

**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

---

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<br>Aporte Utilizados..... | 14   |
| 1.3 Metalurgia de la Soldadura.....   | 20   |
| 1.4 Soldabilidad de los Metales y Aleaciones Ferrosas con el<br>Proceso GMAW.....       | 33   |
| 1.5 Requerimientos de Uniones Soldadas bajo Normas AWS<br>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 <sub>2</sub> .....   | 64 |
| 2.3.2 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....   | 67 |
| 2.3.3 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....  | 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 <sub>2</sub>   | 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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>2</sub> , 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 <sub>2</sub> , en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito y (b) Globular.....                      | 66 |
| FIGURA 2.5  | Cordón de soldadura con 80 % Ar + 20 % CO <sub>2</sub> , 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 <sub>2</sub> , 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 <sub>2</sub> .....   | 79 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| FIGURA 3.5  | Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 100% CO <sub>2</sub> .....   | 80  |
| FIGURA 3.6  | Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....                          | 81  |
| FIGURA 3.7  | Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....                                   | 82  |
| FIGURA 3.8  | Microestructura de probetas en Transferencia Spray, 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....                                      | 83  |
| FIGURA 3.9  | Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....                           | 84  |
| FIGURA 3.10 | Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....                                    | 85  |
| FIGURA 3.11 | Microestructura de probetas en Transferencia Spray, 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....                                       | 86  |
| FIGURA 3.12 | Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Corto Circuito, 100% CO <sub>2</sub> .....                  | 88  |
| FIGURA 3.13 | Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Globular, 100% CO <sub>2</sub> .....                        | 89  |
| FIGURA 3.14 | Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO <sub>2</sub> , en Transferencia Corto Circuito.....                   | 89  |
| FIGURA 3.15 | Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO <sub>2</sub> , en Transferencia Globular.....                         | 90  |
| FIGURA 3.16 | Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO <sub>2</sub> , en Transferencia Spray.....                            | 90  |
| FIGURA 3.17 | Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO <sub>2</sub> , en Transferencia en Corto Circuito.....                | 91  |
| FIGURA 3.18 | Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO <sub>2</sub> , en Transferencia Globular.....                         | 91  |
| FIGURA 3.19 | Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO <sub>2</sub> , 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 <sub>2</sub> .....   | 99  |
| FIGURA 3.23 | Método de Transferencia Corto Circuito con 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....   | 100 |
| FIGURA 3.24 | Método de Transferencia Corto Circuito con 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....  | 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 <sub>2</sub> .....  | 103 |
| FIGURA 3.27 | Método de Transferencia Globular con 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....  | 104 |
| FIGURA 3.28 | Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....   | 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 <sub>2</sub> .....  | 107 |
| FIGURA 3.31 | Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....   | 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 <sub>2</sub> .....   | 112 |
| FIGURA 3.34 | Radiografía de la Muestra con 80% Ar +20% CO <sub>2</sub> .....  | 112 |
| FIGURA 3.35 | Radiografía de la Muestra con 92% Ar +8% CO <sub>2</sub> .....   | 112 |
| FIGURA 3.36 | Cálculo de Costos de Soldadura 100% CO <sub>2</sub> (Corto Circuito) .....                                       | 114 |
| FIGURA 3.37 | Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO <sub>2</sub> (Corto Circuito) .....                          | 114 |
| FIGURA 3.38 | Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> (Corto Circuito) .....                               | 115 |
| FIGURA 3.39 | Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> (Corto Circuito) .....                  | 115 |
| FIGURA 3.40 | Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> (Corto Circuito) .....                                | 116 |
| FIGURA 3.41 | Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> (Corto Circuito) .....                   | 116 |
| FIGURA 3.42 | Cálculo de Costos de Soldadura 100% CO <sub>2</sub> (Globular) .....   | 117 |
| FIGURA 3.43 | Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO <sub>2</sub> (Globular) .....                                | 117 |
| FIGURA 3.44 | Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> (Globular) .....                                     | 118 |
| FIGURA 3.45 | Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> (Globular) .....                        | 118 |
| FIGURA 3.46 | Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> (Globular) .....                                      | 119 |
| FIGURA 3.47 | Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> (Globular) .....                         | 119 |



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

## ÍNDICE DE TABLAS

|          | Pág.  |       |
|----------|---|-------|
| TABLA 1  | Requerimientos de Composición Química de Electrodo<br>Sólidos y Alambres..... | 41    |
| TABLA 2  | Tabulación de Posiciones de Soldaduras por<br>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 <sub>2</sub> .....                             | 99    |
| TABLA 9  | Dureza: Corto Circuito 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....                     | 100   |
| TABLA 10 | Dureza: Corto Circuito 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....                      | 101   |
| TABLA 11 | Dureza: Globular 100% CO <sub>2</sub> .....                                   | 103   |
| TABLA 12 | Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....                           | 104   |
| TABLA 13 | Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....                            | 105   |
| TABLA 14 | Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> .....                           | 107   |
| TABLA 15 | Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO <sub>2</sub> .....                            | 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 metalmecánica.

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% CO<sub>2</sub>, 80% Ar +20% CO<sub>2</sub> y 92% Ar +8% CO<sub>2</sub>, 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

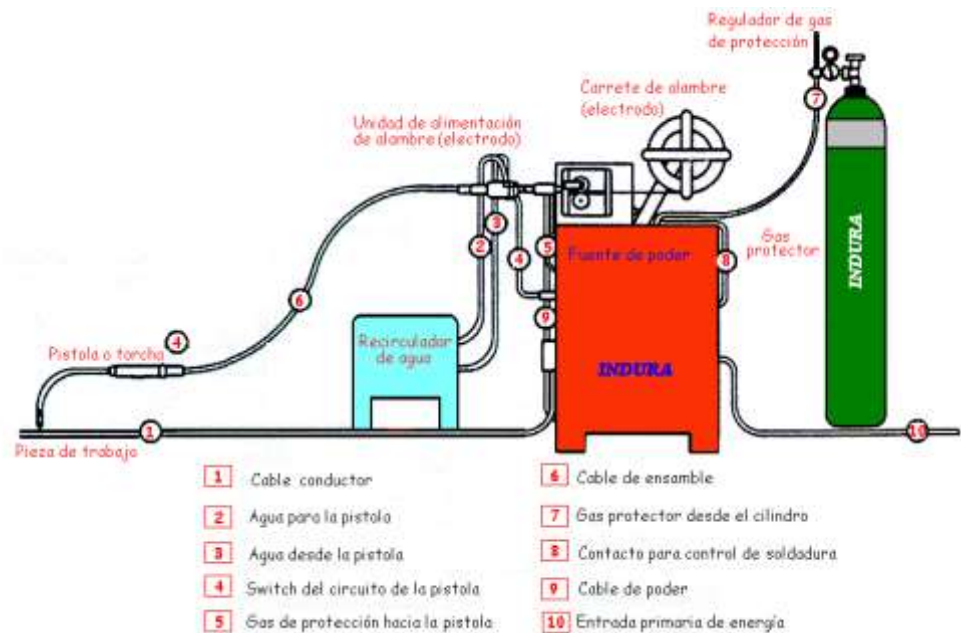
La soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding) también conocida como MIG (metal inert gas) o MAG (metal active gas), es un proceso donde un arco eléctrico es mantenido entre un alambre sólido que funciona como electrodo continuo y la pieza de trabajo, donde el arco y la soldadura fundida son protegidos por 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):

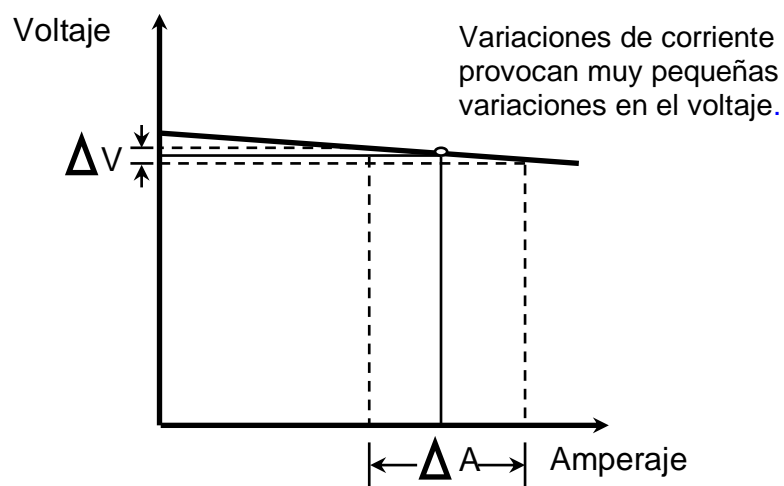
**Voltaje**, se refiere al valor suministrado por la *fuerza de poder* y que se mantiene constante durante la operación de soldadura, además el



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.

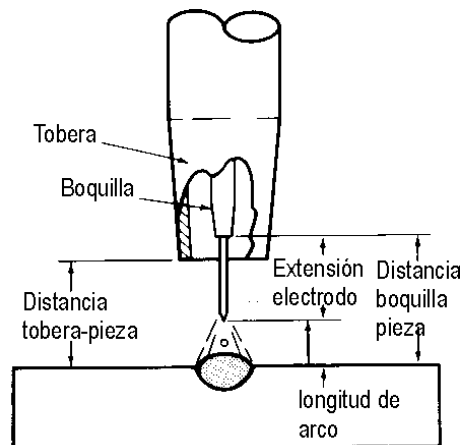
La mayor razón para utilizar este tipo de máquinas (voltaje constante) es que autorregulan la longitud de arco compensando la distancia entre la punta del electrodo y el metal base con incrementos y disminuciones automáticas de corriente manteniendo una longitud de arco constante, adicionalmente la longitud 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.

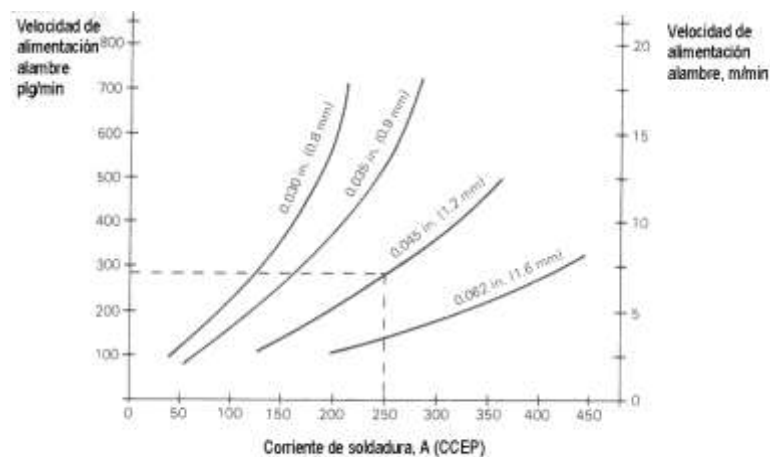
Eso inmediatamente reduce la velocidad de fusión lo que permite acortar la longitud de arco.

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).



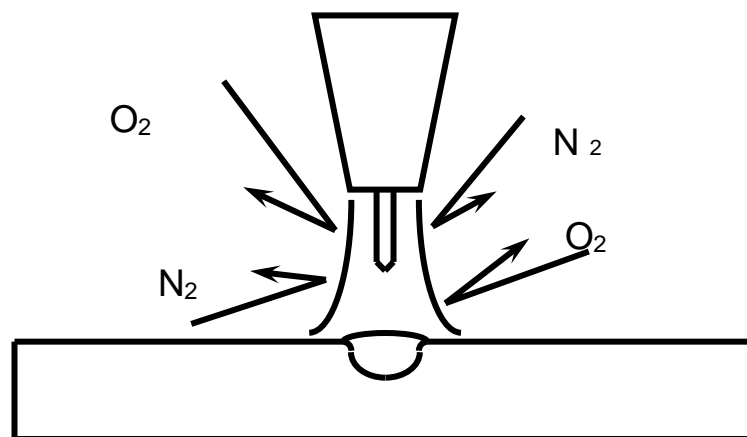
**FIGURA 1.4: Corrientes típicas versus velocidad de alimentación de alambre para electrodos de acero al carbono (6).**

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).

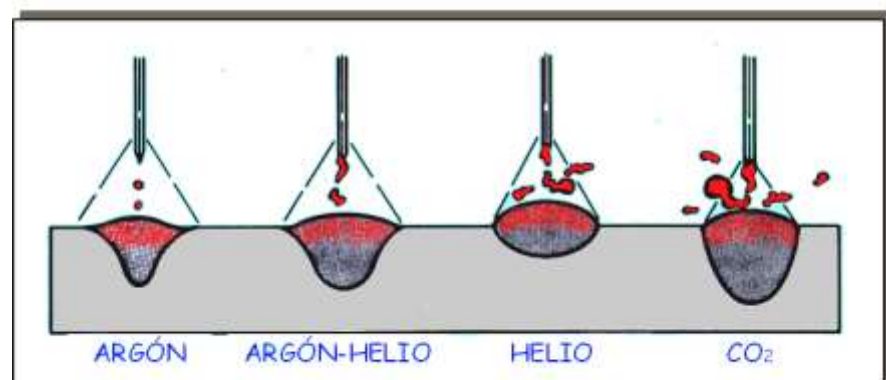
**Orientación del electrodo** Como todos los procesos de soldadura, la orientación del electrodo afecta a la configuración y penetración. La mayor penetración se alcanza con la técnica de arrastre (backhand) y la menor con la técnica de empuje (forehand) (6).

**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

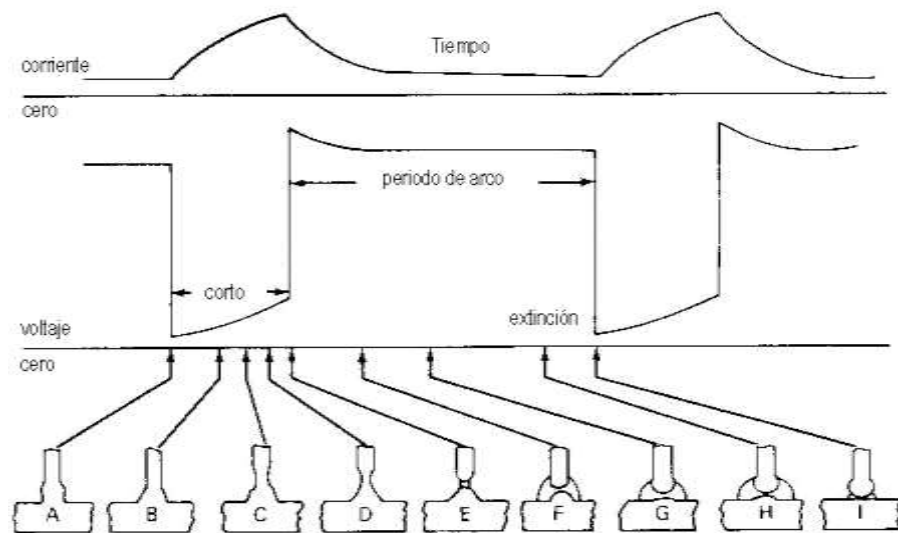
**Transferencia Corto Circuito** Este tipo de transferencia se encuentra relacionado con los valores más bajo de corriente, voltaje y diámetro de electrodo. Produce una poza de soldadura de tamaño pequeño con una rápida solidificación, ello permite que este tipo de

