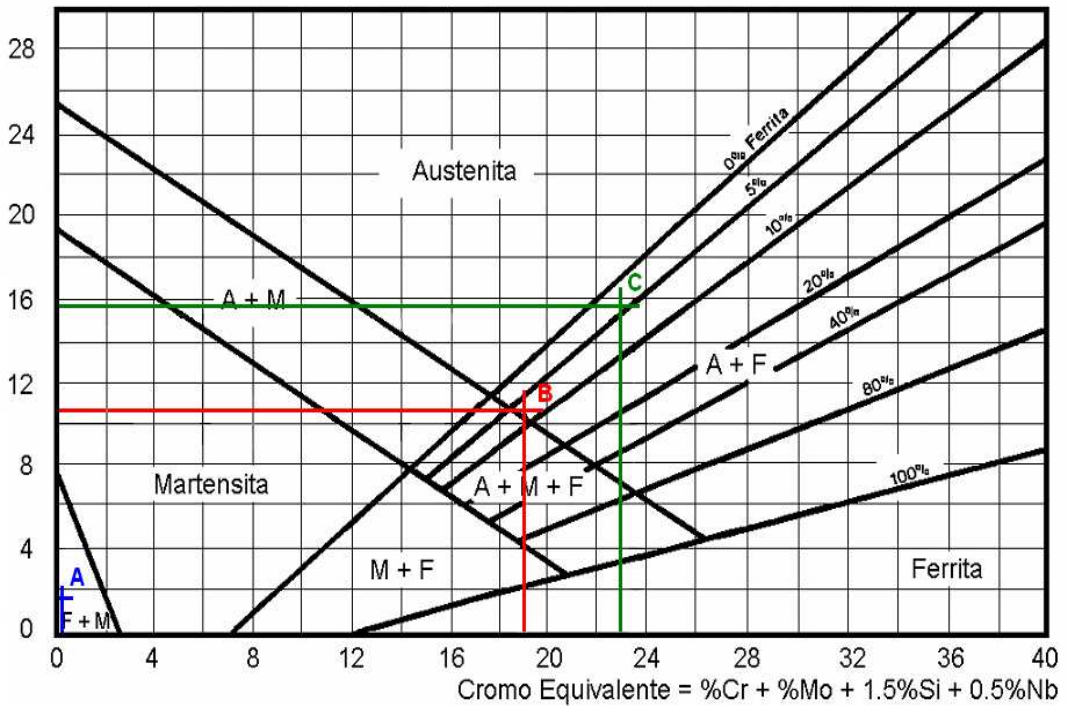


Figura 3.3.- Diagrama de Schaeffler, donde A indica el % de Ferrita del material base ASTM A569, B indica el % de Ferrita del material base AISI/SAE 304, y C el % de Ferrita del material de aporte ER309L.

### 3.4.- Caracterización Mecánica de los Materiales Base

#### 3.4.1.- Ensayos de Dureza

Para el ensayo de dureza de los materiales base, se tomó una muestra de cada material (AISI/SAE 304 y ASTM A569) y en cada una de ellas se realizaron 7 mediciones en la dirección de laminación con un indentador de forma esférica de 1/16 pulg. (1,588 mm) de diámetro (Rockwell B). Los resultados obtenidos son reportados en la tabla 3.6, que se muestra a continuación.

Tabla 3.6.- Valores de Dureza Rockwell B (HRB) de los Materiales Base.

Probeta	Valores de Dureza Rockwell B							Promedio	Desviación Estándar
ASTM A569	66	69	69	67	69	68	69	68,14	± 0,98
AISI/SAE 304	91	89	92	93	90	92	91	91,14	± 1,02

#### 3.4.2.- Ensayo de Tracción

Los resultados de los ensayos de tracción de los materiales base se presentan en la tabla 3.7 y las curvas esfuerzo vs deformación en las figuras 3.4 y 3.5.

Tabla 3.7.- Resultados de los Ensayos de Tracción realizados a los Materiales Base AISI/SAE 304 y ASTM A569.

ASTM A569	$S_y$ (MPa)	$S_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Elongación (%)
NORMA ASTM A1011	205 - 340	-	≥ 25
Probeta 1	282,4	358,92	38,2
Probeta 2	296,2	364,81	37,6
Probeta 3	294,2	372,65	32
Promedio	290,93	365,46	35,80
Desviación Estándar	± 5,69	± 4,80	± 2,53
AISI/SAE 304	$S_y$ (MPa)	$S_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Elongación (%)

NORMA ASTM A240	205	515	40
Probeta 1	353	660,97	52
Probeta 2	329,5	678,62	56
Probeta 3	353	666,85	56
Promedio	345,17	668,81	54,67
Desviación Estándar	± 10,44	± 6,54	± 1,78

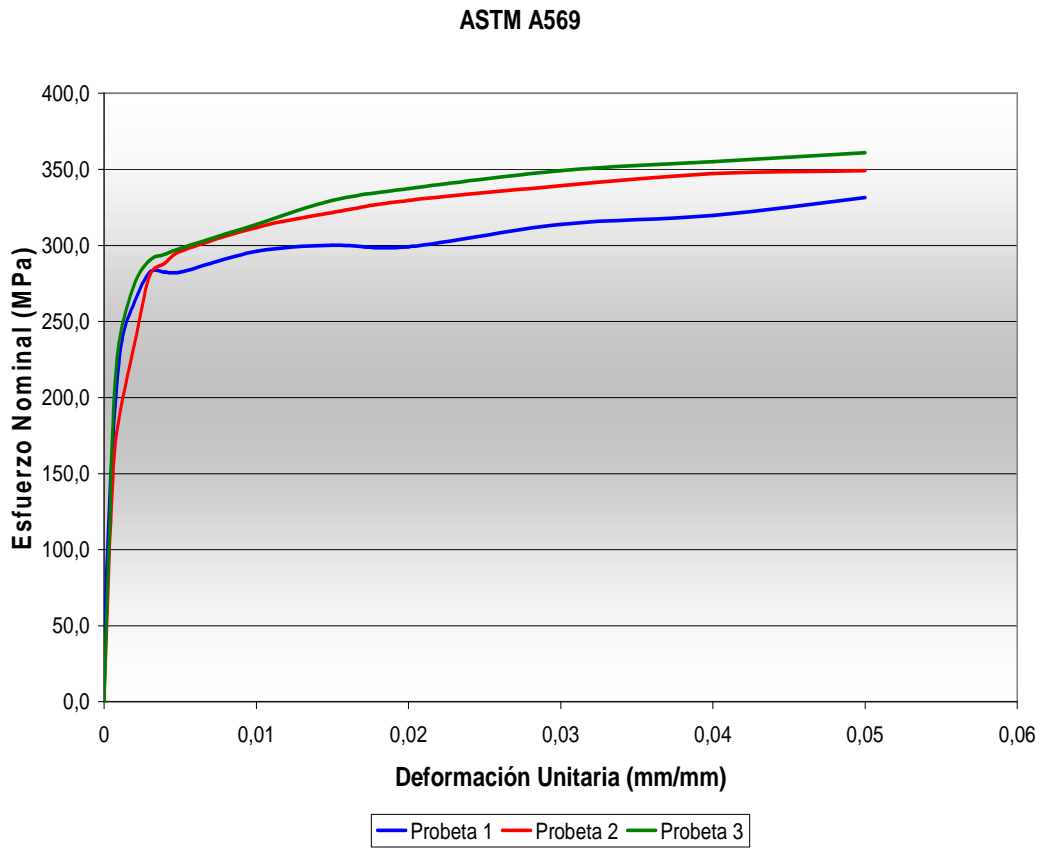


Figura 3.4.- Curvas de esfuerzo (S) vs deformación (e) para tres pruebas del material base de Acero al Carbono ASTM A569.

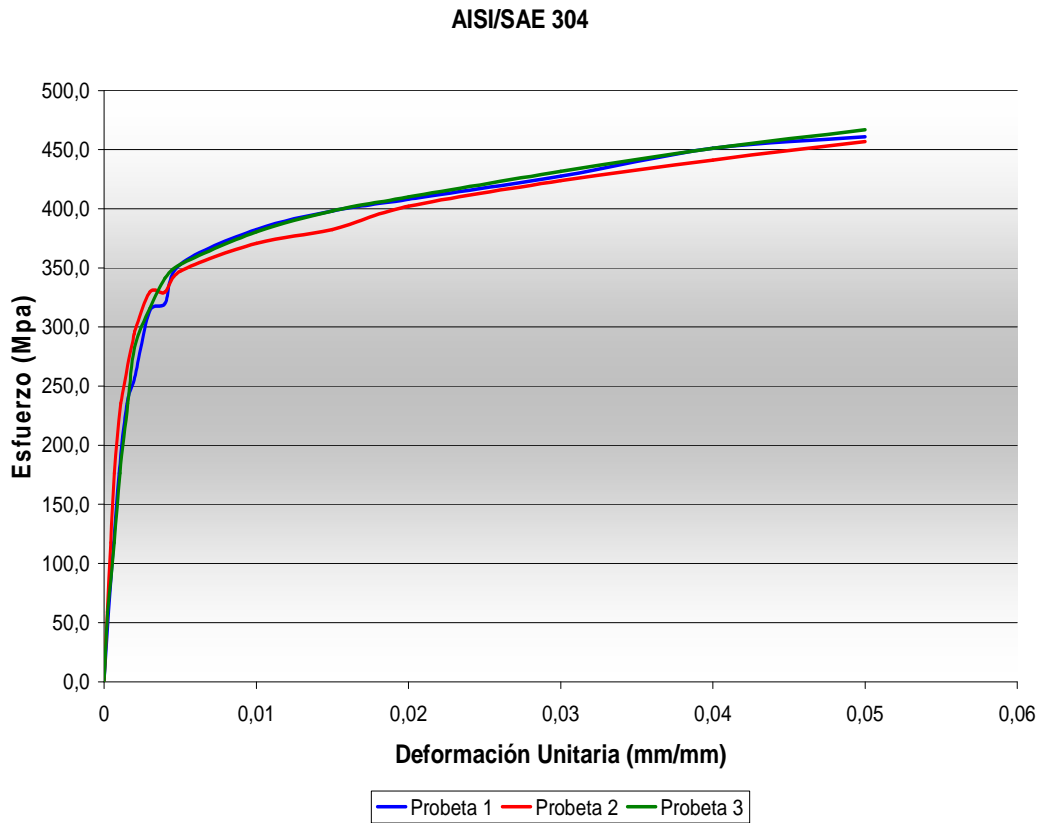


Figura 3.5.- Curvas de esfuerzo (S) vs deformación (e) para tres pruebas del material base de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304.

### 3.5.- Determinación de los Parámetros del Proceso de Soldadura GMAW-P

#### 3.5.1.- Criterio de Burnoff

A partir de los ensayos de soldadura realizados con modo de corriente pulsada (transferencia pulsada) y corriente constante (transferencia corto-circuito) se obtuvieron los datos de las mismas, que se muestran en la tabla 3.8, en función de los cuales se construyó la gráfica representada en la Fig. 3.6.

Tabla 3.8.- Datos de la gráfica que representa el criterio de Burnoff para el material de aporte ER309L.

Corriente Pulsada		Corriente Constante	
$W_F$ (m/min.)	$I_m$ (A)	$W_F$ (m/min.)	$I_m$ (A)
2	70	2	83
4	130	4	144
6	180	6	216
8	240	8	238,89
10	324	10	255,37

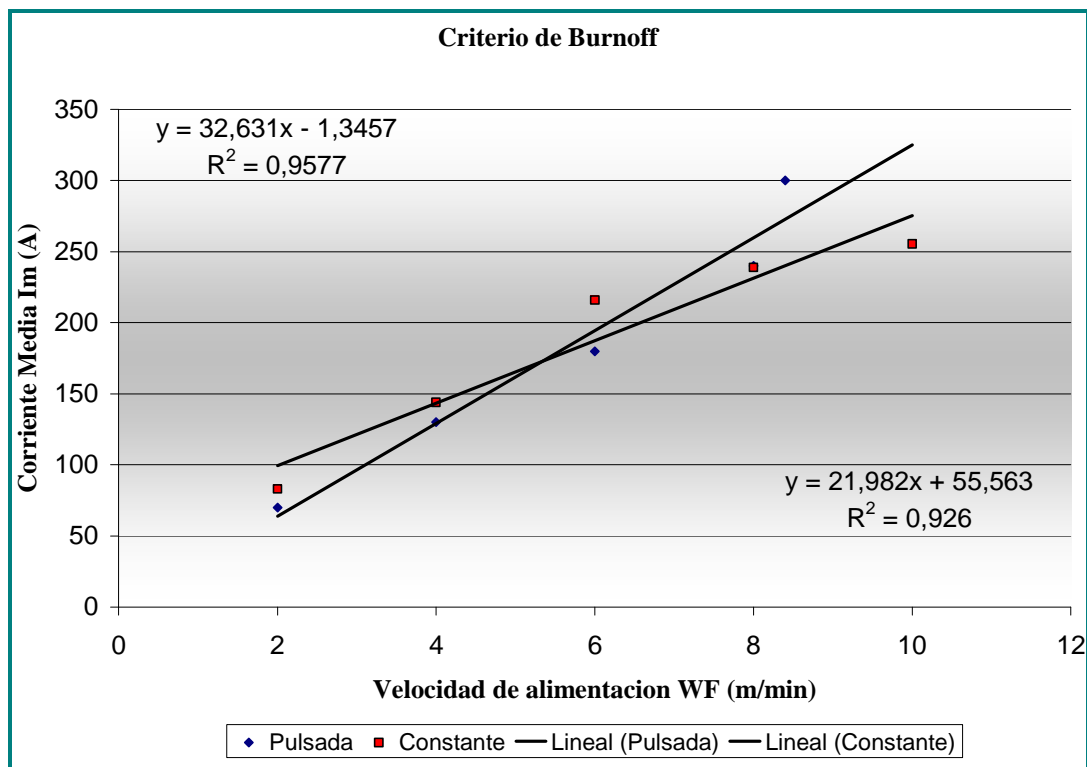


Figura 3.6.- Relación entre  $I_m$  vs  $W_F$  para soldadura con corriente constante y pulsada usando un aporte ER309L de diámetro 1,2 mm.

El punto de corte de las dos rectas representadas en la figura 3.6, ocurre en  $W_F = 5,34$  m/min, el cual representa según Rajasekaran <sup>[26]</sup> el posible valor de la

corriente de transición para este tipo de material de aporte. Las ecuaciones para las rectas obtenidas, una para corriente pulsada y otra para corriente constante son:

Corriente Pulsada

$$y = 32,631x - 1,3457 \quad [24]$$

Corriente Constante

$$y = 21,982x + 55,563 \quad [25]$$

Teniendo el volumen de la gota calculado por la ecuación [10], ( $V = 0,905 \text{ mm}^3$ ), y usando la ecuación [11] para hallar el tiempo de ciclo con  $W_F = 6 \text{ m/min}$  se obtuvo  $T_c = 8 \text{ ms}$ . Luego tomando el valor de la pendiente ( $m$ ) y el punto de corte con las ordenadas ( $c$ ) de la ecuación de corriente pulsada [24], y sustituyendo en la ecuación [8] ( $Im = mW_F + c$ ), se calculó el valor de  $Im$  para la  $W_F$  a estudiar. Por último, con la ecuación [13], se obtuvo la zona paramétrica preliminar representada en la figura 3.7, para la velocidad de alimentación  $W_F = 6 \text{ m/min}$  respectiva.



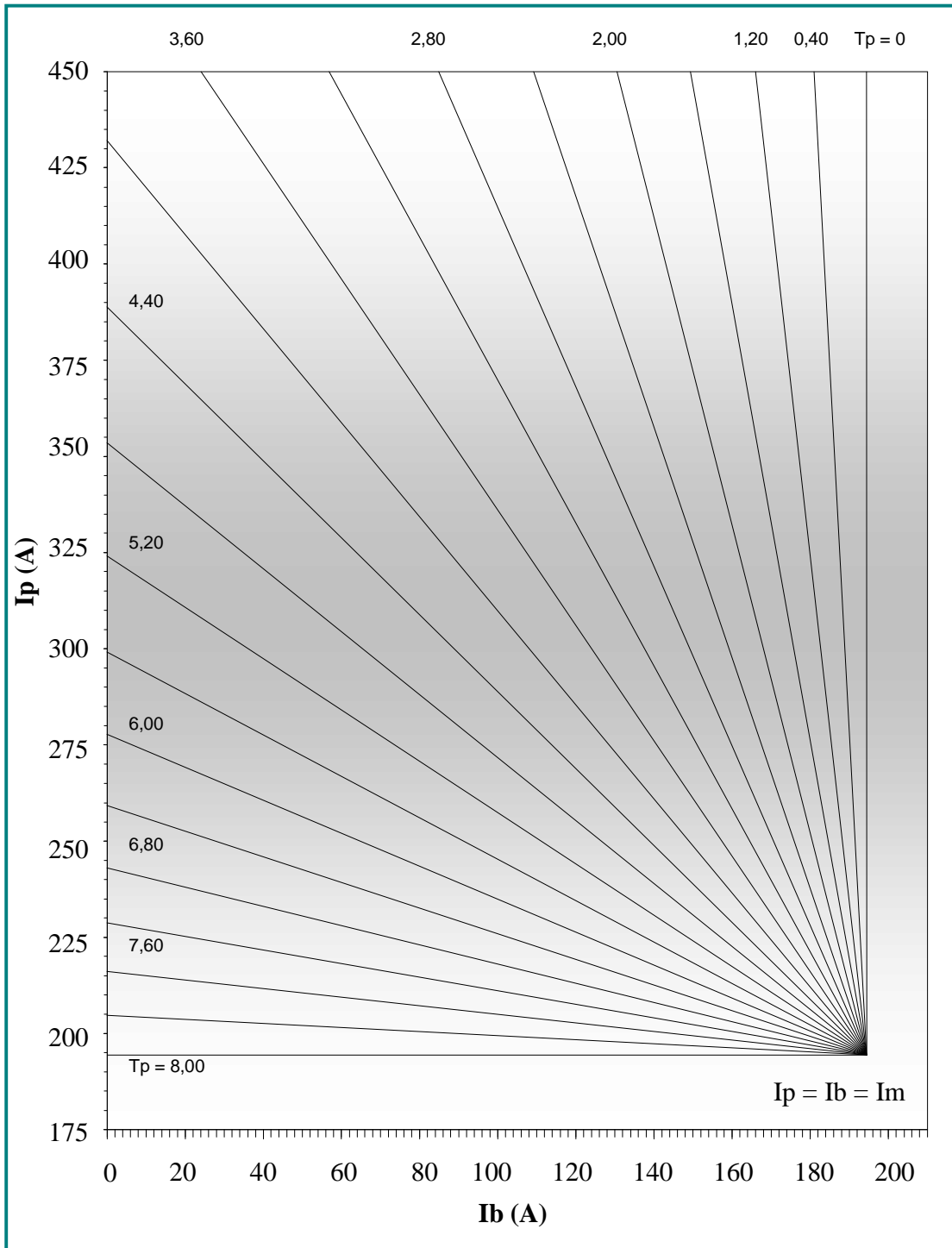


Figura 3.7.- Zona paramétrica preliminar según el Criterio de Burnoff para condiciones de  $W_F = 6$  m/min.;  $I_m = 194,44$  A;  $T_C = 8$  ms.

**3.5.2.- Criterio de Transferencia Metálica**

**3.5.2.1.- Limitación de la Corriente Pico (Ip) y Tiempo Pico (Tp)**

Los parámetros de combinaciones Ip vs Tp que proporcionaron el desprendimiento de una gota por pulso para la velocidad de alimentación estudiada  $W_F$ , se ilustran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9.- Parámetros (Ip - Tp) que ofrecen una gota por pulso para  $W_F = 6,0$  m/min.

$W_F = 6$ m/min			
Tp (ms)	Tb (ms)	Ip (A)	Ib (A)
1,4	6,6	430	171,3
1,5	6,5	410	171,93
1,4	6,6	410	175,54
1,3	6,7	430	177,04
1,3	6,7	440	173,22
1,4	6,6	435	170,24
1,3	6,7	425	176,13
1,2	6,8	435	178,02

La relación potencial existente se expresa en la figura 3.8 con su respectiva ecuación de ajuste. El valor de gota calculado por la ecuación [10] arrojó como resultado  $V = 0,905$  mm<sup>3</sup>, utilizando un electrodo de diámetro de 1,2 mm.

