

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Estudio del Efecto de Mezclas de Gas de Protección Sobre las
Características de Soldaduras Utilizando el Proceso GMAW.”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Luis Paúl Ajila Camacho

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2007

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

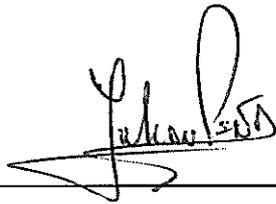
A MI ESPOSA

A MIS HIJOS

AGRADECIMIENTO

A Dios, y mi familia, quienes me apoyaron en cada momento. A la empresa INDURA S.A., la cual me ofreció facilidades para desarrollar la parte práctica de este trabajo, al Tng. Marco Rojano, por su ayuda en los Laboratorios de Materiales, y a mi director de tesis, Ing. Omar Serrano, por su invaluable apoyo, ayuda y paciencia.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Julián Peña E.
DELEGADO DEL
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



CIB-ESPOL



Ing. Omar Serrano V.
DIRECTOR DE TESIS

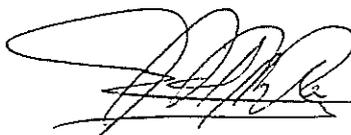


Ph. D. Cecilia Paredes V.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Luis Paúl Ajila Camacho

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo establecer un criterio sobre cual gas protector utilizado en el proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding) ofrece las mejores ventajas en su aplicación, tomando en cuenta las características de la soldadura, propiedades mecánicas y los aspectos económicos involucrados en su aplicación.

Las obras más recientes que se han realizado y se están ejecutando en la ciudad de Guayaquil y el resto del país, tales como Malecón 2000, Malecón del Salado, regeneración urbana, centros comerciales como Mall del Sol, Río Centros, edificios, parques, cines, aeropuertos, y muchos más, demandan una gran utilización de todo tipo de estructuras soldadas, donde la aplicación de soldadura es la principal herramienta tecnológica para su construcción

Esto ha permitido que el proceso (GMAW) haya experimentado un gran desarrollo en la industria metalmecánica y de la construcción, las mismas que lo han adoptado como herramienta básica en sus operaciones por ser un

proceso semiautomático de alto rendimiento y de fácil automatización, permitiendo realizar trabajos de soldadura en menor tiempo que el proceso tradicional SMAW, ya que sus ventajas principales son mayor velocidad de avance, velocidad de depositación, menor costo, etc.

En el primer capítulo se realizará una breve introducción a los fundamentos teóricos del proceso GMAW, como también se respalda los costos que se involucran en el proceso y los diferentes tipos de uniones que se realizan bajo el código AWS. En el capítulo segundo se estudiará brevemente las estructuras en las cuales se aplicará la soldadura para la investigación de este trabajo, y seguido se procede a la aplicación de la soldadura utilizando diferentes mezclas de gases. En el capítulo siguiente se realizará un estudio detallado de los resultados obtenidos del capítulo anterior bajo consideraciones físicas, metalúrgicas, mecánicas y económicas. Finalmente el capítulo cuarto tratará de las conclusiones y recomendaciones sobre los resultados obtenidos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1.	
1. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW.....	3
1.1 Variables del Proceso.....	6
1.2 Gases de Protección y Modos de Transferencia del Metal de Aporte Utilizados.....	14
1.3 Metalurgia de la Soldadura.....	20
1.4 Soldabilidad de los Metales y Aleaciones Ferrosas con el Proceso GMAW.....	33
1.5 Requerimientos de Uniones Soldadas bajo Normas AWS D1.1.....	37
1.5.1 Materiales de Aporte.....	39

1.5.2 Simbología, Tipos de Uniones y Posiciones de Soldadura.....	42
1.5.3 Requerimientos Mecánicos.....	51
1.6 Costos Involucrados en el Proceso GMAW.....	52

CAPITULO 2.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL: APLICACIÓN DEL PROCESO GMAW EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	56
2.1 Características de los Elementos Estructurales.....	56
2.2 Parámetros y Condiciones de Soldadura:	
Matriz Experimental.....	59
2.3 Ejecución de Soldaduras Utilizando Diferentes Mezclas de Gas.....	62
2.3.1 100% CO ₂	64
2.3.2 80% Ar + 20% CO ₂	67
2.3.3 92% Ar + 8% CO ₂	68

CAPITULO 3.

3. DISCUSION Y RESULTADOS.....	70
3.1 Morfología de las Soldaduras.....	72
3.2 Metalurgia de las Soldaduras.....	77
3.3 Propiedades Mecánicas y Dureza.....	95

3.4 Calidad de las Soldaduras con Ensayos No Destructivos.....	110
3.5 Análisis de Costos.....	113

CAPITULO 4.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
--	-----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

SIMBOLOGÍA

"	Pulgadas
1F	Posición Plana Soldadura en Filete
1G	Posición Plana Soldadura en Ranura
c / protección	Con protección
CJP	Junta de Penetración Completa
F	Posición Plana
G	Gamma
H	Posición Horizontal
M. A.	Metal de Aporte
Mf	Temperatura fija de finalización de formación de Martensita
Ms	Temperatura fija de inicio de formación de Martensita
°	Grado
OH	Posición sobre cabeza
PJP	Junta de Penetración Parcial
s / protección	Sin protección
V	Posición Vertical

ABREVIATURAS

%	Porcentaje
Ar	Argón
AWS	American Welding Society
BCC	Body Centered Cubic
C. V.	Voltaje Constante
CE	Carbono Equivalente
CO ₂	Dióxido de Carbono
D.C.	Corriente Directa
DCPE	Direct Current Electrode Positive
E. P.	Electrodo Positivo
FCAW	Flux Cored Arc Welding
FCC	Face Centered Cubic
Fe	Hierro
Fe ₃ C	Cementita
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HRB	Hard Rockwell B
Hv	Calor de aporte
M. A.	Material de Aporte
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
mm	Milímetros
Pmd	Peso del metal depositado
SAW	Sumerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
TTT	Transformación Temperatura Tiempo
V	Voltaje
WPS	Welding Procedure Specification
WPSs	Welding Procedure Specifications
ZAC	Zona Afectada por el Calor

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1.1	Elementos del Proceso GMAW..... 5
FIGURA 1.2	Voltaje Constante..... 7
FIGURA 1.3	Stick out..... 8
FIGURA 1.4	Corrientes típicas versus velocidad de alimentación de alambre para electrodos de acero al carbono..... 10
FIGURA 1.5	Gases de Protección..... 11
FIGURA 1.6	Formas del cordón según el gas aplicado..... 14
FIGURA 1.7	Representación esquemática de la transferencia por cortocircuito..... 17
FIGURA 1.8	Modos de transferencia metálica: (a) spray, (b) globular y (c,d, e y f) cortocircuito..... 19
FIGURA 1.9	Solubilidad de C en hierro alfa (BCC) en función de la temperatura..... 22
FIGURA 1.10	Diagrama de fase Fe- Fe ₃ C..... 24
FIGURA 1.11	Efecto temperatura austenitización sobre el tamaño de grano austenítico..... 26
FIGURA 1.12	Tamaño de grano austenítico en ZAC..... 27
FIGURA 1.13	Carbono atrapado en la red BCC..... 28
FIGURA 1.14	Dureza de la martensita en función del contenido en carbono..... 29
FIGURA 1.15	Cuatro soldaduras de diferentes aportes térmicos con sus respectivas ZAC..... 30
FIGURA 1.16	Procedimiento para determinar el comportamiento Transformación-Temperatura-Tiempo..... 31
FIGURA 1.17	Diagrama típico TTT..... 32
FIGURA 1.18	Acero que experimenta transformación isotérmica a 650 °C..... 32
FIGURA 1.19	Simbología del material de aporte..... 40
FIGURA 1.20	Localización estándar de los elementos de los

	símbolos de Soldadura.....	42
FIGURA 1.21	Símbolos Básicos de Soldadura.....	42
FIGURA 1.22	Terminología de las Juntas.....	43
FIGURA 1.23	Unión Tope.....	44
FIGURA 1.24	Unión Esquina.....	44
FIGURA 1.25	Unión T.....	45
FIGURA 1.26	Unión Traslape.....	45
FIGURA 1.27	Unión Borde.....	45
FIGURA 1.28	Posición del cordón de soldadura.....	46
FIGURA 1.29	Posición de Soldadura por Filete.....	47
FIGURA 1.30	Posición de las pruebas en planchas de Soldadura por Ranura.....	48
FIGURA 1.31	Posición en Muestras de Tuberías para Soldadura por Ranura.....	49
FIGURA 1.32	Posición de Pruebas en Planchas de Soldadura en Filete.....	50
FIGURA 1.33	Posición de Muestras de Tuberías para Soldaduras Filete.....	51
FIGURA 1.34	Software de Costos de Soldadura Indura S.A.....	54
FIGURA 2.1	Soldadura tipo ranura simple y doble filete.....	57
FIGURA 2.2	Esquema del tipo de soldadura con 100% CO ₂ , en los diferentes tipos de transferencia: Corto Circuito y Globular.....	65
FIGURA 2.3	Esquema del tipo de Soldadura a través de Transferencia Corto Circuito (Propiedades mecánicas).....	66
FIGURA 2.4	Cordón de soldadura con 100% CO ₂ , en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito y (b) Globular.....	66
FIGURA 2.5	Cordón de soldadura con 80 % Ar + 20 % CO ₂ , en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito, (b) Globular y (c) Spray.....	68
FIGURA 2.6	Cordón de soldadura con 92 % Ar + 8 % CO ₂ , en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito, (b) Globular y (c) Spray.....	69
FIGURA 3.1	Efecto de la dilución del metal de aporte por la mezcla con los metales base	73
FIGURA 3.2	Calor vs. Penetración.....	75
FIGURA 3.3	Calor vs. Dilución.....	76
FIGURA 3.4	Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 100% CO ₂	79

FIGURA 3.5	Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 100% CO ₂	80
FIGURA 3.6	Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 80% Ar + 20% CO ₂	81
FIGURA 3.7	Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 80% Ar + 20% CO ₂	82
FIGURA 3.8	Microestructura de probetas en Transferencia Spray, 80% Ar + 20% CO ₂	83
FIGURA 3.9	Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 92% Ar + 8% CO ₂	84
FIGURA 3.10	Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 92% Ar + 8% CO ₂	85
FIGURA 3.11	Microestructura de probetas en Transferencia Spray, 92% Ar + 8% CO ₂	86
FIGURA 3.12	Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Corto Circuito, 100% CO ₂	88
FIGURA 3.13	Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Globular, 100% CO ₂	89
FIGURA 3.14	Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO ₂ , en Transferencia Corto Circuito.....	89
FIGURA 3.15	Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO ₂ , en Transferencia Globular.....	90
FIGURA 3.16	Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO ₂ , en Transferencia Spray.....	90
FIGURA 3.17	Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO ₂ , en Transferencia en Corto Circuito.....	91
FIGURA 3.18	Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO ₂ , en Transferencia Globular.....	91
FIGURA 3.19	Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO ₂ , en Transferencia Spray.....	92
FIGURA 3.20	Gráfico comparativo de la Penetración con las diferentes mezclas de gases y procesos de transferencia.....	92
FIGURA 3.21	Gráfico comparativo de la Dilución con las diferentes mezclas de gases y procesos de transferencia.....	94
FIGURA 3.22	Método de Transferencia Corto Circuito con 100% CO ₂	99
FIGURA 3.23	Método de Transferencia Corto Circuito con 80% Ar + 20% CO ₂	100
FIGURA 3.24	Método de Transferencia Corto Circuito con 92% Ar + 8% CO ₂	101
FIGURA 3.25	Gráfico comparativo de la Dureza en las diferentes mezclas de gases en el proceso de transferencia por Corto Circuito.	102

FIGURA 3.26	Método de Transferencia Globular con 100% CO ₂	103
FIGURA 3.27	Método de Transferencia Globular con 80% Ar + 20% CO ₂	104
FIGURA 3.28	Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO ₂	105
FIGURA 3.29	Gráfico comparativo de la Dureza en las diferentes mezclas de gases en el proceso de transferencia Globular.....	106
FIGURA 3.30	Método de Transferencia Globular con 80% Ar + 20% CO ₂	107
FIGURA 3.31	Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO ₂	108
FIGURA 3.32	Gráfico comparativo de la Dureza en las diferentes mezclas de gases en el proceso de transferencia Spray.....	109
FIGURA 3.33	Radiografía de la Muestra con 100% CO ₂	112
FIGURA 3.34	Radiografía de la Muestra con 80% Ar +20% CO ₂	112
FIGURA 3.35	Radiografía de la Muestra con 92% Ar +8% CO ₂	112
FIGURA 3.36	Cálculo de Costos de Soldadura 100% CO ₂ (Corto Circuito)	114
FIGURA 3.37	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO ₂ (Corto Circuito)	114
FIGURA 3.38	Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO ₂ (Corto Circuito)	115
FIGURA 3.39	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO ₂ (Corto Circuito)	115
FIGURA 3.40	Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO ₂ (Corto Circuito)	116
FIGURA 3.41	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO ₂ (Corto Circuito)	116
FIGURA 3.42	Cálculo de Costos de Soldadura 100% CO ₂ (Globular)	117
FIGURA 3.43	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO ₂ (Globular)	117
FIGURA 3.44	Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO ₂ (Globular)	118
FIGURA 3.45	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO ₂ (Globular)	118
FIGURA 3.46	Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO ₂ (Globular)	119
FIGURA 3.47	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO ₂ (Globular)	119

FIGURA 3.48	Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO ₂ (Spray)	120
FIGURA 3.49	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO ₂ (Spray)	120
FIGURA 3.50	Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO ₂ (Spray)	121
FIGURA 3.51	Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO ₂ (Spray)	121
FIGURA 3.52	Cuadro Comparativo de Costos.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.	
TABLA 1	Requerimientos de Composición Química de Electrodo Sólidos y Alambres.....	41
TABLA 2	Tabulación de Posiciones de Soldaduras por Ranuras.....	46
TABLA 3	Tabulación de Posiciones de Soldaduras por Filetes.....	47
TABLA 4	Matriz Experimental.....	60-61
TABLA 5	Resultados de las pruebas.....	70-71
TABLA 6	Ensayo de Tracción.....	96
TABLA 7	Ensayo de Doblado Lateral.....	97
TABLA 8	Dureza: Corto Circuito 100% CO ₂	99
TABLA 9	Dureza: Corto Circuito 80% Ar + 20% CO ₂	100
TABLA 10	Dureza: Corto Circuito 92% Ar + 8% CO ₂	101
TABLA 11	Dureza: Globular 100% CO ₂	103
TABLA 12	Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO ₂	104
TABLA 13	Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO ₂	105
TABLA 14	Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO ₂	107
TABLA 15	Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO ₂	108

INTRODUCCIÓN

Dentro del diseño y construcción de obras se emplean diferentes técnicas de uniones de materiales, las cuales son elementos adhesivos como pegamentos; elementos de sujeción mecánica como pernos, remaches; y la soldadura que permite la fusión de metales ó unión metalúrgica de dos metales mediante la aplicación de calor y/ó presión. Siendo la soldadura una herramienta importante en las construcciones, porque ha seguido su desarrollo con los avances tecnológicos, obteniendo excelentes resultados, consiguiendo a través de esta unión una sola pieza.

En la actualidad existen diferentes métodos de soldadura, pero cada uno de ellos posee características propias a las diferentes aplicaciones y requerimientos a realizar. Sin embargo, la presente investigación se enfocará en el método GMAW, por lo que este método puede ser automático ó semiautomático, presentando excelentes rendimientos con respecto a tiempo, y mano de obra, influyendo por ende en el costo del mismo, convirtiéndolo en un proceso económico en la industria metalmeccánica.

Como este proceso requiere de un gas protector en la transferencia del material de aporte al metal, se ha considerado analizar tres diferentes combinaciones de gases, siendo estas de 100% CO₂, 80% Ar +20% CO₂ y 92% Ar +8% CO₂, las cuales se encuentran disponibles en el mercado. A la vez, se las va a aplicar con diferentes medios de transferencia: Corto Circuito, Globular y Spray, con la finalidad de analizar el mejor método de aplicación, lo cual se hará a través del resultado del cordón de soldadura, es decir, de su morfología, su estudio metalúrgico, sus propiedades mecánicas, su dureza, y en especial en los costos de aplicación. Buscando con esto, un nuevo enfoque en el desarrollo de la soldadura GMAW a través de una combinación favorable de gases de protección, con el mejor procedimiento de transferencia de material de aporte.

CAPITULO 1

1. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW

La soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding) también conocida como MIG (metal inert gas) o MAG (metal active gas), es un proceso donde un arco eléctrico es mantenido entre un alambre sólido que funciona como electrodo continuo y la pieza de trabajo, donde el arco y la soldadura fundida son protegidos por un baño o chorro de gas (inerte o activo) suministrado externamente, ayudando a la vez a la estabilización del arco.

El proceso puede ser usado en la mayoría de los metales con una gama de alambres en diferentes aleaciones y aplicaciones casi infinitas. Este proceso GMAW es indudablemente más productivo que el proceso SMAW (soldadura al arco manual) donde las pérdidas de productividad ocurren cada vez que el soldador se detiene para reemplazar el electrodo consumido. Además en éste proceso SMAW es muy notable la pérdida

de la parte del electrodo (colilla) que se sujeta al porta electrodo ya que la misma es desechada.

Cabe indicar que por cada kilogramo de electrodo revestido solamente se aprovecha o es depositado como soldadura alrededor de un 50-65%, mientras que en el proceso GMAW el uso de alambre sólido y/o tubular ha incrementado la eficiencia de depositación de soldadura entre un 80-95%.

El proceso GMAW opera en D. C. (corriente directa) usualmente con el alambre como E. P. (electrodo positivo) o conocido también como "Polaridad Negativa", las corrientes de soldadura varían de entre unos 50 a 600 amperios en muchos casos con voltaje de 15 V hasta 32 V, el arco eléctrico auto-estabilizado es obtenido con el uso de una fuente de poder C. V. (voltaje constante) y una alimentación constante de alambre (electrodo) el mismo que varía desde 0.6 mm hasta 1.6 mm en diámetro (2).

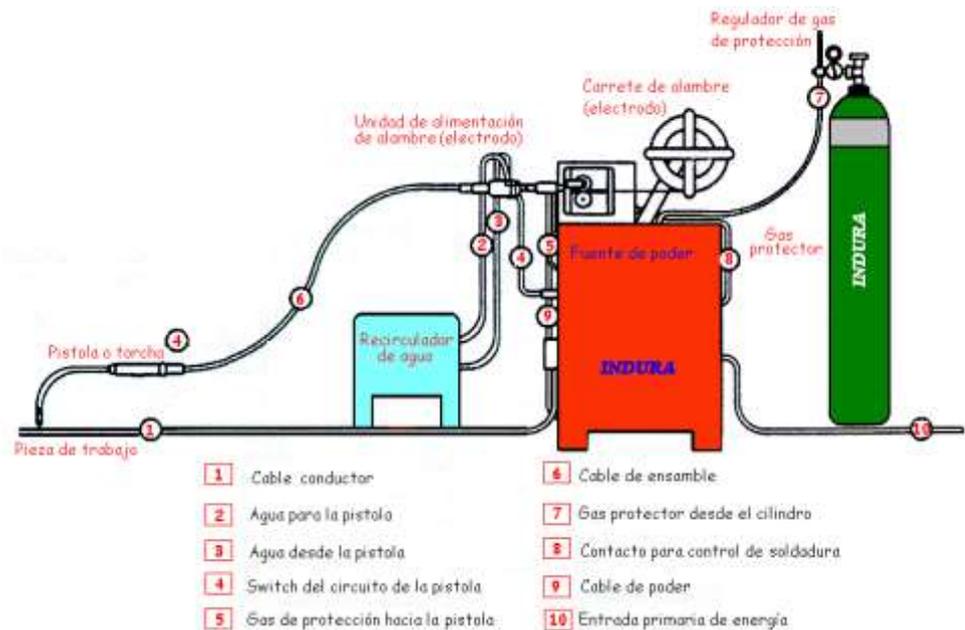


FIGURA 1.1: Elementos del Proceso GMAW. (10)

Continuos desarrollos de éste proceso de soldadura lo han convertido en un proceso aplicable a la mayoría de los metales comercialmente importantes como el acero, aluminio, acero inoxidable, cobre y algunos otros, inclusive materiales por encima de 0.076 mm de espesor pueden ser soldados en cualquier posición y con calidad. Es muy simple escoger el equipo, el alambre o electrodo, el gas de protección y las condiciones optimas para producir soldaduras de alta calidad y a muy bajo costo (2).

Sus principales cualidades se las diferencian mejor en proyectos de alta productividad, de los cuales exponemos a continuación varias de estas

cualidades comparándolo con el proceso de electrodo revestido, arco sumergido y Tig (2):

- ✓ Se puede soldar en toda posición
- ✓ No hay escoria que remover
- ✓ Elevada depositación de metal de soldadura
- ✓ Los tiempos muertos frente al electrodo revestido se reducen hasta en un 50%
- ✓ Altas velocidades de soldadura, lo que implica menos distorsión de la pieza de trabajo
- ✓ No hay desperdicios de colillas como en el electrodo revestido
- ✓ Se puede soldar largos cordones continuos fácilmente

1.1 Variables del Proceso

Como se puede apreciar en la Figura 1.1, el proceso se conforma con una fuente de poder de voltaje constante, un sistema de alimentación de alambre, la antorcha o pistola, y el suministro de gas de protección entre lo más destacado, y sus principales variables están relacionadas con estas partes componentes de manera muy directa entre las cuales tenemos (6):

Voltaje, se refiere al valor suministrado por la *f fuente de poder* y que se mantiene constante durante la operación de soldadura, además el

voltaje influye en el ancho del cordón de soldadura final de manera proporcional, es decir, a mayor voltaje más ancho será el cordón de soldadura final.

La mayor razón para utilizar este tipo de máquinas (voltaje constante) es que autorregulan la longitud de arco compensando la distancia entre la punta del electrodo y el metal base con incrementos y disminuciones automáticas de corriente manteniendo una longitud de arco constante, adicionalmente la longitud de arco se ajusta con la salida de voltaje de la fuente de poder, donde la corriente es regulada por medio de la velocidad de alimentación del alambre (6).

Voltaje Constante

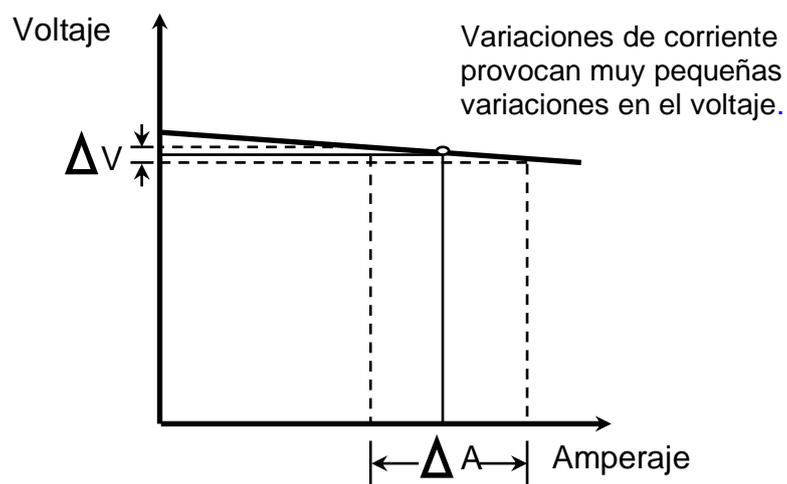


FIGURA 1.2: Voltaje Constante (6).

Stick out, corresponde a la distancia entre el borde de la boquilla o tubo contacto y la punta del electrodo determinado, incluyendo la longitud de arco, es de suma importancia dentro del proceso GMAW, ya que variaciones en esta longitud influyen directamente en variaciones de voltaje y corriente, un incremento en la extensión del electrodo resulta un incremento en su resistencia eléctrica. La resistencia al calentamiento causa que la temperatura del electrodo aumente resultando un pequeño incremento en la velocidad de fusión (6).

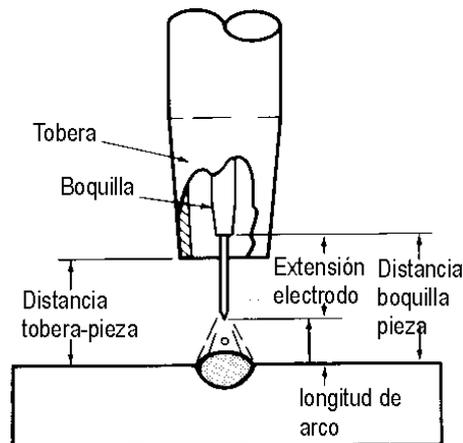


FIGURA 1.3: Stick out (6)

El incremento de la resistencia eléctrica produce una mayor caída de voltaje de la tobera a la pieza de trabajo, esto sensibiliza a la fuente de poder el cual compensa mediante una disminución de la corriente.

Eso inmediatamente reduce la velocidad de fusión lo que permite acortar la longitud de arco.

Los valores de extensión de electrodo se encuentran generalmente entre 6.4 mm a 12.7 mm (1/4" a 1/2") para transferencia por corto circuito y desde 12.7 mm a 25.4 mm (1/2" a 1") para otros tipos de transferencias (6).

Velocidad de alambre o Amperaje, este parámetro influye directamente en la penetración y altura del cordón de soldadura, además de contribuir a una mayor o menor depositación de soldadura en la unión que se esté ejecutando también de manera proporcional.

Al mantener todas las otras variables constantes, la corriente de soldadura varía en forma no lineal con la velocidad de alimentación del alambre o velocidad de fusión. Esta relación de corriente con velocidad de alambre para aceros al carbono se muestra en la Figura 1.4, a bajos niveles de corriente para cada diámetro de electrodo la curva es medianamente lineal. Sin embargo, esta aparente linealidad se ve perdida al aumentar los niveles de amperaje. Otro aspecto que se desprende de las curvas mostradas en la Figura 1.4, es que a una

determinada velocidad de alambre se necesita mayor valores de corriente al cambiar a mayores diámetros del electrodo (6).

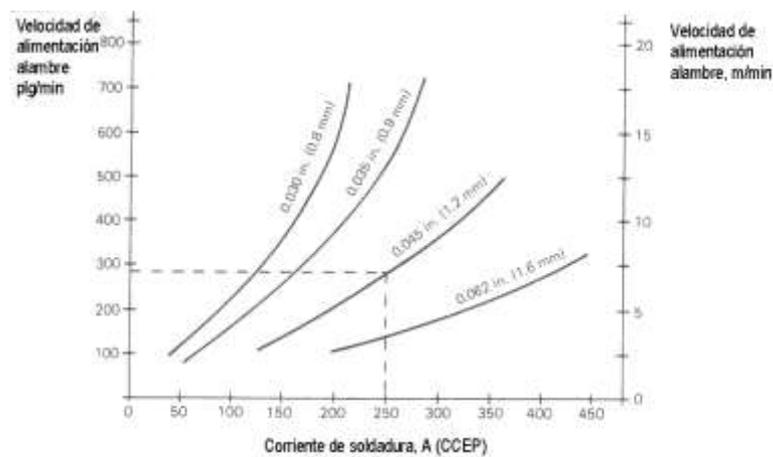


FIGURA 1.4: Corrientes típicas versus velocidad de alimentación de alambre para electrodos de acero al carbono (6).

Un incremento en la corriente de soldadura, manteniendo todas las otras variables constantes resulta en lo siguiente (6):

- a) Incremento en la profundidad y ancho de la penetración de la soldadura
- b) Incremento en la velocidad de depósito
- c) Incremento en el tamaño del cordón de soldadura

La soldadura spray pulsada es una variación del proceso mig/mag, en la cual la corriente es pulsada para obtener las ventajas de la transferencia spray a valores de corriente promedio igual o menores que la corriente de transición globular/spray.

Gas de protección, utilizado par proteger la posa de soldadura de la contaminación del medio ambiente, siendo además un componente que construye una atmósfera ideal ionizada que estabiliza el arco de soldadura, y tiene relación directa con el tipo de transferencia del metal fundido hacia la posa de soldadura, es decir como se deposita el material de aporte en el baño de fusión, esto es de vital importancia dentro de la soldadura GMAW, ya que de la correcta regulación y elección del gas depende el éxito de la soldadura (1, 6).

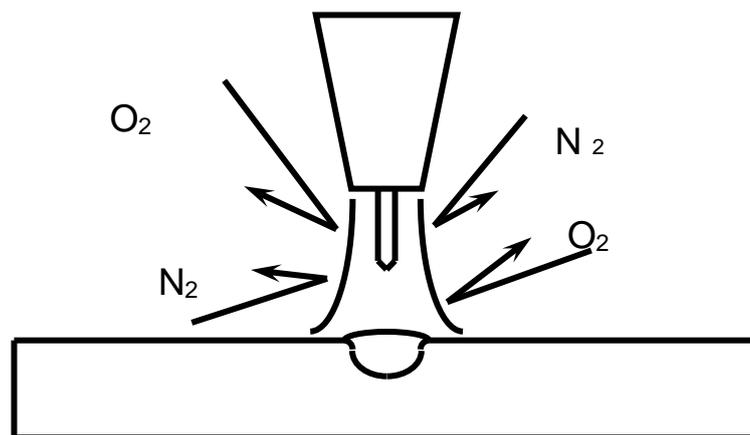


FIGURA 1.5: Gases de Protección (1)

Cuando se suelda con electrodo continuo y protección gaseosa se puede soldar básicamente de tres formas: “Corto Circuito”, “Globular” y “Spray”

También tiene un efecto pronunciado en lo siguiente (1,6):

- ✓ Características del arco
- ✓ Modo de transferencia metálica
- ✓ Penetración y perfil del cordón
- ✓ Velocidad de soldadura
- ✓ Tendencia a la socavación
- ✓ Acción de limpieza, y
- ✓ Propiedades mecánicas del metal de soldadura

Velocidad de avance de la soldadura, corresponde a la velocidad lineal en la cual el arco se mueve a través de la unión. Manteniendo las otras variables constantes se encuentra que la máxima penetración es lograda a velocidades intermedias, cuando la velocidad de avance disminuye, el metal de aporte depositado por unidad de longitud se ve incrementado, a velocidades más bajas el arco de soldadura golpea en la poza del metal fundido en vez del metal base, esto produce la reducción efectiva de penetración como

también un cordón más ancho, una *velocidad muy alta* o un incremento en la velocidad más allá de lo óptimo produce tendencia a la socavación (**undercut**) en los bordes del cordón de soldadura, además de falta de penetración, cordones estrechos, debido al tiempo insuficiente que tiene el arco para entregar una cantidad de calor suficiente y/o a insuficiente cantidad de metal de aporte para llenar el patrón fundido por el arco, mientras que una *velocidad muy baja* ocasiona un aumento de la cantidad de material depositado, aumenta el ancho del cordón y un refuerzo excesivo (6).

Orientación del electrodo Como todos los procesos de soldadura, la orientación del electrodo afecta a la configuración y penetración. La mayor penetración se alcanza con la técnica de arrastre (backhand) y la menor con la técnica de empuje (forehand) (6).

Posición de la Unión de Soldadura, la mayoría de la transferencia spray es realizada en posición plana y horizontal, mientras que las transferencias de baja energía son aptas para soldadura en toda posición. Por ejemplo, para superar la fuerza ejercida por la gravedad en posición vertical y sobre cabeza se utilizan electrodos de diámetros pequeños con transferencias spray pulsada, generalmente diámetros de 1.2 mm e inferiores son usados en toda posición. El

bajo aporte térmico permite que la poza de soldadura solidifique en forma rápida (6).

El diámetro del electrodo influye en la configuración del cordón de soldadura, un electrodo más grande requiere una corriente mínima más alta que uno de menor tamaño para obtener similar tipo de transferencia (6, 7, 8).

1.2 Gases de Protección y Modos de Transferencia del metal de aporte utilizados.

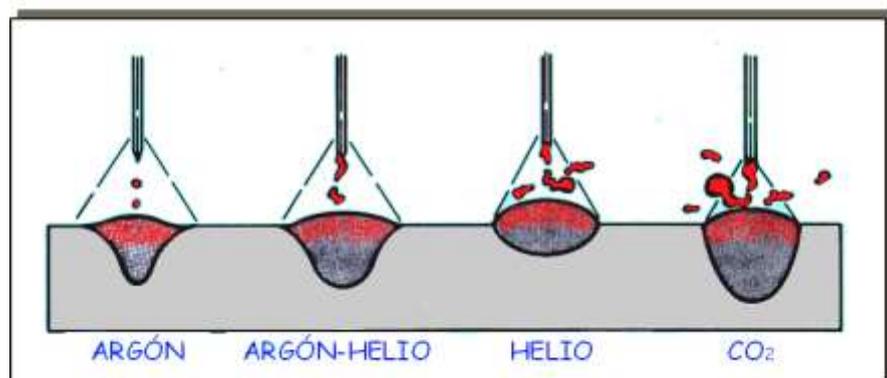


FIGURA 1.6: Formas del cordón según el gas aplicado (6).

Como se aprecia en la Figura 1.6, con diferentes gases de protección se obtiene una diferente forma del cordón, y de como es transferido el metal de aporte hacia el metal base.

Las características del proceso GMAW es mejor descrito en términos del tipo y forma de transferencia por el cual el metal de aporte es conducido a la poza de soldadura. Existen tres tipos de transferencias:

- ✓ Transferencias Corto Circuito (**Short circuiting transfer**)
- ✓ Transferencia Globular (**Globular transfer**)
- ✓ Transferencia Spray (**Spray transfer**)

Estos tipos de transferencias queda determinado por un número de factores siendo los más influyentes los siguientes:

- ✓ Magnitud y tipo de corriente de soldadura
- ✓ Diámetro electrodo
- ✓ Composición electrodo
- ✓ Extensión del electrodo
- ✓ Gas de protección

Transferencia Corto Circuito Este tipo de transferencia se encuentra relacionado con los valores más bajo de corriente, voltaje y diámetro de electrodo. Produce una poza de soldadura de tamaño pequeño con una rápida solidificación, ello permite que este tipo de

transferencia se encuentre asociado a uniones de secciones delgadas, soldadura en toda posición y grandes separaciones de raíz.