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).**

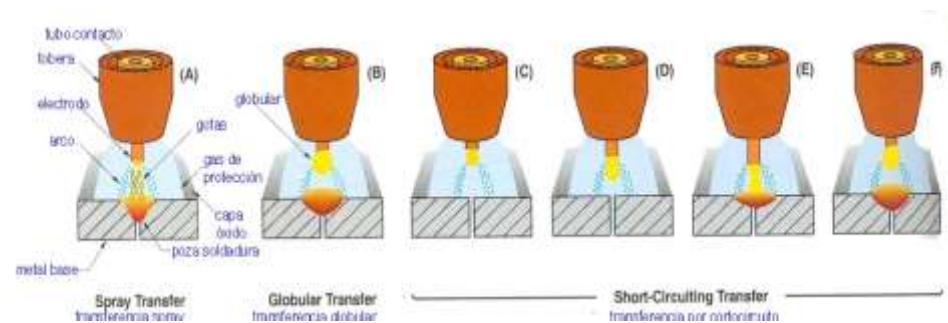
Aunque la transferencia metálica ocurre durante el corto circuito, la composición del gas de protección tiene un efecto dramático sobre la tensión superficial del metal fundido. En general, el tipo de gas influye en las características operativas del arco y la penetración en el metal base. Por ejemplo, el dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , produce altos niveles de salpicadura comparados con gases inertes, pero también el  $\text{CO}_2$  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**

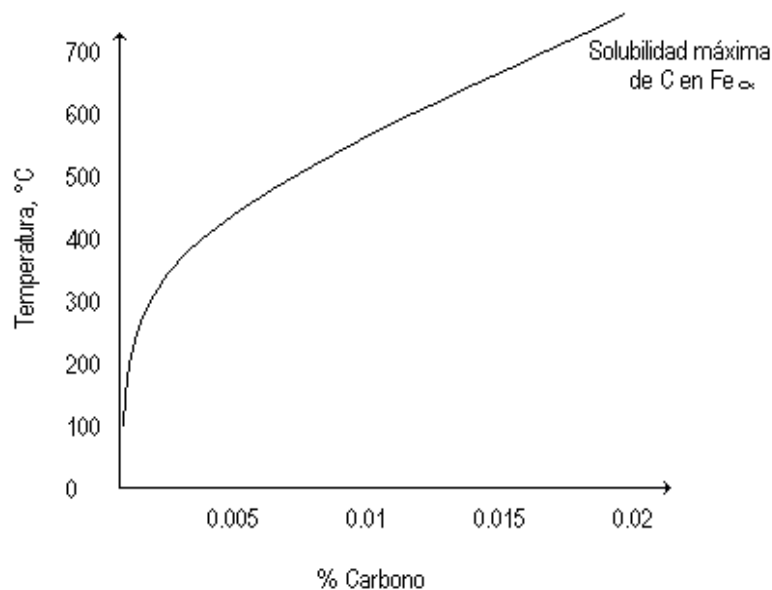
Hablar de metalurgia de la soldadura es hablar de metalurgia del acero, es por este motivo que empezaremos a estudiar que la metalurgia de este material, los aceros son aleaciones de Hierro y Carbono (< 2%) más una serie de elementos de aleación que son deliberadamente adicionados para mejorar e impartir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

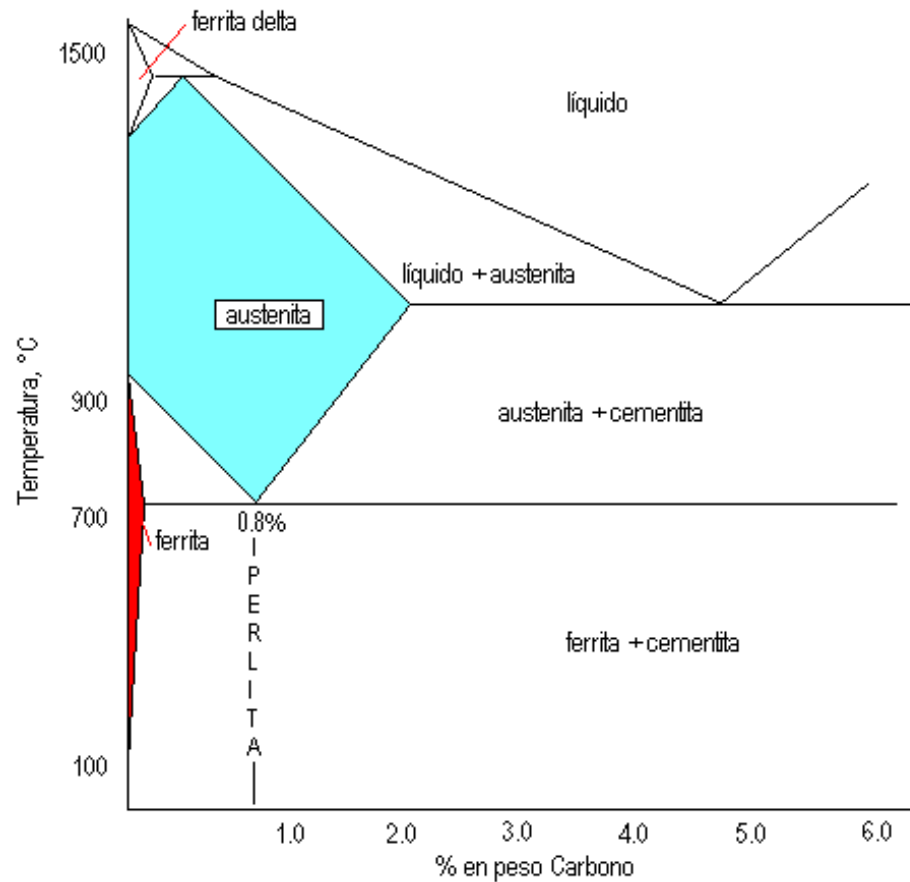


La verdadera estructura estable del carbono es el grafito, el cual se encuentra bajo ciertas condiciones de enfriamiento y sólo en fundiciones o hierros fundidos. La Figura 1.10 nos muestra el diagrama metaestable Fe - Fe<sub>3</sub>C (4).

La **Austenita,  $\gamma$**  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,  $\alpha$**  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).

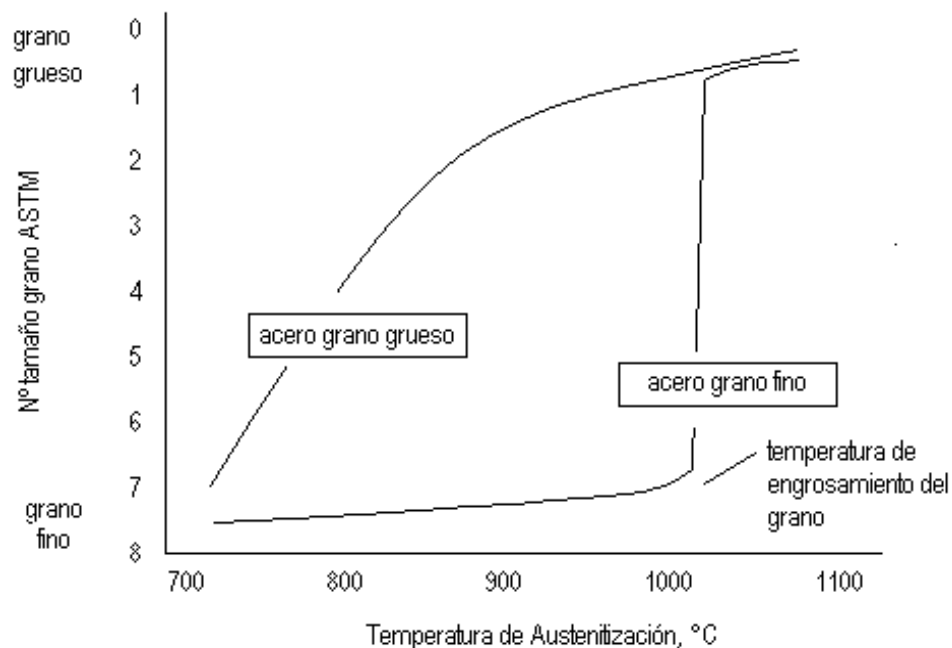


**FIGURA 1.10: Diagrama de fase Fe- Fe<sub>3</sub>C (4)**

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).

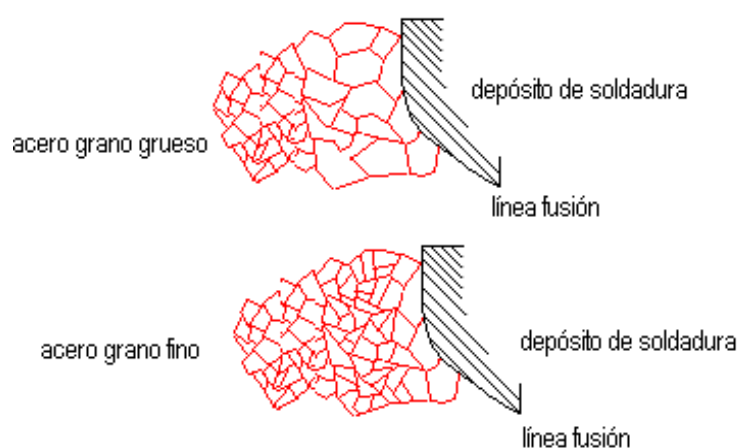


**FIGURA 1.11: Efecto temperatura austenización sobre el tamaño de grano austenítico (4).**

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

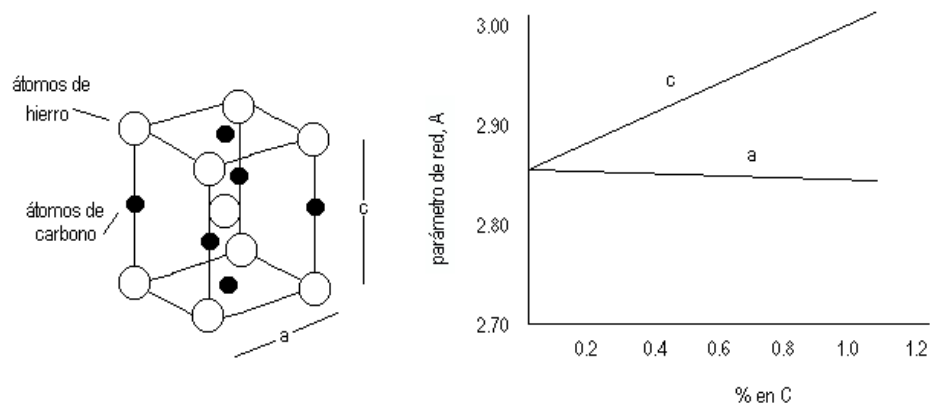
cuales forman nitruro de titanio que es muy resistente a la disolución a altas temperatura (4).



**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-Fe<sub>3</sub>C. 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

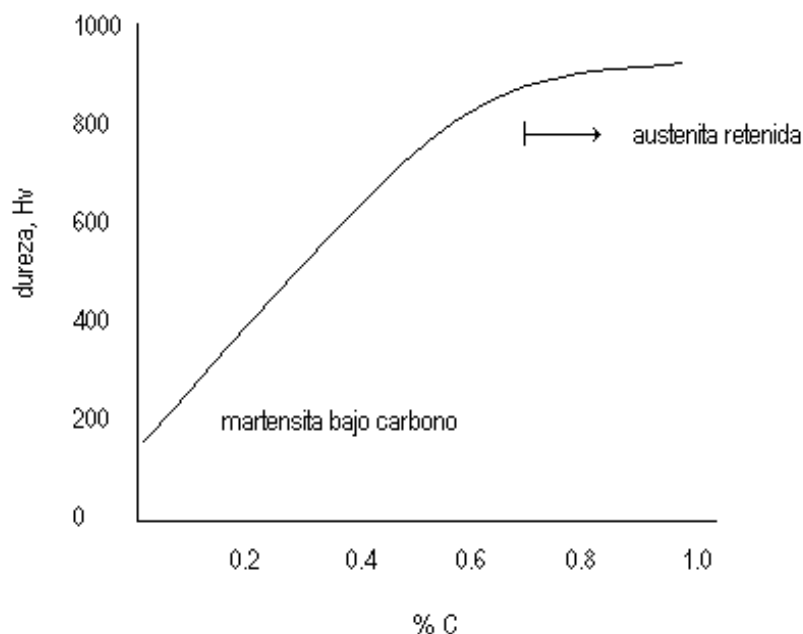
carbono y una nueva estructura obtendremos en el acero. De esta forma el carbono queda atrapado en el mismo espacio que se encontraba en la austenita, más aún éste rápido enfriamiento no puede suprimir el cambio de transformación, por lo que la transformación desde FCC a BCC también ocurre, si a esto 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

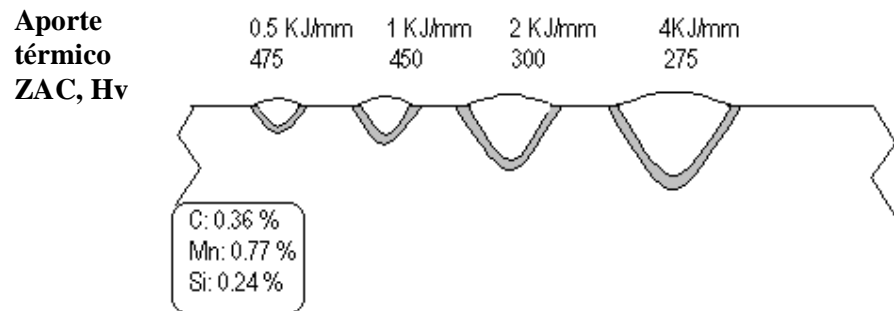
Figura 1.14 muestra la relación aproximada que existe entre dureza de la martensita y contenido en carbono (4).



**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).

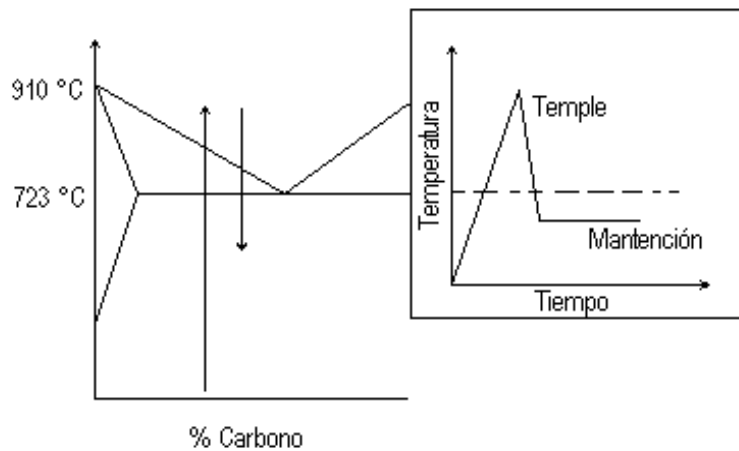


**FIGURA 1.15: Cuatro soldaduras de diferentes aportes térmicos con sus respectivas ZAC (4).**

Puesto que el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C 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).

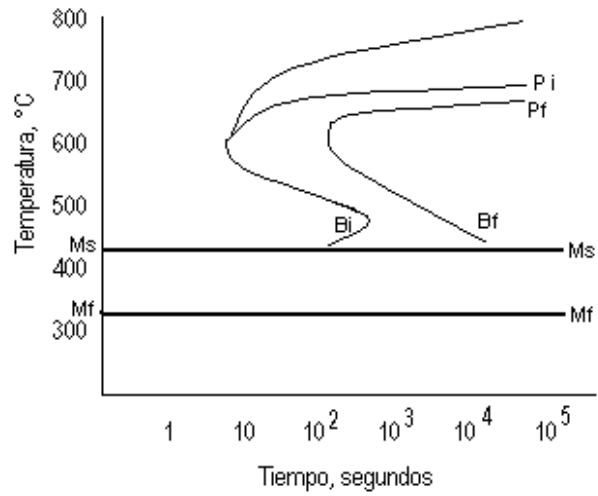




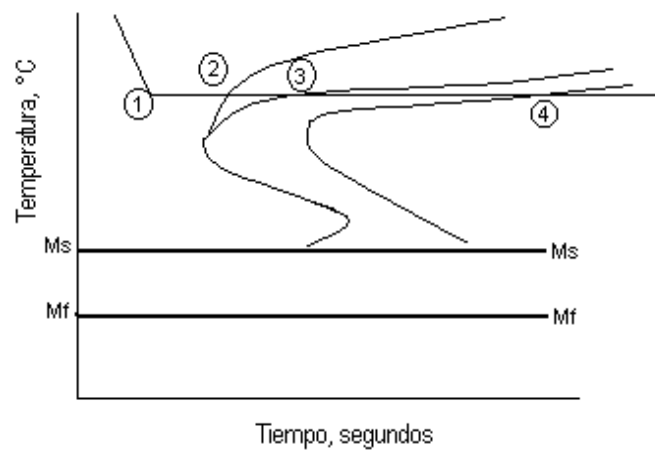
**FIGURA 1.16: Procedimiento para determinar el comportamiento Transformación-Temperatura-Tiempo (4).**

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).