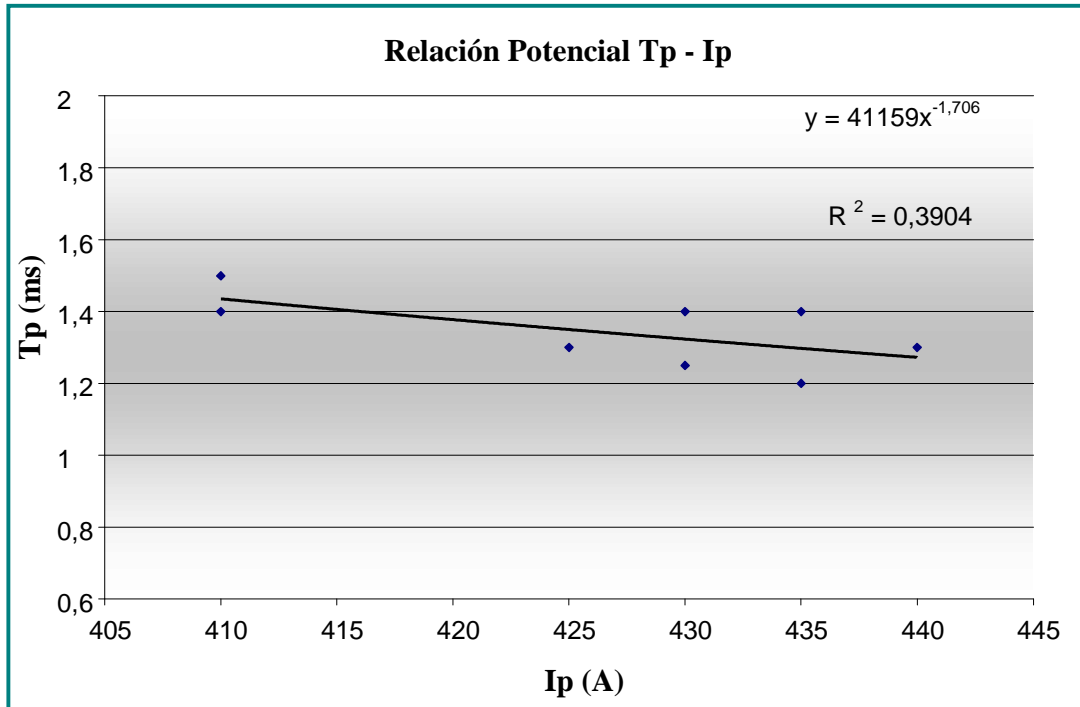


Figura 3.8.- Relación potencial entre Ip y Tp para la condición de una gota promedio por pulso para un volumen de gota desprendida de 0,905 mm<sup>3</sup> de material de aporte ER309L.

Obteniéndose la siguiente ecuación a partir de la gráfica anterior:

$$y = 41159x^{-1,706} \quad (\text{Para } W_F = 6 \text{ m/min.}) \quad [26]$$

Usando la ecuación [14] y con  $-m = 1,706$  se tiene:

$$Ip^{1,706}Tp = Kv \quad [27]$$

### 3.5.2.2.- Determinación del Parámetro de Desprendimiento (Kv)

Los parámetros que aseguran una transferencia tipo spray en corriente constante para una  $W_F$  seleccionada se reflejan en la tabla 3.10 para cuatro condiciones distintas. Mientras que en las figuras 3.9 a la 3.12, se muestran los oscilogramas típicos para este tipo de soldadura. El efecto de la inductancia ( $K_s$  y  $K_d$ ), es importante en la soldadura GMAW convencional o con corriente constante, influyendo directamente en la formación de salpicaduras y en la estabilidad de arco.

Los valores asumidos de la inductancia de subida ( $K_s$ ) y de descenso ( $K_d$ ), se detallan en la tabla 3.10 para transferencia Spray.

Tabla 3.10.- Parámetros de soldadura con corriente constante y transferencia tipo spray para la determinación de  $K_v$ .

Pruebas	$W_F$ (m/min)	$I_m$ (A)	$U_{ref}$ (V)	$K_s$	$K_d$
1	4	174	30	15	15
2	6	222	31	15	15
3	8	261	32	15	15
4	10	332	33	15	15

Los valores de  $I_m$  reportados en la tabla 3.10, corresponden a los observados en los equipos auxiliares externos (amperímetro). Los valores de  $I_{dc}$  de la tabla 3.11, corresponden a la señal promedio de la corriente en los oscilogramas del programa Oscilos4.

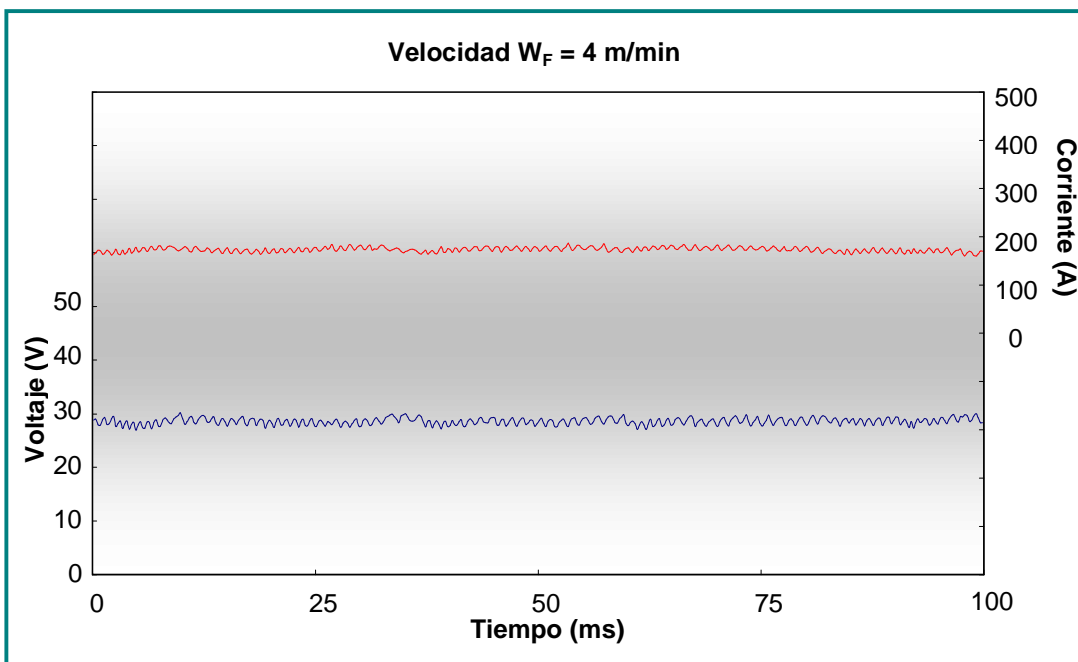


Figura 3.9.- Oscilograma ( $W_F = 4$  m/min;  $I_m = 173,96$  A;  $V_m = 30$  V;  $K_s = K_d = 15$ ).

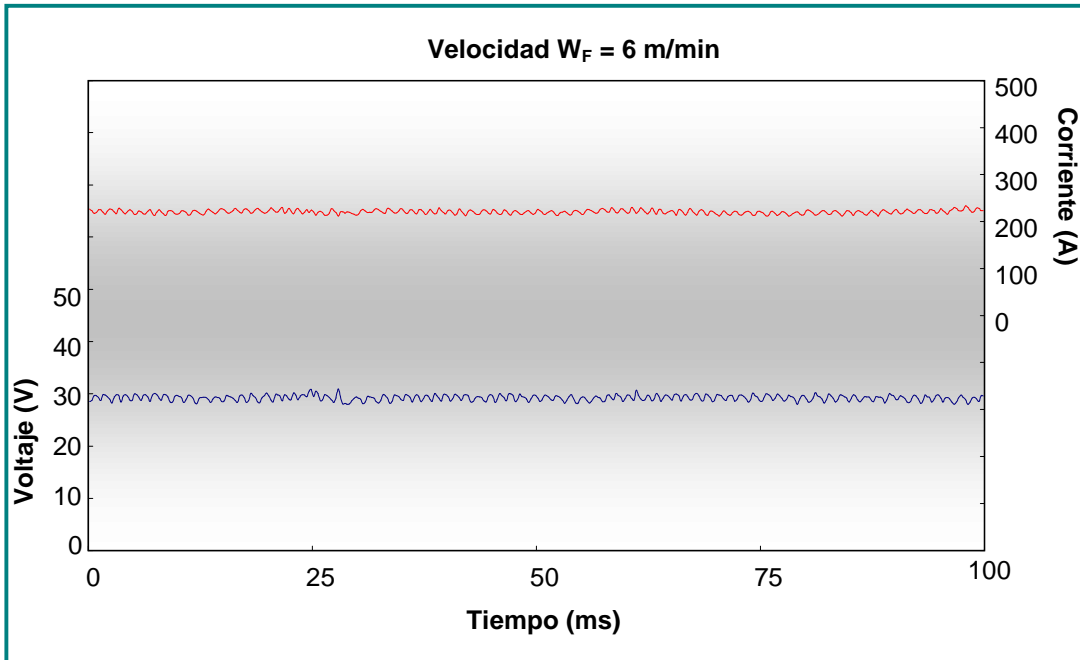


Figura 3.10.- Oscilograma ( $W_F = 6$  m/min;  $I_m = 220,70$  A;  $V_m = 31$  V;  $K_s = K_d = 15$ ).

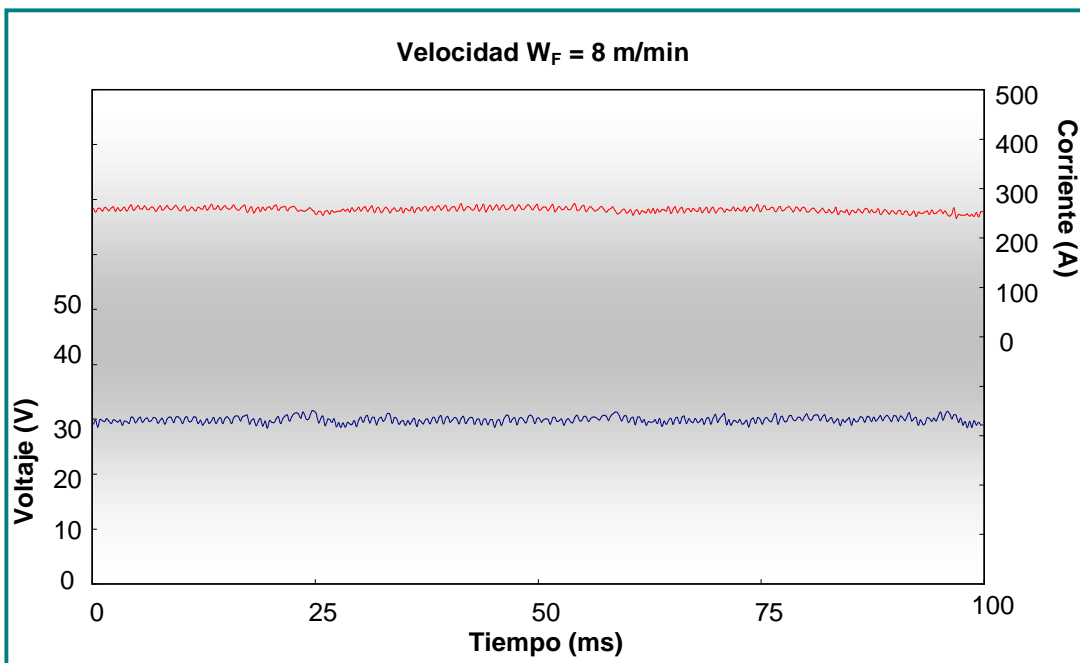


Figura 3.11.- Oscilograma ( $W_F = 8$  m/min;  $I_m = 261,15$  A;  $V_m = 32$  V;  $K_s = K_d = 15$ ).

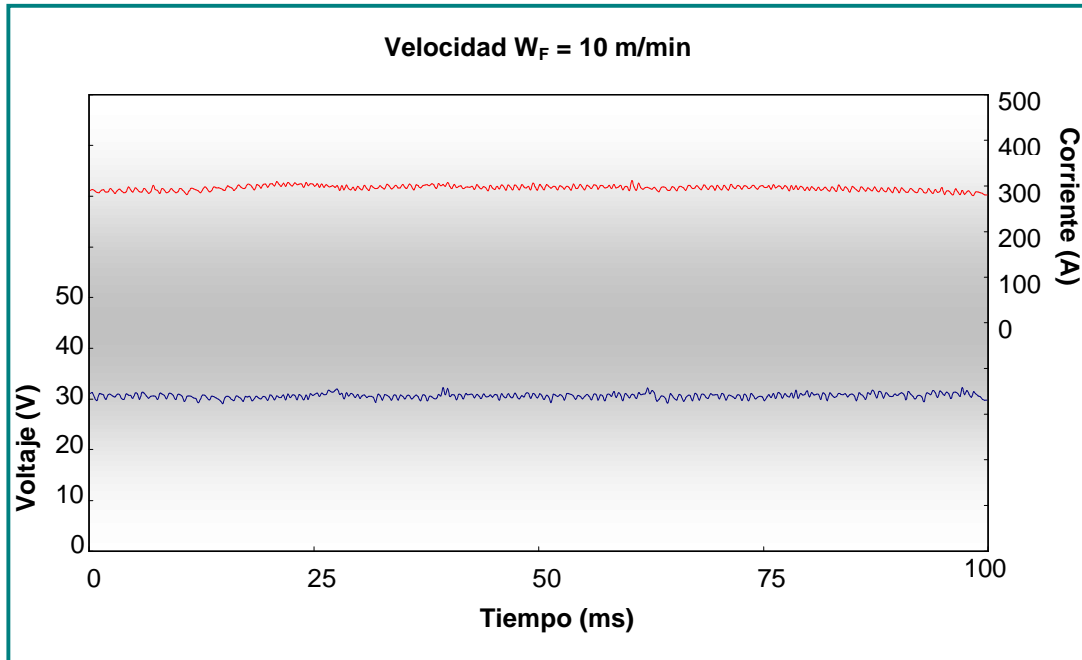


Figura 3.12.- Oscilograma ( $W_F = 10$  m/min;  $I_m = 297,17$  A;  $V_m = 33$  V;  $K_s = K_d = 15$ ).

Los valores de la corriente media constante  $I_{dc}$ , se extraen a partir de los oscilogramas anteriores. Los valores de tiempo de desprendimiento modal  $T_{dm}$  se obtienen de los oscilogramas representados en las figuras 3.13 a la 3.16; por último, conociendo  $T_{dm}$ , se obtiene de la ecuación [15], el valor de  $V_{dm}$  para cada  $W_F$ .

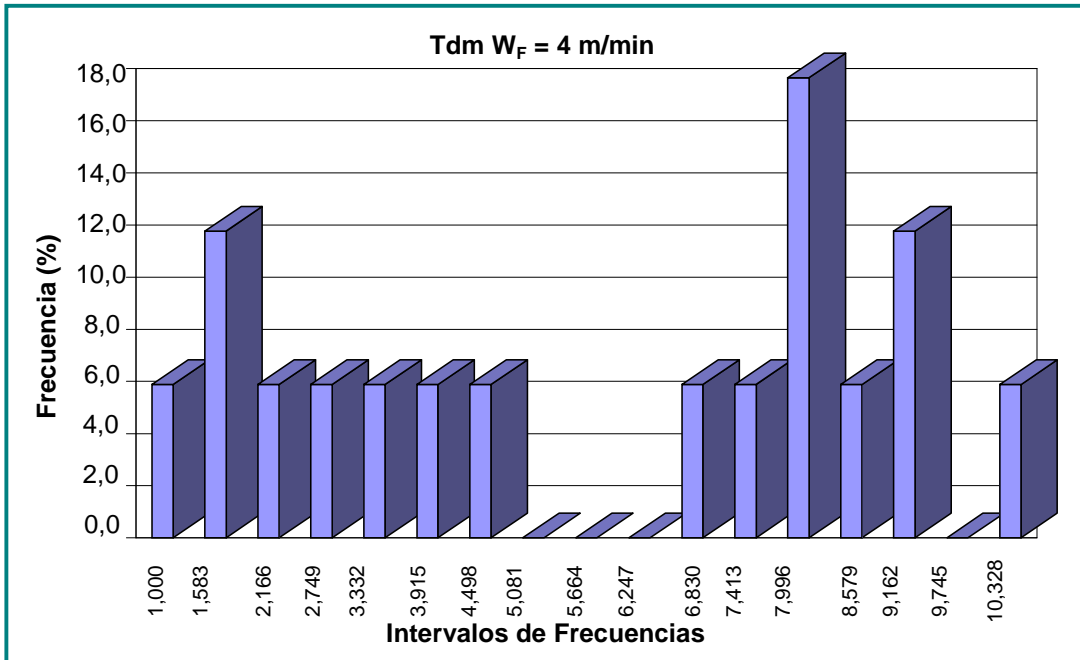


Figura 3.13.- Histograma Tdm = 7,996 ms ( $W_F = 4$  m/min;  $I_m = A$ ;  $V_m = 30$  V).

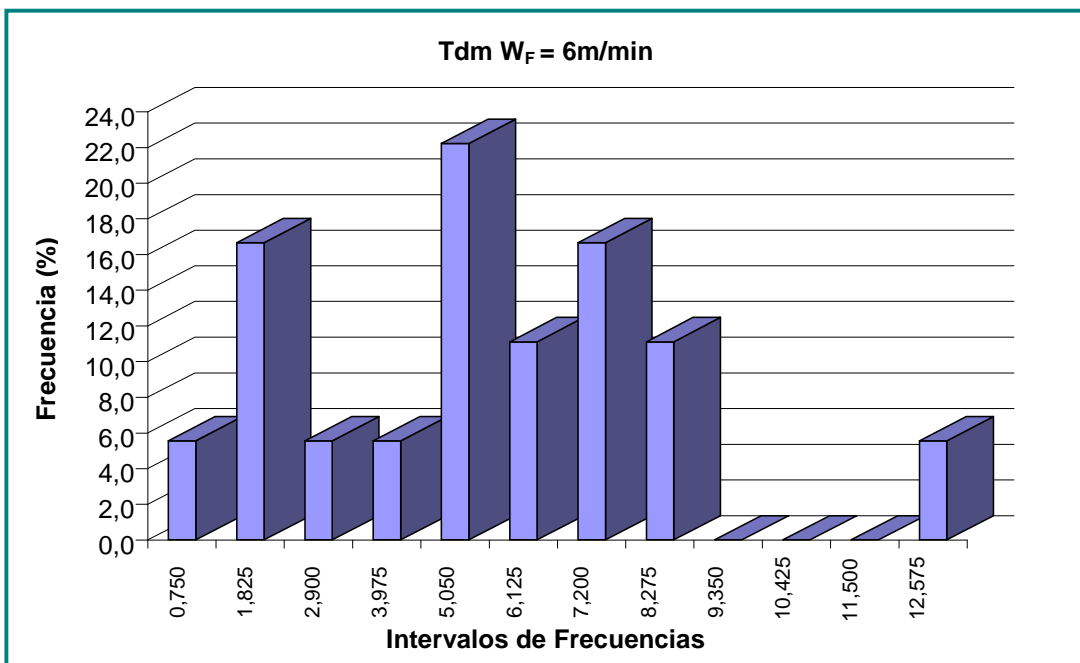


Figura 3.14.- Histograma Tdm = 5,050 ms ( $W_F = 6$  m/min;  $I_m = A$ ;  $V_m = 32$  V).

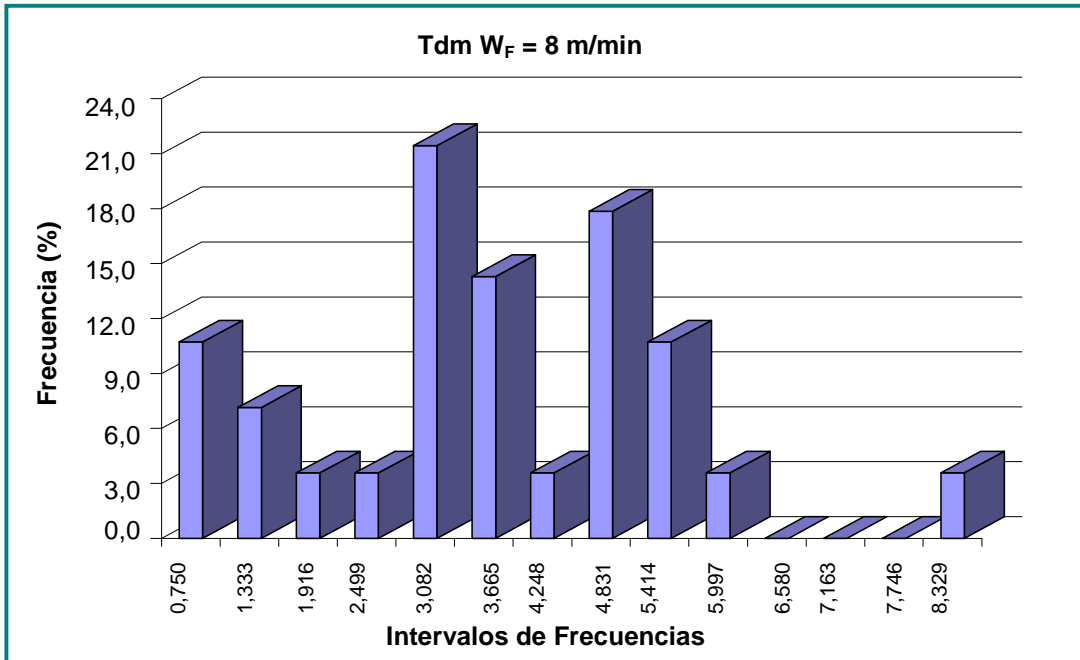


Figura 3.15.- Histograma Tdm = 3,082 ms (W<sub>F</sub> = 8 m/min; I<sub>m</sub> = A; V<sub>m</sub> = 32 V).