Las gotas metálicas son transferidas desde el electrodo a la pieza de trabajo durante un corto período de tiempo; ello ocurre cuando la punta del electrodo toca a la poza de soldadura, por tanto no existe transferencia metálica a través de la longitud de arco. El electrodo hace contacto con la poza de soldadura en un rango que va de 20 a sobre 200 veces por segundo, la secuencia de eventos en la transferencia metálica y el correspondiente comportamiento del voltaje y corriente se muestra en la Figura 1.7.

Cuando el alambre toca el metal de soldadura, la corriente se incrementa (A, B, C y D en la Figura 1.7), por su parte el metal fundido en la punta del alambre se desprende en D y E, iniciándose un nuevo arco como se muestra en E y F. La tasa de incremento de corriente debe ser lo suficientemente alta para calentar el electrodo y promover la transferencia metálicas como también lo suficientemente baja para minimizar las salpicaduras causada por la violenta separación de la gota del metal. Esta velocidad de incremento de la corriente es controlada por ajuste de la inductancia en la fuente de

poder. Cuando el arco es establecido, el alambre se funde en la punta mientras es alimentado hasta formar el próximo corto circuito, en H de la Figura 1.7 (6).

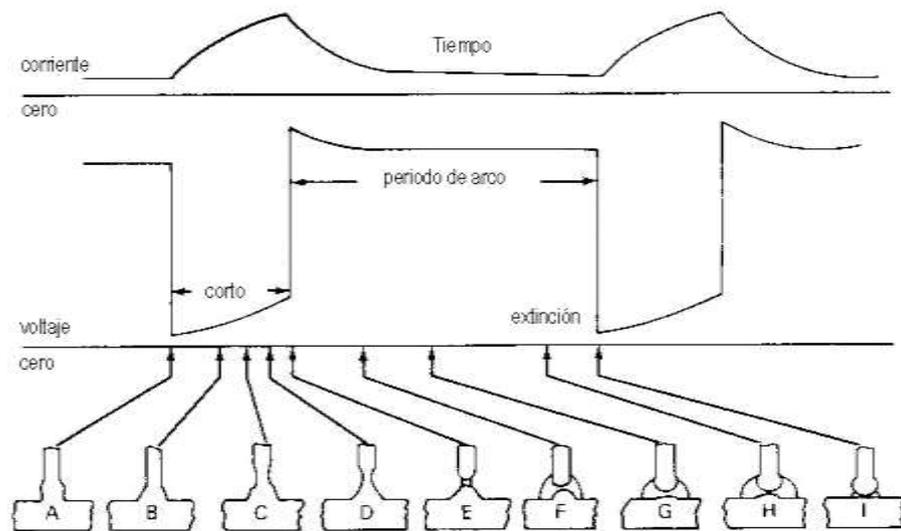


FIGURA 1.7: Representación esquemática de la transferencia por cortocircuito (6).

Aunque la transferencia metálica ocurre durante el corto circuito, la composición del gas de protección tiene un efecto dramático sobre la tensión superficial del metal fundido. En general, el tipo de gas influye en las características operativas del arco y la penetración en el metal base. Por ejemplo, el dióxido de carbono, CO_2 , produce altos niveles de salpicadura comparados con gases inertes, pero también el CO_2 produce mayor penetración en el metal base.

Transferencia Globular La transferencia globular es caracterizada por un tamaño de gota que es mayor que el diámetro del alambre que está siendo usado, este tipo de transferencia posee características operativas que tienden a ser menos estable y, por ende normalmente rechazada como tipo de transferencia en la práctica debido a su gran cantidad de salpicaduras (proyecciones metálicas).

Transferencia Spray con mezclas ricas en argón es posible producir un modo de transferencia muy estable, libre de salpicadura y de forma axial, en la Figura 1.8 se ilustra una comparación de los tres tipos de transferencias, Esto requiere el uso de corriente continua electrodo positivo (**direct current electrode positive – DCEP-**) y un nivel de corriente sobre el valor crítico llamado corriente de transición. Bajo esta corriente, la transferencia ocurre bajo el modo globular, descrito previamente, sobre la corriente de transición, la transferencia ocurre en la forma de gotas muy pequeñas que son formadas y liberadas a una velocidad de varios cientos por segundo.

La transferencia spray resulta en un flujo de gotas altamente diseccionado, producto que es acelerado por las fuerzas del arco a velocidades que superan los efectos de gravedad, debido a esto, el

proceso bajo ciertas condiciones, puede ser usado en cualquier posición.

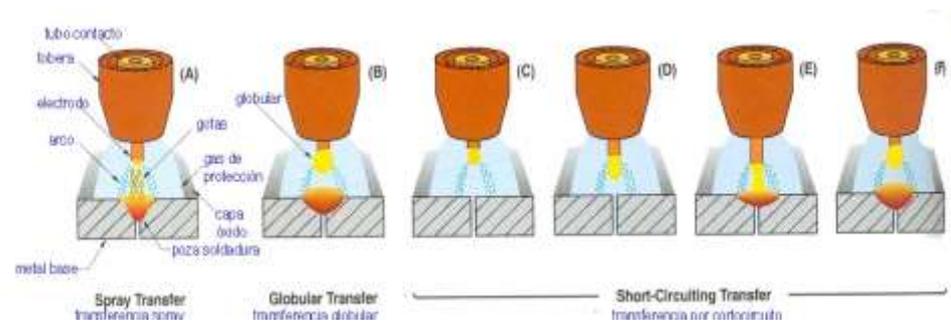


FIGURA 1.8: Modos de transferencia metálica: (a) spray, (b) globular y (c,d, e y f) cortocircuito (6)

Otra característica de la transferencia spray es la penetración tipo dedo (**finger type**). Este tipo de transferencia puede ser usado para soldar la mayoría de los metales o aleaciones debidas de las características inertes de la protección de argón. Sin embargo, las aplicaciones de este tipo de transferencia no son aplicables en espesores bajos debido a los altos valores de corriente que se necesitan para alcanzar esta transferencia.

Las limitaciones de espesor y posición de la transferencia spray han sido superadas gracias a la introducción de nueva tecnología en las fuentes de poder. Estas máquinas producen ondas y frecuencias cuidadosamente controladas que tienen la virtud de “pulsar” la

corriente de soldadura. Existen muchas variaciones de fuentes de poder, la más simple entrega una frecuencia de pulso (60 o 120 pps) con control independiente de los niveles de corriente de fondo y pulso. Más aún existen fuentes de poder más sofisticada llamadas sinérgicas que en forma automática proporciona la combinación óptima de la corriente de fondo y pulso para cualquier ajuste de velocidad de alimentación de alambre.

1.3 Metalurgia de las Soldaduras

Hablar de metalurgia de la soldadura es hablar de metalurgia del acero, es por este motivo que empezaremos a estudiar que la metalurgia de este material, los aceros son aleaciones de Hierro y Carbono (< 2%) más una serie de elementos de aleación que son deliberadamente adicionados para mejorar e impartir propiedades especiales.

Sin embargo, otros elementos no son completamente removidos quedando en el acero como impurezas. La gran variedad de propiedades, tales como resistencia, tenacidad al impacto, ductilidad, resistencia al calor, etc., los hace un material comercialmente disponible y que es ampliamente usado como material de ingeniería.

Los diferentes elementos presentes en el acero podrían estar presentes como solución sólida o combinado como compuestos intermetálico con el hierro, carbono o nitrógeno.

Una de las principales propiedades del hierro y que son la base para los tratamientos térmicos es que existe en diferentes formas cristalográficas o **estructuras cristalinas** en estado sólido. Bajo 910 °C la estructura es BCC (body centered cubic) pero entre 910 °C y 1390 °C asume una estructura FCC (face centered cubic). Sobre 1390 °C hasta el punto de fusión, 1534 °C, vuelve a la estructura BCC. Todos estos cambios son conocidos como formas **alotrópicas** del hierro.

Una cualidad muy importante de este material es la **solubilidad del carbono** en la estructura BCC es muy pequeña, alcanzando su máximo a 723 °C con un 0.02 % en peso. Sin embargo, los aceros poseen más que un 0.02% C por tanto el exceso debe estar presente como compuesto intermetálico Fe_3C conocido como *Cementita*. La Figura 1.9 muestra la solubilidad del carbono en la estructura BCC (4).

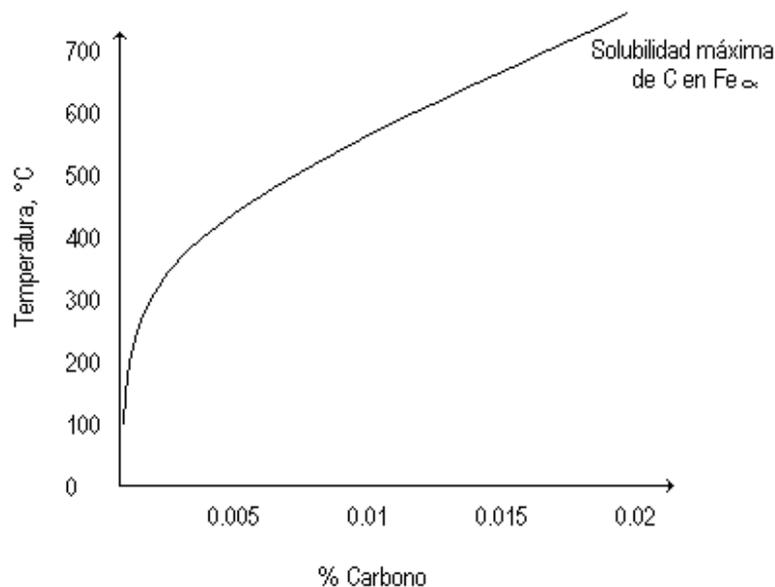


FIGURA 1.9: Solubilidad de C en hierro alfa (BCC) en función de la temperatura (4).

Por su parte, la estructura FCC o hierro gamma ($Fe \gamma$) disuelve carbono hasta un 2%. De esta forma el acero cuando es calentado y se transforma de BCC a FCC el carbono entra en solución. La manera en que se distribuye el carbono durante el enfriamiento bajo la temperatura de transformación permite el origen de una gran variedad de propiedades que son posibles de alcanzar en los aceros.

Para un mejor entendimiento del comportamiento de los aceros es necesario conocer el diagrama de fase Hierro - Carbono. Sin embargo, el diagrama que nos interesa es el metaestable $Fe - Fe_3C$ debido a condiciones cinéticas de la transformación.

La verdadera estructura estable del carbono es el grafito, el cual se encuentra bajo ciertas condiciones de enfriamiento y sólo en fundiciones o hierros fundidos. La Figura 1.10 nos muestra el diagrama metaestable Fe - Fe₃C (4).

La **Austenita, γ** se ubica en la región en la cual el hierro FCC disuelve hasta un 2% de carbono en un rango de temperatura entre 723°C y variando hasta un máximo de 1493°C, como se puede apreciar en la gráfica 1.10 (4).

Cuando no existe carbono, la transformación BCC a FCC ocurre a 910 °C, sin embargo con un 0.8 % de C la transformación comienza a 723 °C. Cuando el acero es calentado hasta la región austenítica todo el carbono y también la mayoría de los compuestos se disuelven en ella para dar paso a una sola fase.

La región mostrada en la Figura 1.10 de color rojo, corresponde a la estructura de **Ferrita, α** zona en la cual el carbono se disuelve hasta un 0.02% a 723 °C. Aunque el contenido de carbono en la ferrita es muy bajo, los otros elementos se pueden disolver apreciablemente en ella, por lo cual no puede considerarse como “hierro puro” (4).

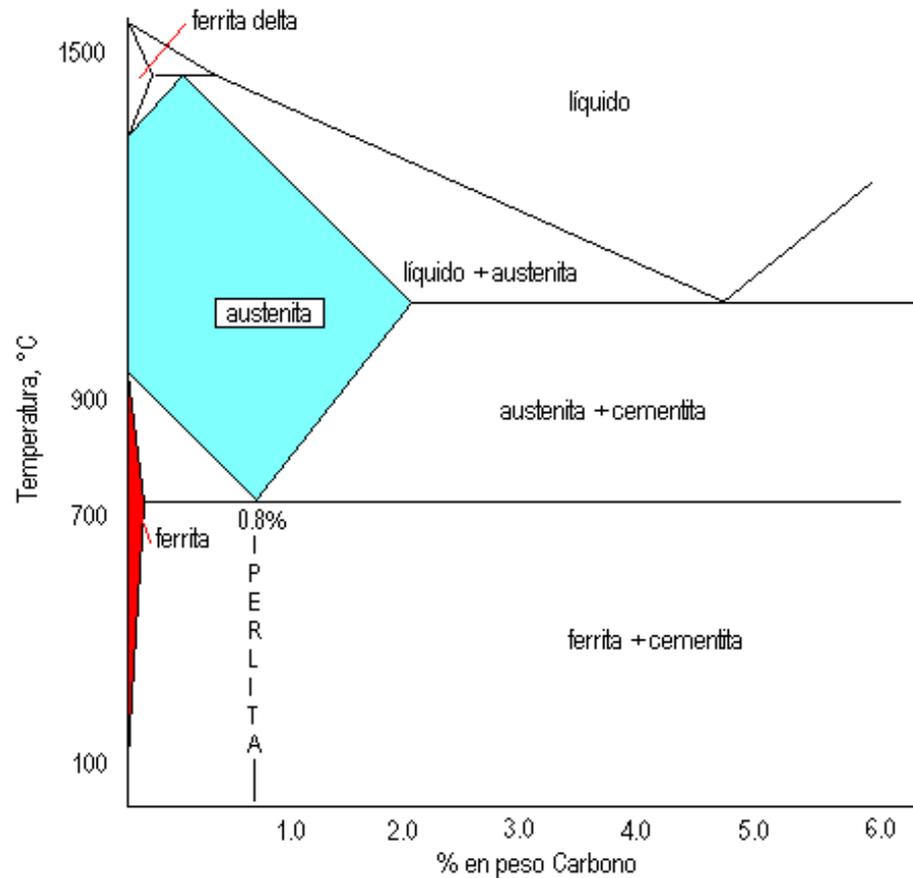


FIGURA 1.10: Diagrama de fase Fe- Fe₃C (4)

Existe una transformación eutectoide a 723 °C y 0.8% C. Producto de esta transformación la austenita pasa a una mezcla de dos fases llamada **perlita** (ferrita + cementita). La perlita combina una fase blanda como es la ferrita y una fase dura como es la Cementita (1150 Hv), entregando diferentes propiedades al acero de acuerdo a la cantidad de perlita formada (4).

En el calentamiento de un acero a temperaturas suficientemente altas y que son necesarias para obtener una transformación completa causan que los granos de austenita crezcan, este fenómeno se conoce como **crecimiento de grano**. El tamaño final del grano de austenita depende no sólo de la temperatura alcanzada sino que también del acero. Algunos aceros contienen pequeños precipitados, tales como nitruro de aluminio y vanadio, los cuales permiten retener el pequeño tamaño del grano hasta altas temperaturas. Estos aceros son denominados aceros de grano fino.

El efecto de la temperatura de austenitización en el tamaño de grano es mostrado en la Figura 1.11. Se ve claramente que el crecimiento se ve restringido en un acero de grano fino, pero sin embargo si alcanzamos una temperatura lo suficientemente alta los precipitados entrarán en solución y el acero se comportará como un acero de grano grueso (4).

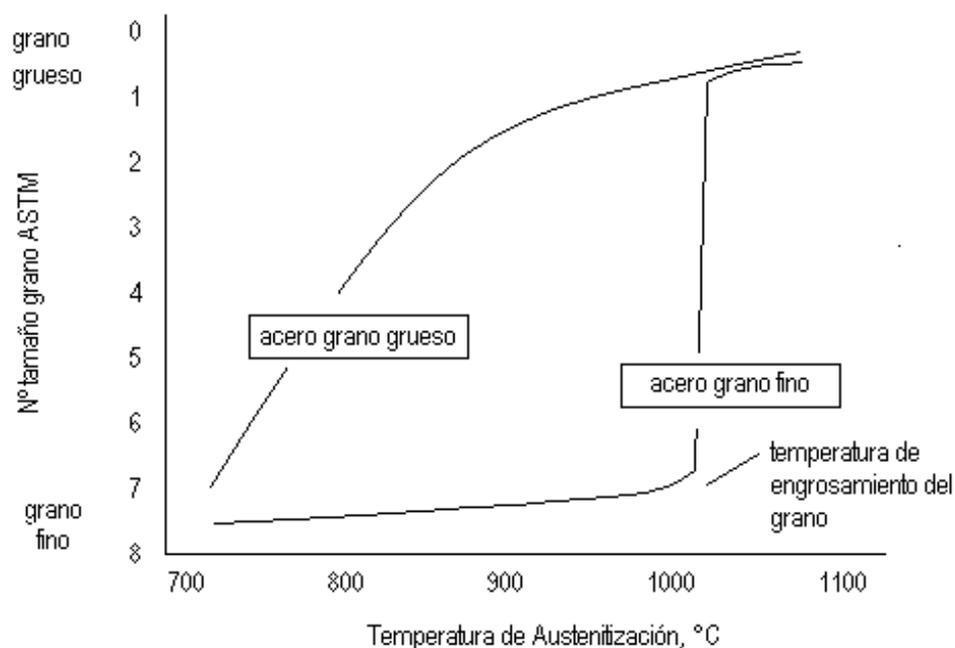


FIGURA 1.11: Efecto temperatura austenización sobre el tamaño de grano austenítico (4).

Este efecto es sumamente importante en la **Zona Afectada por el Calor, ZAC**. La Figura 1.12 muestra la diferencia en la ZAC entre un acero de grano fino y uno de grano grueso. En la ZAC de un acero de grano grueso existe una amplia región donde ha ocurrido el crecimiento de grano, caso contrario ocurre en el otro acero, el cual resiste mejor el calentamiento, excepto en la zona inmediatamente a la línea de fusión, donde la temperatura es extremadamente alta.

Algunos aceros pueden retener su fino tamaño incluso hasta el límite de fusión, tal es el caso en los aceros que contienen titanio, los

cuales forman nitruro de titanio que es muy resistente a la disolución a altas temperatura (4).

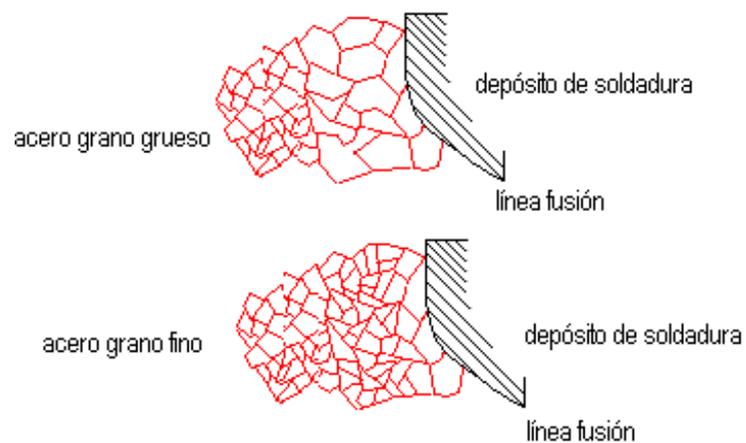


FIGURA 1.12: Tamaño de grano austenítico en ZAC (4)

La **velocidad de enfriamiento** tiene un especial e importante efecto sobre el tipo de *microestructura* que se puede presentar en el acero, y al menos que el enfriamiento sea lento no puede usarse el diagrama metaestable Fe-Fe₃C. La razón es que la transformación de austenita a perlita requiere de difusión de carbono hacia los sitios de crecimiento del carburo, lo que significa que es un proceso que toma tiempo. Por ejemplo, con una velocidad de enfriamiento que va desde lenta hasta rápida, la perlita también cambia desde gruesa a fina. Sin embargo, si enfriamos un acero lo suficientemente rápido, más allá de una velocidad crítica, suprimiremos la difusión del

carbono y una nueva estructura obtendremos en el acero. De esta forma el carbono queda atrapado en el mismo espacio que se encontraba en la austenita, más aún éste rápido enfriamiento no puede suprimir el cambio de transformación, por lo que la transformación desde FCC a BCC también ocurre, si a esto le sumamos que existe carbono atrapado en la red cristalina del hierro resultará en una estructura BCC deformada y que será más bien tetragonal que cúbica. A esta nueva microestructura la llamaremos *martensita*. La Figura 1.13 nos muestra tal situación (4).

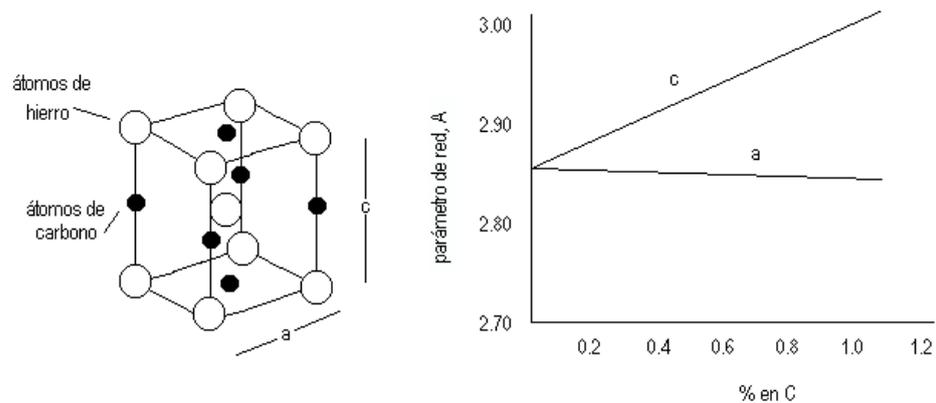


FIGURA 1.13: Carbono atrapado en la red BCC (4)

La ***martensita*** puede ser un constituyente muy duro y frágil cuando posee un contenido alto de carbono. Además la dureza depende principalmente del contenido en carbono teniendo un muy pequeño efecto los elementos de aleación usualmente usados en aceros. La

Figura 1.14 muestra la relación aproximada que existe entre dureza de la martensita y contenido en carbono (4).

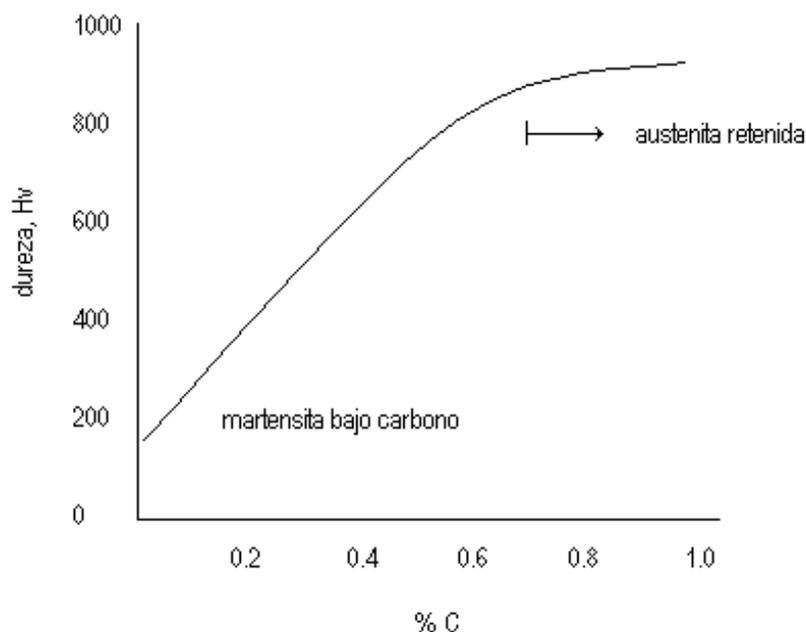


FIGURA 1.14: Dureza de la martensita en función del contenido en carbono (4).

La Figura 1.15 ilustra varios cordones de soldaduras que se han enfriado a diferentes velocidades de enfriamiento. Cada soldadura presenta una Zona Afectada por el Calor, la cual se ha transformado a diferentes microestructura dependiendo de la velocidad de enfriamiento. En el caso del cordón más pequeño, se tiene que la ZAC se ha enfriado rápidamente promoviendo la formación de martensita. Caso contrario tenemos en el cordón más grande, en la cual una lenta velocidad de enfriamiento ha causado la aparición de

perlita en la ZAC. Por tanto la dureza en la ZAC es más alta en aquellas soldaduras que ha aparecido martensita (4).

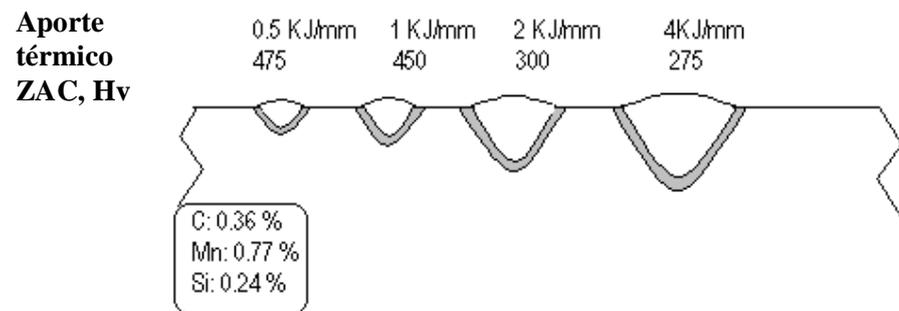


FIGURA 1.15: Cuatro soldaduras de diferentes aportes térmicos con sus respectivas ZAC (4).

Puesto que el diagrama Fe-Fe₃C es un diagrama sólo válido para velocidades de enfriamientos sumamente lento, existen diagramas alternativos para determinar los constituyentes a velocidades más altas de enfriamiento. Para tal caso, existen dos tipos de diagramas uno llamado isotérmico y el otro continuo, siendo éste último el más interesante desde el punto de vista soldadura. Sin embargo comenzaremos a estudiar el primer tipo de diagrama (4).

Consideremos la siguiente situación, tal como lo muestra la Figura 1.16 (4).

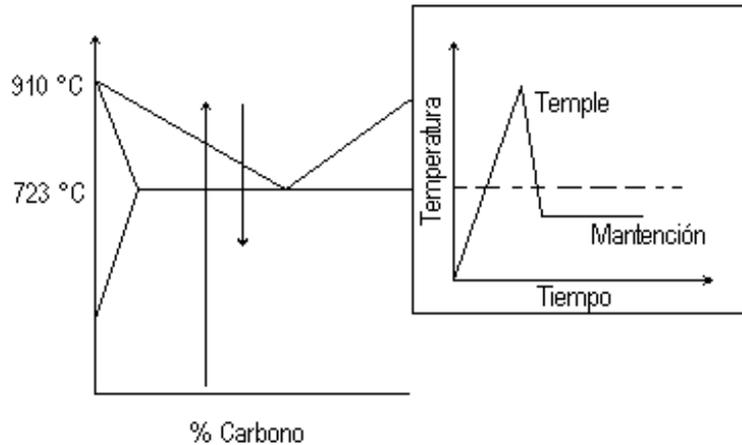


FIGURA 1.16: Procedimiento para determinar el comportamiento Transformación-Temperatura-Tiempo (4).

El acero es calentado hasta la temperatura austenítica y luego templado a alguna temperatura bajo la temperatura de transformación de equilibrio. Si el acero es mantenido a esta temperatura encontraremos que hay un retardo en el comienzo de transformación y existirá un lapso de tiempo en la cual la transformación toma lugar. El retraso del comienzo de la transformación depende de la temperatura en la cual el acero es mantenido y de esta forma podemos graficar dicha información en un diagrama de temperatura versus tiempo para cada composición de acero (4).

Un ejemplo de tal diagrama TTT para un acero al carbono se detalla en la Figura 1.17, y 1.18, con diferentes situaciones.

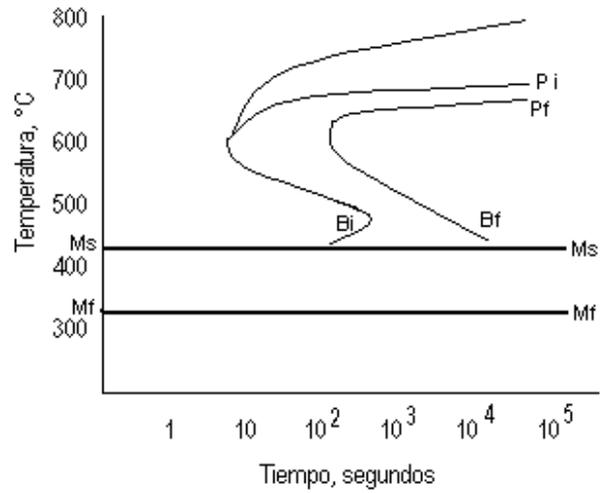
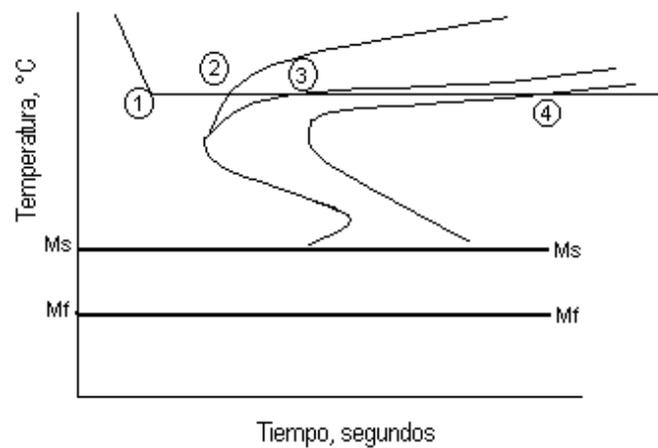


FIGURA 1.17: Diagrama típico TTT (4).



- 1) Probeta enfriada rápidamente desde la región austenítica y mantenida a 650 °C
- 2) Comienza la formación de ferrita proeutectoide
- 3) Comienza formación de perlita
- 4) Fin de la transformación de perlita

FIGURA 1.18: Acero que experimenta transformación isotérmica a 650 °C (4).

Se debe notar que a temperaturas altas, Figura 1.18, el acero se transforma a ferrita proeutectoide seguido de la transformación perlítica (4).

1.4 Soldabilidad de los Metales y Aleaciones Ferrosas con el proceso GMAW

Cuando hablamos de soldabilidad solemos relacionar este término a la facilidad con que un material puede ser unido, alcanzando las propiedades mecánicas que se requieren para su operación en servicio. Sin embargo, analizaremos el término soldabilidad desde los siguientes puntos de vista, considerando que un elemento o un conjunto que será soldado debe cumplir tres aspectos fundamentales como son la **soldabilidad operativa**, que se refiere a la operación de sondeo en sí y estudia las dificultades de su realización, es la posibilidad operatoria de unir los metales con fin de obtener continuidad metálica en la unión. La **soldabilidad metalúrgica**, la cual se centra en las modificaciones microestructurales que son producto de la operación de soldar, trata de obtener las características mecánicas y químicas deseadas en la unión, y como tercer punto la **soldabilidad constructiva o global**,

que define y estudia las propiedades y condiciones que debe reunir la soldadura para poder entrar en servicio en una construcción (4).

El proceso de soldadura GMAW es un proceso de soldadura completamente operativo fácil de aplicarse en taller para estructuras de todo tamaño, así mismo desde el punto de vista de la soldabilidad metalúrgica, este proceso de soldadura esta muy desarrollado que en la actualidad tenemos diferentes tipos de aleaciones de aporte para la gran variedad de materiales de aceros estructurales que dan como resultado una microestructura confiable, y por último refiriéndose a la soldabilidad constructiva este proceso es uno de los más versátiles, lo cual permite soldar con menos aportes de calor, altas velocidades de soldadura ayudando de esta forma a la soldabilidad constructiva (4).

En pocas palabras la soldabilidad busca alcanzar la continuidad metálica de la unión garantizando determinadas propiedades importantes como: resistencia estática, a la fatiga, a la corrosión, otras propiedades como ductilidad, tenacidad (4).

El proceso de soldadura empleado en este trabajo favorece en las estructuras las siguientes condiciones (4):

- Ofrece una buena tenacidad después de efectuada la soldadura.
- La composición química de la zona fundida no es frágil por dilución con el metal base.

Por último para considerar que un proceso de soldadura utilizado favorece la soldabilidad de los metales o estructuras, debemos considerar lo siguiente (4):

- ✓ La transformación que se producen en las ZAC.
- ✓ La composición química de los materiales a unir (metal base y metal de aporte).
- ✓ Tensiones residuales generadas durante la soldadura y el procedimiento de soldadura empleado.
- ✓ Los problemas más críticos relacionados con la soldabilidad de los aceros al momento de soldar son: agrietamiento en frío, agrietamiento en caliente y delaminación. Un parámetro muy empleado para juzgar el grado de soldabilidad es el carbono equivalente (CE) y la estimación de la dureza bajo el cordón (en la ZAC) este método lo emplea el código estructural AWS-D1.1, con estos valores podemos trabajar para evitar los posibles problemas seleccionando materiales de aporte, y tratamientos

térmicos como: temperaturas de precalentamiento y post calentamiento.

Hoy en la actualidad son utilizados una gran variedad de aceros en aplicaciones de diseño en ingeniería, básicamente la Soldabilidad de este material esta ligada a la metalurgia del mismo y que a su vez cuando hablamos de metalurgia del acero es prácticamente hablar de metalurgia de la soldadura, como se explica anteriormente en párrafos de este capítulo.

Como los aceros son una mezcla metalúrgica de hierro + carbono y/o elementos de aleación, los materiales de acero se clasifican en (4):

- ✓ Aceros al carbono,
- ✓ Aceros de baja aleación y
- ✓ Aceros de alta aleación,

Y a su vez los aceros al carbono se subdividen en (4):

- ✓ Aceros de bajo contenido de carbono,
- ✓ Aceros de medio contenido de carbono
- ✓ Aceros de alto contenido de carbono

Mientras que los aceros de baja aleación son aquellos que la suma de todos los elementos de aleación llega hasta un 6%, y se subdivide en diferentes tipos dependiendo del elemento de aleación presente. Y por último los aceros de alto contenido de carbono son aquellos en que la suma de los elementos de aleación es superior a 10% y los principales son los aceros Inoxidables y los aceros al manganeso (4).