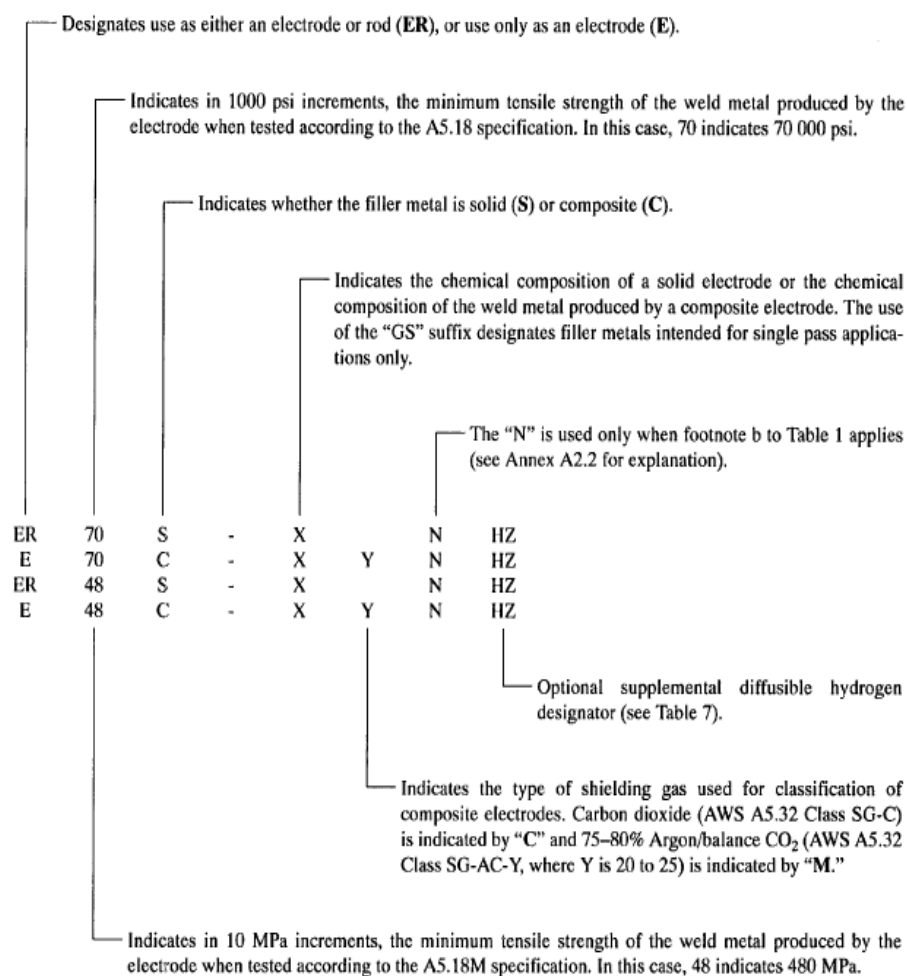
Para el proceso GMAW-Corto Circuito, al no estar soportado por un (WPSs) ser precalificado se debe proceder a calificar un procedimiento de soldadura según lo descrito en el Capítulo 4, Sección B (WPS), es decir análisis del cordón de soldadura, se debe establecer la posición de soldadura de producción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

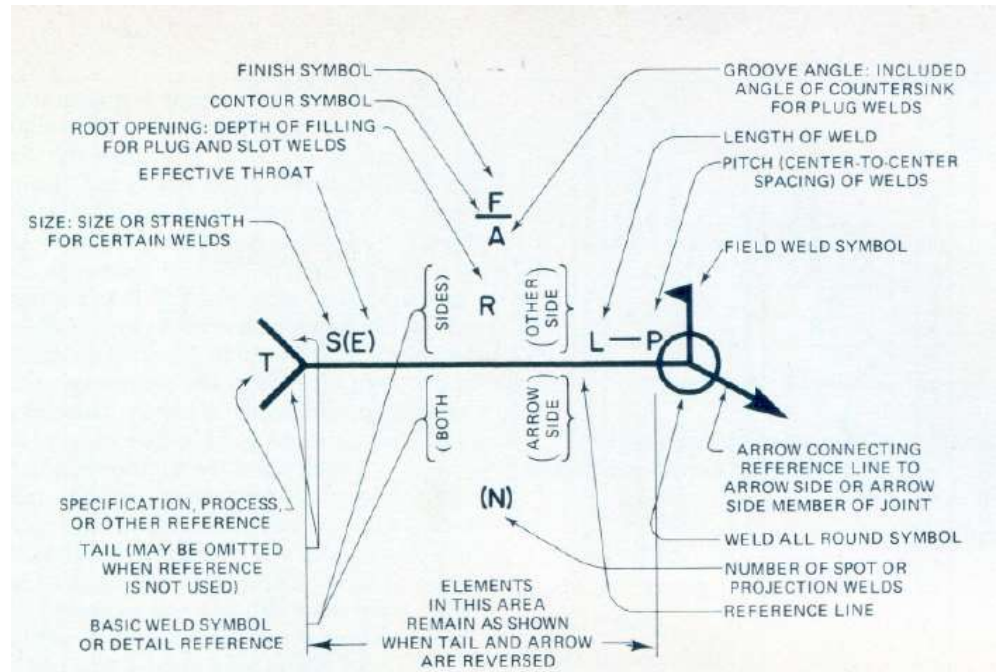
**Tabla 1 (8)**  
**Requerimientos de Composición Química para Electrodo Sólidos y alambres**

| 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



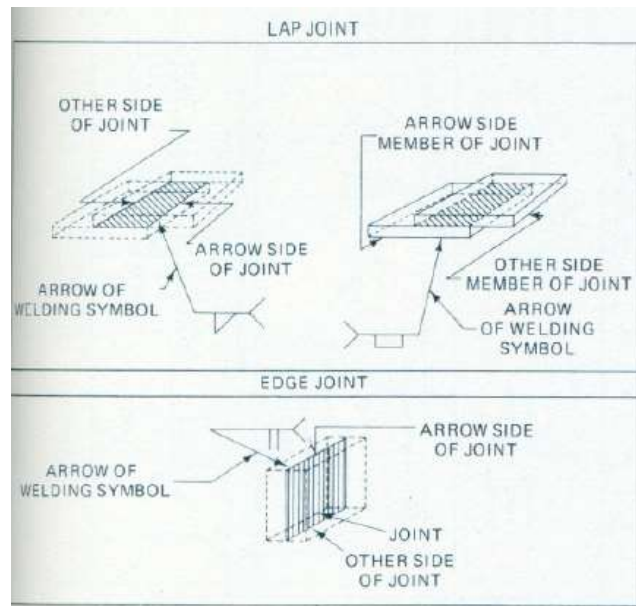
**FIGURA 1.20: Localización estándar de los elementos de los símbolos de Soldadura (1).**

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

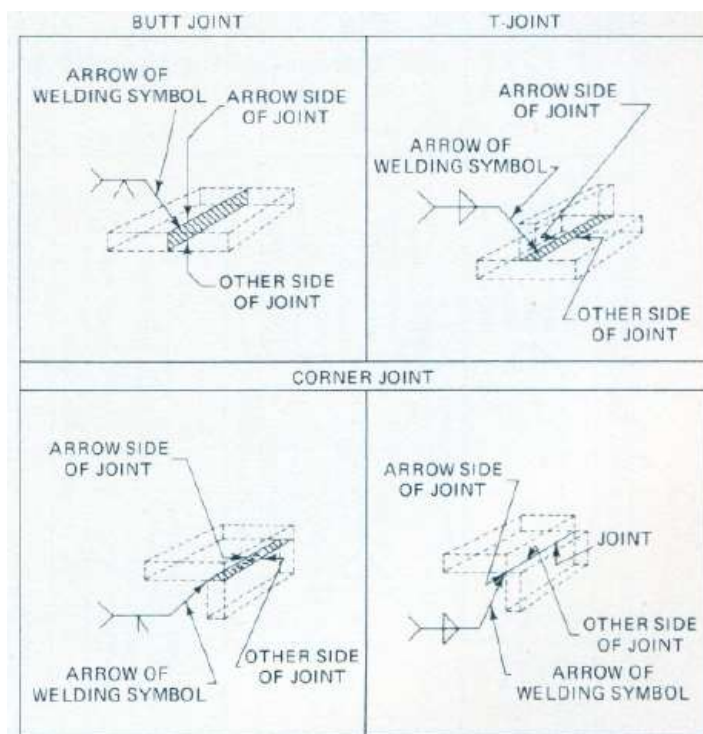
  

| FILLET | PLUG OR SLOT | SPOT PROJECTION | SEAM | BACK OR BACKING | SUR-FACING | FLANGE |        |
|--------|--------------|-----------------|------|-----------------|------------|--------|--------|
|        |              |                 |      |                 |            | EDGE   | CORNER |
|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

**Figura 1.21: Símbolos Básicos de Soldadura (1).**



(a)



(b)

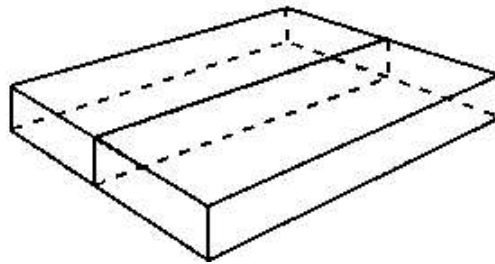
Figura 1.22: Terminología de las Juntas (1).

### ***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).

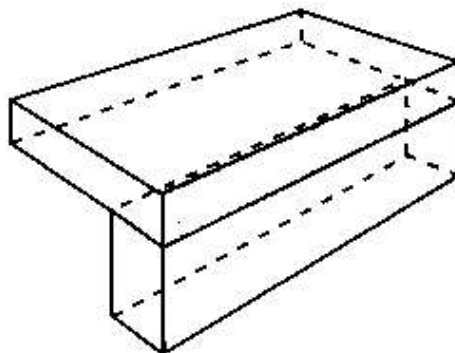
Los tipos de uniones son cinco y son:

1. Tope (butt)



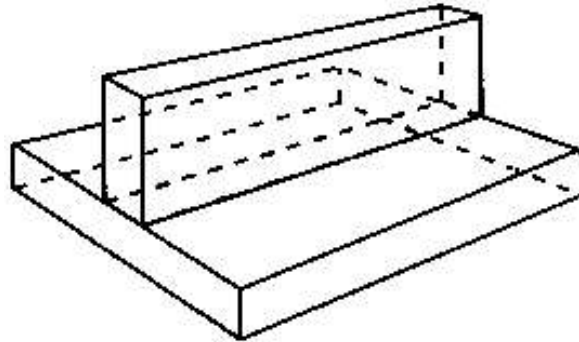
**FIGURA 1.23: Unión Tope (9).**

2. Esquina (corner)



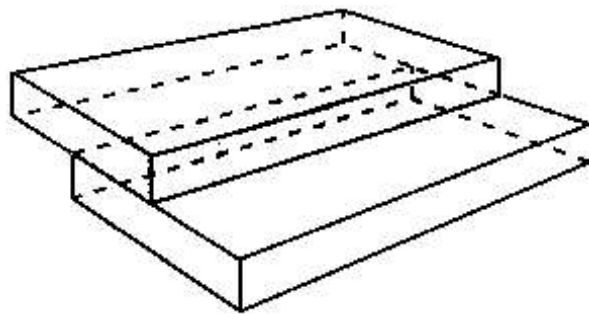
**FIGURA 1.24: Unión Esquina (9)**

3. Unión T (T)



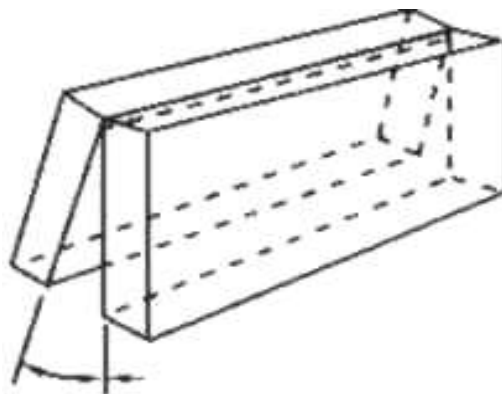
**FIGURA 1.25: Unión T (9).**

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°<br>210° to 280° |
| Overhead                                | C                 | 0° to 80°           | 0° to 80°<br>280° to 360°   |
| Vertical                                | D                 | 15° to 80°          | 80° to 280°                 |
|   | E                 | 80° to 90°          | 0° to 360°                  |