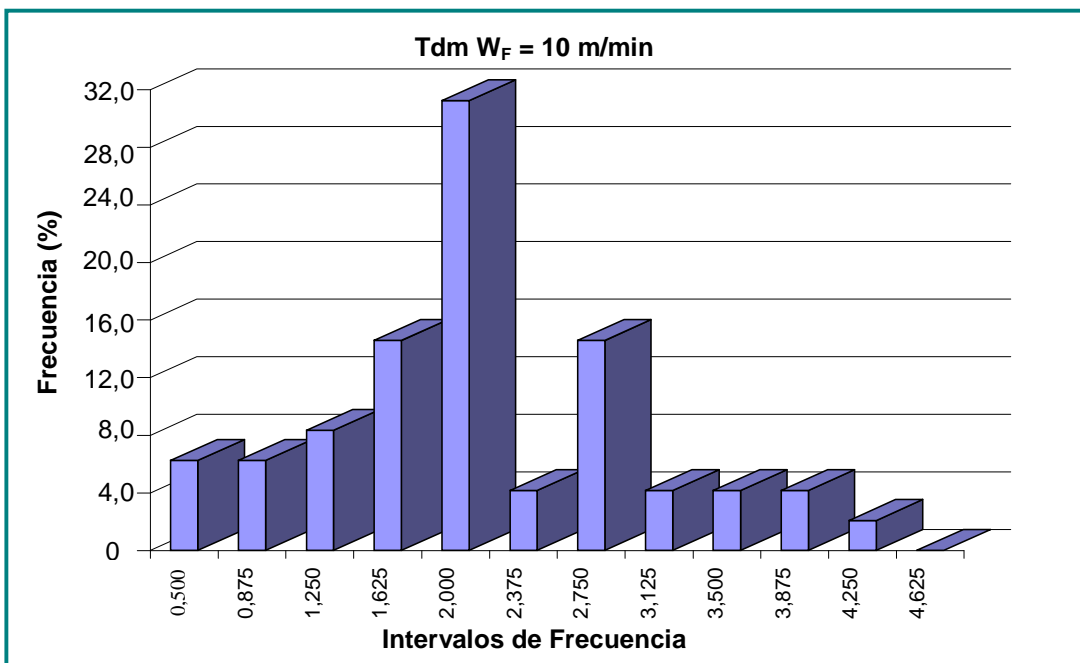


Figura 3.16.- Histograma Tdm = 2,000 ms (W<sub>F</sub> = 10 m/min; I<sub>m</sub> = A; V<sub>m</sub> = 33 V).



Todos los datos recolectados de los oscilogramas e histogramas para cada prueba se reportan en la tabla 3.11, para luego dar origen a las graficas de las figuras 3.17 y 3.18.

Tabla 3.11.- Datos recolectados de los Oscilogramas e Histogramas para cada prueba.

$W_F$ (m/min)	$I_{dc}$ (A)	$T_{dm}$ (ms)	$V_{dm}$ (mm <sup>3</sup> )	Log (Vdm)
4	173,96	7,996	0,603	-0,220
6	220,7	5,050	0,571	-0,243
8	261,15	3,082	0,465	-0,333
10	297,17	2,000	0,377	-0,424

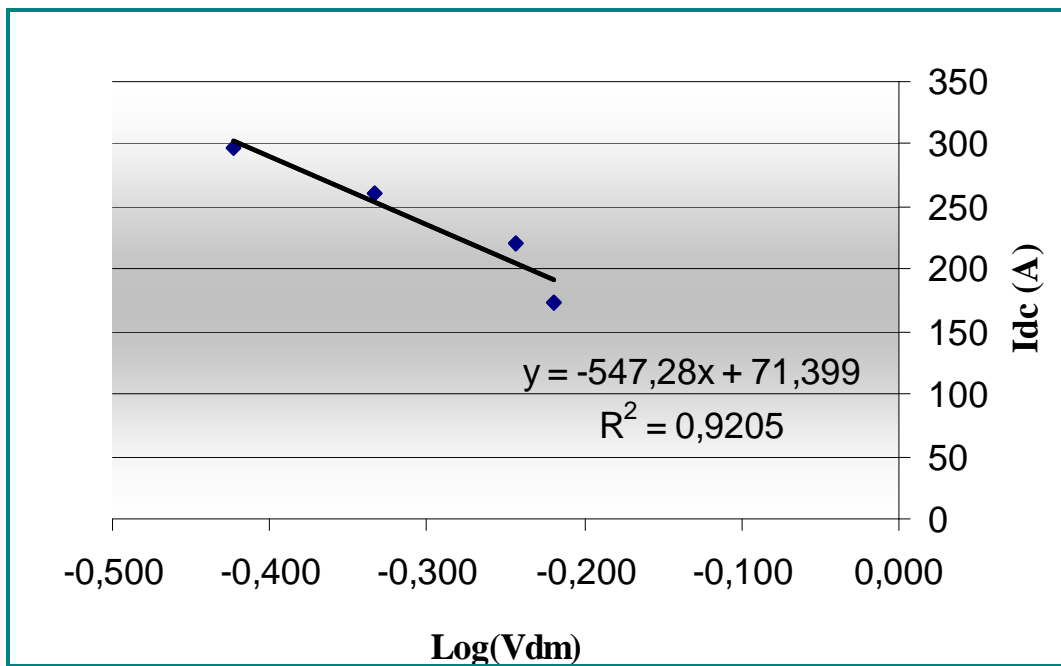


Figura 3.17.- Relación entre  $I_{dc}$  y Log (Vdm).

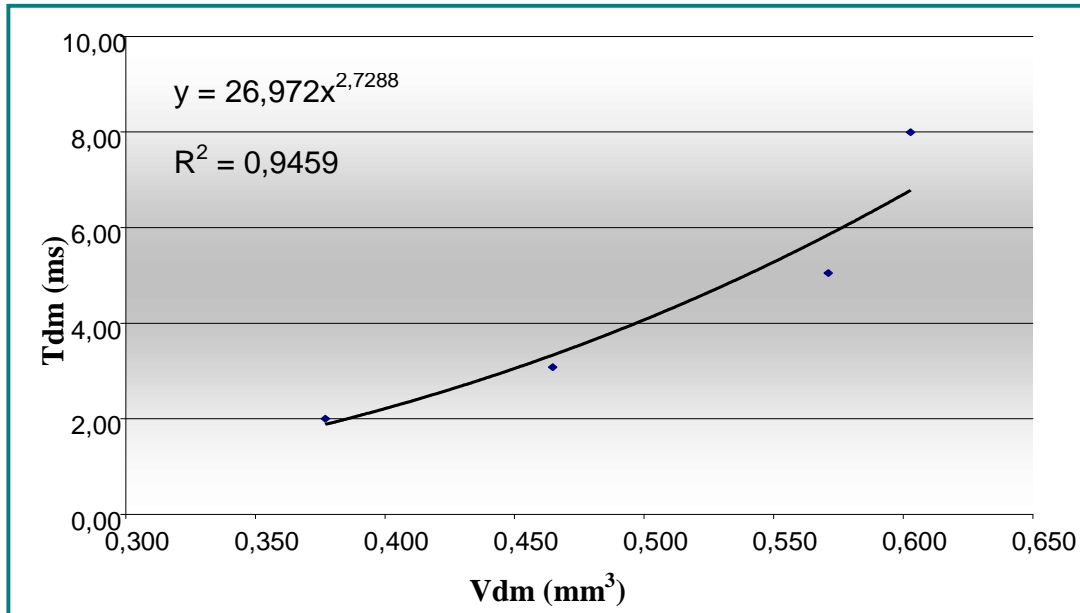


Figura 3.18.- Relación entre Tdm y Vdm.

De esta manera, para el volumen de gota requerido en el desprendimiento ( $V = 0,905 \text{ mm}^3$ ), se obtiene de las relaciones  $I_{dc} - V_{dm}$  y  $T_{dm} - V_{dm}$  lo siguiente:

$$I_{dc} = -547,28 \times \text{Log}(V_{dm}) + 71,399 = 95,124A \quad [28]$$

$$T_{dm} = 26,972 \times V_{dm}^{2,7288} = 20,541ms \quad [29]$$

Sustituyendo los valores en la ecuación [16], se tiene el valor de  $K_V$ :

$$K_V = 95,124^{1,706} \cdot 20,541 = 48,706A^{1,706}s \quad [30]$$

### 3.5.2.3.- Curva de Potencia Constante

Una vez encontrado el valor de  $K_V$  se sustituye en la ecuación [14] obteniéndose una curva paramétrica de potencia constante característica del material de aporte.

$$I_p^{1,706} \cdot T_p = 48,706A^{1,706}s \quad [31]$$

### 3.5.3.- 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 y último criterio del método, se acordó el valor de  $I_b$  en 40 A ( $I_b > 40$  A), directamente a través de pruebas de soldadura mediante decrementos de la corriente  $I_b$ .

$$I_b > 40A \quad [32]$$

Mediante el cumplimiento del segundo y tercer criterio de Amim, se limitó por segunda vez la zona paramétrica obtenida. La nueva zona de trabajo se ilustra en la figura 3.19, para la  $W_F$  estudiada. La zona obtenida a partir de la aplicación de los tres Criterios de Amim <sup>[24]</sup>, para la determinación de los parámetros pulsados, se encuentra limitada entre la corriente mínima de trabajo y la curva de potencia constante.

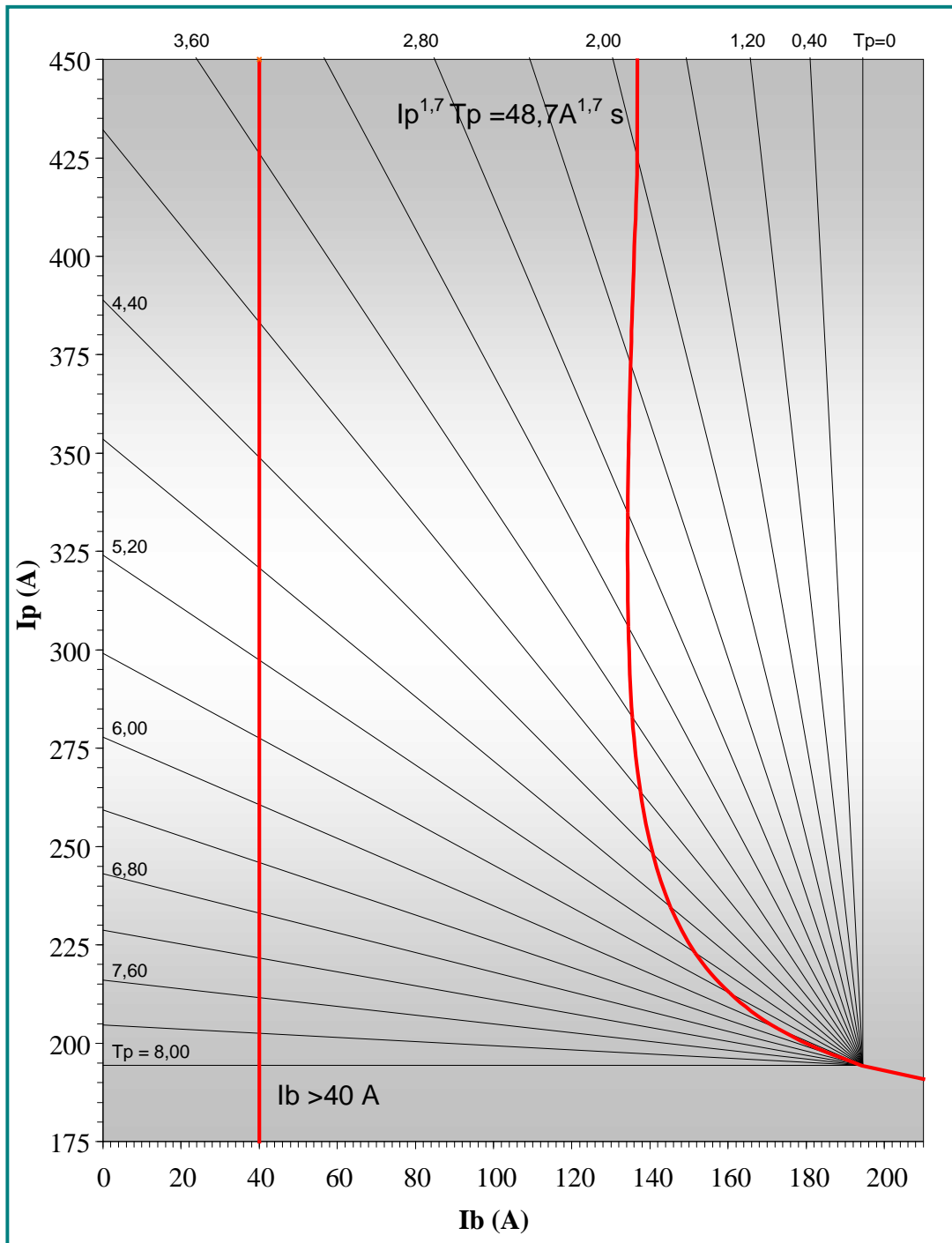


Figura 3.19.- Zona Paramétrica preliminar según el Criterio de Burnoff limitada por la curva de potencia constante y criterio de estabilidad de arco.  $W_F = 6$  m/min.;  $I_m = 194,44$  A;  $T_C = 8$  ms.

### 3.5.4.- Acotamiento de la Zona Paramétrica

El conjunto de parámetros que cumplen con las condiciones de estabilidad de arco, y desprendimiento de una gota por pulso durante el  $T_p$ , se muestran en la tabla 3.12, para la condición ( $W_F = 6$  m/min;  $I_m = 194,44$  A;  $T_C = 8$  ms;  $V_s = 39,5$  cm/min).

Tabla 3.12.- Ensayos realizados dentro de la zona paramétrica para  $W_F = 6$  m/min,  $I_m = 144,44$  A;  $T_C = 8$  ms. En rojo se muestran los ensayos que resultaron ser una gota por pulso (UGP), además se muestran los que resultaron ser de dos y tres gotas por pulso (DGP y TGP).

Nº Ensayo	$T_p$ (ms)	$T_b$ (ms)	$I_p$ (A)	$I_b$ (A)	$I_m$ (A)	$V_m$ (V)	Observaciones
E-1	3	5	375	86,10	194,44	25,43	DGP
E-2	3	5	355	98,10	194,44	24,19	DGP
E-3	2,6	5,4	365	112,32	194,44	25,45	UGP
E-4	3,4	4,6	360	72,07	194,44	25,70	TGP
E-5	2,9	5,1	370	94,61	194,44	25,05	DGP
E-6	2,3	5,7	375	121,58	194,44	24,84	UGP
E-7	3,1	4,9	355	92,86	194,44	25,51	TGP
E-8	3,1	4,9	350	96,03	194,44	26,07	TGP
E-9	2,9	5,1	355	103,14	194,44	26,46	DGP
E-10	2,8	5,2	355	107,98	194,44	26,42	DGP
E-11	2,8	5,2	360	105,29	194,44	25,96	UGP
E-12	2,9	5,1	365	97,45	194,44	25,75	UGP
E-13	3	5	365	92,10	194,44	25,63	DGP
E-14	3	5	350	101,10	194,44	26,10	TGP
E-15	3,2	4,8	345	94,07	194,44	25,65	DGP
E-16	2,6	5,4	355	117,13	194,44	28,12	UGP
E-17	3,2	4,8	350	90,73	194,44	28,56	DGP
E-18	3,2	4,8	335	100,73	194,44	27,79	UGP
E-19	3,4	4,6	350	79,46	194,44	27,17	UGP
E-20	3,6	4,4	335	79,44	194,44	25,62	UGP
E-21	3,8	4,2	335	67,27	194,44	26,01	UGP

E-22	3,5	4,5	370	57,89	194,44	26,98	DGP
E-23	3,8	4,2	355	49,17	194,44	26,44	DGP
E-24	4,1	3,9	335	46,67	194,44	26,71	TGP
E-25	4,3	3,7	305	65,95	194,44	27,25	TGP
E-26	3,8	4,2	315	85,36	184,44	25,85	TGP
E-27	3,2	4,8	330	104,07	194,44	27,26	TGP
E-28	2,6	5,4	335	126,76	194,44	28,21	TGP
E-29	3,4	4,6	305	112,72	194,44	24,77	TGP
E-30	2,6	5,4	395	97,87	194,44	27,01	DGP
E-31	2	6	410	122,59	194,44	26,80	DGP

Los oscilogramas de los parámetros caracterizados en chapa plana se ilustran en las figuras 3.20 a la 3.22, mientras que las figuras 3.23 a la 3.26, se muestra ejemplos de oscilogramas cuyos parámetros están fuera de la zona de UGP. Todos los parámetros pertenecen a la condición ( $W_F = 6$  m/min;  $I_m = 144,44$  A;  $T_C = 8$  ms;  $V_s = 39,5$  cm/min).

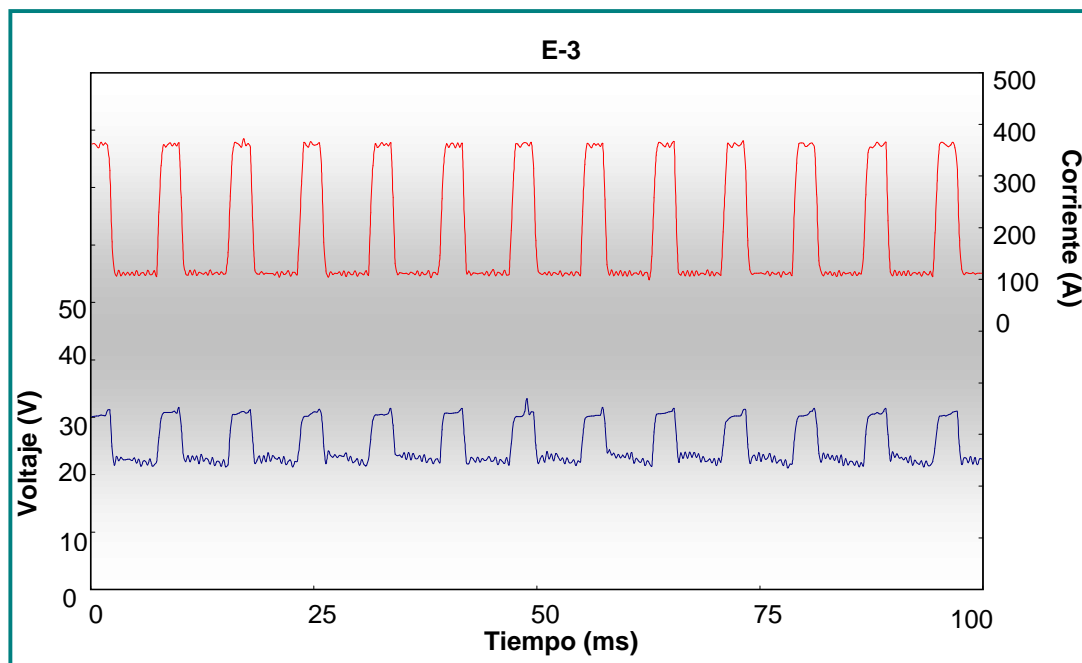


Figura 3.20.- Oscilograma E-3 UGP. ( $I_p = 365$  A;  $I_b = 112,32$  A;  $T_p = 2,6$  ms;  $T_b = 5,4$  ms).

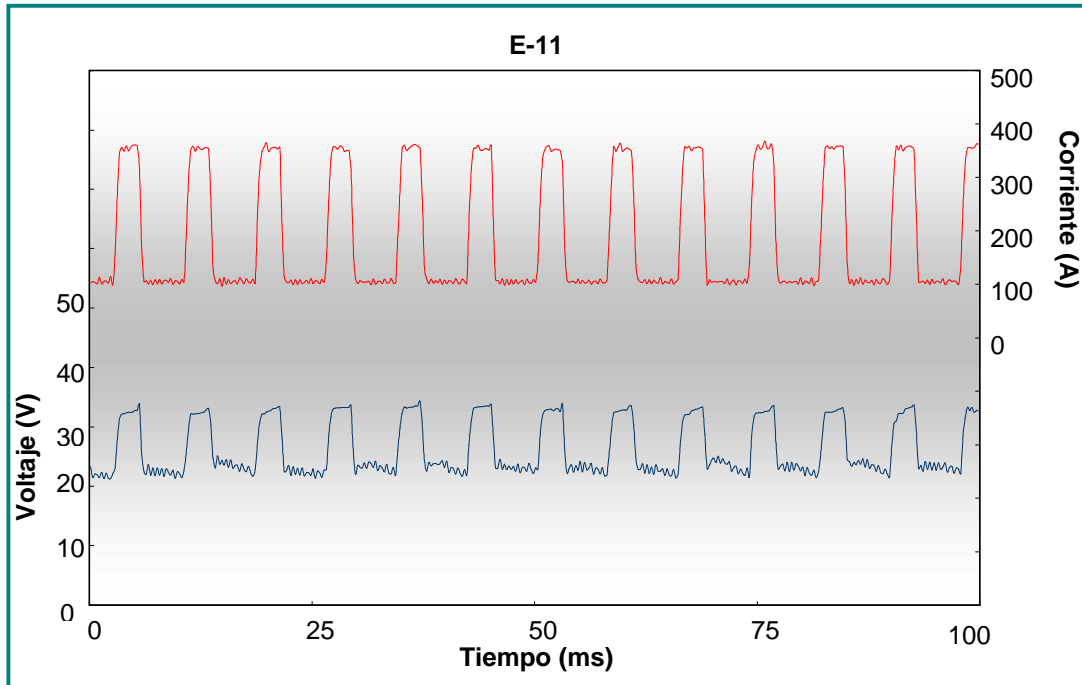


Figura 3.21.- Oscilograma E-11 UGP. ( $I_p = 360$  A;  $I_b = 105,29$  A;  $T_p = 2,8$  ms;  $T_b = 5,2$  ms).