Debido a que la acción de soldar un metal cualquiera fuera el proceso de soldadura a utilizar, este metal es llevado sobre la temperatura de fusión y es enfriado rápidamente en una zona localizada y controlada, dando como resultado un cambio a nivel estructural en la zona intervenida que a su vez ocasiona que las propiedades mecánicas se ven muy afectadas tanto por el contenido de carbono como por el contenido de elementos de aleación sumado al proceso de soldadura (4).

1.5 Requerimientos de uniones soldadas bajo Norma AWS D1.1

Si nos regimos al código estructural AWS D1.1, los mínimos requerimientos que se exigen a una unión en soldadura para ser aceptada están dirigidos en medir la compatibilidad mecánica y metalúrgica de las cuatro variables presentes en una unión de

soldadura que son: el material base, el material de aporte, la técnica empleada y el proceso de soldadura utilizado (9).

La Norma AWS D1.1, en el Capítulo 3, contempla procesos de soldadura precalificados, los cuales son SMAW, SAW, GMAW (excepto GMAW-Corto Circuito), FCAW, siendo estos procesos aprobados sin necesidad de pruebas de calificación del desarrollo del cordón de soldadura. Este Capítulo nos da las pautas a considerar según el tipo de Material Base y Material de Relleno definidos por el proceso, Tabla 3.1 (Apéndice A). Además, indica un pre tratamiento térmico en caso de ser necesario presentado en Tabla 3.2 (Apéndice B). Y en la Tabla 3.7 (Apéndice C), nos presenta los rangos establecidos en los cordones de soldadura que dependerán de las variables existentes como Diámetro del electrodo, Corriente, Velocidad de avance, y demás mencionados en la misma, siendo estos datos condiciones que deben de cumplir (9).

Para el proceso GMAW-Corto Circuito, al no estar soportado por un (WPSs) ser precalificado se debe proceder a calificar un procedimiento de soldadura según lo descrito en el Capítulo 4, Sección B (WPS), es decir análisis del cordón de soldadura, se debe establecer la posición de soldadura de producción para la

calificación del WPS (AWS 4.3), esto se lo hace según la tabla 4.1 (Apéndice D). Para nuestro caso de estudio tomaremos la posición más básica o más simple que es la posición plana, y que según la tabla 4.1 del AWS D1.1 esta posición al utilizarse con placas y con soldadura de ranura (1G) en penetración completa (CJP), califica a la posición de filete en posición plana 1F (9).

1.5.1 Materiales de Aporte

El material de Aporte se presenta a través de la simbología emitida por la Norma AWS A5-18, de la siguiente manera:

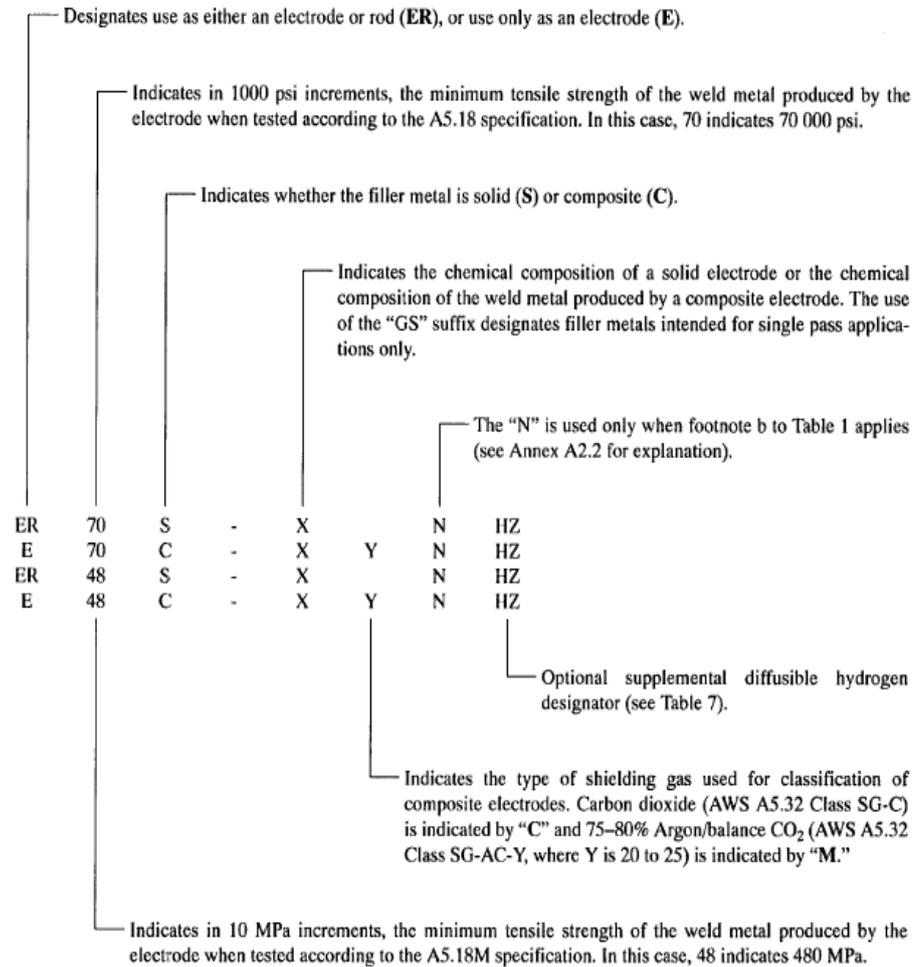


FIGURA 1.19: Simbología del Material de Aporte (8).

Con esta Simbología se puede manejar con facilidad el material de Aporte.

La Tabla 1 (8) que se presenta a continuación nos indica las características en su composición química de los diferentes Materiales de Aporte, y en especial el **ER70S-6**, el cual fue empleado en el desarrollo de esta tesis, teniendo por lo tanto:

Tabla 1 (8)
Requerimientos de Composición Química para Electrodo Sólidos y alambres

AWS Clasificación		UNS Number	Peso porcentual												
A5.18	A5.18M		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
ER70S-2		K10726	0,07	a	a	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	a	a	a
				1,40	0,7								0,15	0,12	0,15
			0,06	0,90	0,45										
ER70S-3		K11022	a	a	a	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	-	-	-
			0,15	1,40	0,75										
			0,06	1,00	0,65										
ER70S-4		K11132	a	a	a	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	-	-	-
			0,15	1,50	0,85										
			0,06	1,40	0,8										
ER70S-6		K11140	a	a	a	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	-	-	-
			0,15	1,85	1,15										
			0,07	1,50	0,5										
ER70S-7		K11125	a	a	a	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	-	-	-
			0,15	2,00	0,8										
ER70S-G	ER48S-G	-													

No Especificado

1.5.2 Simbología, Tipos de Uniones y posiciones de soldadura

Simbología

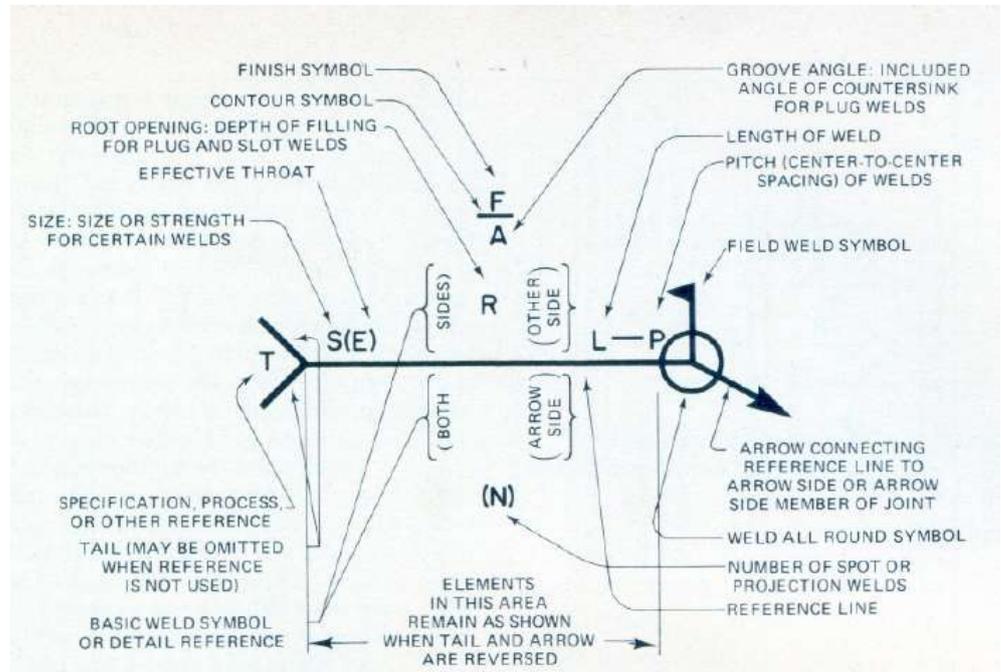
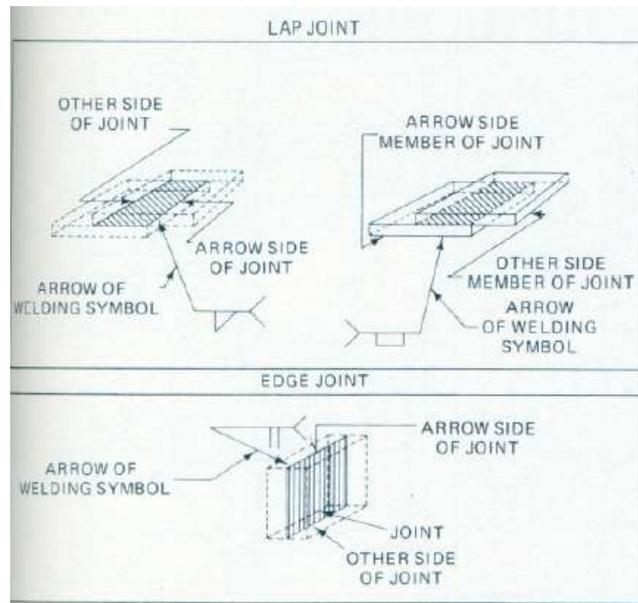


FIGURA 1.20: Localización estándar de los elementos de los símbolos de Soldadura (1).

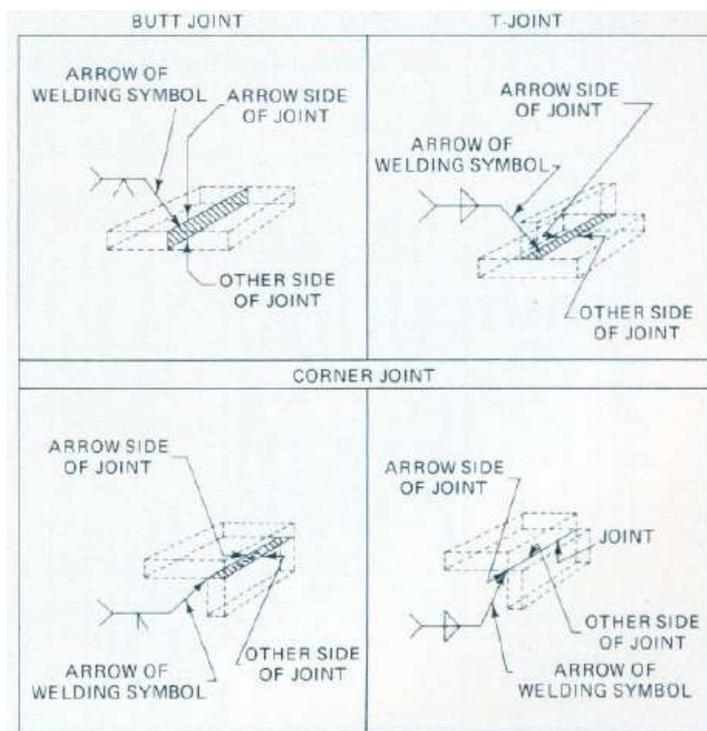
GROOVE						
SQUARE	V	BEVEL	U	J	FLARE-V	FLARE-BEVEL
	∇	∇	Y	⌋	∩	∩

FILLET	PLUG OR SLOT	SPOT PROJECTION	SEAM	BACK OR BACKING	SUR-FACING	FLANGE	
						EDGE	CORNER
△	▭	○	⊕	⌒	∩	∩	∩

Figura 1.21: Símbolos Básicos de Soldadura (1).



(a)



(b)

Figura 1.22: Terminología de las Juntas (1).

Tipos de Uniones

La geometría de la unión y soldadura deben estar claramente definidas y comprendidas por todas las partes relacionadas en la fabricación. AWS A3.0 me indicia los “términos estándares de soldadura y definiciones” (7).

Los tipos de uniones son cinco y son:

1. Tope (butt)

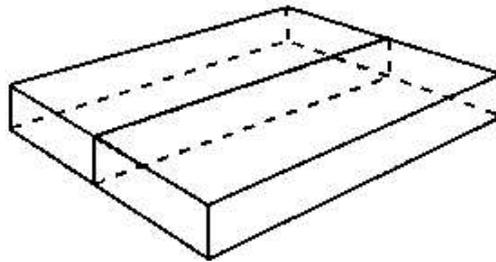


FIGURA 1.23: Unión Tope (9).

2. Esquina (corner)

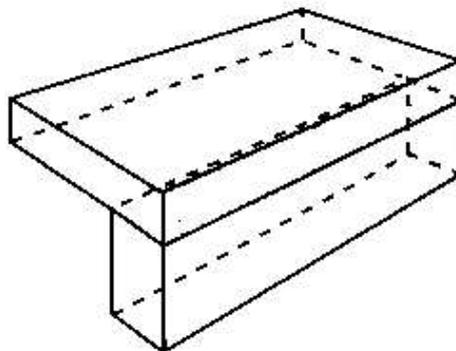


FIGURA 1.24: Unión Esquina (9)

3. Unión T (T)

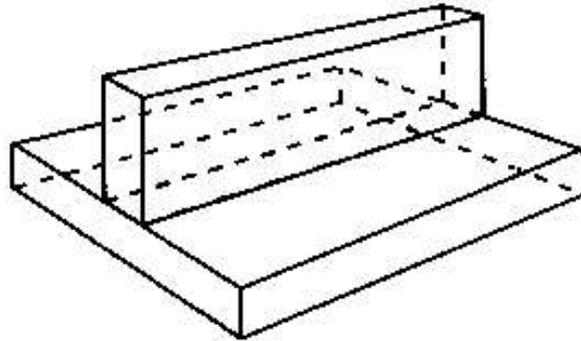


FIGURA 1.25: Unión T (9).

4. Traslape (overlap)

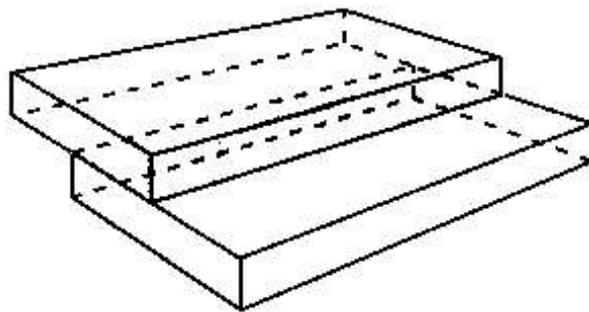


FIGURA 1.26: Unión Traslape (9).

5. Borde (edge)

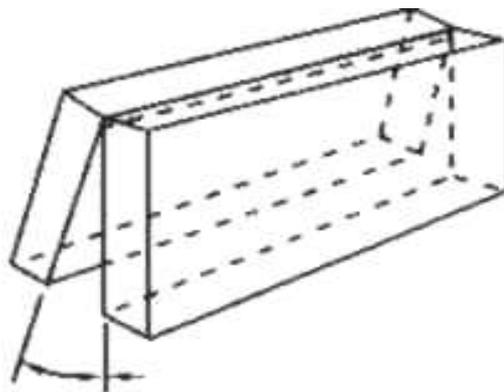


FIGURA 1.27: Unión Borde (9).

Posiciones de Soldadura

Tabla 2 (9)

Tabulation of Positions of Groove Welds			
Position	Diagram Reference	Inclination of Axis	Rotation of Face
Flat	A	0° to 15°	150° to 210°
Horizontal	B	0° to 15°	80° to 150° 210° to 280°
Overhead	C	0° to 80°	0° to 80° 280° to 360°
Vertical	D	15° to 80°	80° to 280°
	E	80° to 90°	0° to 360°

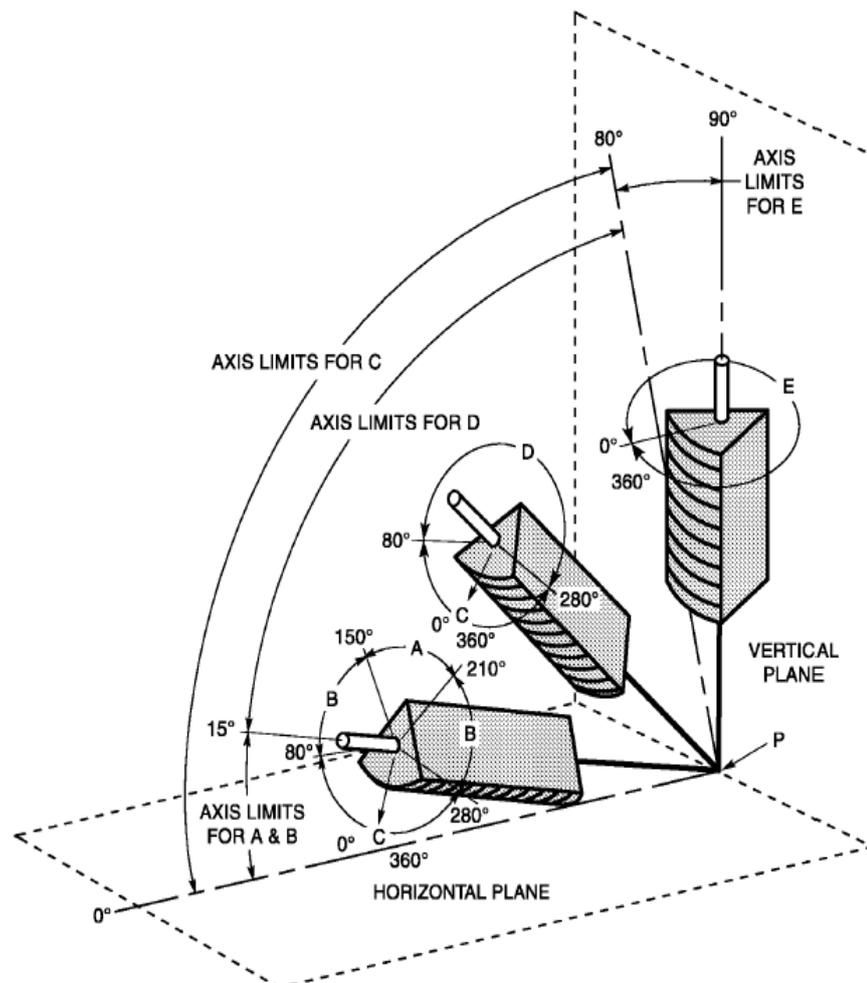


FIGURA 1.28: Posición del cordón de soldadura (9).

Tabla 3 (9)

Tabulation of Positions of Fillet Welds			
Position	Diagram Reference	Inclination of Axis	Rotation of Face
Flat	A	0° to 15°	150° to 210°
Horizontal	B	0° to 15°	125° to 150° 210° to 235°
Overhead	C	0° to 80°	0° to 125° 235° to 360°
Vertical	D	15° to 80°	125° to 235°
	E	80° to 90°	0° to 360°

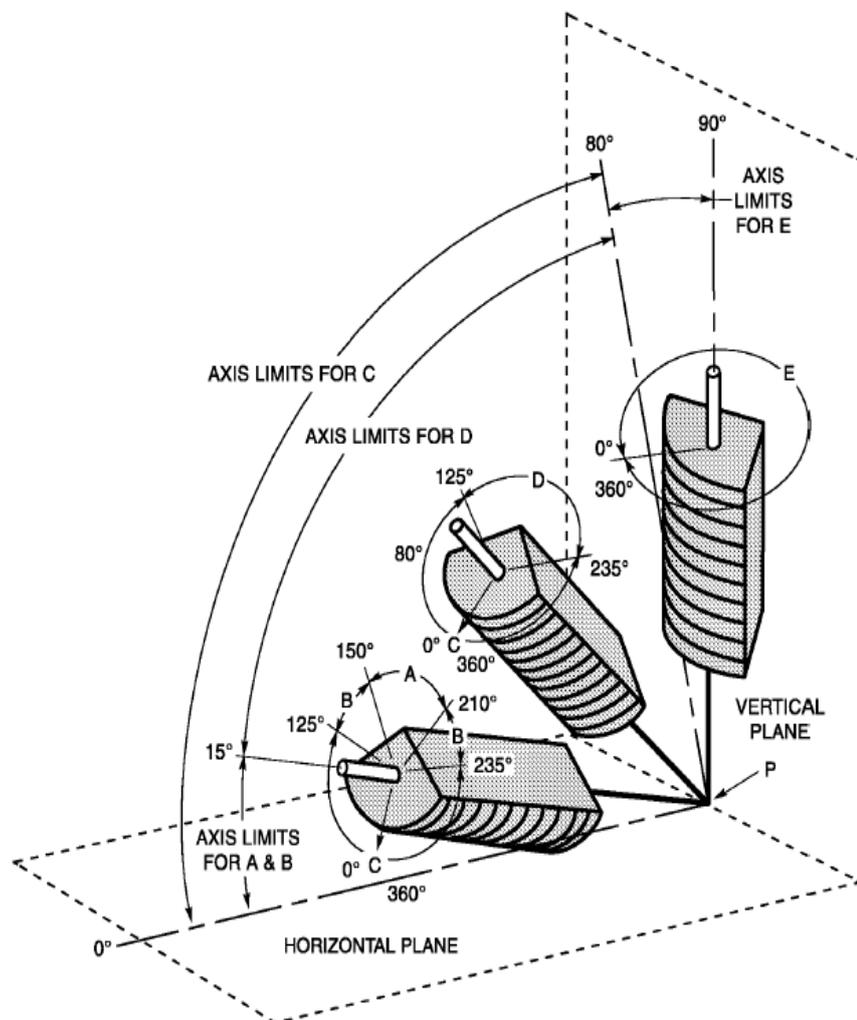


FIGURA 1.29: Posición de Soldadura por Filete (9).

Las posiciones de Soldaduras están establecidas por la Norma AWS D1.1, en el Capítulo 4, Sección 4.2.4, indicando las siguientes denominaciones:

F: Posición Plana.

H: Posición Horizontal.

V: Posición Vertical

OH: Posición sobrecabeza.

Pruebas de posiciones tenemos a continuación:

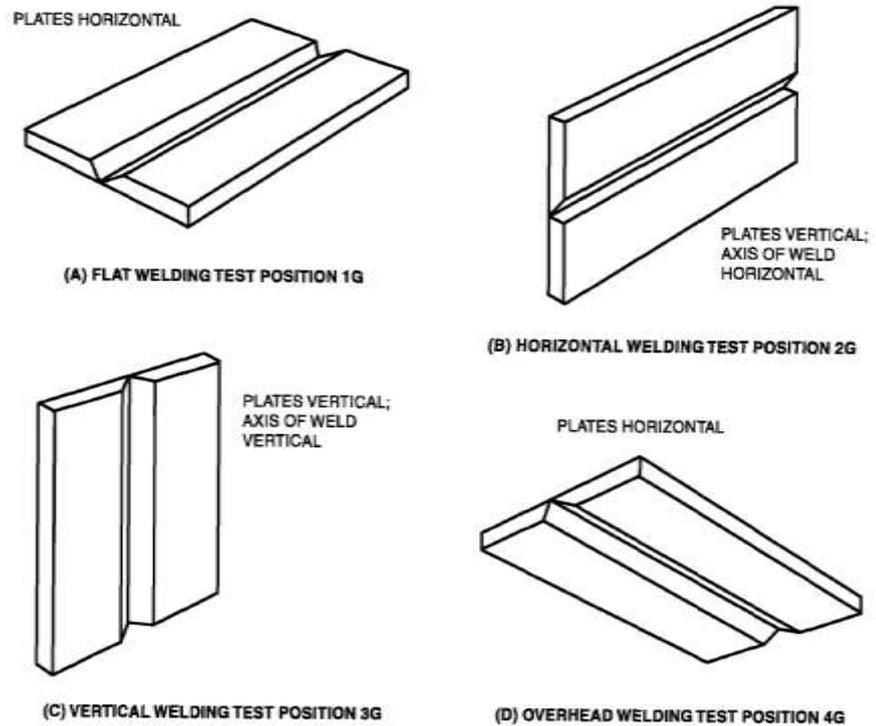


FIGURA 1.30: Posición de las pruebas en planchas de Soldadura por Ranura (9).

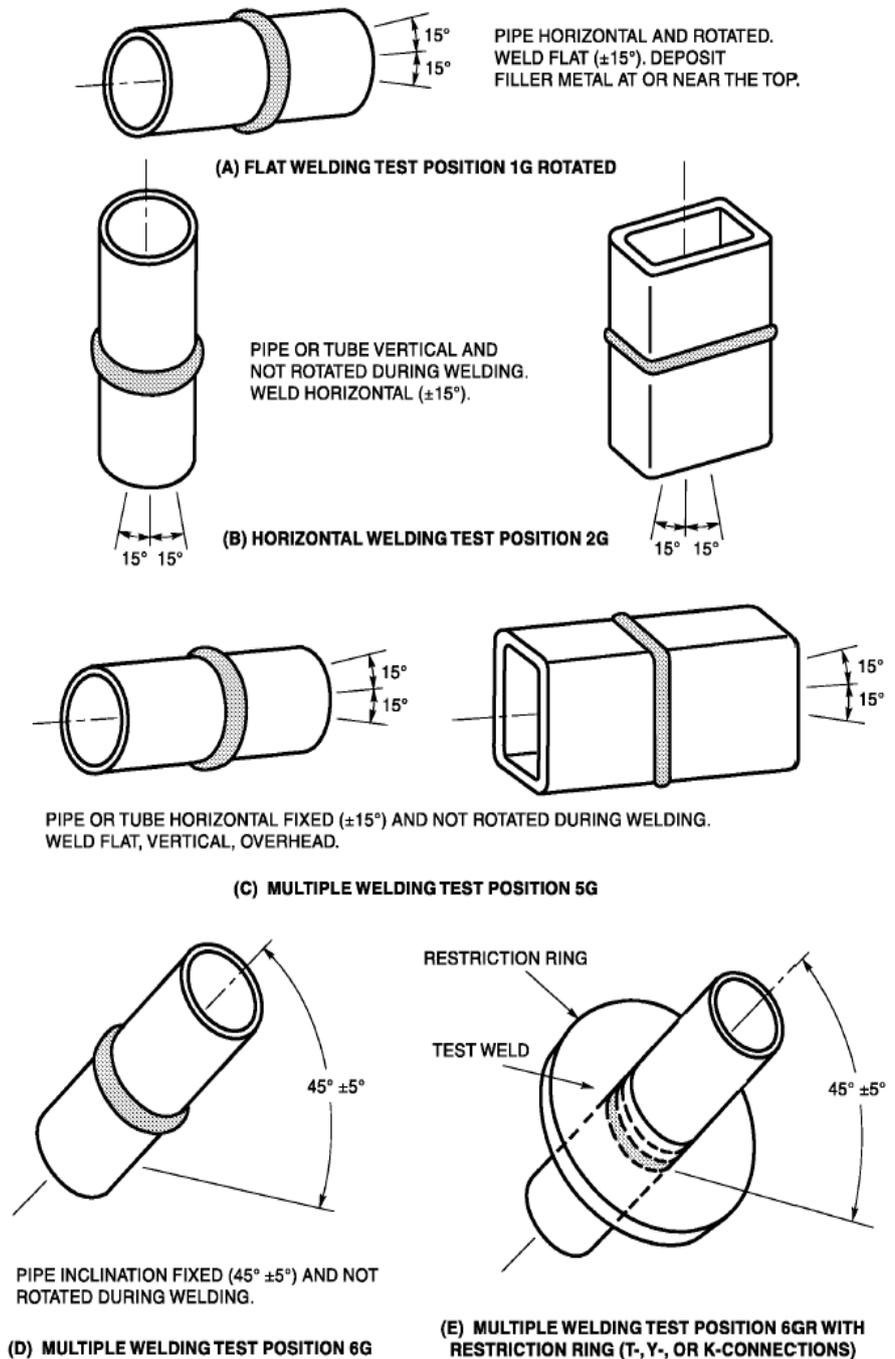
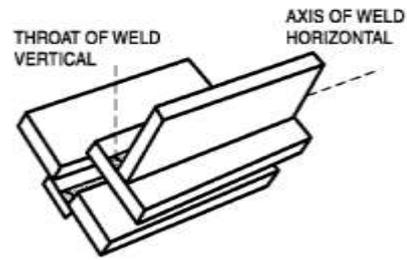
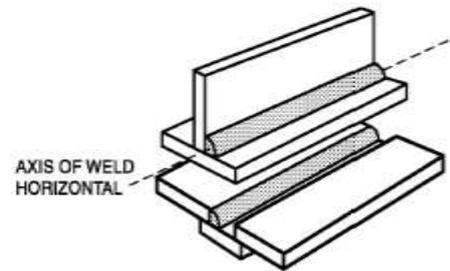


FIGURA 1.31: Posición en Muestras de Tuberías para Soldadura por Ranura (9).

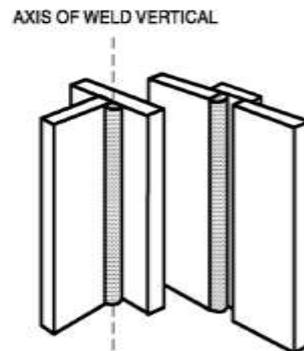


(A) FLAT WELDING TEST POSITION 1F

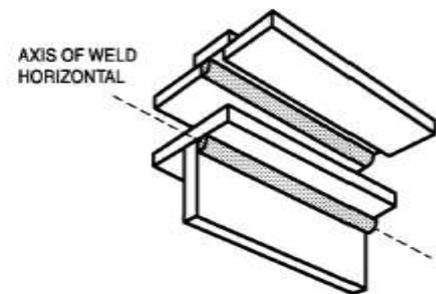


Note: One plate must be horizontal.

(B) HORIZONTAL WELDING TEST POSITION 2F



(C) VERTICAL WELDING TEST POSITION 3F



Note: One plate must be horizontal.

(D) OVERHEAD WELDING TEST POSITION 4F

FIGURA 1.32: Posición de Pruebas en Planchas de Soldadura en Filete (9).

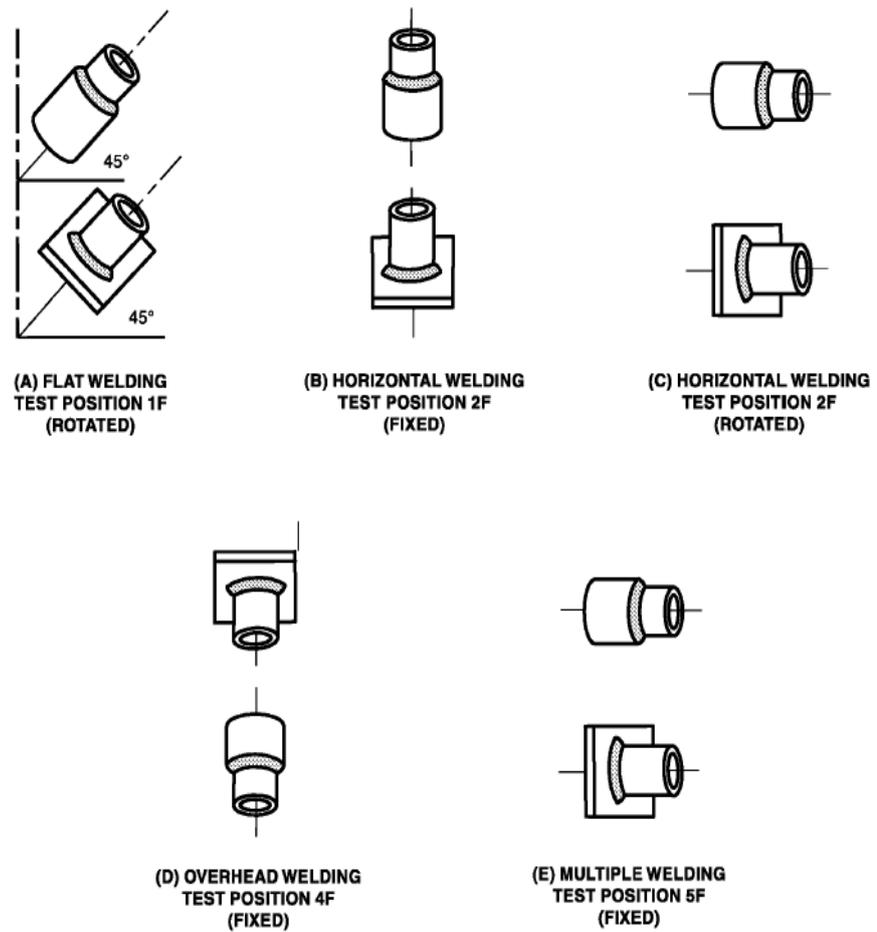


FIGURA 1.33: Posición de Muestras de Tuberías para Soldaduras Filete (9).

1.5.3 Requerimientos Mecánicos

Para el estudio de los requerimientos mecánicos es necesario la elaboración de una probeta para muestreo, la cual está basada por la Norma AWS D1.1, en el Capítulo 4, cuyas medidas y consideraciones se exponen en la Figura 4.11

(Apéndice E), requiriendo para nuestro caso de estudio la muestra de sección longitudinal (9).

En el capítulo 4 literal 4.8 del código estructural se establecen los tipos de pruebas mecánicas, los criterios de aceptación de los mismos, indicados a través de las dimensiones del espesor de la plancha y tipo de penetración CJP en la Tabla 4.2 (Apéndice F), siendo estos los siguientes (9):

- ✓ Prueba de doblado 4.8.3.1 (4.8.3.3 criterios de aceptación), cuyas características de la probeta se encuentran en la Figura 4.12 (Apéndice G).
- ✓ Prueba de Tracción 4.8.3.4 (4.8.3.5), cuyas características de la probeta se encuentran en la Figura 4.14 (Apéndice H).