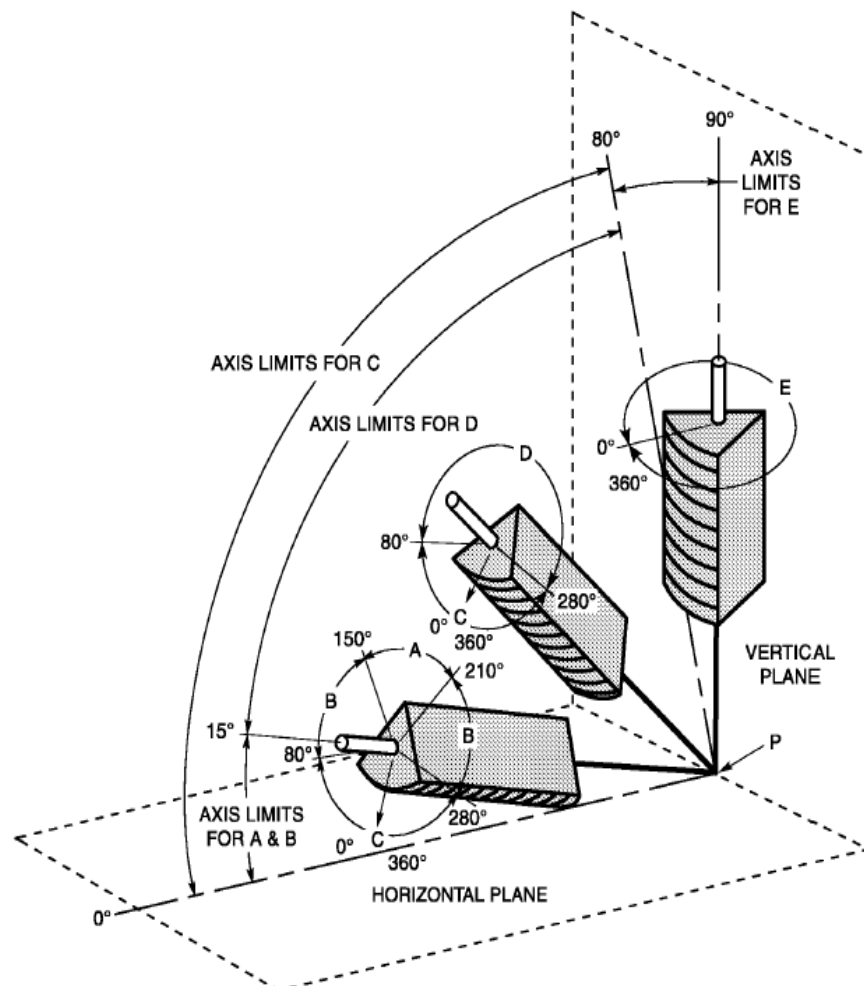
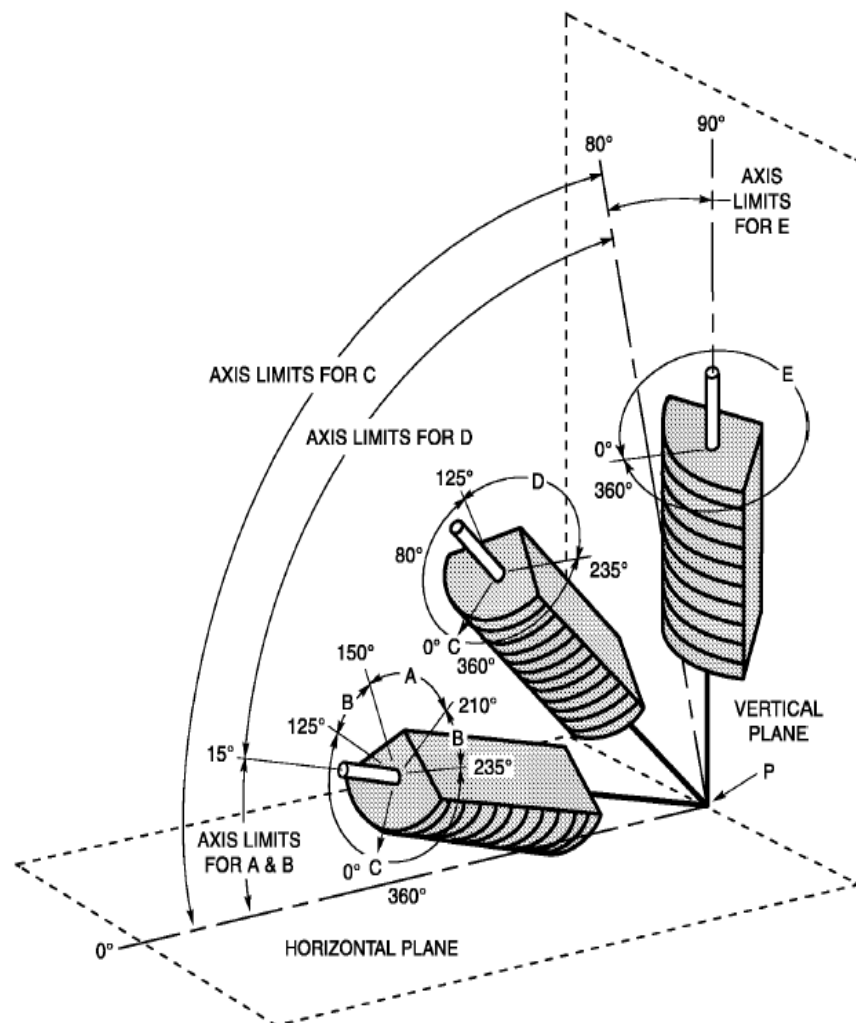


FIGURA 1.28: Posición del cordón de soldadura (9).



**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°<br>210° to 235° |
| Overhead                                | C                 | 0° to 80°           | 0° to 125°<br>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:

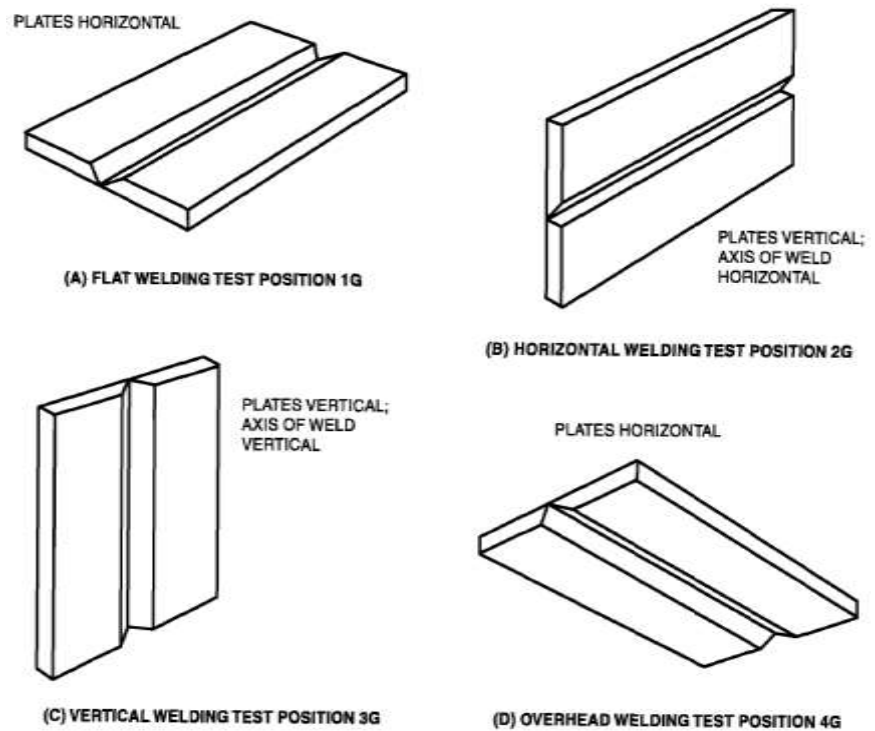
**F:** Posición Plana.

**H:** Posición Horizontal.

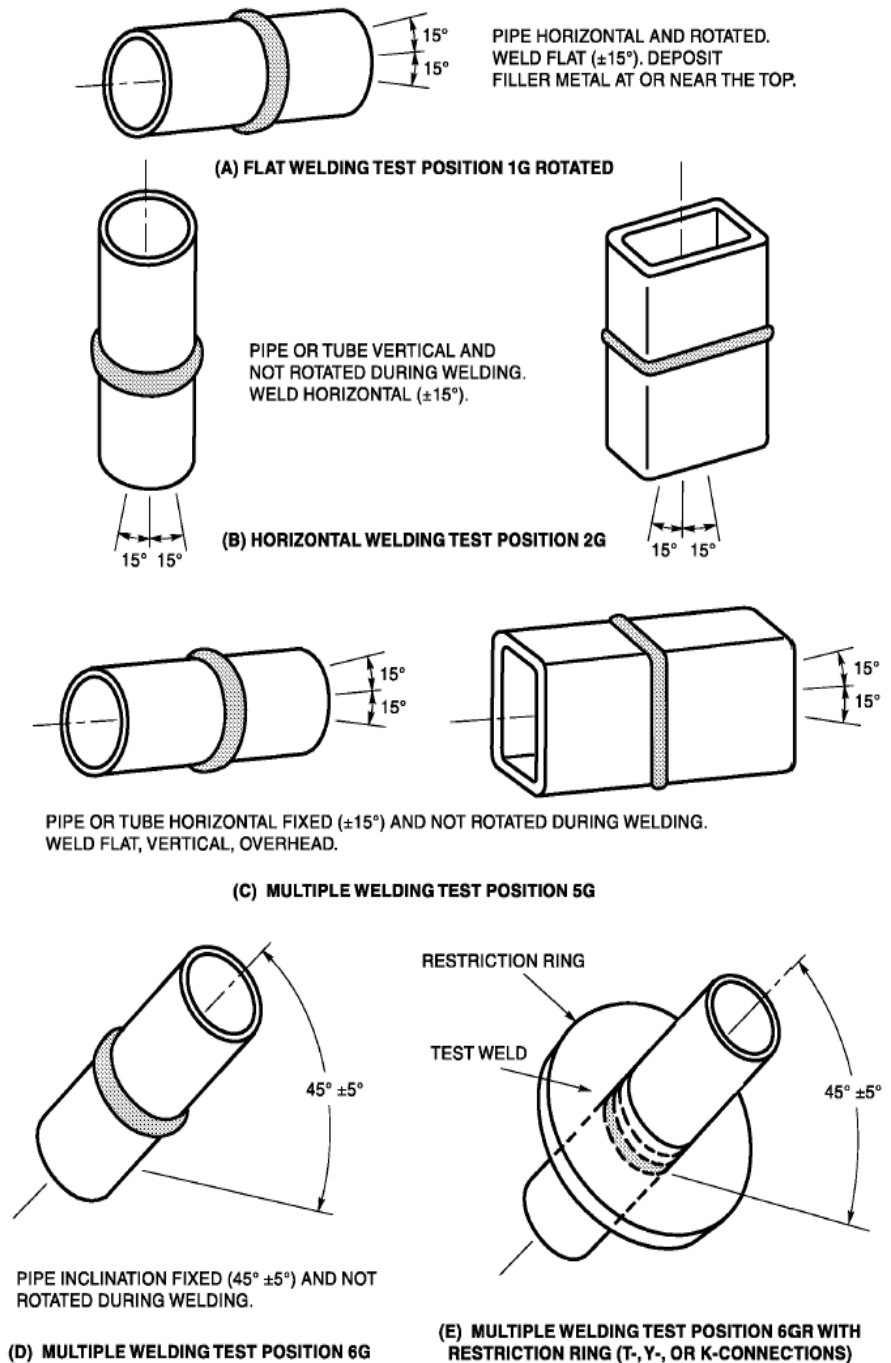
**V:** Posición Vertical

**OH:** Posición sobrecabeza.

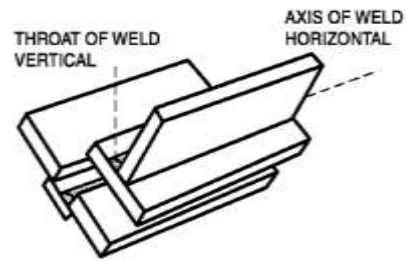
Pruebas de posiciones tenemos a continuación:



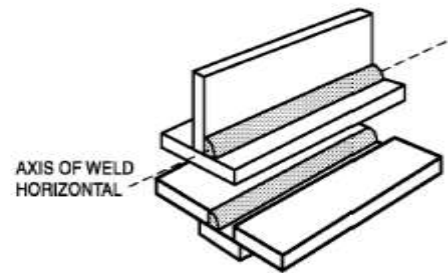
**FIGURA 1.30: Posición de las pruebas en planchas de Soldadura por Ranura (9).**



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

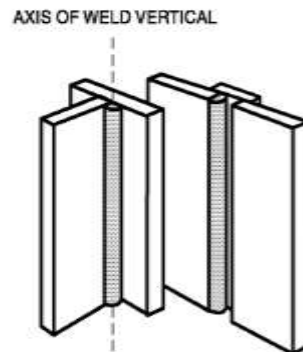


(A) FLAT WELDING TEST POSITION 1F

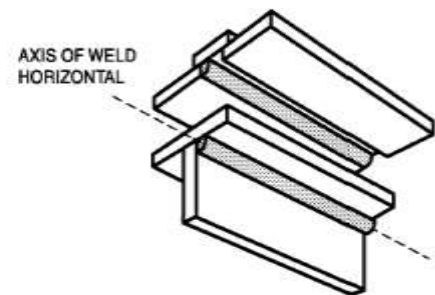


Note: One plate must be horizontal.

(B) HORIZONTAL WELDING TEST POSITION 2F



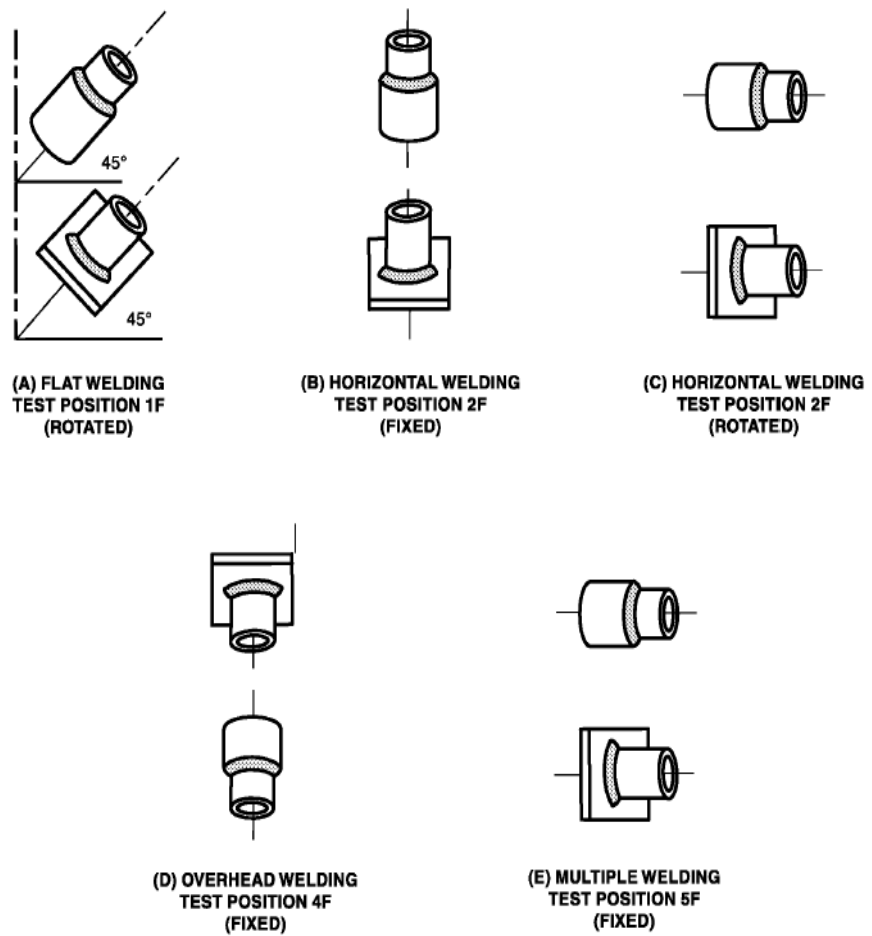
(C) VERTICAL WELDING TEST POSITION 3F



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**

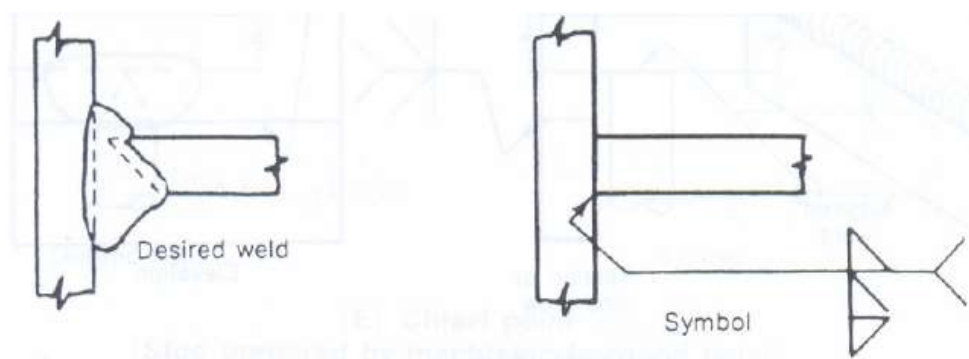
### **2.1 CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

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 <sub>2</sub>     | 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 <sub>2</sub> | 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 <sub>2</sub>  | 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 <sub>2</sub>     |            |           |                  |              |               |                              |  | Corto Circuito         |
|                          |            |           |                  |              |               |                              |  | Globular               |
|                          |            |           |                  |              |               |                              |  | Spray                  |
| 80%Ar+20%CO <sub>2</sub> |            |           |                  |              |               |                              |  | Corto Circuito         |
|                          |            |           |                  |              |               |                              |  | Globular               |
|                          |            |           |                  |              |               |                              |  | Spray                  |
| 92%Ar+8%CO <sub>2</sub>  |            |           |                  |              |               |                              |  | 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)
  - $\phi$ : 1,2 mm
- *Tanque de Gases:*
  - CO<sub>2</sub>

- 80% Ar y 20% CO<sub>2</sub>
- 92% Ar y 8% CO<sub>2</sub>
- Marca: INDURA
- *Cronómetro*
- *Flexómetro*
- *Multímetro sensorial*

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

### **2.3.1 100 % CO<sub>2</sub>**

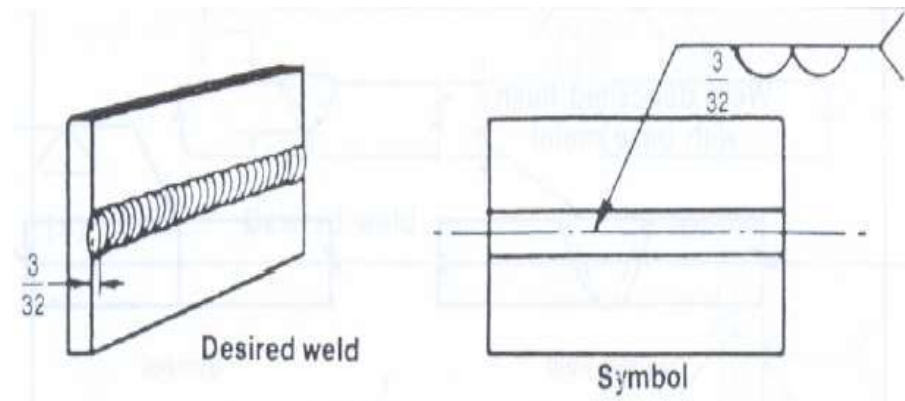
El desarrollo de este tipo soldadura con 100% CO<sub>2</sub> se llevará a cabo con el método de transferencia a través de Corto Circuito y Globular, debido a que por medio de transferencia Spray no es factible realizar este procedimiento (3,4).