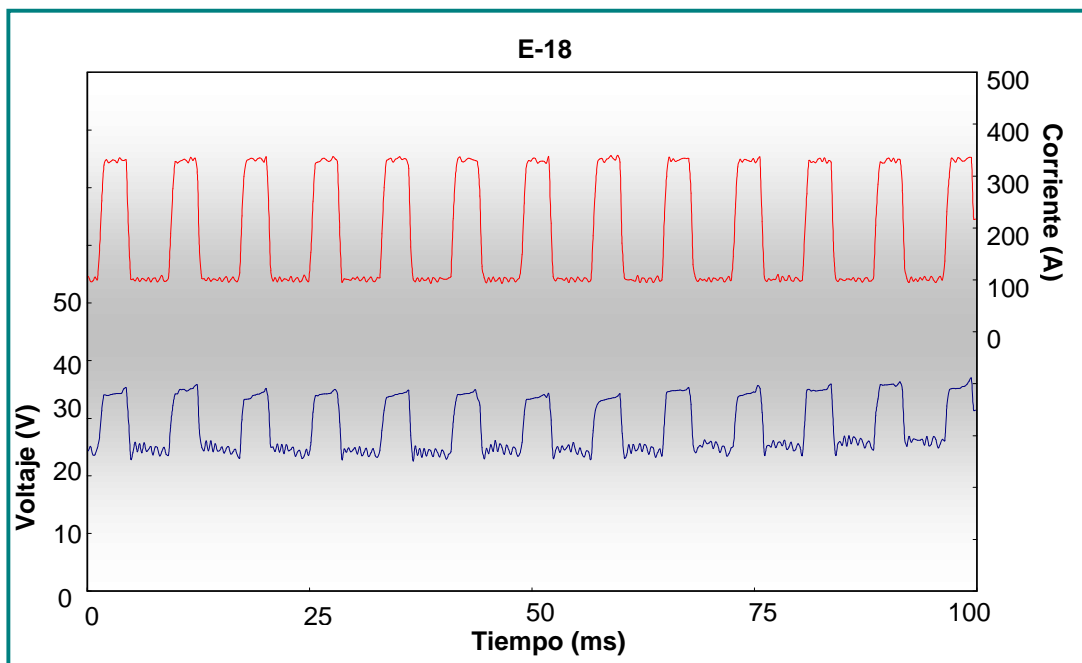


Figura 3.22.- Oscilograma E-18 UGP. ( $I_p = 335$  A;  $I_b = 100,73$  A;  $T_p = 3,2$  ms;  $T_b = 4,8$  ms).

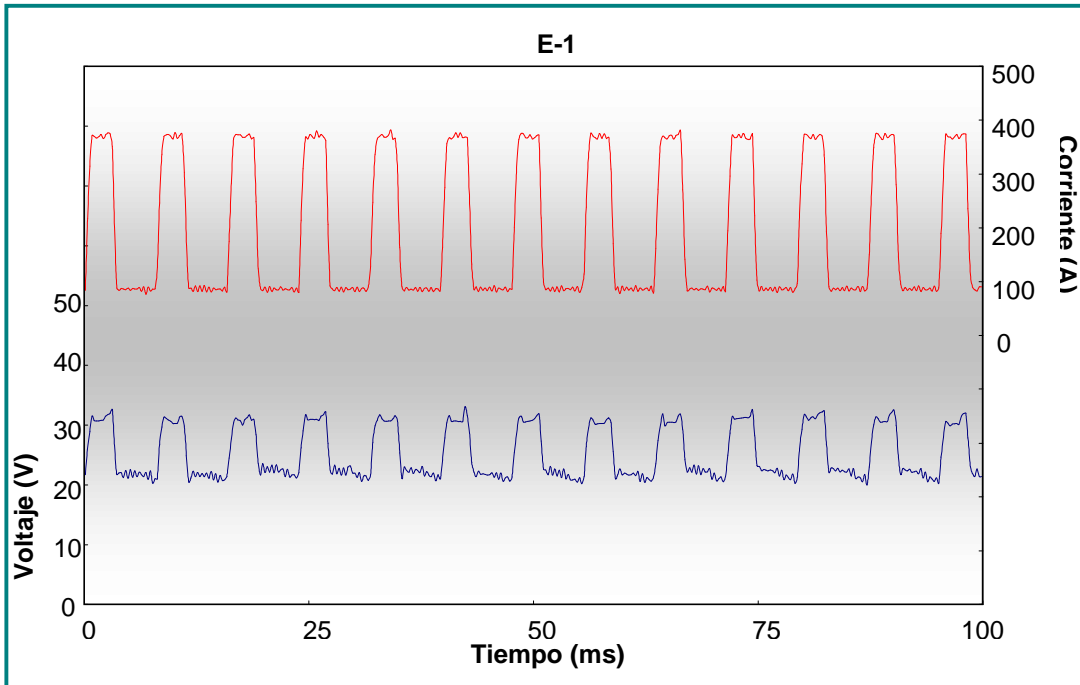


Figura 3.23.- Oscilograma E-1 DGP. ( $I_p = 375$  A;  $I_b = 86,10$  A;  $T_p = 3$  ms;  $T_b = 5$  ms).

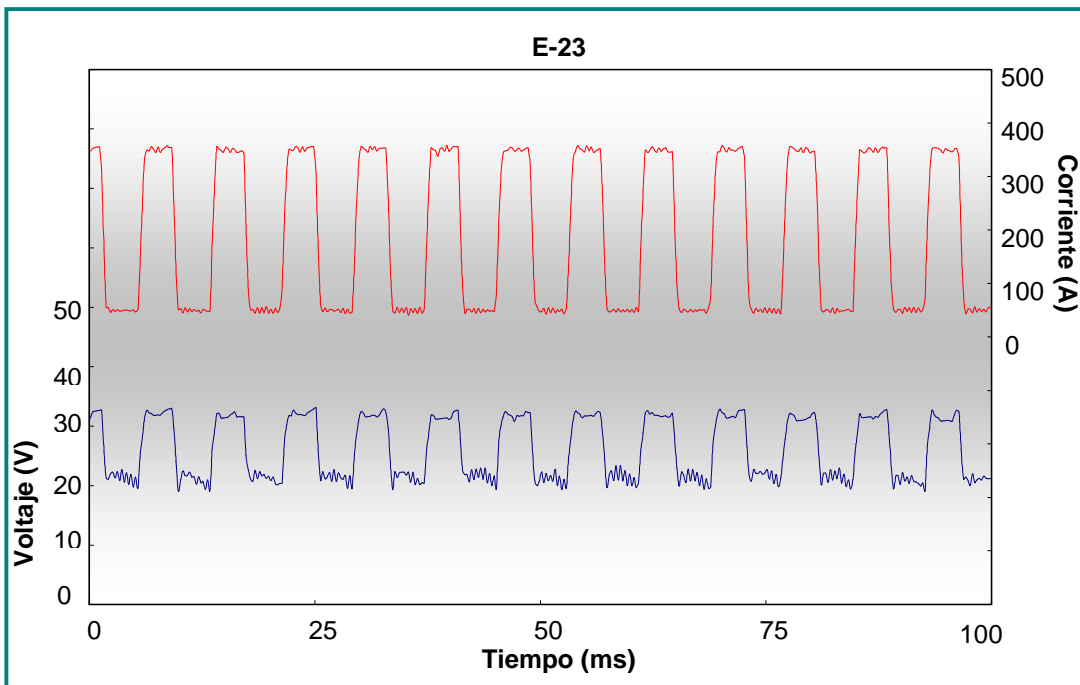


Figura 3.24.- Oscilograma E-23 DGP. ( $I_p = 355$  A;  $I_b = 49,17$  A;  $T_p = 3,8$  ms;  $T_b = 4,2$  ms).



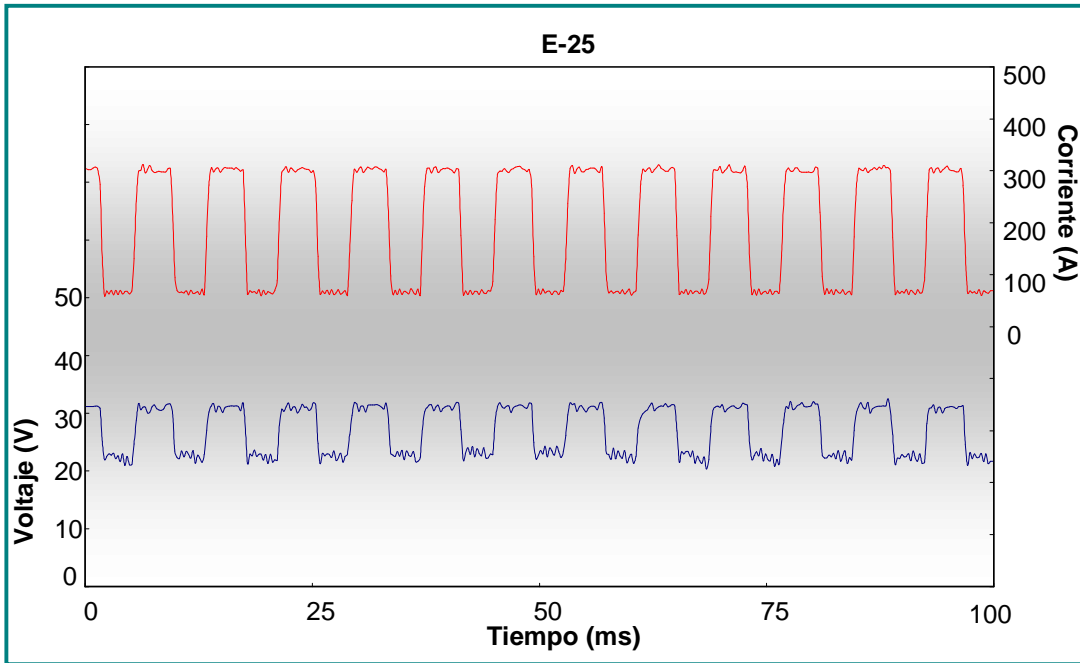


Figura 3.25.- Oscilograma E-25 TGP. ( $I_p = 305$  A;  $I_b = 65,95$  A;  $T_p = 4,3$  ms;  $T_b = 3,7$  ms).

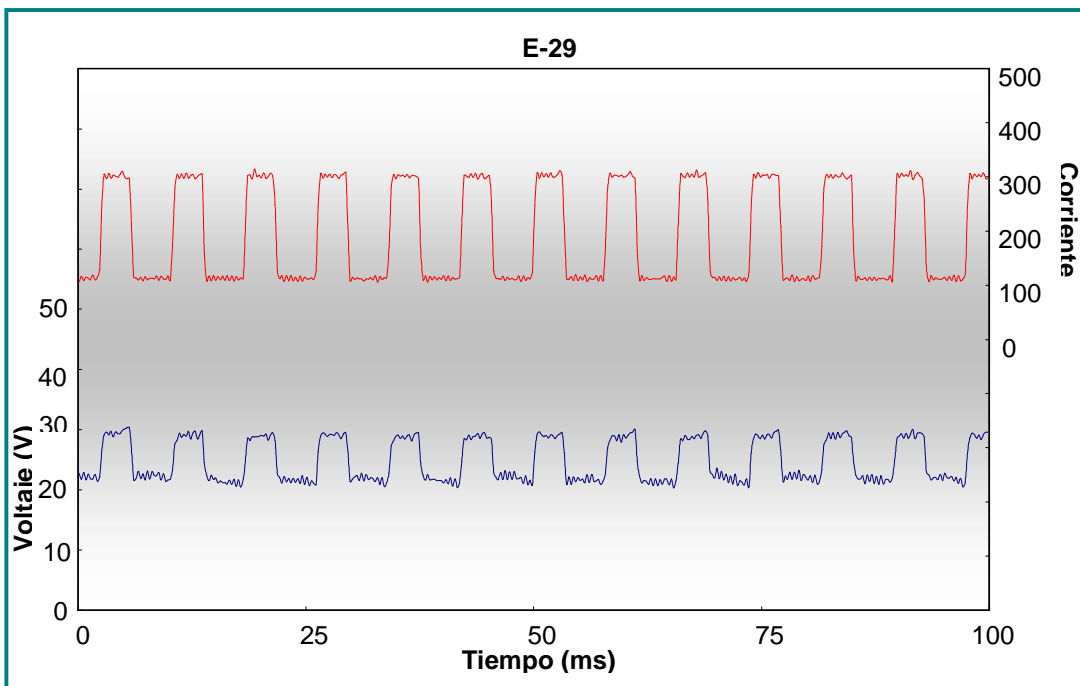


Figura 3.26.- Oscilograma E-29 TGP. ( $I_p = 305$  A;  $I_b = 112,72$  A;  $T_p = 3,4$  ms;  $T_b = 4,6$  ms).

### 3.5.5.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana

En la figura 3.27, se ilustran los cordones depositados sobre chapa plana (seleccionados) para la condición estudiada. Aquí se observa la forma del cordón como la escasa presencia de salpicadura y de otros defectos superficiales.

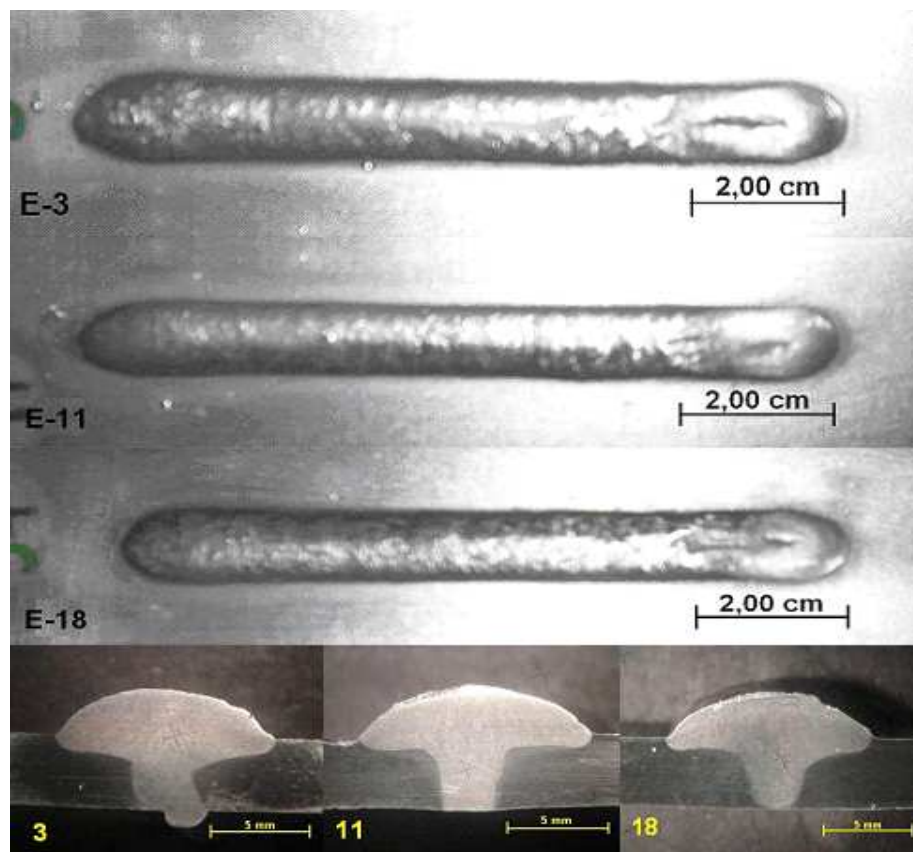


Figura 3.27.- Cordones depositados sobre chapa plana para las condiciones E-3, E-11 y E-18, evidenciando la ausencia de defectos superficiales; y sus respectivos cortes transversales indicando los perfiles geométricos.

En la figura 3.28, se muestra la zona paramétrica para la  $W_F$  de 6 m/min. En la zona se ha demarcado la región de una gota por pulso, éstos son los puntos representados en color rojo (UGP), y los parámetros seleccionados para evaluar desde el punto de vista geométrico y superficial, los encerrados en círculo. Los parámetros descartados se encuentran igualmente señalados.

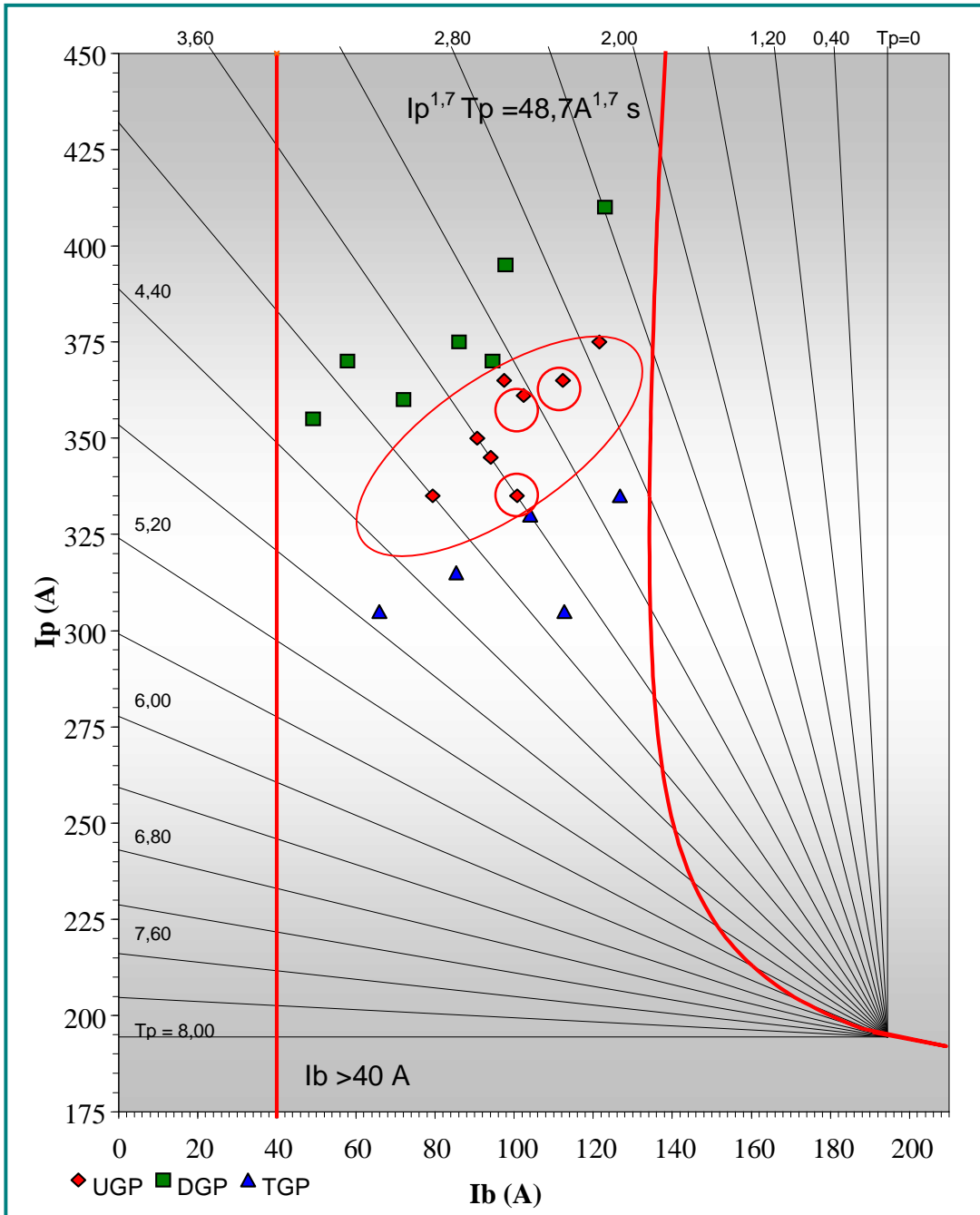


Figura 3.28.- Parámetros que forman la zona de Una Gota por Pulso (UGP) dentro de la zona paramétrica en rojo.  $W_F = 6$  m/min;  $I_m = 194,44$  A;  $T_C = 8$  ms. Los encerrados en círculo son aquellos seleccionados para ensayar. Los puntos verdes y azules indican algunos parámetros que ofrecen dos gotas y tres gotas por pulso, respectivamente.

### 3.6.- Realización de la Soldadura en una Unión a Tope

Al ser determinado el conjunto óptimo de parámetros de soldadura (E-11), se procedió a realizar la junta a tope en un solo pase. En la tabla 3.13 se muestra el conjunto de parámetros fijados para realizar la junta.

Tabla 3.13.- Parámetros fijados para la elaboración de la junta mediante el proceso GMAW-P.

Modo de transferencia	Pulsado
Material de Aporte	ER 309L, diámetro 1,2 mm
Gas de protección	98 % Ar + 2 % O <sub>2</sub>
Velocidad de soldadura	39,5 cm/min
Velocidad de alimentación	6,0 m/min
Corriente Pulsada	$I_p = 360$ A; $I_b = 105,29$ A; $T_p = 2,8$ ms; $T_b = 5,2$ ms
Polaridad	Corriente directa (CD); electrodo (+)
Distancia Boquilla - Pieza	12 mm
Posición de soldadura	Plana (1G); Orientación del electrodo 90°
Flujo de gas protector	15 L/min
Tipo de junta	A tope, ranura cuadrada
Separación de Raíz	2 mm
Respaldo	Cobre

La tabla 3.14, 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 anterior (tabla 3.13) y utilizando las ecuaciones [22] y [23].

Tabla 3.14.- Valores de Calor Aportado y Calor Absorbido.

EBA (J/mm)	ENA (J/mm)
766,88	536,82

### **3.7.- Ensayos No Destructivos**

#### **3.7.1. -Inspección Visual**

La inspección visual fue realizada sobre la junta soldada como lo especifica la regla QW-194 del Código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX, asegurando que la junta cumplía con las condiciones de calidad, lo cual se evidenció por la ausencia de discontinuidades superficiales tales como agrietamiento, poros, socavaduras, falta de penetración o salpicadura.

#### **3.7.2.- Inspección por Líquidos Penetrantes**

En cuanto a la inspección por líquidos penetrantes, se determinó la ausencia de socavaduras, grietas, salpicaduras en el metal base y en el cordón de soldadura, y se confirmó el buen estado superficial de la junta.

En la figura 3.29, se observan los pasos realizados para llevar a cabo la inspección por líquidos penetrantes. Los resultados cumplen con lo establecido en los párrafos QW-195 y QW-195.2 del Código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX referentes al criterio de aceptación de inspección por líquidos penetrantes.