1.6 Costos involucrados en el Proceso GMAW

Cada trabajo de soldadura presenta al calculista y diseñador sus propias características y dificultades, por lo cual un modelo de costos de soldadura que a continuación se expone propone un rango amplio de aplicación para todos los procesos que se utilizan en soldadura, y especialmente aplicable al proceso de soldadura GMAW. Este tema

de costos expuesto en este trabajo es basado en un software de estimación de costos involucrados en soldadura desarrollado por la empresa Indura S.A. Se basa en la relación de varios conceptos y parámetros involucrados que son: el costo de **consumibles** (electrodos, fundentes, gases de protección, electricidad, etc), costos de **mano de obra**, y **gastos generales** (10).

Como la soldadura esta relacionada directamente con otras operaciones, debe considerarse estas operaciones que involucra la fabricación de estructuras, a continuación se expone otras operaciones dentro de un proceso de fabricación (10):

- ✓ Abastecimiento y almacenamiento de materias primas
- ✓ Preparación de estos materiales para soldadura, corte, etc
- ✓ Armado de los componentes
- ✓ Soldadura
- ✓ Operaciones mecánicas subsecuentes
- ✓ Tratamientos térmicos
- ✓ Inspección

Software de Costos de la Compañía Indura S. A.



FIGURA 1.34: Software de Costos de Soldadura Indura S.A. (10)

Este programa se ha desarrollado con la finalidad de garantizar un trabajo seguro, beneficioso tanto para el cliente como para la empresa y que brinde los datos exactos y necesarios para poder seleccionar las mejores condiciones, materiales y métodos de soldadura (10).

Características del Programa (10):

- Permite calcular en forma detallada los costos de un proceso de soldadura.

- Permite comparar dos procesos distintos mediante sus costos para determinar el más económico.
- Examinar los Efectos al variar determinados parámetros de un proceso de Soldadura y ver su influencia en el costo total.
- Realizado en ambiente Windows.

CAPITULO 2

2. TRABAJO EXPERIMENTAL: APLICACIÓN DEL PROCESO GMAW EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

2.1 CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

En la construcción de una estructura encontramos diferentes tipos de elementos que las conforman, estos elementos dependiendo del tipo de estructura pueden ser vigas, pilares, cajones, cerchas, etc.

Cualquiera que sea la forma del elemento que formará la estructura, en su gran mayoría son construidas a base de planchas y perfiles de acero y que a su vez son cortados y finalmente soldados para conseguir la forma del elemento y luego la estructura total, el reto que mantienen los actuales constructores es el poder construir estos elementos y la estructura de una forma rápida, segura y con calidad.

Existen diferentes medios automáticos y semiautomáticos de corte y soldadura que ayudan a conseguir este objetivo.

El proceso de soldadura GMAW es un proceso semiautomático que puede automatizarse fácilmente contribuyendo de esta forma a reducir los tiempos de producción en la construcción de una estructura. Estos elementos estructurales y el conjunto en si son unidos con soldadura y el tipo de soldadura que se usa para lograr esta unión es el de tipo de soldadura de ranura y de filete.

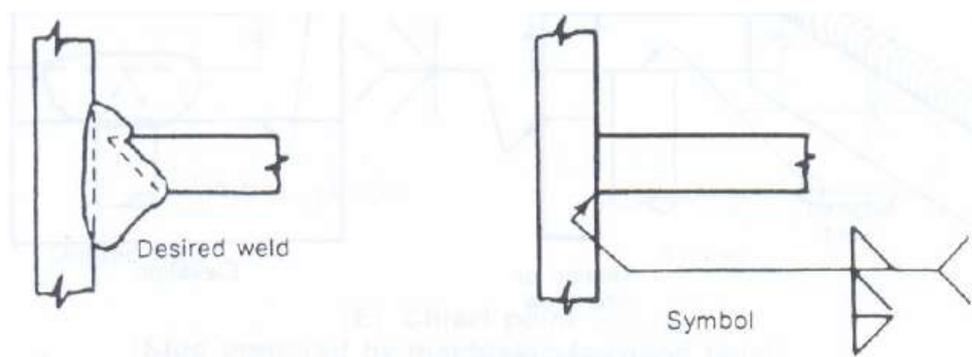


FIGURA 2.1: Soldadura tipo ranura simple y doble filete (1).

Estos dos tipos de soldadura pueden ser realizados por diferentes procesos, siendo los mas productivos los procesos SAW (arco sumergido), FCAW (alambre tubular), GMAW (Mig/Mag, MCAW), y el proceso de SMAW (electrodo revestido), de estos procesos, el que mayor facilidad de uso tanto por su parte operativa y por la inversión

económica que brinda para su desarrollo, es el GMAW, permitiéndonos soldar todo los elementos de una forma eficiente, este trabajo por lo general se lo realiza en taller, y su uso en montaje de los elementos para la conformación de la estructura total es limitada debido a su desventaja de no poder usarlo en terreno o en campo por la utilización de un gas de protección externo.

Los elementos que conforman la estructura dependiendo de su forma, necesitan de cordones de soldadura considerables en longitud, si tomado el ejemplo de construir una viga I, o doble T, esta sería construida a partir de 3 placas de acero, dos de las mismas son llamadas alas y una alma, si la viga tiene una longitud de 10 metros, necesitaríamos 40 metros de soldadura de filete para lograr su construcción, considerando que el alma utilizada no necesite de soldadura para su conformado, y si esta misma viga necesitare de un refuerzo en una de sus alas, esta longitud inicial de 40 metros aumenta a 60 metros de soldadura de filete con PJP (penetración parcial).

Si tenemos el caso de que necesitamos construir tubos para pilotaje, los mismos que serían enterrados en el suelo dependiendo del tipo de construcción a soportar los pilotes y del terreno donde se

construirá, podemos necesitar varios metros de tubería para estos pilotes, donde necesitaríamos realizar soldadura de ranura con CJP (penetración completa).

De los ejemplos anteriores nos damos cuenta que la utilización del proceso GMAW es de gran ayuda para poder enfrentar los retos de construcción actual.

2.2 PARAMETROS Y CONDICIONES DE SOLDADURA: MATRIZ EXPERIMENTAL

Como se indicó en la Sección 1.1 de esta tesis, tenemos diferentes parámetros que se deben considerar durante este proceso de soldadura, razón por la cual nos basaremos mediante la siguiente Matriz expuesta en la Tabla 4:

Tabla 4
Matriz Experimental

GASES	PARÁMETROS						TRANSFERENCIA ESPERADA
	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Velocidad de Avance (mm/seg.)	STICK OUT (mm)	FLUJO DE GAS (l/min.)		
100% CO ₂	22	160	4,689	8 @ 12	15	Corto Circuito	
	26	210	5,443	12 @ 18	17	Globular	
	0	0	0	0	0	Spray	
80%Ar+20%CO ₂	20,5	152	5,542	8 @ 12	13	Corto Circuito	
	24,5	225	6,35	12 @ 18	15	Globular	
	31	310	8,021	12 @ 18	18	Spray	
92%Ar+8%CO ₂	19,3	145	5,976	8 @ 12	13	Corto Circuito	
	23	212	7,088	12 @ 18	15	Globular	
	29	290	8,709	12 @ 18	19	Spray	

Tabla 4

Matriz Experimental (Continuación)

GASES	PARAMETROS							TRANSFERENCIA ESPERADA
	ZAC (mm)	Q (J/mm.)	Penetración (mm)	Dilución (%)	Dureza En ZAC	Inspección Visual (AWS D1,1)		
100% CO ₂								Corto Circuito
								Globular
								Spray
80%Ar+20%CO ₂								Corto Circuito
								Globular
								Spray
92%Ar+8%CO ₂								Corto Circuito
								Globular
								Spray

Las condiciones con las que se operaron fueron las siguientes:

- Posición plana, 1F.
- Orientación del electrodo: Técnica de empuje (Forehand).
- Condiciones ambientales, en el Taller de INDURA.

2.3 EJECUCION DE SOLDADURAS UTILIZANDO DIFERENTES MEZCLAS DE GAS

Para el desarrollo de estas pruebas se trabajaron con los siguientes equipos y accesorios:

Equipos:

- *Máquina de Soldar:*
 - Modelo AMIGO 403
 - Marca: INDURA
 - Trifásica
 - 60 Hz
 - 400 Amp de Capacidad.
- *Gage*
 - Marca: Bridgecam
- *Wel handy multi (Robot de Soldadura)*
 - Marca: KOIKE

- Equipo de Rayos X
 - Marca ERESKO ES2
 - 300 kV
 - Radiación: 10mA/min * 180 kW y 36" de distancia entre fuente y película.
- Equipo de Tracción.
 - INSTRON 1128

Accesorios:

- *Placas ASTM–A36*
 - Probetas para propiedades mecánicas en Corto Circuito, con espesor de 3/8 " y longitud establecida por la Norma AWS D1.1 (Apéndice E)
 - Probetas para análisis en Corto Circuito, con espesor de 1/2".
- *Material de Aporte*
 - Marca: Indura
 - Tipo: ER70S-6 (Norma AWS 5.18)
 - ϕ : 1,2 mm
- *Tanque de Gases:*
 - CO₂

- 80% Ar y 20% CO₂
- 92% Ar y 8% CO₂
- Marca: INDURA
- *Cronómetro*
- *Flexómetro*
- *Multímetro sensorial*

Todos estos equipos y accesorios fue facilitados gentilmente por la industria INDURA.

2.3.1 100 % CO₂

El desarrollo de este tipo soldadura con 100% CO₂ se llevará a cabo con el método de transferencia a través de Corto Circuito y Globular, debido a que por medio de transferencia Spray no es factible realizar este procedimiento (3,4).

El procedimiento a seguir a través de transferencia en Corto Circuito es el siguiente:

1. Preparar las placas.
2. Calibrar el equipo con Voltaje, Amperaje y Stick out.
3. Ejecución de la Soldadura.

El procedimiento a seguir a través de transferencia Globular es semejante al de Corto Circuito, sólo cambia el Voltaje, Amperaje, y Stick out.

Para tener una mejor apreciación del trabajo desarrollado se presenta el siguiente esquema:

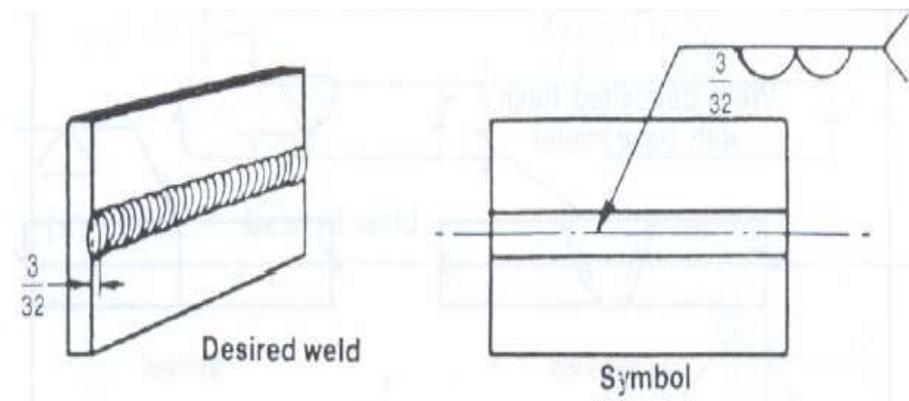


FIGURA 2.2: Esquema del tipo de soldadura con 100% CO₂, en los diferentes tipos de transferencia: Corto Circuito y Globular (1).

Durante el desarrollo de este estudio se realizaron probetas para realizar las pruebas mecánicas en Corto Circuito, al no

ser un proceso precalificado, presentando el siguiente esquema:

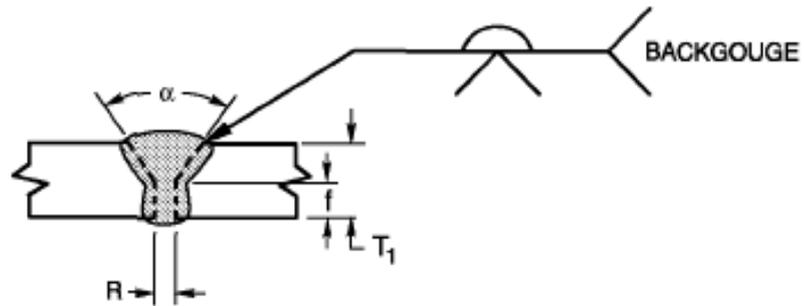
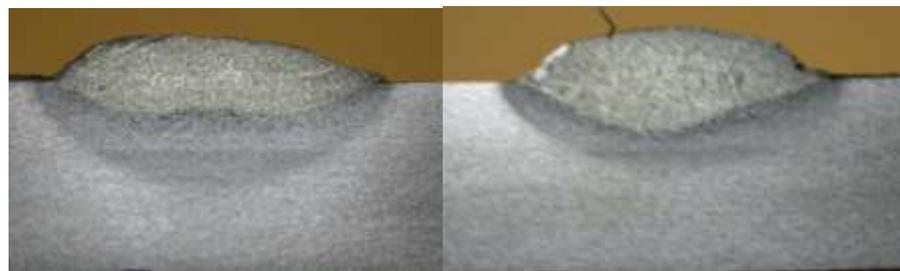


Figura 2.3: Esquema del tipo de Soldadura a través de Transferencia Corto Circuito (Propiedades mecánicas) (9).



(a)

(b)

FIGURA 2.4: Cordón de soldadura con 100% CO₂, en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito y (b) Globular.

2.3.2 80 % Ar + 20 % CO₂

El desarrollo de este tipo soldadura con 80% Ar + 20% CO₂ se llevará a cabo con el método de transferencia a través de Corto Circuito, Globular y Spray.

El procedimiento a seguir a través de transferencia en Corto Circuito es el siguiente:

1. Preparar las placas.
2. Calibrar el equipo con Voltaje, Amperaje y Stick out.
3. Ejecución de la Soldadura.

El procedimiento a seguir a través de transferencia Globular es semejante al de Corto Circuito, sólo cambia el Voltaje, Amperaje y Stick out.

El procedimiento a seguir a través de transferencia Spray es semejante al de Corto Circuito, sólo cambia el Voltaje, Amperaje y Stick out..

Para tener una mejor apreciación del trabajo desarrollado se puede recurrir también al Esquema de la Figura 2.2. Además, también se hicieron probetas para analizar sus propiedades

mecánicas en Corto Circuito, según el esquema de la Figura 2.3.

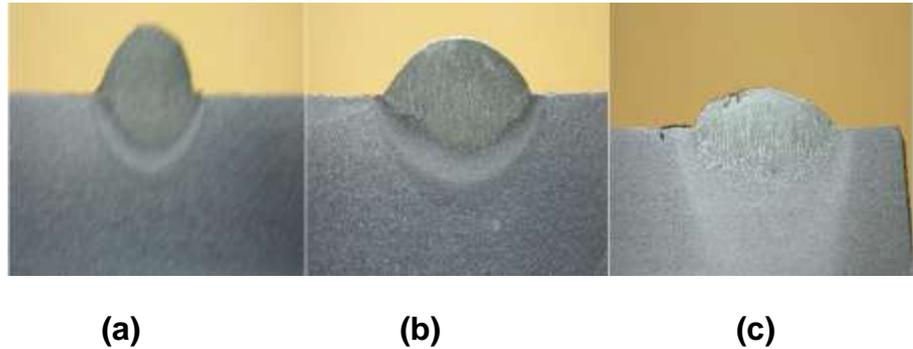


FIGURA 2.4: Cordón de soldadura con 80 % Ar + 20 % CO₂, en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito, (b) Globular y (c) Spray.

2.3.3 92 % Ar + 8 % CO₂

El desarrollo de este tipo soldadura con 92% Ar + 8% CO₂ se llevará a cabo con el método de transferencia a través de Corto Circuito, Globular y Spray.

El procedimiento a seguir a través de transferencia en Corto Circuito es el siguiente:

1. Preparar las placas.
2. Calibrar el equipo con Voltaje, Amperaje y Stick out.
3. Ejecución de la Soldadura.

El procedimiento a seguir a través de transferencia Globular es semejante al de Corto Circuito, sólo cambia el Voltaje, Amperaje y Stick out.

El procedimiento a seguir a través de transferencia Spray es semejante al de Corto Circuito, sólo cambia el Voltaje, Amperaje y Stick out.

Para tener una mejor apreciación del trabajo desarrollado, podemos recurrir a los Esquemas presentado en la Figura 2.2 y en la Figura 2.3.

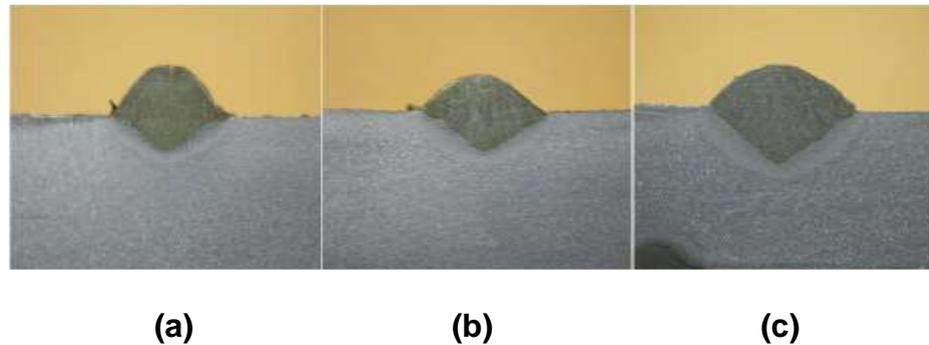


FIGURA 2.6: Cordón de soldadura con 92 % Ar + 8 % CO₂, en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito, (b) Globular y (c) Spray.

CAPITULO 3

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla 5

Resultados de las Pruebas

GASES	TRANSFERENCIA	PARAMETROS					
		Voltaje (V)	Amperaje (A)	Velocidad de Avance (mm/seg.)	STICK OUT (mm)	FLUJO DE GAS (l/min.)	
100% CO ₂	Corto Circuito	22	160	4,689	8 @ 12	15	
	Globular	26	210	5,443	12 @ 18	17	
	Spray	0	0	0	0	0	
80%Ar+20%CO ₂	Corto Circuito	20,5	152	5,542	8 @ 12	13	
	Globular	24,5	225	6,35	12 @ 18	15	
	Spray	31	310	8,021	12 @ 18	18	
92%Ar+8%CO ₂	Corto Circuito	19,3	145	5,976	8 @ 12	13	
	Globular	23	212	7,088	12 @ 18	15	
	Spray	29	290	8,709	12 @ 18	19	

Tabla 5
Resultados de las pruebas (Continuación)

GASES	TRANSFERENCIA	PARAMETROS					
		ZAC (%)	Q (J/seg.)	Penetración (mm)	Dilución (mm)	DUREZA en ZAC (HRB)	Inspección Visual (AWS D1.1)
100% CO ₂	Corto Circuito	33,3%	750,70	1,79	43	87,7	OK
	Globular	16,3%	987,53	2,63	49	84,5	OK
	Spray	0,0%	0,00	0	0	0	----
80%Ar+20%CO ₂	Corto Circuito	9,1%	562,30	2,03	47	88	OK
	Globular	18,2%	793,70	2,9	55	86	OK
	Spray	43,8%	960,00	3,65	65	78	OK
92%Ar+8%CO ₂	Corto Circuito	7,7%	468,30	1,6	33	77	OK
	Globular	16,7%	632,73	2,44	49	74	OK
	Spray	7,7%	790,60	3,01	54	68	OK

3.1 MORFOLOGIA DE LAS SOLDADURAS

Dentro de la morfología de la soldadura de los cordones realizados se han analizado los siguientes parámetros:

- *Zona Afectada por el Calor (ZAC).*

Como vimos en la Sección 1.3, en la Zona Afectada por el Calor hay cambios en el tamaño de grano, modificando con ello las características del material. Por ello en la Sección de Metalurgia se analizará la macro estructura de cada una de las muestras. Los datos del ZAC se presentan en la Tabla 5.

- *Penetración.*

Mediante esta característica física podemos describir la situación en la que el metal depositado y el metal base se funden en forma íntegra en la raíz de la soldadura. Por lo tanto, esto será mucho más sencillo de analizar a través de un estudio macroscópico, como se lo hará en la siguiente sección.

- *Dilución.*

Durante el proceso de soldadura, el metal base debe ser capaz de aceptar la dilución (aleación) por los metales bases sin producir una microestructura propensa a la figuración (1).

La Figura 3.1 muestra de manera gráfica el concepto de dilución. En la imagen superior se ha representado un depósito de un metal A sobre una pieza (1).

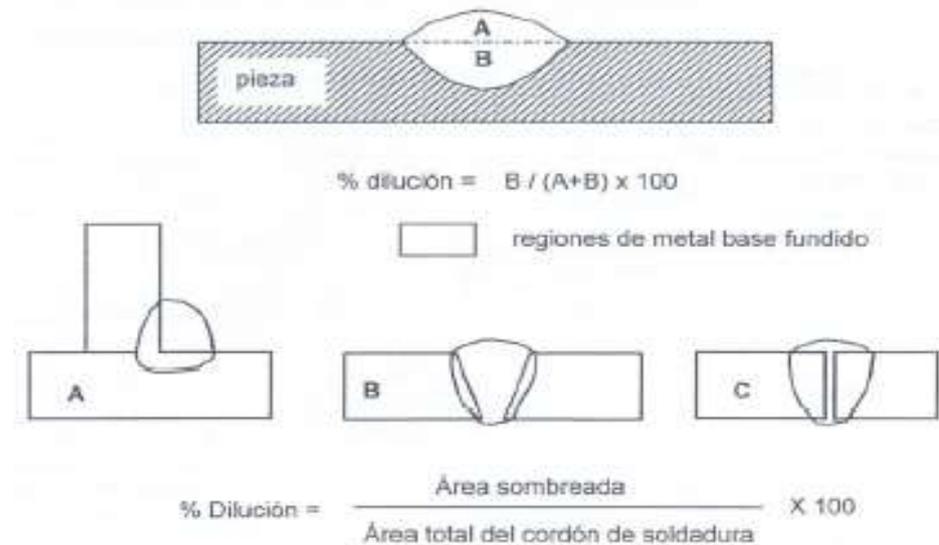


FIGURA 3.1: Efecto de la dilución del metal de aporte por la mezcla con los metales base (1).

- *Calor aportado.*

El aporte de calor es la energía que se genera durante la soldadura. Puede ser de origen químico (como consecuencia de la combustión de sustancias combustibles), *eléctrico* (procesos de arco eléctrico) o mecánico (soldadura por explosión o por fricción).

El calor de aporte viene expresado por la siguiente ecuación:

$$H_{\text{neto}} \text{ (Joules / mm)} = \frac{V(\text{volt.}) \times I(\text{amp.})}{v \left(\frac{\text{mm}}{\text{seg}} \right)} \quad \text{(Ec. 3.1)}$$

Donde:

H_{neto} = Calor neto aportado [Joules/mm]

V = Voltaje [Voltios]

I = Corriente [Amperaje]

v = Velocidad de soldeo [mm/seg.]

El aporte de calor es el parámetro más importante que condiciona las propiedades mecánicas de la unión soldada dependientes de la micro estructura del material. Los datos del Calor obtenido en cada proceso de Transferencia se encuentran en la Tabla 5.

A continuación presentamos el comportamiento de la entrada de Calor en los diferentes métodos de transferencia y mezclas de gases.

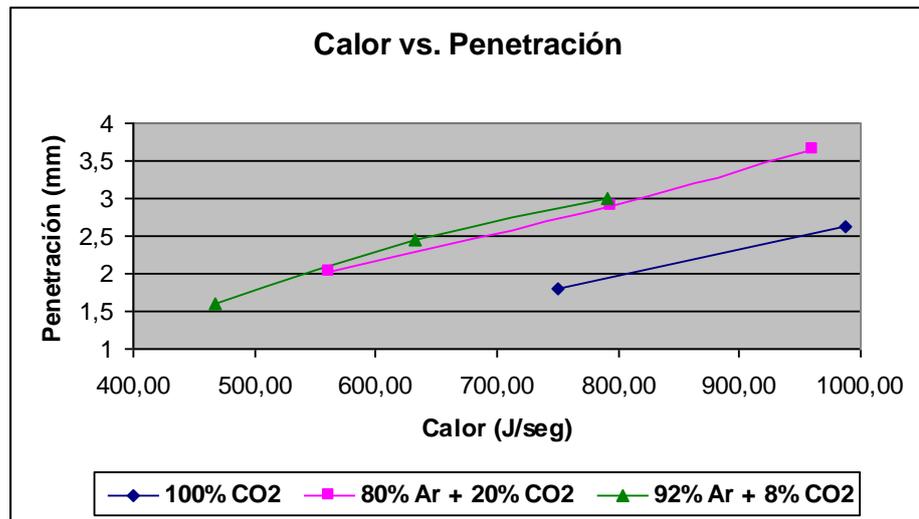


FIGURA 3.2: Calor vs. Penetración.

La mezcla de 80% Ar + 20% CO₂ presenta un comportamiento promedio en los diferentes métodos de transferencia, indicando una penetración aceptable en los cordones de soldadura. El método de transferencia Corto Circuito presenta menor requerimiento de Calor para ser desarrollado, y mayor requerimiento está el método de Spray.

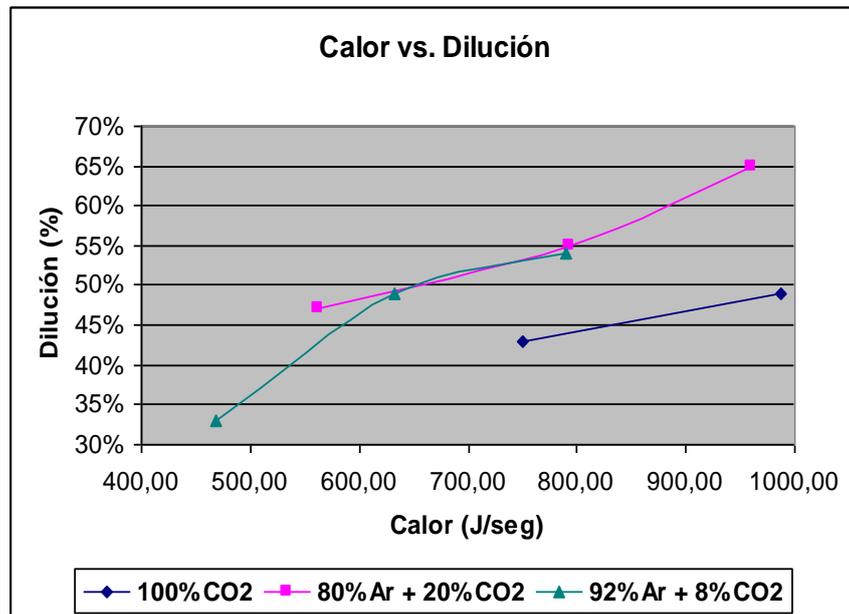


FIGURA 3.3: Calor vs. Dilución

En la figura 3.3 la curva de 80% Ar + 20% CO₂, presenta valores promedios con respecto a las otras dos mezclas, y que el proceso de Corto Circuito es el que requiere menor cantidad de Energía.

- *Dureza*

Esta propiedad será analizada con mayor detalle en la Sección 3.3

- *Estructuras*

Las micro y macro estructuras han sido expuestas en la Sección siguiente.

3.2 METALURGIA DE LAS SOLDADURAS

Para el estudio de las estructuras es muy importante obtener una probeta representativa y realizar el siguiente procedimiento para su preparación:

1. Preparar la probeta de acero al Carbono (ASTM A 36) con su respectivo cordón de soldadura.
2. Realizar cortes transversales a través de la probeta y rectificarla.
3. Preparar los cortes para hacer ataque macroscópico y poder analizar el ancho del ZAC, del cordón, Penetración y Dilución.
Para lo cual se utiliza ácido acético, clórico, nítrico y glicerina.
4. Esmerilar la probeta antes de la metalografía.
5. Empleo de lijas #: 180, 220, 320, 400 y 600.
6. Pulir con alúmina.
7. Realizar el ataque químico con Nital al 3% y secarle con alcohol
8. Exponer la probeta al Microscopio metalográfico previsto de oculares 160X (Olympus PME).

9. Proseguir con la observación macroscópica, con ayuda de un papel cuadriculado a escala, para proseguir con la toma de datos de ZAC, Penetración y Dilución.

Nota: Todas las fotos fueron realizadas con un aumento de 160X

A través de su microestructuras podemos indicar la tendencia del comportamiento de los cordones de soldadura, teniendo los siguientes resultados a continuación:

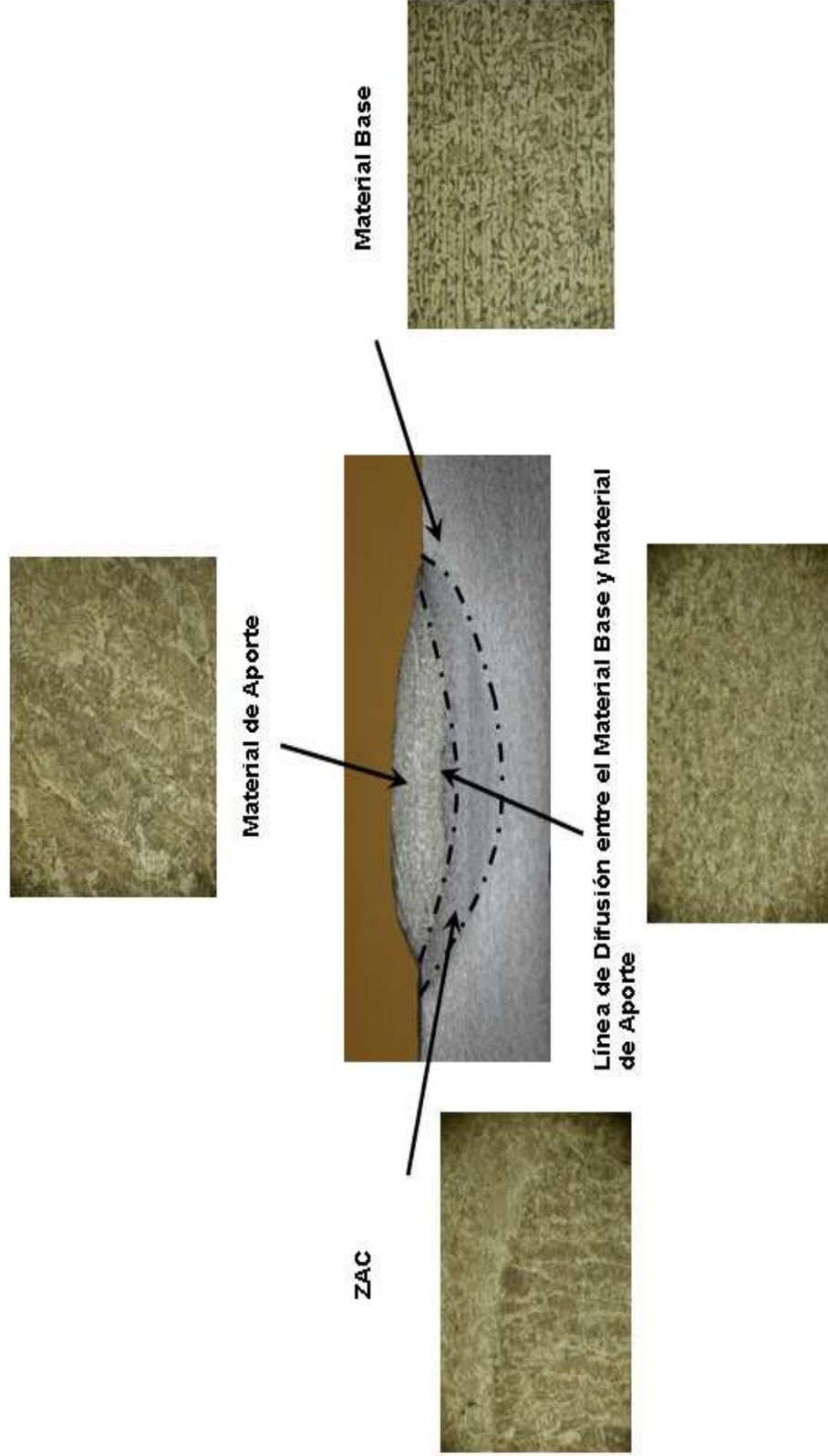


FIGURA 3.4: Microestructura de probetas en Corto Circuito, 100% CO₂.