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.

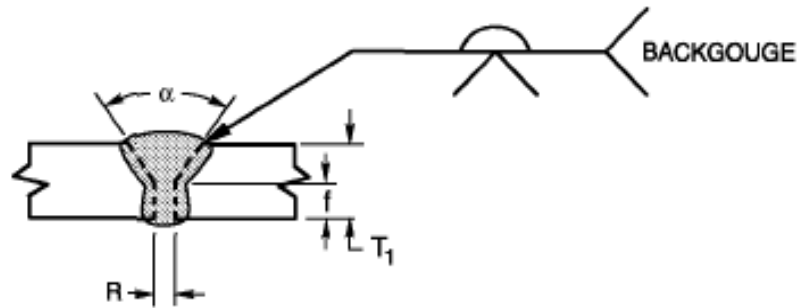
Para tener una mejor apreciación del trabajo desarrollado se presenta el siguiente esquema:



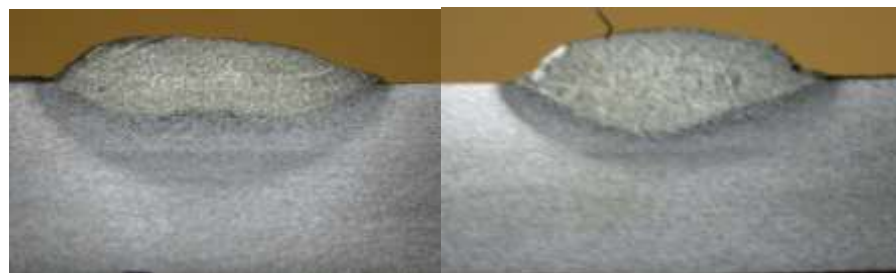
**FIGURA 2.2: Esquema del tipo de soldadura con 100% CO<sub>2</sub>, en los diferentes tipos de transferencia: Corto Circuito y Globular (1).**

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% CO<sub>2</sub>, en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito y (b) Globular.**

### **2.3.2 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>**

El desarrollo de este tipo soldadura con 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> 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:

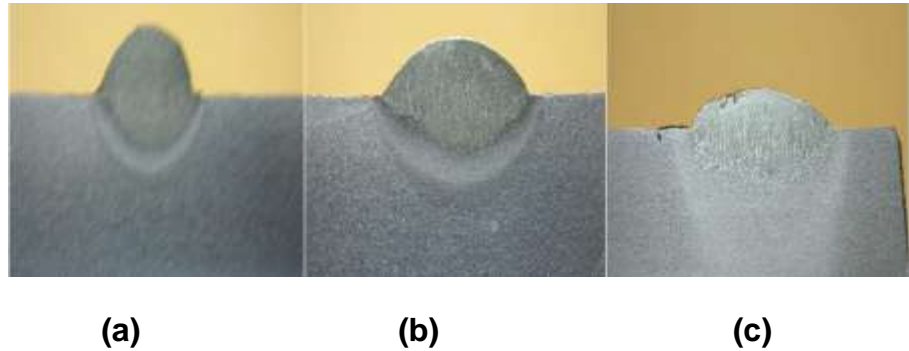
1. Preparar las placas.
2. Calibrar el equipo con Voltaje, Amperaje y Stick out.
3. Ejecución de la Soldadura.

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 % CO<sub>2</sub>, en los diferentes tipos de transferencia: (a) Corto Circuito, (b) Globular y (c) Spray.**

### 2.3.3 92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>

El desarrollo de este tipo soldadura con 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> se llevará a cabo con el método de transferencia a través de Corto Circuito, Globular y Spray.

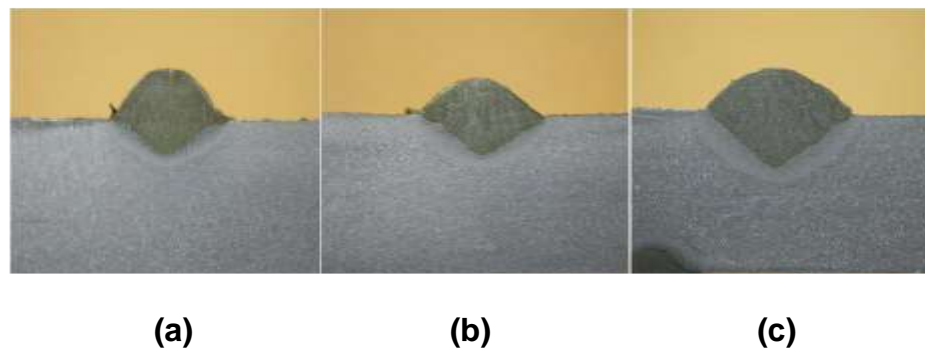
El procedimiento a seguir a través de transferencia en Corto Circuito es el siguiente:

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 % CO<sub>2</sub>, 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 <sub>2</sub>     | 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 <sub>2</sub> | 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 <sub>2</sub>  | 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 <sub>2</sub>     | 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 <sub>2</sub> | 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 <sub>2</sub>  | 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.

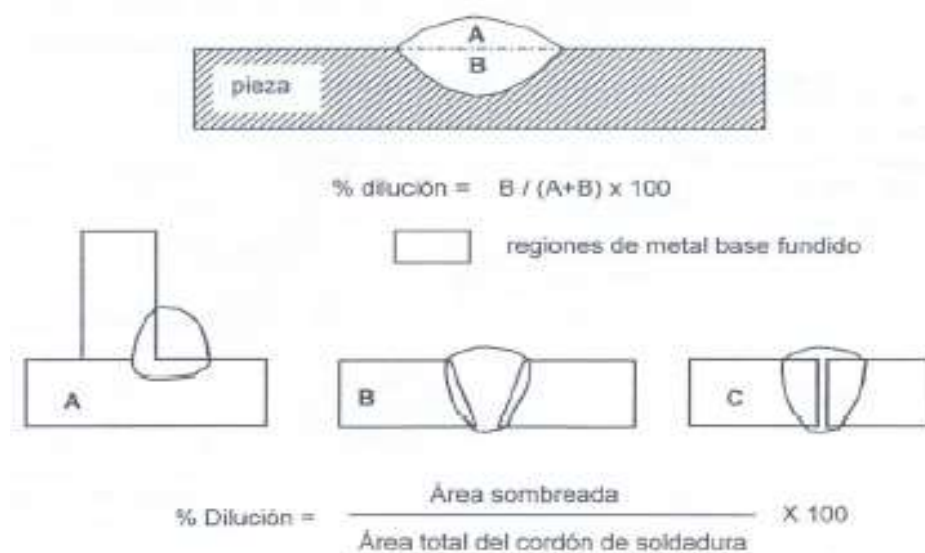
- *Penetración.*

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:

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

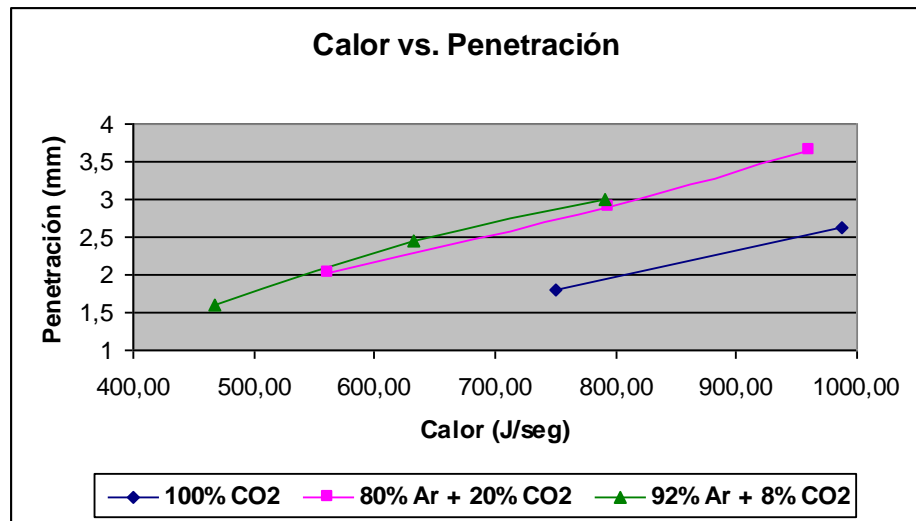
$V$  = Voltaje [Voltios]

$I$  = Corriente [Amperaje]

$v$  = Velocidad de soldeo [mm/seg.]

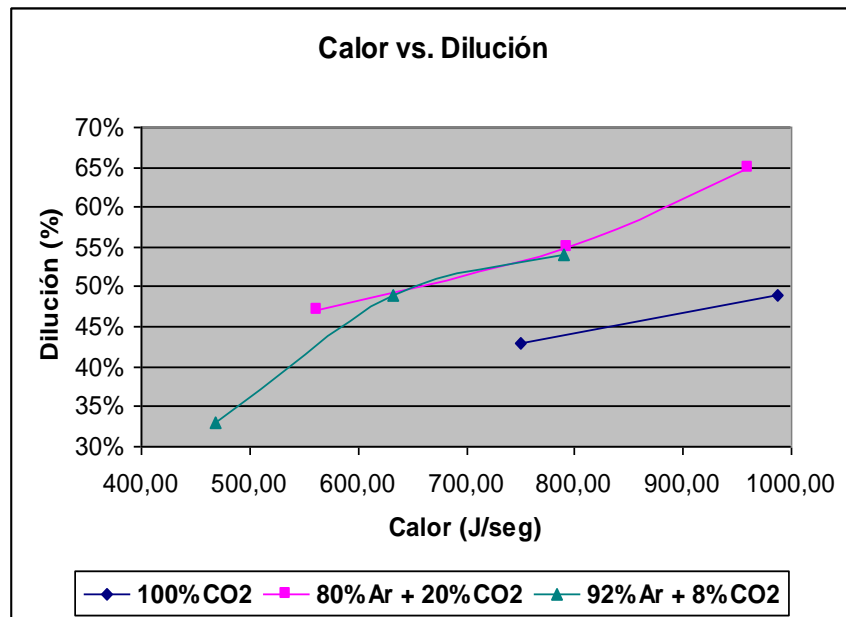
El aporte de calor es el parámetro más importante que condiciona las propiedades mecánicas de la unión soldada dependientes de la micro estructura del material. Los datos del Calor obtenido en cada proceso de Transferencia se encuentran en la Tabla 5.

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% CO<sub>2</sub> 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% CO<sub>2</sub>, 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:

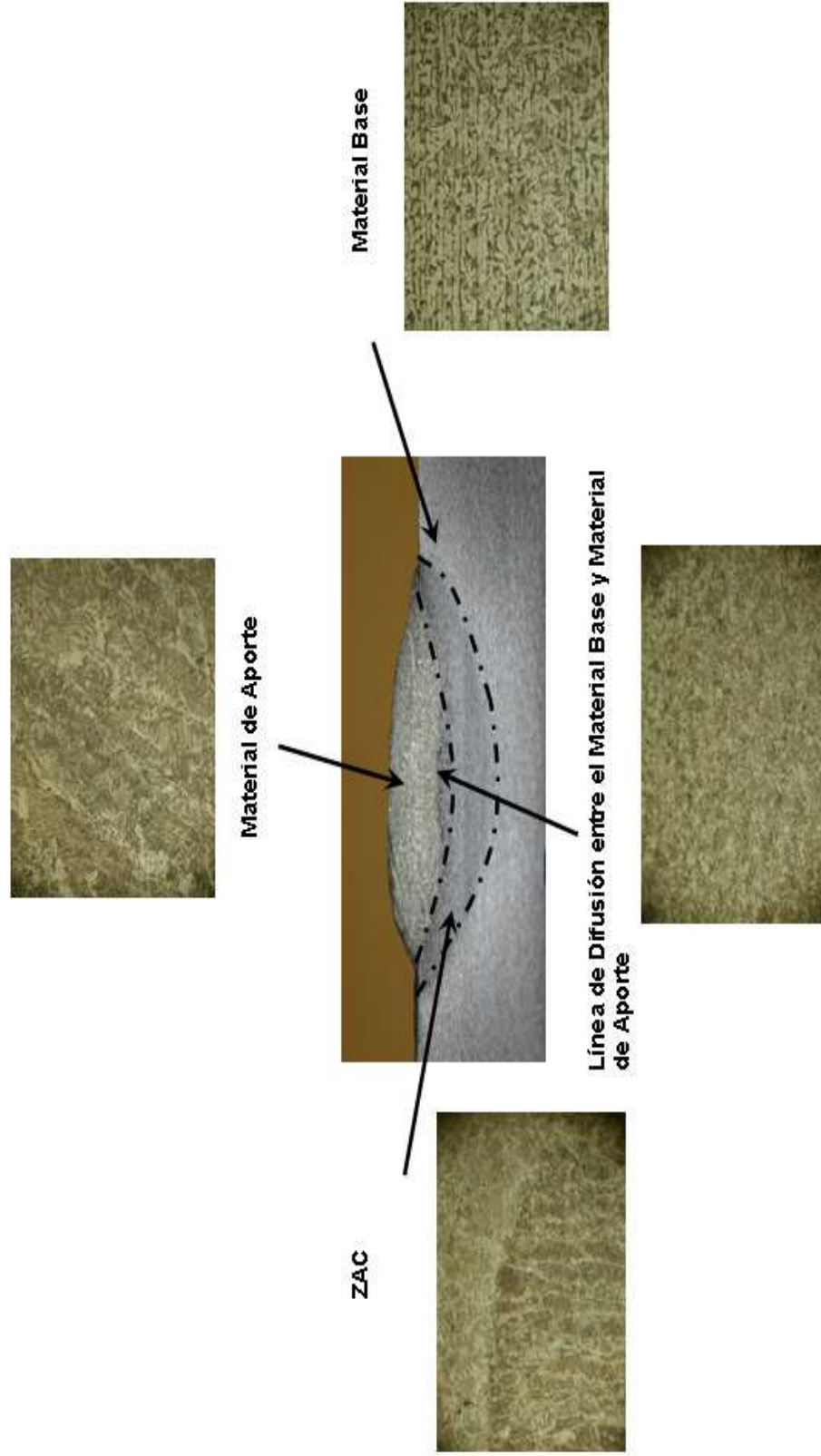
1. Preparar la probeta de acero al Carbono (ASTM A 36) con su respectivo cordón de soldadura.
2. Realizar cortes transversales a través de la probeta y rectificarla.
3. Preparar los cortes para hacer ataque macroscópico y poder analizar el ancho del ZAC, del cordón, Penetración y Dilución.  
Para lo 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.