#### **3.7.3.- Inspección Radiográfica**

La inspección radiográfica fue realizada a la junta soldada, una vez que se obtuvo la radiografía. La misma presentó resultados satisfactorios ya que no se observaron grietas ni porosidades, igualmente se observó penetración completa en la raíz de la junta por lo cual se concluyó que la junta cumple con las condiciones de calidad especificadas en la regla QW-191 del Código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX.

En las figuras 3.30 y 3.31, se ilustra la radiografía observada en la pantalla fluoroscópica (negatoscopio).

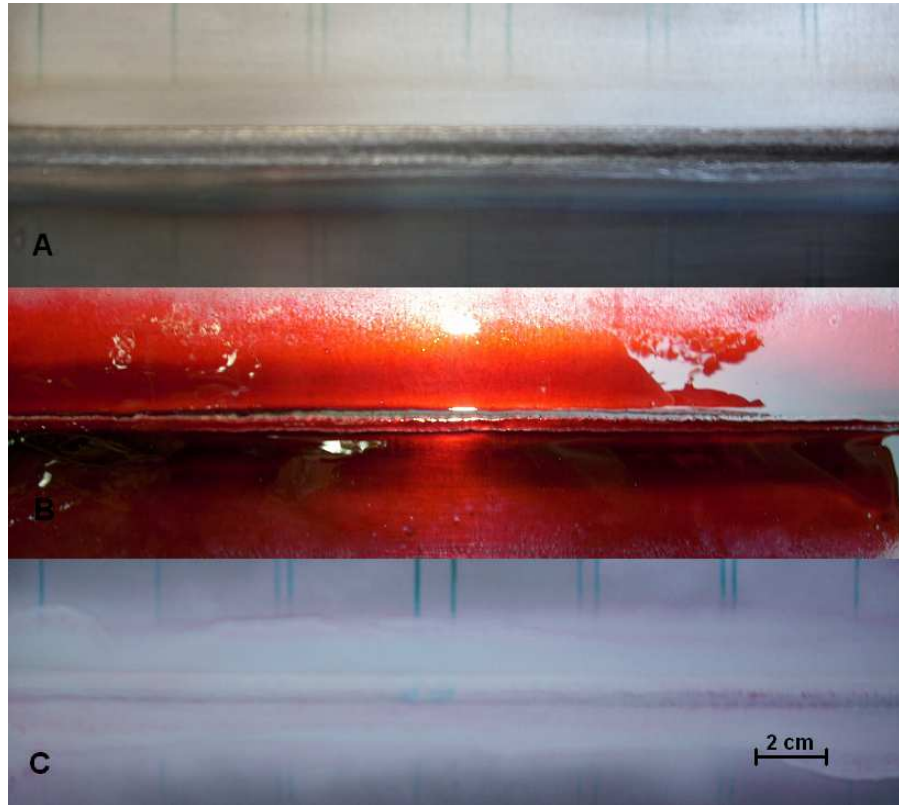


Figura 3.29.- A.- Limpieza con Removedor del cupón soldado. B.- aplicación del Penetrante sobre el cupón soldado. C.- Aplicación del Revelador sobre el cupón soldado. (Lado del refuerzo de Cara).



Figura 3.30.- Radiografía del cupón soldado observada en la pantalla fluoroscópica.

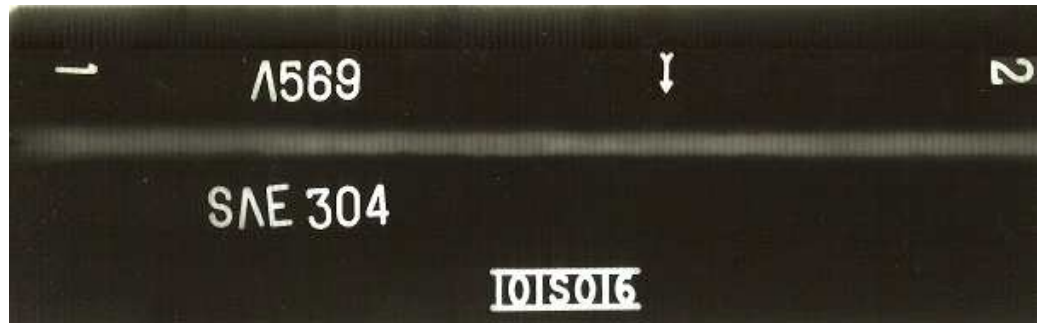


Figura 3.31.- Radiografía del cupón soldado.

### 3.8.- Ensayos Destructivos

#### 3.8.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura

En la tabla 3.15, se reportan los resultados del análisis químico realizado al cordón de soldadura.

Tabla 3.15.- Análisis Químico realizado al Cordón de Soldadura.

Elementos	% C	% S	% Cr	% Ni	% Mn	% Co	% Mo	% Si
Cordón de soldadura	0,046	0,010	18,74	9,40	2,12	0,77	0,10	0,13

#### 3.8.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura

##### 3.8.2.1.- Análisis Micrográfico

Las fotomicrografías tomadas en tres zonas específicas de la junta soldada, con reactivos de ataques diferentes como se explica en el ítem 2.10.2.1, se pueden observar en la figura 3.32.

Todas estas fotomicrografías fueron tomadas utilizando el microscopio óptico marca Olympus PMG 3 en conjunto con una pantalla digital marca JVC modelo TK-C13800, el mismo usado en la caracterización metalográfica de los materiales base.

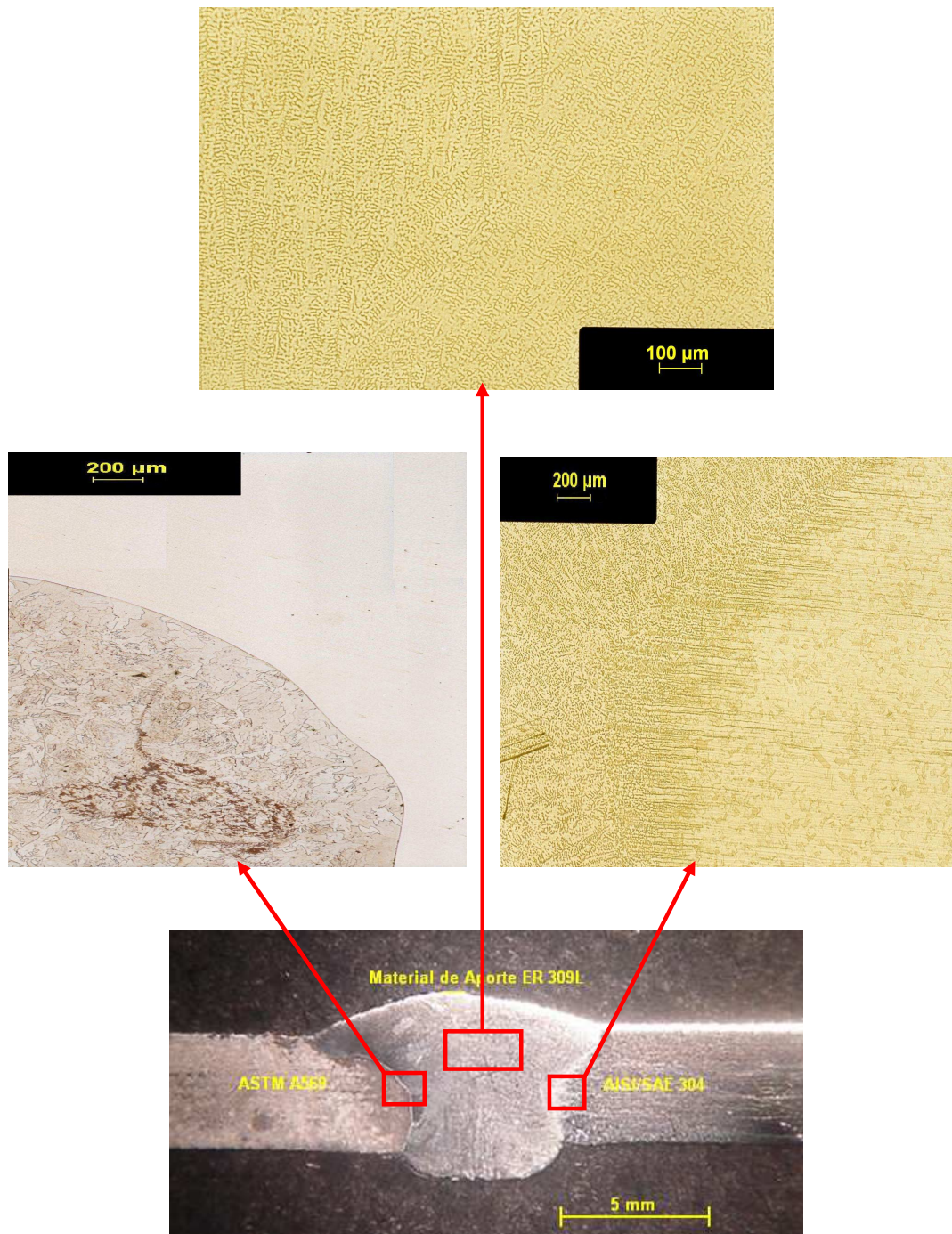


Figura 3.32.- Evaluación micrográfica en distintas zonas del cordón de soldadura, indicando la fase ferrita (zona oscura) en la matriz austenítica de la junta soldada con transferencia metálica por arco pulsado usando Argón con 2 % de Oxígeno como gas de protección.



### 3.8.2.2.- Análisis Macrográfico y Dilución

La macrografía que se muestra en la figura 3.33 (representativa del cordón de soldadura) se utilizó para determinar la penetración, ancho y altura de los refuerzos de cara y de raíz, el porcentaje de dilución y la identificación de la zona fundida o zona del cordón, la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base sin afectar.

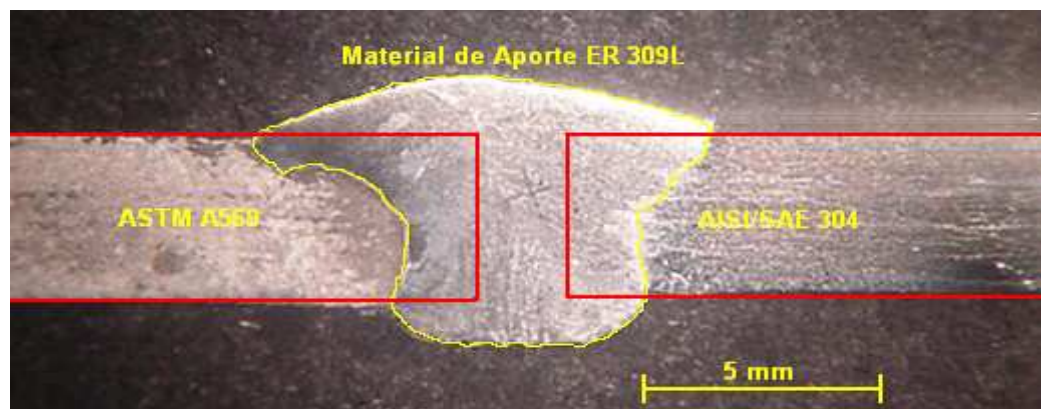


Figura 3.33.- Macrografía de la junta disímil AISI/SAE 304 y ASTM A569 soldado con un electrodo ER309L.

La caracterización geométrica y dilución presentada por el cordón de soldadura se presenta en la tabla 3.16. El valor obtenido es típico en transferencias pulsada y se encuentra dentro de lo esperado para el proceso de soldadura utilizado<sup>(39), (40)</sup>.

Tabla 3.16.- Parámetros geométricos (promedio) del cordón de soldadura del cupón de prueba.

Ancho Cara	Ancho Raíz	Refuerzo de Cara	Refuerzo de Raíz	Relación Ancho/Alto	Dilución (%)
11,00	5,00	2,00	1,00	1,57	39,83
Medidas en mm					

### 3.8.3.- Medición del Contenido de Ferrita

#### 3.8.3.1. Método Metalográfico

El cálculo se realizó con ayuda de un analizador de imagen Digital MicroGraph versión 3.4.2, el mismo utilizado para la estimación de los porcentaje de ferrita de los materiales base, el cual presenta los resultados de manera automática, calculando un valor promedio entre cinco (5) mediciones (ver tabla 3.17). Para este análisis la fotomicrografía empleada se muestra en la figura 3.32 correspondiente a la zona central del cordón de soldadura tal como se indica en la misma.

Tabla 3.17.- Valores de porcentaje de ferrita en el cordón de soldadura obtenidos con el analizador de imagen Digital MicroGraph versión 3.4.2.

Medida	1	2	3	4	5
Contenido de Ferrita (%)	4,97	4,92	5,04	5,10	5,17
Promedio	5,04				
Desviación Estándar	± 0,08				

#### 3.8.3.2.- Método Químico

A partir de los análisis químicos realizados al cordón de soldadura, se calculó el cromo equivalente ( $Cr_{eq}$ ) y del níquel equivalente ( $Ni_{eq}$ ) para la determinación del contenido de ferrita (%) del cordón utilizando el diagrama de Schaeffler.

Tabla 3.18.- Contenido de Ferrita en el Cordón de Soldadura de acuerdo al método Químico.

Cordón de Soldadura		
Diagrama de Schaeffler	$Cr_{eq}$ (%)	19,03
	$Ni_{eq}$ (%)	11,84
	Ferrita (%)	≈ 5

El resultado reportado en la tabla 3.18, se obtuvo a partir de la figura 3.34 (diagrama de Schaeffler), en el cual se observa el porcentaje de ferrita en el cordón de soldadura. De este diagrama se consiguen valores aproximados del porcentaje de Ferrita en el cordón determinado para la junta soldada.

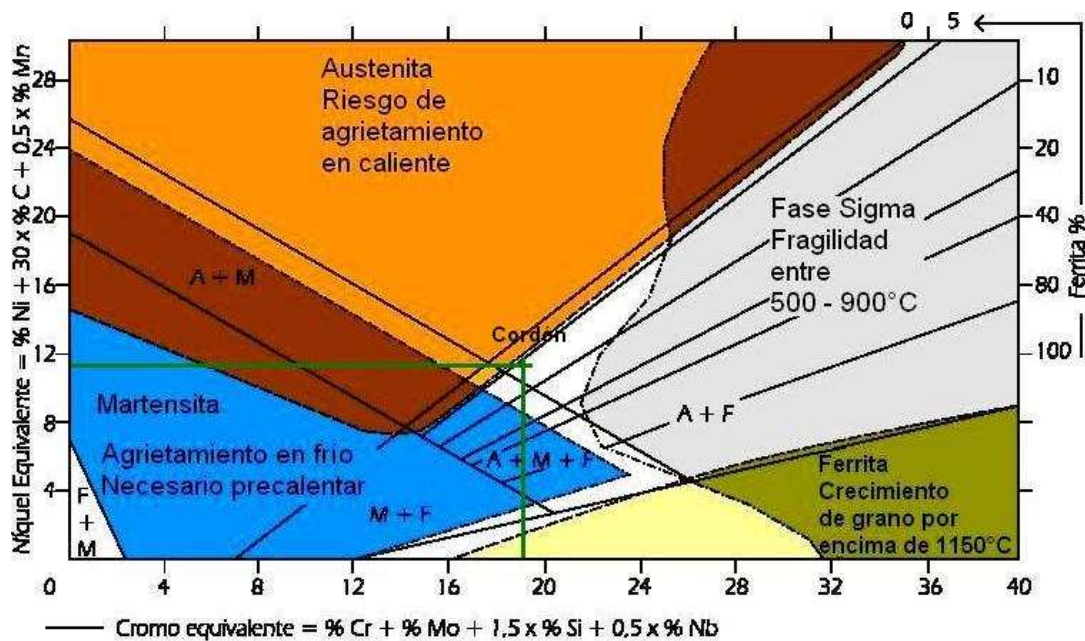


Figura 3.34.- Diagrama de Schaeffler indicando el porcentaje (%) de ferrita del cordón de soldadura.

Registrando los resultados de los procedimientos antes mencionados, en la tabla 3.19, se muestra el porcentaje de contenido de ferrita en el cordón de soldadura evaluado por los diferentes métodos, observándose resultados similares.

Tabla 3.19.- Contenido de Ferrita (%) dentro del cordón de soldadura utilizando diferentes métodos: Metalográfico y Químico.

Método	Metalográfico	Químico
		Schaeffler
Cordón de Soldadura	5,04 ± 0,08	5

### 3.8.4.- Dureza

#### 3.8.4.1.- Microdureza

Los resultados correspondientes a los barridos del ensayo de microdureza Vickers realizados a la probeta de la junta soldada se reportan en la tabla 3.20, mostrando los resultados por zonas (ASTM A569 ZAC, Cordón y AISI/SAE 304 ZAC), y se observan en la figura 3.35.

La curva en rojo muestra el comportamiento de los valores de microdureza realizados al barrido superior en la junta soldada mientras que la curva en azul se refiere al barrido inferior. Además se identifican en el gráfico los puntos resaltados que pertenecen al cordón de soldadura.

Tabla 3.20.- Valores de Microdureza Vickers (HV<sub>100</sub>) realizado en los barridos superior (perfil 1) e inferior (perfil 2) sobre la junta soldada.

	Perfil 1			Perfil 2		
	Zona	Dureza HV100	HRB	Zona	Dureza HV100	HRB
-11,20	ASTM A569	155,80	80,60	ASTM A569	133,64	71,32
-10,50		131,87	70,44		123,50	66,70
-9,80		153,57	79,85		126,75	67,88
-9,10		141,12	74,56		128,42	68,71
-8,40		145,09	75,77		120,37	66,07
-7,70		172,89	85,97		118,85	65,62
-7,00	ZAC	141,12	74,56	ZAC	120,37	66,07
-6,30		158,08	81,36		125,11	67,06
-5,60		147,15	77,08		128,42	68,71
-4,90		160,42	82,14		145,09	75,77
-4,20		149,24	78,12		170,28	85,32
-3,50		155,80	80,60		153,57	79,85
-2,80	Cordón de Soldadura	202,65	91,53	Cordón de Soldadura	158,08	81,36
-2,10		202,65	91,53		181,09	86,90
-1,40		183,96	97,39		155,80	80,60
-0,70		181,09	86,90		183,96	87,39
0,00		192,97	89,59		175,56	86,30
0,70		206,04	92,21		175,56	86,30
1,40		186,89	87,98		165,24	83,75

2,10		209,52	92,90		196,12	90,22
2,80		236,53	97,42		199,34	90,87
3,50	ZAC	232,36	96,82	ZAC	206,04	92,21
4,20		245,21	98,52		206,04	92,21
4,90		209,52	92,90		206,04	92,21
5,60		224,35	95,87		216,75	94,35
6,30		245,21	98,52		202,65	91,53
7,00		228,30	96,37		206,04	92,21
7,70	AISI/SAE 304	213,09	93,62	AISI/SAE 304	206,04	92,21
8,40		220,50	95,10		202,65	91,53
9,10		228,30	96,37		199,34	90,87
9,80		199,34	90,87		196,12	90,22
10,50		209,52	92,90		202,65	91,53
11,20		199,34	90,87		160,42	82,14

**Ensayo de Microdureza HV 100**

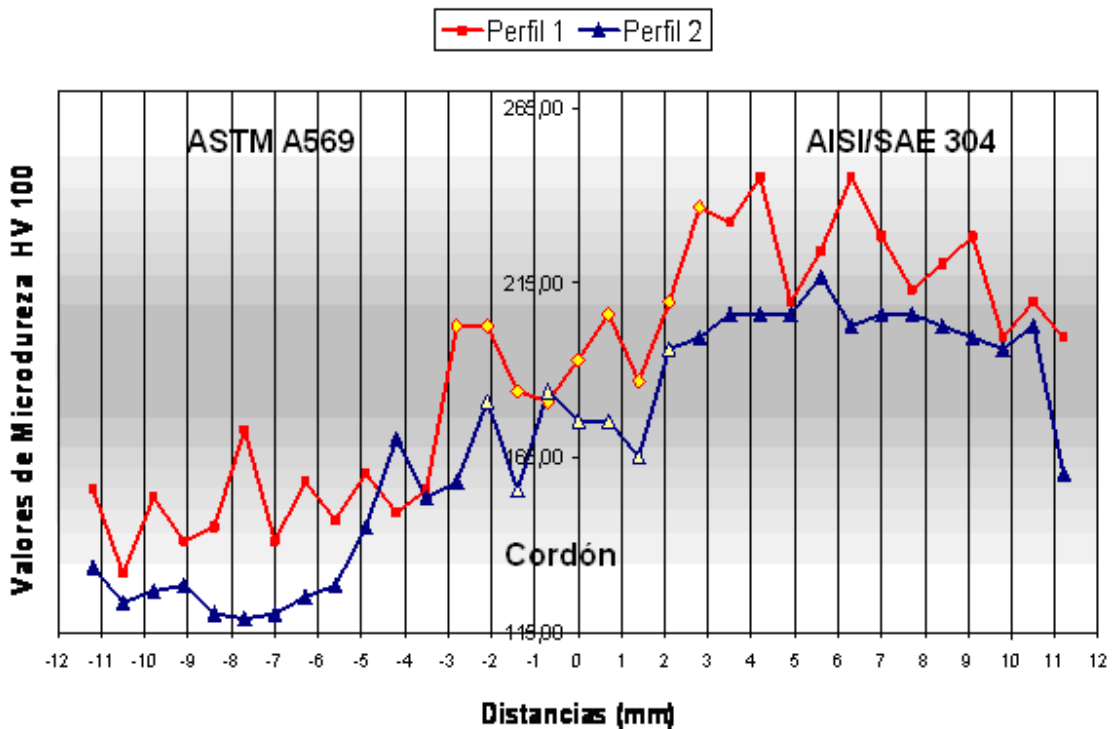


Figura 3.35.- Gráfico de distribución de medidas de microdureza: En rojo barrido superior, en azul barrido inferior. (Los puntos resaltados pertenecen a la zona del cordón de soldadura)

### 3.8.5.- 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 éstos, se elaboraron dos probetas según la norma AWS B2.1:1998<sup>(35)</sup>, cantidad necesaria para reportar confiablemente las propiedades mecánicas de la junta soldada según el cupón de prueba para la calificación de procedimiento de soldadura según la Sección IX del Código ASME<sup>(28)</sup>. Las probetas ensayadas pueden ser apreciadas en la figura 3.36.