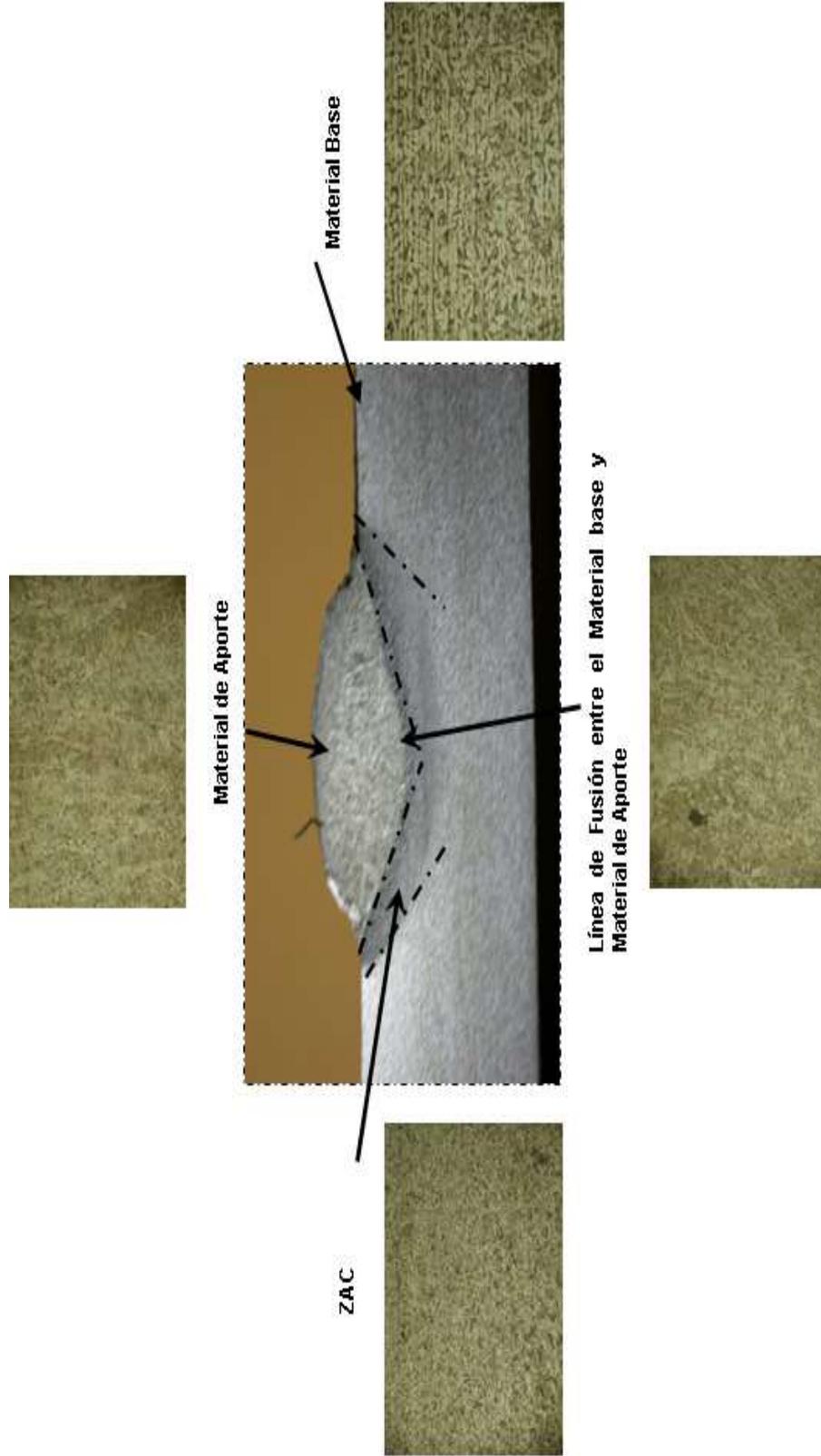


FIGURA 3.5: Microestructura de probetas en Transferencia en Globular, 100% CO₂

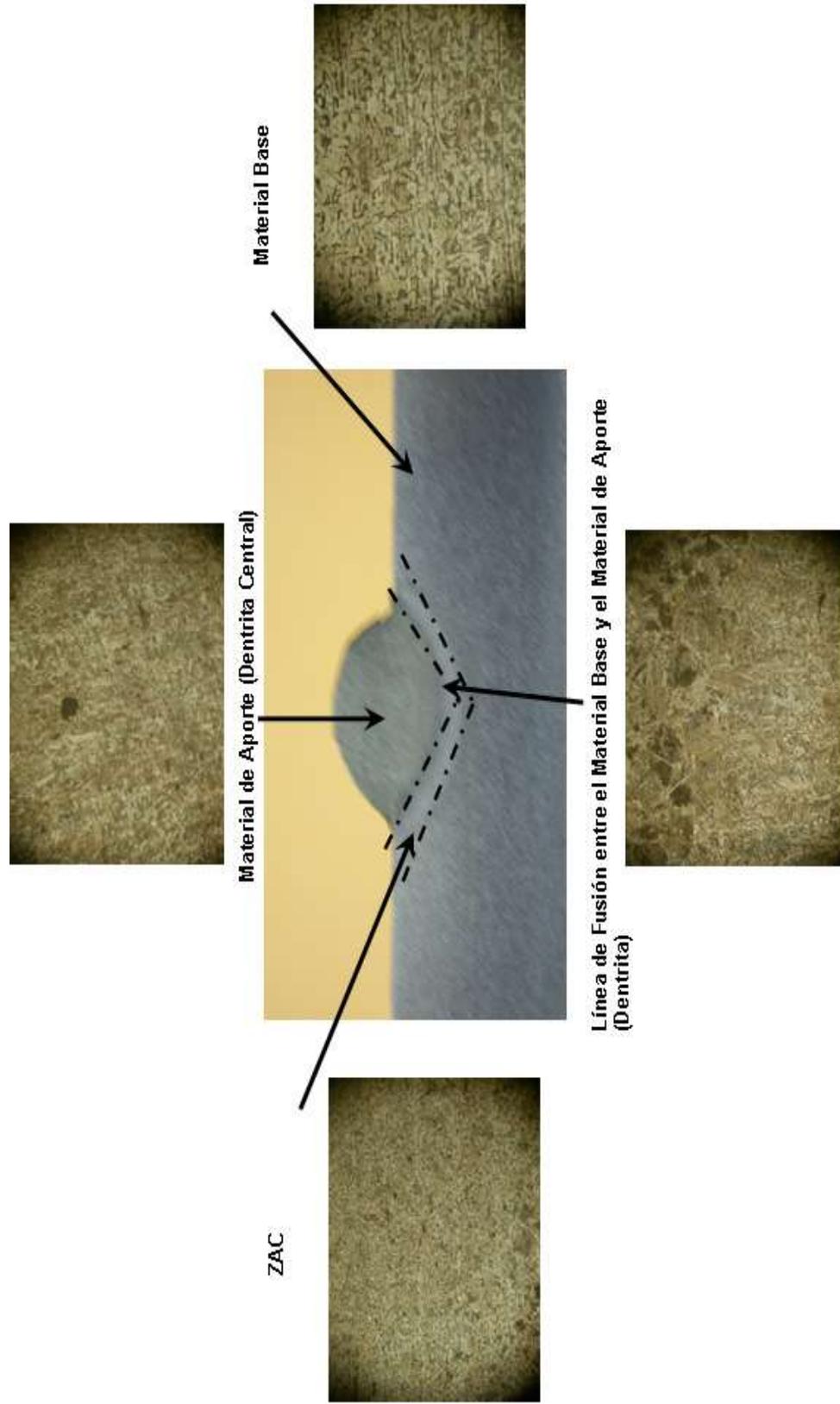


FIGURA 3.6: Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 80 % Ar + 20 % CO₂

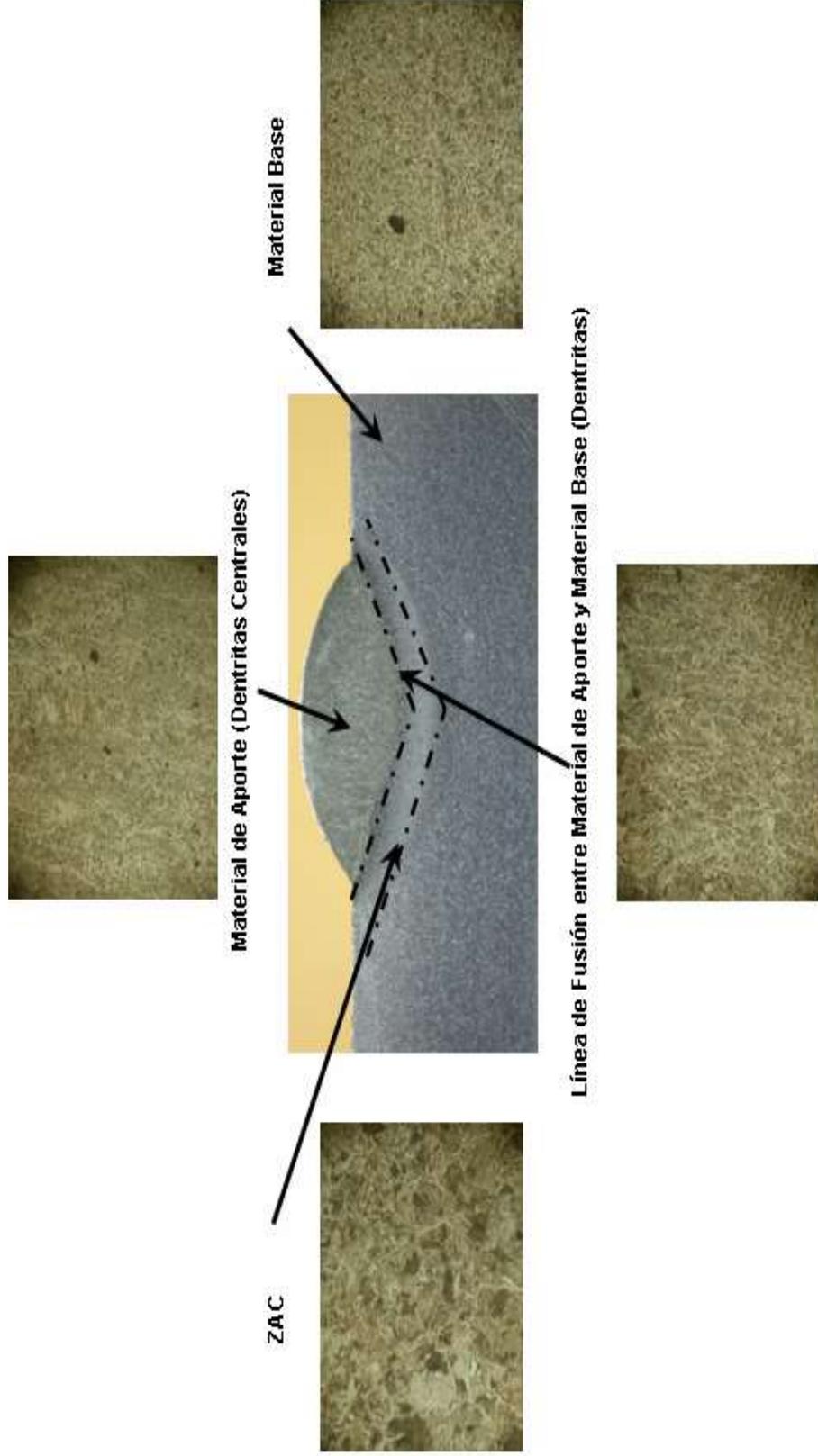


FIGURA 3.7: Microestructura de probetas en Transferencia en Globular, 80 % Ar + 20 % CO₂

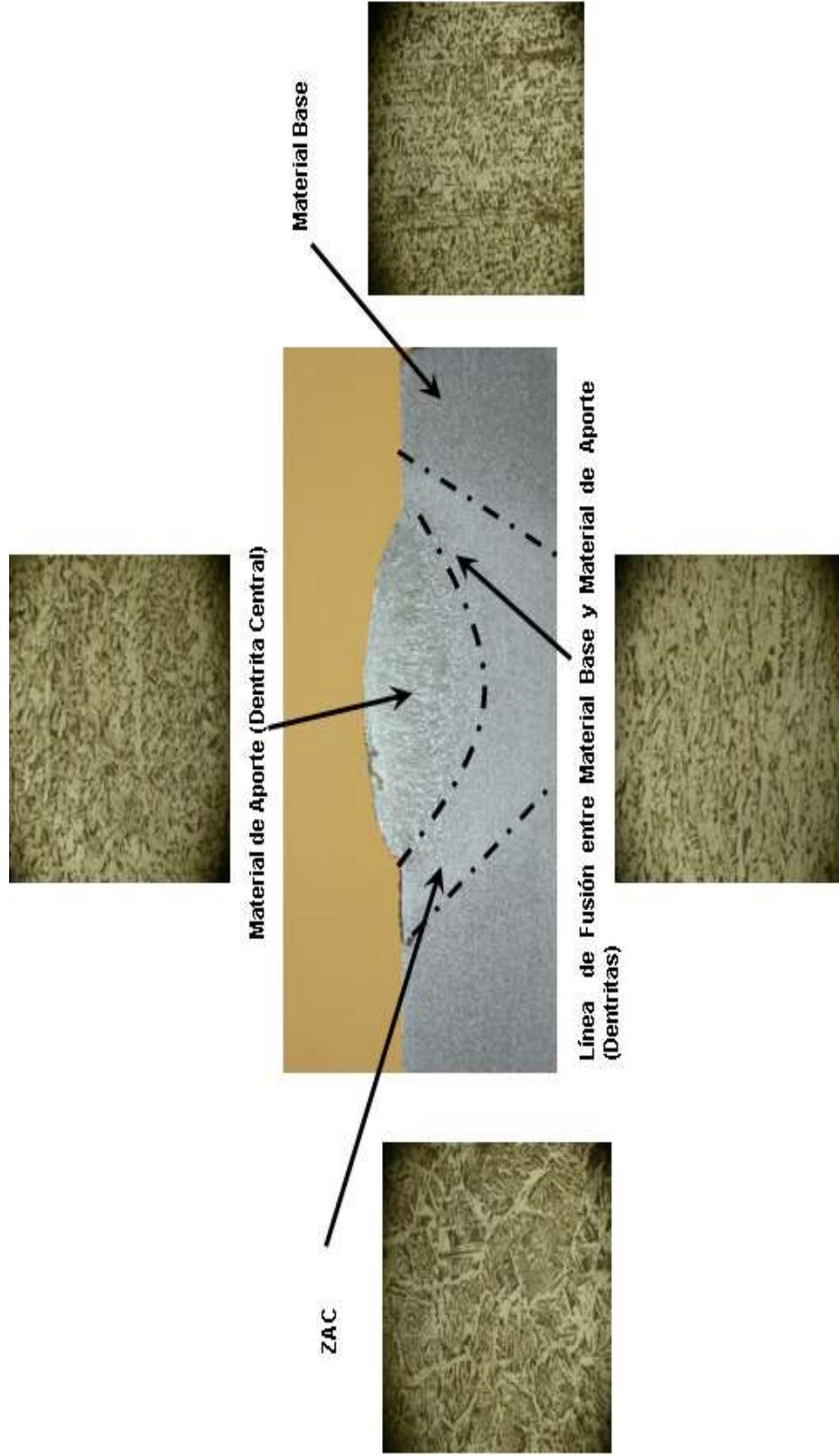


FIGURA 3.8: Microestructura de probetas en Spray, 80 % Ar + 20 % CO₂

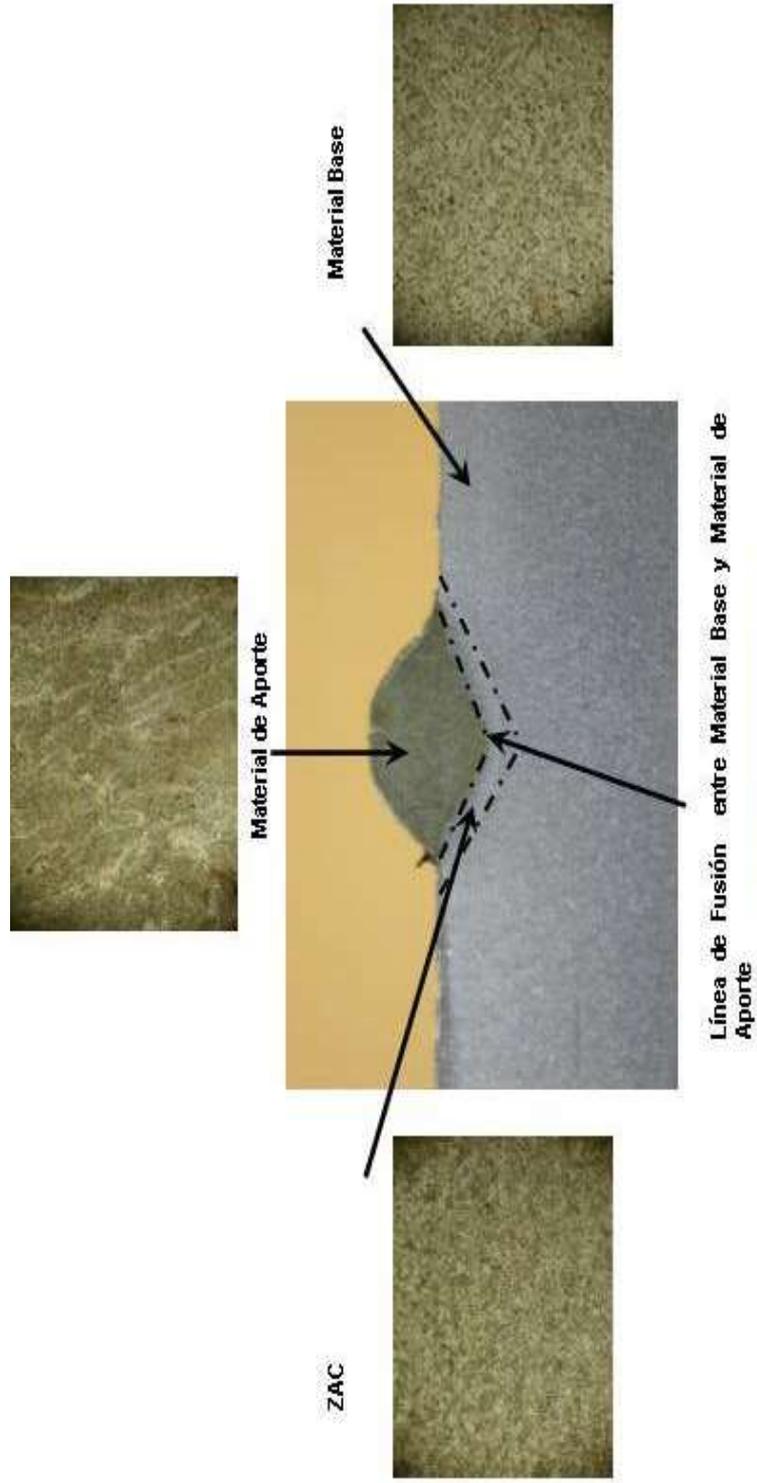


FIGURA 3.9: Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 92 % Ar + 8 % C O₂

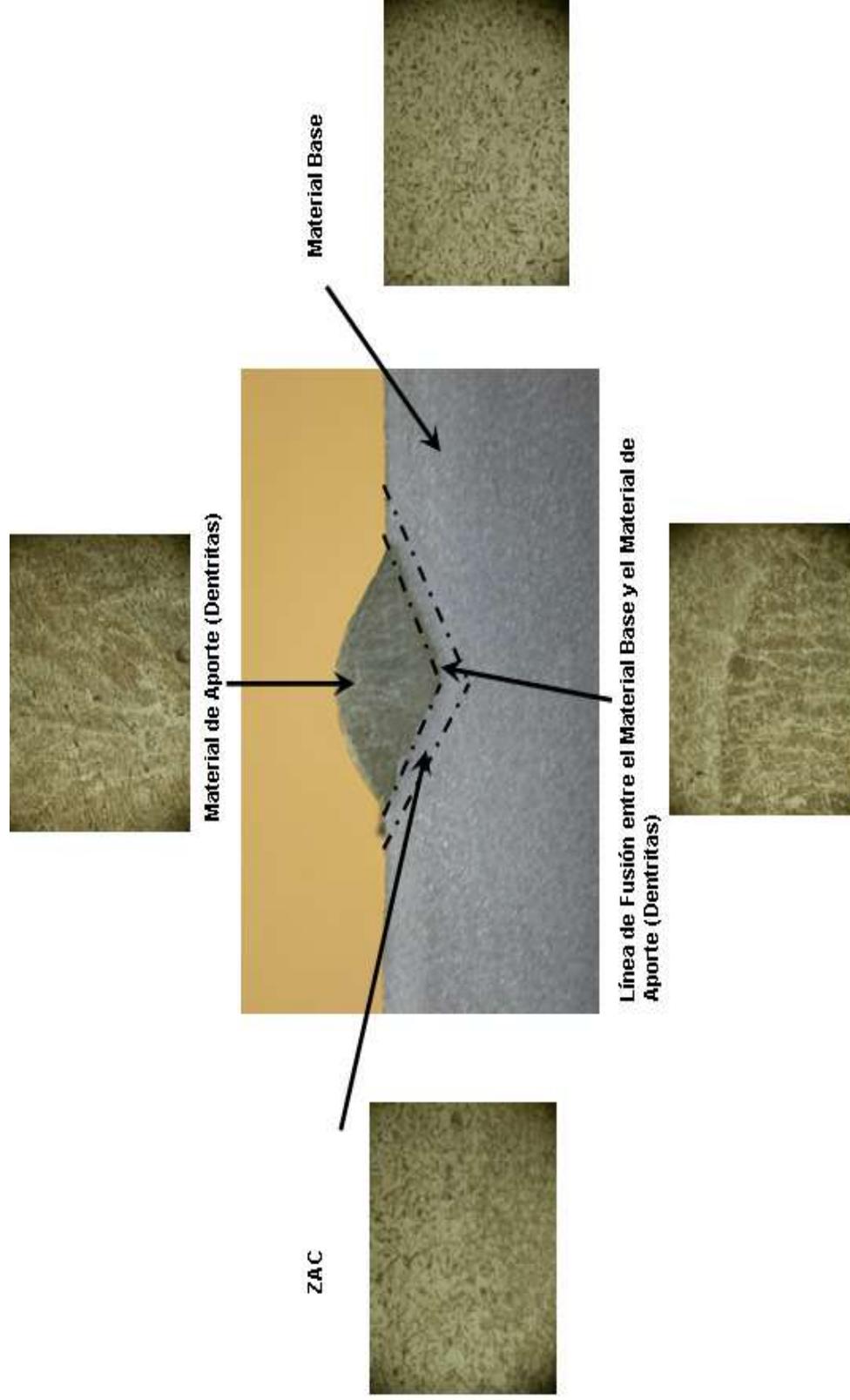


FIGURA 3.10: Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 92 % Ar + 8 % CO₂

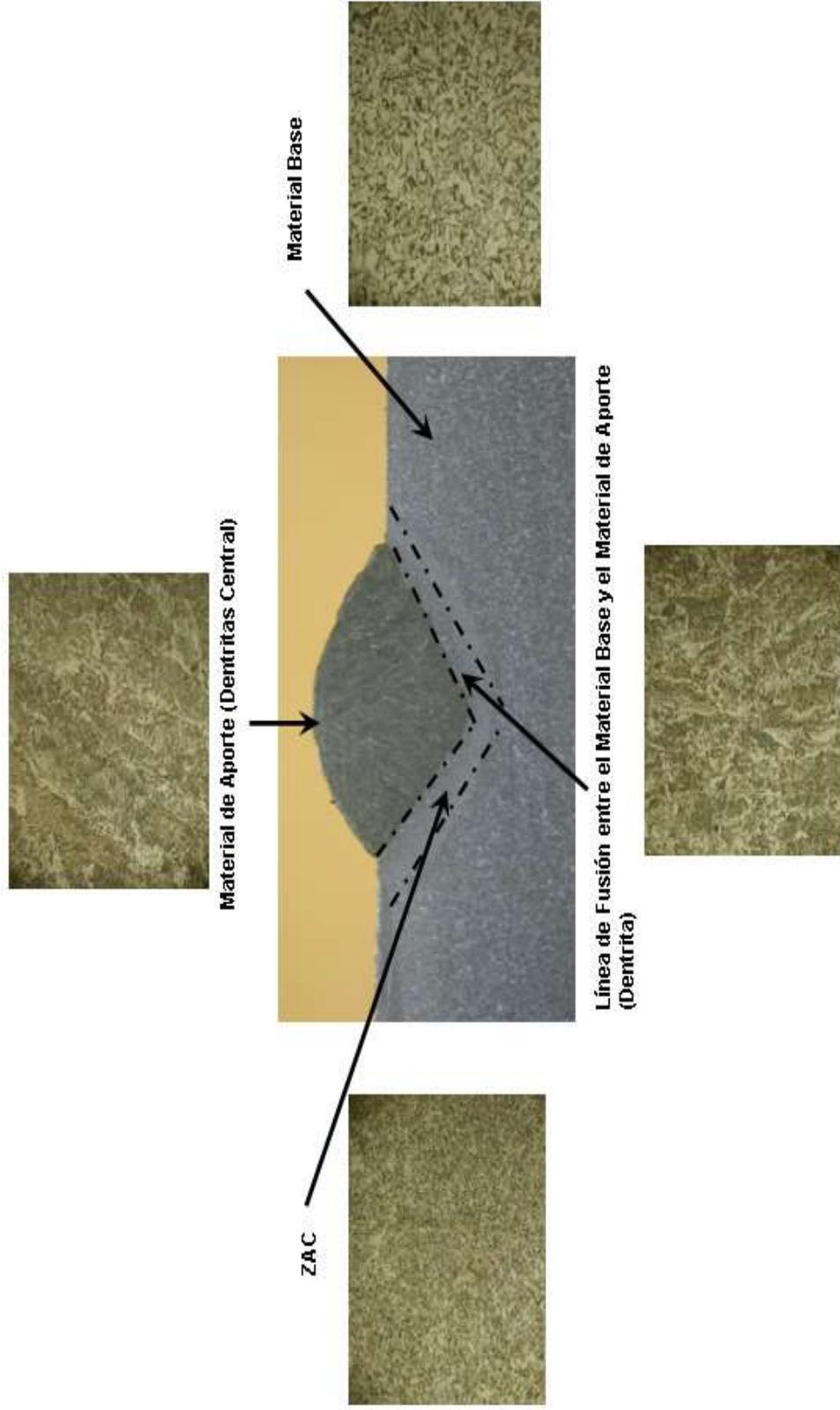


FIGURA 3.11: Microestructura de probetas en Transferencia en Spray, 92 % Ar + 8 % CO₂

En las Figuras 3.4 hasta la 3.11 podemos apreciar las diferentes microestructuras en cada parte del cordón de soldadura, tomando en cuenta que por ser el mismo material y al estar expuestos a condiciones semejantes sus microestructuras son las mismas, presentado en la Zona de:

Material de Aporte: En ellas tenemos la microestructura denominada Dentrillas, la cual se puede considerar como granos muy finos formados durante el proceso de soldadura al ser aportado al material base.

Línea de Fusión entre el Material Base y Material de Aporte: La microestructura presente son Dentrillas alargadas.

Afectada por el Calor: La microestructura presenta perlitas y ferritas, debido al proceso de enfriamiento que se da durante el proceso de soldadura. Es decir, la temperatura inicial del proceso de soldadura sobrepasa los 700°C , por lo que el material presenta una microestructura austenítica, la cual al enfriarse lentamente, comienza la transformación. Esta transformación consiste en precipitación de ferrita con pequeñas cantidades de carbono en solución, quedando granos de austenita que se van enriqueciendo paulatinamente en carbono a medida que desciende la temperatura. La austenita se

transforma en perlita (ferrita+cementita), teniendo por lo tanto este tipo de microestructuras.

Material Base: La microestructura existente en un acero de bajo porcentaje de carbono es de Perlita y Ferrita.

En las macroestructuras podremos ver en las siguientes figuras con certeza, las diferencias existentes en el proceso de soldadura, a través del tamaño de penetración y porcentaje de dilución, los cuales son distintos debido al proceso de transferencia de Calor, teniendo por lo tanto:

100% CO₂

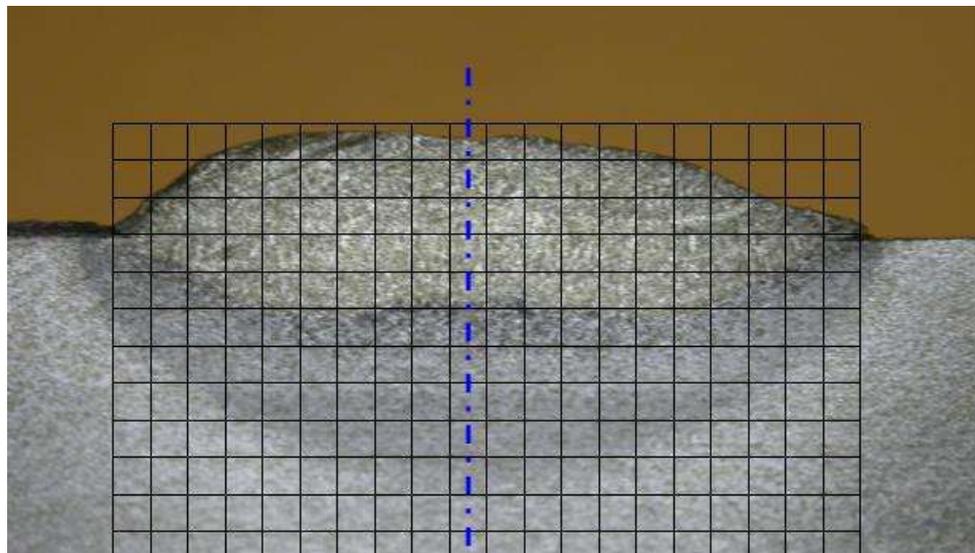


FIGURA 3.12: Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Corto Circuito, 100% CO₂.

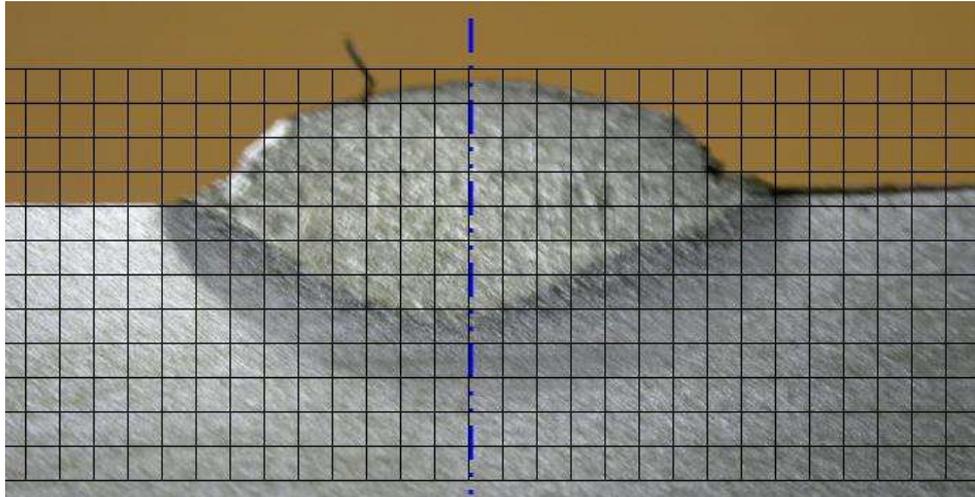


FIGURA 3.13: Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Globular, 100% CO₂.

80 % Ar + 20 % CO₂

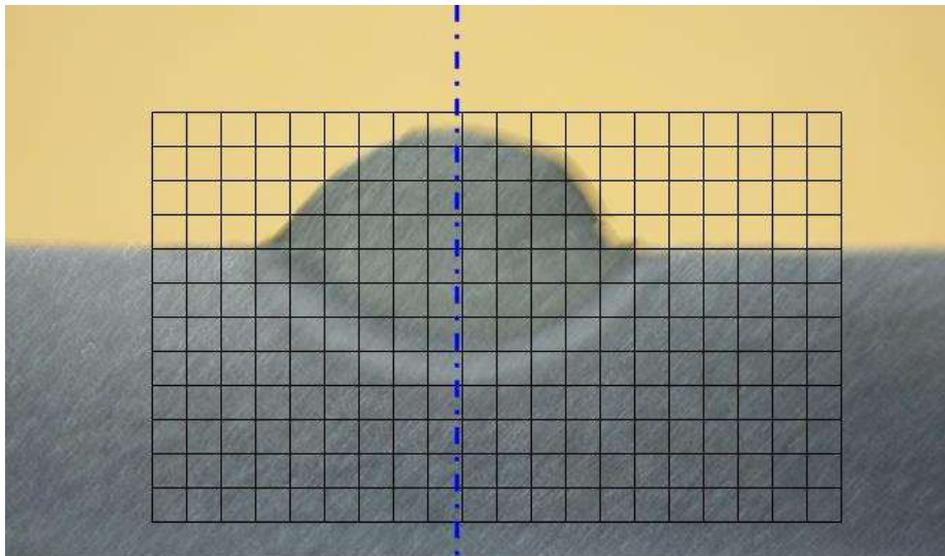


FIGURA 3.14: Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO₂, en Transferencia en Corto Circuito.

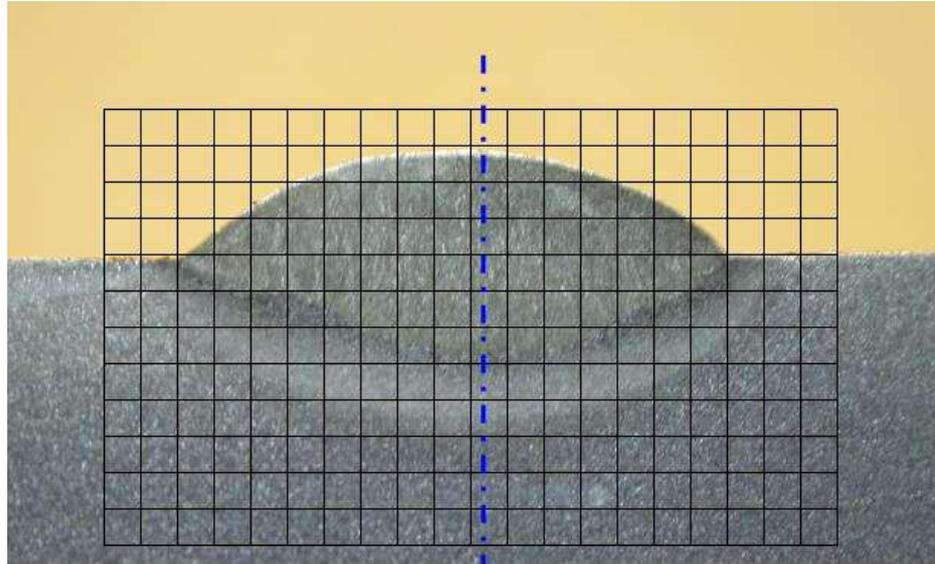


FIGURA 3.15: Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO₂, en Transferencia Globular.