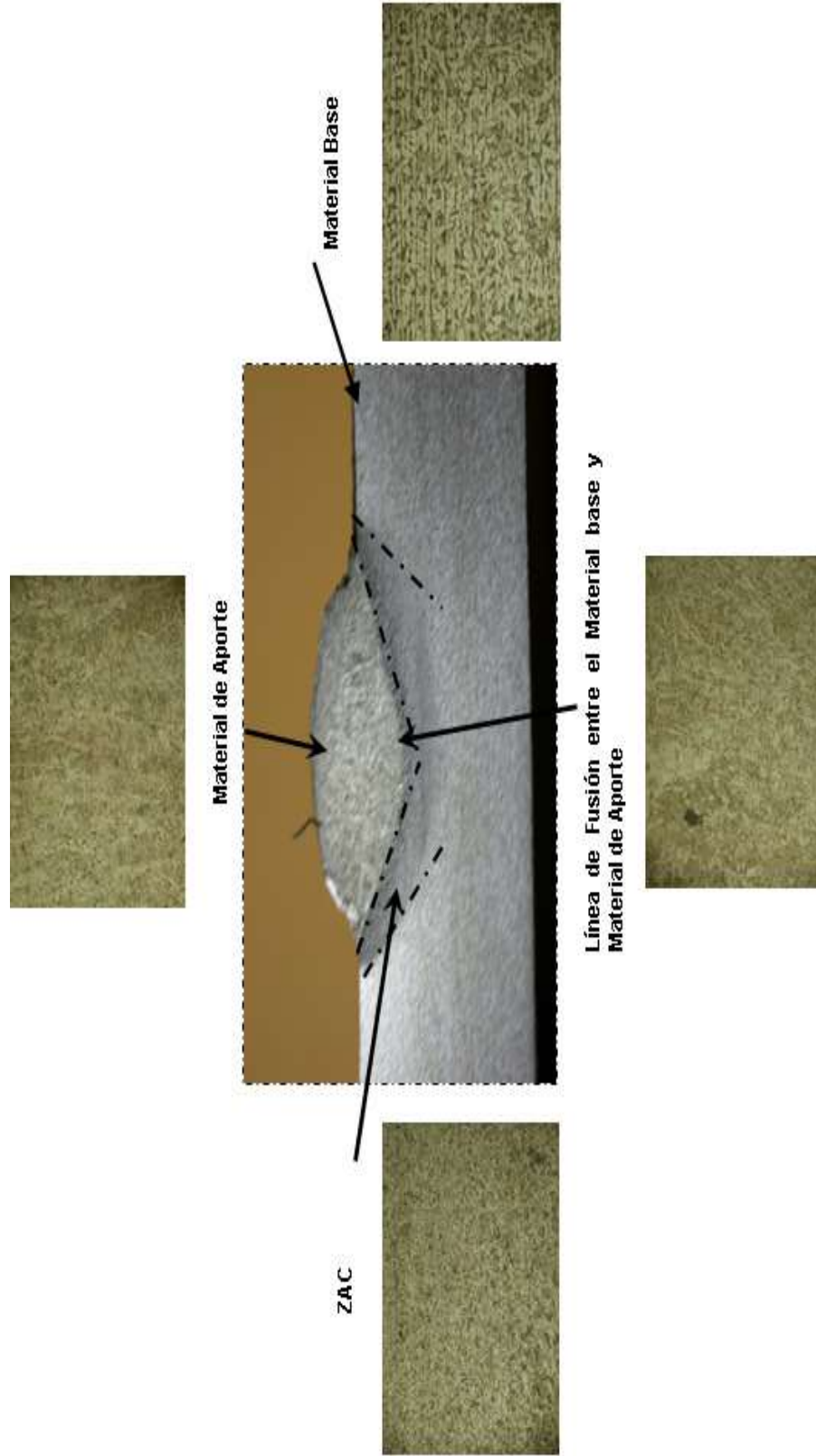
**Nota: Todas las fotos fueron realizadas con un aumento de 160X**

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

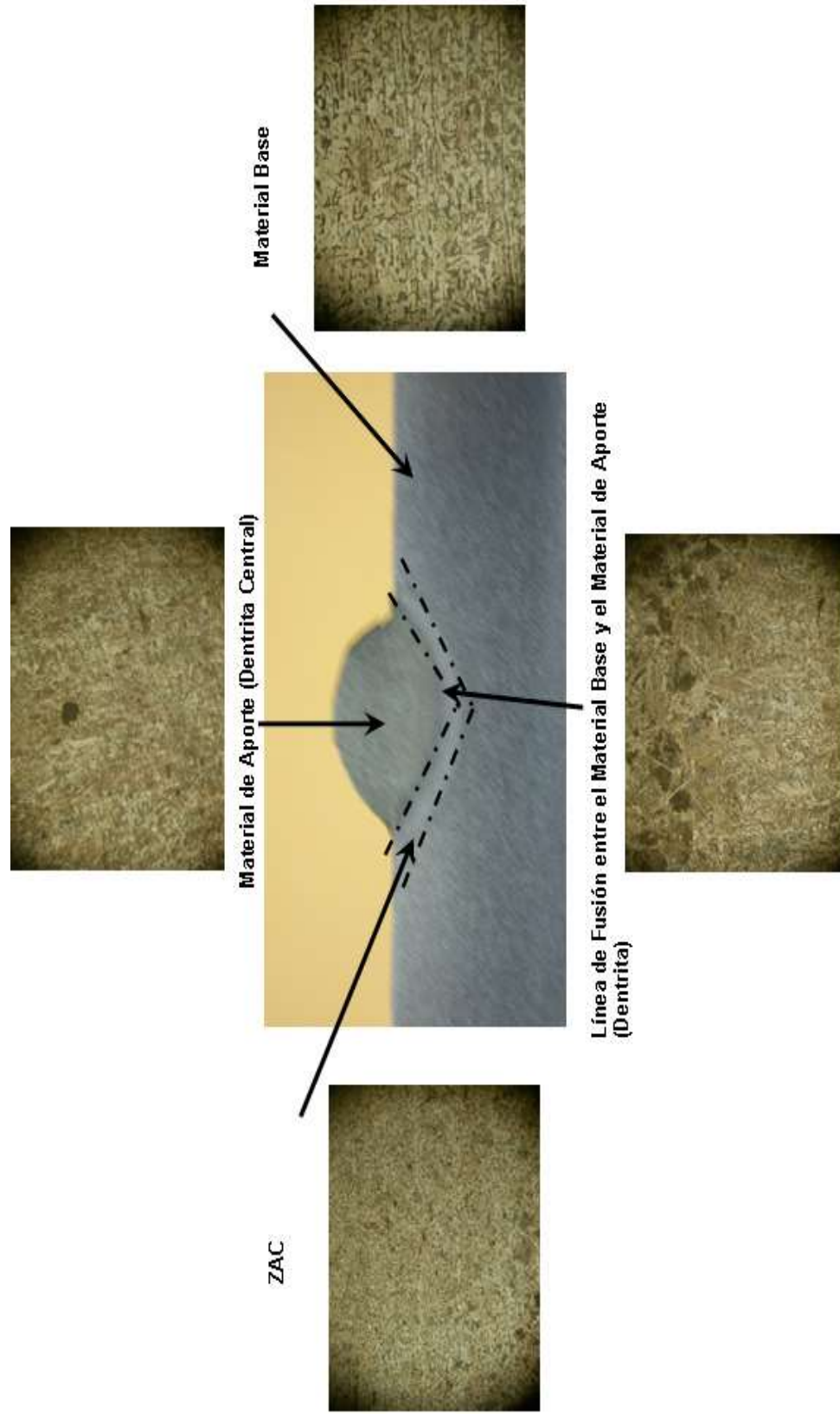




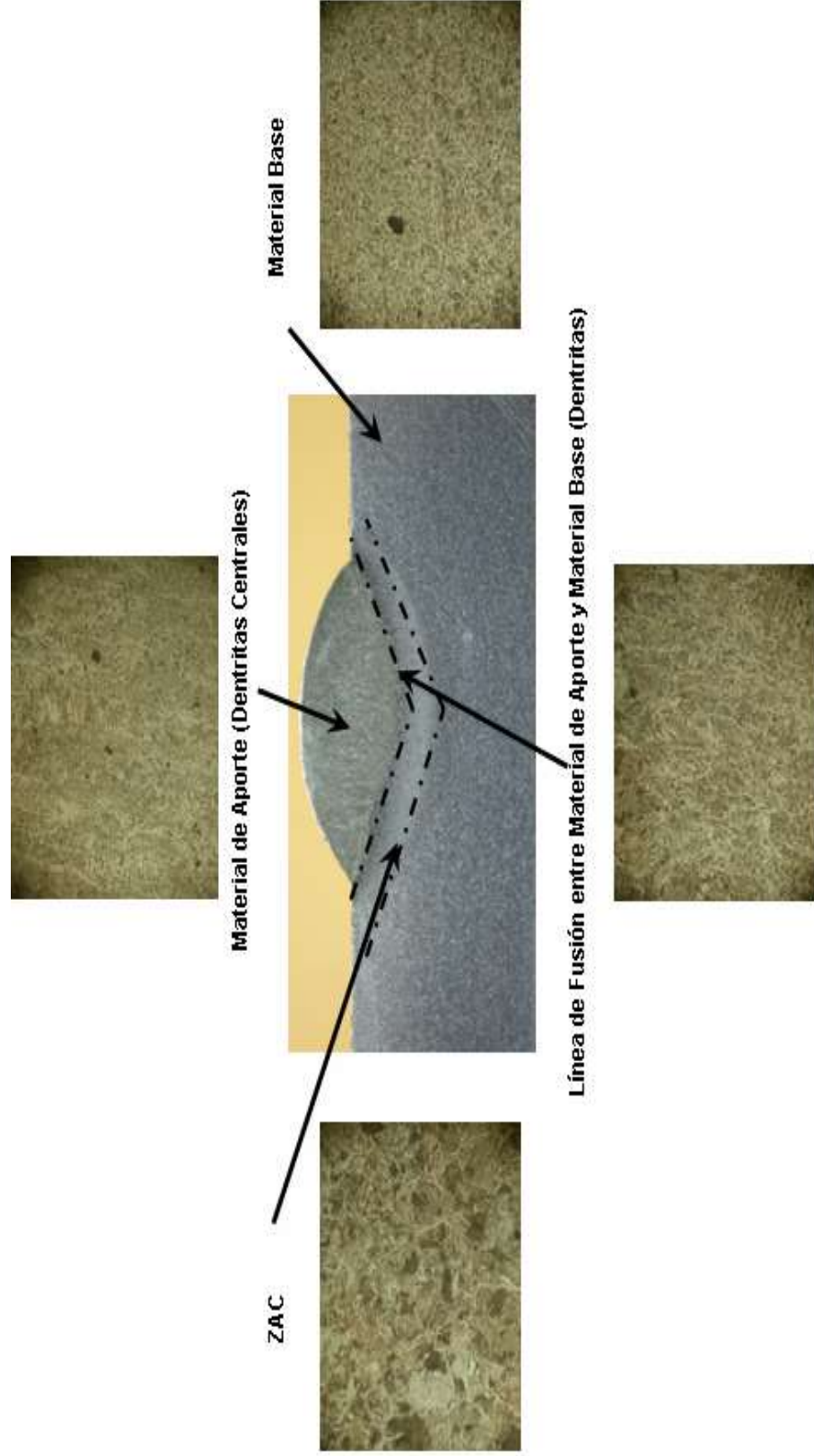
**FIGURA 3.4:** Microestructura de probetas en Corto Circuito, 100% CO<sub>2</sub>.



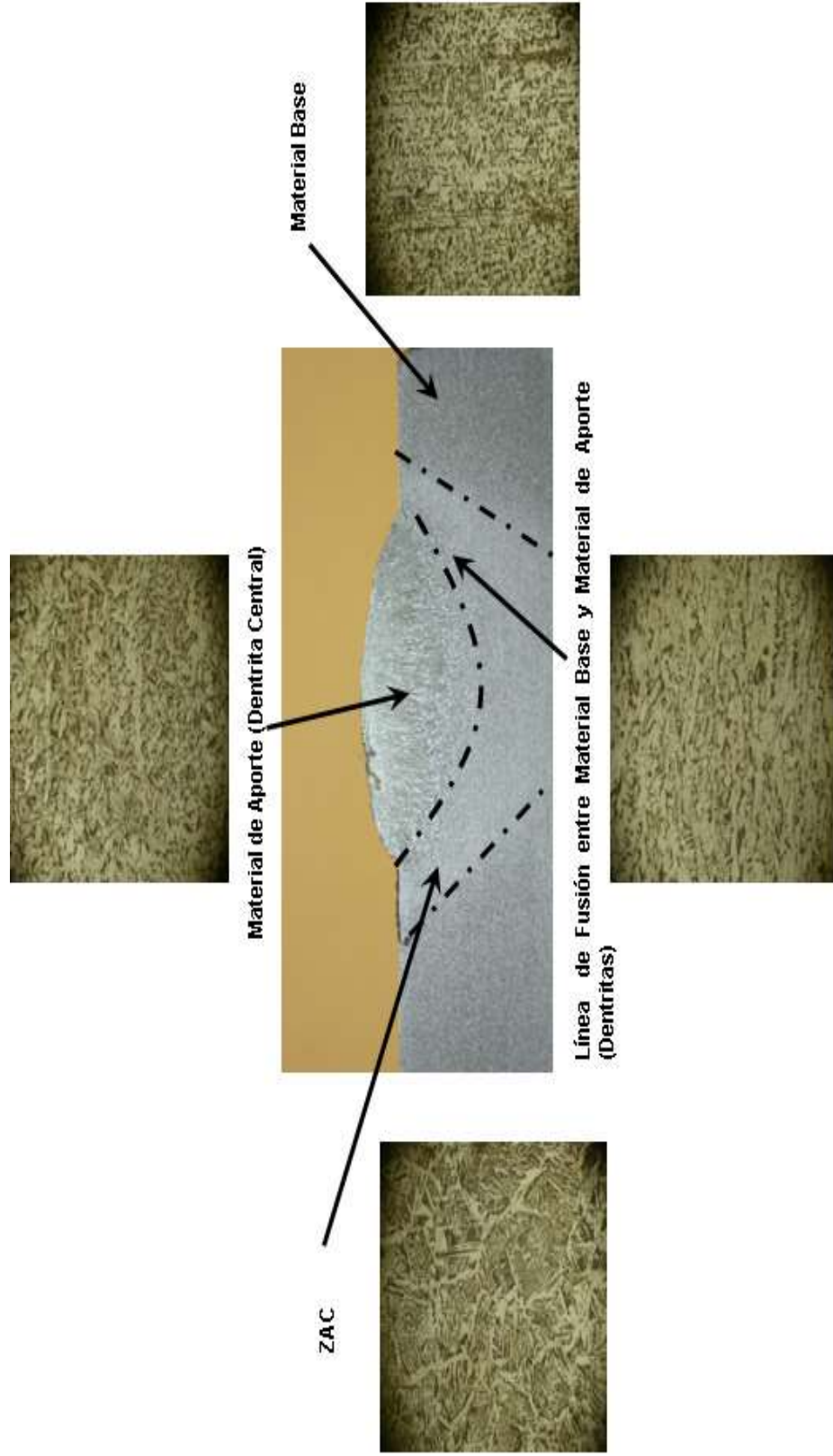
**FIGURA 3.5: Microestructura de probetas en Transferencia en Globular, 100% CO<sub>2</sub>**