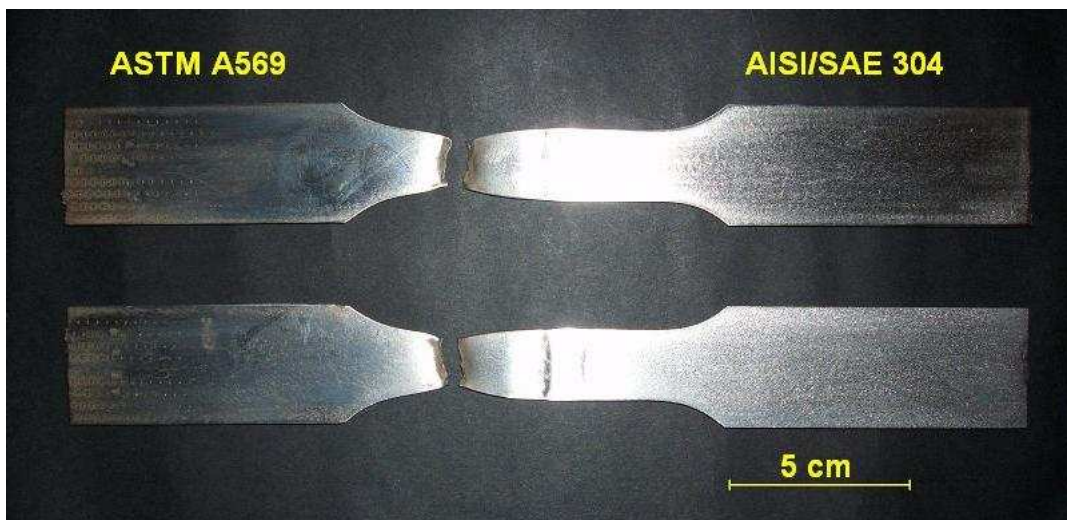


Figura 3.36.- Probetas luego del ensayo de tracción de unión disímil de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y Acero al Carbono ASTM A569 soldadas con un electrodo ER309L.

Los resultados del ensayo de tracción, esfuerzo (S) vs deformación (e), correspondientes a la junta soldada se presenta en la figura 3.37, donde se muestra la grafica de Esfuerzo vs. Deformación obtenida al ensayar las probetas. En la tabla 3.21 se reportan los valores promedios de esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ) y resistencia a la tracción ( $S_{m\acute{a}x}$ ). Igualmente se reporta el porcentaje de elongación que presenta la junta.

Tabla 3.21.- Valores de esfuerzo obtenidos de los ensayos de tracción de junta disímil de un Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y Acero al Carbono ASTM A569 soldadas con un electrodo ER309L.

Junta Disímil Soldada	Sy (MPa)	Smáx (MPa)	Elongación (%)
Probeta 1	258,1	350,98	17,80
Probeta 2	276,1	350,98	20,40
Promedio	267,1	350,98	19,10
Desviación Estándar	± 9	± 0,00	± 1,30

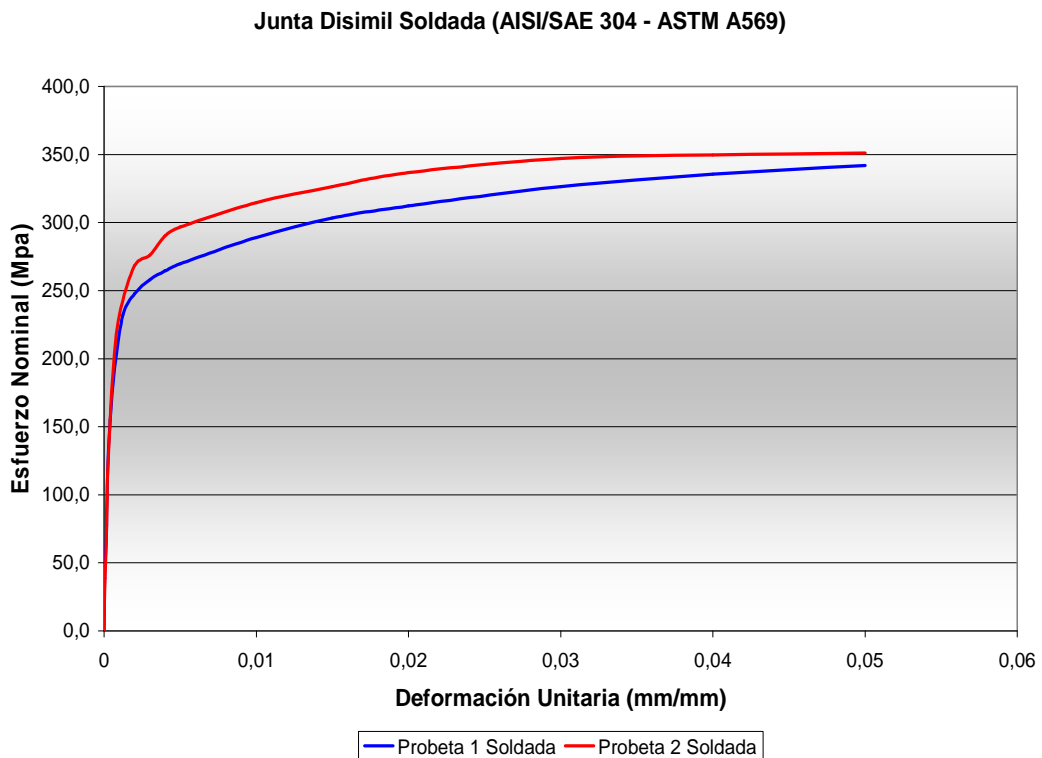


Figura 3.37.- Curvas de Tracción. Esfuerzo vs. Deformación para dos probetas de unión disímil de los material base de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y ASTM A569 soldadas con un electrodo ER309L.

### 3.8.6.- Ensayo de Doblez

El ensayo se realizó según las especificaciones escritas en el párrafo QW-466.1 del Código ASME, Sección IX, mientras que la probeta fue diseñada de acuerdo a lo establecido en el párrafo QW-462.3(a). En la figura 3.38 se observa que la superficie de las probetas ensayadas se encuentran libres de discontinuidades, garantizando una soldadura de calidad, además el lado de la probeta del acero al carbono ASTM A569 se observa un doblez mas pronunciado por ser este más dúctil que el acero inoxidable AISI/SAE 304.

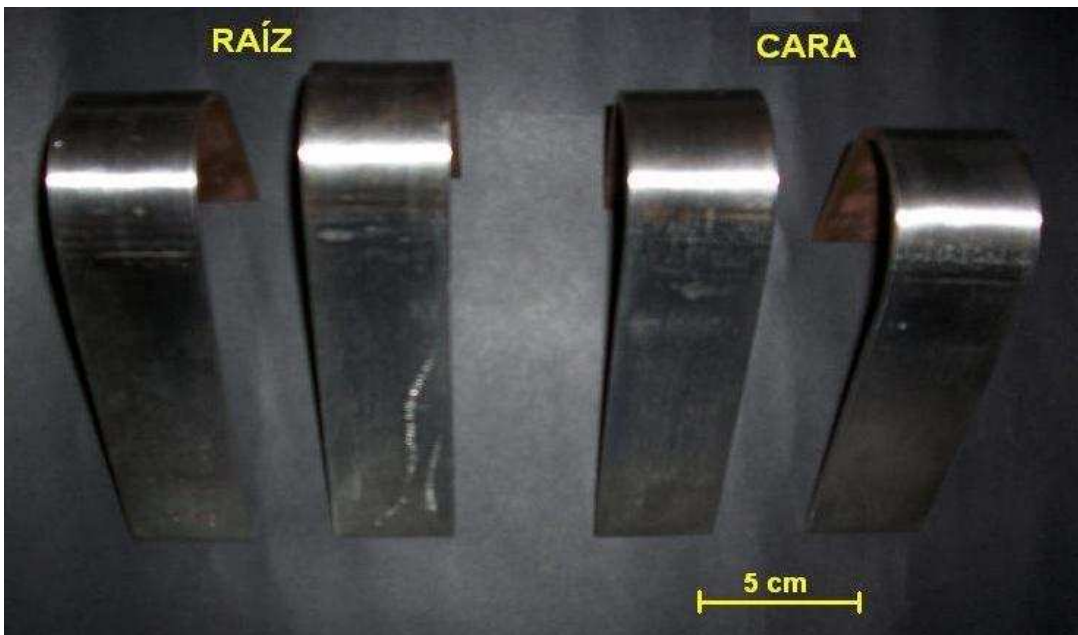


Figura 3.38.- Ensayo de doblez de cuatro probetas de unión disímil de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y ASTM A569, soldadas con un electrodo ER309L (vista superior).


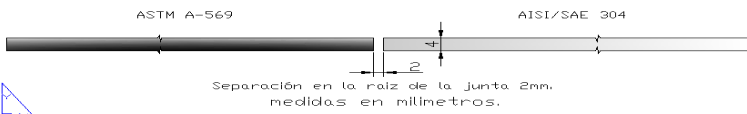




Figura 3.39.- Conjunto de probetas de uniones disímiles de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y ASTM A569, soldadas con un electrodo ER309L (vista lateral).

### 3.9.- Elaboración del Registro de Calificación del Procedimiento de Soldadura (RCP)

En base al conjunto de variables esenciales utilizadas y los resultados obtenidos en los ensayos, se presenta a continuación el RCP correspondiente a la evaluación de procedimiento de soldadura para realizar una junta soldada aplicando GMAW pulsado.

 <p><b>CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.</b></p>	<p><b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b>                  ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA                  REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO  <b>RCP</b></p>												
RCP Nº: EPS Nº:	FECHA: CÓDIGO REF:												
<b>NOMBRE SOLDADOR:</b>		<b>C.I.:</b>	<b>IDENTIFICACIÓN:</b>	<b>HOJA: 1/2</b>									
OFW ( ) SMAW ( )	<b>PROCESO</b> GMAW (X) GTAW ( ) Procesos Especiales:	SAW ( ) Otro ( )	<b>TIPO</b> ( ) Manual      (X) Semiautomático      ( ) Automático										
<b>DISEÑO DE JUNTA</b>													
Tipo de Junta: Ranura (X) Filete ( ) Otra: Respaldo: Si (X) No ( ) Material del Respaldo: <b>Cobre</b> Espesor de Recargue: <b>N.A.</b>													
<b>METAL BASE</b>													
Especificación, Grado o Tipo: Nº P: <b>8</b> Nº Grupo: <b>1</b> Plancha (X)      Espesor: <b>4 mm</b>	Especificación, Grado o Tipo: Nº S: <b>1</b> Nº Grupo: <b>1</b> Tubería ( )      Espesor:      Diámetro:												
<b>METAL DE APORTE</b>													
	Aporte (A)	Aporte (B)	Aporte (C)	Aporte (D)									
Especificación Fabricante AWS (Clase) Nº F: Diámetro: Espesor Material Depositado:	309L 309L 6 1,2 mm 7,00 mm												
<b>POSICIÓN Y ALINEACIÓN DE LA JUNTA</b>		<b>TÉCNICA</b>											
Posición: <b>1G</b> Progresión: <b>Plana</b> Nº de puntos: <b>1</b> Distancia entre puntos:		Cordón: Recto (X) Ondulado ( ) Oscilación: N.A. Electrodo: Múltiple ( ) Sencillo (X) Pases por lado: Múltiples ( ) Sencillo (X)											
<b>PRECALENTAMIENTO</b>		<b>POST-CALENTAMIENTO</b>											
Temperatura mín. precalentamiento: Temperatura máx. entre pases: Tiempo de permanencia: Otros:		<b>NO APLICA</b>											
Temperatura mín. precalentamiento: Temperatura máx. entre pases: Tiempo de permanencia: Otros:		Intervalo de temperatura: Tiempo de permanencia: Enfriamiento: Otros:											
<b>GAS</b>		<b>LIMPIEZA</b>											
	Tipo	Composición	Flujo (Lts/min)										
Protección	<b>Inerte</b>	<b>98% Ar+2% O<sub>2</sub></b>	<b>15</b>										
Arrastre													
Respaldo	-	-	-										
Otros													
<b>PARAMETROS ELÉCTRICOS (GMAW-P)</b>													
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 <sub>p</sub>	I <sub>b</sub>	T <sub>p</sub>	T <sub>b</sub>				I <sub>m</sub>
1	GMAW	ER309L	1.2	Pulsada	Inversa	360	105,29	2,8	5,2	194,44	25 - 29	39,5	6,0
OBSERVACIONES: Penetración Completa													

 <b>CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.</b>	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b> ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO <b>RCP</b>							
	RCP N°: EPS N°:	FECHA: CÓDIGO REF:						
NOMBRE SOLDADOR:	C.I.:	IDENTIFICACIÓN:	HOJA: 2/2					
<b>ENSAYO DE TRACCION</b>								
Probeta	Ancho (mm)	Espeso (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tracción		Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones	
				Ksi	MPa			
1	19,01	4,00	76,04	50,91	350,98	Dúctil – Material Base ASTM A569	Cumple con requerimiento	
2	19,03	4,00	76,12	50,91	350,98	Dúctil – Material Base ASTM A569	Cumple con requerimiento	
<b>ENSAYOS DE DOBLEZ</b>								
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						
<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO AI DEPOSITO</b>								
Elementos	%C	%S	%Cr	%Ni	%Mn	%Co	%Mo	%Si
<b>Cordón</b>	0,046	0,010	18,740	9,400	2,120	0,767	0,100	0,125
<b>OBSERVACIONES:</b>				<b>OTROS ENSAYOS</b>				
Tipo de ensayo: No destructivos Se realizó una inspección por líquidos penetrantes y una inspección radiográfica al cupon de prueba, dando como resultados la ausencia de porosidades, grietas superficiales y falta de penetración en la raíz. Tipo de ensayo: Dureza Observaciones: Los resultados de los ensayos de dureza cumplen satisfactoriamente con los valores exigidos tanto para el acero al carbono ASTM A569 y 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 materiales base. Los resultados de estos ensayos se consideran satisfactorios.								
<b>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.</b>								
Elaborado por: Br. Edward F, Saavedra R. C.I. 15.698.534				Ing. Vicente Ignoto Coordinador – C.V.S.				

Figura 3.41.- Registro de Calificación de de Procedimiento completado (RCP) Hoja 2/2.

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## CAPÍTULO IV

## **4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1- Caracterización de los Materiales Base y Aporte**

La caracterización de los materiales base y aporte se realizó a partir del análisis químico, contenido de ferrita, análisis metalográfico y ensayos mecánicos (dureza y tracción, únicamente para los materiales base), a objeto de verificar si cumplían con las especificaciones indicadas por las normas.

#### **4.1.1- Caracterización Química de los Materiales Base y Material de Aporte**

En los análisis realizados (materiales base) se puede observar que las composiciones químicas porcentuales se encuentran dentro de los valores nominales especificados para estos tipos de aceros (ASTM A569 y AISI/SAE 304) en las normas ASTM A1011<sup>(5)</sup> (para aceros de calidad comercial) y ASTM A240<sup>(37)</sup> respectivamente. Esto garantizó que, en la presente investigación, se emplearon los materiales especificados.

En lo que respecta al material de aporte ER309L se verificó que la composición química igualmente cumplía con las características descritas por la norma AWS A5.9<sup>(21)</sup>.

#### **4.1.2.- Caracterización Metalográfica de los Materiales Base**

La caracterización metalográfica de los materiales base se realizó en las superficies longitudinal y transversal al sentido de laminación (ver figuras 3.1 y 3.2). Para el caso del acero de bajo carbono ASTM A569 se identificaron las fases presentes en esta aleación: una matriz clara de ferrita (fase predominante) y una oscura de perlita (fase minoritaria que bordea los granos ferríticos). Con respecto al acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304 se identificaron las fases presentes: austenita (matriz clara) y ferrita (fase oscura), ubicada esta última entre los límites de los granos austeníticos. Para ambos estudios metalográficos, se evidenció que el tipo, cantidad relativa y distribución de fases corresponden a las microestructuras típicas de estos aceros.

#### 4.1.3.- Contenido de Ferrita en los Metales Base y Aporte

El contenido aproximado de la fase ferrítica para el acero inoxidable AISI/SAE 304 correspondió a un porcentaje de  $6,86 \pm 0,16$  calculado por el método metalográfico y a 7 % de ferrita (ubicado entre las líneas de 5 y 10%) a través de la aplicación del método químico. Se observa que existe una similitud entre los valores obtenidos por ambos métodos debido a que el diseño del diagrama de Schaeffler se basó en el método metalográfico. A pesar de ser un acero austenítico, se determinó que el mismo posee una cierta cantidad de ferrita, lo cual es usual, tal y como lo reportó Lafebvre. Además Lafebvre estableció que el rango de ferrita más idóneo para evitar el agrietamiento en caliente, mejorar las características mecánicas y disminuir la susceptibilidad a la corrosión frente a ácidos oxidantes a alta temperatura y la formación de la fase Sigma, es entre 5 y 15 %. Esto indica que este material base se encuentra en el intervalo que se establece como óptimo y se descarta la ocurrencia de los posibles problemas mencionados anteriormente.

La cantidad aproximada de ferrita en el material base ASTM A569 calculada mediante el método químico arrojó un valor de  $(82,90 \pm 5,63)$  %. Es importante destacar que el porcentaje de ferrita del material base ASTM A569 solo se puede estimar por el método metalográfico debido a que originalmente el diagrama Schaeffler se obtuvo a partir de aceros inoxidables. Este alto contenido de ferrita en mayor proporción es típico de este tipo de acero debido al bajo contenido de carbono (0,05 % aproximadamente).

Finalmente, el contenido de ferrita en el material de aporte calculado por el método químico fue de 5 %; éste también por ser un material de aporte inoxidable y austenítico cumple con lo reportado por Lafebvre.

Tabla 4.1.- Porcentaje de (%) Ferrita en los Materiales Base (ASTM A569 y AISI/SAE 304) y Aporte de acuerdo al método Metalográfico y Químico.

Materiales	Método Metalográfico	Método Químico
		Diagrama de Schaeffler
ASTM A569	82,90 ± 5,63	-
AISI/SAE 304	6,86 ± 0,16	7
ER309L	-	5

#### 4.1.4.- Caracterización Mecánica de los Materiales Base

##### 4.1.4.1.- Ensayo de Dureza de los Materiales Base

Los valores de dureza en los materiales base se determinaron de acuerdo a la norma ASTM A370<sup>(30)</sup> y los resultados se reportan en la tabla 4.2.

Estos resultados coinciden con lo establecido en las normas ASTM A1011<sup>(5)</sup> y ASTM A240<sup>(37)</sup>, ya que entran dentro de los intervalos de dureza especificados por dichas normas.

Tabla 4.2.- Resultados del ensayo de dureza de los materiales base y valores según sus normas respectivas.

Probeta	Escala Rockwell B
ASTM A569	68,14 ± 0,98
Norma ASTM A1011	75 máx
AISI/SAE 304	91,14 ± 1,02
Norma ASTM A240	92 máx

##### 4.1.4.2.- Ensayo de Tracción de los Materiales Base

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción de los materiales base ASTM A569 y AISI/SAE 304, se ilustran en la tabla 4.3. Se evidenció de esta forma, que los resultados cumplían con los estándares de propiedades mecánicas mecánicas mínimas especificadas por las normas.

Tabla 4.3.- Resumen de las propiedades mecánicas de los materiales base, según los resultados de los ensayos realizados y normas respectivas.

	$S_y$ (MPa)	$S_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Elongación (%)
ASTM A569 (Promedio)	290,93 ± 5,69	365,46 ± 4,80	35,80 ± 2,53
Norma ASTM A1011	205 - 340	-	≥ 25
AISI/SAE 304 (Promedio)	345,17 ± 10,44	668,81 ± 6,54	54,67 ± 1,78
Norma ASTM A240	205	515	40

## 4.2.- Determinación de los Parámetros del Proceso de Soldadura GMAW-P

### 4.2.1.- Criterio de Burnoff

Este criterio establece la relación entre corriente media ( $I_m$ ) y velocidad de alimentación del electrodo ( $W_F$ ). Utilizando corriente pulsada y convencional (cortocircuito) se encuentra el punto de intersección de 173,03 A ( $W_F = 5,34$  m/min), punto aproximado sobre el cual predomina la transferencia metálica con modo Spray. La relación de la curva  $I_m$  vs.  $W_F$  en ambos casos se obtuvo de manera similar a la investigación realizada por Amin<sup>(24)</sup>, determinándose una pendiente de valor  $m = 32,631$  para la correspondiente a la transferencia pulsada. De esta forma se cumplió con el objetivo final de determinar la intersección de las rectas y localizar los valores de  $I_m$  y  $W_F$  a partir de los cuales se lograría con mayor facilidad la transferencia tipo Spray del material de aporte utilizado. Se seleccionó como parámetro fijo (base de estudio) una  $W_F$  de 6 m/min. Utilizando las ecuaciones 9, 11, 12 y 13, con las que se obtienen los valores de Tiempo de Ciclo ( $T_C$ ) de 8 ms e  $I_m = 194,44$  A, fijando una  $W_F = 6$  m/min y variando el Tiempo de Pico ( $T_p$ ), se elaboró la Zona Paramétrica preliminar representada en la figura 3.7.