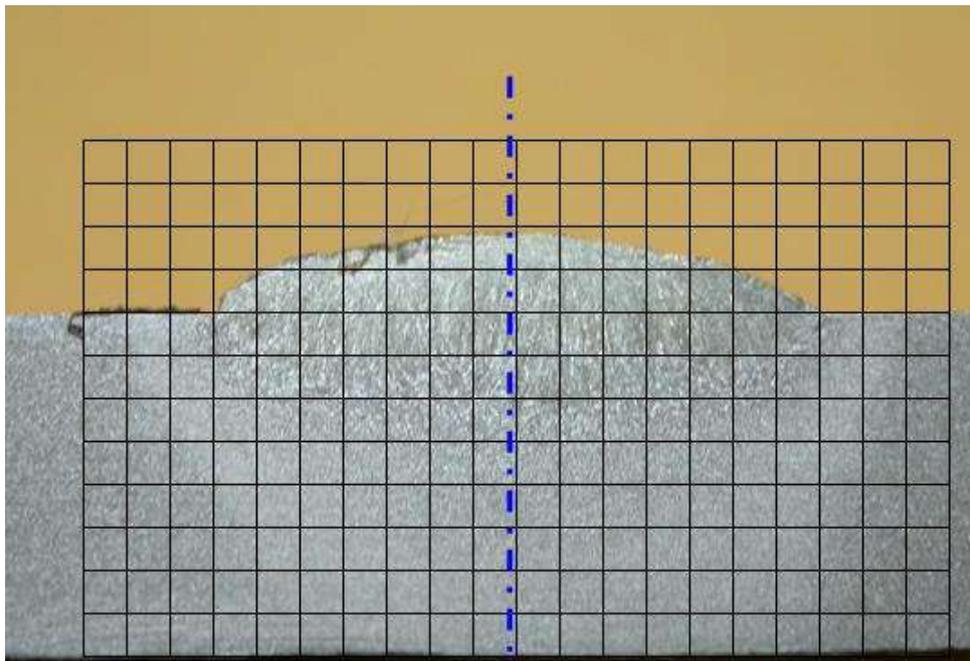


FIGURA 3.16: Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO₂, en Transferencia Spray.

92 % Ar + 8 % CO₂

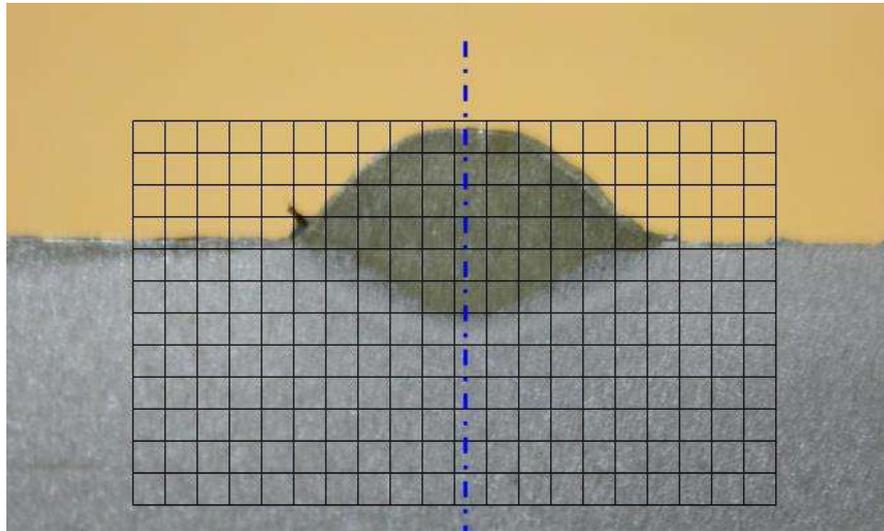


FIGURA 3.17: Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO₂, en Transferencia en Corto Circuito.

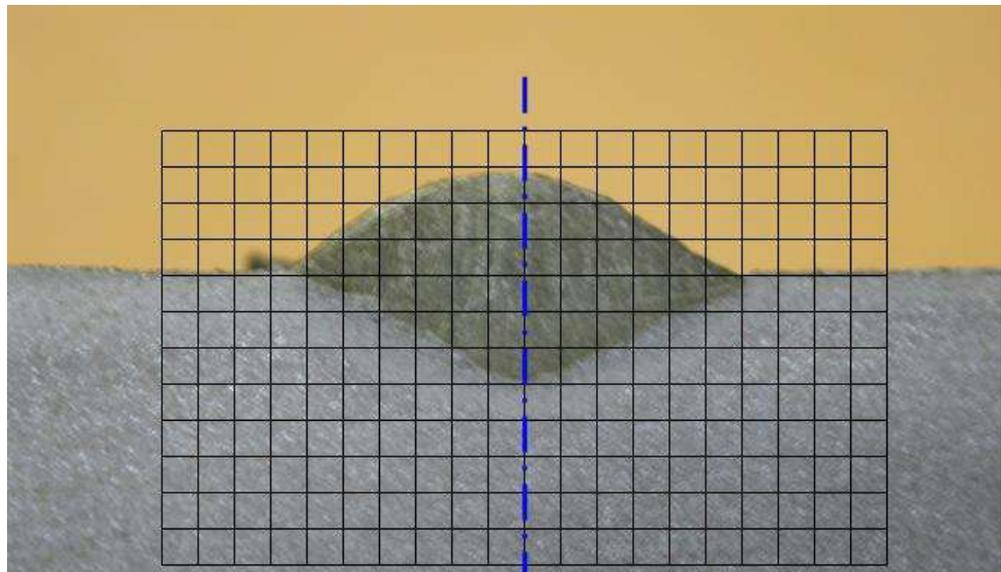


FIGURA 3.18: Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO₂, en Transferencia Globular.

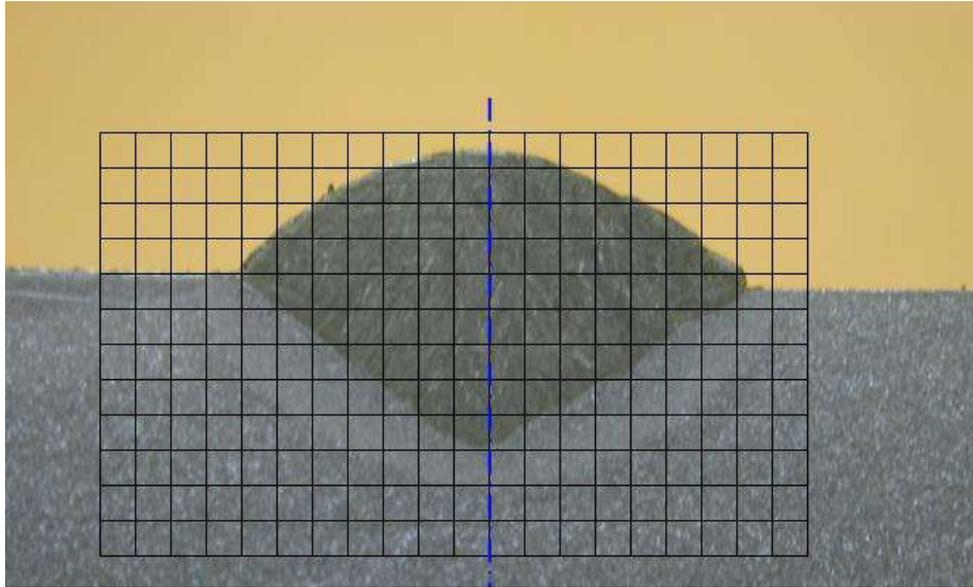


FIGURA 3.19: Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO₂, en Transferencia Spray.

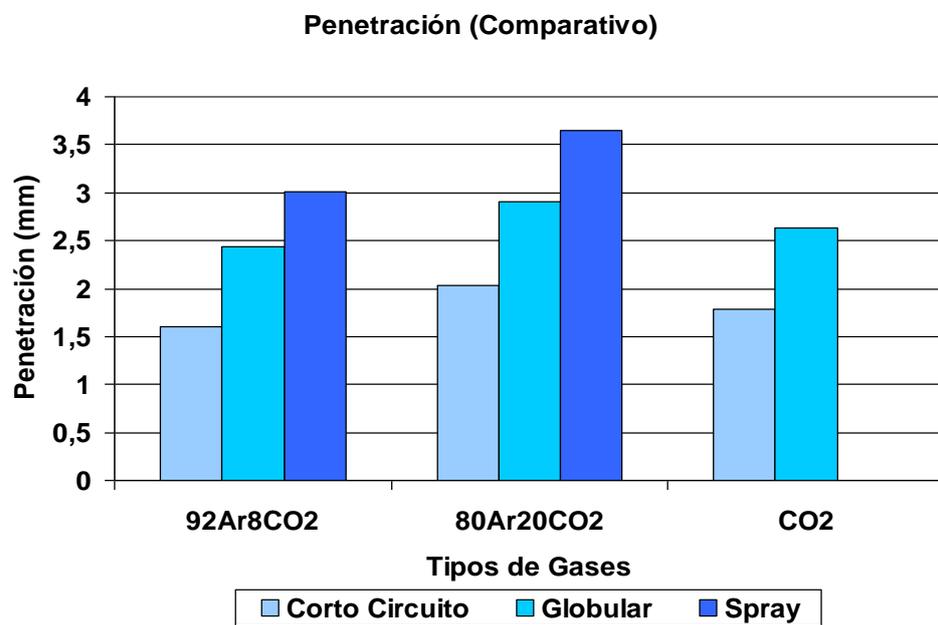


FIGURA 3.20: Gráfico comparativo de la Penetración con las diferentes mezclas de gases y procesos de transferencia.

A través de las Figuras 3.12 hasta 3.19, podemos apreciar la variación de penetración del material de aporte en el material base, siendo de manera creciente la siguiente: Corto Circuito, Globular y por último Spray. Estos resultados mantienen esta tendencia en la gráfica 3.20, cuyos datos están en la Tabla 5 donde el comportamiento de mayor penetración se da en la transferencia de tipo Spray. Pero, al analizar los tipos de mezclas de gases, estos resultados indican que se da mayor penetración en aquellos donde la mezcla ha sido 80%Ar +20%CO₂, cuyos valores están en el rango de 2.03 hasta 3.65 mm. Es importante denotar que todas las transferencias llevadas a cabo con este tipo de mezcla de gases es la que presenta los valores de penetración mayor.

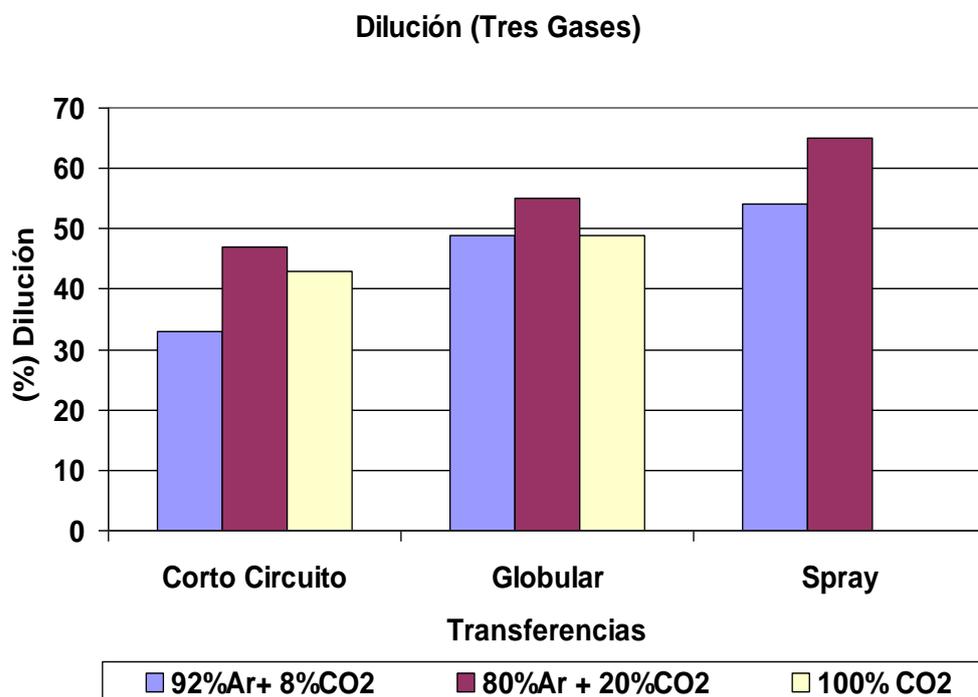


FIGURA 3.21: Gráfico comparativo de la Dilución con las diferentes mezclas de gases y procesos de transferencia.

En la Figura 3.21 muestra a través de barras el comportamiento favorable de la mezcla de gases 80% Ar+ 20% CO₂, debido a que sus valores obtenidos son los de mayor valor, dando una correspondencia a los resultados de penetración expuestos en la Figura 3.20, confirmando así la relación del % de Dilución con respecto a la penetración, como se indicó al inicio en la Sección 3.1. Estos datos lo pueden ubicar en la Tabla 5.

3.3 PROPIEDADES MECANICAS Y DUREZA

Las propiedades mecánicas que se analizaron de acuerdo a los procesos no precalificados para Corto Circuito, regidos por la Norma AWS D1.1, Capítulo 4 Sección 8 fueron las siguientes:

- *Resistencia a la tracción.*

Para el desarrollo de esta prueba se tomó como referencia la Norma AWS D1.1. Se trabajó con un acero ASTM A36, condiciones ambientales, con una velocidad de operación de 10 mm/min. Resultados expuestos en Tabla 6.

- *Ductilidad (doblado).*

Para el desarrollo de esta prueba se tomó como referencia la Norma AWS D1.1. Se trabajó con un acero ASTM A36, condiciones ambientales, con una velocidad de operación de 10 mm/min. Resultados expuestos en la Tabla 7.

La tabla 6 y 7 nos indican que las muestras con 100% CO₂ y 80% Ar + 20% CO₂ pasaron las pruebas con resultados considerables, pero la muestra con 92% Ar + 8% CO₂ fallaron, se rompieron las muestras durante el procedimiento ocasionado por el exceso de porosidad que presentaban.

Tabla 6
Ensayo de Tracción

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Area (mm ²)	Designación	Límite de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Localización de Rotura	Elongación (%)	
Corto Circuito	100% CO ₂	9,5	167,68	01-1G	473,28	591,61	Fuera de soldadura	26,38	
		9,45	167,74	02-1G	473,56	592,54	Fuera de soldadura	25,98	
	80% Ar+20%CO ₂	9,4	167,32	03-1G	506,76	608,35	Fuera de soldadura	27,15	
		9,28	163,88	04-1G	505,96	606,98	Fuera de soldadura	27,22	
	92% Ar+8%CO ₂	9,05	17,2	155,66	05-1G	Falló	Falló	Falló	Falló
		9,36	17,55	164,27	06-1G	Falló	Falló	Falló	Falló

o

Tabla 7
Ensayo de Doblado Lateral

Probeta	Designación	Áng. Doblado	Diám. Mandr.	Lateral	Lateral	Lateral	Lateral
Corto Circuito	100% CO ₂	01-1G	38 mm	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
		02-1G	38 mm	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
	80%Ar+20%CO ₂	03-1G	38 mm	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
		04-1G	38 mm	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
	92%Ar+8%CO ₂	05-1G	38 mm	Falló	Falló	Falló	Falló
		06-1G	38 mm	Falló	Falló	Falló	Falló

Dureza: Se define como su resistencia a la indentación permanente. Un material con buena dureza es resistente al desgaste y al rayado. Las muestras fueron sometidas a este tipo de pruebas, bajo recomendaciones de un proceso precalificado en la Norma AWS D1.1.

Procedimiento para el Ensayo de Dureza Rockwell:

1. Preparar la probeta, la cual consiste en dejar sus caras paralelas.
2. Preparar el equipo de Ensayo para dureza Rockwell, de acuerdo al material, siendo en este caso ASTM A36, cuyo rango de dureza debe estar en HRB, por lo que se requerirá el indentador 1/16" y una carga de 100 kg.
3. Colocar la probeta en la base para tomar sus lecturas respectivas, a distancias conocidas.
4. Realizar la lectura de datos.

Se aprecia en las siguientes figuras los resultados de dureza con sus respectivas distancias:

Transferencia en Corto Circuito

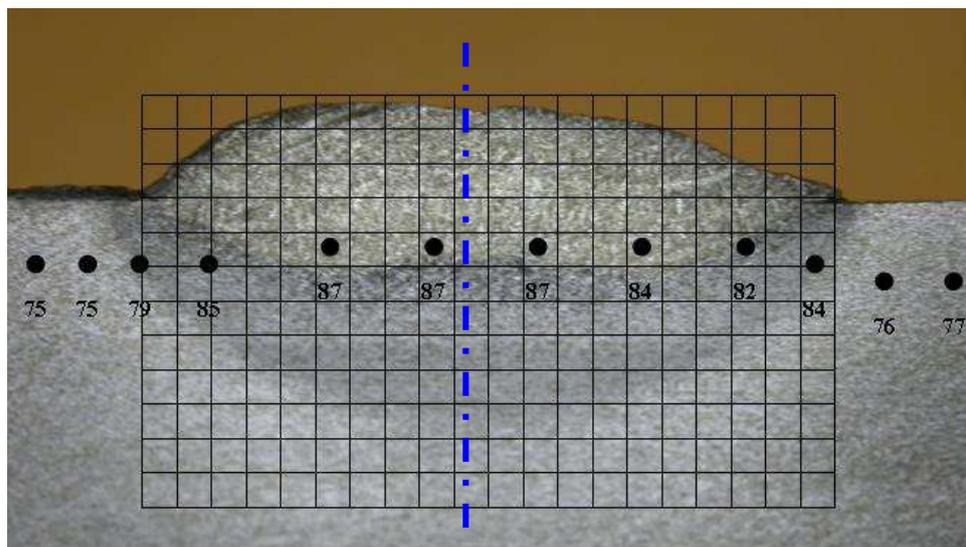


FIGURA 3.22: Método de Transferencia Corto Circuito con 100% CO₂

Tabla 8

Dureza: Corto Circuito 100% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-11,6	75
-10	79
-8	85
-4,7	87
-1,6	87
1,25	87
4,2	84
7,2	82
9,25	84
11,2	76

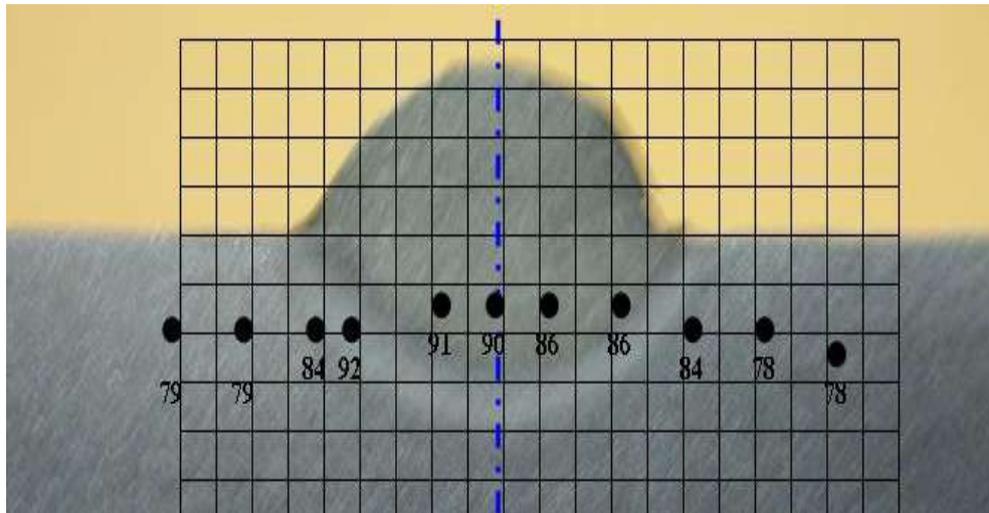


FIGURA 3.23: Método de Transferencia Corto Circuito con 80% Ar + 20% CO₂

Tabla 9

Dureza: Corto Circuito 80% Ar + 20% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-9,15	79
-7,15	79
-5,2	84
-4,2	92
-1,8	91
0	90
1,15	86
3,1	86
5,2	84
7,1	78
9,15	78

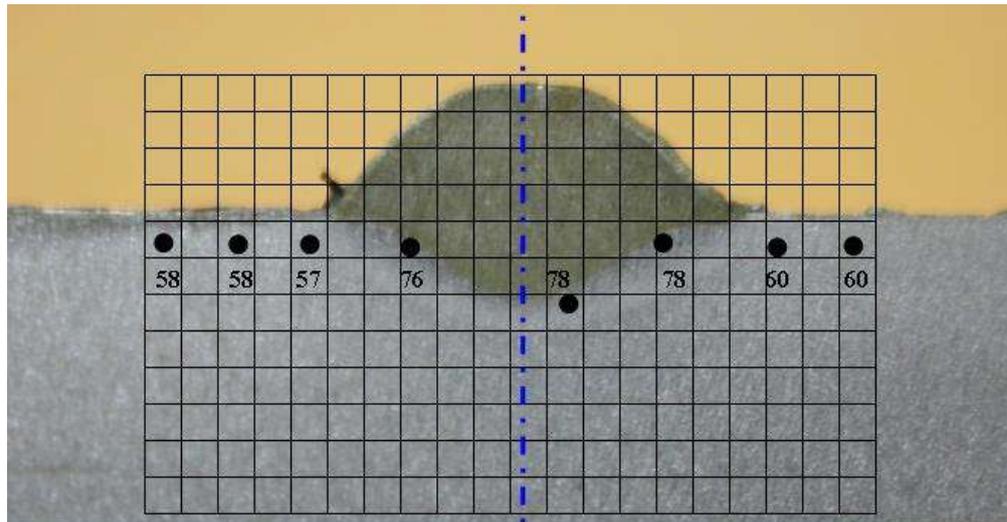


FIGURA 3.24: Método de Transferencia Corto Circuito con 92% Ar + 8% CO₂

Tabla 10

Dureza: Corto Circuito 92% Ar + 8% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-7,5	58
-5,5	57
-2,5	76
2,25	78
4	78
6,4	60

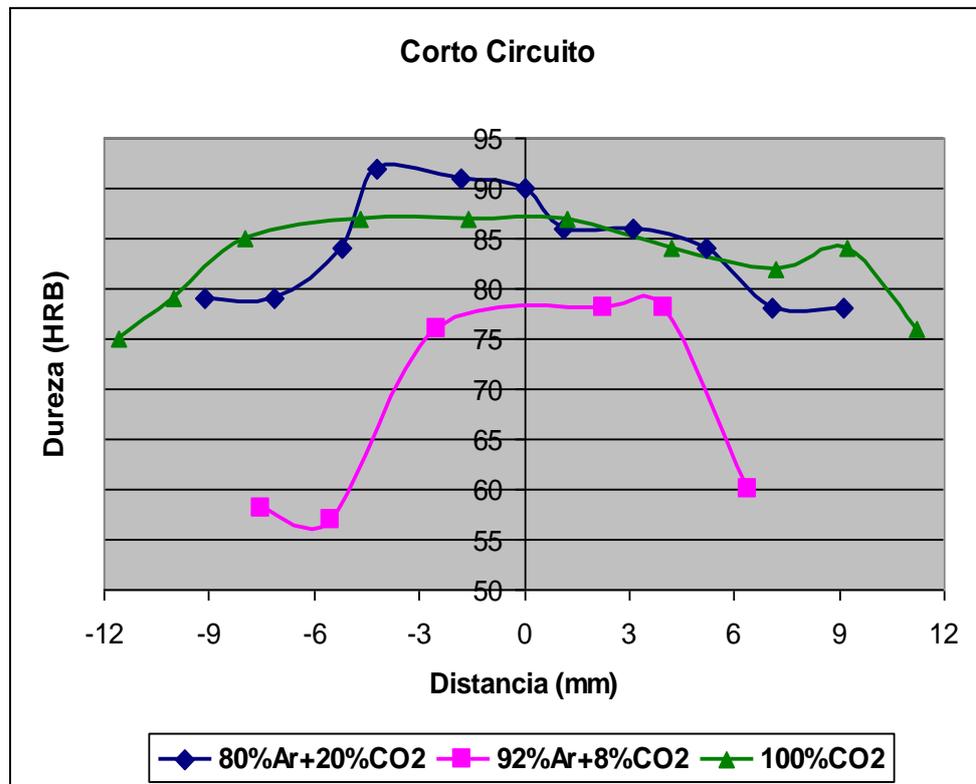


FIGURA 3.25: Gráfico comparativo de la Dureza en las diferentes mezclas de gases en el proceso de transferencia por Corto Circuito.

Mediante estas curvas expuestas en la Figura 3.25, tenemos un comportamiento más estable en la dureza a través de la mezcla 100% CO₂, presentando valores muy cercanos entre sí. Con respecto a la curva de mezcla de 92% Ar + 8% CO₂ estos valores se dispersan muchos, indicándonos que en el Material de Aporte es donde se encuentra mayor dureza que en las partes adyacentes. Por último tenemos la curva de mezcla 80% Ar + 20% CO₂,

presentando una variaciones altas y bajas donde se encuentra el Material de Aporte, las cuales deberían presentar valores semejantes y con pocas variaciones, por ser el mismo material.

Transferencia Globular

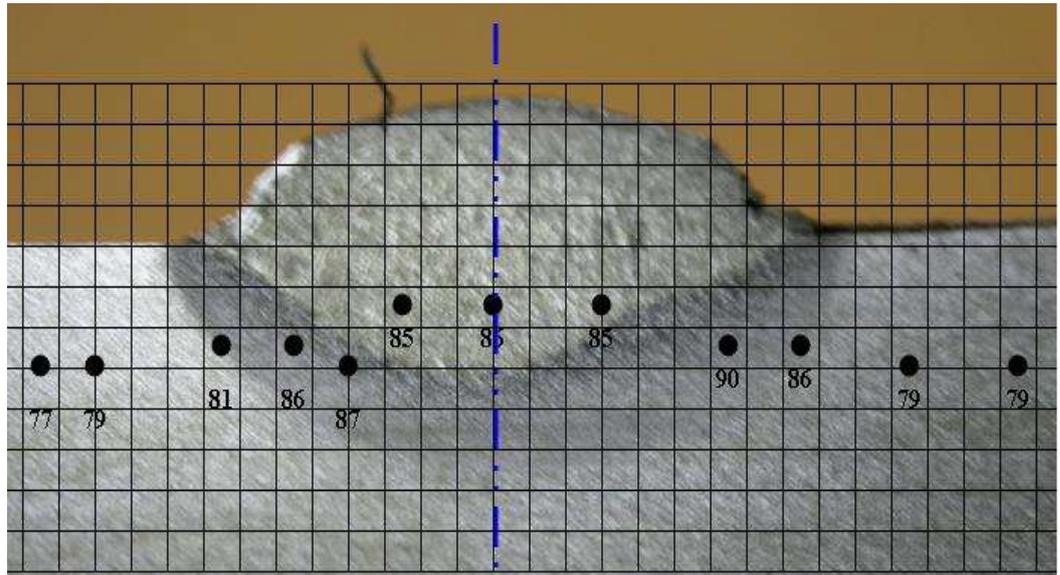


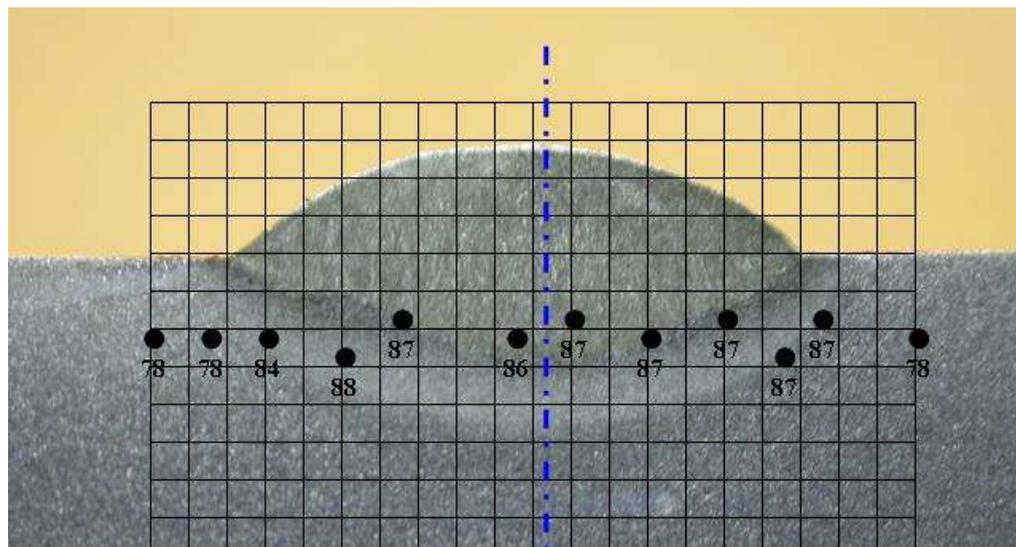
FIGURA 3.26: Método de Transferencia Globular con 100% CO₂

Tabla 11

Dureza: Globular 100% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-10	79
-7,5	81
-5,75	86
-4	87
-2,6	85

0	86
3	85
6	90
7,8	86
11	79



**FIGURA 3.27: Método de Transferencia Globular con 80% Ar +
20% CO₂**

Tabla 12

Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-10,8	78
-9,15	78
-7,9	84
-5,9	88
-4,15	87

-1,25	86
0	87
2	87
4,15	87
5,2	87
6,9	87
7,9	87
9,1	78

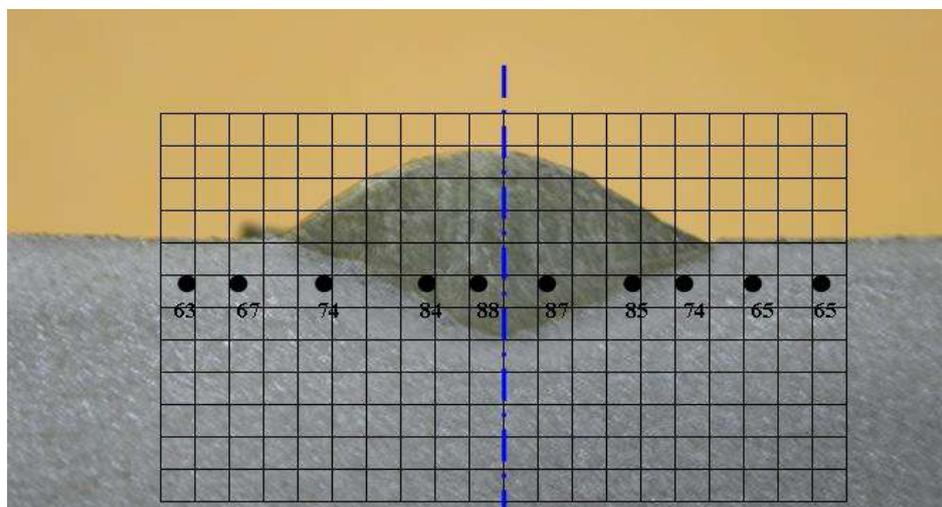


FIGURA 3.28: Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO₂

Tabla 13

Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-9,2	67
-7,8	67
-5,15	74
-2,2	84
-0,8	88

1,2	87
3,85	85
5,15	74
7,1	65
9,1	65

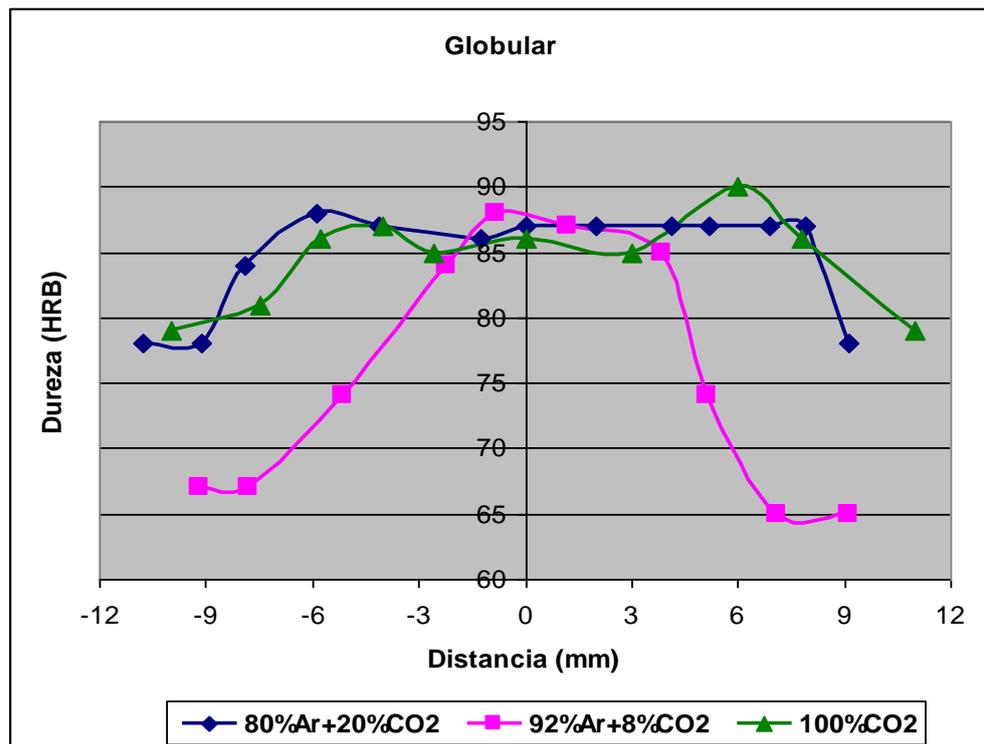


FIGURA 3.29: Gráfico comparativo de la Dureza en las diferentes mezclas de gases en el proceso de transferencia Globular.

En la figura 3.29 presenta en la curva de 80% Ar +20% CO₂ más estabilidad de dureza en las diferentes zonas del cordón del soldadura, incluso superando al del material base, a esta combinación de gases le sigue el de 100% CO₂, y por último el 92%

Ar + 8% CO₂, cuyos valores de dureza son más distantes en la Zona de Material de Aporte con respecto al resto de las zonas.