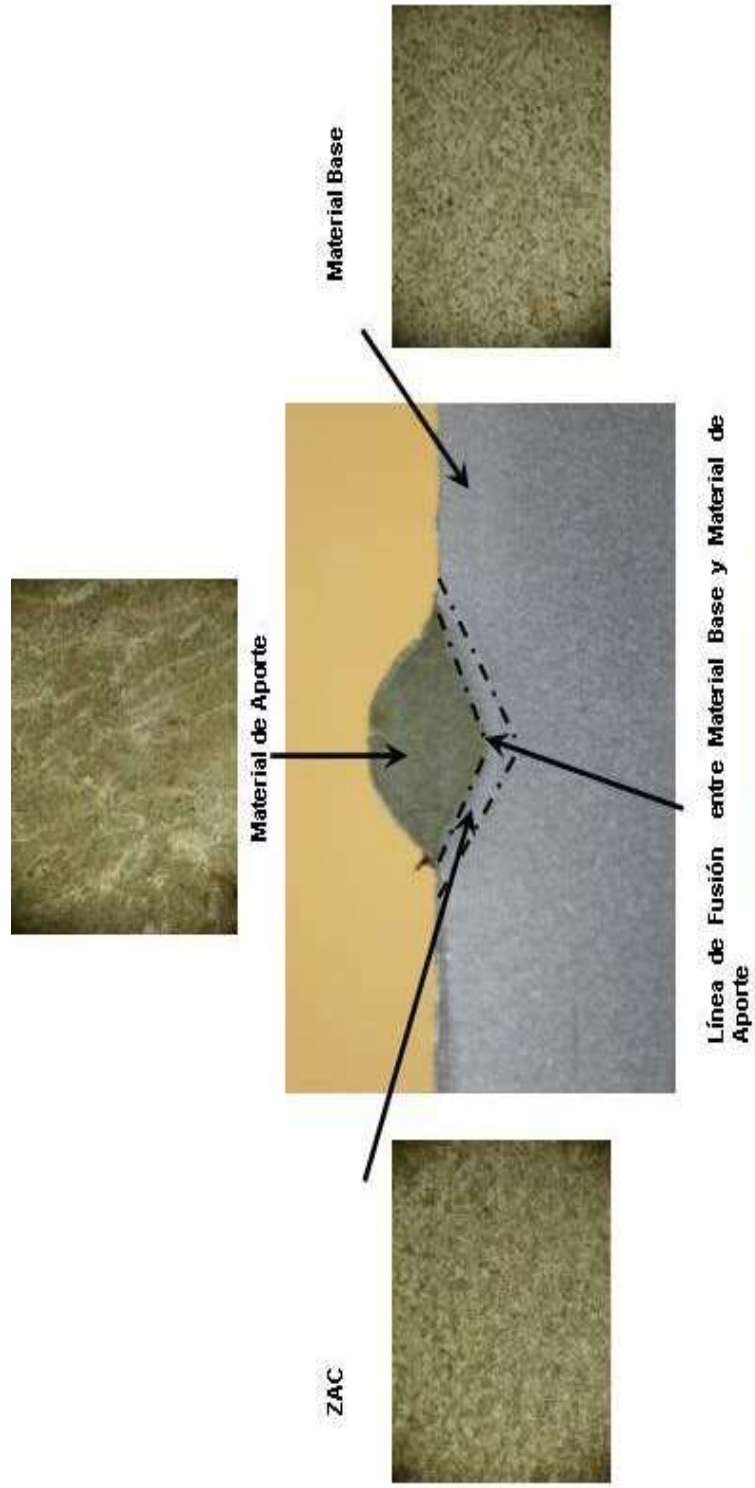
**FIGURA 3.6:** Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>



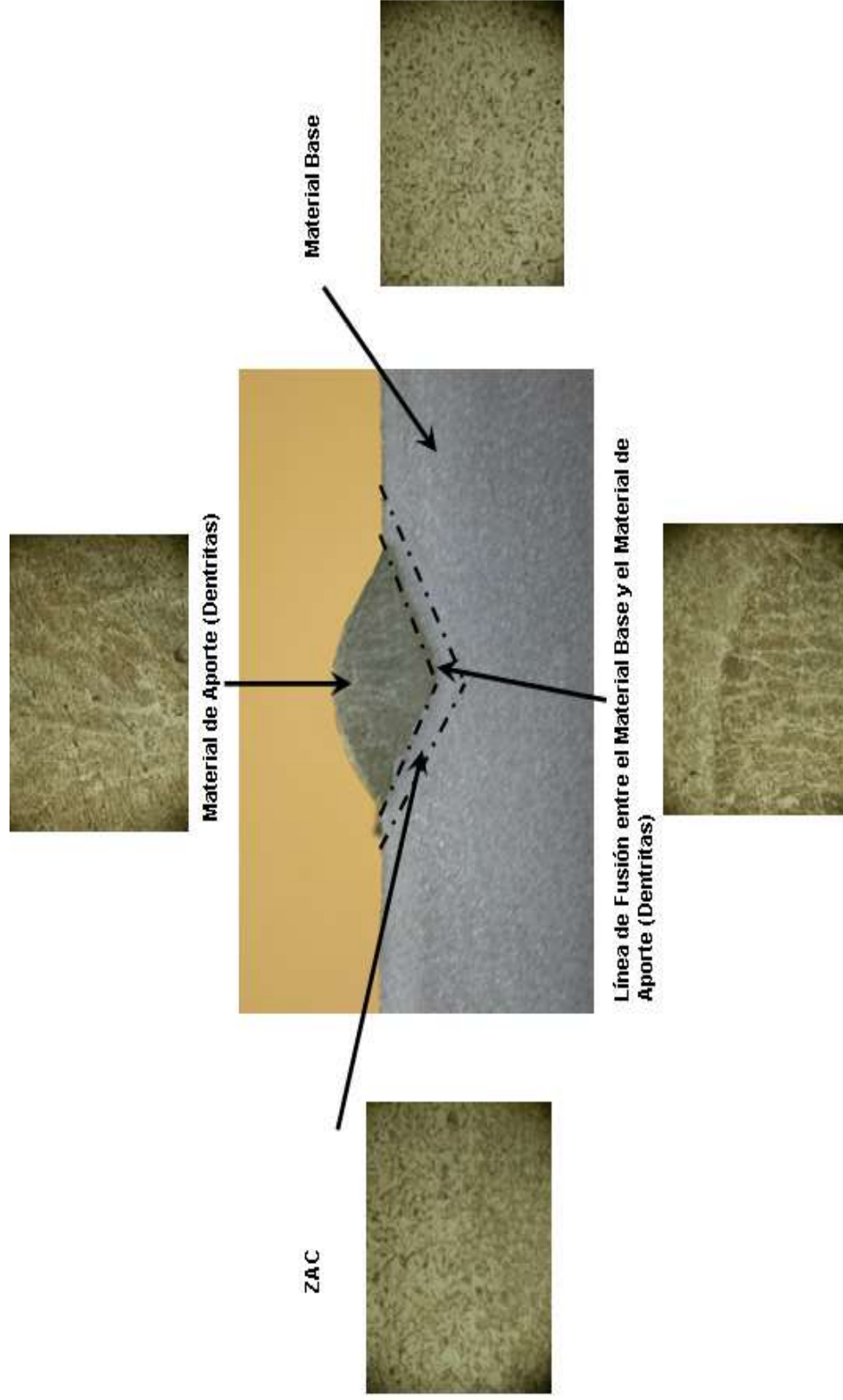
**FIGURA 3.7: Microestructura de probetas en Transferencia en Globular, 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>**



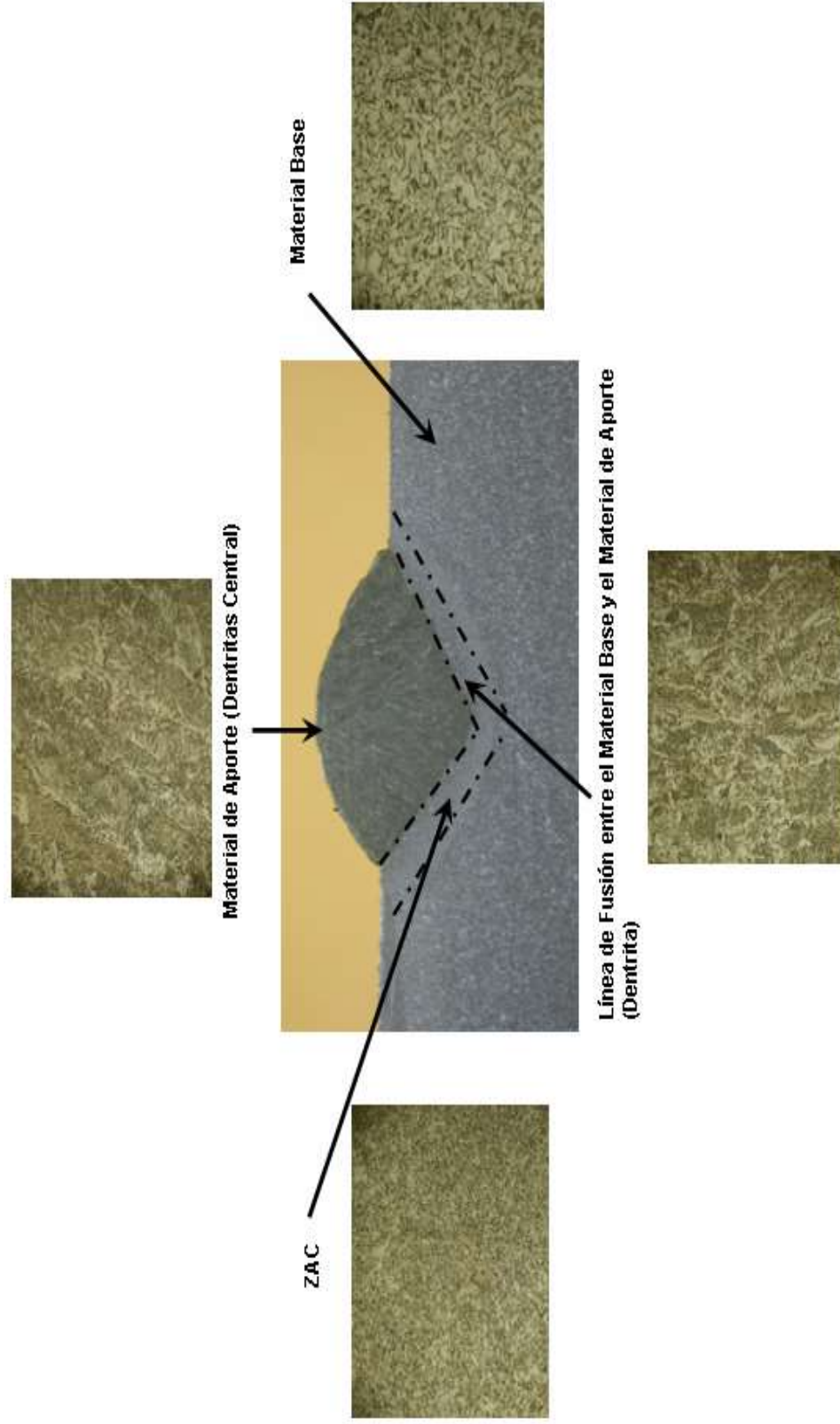
**FIGURA 3.8:** Microestructura de probetas en Spray, 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>



**FIGURA 3.9: Microestructura de probetas en Transferencia en Corto Circuito, 92 % Ar + 8 % C O<sub>2</sub>**



**FIGURA 3.10: Microestructura de probetas en Transferencia Globular, 92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>**



**FIGURA 3.11: Microestructura de probetas en Transferencia en Spray, 92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>**



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 Dentrinas, 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 Dentrinas alargadas.

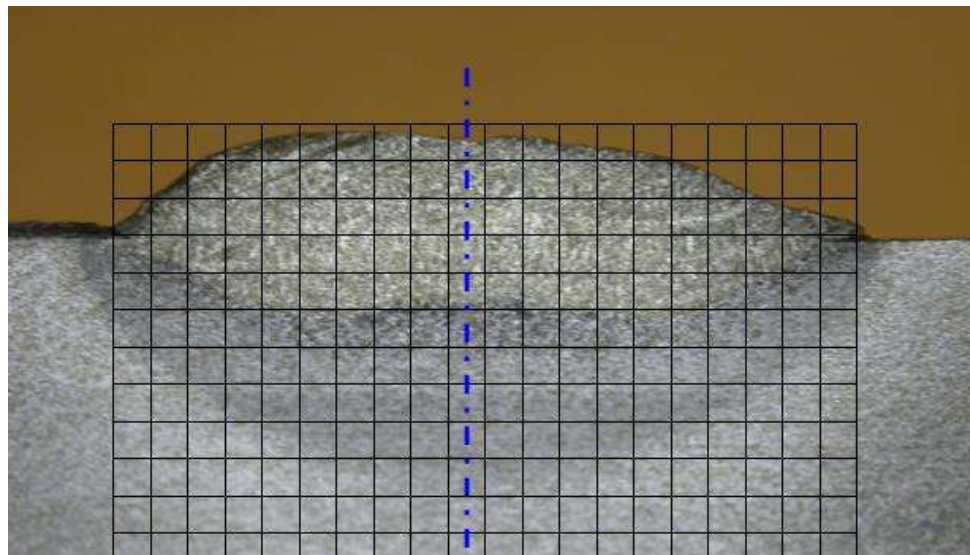
*Afectada por el Calor:* La microestructura presenta perlitas y ferritas, debido al proceso de enfriamiento que se da durante el proceso de soldadura. Es decir, la temperatura inicial del proceso de soldadura sobrepasa los  $700^{\circ}\text{C}$ , por lo que el material presenta una microestructura austenítica, 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.

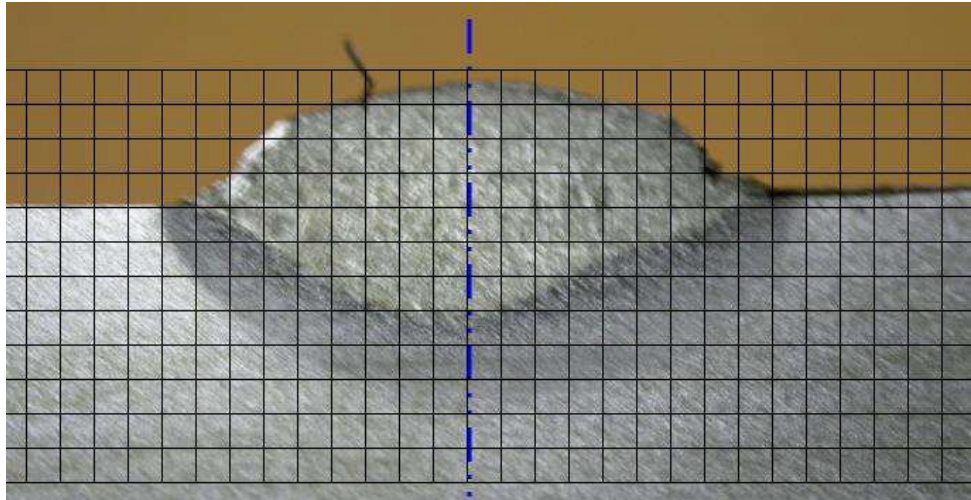
*Material Base:* La microestructura existente en un acero de bajo porcentaje de carbono es de Perlita y Ferrita.