El objetivo de variar ( $T_p$ ) en la relación Corriente de Pico ( $I_p$ ) vs Corriente de Base ( $I_b$ ), consistió en generar rectas cuyas pendientes varían desde  $\infty$  (recta de pendiente vertical) para  $T_p = 0$  hasta una pendiente igual a cero (recta de pendiente horizontal) para  $T_p = T_C$ . De esta forma la variación de  $T_p$  genera rectas que



representan la relación  $I_p$  vs  $I_b$  que se intersectan en un punto común  $I_p = I_b = I_m$ . En conclusión, esta zona presenta las múltiples combinaciones entre  $I_p$ ,  $I_b$  y  $T_p$  para una  $I_m$  determinada, con lo cual se garantizaron las condiciones de pulso que cumplieran con el Criterio de Burnoff para una velocidad de alimentación de alambre ( $W_F$ ) dada. El área de la Zona Paramétrica preliminar aumenta a medida que aumenta  $W_F$ , disminuyendo como consecuencia  $T_C$  e incrementando  $I_m$  (ecuaciones 8 y 11, respectivamente); es decir, mayores valores de  $W_F$  implican mayores valores de  $I_m$  para lograr establecer el equilibrio de la tasa de fusión del electrodo.

#### 4.2.2.- Criterio de Transferencia Metálica

Con las relaciones  $I_p$  vs.  $T_p$  se determinó el exponente “m” (ecuación 14) que teóricamente garantizaría el desprendimiento de por lo menos una gota por pulso. Se debe recordar que el valor de  $-m$  depende del volumen de la gota, para un tipo y diámetro de material de aporte. El Volumen de Gota ( $V$ ) se fijó en  $0,905 \text{ mm}^3$ , calculado a partir de la ecuación 10 y utilizando un diámetro de electrodo de 1,2 mm. En la figura 3.8 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 obtiene un valor de  $m = -1,706$ .

En la tabla 3.10 se presentan los resultados obtenidos de  $I_m$  y (Voltaje Medio)  $V_m$  a partir de pruebas con corriente directa para  $W_F$  específicas que proporcionaron un modo de transferencia metálica tipo Spray. Empleando los oscilogramas registrados se obtuvieron los valores de Corriente Media Constante ( $I_{dc}$ ), por medio de histogramas (análisis estadístico) se obtuvieron los valores de Tiempo Modal de Desprendimiento ( $T_{dm}$ ) y a través las figuras 3.17 y 3.18 se obtuvo un valor de  $K_v = 48,706 \text{ A}^{1,706} \text{ s}$  para una gota de volumen igual a  $0,905 \text{ mm}^3$ . Para un volumen mayor el parámetro de desprendimiento se incrementará y viceversa.

Utilizado los valores obtenidos ( $m$  y  $K_v$ ) se consigue la ecuación [33] con la que se puede acotar la zona paramétrica preliminar. En la figura 3.19 se aprecia como esta ecuación (curva de Potencia Constante) acota a la zona paramétrica preliminar.

Amim<sup>(24)</sup> determinó que para elevadas  $W_F$ , la curva se invierte, reafirmando Rajasekaran<sup>(26)</sup>.

#### 4.2.3.- Criterio de Estabilidad del Arco

Con el fin de evitar la extinción del arco, se fijó la corriente de base mínima ( $I_b = 40$  A). Se acordó establecer en un valor de 40 A, con lo que se realizó el acotamiento final de la Zona Paramétrica según el método de Amin. A partir de este valor de corriente base se garantizó un arco eléctrico estable que se mantendría encendido.

#### 4.2.4.- Acotamiento de la Zona Paramétrica

A pesar de haber reducido las posibles combinaciones de parámetros eléctricos para transferencia pulsada mediante la aplicación de los tres criterios, se observó que el número de combinaciones posibles era excesivo. A objeto de simplificar estas combinaciones, se determinó por ensayo y error el conjunto de parámetros que proporcionaran un arco estable, uniformidad en el desprendimiento de gotas y a su vez el desprendimiento de una gota por pulso durante el tiempo pico ( $T_p$ ) para la zona paramétrica  $W_F$  estudiada.

Como se observa en la figura 4.1, la curva de potencia constante resultó invertida, quedando la posible zona paramétrica entre dicha curva y la recta  $I_b = 40$  A. En esta zona se realizaron pruebas al azar, lográndose establecer una distribución particular de las condiciones según el número de gotas desprendidas por pulso.

En la tabla 3.12 se registran los valores de los parámetros utilizados en cada uno de los treinta y un (31) ensayos realizados, veinte (20) de los cuales se grafican en la figura 3.28. Es posible apreciar como los puntos que corresponden al desprendimiento de una sola gota por pulso se agruparon en un área particular demarcada por un óvalo rojo, las condiciones que produjeron el desprendimiento de dos gotas por pulso se agruparon en la parte superior de la zona paramétrica y las condiciones que generaron tres gotas por pulso lo hicieron en la parte inferior.

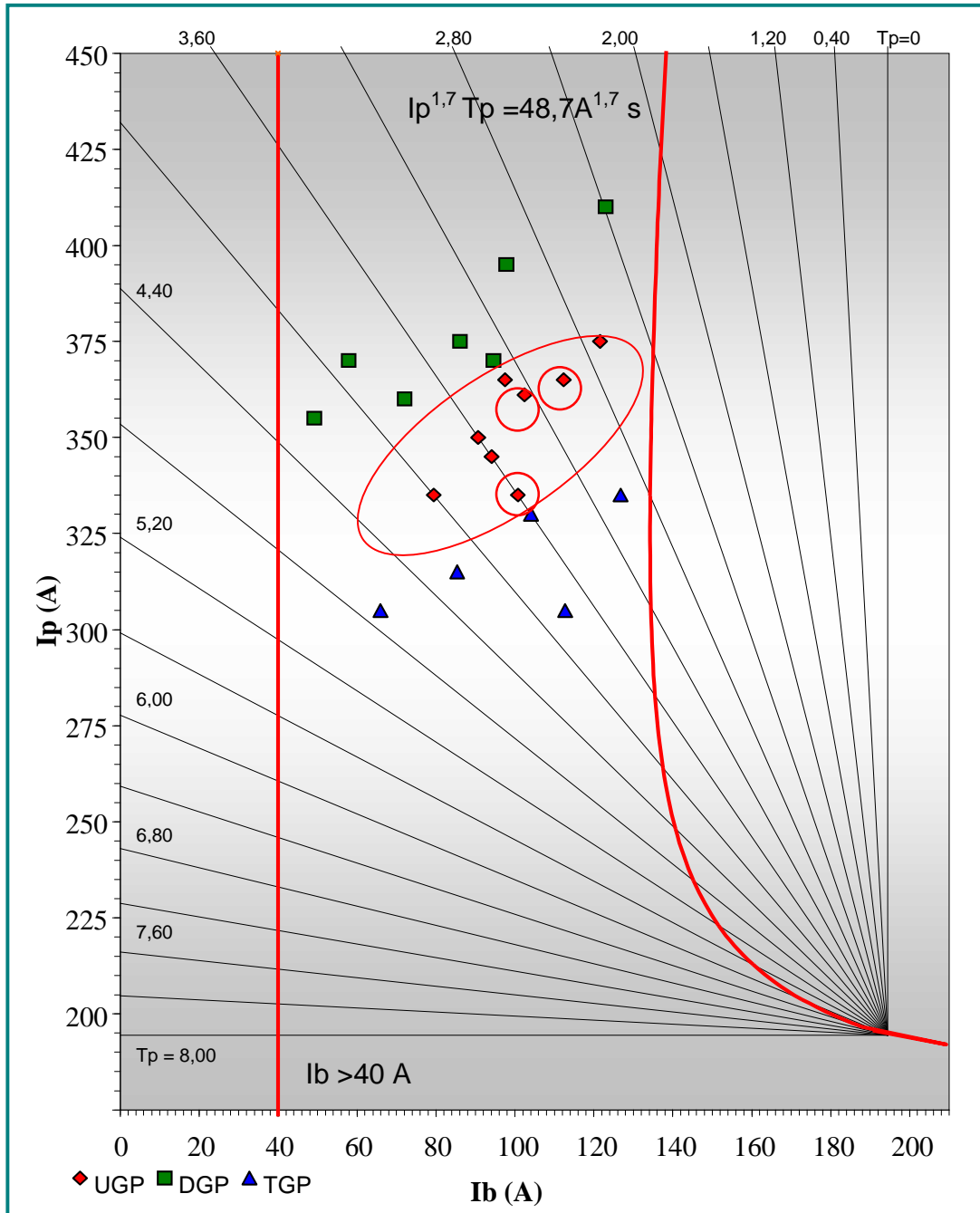


Figura 4.1.- Zona Paramétrica acotada por el Criterio de Transferencia Metálica y por el Criterio de Estabilidad del Arco, Parámetros que forman la zona de Una Gota por Pulso (UGP) dentro de la zona paramétrica en rojo. Los puntos verdes y azules indican parámetros que ofrecen dos y tres gotas por pulso, respectivamente.

#### 4.2.5.- Caracterización de Cordones sobre Chapa Plana

De los treinta y un (31) ensayos realizados, nueve (9) cumplieron con las condición de desprendimiento de una gota por pulso. De estas condiciones, se preseleccionaron tres (3) correspondientes a los ensayos E-3, E-11 y E-18, demarcadas por un círculo rojo en la figura 3.28, de acuerdo a los resultados de inspección visual.

Para realizar la selección del mejor de los tres conjuntos de condiciones se realizaron deposiciones de cordón sobre chapa en posición plana tomando como criterio los resultados del estudio de la geometría. La figura 3.27 muestra las macrográficas realizadas a las tres condiciones. En la inspección visual se detalla la escasa presencia de salpicaduras.

La condición E-11 presentó un cordón con ondulaciones suaves, simétrico y sin salpicaduras, mientras que la condición E-3 presentó una cara de refuerzo con ondulaciones muy marcadas y menos simétrico, a su vez el cordón E-18 presentó una simetría adecuada con ondulaciones poco marcadas.

Tabla 4.4.- Resumen de la caracterización geométrica de los cordones depositados sobre chapa plana.

Ensayo	Ancho (mm)	Refuerzo de Cara (mm)	Relación Ancho/Altura	Dilución (%)
E-3	12,0	2,80	0,43	51
E-11	12,2	2,90	0,42	45
E-18	12,0	2,90	0,41	52

De las tres condiciones seleccionadas, si bien el porcentaje de dilución de todas se encuentra en el rango adecuado, la condición E-11 presentó el valor óptimo, junto a un perfil de penetración igualmente óptimo (figura 3.27), por lo cual se seleccionó dicha condición como la definitiva para la realización de la junta soldada.

### 4.3.- Realización de la Junta de Soldadura a Tope

Al haber conseguido los parámetros de soldadura GMAW-P, en este caso el ensayo E-11 ( $I_p = 360$  A;  $I_b = 105,29$  A;  $T_p = 2,8$  ms;  $T_b = 5,2$  ms) de una gota por pulso, se realizó la unión disímil a tope de las láminas en un solo pase, utilizando los parámetros reportados en la tabla 3.13.

El conjunto de parámetros coincide con los rangos de los valores recomendados en la literatura para transferencia pulsada con alambre de diámetro de 1,2 mm:  $I_p = 350 - 450$  A;  $I_b = 50 - 150$  A;  $Frec = 80 - 120$  Hz<sup>(38)</sup>.

La tabla 3.14 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 de corriente media del proceso, voltaje medio del proceso y velocidad de soldadura, cuyos valores se reportan en la tabla 3.13.

Según las referencias bibliográficas el valor registrado en la tabla 3.13 se encuentra por debajo del valor máximo (2000 J/mm).

### 4.4.- Ensayos No Destructivos realizados al Cupón Soldado

En la inspección que se llevó a cabo al cupón soldado a través de los diferentes ensayos como lo fueron inspección visual, inspección por líquidos penetrantes e inspección radiográfica, no se encontró evidencia de discontinuidades superficiales tales como poros, grietas, socavaduras, falta de penetración o relleno insuficiente en la cara del cordón.

El ensayo de líquidos penetrantes confirmó el buen acabado superficial, así como la inexistencia de grietas y discontinuidades superficiales tanto en el metal base como en todo el cordón, reafirmando estos resultados con la evaluación radiográfica.

Finalmente, se realizó la inspección radiográfica con el objeto de documentar y obtener un registro físico de los resultados de la posible presencia de discontinuidades tanto internas como superficiales en la junta soldada. Sin embargo, a partir del análisis de la radiografía presentada en la figura 3.31, es posible concluir

que dicha junta cumplió con las condiciones de calidad especificadas en los criterios de aceptación de las reglas respectivas a los Ensayos No Destructivos realizados, del Código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX.

#### 4.5.- Ensayos Destructivos realizados al Cupón Soldado

##### 4.5.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura

Según la tabla 4.5 se representan los valores reportados por los análisis químicos del cordón en comparación con los del material de aporte y materiales base.

Tabla 4.5.- Resultados de los Análisis Químicos en los Materiales base, Aporte y Cordón de Soldadura.

	% C	% S	% Cr	% Ni	% Mn	% Mo	% Si
ASTM A569	0,050	0,016	0,01	0,07	0,22	0,05	0,05
AISI 304	0,044	0,004	17,93	7,89	2,00	-	0,66
ER309L	0,019	0,001	22,03	14,38	1,43	0,14	0,47
Cordón de soldadura	0,046	0,010	18,74	9,40	2,12	0,10	0,13

En la tabla 4.5 se puede apreciar que la composición química del cordón correspondió a lo esperado de acuerdo a la dilución entre los metales base disímiles y el aporte. Las variaciones registradas 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 pérdidas, en soldadura disímil, el material de aporte contiene valores más altos de estos elementos en comparación a los del metal base que presenta el mayor porcentaje de elementos aleantes (en este caso, el Acero Inoxidable AISI/SAE 304).

Observando los valores de porcentaje en peso del azufre (S) en la tabla 4.5, y tomando en cuenta que es un elemento altamente perjudicial, por su influencia en la

formación de grietas o fisuración en caliente, se concluye que el contenido de este elemento se encuentra en el rango establecido para los materiales base y de aporte, por lo que el contenido resultante en el cordón de soldadura es igualmente bajo (0,010 %), lo que se traduce en escasas posibilidades de formación de fases de bajo punto de fusión en el cordón de soldadura, es decir poco riesgo a la fisuración en caliente.

#### **4.5.2.- Evaluación Metalográfica del Cordón de Soldadura**

Las evaluaciones metalográficas se realizaron a fin de determinar la forma de los perfiles geométricos de los cordones de soldadura: penetración, ancho y altura del refuerzo, dilución, microestructura y fases presentes, zona afectada por el calor, presencia de discontinuidades (inclusiones, poros, grietas) en todas las probetas soldadas.

Las micrografías muestran la dirección de crecimiento de las columnas dendríticas en la zona fundida, típica de este modo de solidificación, observándose un crecimiento epitaxial que va desde la raíz al centro del cordón con una orientación hacia la parte superior del mismo, siguiendo la distribución de calor de la junta soldada. En la figura 3.32 se observan los granos austeníticos con tamaños similares a lo largo de los metales base hasta la zona de transición, particularmente del lado del metal base de acero inoxidable, concluyéndose que la zona afectada por el calor (ZAC) es pequeña.

La caracterización geométrica del cordón de soldadura se presenta en la tabla 3.16, 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 3.33 se puede observar y confirmar una excelente penetración del cordón de soldadura, apreciándose refuerzos de cara y raíz adecuados con respecto a la geometría de cordón, así como una relación ancho/profundidad por encima del valor mínimo recomendado por ciertos investigadores para evitar la fisuración en caliente de la junta.

La dilución, evaluada como una relación porcentual de participación de los metales base en el cordón de soldadura, se debe principalmente al aporte calórico generado por el modo de transferencia metálica pulsada. A medida que sea mayor el aporte calórico al cordón de soldadura, mayor mojabilidad; por ende mayor cantidad de metal base pasa a formar parte del cordón de soldadura.

#### **4.5.3.- Contenido de Ferrita en el Cordón de Soldadura**

Por ser la Ferrita una fase de alta ductilidad y poseer un menor coeficiente de expansión térmica, un cierto contenido de esta fase, facilita la relajación térmica y una menor contracción durante el enfriamiento de la junta soldada. 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, además de combatir las fisuración en caliente, también puede incrementar las características mecánicas del cordón de soldadura, pero, al mismo tiempo, es desfavorable al disminuir la resistencia a la corrosión frente a ácidos calientes y permitir la formación de fases fragilizantes. Por tales motivos se determinó el contenido de ferrita en el metal de soldadura.

Los valores del contenido de ferrita en el cordón de soldadura (ver tabla 3.19) presentaron una mínima variación entre el valor obtenido por el Método Metalográfico y el Método Químico, lo que nos indica que el resultado se encuentra cercano a la realidad. Este contenido es beneficioso ya que de acuerdo con las investigaciones<sup>(18), (19), (33)</sup> se considera que el contenido de ferrita debe oscilar entre (5 y 15 % Ferrita) para los Aceros Inoxidables Austeníticos. Adicionalmente, en la figura 3.34, correspondiente al diagrama de Schaeffler, se observa la ubicación del cordón en la zona donde se considera que un metal depositado es óptimo con respecto a propiedades mecánicas de una junta.



#### 4.5.4.- Dureza en el Cordón de Soldadura

Las mediciones de dureza fueron realizadas en la probeta soldada usando la norma ASTM E384<sup>(34)</sup>. Los resultados del ensayo de dureza son reportados en la tabla 3.20, tanto en valores de Microdureza Vickers y en la escala Rockwell B, donde se realizaron dos barridos horizontales a lo largo de la probeta e identificando las zonas afectadas por el calor, materiales base y cordón de soldadura, como puede observarse en la tabla 4.6.

Tabla 4.6.- Resultados promedios del ensayo de Microdureza representada por zonas de la Unión Disímil soldada con un electrodo ER309L.

Dureza Vickers (HV100)		
Zonas de la Soldadura	PERFIL 1	PERFIL 2
Material Base ASTM A569	150,05 ± 10,69	125,25 ± 4,34
ZAC1	151,96 ± 6,13	142,98 ± 15,73
Cordón de Soldadura	200,25 ± 12,47	176,19 ± 9,31
ZAC2	230,82 ± 10,10	206,13 ± 3,03
Material Base AISI/SAE 304	211,68 ± 8,94	194,53 ± 11,37

En la tabla puede observarse que el valor de dureza Vickers promedio, obtenido en las zonas afectadas por el calor de ambos barridos tanto superior como inferior y de cada ZAC a cada lado de material base diferente, es mayor a la zona del material base, es decir ocurrió un aumento en la dureza. Esto indica que los mayores valores de dureza tienen lugar en la zona de transición (ZAT) entre cada 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.

#### 4.5.5.- Ensayo de Tracción

Los ensayos de tracción se realizaron con la finalidad de determinar el esfuerzo real de fluencia ( $S_y$ ) y esfuerzo real a carga máxima ( $S_{max}$ ). Requisito indispensable para evaluar en la regla QW-153 del Código ASME sección IX, referente al criterio de aceptación de ensayos de tracción, con el diseño de probetas especificado en AWS B2.1: 1998 (especificación para procedimiento de soldadura y calificación de resultados). Se debió recurrir a este diseño de probeta debido a que no se disponía de un extensómetro para la zona calibrada de la probeta menor a 50 mm (2 pulgadas) en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la UCV (lugar donde se realizó dicho ensayo).

En la tabla 4.7, se presentan los resultados producto de los dos ensayos realizados. Aquí se observa que el valor promedio de carga máxima ( $S_{max}$ ) es de  $(350,975 \pm 0,00)$  MPa, el esfuerzo de fluencia ( $S_{ys}$ ) de  $(267,1 \pm 9,00)$  MPa, y una máxima elongación de  $19,10 \pm 1,30$  mm en la zona calibrada. En la figura 4.2, se ilustran las probetas ensayadas mostrando la fractura dúctil en la zona del metal base ASTM A569, que posee menor resistencia a la tracción en comparación con el otro metal base AISI/SAE 304 y el cordón de soldadura.

Tabla 4.7.- Resultados del Ensayo de Tracción de la Unión Disímil soldada con un electrodo ER309L.

Materiales	$S_y$ (MPa)	$S_{max}$ (MPa)	Elongación (%) (50 mm)
Probeta de Unión Disímil	$267,1 \pm 9,00$	$350,98 \pm 0,00$	$19,10 \pm 1,30$

Por ser ésta una unión disímil, es decir de dos aceros con resistencias y/o propiedades mecánicas distintas; el párrafo QW-153.1 acota que para superar el

ensayo de tracción, la muestra deberá tener una resistencia a la tracción que no sea inferior a “b: la resistencia a la tracción mínima especificada del más débil de los dos, si se utilizan metales base diferentes con una resistencia a la tracción mínima” y “d: si la muestra se rompe en el metal base fuera de la soldadura o en la interfaz de la soldadura, la prueba deberá ser aceptada con el cumplimiento de los requisitos, siempre que la fuerza no es más del 5% por debajo del esfuerzo a la tracción mínima del metal base”.

En la tabla 4.7, se aprecia que los valores recogidos por los ensayos cumplen con los valores mínimos establecidos en QW-422 y la norma ASTM A1011.