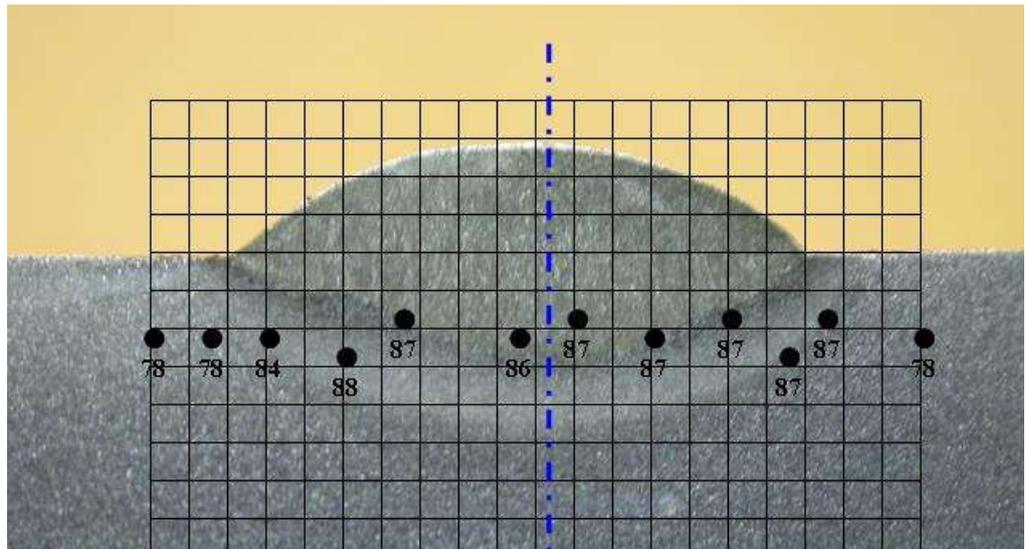


FIGURA 3.30: Método de Transferencia Globular con 80% Ar + 20% CO₂

Tabla 14

Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-9	74
-7,1	76
-6,8	79
-5	79
-3,9	76
-1,6	76
0	76
1,1	76

2,8	76
4,1	78
5,9	79
7,1	76
8,15	74

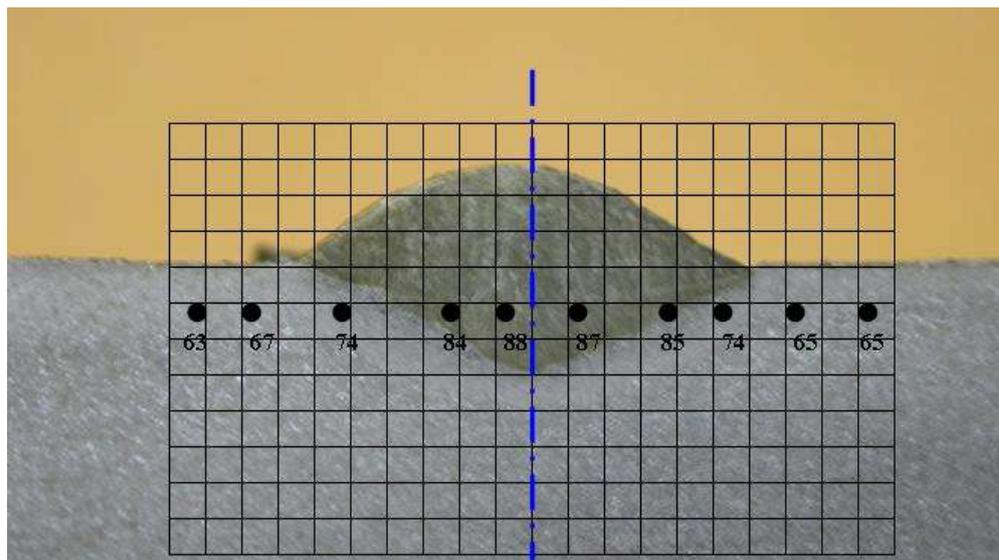


FIGURA 3.31: Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO₂

Tabla 15

Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO₂

Distancia (mm)	Dureza (RHB)
-9	65
-7,9	64
-6,85	64
-5,2	70
-3,15	80

-1,2	83
0,2	85
1,8	85
3,2	84
5,2	73
6,8	66
8,2	65

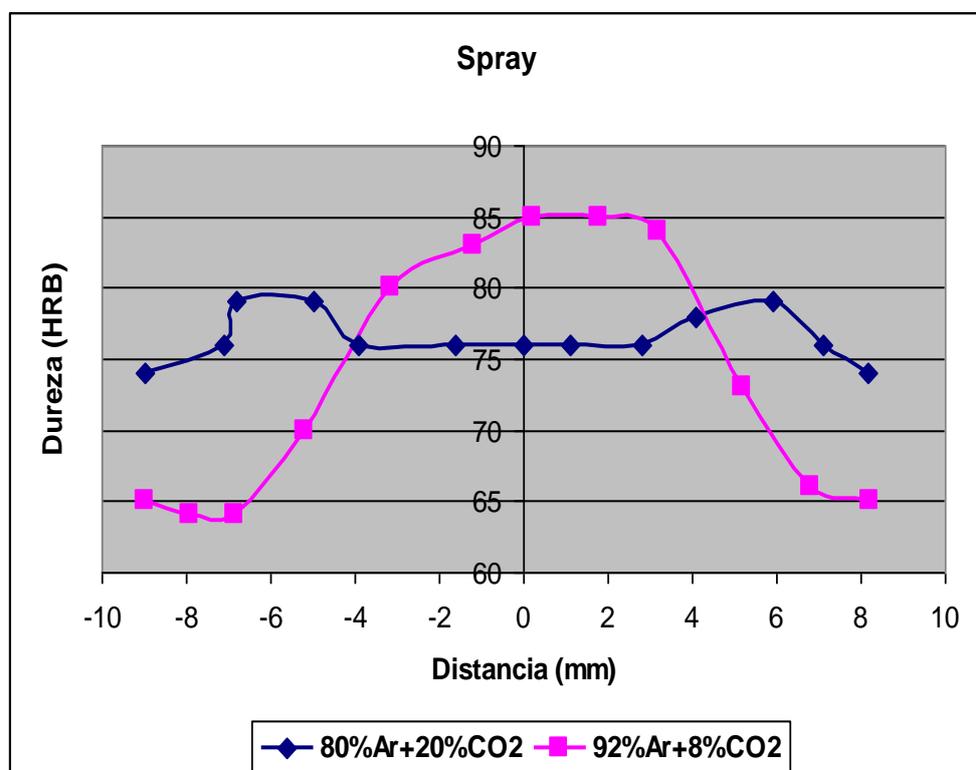


FIGURA 3.32: Gráfico comparativo de la Dureza en las diferentes mezclas de gases en el proceso de transferencia Spray.

En la Figura 3.32, la curva de 80% Ar +20% CO₂, no tiene un comportamiento favorable de la dureza en el cordón, debido a que sus resultados indican una caída de esta en la Zona de Material de

Aporte, donde al menos debe presentar características semejantes, indicando con ellos defectos en esta mezcla de gas. En cambio en la mezcla 92% Ar + 8% CO₂, su dureza tiende a ser mayor en la Zona de Material Aporte mejorando la del Material Base, sin embargo existe el riesgo de la presencia de fragilidad en esta parte del cordón de soldadura, propiedad que no es la deseada durante un proceso de soldadura.

3.4 CALIDAD DE LAS SOLDADURAS CON ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Inspección visual

Para realizar el estudio de Inspección visual nos basaremos como referencia en la Norma AWS D1.1, Capítulo 6 referente a Inspección, Parte C: Criterio de Aceptación, de la Sección 6.9, donde nos indica que toda soldadura debe ser inspeccionada visualmente y debe presentar criterio de aceptabilidad si cumple con la Tabla 6.1 (Apéndice I).

El desarrollo de inspección visual se realiza desde la preparación del material base, durante el desarrollo del proceso de soldadura hasta obtener finalmente el acabado del cordón de soldadura, el cual

pasará a realizarse medidas del mismo con una Regla en unidades de milímetros, y un Medidor Bridgecam de Marca Gage.

Es importante indicar que los resultados en las diferentes probetas no mostraron defectos por Socavación, ni exceso de reforzamiento, cumpliendo así lo estipulado por la Norma AWS D1.1, según la Tabla 6.1 indicado anteriormente.

Rayos X

Según la Norma AWS D1.1 se establece que durante el proceso de GMAW en Corto Circuito se debe hacer pruebas de Ensayos No Destructivos para ver la calidad del cordón de soldadura, debido a que no se encuentra como un Proceso Pre-Calificado, en su Capítulo 3, Sección 3.2. Por lo tanto, a continuación analizaremos sus radiografías.

Para la preparación de las radiografías de los cordones de soldadura, se debe:

1. Colocar las probetas en el Equipo ERESKO ES2,
2. Operar con una radiación de 2 mA x 5 minutos.
3. Realizar el análisis de los cordones a través de las radiografías.



FIGURA 3.33: Radiografía de la Muestra con 100% CO₂



FIGURA 3.34: Radiografía de la Muestra con 80% Ar +20% CO₂



FIGURA 3.35: Radiografía de la Muestra con 92% Ar +8% CO₂

De manera general, las radiografías presentaron en los cordones de soldadura Porosidad, siendo el orden de menor presencia de la misma el siguiente: 100% CO₂, 80% Ar + 20% CO₂, y por último de mayor contenido de la misma 92% Ar + 8% CO₂, confirmando con estos resultados los fallos conseguidos en las pruebas de Tracción y

Doblado. Estos defectos de porosidad tienen su origen debido a diferentes factores operativos o climáticos, los cuales no permitieron una fluidez eficiente durante el proceso de soldadura.

3.5 ANALISIS DE COSTOS

Para la realización del análisis de Costo nos basaremos en el Software perteneciente a la Compañía INDURA, el cual me indica Consumibles, Tiempo y Mano de Obra, parámetros analizados en la Sección 1.6 de esta tesis.

A continuación se presenta los resultados obtenidos una vez ejecutado el programa de costos:

Transferencia en Corto Circuito:



FIGURA 3.36: Cálculo de Costos de Soldadura 100% CO₂ (Corto Circuito)

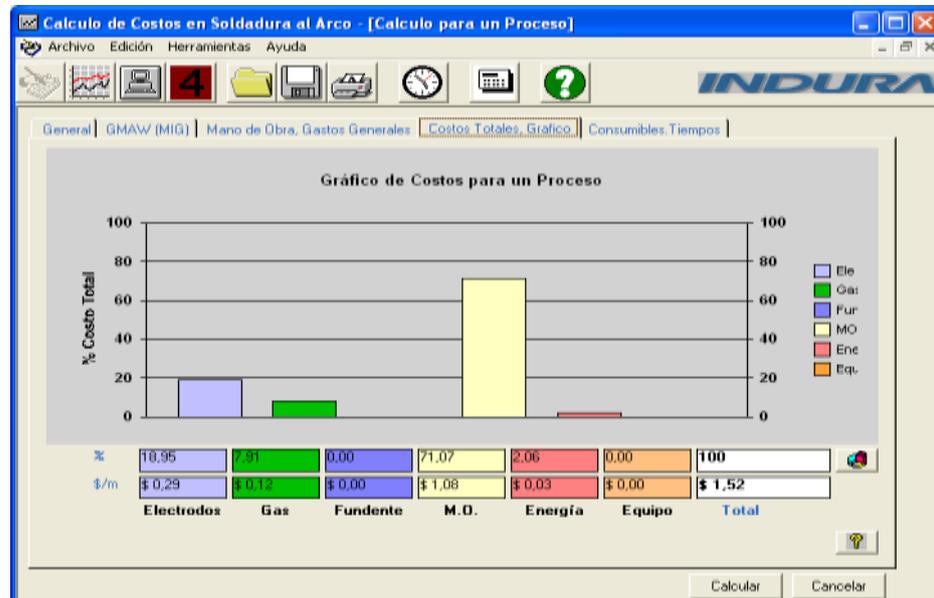


FIGURA 3.37: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO₂ (Corto Circuito)

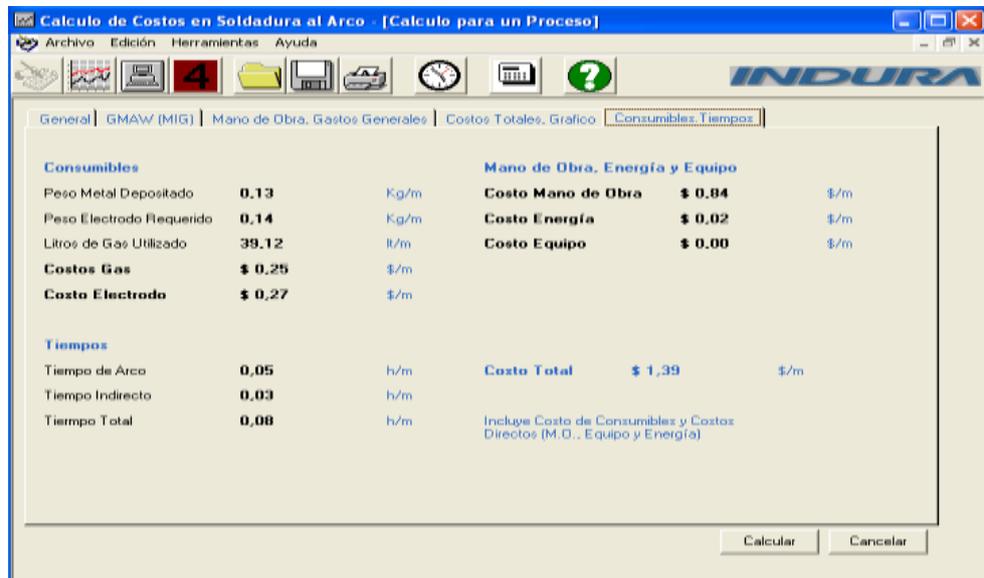


FIGURA 3.38: Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO₂ (Corto Circuito)

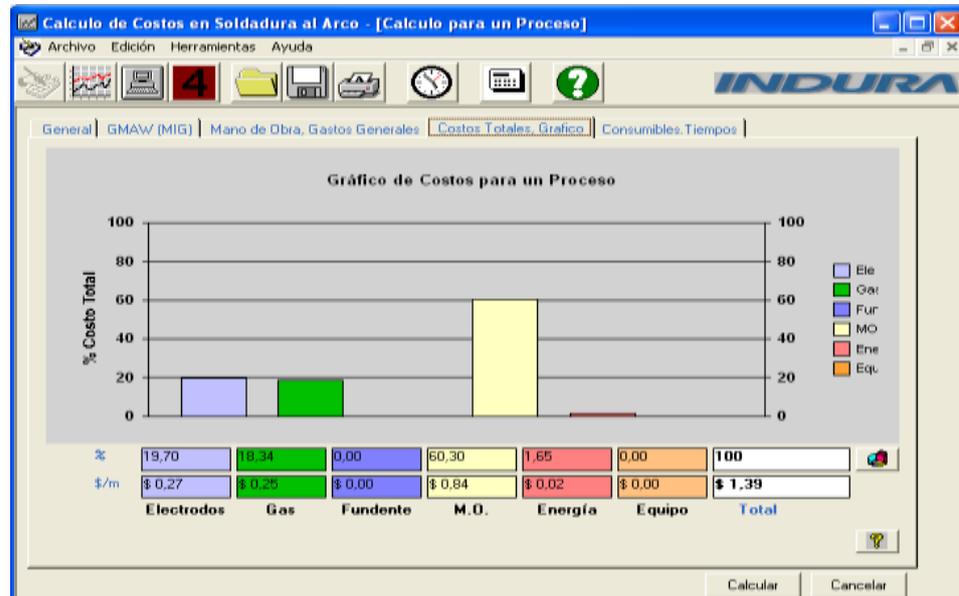


FIGURA 3.39: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO₂ (Corto Circuito)



FIGURA 3.40: Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO₂ (Corto Circuito)

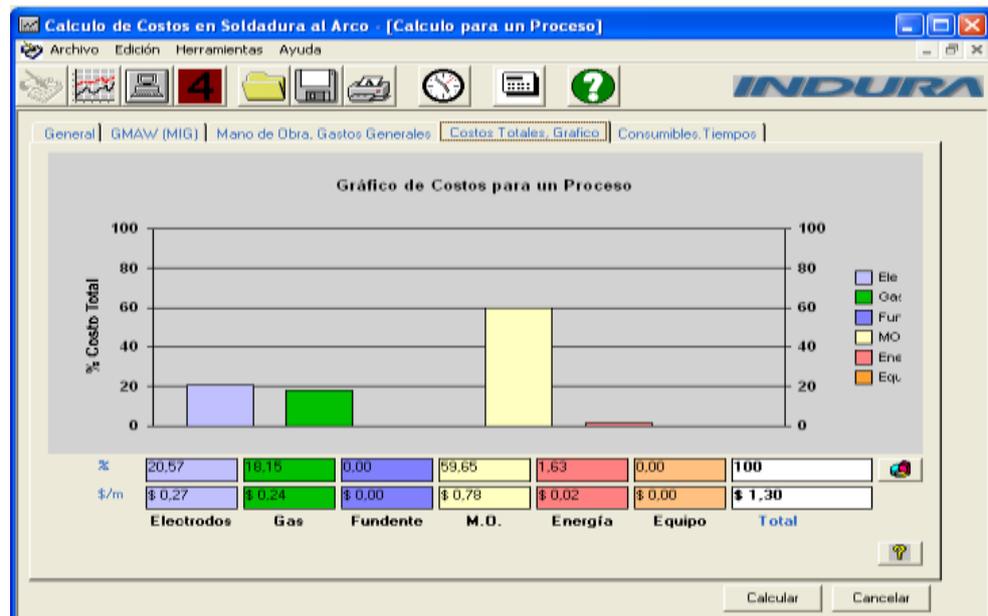


FIGURA 3.41: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO₂ (Corto Circuito)

Transferencia Globular:



FIGURA 3.42: Cálculo de Costos de Soldadura 100% CO₂ (Globular)

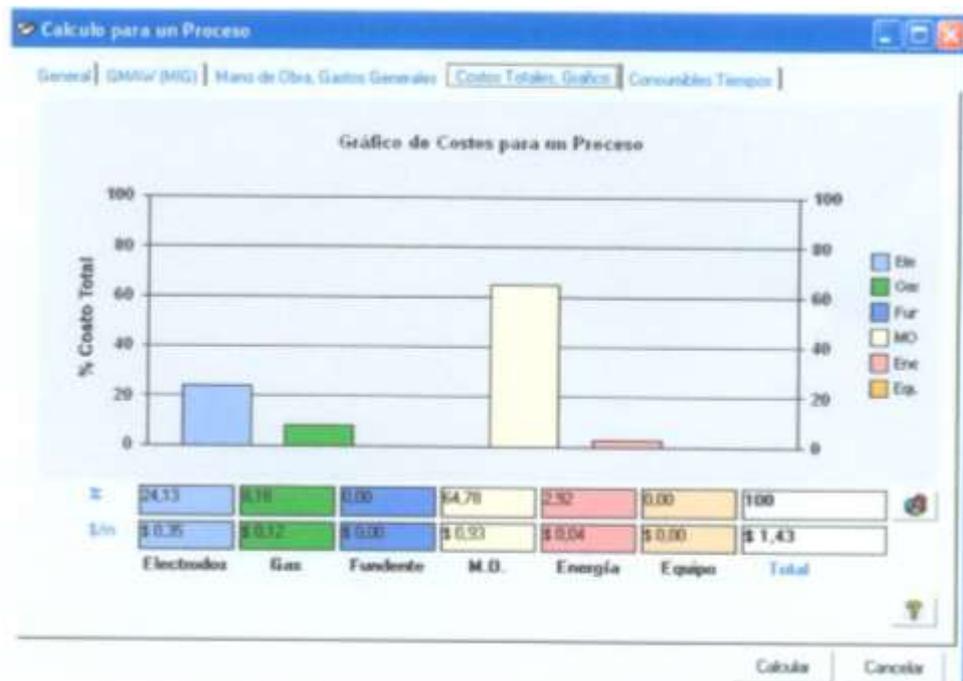


FIGURA 3.43: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO₂ (Globular)



FIGURA 3.44: Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO₂ (Globular)

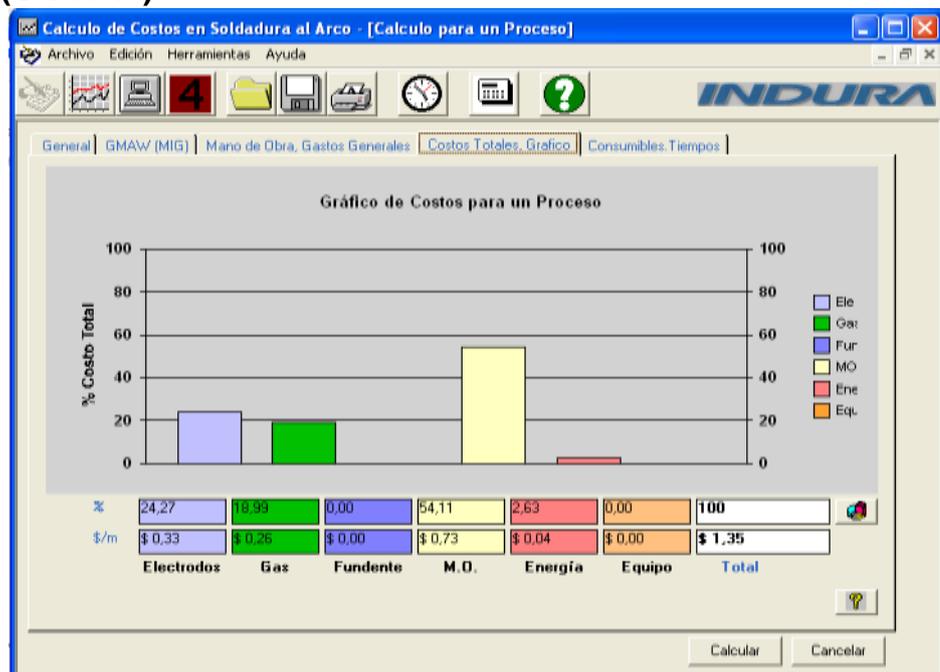


FIGURA 3.45: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO₂ (Globular)



FIGURA 3.46: Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO₂ (Globular)

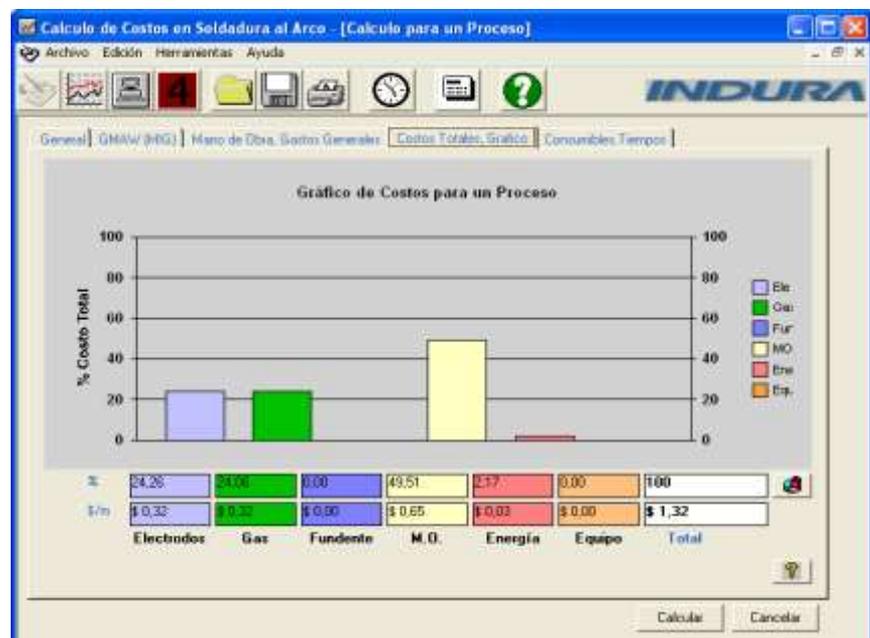


FIGURA 3.47: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO₂ (Globular)

Transferencia Spray:



FIGURA 3.48: Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO₂ (Spray)



FIGURA 3.49: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO₂ (Spray)

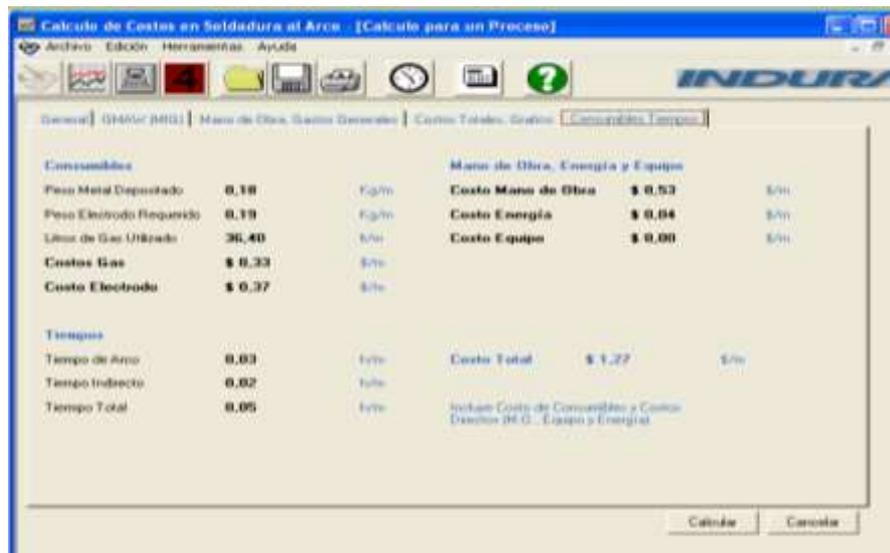


FIGURA 3.50: Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO₂ (Spray)

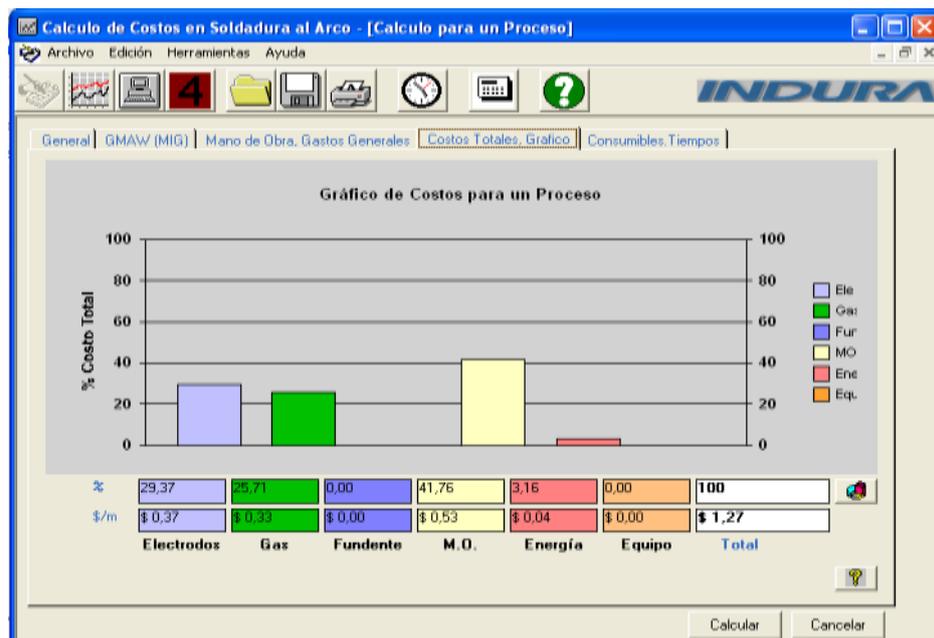


FIGURA 3.51: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO₂ (Spray)

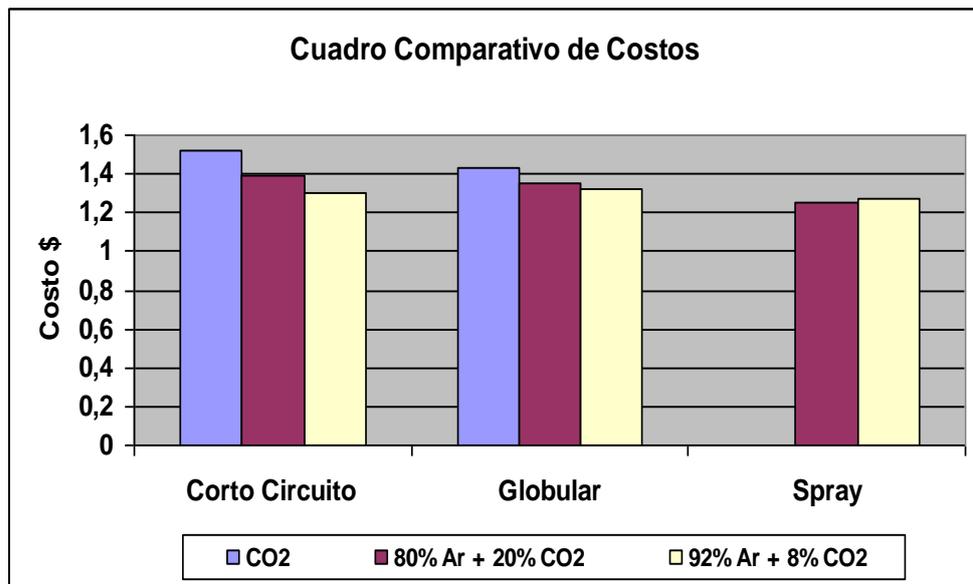


FIGURA 3.52: Cuadro Comparativo de Costos.

En el cuadro de la Figura 3.52 apreciamos que el Método de Transferencia Spray resulta ser el proceso más económico a nivel industrial, resultados que son corroborados por las diferentes pruebas analizadas anteriormente.

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. La mezcla de gases 80% Ar + 20% CO₂, es la más adecuada en los diferentes tipos de Transferencia de metal de aporte analizados en el desarrollo de esta tesis.
2. Las soldaduras realizadas por la técnica de transferencia Corto Circuito con los tres gases son confiables. Por su elevada velocidad de soldadura y valores bajos de energía, la mezcla de gases 92% Ar + 8% CO₂, debe ser controlada estrictamente.
3. Por las elevadas velocidades de soldadura el costo por metro de soldadura es menor con mezclas de gases Ar + CO₂, a pesar de que el precio de éstas mezclas es más alto que el CO₂.

Recomendaciones:

1. Se recomienda realizar una adecuada calificación de procedimientos de soldadura y soldadores para la técnica Transferencia por Corto Circuito, ya que es la técnica de mayor uso a nivel industrial.
2. Para la automatización del proceso GMAW, se recomienda el empleo de la técnica de Transferencia Spray, por sus excelentes propiedades mecánicas, soldabilidad y bajos costos de producción.
3. Para aplicar la técnica de Transferencia Spray se recomienda usar mezclas de gases con porcentajes de Argón mayores como por ejemplo 92% Ar + 8% CO₂, para obtener mayores velocidades de soldadura.

APÉNDICES



CIB-ESPOL

APÉNDICE A:

NORMA AWS D1.1

**TABLA 3.1: REQUERIMIENTOS DEL MATERIAL BASE
Y MATERIAL DE APORTE.**

**Table 3.1
Prequalified Base Metal—Filler Metal Combinations for Matching Strength (see 3.3)**

Group	Steel Specification Requirements				Filler Metal Requirements					
	Steel Specification	Minimum Yield Point/Strength		Tensile Range	Process	AWS Electrode Specification	Electrode Classification			
		ksi	MPa					ksi	MPa	
I	ASTM A 36	($\leq 3/4$ in. [20 mm])	36	250	58-80	400-550	SMAW	A5.1	E60XX, E70XX	
	ASTM A 53	Grade B	35	240	60 min	415 min		A5.5 ³	E70XX-X	
	ASTM A 106	Grade B	35	240	60 min	415 min				
	ASTM A 131	Grades A, B, CS, D, DS, E	34	235	58-71	400-490				
	ASTM A 139	Grade B	35	241	60 min	414 min		A5.17	F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX	
	ASTM A 381	Grade Y35	35	240	60 min	415 min				
	ASTM A 500	Grade A	33	228	45 min	310 min				
		Grade B	42	290	58 min	400 min				
	ASTM A 501		36	250	58 min	400 min		A5.23 ³	F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	
	ASTM A 516	Grade 55	30	205	55-75	380-515				
		Grade 60	32	220	60-80	415-550				
	ASTM A 524	Grade I	35	240	60-85	415-586		GMAW	A5.18	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodes with the -GS suffix shall be excluded)
		Grade II	30	205	55-80	380-550				
	*									
	ASTM A 570	Grade 30	30	205	49 min	340 min			A5.28 ³	ER70S-XXX, E70C-XXX
	Grade 33	33	230	52 min	360 min					
	Grade 36	36	250	53 min	365 min					
	Grade 40	40	275	55 min	380 min					
	Grade 45	45	310	60 min	415 min					
ASTM A 573	Grade 65	35	240	65-77	450-530			A5.20	E6XT-X, E6XT-XM, E7XT-X, E7XT-XM (Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix shall be excluded and electrodes with the -11 suffix shall be excluded for thicknesses greater than 1/2 in. [12 mm])	
	Grade 58	32	220	58-71	400-490					
ASTM A 709	Grade 36 ($\leq 3/4$ in. [20 mm])	36	250	58-80	400-550					
API 5L	Grade B	35	240	60	415					
	Grade X42	42	290	60	415					
ABS	Grades A, B, D, CS, DS			58-71	400-490			A5.29 ³	E6XTX-X, E6XT-XM, E7XTX-X, E7XTX-XM	
	Grade E ²			58-71	400-490					

*ASTM A 529 (min. yield 42 ksi) has been deleted.