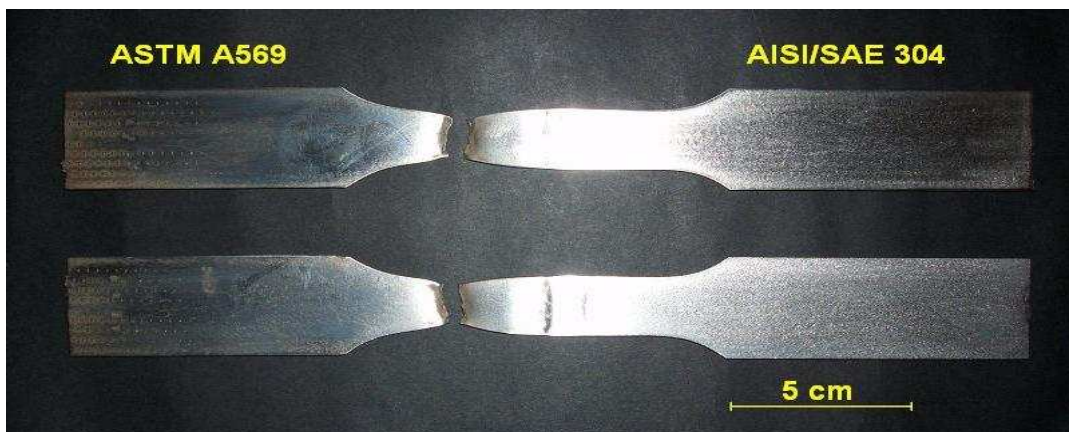


Figura 4.2.- Probetas de tracción ensayadas de la unión disímil de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 y Acero al Carbono ASTM A569, mostrando la fractura dúctil en el lado del Acero al Carbono típico de este tipo de material.

#### 4.5.6.- Ensayos de Doble

Este ensayo se debió realizar bajo el procedimiento y montaje que se muestra en la figura 4.3, referente al párrafo QW-466.3 (Guided-bend wrap around jig) del Código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX, ya que cuando se trata de juntas con materiales disímiles, el montaje de rodillos doble es el método adecuado, pero al no disponer de ese arreglo se procedió a realizar el ensayo de acuerdo a las especificaciones en QW 466.2 del Código ASME<sup>(28)</sup>, Sección IX, mientras que el diseño de la probeta

correspondió a lo establecido en QW-462.3(a) a fin determinar el grado de solidez y ductilidad de la junta soldada por medio de los ensayos de doblez guiado de cara y raíz (dos de cada una).

Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios debido a que el doblez de las probetas no resultó simétrico con respecto al eje del cordón de soldadura por la diferencia de resistencia mecánica entre los materiales base utilizados, sin embargo, al observar las superficies de los cordones de las probetas, no presentaron ninguna discontinuidad superficial, encontrándose libres de grietas por causa de la deformación desigual de las probetas de soldadura, es decir, se aprecia como el cordón y la zona afectada por el calor de cada probeta de soldadura, no se encuentra dentro de la porción doblada de la misma después de ensayada.

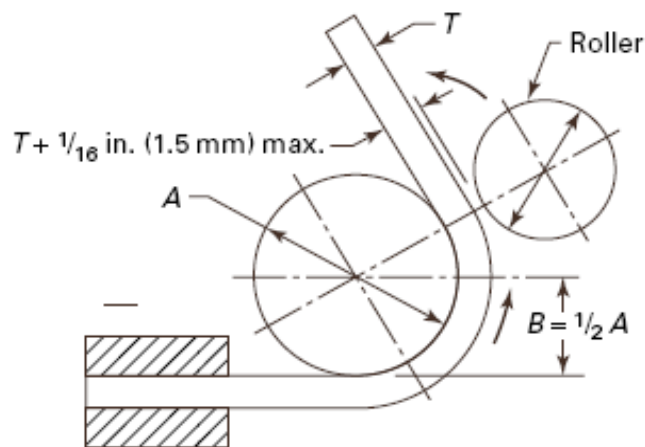


Figura 4.3.- Montaje adecuado para ensayo de doblez guiado para uniones de materiales disímiles y/o con resistencias diferentes. Según Código ASME, Sección IX.

**4.6.- Registro de Calificación del Procedimiento (RCP)**

De este modo, con los resultados obtenidos en los ensayos realizados y debidamente completado el Registro de Calificación del Procedimiento (RCP), se puede asegurar que la selección de los parámetros de soldadura con modo de transferencia pulsada para la realización de la junta disímil de acero inoxidable AISI/SAE 304 y acero al carbono ASTM A569 fueron acertados por lo que el procedimiento de soldadura califica.

# **CONCLUSIONES**

## **CAPÍTULO V**

## 5.1- CONCLUSIONES

- Un conjunto de parámetros óptimos para fabricar una soldadura con GMAW-P para la unión disímil del aceros AISI/SAE 304 y ASTM A569, en posición plana (1G), con espesor de 4 mm y junta a tope cuadrada, es:  $I_p = 360$  A,  $I_b = 105,29$  A,  $T_p = 2,8$  ms,  $T_b = 5,2$  ms,  $I_m = 194,4$  A,  $W_F = 6,0$  m/min, utilizando como gas de protección Argón + 2% O<sub>2</sub> con un flujo de 15 L/min y un material de aporte ER 309L de 1,2 mm de diámetro.
- Los resultados obtenidos en los Ensayos No Destructivos: Inspección Visual, Líquidos Penetrantes e Inspección Radiográfica, que se efectuaron al cupón de prueba definitivo no evidenciaron discontinuidades superficiales o internas.
- Los resultados obtenidos en los Ensayos Destructivos: Análisis Químico, Evaluación Metalográfica, Tracción y Dureza, cumplen con lo establecido en el Código ASME, Sección IX y por las normas respectivas para los consumibles utilizados.
- El contenido de ferrita en el cordón de la junta disímil AISI/SAE 304 – ASTM A569 es de 5 %.
- Los resultados de los ensayos de Doblez realizados con el montaje mostrado en el párrafo QW-466.2 (Guided – Bend Roller Jig) del Código ASME, Sección IX, tanto de Cara como de Raíz, no fueron satisfactorios.
- El Registro de Calificación de Procedimiento de Soldadura (RCP) efectuado según el Código ASME, Sección IX para la Especificación de Procedimiento obtenida en el presente trabajo documenta que la soldadura es aprobada y califica.

# RECOMENDACIONES

## CAPÍTULO VI



## 6.1- RECOMENDACIONES

- Determinar la Zona Paramétrica utilizando los criterios desarrollados por Amin para materiales de aporte inoxidable adicionales de aplicación industrial, a fin de disponer de la información necesaria para la obtención de juntas soldadas con propiedades adecuadas al servicio específico de las mismas.
- Profundizar el estudio metalográfico de las juntas utilizando técnicas de Microscopía Electrónica (Barrido y Transmisión) para identificar y cuantificar las fases presentes que pudieron presentarse durante la soldadura y determinar su influencia en las propiedades mecánicas de la junta soldada.
- Realizar el ensayo de dobléz guiado adecuado para uniones de materiales disímiles con resistencias mecánicas diferentes como lo establece el párrafo QW-466.3 (Guided-bend wrap around jig), según Código ASME, Sección IX.
- Caracterizar el comportamiento a fatiga y la resistencia al impacto de las juntas disímiles soldadas del acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304 y el acero de bajo carbono ASTM A569, con el fin de establecer el alcance de sus posibles aplicaciones industriales.
- Realizar estudios modificando la composición y flujo del gas de protección para lograr la transferencia de una gota por pulso con GMAW y así establecer las posibles ventajas en cuanto a calidad y propiedades de la junta con respecto a los resultados obtenidos utilizando un flujo de 15 L/min de Ar + 2% O<sub>2</sub>.

- Realizar modificaciones de los parámetros de velocidad de alimentación y soldadura para optimizar la productividad del proceso GMAW con transferencia pulsada.
  
- Evaluar las propiedades mecánicas de uniones soldadas con GMAW-P, manteniendo los mismos parámetros de soldeo, pero en posiciones de soldadura diferentes (horizontal, vertical y sobrecabeza) y comparar estos resultados con los obtenidos en esta investigación para posición plana.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## **CAPÍTULO VII**

**7.1.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] ASM, H. (1990). *Properties and selection: irons, steels and high - performance alloys*: Classification and designation of carbon and low- alloy steels. ASM (10ª ed.) Vol 1.
- [2] Doyle, L., y otros. (1988). *Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros*. (3ª ed.). México: Prentice Hall.
- [3] ASM, H. (1990). *Properties and selection: irons, steels and high - performance alloys*: Carbon and low – alloy steel sheet and strip. ASM (10ª ed.) Vol 1.
- [4] Standard specification for steel, carbon (0,15 maximum, percent), hot – rolled, sheet and strip commercial quality. ASTM A 569-91. (1991). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [5] Standard specification for steel, sheet and strip, hot – rolled, carbon, structural, high – strength low – alloy, high – strength low – alloy with improved formability, and ultra – high strength. ASTM A 1011-08. (2008). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [6] Liu, S., and Indacochea, J. (1990). *Weldability of Steels. ASM Metals Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys* (9ª ed.). 603 – 613.
- [7] Ignoto, V. (2000). *Soldadura para Ingenieros*. Caracas.
- [8] Kotecki, D. (1995). *Welding of Stainless Steel*. ASM Handbook. Welding, Soldering and Brazing. (9ª ed.). 6, 677 - 707.
- [9] Malcolm, B. (1990). *Cast Stainless Steels. ASM Handbook. Properties and selection: irons, steels and high - performance alloys* (10ª ed.) Vol 1.
- [10] Avner Sydney. (1975). *Introducción a la Metalurgia Física*. McGraw-Hill, (1ª ed.). México pp 290-298.
- [11] Jamaes, A. (1989). *Soldadura*. (3ª ed.). México: McGraw-Hill.

- [12] Brooks J., y Lippold. J. (1995). *Selection of Wrought Austenitic stainless Steels*. ASM Handbook. (9ª ed.) Vol, 6, 456 - 469.
- [13] Schaeffler, A. (1949). *Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal*, Met. Prog, 56 (11), 680-680.
- [14] Delong, W. (1974). *Ferrite in austenitic stainless steel welds metal*. Welding Journal, 53 (7). 273 – 286.
- [15] Siewert, T., McCowan, C., and Olson, D. (1988). *Ferrite Number Prediction to 100 FN in Stainless Steel Weld Metal*. Welding Journal. 67 (12), 289 – 298.
- [16] Kotecki, D., and Siewert, T. (1992). *WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metal*. A modification of the WRC-1988 diagram. Welding Journal, 71 (5). 171 – 178.
- [17] Ospina, L., Aguirre, C., y Parra, L. (s/f). *Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disímiles*. Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Scientia Et Technica, mayo, año/vol. XIII, número 034. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia, 273-278.
- [18] Lippold, J. (1995). Edison Welding Institute. *Dissimilar Welds with Stainless Steel*. ASM Handbook. Welding, Soldering and Brazing (9ª ed.). USA, Vol 6, 500 - 504.
- [19] ASM, H. (1995). *Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining*. En Davis, J., Davis & Associates. (comp). Welding, Brazing and soldering ASM (9ª ed.) Vol 6.
- [20] Welding, H. (1991). *Welding Process*. (8ª ed.). Vol. 2.
- [21] Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods. ANSI / AWS A5.9 – 93. (1993). AWS American welding society.
- [22] Hurtado, A. (2004). *Caracterización de juntas soldadas del acero inoxidable AISI/SAE 304 por GMAW-P*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela.
- [23] Recommended practices for Gas Metal Arc Welding. ANSI / AWS C5.6 – 89

- R. (1989). AWS American welding society.
- [24] Amim, M. (1983). *Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding*. Metal Construction, (5), 272 – 278.
- [25] Kim, Y., and Eager, T., (1993). *Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding*. Welding Journal, 72 (7), 279 - 287.
- [26] Rajasekaran, S., Kulkarni, S., Mallya, U., and Chaturvedi, R. (1998). *Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gas metal arc welding*. Welding Journal 77 (6), 254 - 269.
- [27] Benzo, M., y Capodicasa, A. (1995). *Calificación de Procedimientos de Soldadura Tubo / Tubo Usados en Calderas*. Universidad Central de Venezuela, 75–77.
- [28] 2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code IX. (2005). *Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, blazers and welding and brazing operators*. ASME.
- [29] Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM E 407-07. (2007). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [30] Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. ASTM A 370-08a. (2008). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [31] Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. ASTM E 340-00 (reapproved 2006). (2006). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [32] Standard test method for liquid penetrant examination. ASTM E 165-02. (2002). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [33] Delong, W., Ostrom, G., and Szumachowski, E. (1956). *Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal*. Welding Journal, 35 (11). 521 – 528.
- [34] Standard test method for microindentation hardness of material. ASTM E 384

- 08a (2008). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [35] Specification for welding procedure and performance qualification. ANSI / AWS B2.1:1998. (1998). AWS American welding society.
- [36] Standard specification for guided bend test for ductility of welds. ASTM E 190 – 92 (reapproved 2008). (2008). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [37] Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet and strip for pressure vessels and general applications. ASTM A 240-08. (2008). ASTM American Society for Testing and Materials.
- [38] Avesta Welding. Catalogo de Consumibles.  
<http://www.avestawelding.com/3928.epibrw>
- [39] Gretoft, B., y Karlsson, L. (1990). *Fisuración en Caliente durante la Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos*. Soldadura y Tecnologías de Unión, 6, 68-73.
- [40] Gretoft, B., y Karlsson, L. (1991). *Fisuración en Caliente durante la Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos II*. Soldadura y Tecnologías de Unión, 8, 1-12

# **ANEXOS**

## **CAPÍTULO VIII**



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE LOS  
 MATERIALES  
 LABORATORIO QUIMICO INSTRUMENTAL  
 Teléfonos: 6051602-1527 / Telefax: 6051515



## REPORTE

### RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS

**Solicitante:** Br. Edward Ramírez

**Fecha:** 27/04/09

**Material:** Muestras de acero calidad comercial, inoxidable, alambre para soldar (ER309L) y metal depositado por soldadura

**Elementos a determinar:** Carbono (C), Azufre (S), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Silicio (Si), Níquel (Ni), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cobalto (Co) y Molibdeno (Mo).

**Métodos:**

- Espectrofotometría de absorción atómica de llama para Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Silicio (Si) y Molibdeno (Mo).
- Gasometría por radiación infrarroja para el Carbono (C) y Azufre (S).
- Fluorescencia para el Cobalto (Co), Cromo (Cr) y Níquel (Ni) en muestra de acero inoxidable inoxidables y metal depositado por soldadura.

**Procedimiento o norma:**

- Análisis de aceros y fundiciones, código MT-10. Manual de Métodos analíticos PERKIN ELMER.
- Norma ASTM E663: Flame Atomic Absorption Analysis.
- Norma ASTM E350: "Standard Methods for CHEMICAL ANALYSIS OF CARBON STEEL, LOW-ALLOY STEEL, SILICON ELECTRICAL STEEL, INGOT IRON AND WROUGHT IRON".

**Resultados:**

**Muestra:** Acero calidad comercial

<i>Elemento</i>	<i>%wt ± S</i>	<i>Elemento</i>	<i>%wt ± S</i>
C	0.050 ± 0.001	Cr	0.01 ± 0.00
S	0.016 ± 0.000	Mo	0.05 ± 0.00
Mn	0.22 ± 0.00	Ni	0.07 ± 0.00
Si	0.05 ± 0.01		
Cu	0.02 ± 0.00		

ND: No fue detectado

Figura 8.1.- Reporte de resultados de análisis químicos. Hoja 1/2.

**Muestra: Acero inoxidable**

<b>Elemento</b>	<b>%wt ± S</b>	<b>Elemento</b>	<b>%wt ± S</b>
C	0.044 ± 0.001	Cr	17.93 ± 0.45
S	0.004 ± 0.000	Mo	ND
Mn	2.00 ± 0.06	Ni	7.89 ± 0.39
Si	0.66 ± 0.28		
Cu	ND		

ND: No fue detectado

**Muestra: ER309L**

<b>Elemento</b>	<b>%wt ± S</b>	<b>Elemento</b>	<b>%wt ± S</b>
C	0.019 ± 0.001	Cr	22.03 ± 0.36
S	0.001 ± 0.000	Mo	0.14 ± 0.00
Mn	1.43 ± 0.21	Ni	14.38 ± 0.77
Si	0.47 ± 0.01		
Cu	0.06 ± 0.00		

ND: No fue detectado

**Muestra: Metal depositado por soldadura**

<b>Elemento</b>	<b>%wt ± S</b>	<b>Elemento</b>	<b>%wt ± S</b>
C	0.046 ± 0.007	Cr	18.74 ± 0.53
S	0.010 ± 0.002	Mo	0.10 ± 0.00
Mn	2.12 ± 0.89	Ni	9.40 ± 0.70
Si	0.13 ± 0.02	Co	0.77 ± 0.15
Cu	ND		

ND: No fue detectado



**T.S.U Francisco Durán**  
Analista



**Ing. Marcial Pérez**  
Jefe Lab. Análisis de Química Instrumental

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

Figura 8.2.- Reporte de resultados de análisis químicos. Hoja 2/2.

AGA

LOTE #: 221008-311

MUESTRA #: 2988

**DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD**

VALIDEZ: 22/10/08 AL: 22/10/09

**AGAMIX 12**

Este producto cumple con los siguientes requisitos de calidad:

**COMPOSICIÓN QUÍMICA:** (Expresada en concentración molar)

OXIGENO	O <sub>2</sub>	2.0 ± 0.2	%
HUMEDAD	H <sub>2</sub> O	5.0	ppm max.
ARGON	Ar	BALANCE	

**CONTENIDO:** 6.0 m<sup>3</sup>  
**SERIAL DEL CILINDRO:** A21528S  
**TIPO DE CILINDRO:** 040

**VÁLVULA:** CGA-580  
**PRESIÓN (21°C):** 2200 psig.

AGA Gas, C.A.  
 Laboratorio de Gases

LABORATORIO DE GASES

José F. Azuaga O.

PLANTA GASES ESPECIALES Maracay, Estado Aragua., TELÉFONO: (0243) 5516875 / FAX: (0243) 5515946

VE-PRO-0025 E

Figura 8.3.- Certificado de Declaración de Conformidad para el Gas de Protección AGAMIX 12 realizado por el fabricante.

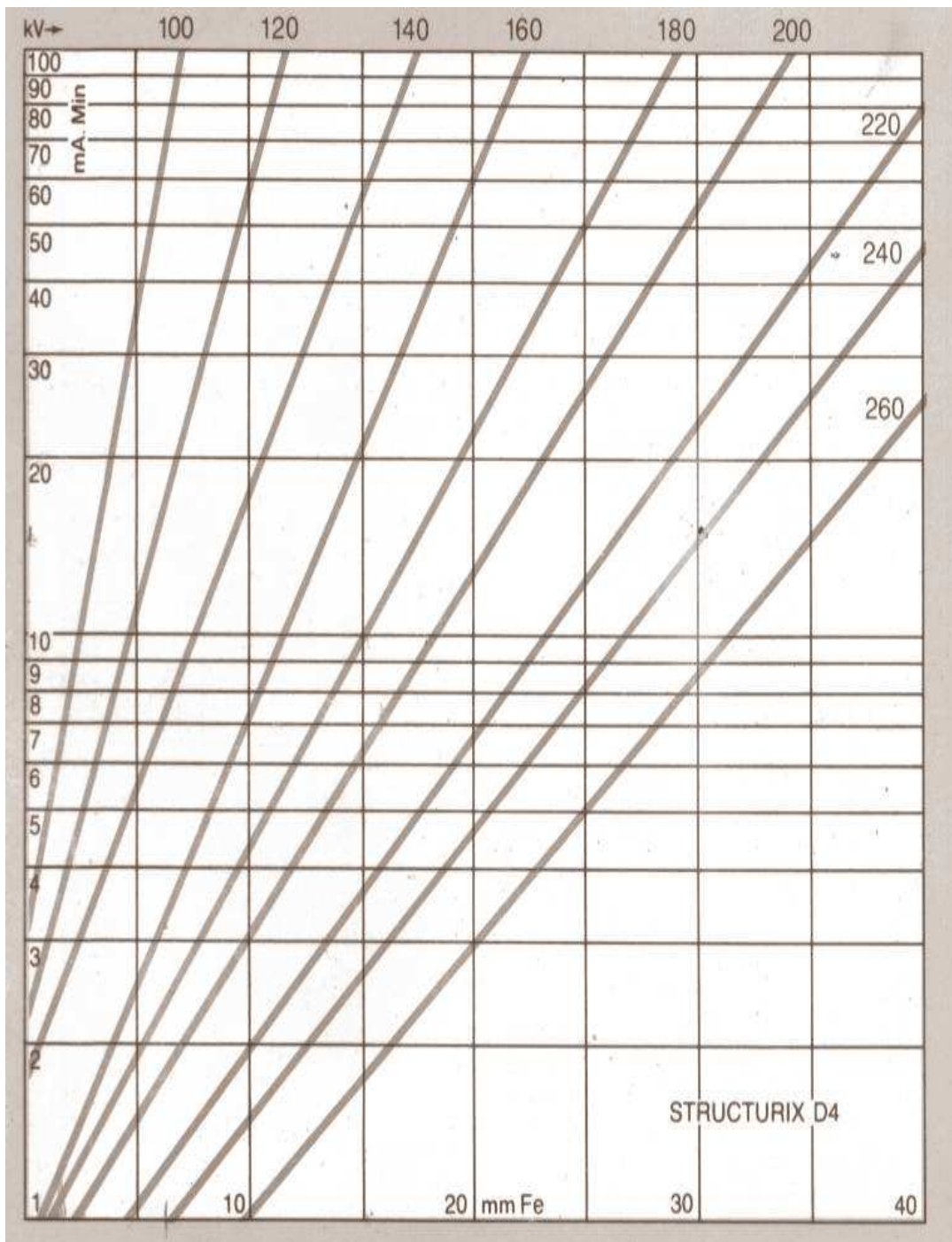


Figura 8.4.- Curvas de Exposición para Aceros, utilizada para determinar los parámetros radiográficos.