(continued)

Table 3.1 (Continued)

G I O U P	Steel Specification Requirements				Filler Metal Requirements																														
	Steel Specification	Minimum Yield Point/Strength		Tensile Range	AWS Electrode Specification	Electrode Classification	Process																												
		ksi	MPa	ksi				MPa																											
I	ASTM A 36	(≥3/4 in. [20 mm])	36	250	58-80	400-550	SMAW	E7015, E7016, E7018, E7028																											
	ASTM A 131	Grades AH32, DH32, EH32	51	315	68-85	470-585			A5.1	E7015-X, E7016-X, E7018-X																									
	ASTM A 441	Grades AH36, DH36, EH36	40-50	275-345	60-70	415-485					A5.5 ³	F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX																							
	ASTM A 516	Grade 65	35	240	65-85	450-585							A5.17	F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX																					
	ASTM A 529	Grade 70	38	260	70-90	485-620									A5.23 ³	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodes with the -GS suffix shall be excluded)																			
	ASTM A 537	Grade 50	50	345	70-100	485-690											A5.18	ER70S-XXX, E70C-XXX																	
	ASTM A 570	Grade 55	55	380	70-100	485-690													A5.20	(Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix shall be excluded and electrodes with the -11 suffix shall be excluded for thicknesses greater than 1/2 in. [12 mm])															
	ASTM A 572	Grade 50	45-50	310-345	65-90	450-620															E7XT-X, E7XT-XM	E7XT-X, E7XT-XM (Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix shall be excluded and electrodes with the -11 suffix shall be excluded for thicknesses greater than 1/2 in. [12 mm])													
	ASTM A 588 ⁵	Grade 55	50	345	65	450																	A5.29 ³	E7XTX-X, E7XTX-XM											
	ASTM A 595	Grade A	50	345	65	450																			E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM									
	ASTM A 606 ⁵	Grades B and C	50	345	65	450																					E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM							
	ASTM A 607	Grade 45	45-50	310-340	65	450																							E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM					
	II	ASTM A 618	Grade 50	45	310	60																									410	GMAW	ER70S-XXX, E70C-XXX		
		ASTM A 633	Grade 55	50	345	65																									450			A5.28 ³	ER70S-XXX, E70C-XXX
		ASTM A 709	Grades B, II, III	46-50	315-345	65																									450				
Grades C, D			42	290	63-83	430-570	E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																											
(2-1/2 in. [65 mm] and under)			50	345	70-90	485-620			E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																									
Grade 36 (≥3/4 in. [20 mm])			36	250	58-80	400-550					E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																							
Grade 50			50	345	65	450							E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																					
Grade 50W			50	345	70	485									E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																			
Grade A, Class 2 > 2 in. [50 mm]			55	380	65	450											E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																	
(2-1/2 in. [65 mm] and under)			42	290	60	415													E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM															
Grade 50			50	345	65	450															E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM													
Grade 42			50-65	345-450	65	450																	E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM											
Grade 50			42	290	62-80	430-550																			E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM									
Grade 42			50	345	70	485																					E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM							
Grade 50			42-67	290-462	62	427																							E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM					
Grade 50T	50-75		345-517	65	448	E7XTX-X, E7XTX-XM																									E7XTX-X, E7XTX-XM				
Grade 42	50-80		345-552	70	483																											E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM		
Grade 50	42-67	290-462	62	427	E7XTX-X, E7XTX-XM																													E7XTX-X, E7XTX-XM	
Grade 50T	50-75	345-517	65	448			E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																											
Grade X52	50-80	345-552	70	483					E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																									
Grades AH32, DH32, EH32	52	360	66-72	455-495							E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																							
Grades AH36, DH36, EH36 ⁶	45.5	315	71-90	490-620									E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																					
	51	350	71-90	490-620											E7XTX-X, E7XTX-XM	E7XTX-X, E7XTX-XM																			

(continued)

Table 3.1 (Continued)

Group	Steel Specification Requirements				Filler Metal Requirements		
	Steel Specification	Minimum Yield Point/Strength		Tensile Range	Process	AWS Electrode Specification	Electrode Classification
		ksi	MPa	ksi			
I	API 2W	Grade 60	60-90	414-621	75 min	517 min	E8015-X, E8016-X, E8018-X
	API 2Y	Grade 60	60-90	414-621	75 min	517 min	F8XX-EXXX-XX, F8XX-ECXXX-XX
	ASTM A 572	Grade 60	60	415	75 min	515 min	
		Grade 65	65	450	80 min	550 min	
	ASTM A 537	Class 2 ²	46-60	315-415	80-100	550-690	ER80S-XXX, E80C-XXX
	ASTM A 633	Grade E ²	55-60	380-415	75-100	515-690	
	ASTM A 710	Grade A, Class 2 ≤ 2 in. [50 mm]	60-65	415-450	72 min	495 min	E8XTX-X, E8XTX-XM
III	ASTM A 710	Grade A, Class 3 > 2 in. [50 mm]	60-65	415-450	70 min	485 min	
	ASTM A 913 ¹	Grade 60	60	415	75 min	520 min	
	Grade 65	65	450	80 min	550 min		
IV	ASTM A 709	Grade 70W	70	485	90-110	620-760	E9015-X, E9016-X, E9018-X, E9018-M
	ASTM A 852		70	485	90-110	620-760	F9XX-EXXX-XX, F9XX-ECXXX-XX
							ER90S-XXX, E90C-XXX
						E9XTX-X, E9XTX-XM	



General Notes:

- In joints involving base metals of different groups, either of the following filler metals may be used: (1) that which matches the higher strength base metal, or (2) that which matches the lower strength base metal and produces a low-hydrogen deposit. Preheating shall be in conformance with the requirements applicable to the higher strength group.
- Match API standard 2B (fabricated tubes) according to steel used.
- When welds are to be stress-relieved, the deposited weld metal shall not exceed 0.05 percent vanadium.
- See Tables 2.3 and 2.5 for allowable stress requirements for matching filler metal.
- Filler metal properties have been moved to nonmandatory Annex O.
- AWS ASM (SI Units) electrodes of the same classification may be used in lieu of the AWS A5 (U.S. Customary Units) electrode classification.
- Any of the electrode classifications for a particular Group (located on the right) may be used to weld any of the base metals in that Group (located on the left).

Notes:

1. The heat input limitations of 5.7 shall not apply to ASTM A 913 Grade 60 or 65.
2. Special welding materials and WPS (e.g., E80XX-X low-alloy electrodes) may be required to match the notch toughness of base metal (for applications involving impact loading or low temperature), or for atmospheric corrosion and weathering characteristics (see 3.7.3).
3. Filler metals of alloy group B3, B3L, B4, B4L, B5, B5L, B6, B6L, B7, B7L, B8, B8L, B9, or any BXH grade in AWS A5.5, A5.23, A5.28, or A5.29 are not prequalified for use in the as-welded condition.

APÉNDICE B:
NORMA AWS D1.1

**TABLA 3.2: TEMPERATURAS MÍNIMA DE PRE-
CALENTAMIENTO**

Table 3.2
 Prequalified Minimum Preheat and Interpass Temperature (see 3.5)

C a t e g o r y	Steel Specification		Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature		
	in.	mm		in.	mm	°F	°C	
A	ASTM A 36	≤3/4 in. [20 mm]	ASTM A 516	Grades I & II	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	321	0 ¹
	ASTM A 53	Grade B	ASTM A 524		Over 3/4	Over 20	150	65
	ASTM A 106	Grade B	ASTM A 570*	All grades	thru 1-1/2 incl.	thru 38 incl.		
	ASTM A 131	Grades A, B, CS, D, DS, E	ASTM A 573	Grade 65	Over 1-1/2	Over 38	225	110
	ASTM A 139	Grade B	ASTM A 709	Grade 36 (≤3/4 in. [20 mm])	thru 2-1/2 incl.	thru 65 incl.		
	ASTM A 381	Grade Y35	API 5L	Grade B				
	ASTM A 500	Grade A		Grade X42				
	ASTM A 501	Grade B	ABS	Grades A, B, D, CS, DS	Over 2-1/2	Over 65	300	150
	ASTM A 36	(≥3/4 in. [20 mm])	ASTM A 570	All grades				
	ASTM A 53	Grade B	ASTM A 572	Grades 42, 50, 55				
ASTM A 106	Grade B	ASTM A 573	Grade 65	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	321	0 ¹	
ASTM A 131	Grades A, B, CS, D, DS, E	ASTM A 588	Grades A, B, C					
	AH 32 & 36	ASTM A 595	ASTM A 606	Grades 45, 50, 55				
	DH 32 & 36	ASTM A 607	ASTM A 607	Grades 42, 50, 50T				
	EH 32 & 36	ASTM A 618	ASTM A 618	Grades 42, 50, 50T				
ASTM A 139	Grade B	ASTM A 633	Grades A, B	Over 3/4	Over 20 thru	50	10	
			Grades C, D	thru 1-1/2 incl.	38 incl.			
ASTM A 381	Grade Y35	ASTM A 709	Grades 36 (≥3/4 in. [20 mm]), 50, 50W					
		ASTM A 710	Grade A, Class 2 (≥2 in. [50 mm])					
		ASTM A 808	SMAW with low-hydrogen electrodes,					
		ASTM A 913 ⁴	SAW, GMAW,					
		ASTM A 992	FCAW					
B	ASTM A 441	Grade A	API 5L	Grade B	Over 2-1/2	Over 65	225	110
	ASTM A 500	Grade B	API Spec. 2H	Grade X42				
			API 2W	Grades 42, 50	Over 1-1/2	Over 38 thru		
			API 2Y	Grades 42, 50, 50T				
			ABS	Grades 42, 50, 50T	thru 2-1/2 incl.	65 incl.	150	65
	ASTM A 501	Grades 55 & 60		Grades AH 32 & 36				
	ASTM A 516	65 & 70		DH 32 & 36				
				EH 32 & 36				
	ASTM A 524	Grades I & II	ABS	Grades A, B, D,				
	ASTM A 529	Grades 50 & 55		CS, DS	Over 2-1/2	Over 65	225	110
ASTM A 537	Classes 1 & 2		Grade B					

*ASTM A 529 has been deleted from Category A.

(continued)

Table 3.2 (Continued)

Category	Steel Specification	Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature	
			in.	mm	°F	°C
C	ASTM A 572	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, GTAW	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	50	10
	ASTM A 633					
	API 5L					
	ASTM A 913 ²					
	ASTM A 710					
	ASTM A 710					
	ASTM A 709 ³					
	ASTM A 852 ³					
	API 2W					
	API 2Y					
D	ASTM A 710 (All classes)	SMAW, SAW, GMAW, and FCAW with electrodes or electrode-flux combinations capable of depositing weld metal with a maximum diffusible hydrogen content of 8 ml/100 g (H ₁₈), when tested according to AWS A4.3.	Over 2-1/2	Over 65	300	150
	ASTM A 913 ²	Grades 50, 60, 65	All thicknesses ≥ 1/8 in. [3 mm]		32 ¹	0 ¹

General Notes:

- For modification of preheat requirements for SAW with parallel or multiple electrodes, see 3.5.3.
- See 5.12.2 and 5.6 for ambient and base-metal temperature requirements.

Notes:

1. When the base metal temperature is below 32°F [0°C], the base metal shall be preheated to a minimum of 70°F [20°C] and the minimum interpass temperature shall be maintained during welding.
2. The heat input limitations of 5.7 shall not apply to ASTM A 913.
3. For ASTM A 709 Grade 70W and ASTM A 852 Grade 70, the maximum preheat and interpass temperatures shall not exceed 400°F [200°C] for thicknesses up to 1-1/2 in. [40 mm], inclusive, and 450°F [230°C] for greater thicknesses.



APÉNDICE C:

NORMA AWS D1.1

TABLA 3.7: REQUERIMIENTOS WPS

Table 3.7
Prequalified WPS Requirements⁶ (see 3.7)

Variable	Position	Weld Type	SMAW	SAW ⁴			GMAW/ FCAW ⁷
				Single	Parallel	Multiple	
Maximum Electrode Diameter	Flat	Fillet ¹	5/16 in. [8.0 mm]	1/4 in. [6.4 mm]			1/8 in. [3.2 mm]
		Groove ¹	1/4 in. [6.4 mm]				
		Root pass	3/16 in. [4.8 mm]				
	Horizontal	Fillet	1/4 in. [6.4 mm]	1/4 in. [6.4 mm]			1/8 in. [3.2 mm]
		Groove	3/16 in. [4.8 mm]	Requires WPS Qualification Test			
	Vertical	All	3/16 in. [4.8 mm] ²				3/32 in. [2.4 mm]
Overhead	All	3/16 in. [4.8 mm] ²	5/64 in. [2.0 mm]				
Maximum Current	All	Fillet	Within the range of recommended operation by the filler metal manufacturer	1000 A	1200A	Unlimited	Within the range of recommended operation by the filler metal manufacturer
	All	Groove weld root pass with opening		600A	700A		
		Groove weld root pass without opening			900A		
		Groove weld fill passes			1200A		
		Groove weld cap pass			Unlimited		
Maximum Root Pass Thickness ⁴	Flat	All	3/8 in. [10 mm]	Unlimited			3/8 in. [10 mm]
Horizontal	5/16 in. [8 mm]		5/16 in. [8 mm]				
Vertical	1/2 in. [12 mm]					1/2 in. [12 mm]	
Overhead	5/16 in. [8 mm]					5/16 in. [8 mm]	
Maximum Fill Pass Thickness	All	All	3/16 in. [5 mm]	1/4 in. [6 mm]	Unlimited		1/4 in. [6 mm]
Maximum Single Pass Fillet Weld Size ³	Flat	Fillet	3/8 in. [10 mm]	Unlimited			1/2 in. [12 mm]
	Horizontal		5/16 in. [8 mm]	5/16 in. [8 mm]	5/16 in. [8 mm]	1/2 in. [12 mm]	3/8 in. [10 mm]
	Vertical		1/2 in. [12 mm]				1/2 in. [12 mm]
	Overhead		5/16 in. [8 mm]				5/16 in. [8 mm]
Maximum Single Pass Layer Width	All (for GMAW/ FCAW) F & H (for SAW)	Root opening > 1/2 in. [12 mm], or		Split layers	Laterally displaced electrodes or split layer	Split layers	Split layers
		Any layer of width w		Split layers if w > 5/8 in. [16 mm]	Split layers with tandem electrodes if w > 5/8 in. [16 mm]	If w > 1 in. [25 mm], split layers	Note 5

Notes:

1. Except root passes.
2. 5/32 in. [4.0 mm] for EXX14 and low-hydrogen electrodes.
3. See 3.7.3 for requirements for welding unpainted and exposed ASTM A 588.
4. See 3.7.2 for width-to-depth limitations.
5. In the F, H, or OH positions for nontubulars, split layers when the layer width w > 5/8 in. [16 mm]. In the vertical position for nontubulars or the 5G or 6G for tubulars, split layers when the width w > 1 in. [25 mm].
6. Shaded area indicates nonapplicability.
7. GMAW-S shall not be not prequalified.



APÉNDICE D:

NORMA AWS D1.1

**TABLA . 4.1: POSICIONES DE SOLDADURAS
CALIFICADAS PARA MUESTRAS DE PLANCHA,
TUBERÍAS Y CAJAS**

Table 4.1
WPS Qualification—Production Welding Positions Qualified by Plate, Pipe, and Box Tube Tests (see 4.3)

Qualification Test		Production Plate Welding Qualified				Production Pipe Welding Qualified				Production Box Tube Welding Qualified				
Weld Type	Positions	Groove	Groove	Fillet ⁹	Butt-Groove		Butt-Groove		Butt-Groove		Butt-Groove		Fillet ⁹	
		CJP	PJP	F	CJP	PJP	CJP	PJP	CJP	PJP	CJP	PJP	CJP	PJP
P L A T E	CJP Groove ¹	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
		F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H
		V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
		OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH
P L A T E	Fillet ¹	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
		F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H
		V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
		OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH	OH
T U B U L A R	Plug/ Slot	Qualifies Plug/Slot Welding for Only the Positions Tested												
		1G Rotated	F ³	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
	2G	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	
	5G	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	F, V, OH	
	(2G + 5G)	All	All	All	All ⁵	All ⁷	All ³	All ³	All ³	All ³	All ³	All ³	All ³	
	6G	All	All	All	All ⁵	All ⁷	All ³	All ³	All ³	All ³	All ³	All ³	All ³	
	6GR	All ⁴	All	All	All ⁵	All	All ⁴	All ⁴	All ⁴	All ⁴	All ⁴	All ⁴	All ⁴	
	1F Rotated	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
	2F	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	F, H	
	2F Rotated	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	F, H, OH	
4F	All	All	All	All	All	All	All	All	All	All	All	All		
5F	All	All	All	All	All	All	All	All	All	All	All	All		



- Notes:**
1. Qualifies for a welding axis with an essentially straight line, including welding along a line parallel to the axis of circular pipe.
 2. Qualifies for circumferential welds in pipes equal to or greater than 24 in. [600 mm] nominal outer diameter.
 3. Production butt joint details without backing or backgouging require qualification testing of the joint detail shown in Figure 4.24.
 4. Limited to prequalified joint details (see 3.12 or 3.13).
 5. For production joints of CJP T, Y, and K-connections that conform to either Figure 3.8, 3.9, or 3.10 and Table 3.6, use Figure 4.27 detail for testing. For other production joints, see 4.12.4.1.
 6. For production joints of CJP T, Y, and K-connections that conform to Figure 3.6, and Table 3.6, use Figure 4.27 and 4.28 detail for testing, or, alternatively, test the Figure 4.27 joint and cut macroetch specimens from the corner locations shown in Figure 4.28. For other production joints, see 4.12.4.1.
 7. For production joints of PJP T, Y, and K-connections that conform to Figure 3.5, use either the Figure 4.24 or Figure 4.25 detail for testing.
 8. For matched box connections with corner radii less than twice the chord member thickness, see 3.12.4.1.
 9. Fillet welds in production T, Y, or K-connections shall conform to Figure 3.2. WPS qualification shall conform to 4.11.

APÉNDICE E:

NORMA AWS D1.1

FIGURA 4.11: DIMENSIONES DEL ESPÉCIMEN DE PRUEBA.



CIB-ESPOL

APÉNDICE F:

NORMA AWS D1.1

TABLA 4.2: NÚMERO Y TIPO DE ESPÉCIMENES DE PRUEBA, Y RANGO DE ESPESORES Y DIÁMETRO CALIFICADOS.

Table 4.2
WPS Qualification—CJP Groove Welds: Number and Type of Test Specimens and Range of Thickness and Diameter Qualified (see 4.4) (Dimensions in Millimeters)

1. Tests on Plate ^{1, 2}									
Nominal Plate Thickness (T) Tested, mm	Number of Specimens				Nominal Plate, Pipe or Tube Thickness ^{3, 4} Qualified, mm				
	Reduced Section Tension (see Fig. 4.14)	Root Bend (see Fig. 4.12)	Face Bend (see Fig. 4.12)	Side Bend (see Fig. 4.13)	Min	Max			
3 ≤ T ≤ 10	2	2	2	—	3	2T			
10 < T < 25	2	—	—	4	3	2T			
25 and over	2	—	—	4	3	Unlimited			
2. Tests on Pipe or Tubing ^{1, 7}									
Nominal Pipe Size or Diam., mm	Nominal Wall Thickness, T, mm	Number of Specimens				Nominal Diameter ⁵ of Pipe or Tube Size Qualified, mm	Nominal Plate, Pipe or Tube Wall Thickness ^{3, 4} Qualified, mm		
		Reduced Section Tension (see Fig. 4.14)	Root Bend (see Fig. 4.12)	Face Bend (see Fig. 4.12)	Side Bend (see Fig. 4.13)		Min	Max	
Job Size Test Pipes	< 600	3 ≤ T ≤ 10	2	2	2	—	Test diam. and over	3	2T
		10 < T < 20	2	—	—	4	Test diam. and over	T/2	2T
		T ≥ 20	2	—	—	4	Test diam. and over	10	Unlimited
	≥ 600	3 ≤ T ≤ 10	2	2	2	—	Test diam. and over	3	2T
		10 < T < 20	2	—	—	4	600 and over	T/2	2T
		T ≥ 20	2	—	—	4	600 and over	10	Unlimited
Standard Test Pipes	50 mm OD × 6 mm WT or 75 mm OD × 6 mm WT		2	2	2	—	20 through 100	3	20
	150 mm OD × 14 mm WT or 200 mm OD × 12 mm WT		2	—	—	4	100 and over	5	Unlimited
3. Tests on ESW and EGW ^{1, 8}									
Nominal Plate Thickness Tested	Number of Specimens				Nominal Plate Thickness Qualified				
	Reduced Section Tension (see Fig. 4.14)	All-Weld-Metal Tension (see Fig. 4.18)	Side Bend (see Fig. 4.13)	CVN Tests	Min	Max			
T	2	1	4	(Note 6)	0.5T	1.1T			

Notes:

- All test plate, pipe or tube welds shall be visually inspected (see 4.8.1) and subject to NDT (see 4.8.2). One test plate, pipe or tube shall be required for each qualified position.
- See Figures 4.10 and 4.11 for test plate requirements.
- For square groove welds that are qualified without backgouging, the maximum thickness qualified shall be limited to the test plate thickness.
- CJP groove weld qualification on any thickness or diameter shall qualify any size of fillet or PJP groove weld for any thickness.
- Qualification with any pipe diameter shall qualify all box section widths and depths.
- When specified, CVN tests shall conform to Annex III.
- See Table 4.1 for the groove details required for qualification of tubular butt and T-, Y-, K-connection joints.
- See Figure 4.9 for plate requirements.

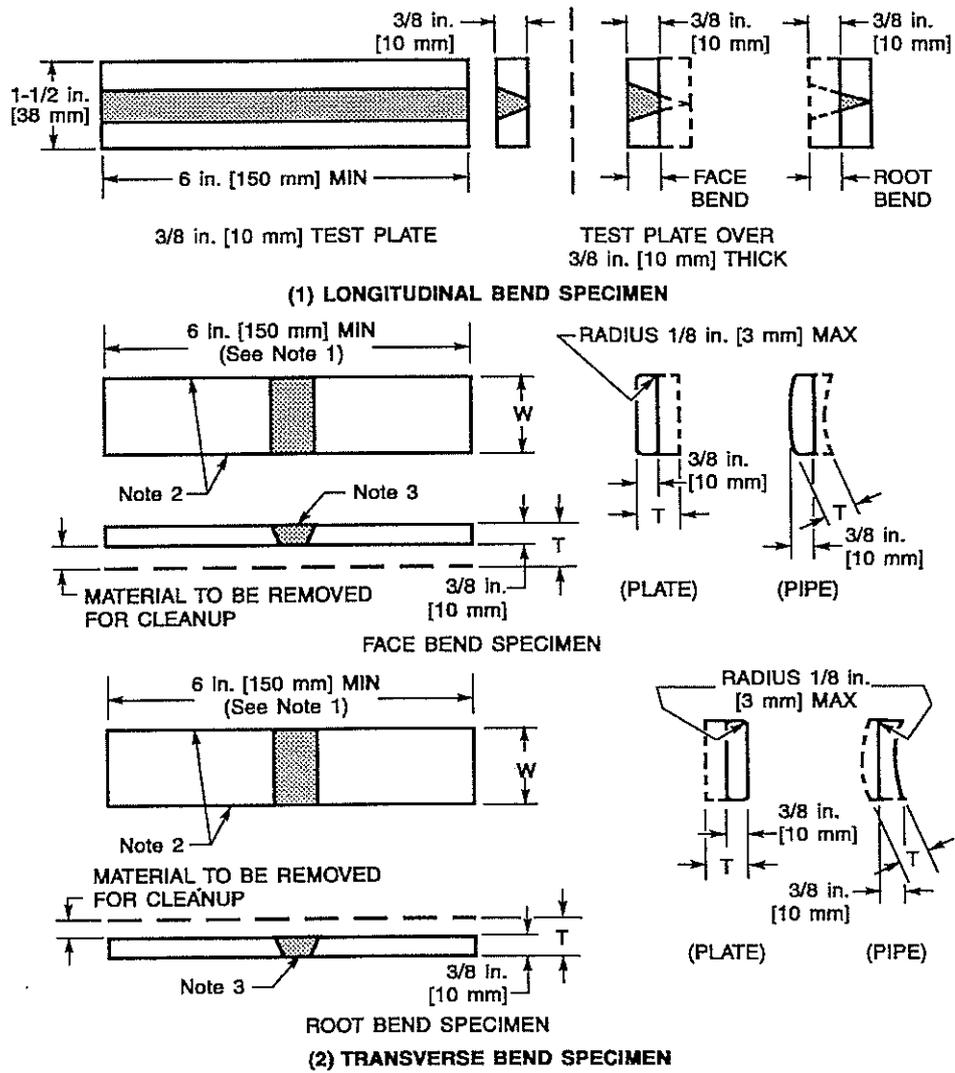




APÉNDICE G:

NORMA AWS D1.1

**FIGURA 4.12: DIMENSIONES PARA LA MUESTRA
SOMETIDO A ENSAYO DE DOBLADO LATERAL**



Dimensions	
Test Weldment	Test Specimen Width, W in. [mm]
Plate	1-1/2 [40]
Test pipe or tube ≤ 4 in. [100 mm] in diameter	1 [25]
Test pipe or tube > 4 in. [100 mm] in diameter	1-1/2 [40]

General Notes:

- T = plate or pipe thickness.
- When the thickness of the test plate is less than 3/8 in. [10 mm], the nominal thickness shall be used for face and root bends.

Notes:

1. A longer specimen length may be necessary when using a wraparound type bending fixture or when testing steel with a yield strength of 90 ksi [620 MPa] or more.
2. These edges may be thermal-cut and may or may not be machined.
3. The weld reinforcement and backing, if any, shall be removed flush with the surface of the specimen (see 5.24.4.1 and 5.24.4.2). If a recessed backing is used, this surface may be machined to a depth not exceeding the depth of the recess to remove the backing; in such a case, the thickness of the finished specimen shall be that specified above. Cut surfaces shall be smooth and parallel.

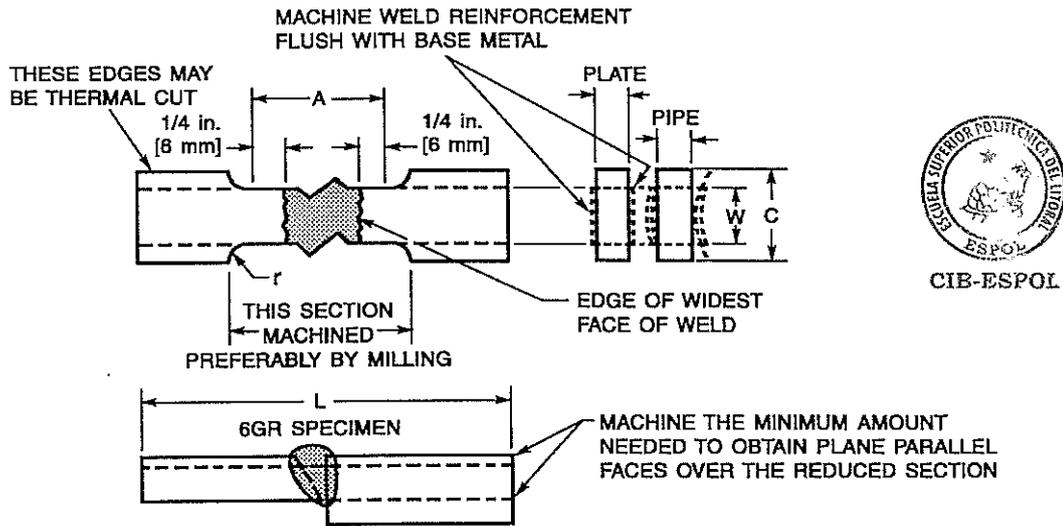
Figure 4.12—Face and Root Bend Specimens (see 4.8.3.1)



APÉNDICE H:

NORMA AWS D1.1

**FIGURA 4.14: DIMENSIONES PARA LA MUESTRA
SOMETIDA A ENSAYO DE TRACCIÓN**



Dimensions in inches [mm]						
	Test Plate Nominal Thickness, T_p			Test Pipe		
	$T_p \leq 1$ in. [25 mm]	1 in. [25 mm] < $T_p < 1\text{-}1/2$ in. [38 mm]	$T_p \geq 1\text{-}1/2$ in. [38 mm]	2 in. [50 mm] & 3 in. [75 mm] Diameter	6 in. [150 mm] & 8 in. [200 mm] Diameter or Larger Job Size Pipe	
A—Length of reduced section	Widest face of weld + 1/2 in. [12 mm], 2-1/4 in. [60 mm] min			Widest face of weld + 1/2 in. [12 mm], 2-1/4 in. [60 mm] min		
L—Overall length, min ¹	As required by testing equipment			As required by testing equipment		
W—Width of reduced section ^{2,3}	3/4 in. [20 mm] min	3/4 in. [20 mm] min	3/4 in. [20 mm] min	1/2 ± 0.01 (12 ± 0.025)	3/4 in. [20 mm] min	
C—Width of grip section ^{3,4}	W + 1/2 in. [12 mm] min	W + 1/2 in. [12 mm] min	W + 1/2 in. [12 mm] min	W + 1/2 in. [12 mm] min	W + 1/2 in. [12 mm] min	
t—Specimen thickness ^{5,6}	T_p	T_p	T_p/n (Note 6)	Maximum possible with plane parallel faces within length A		
r—Radius of fillet, min	1/2 in. [12 mm]	1/2 in. [12 mm]	1/2 in. [12 mm]	1 in. [25 mm]	1 in. [25 mm]	

General Note: Due to limited capacity of some tensile testing machines, the specimen dimensions for Annex M steels may be as agreed upon by the Engineer and the Fabricator.

Notes:

1. It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two-thirds or more of the length of the grips.
2. The ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004 in. [0.102 mm]. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width of either end shall not be more than 0.015 in. [0.381 mm] larger than the width at the center.
3. Narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases, the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested allows. If the width of the material is less than W, the sides may be parallel throughout the length of the specimen.
4. For standard plate-type specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 1/4 in. [6 mm].
5. The dimension t is the thickness of the specimen as provided for in the applicable material specifications. The minimum nominal thickness of 1-1/2 in. [38 mm] wide specimens shall be 3/16 in. [5 mm] except as allowed by the product specification.
6. For plates over 1-1/2 in. [38 mm] thick, specimens may be cut into approximately equal strips. Each strip shall be at least 3/4 in. [20 mm] thick. The test results of each strip shall meet the minimum requirements.

Figure 4.14—Reduced-Section Tension Specimens (see 4.8.3.4)



APÉNDICE I:

NORMA AWS D1.1

**TABLA 6.1: CRITERIO DE ACEPTACIÓN PARA UNA
INSPECCIÓN VISUAL**

Table 6.1
Visual Inspection Acceptance Criteria (see 6.9)

Discontinuity Category and Inspection Criteria	Statically Loaded Nontubular Connections	Cyclically Loaded Nontubular Connections	Tubular Connections (All Loads)										
(1) Crack Prohibition Any crack shall be unacceptable, regardless of size or location.	X	X	X										
(2) Weld/Base-Metal Fusion Thorough fusion shall exist between adjacent layers of weld metal and between weld metal and base metal.	X	X	X										
(3) Crater Cross Section All craters shall be filled to provide the specified weld size, except for the ends of intermittent fillet welds outside of their effective length.	X	X	X										
(4) Weld Profiles Weld profiles shall be in conformance with 5.24.	X	X	X										
(5) Time of Inspection Visual inspection of welds in all steels may begin immediately after the completed welds have cooled to ambient temperature. Acceptance criteria for ASTM A 514, A 517, and A 709 Grade 100 and 100 W steels shall be based on visual inspection performed not less than 48 hours after completion of the weld.	X	X	X										
(6) Undersized Welds The size of a fillet weld in any continuous weld may be less than the specified nominal size (L) without correction by the following amounts (U): <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">L,</td> <td style="text-align: center;">U,</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><u>specified nominal weld size, in. [mm]</u></td> <td style="text-align: center;"><u>allowable decrease from L, in. [mm]</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\leq 3/16$ [5]</td> <td style="text-align: center;">$\leq 1/16$ [2]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$1/4$ [6]</td> <td style="text-align: center;">$\leq 3/32$ [2.5]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 5/16$ [8]</td> <td style="text-align: center;">$\leq 1/8$ [3]</td> </tr> </table> In all cases, the undersize portion of the weld shall not exceed 10% of the weld length. On web-to-flange welds on girders, <u>underrun shall be prohibited</u> at the ends for a length equal to twice the width of the flange.	L,	U,	<u>specified nominal weld size, in. [mm]</u>	<u>allowable decrease from L, in. [mm]</u>	$\leq 3/16$ [5]	$\leq 1/16$ [2]	$1/4$ [6]	$\leq 3/32$ [2.5]	$\geq 5/16$ [8]	$\leq 1/8$ [3]	X	X	X
L,	U,												
<u>specified nominal weld size, in. [mm]</u>	<u>allowable decrease from L, in. [mm]</u>												
$\leq 3/16$ [5]	$\leq 1/16$ [2]												
$1/4$ [6]	$\leq 3/32$ [2.5]												
$\geq 5/16$ [8]	$\leq 1/8$ [3]												
(7) Undercut (A) For material less than 1 in. [25 mm] thick, undercut shall not exceed 1/32 in. [1 mm], with the following exception: <u>undercut shall not exceed 1/16 in. [2 mm] for any accumulated length up to 2 in. [50 mm] in any 12 in. [300 mm]</u> . For material equal to or greater than 1 in. thick, undercut shall not exceed 1/16 in. [2 mm] for any length of weld. (B) In primary members, undercut shall be no more than 0.01 in. [0.25 mm] deep when the weld is transverse to tensile stress under any design loading condition. Undercut shall be no more than 1/32 in. [1 mm] deep for all other cases.	X	X	X										
(8) Porosity (A) CJP groove welds in butt joints transverse to the direction of computed tensile stress shall have no visible piping porosity. For all other groove welds and for fillet welds, the sum of the visible piping porosity 1/32 in. [1 mm] or greater in diameter shall not exceed 3/8 in. [10 mm] in any linear inch of weld and shall not exceed 3/4 in. [20 mm] in any 12 in. [300 mm] length of weld. (B) The frequency of piping porosity in fillet welds shall not exceed one in each 4 in. [100 mm] of weld length and the maximum diameter shall not exceed 3/32 in. [2.5 mm]. Exception: for fillet welds connecting stiffeners to web, the sum of the diameters of piping porosity shall not exceed 3/8 in. [10 mm] in any linear inch of weld and shall not exceed 3/4 in. [20 mm] in any 12 in. [300 mm] length of weld. (C) CJP groove welds in butt joints transverse to the direction of computed tensile stress shall have no piping porosity. For all other groove welds, the frequency of piping porosity shall not exceed one in 4 in. [100 mm] of length and the maximum diameter shall not exceed 3/32 in. [2.5 mm].	X	X	X										

General Note: An "X" indicates applicability for the connection type; a shaded area indicates non-applicability.



CIB-ESPOL

BIBLIOGRAFÍA

1. CARY HORWARD B., MODERN WELDING TECHNOLOGY. Editorial Prentice-Hall, 1979 Capítulo 11, 15
2. Dr. Weld: www.drweld.com
3. Dr. Weld: www.drweld.com/sprayarc-ns4.html
4. FOSCA CARLOS Dr.. Introducción a la METALURGÍA DE LA SODALDURA, 5ta. Edición. Lima, Enero 2005
5. Hobart Brothers Company
6. LINCOLN ELECTRIC MIG/MAG WELDING GUIDE. For Gas Metal Arc Welding (GMAW) pág. 4,8,18,21
7. Norma AWS A3.0
8. Norma AWS A5-18
9. Norma AWS D1.1, Capítulo 3,4,6
10. Programa de Costos de la Empresa INDURA S.A.