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% CO<sub>2</sub>**

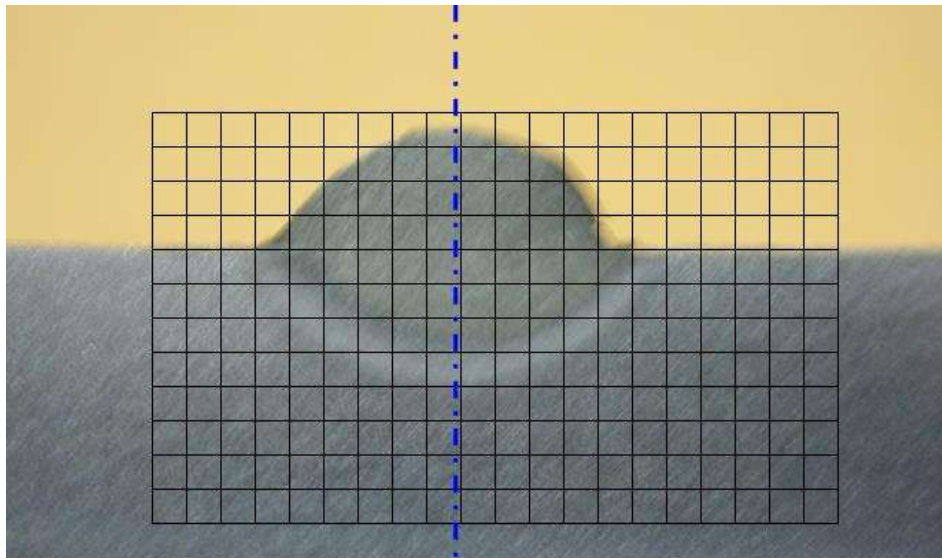


**FIGURA 3.12: Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Corto Circuito, 100% CO<sub>2</sub>.**

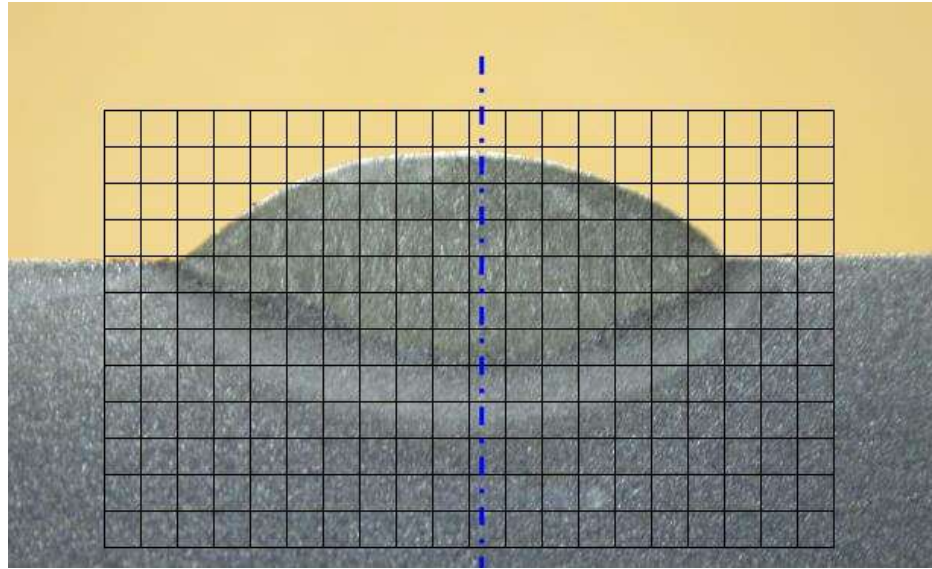


**FIGURA 3.13: Penetración y Dilución de probetas en Transferencia a través de Globular, 100% CO<sub>2</sub>.**

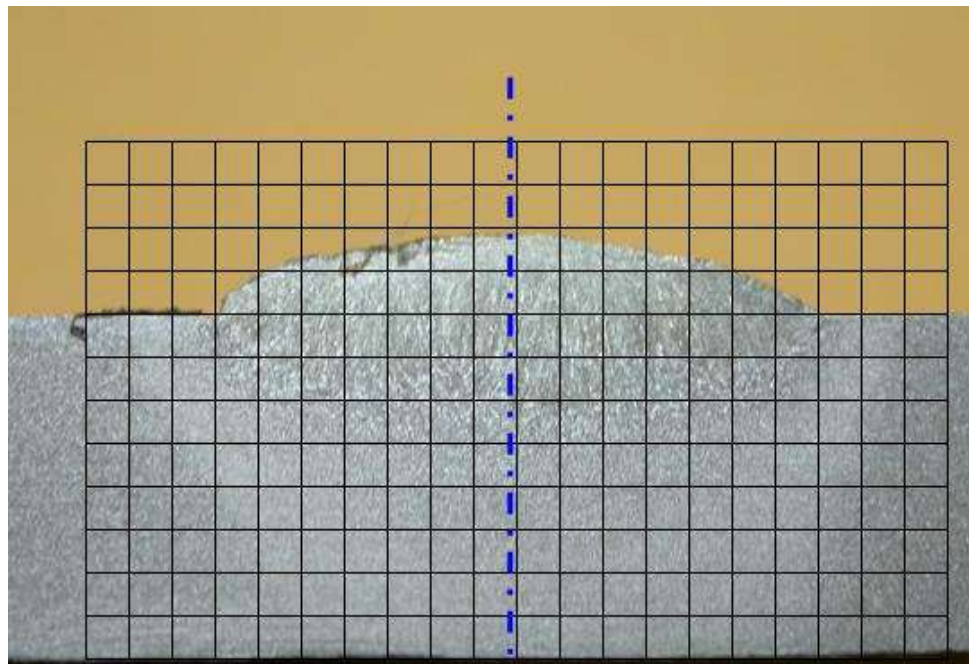
**80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>**



**FIGURA 3.14: Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO<sub>2</sub>, en Transferencia en Corto Circuito.**

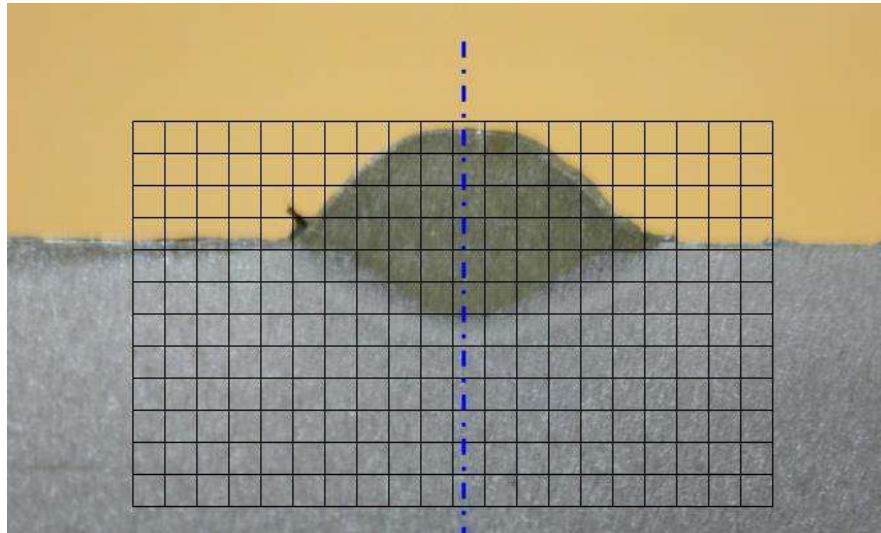


**FIGURA 3.15: Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO<sub>2</sub>, en Transferencia Globular.**

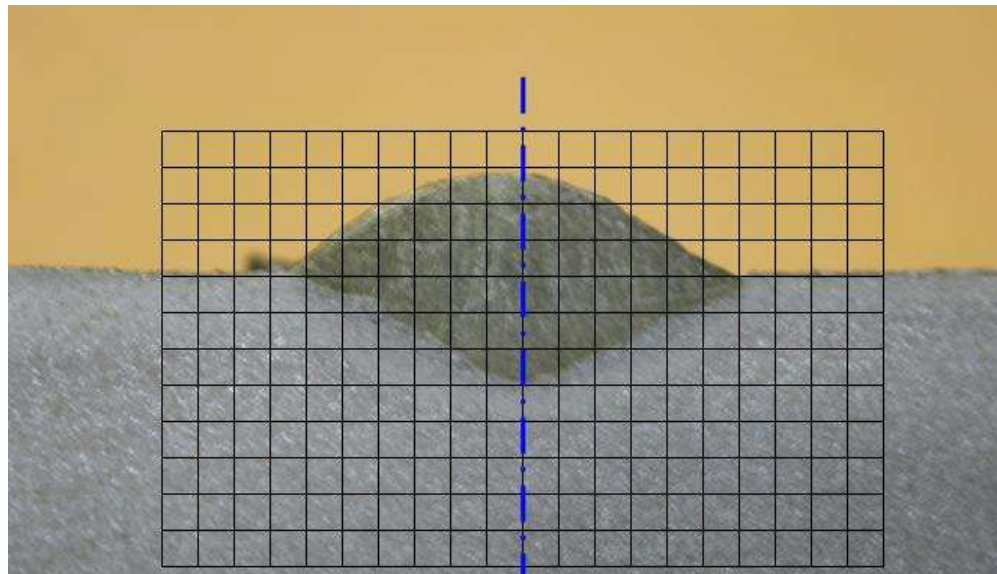


**FIGURA 3.16: Penetración y Dilución de la probeta 80 % Ar + 20 %CO<sub>2</sub>, en Transferencia Spray.**

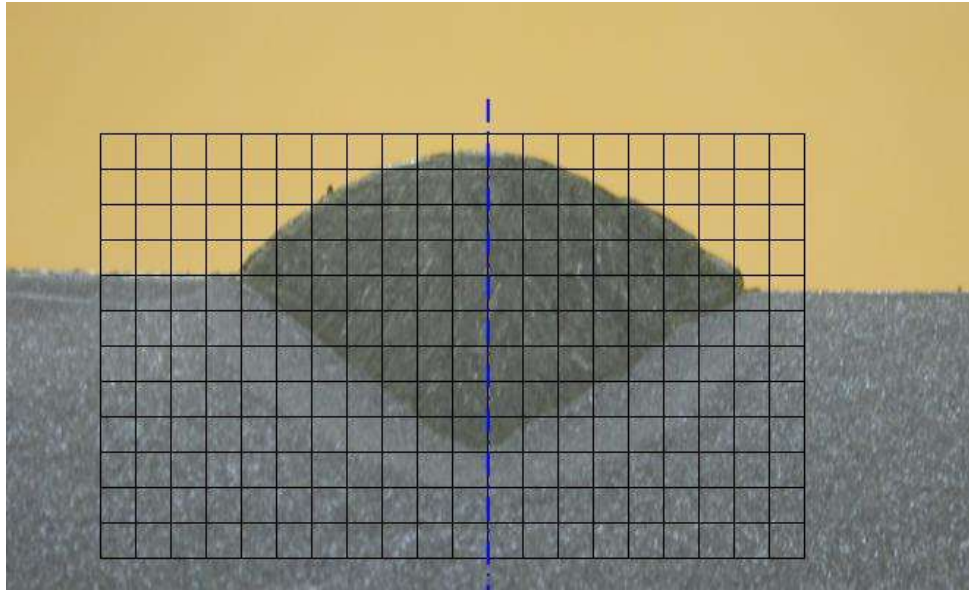
**92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>**



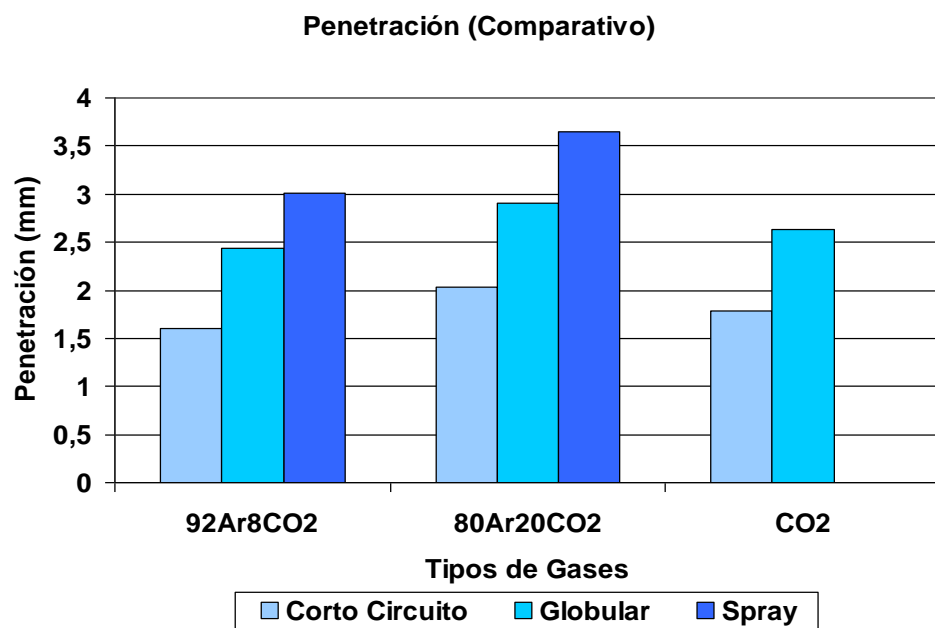
**FIGURA 3.17: Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>, en Transferencia en Corto Circuito.**



**FIGURA 3.18: Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>, en Transferencia Globular.**

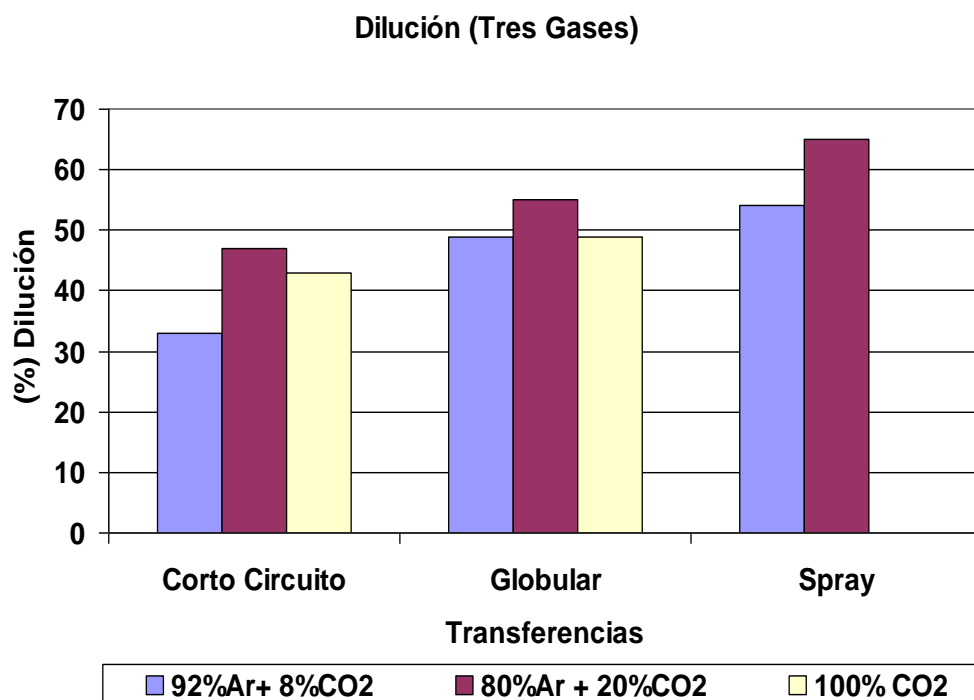


**FIGURA 3.19: Penetración y Dilución de la probeta 92 % Ar + 8 % CO<sub>2</sub>, en Transferencia Spray.**



**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  $80\%Ar + 20\%CO_2$ , 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% CO<sub>2</sub>, 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% CO<sub>2</sub> y 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> pasaron las pruebas con resultados considerables, pero la muestra con 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> 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 <sup>2</sup> ) | Designación | Límite de Fluencia (Mpa) | Esfuerzo Máximo (Mpa) | Localización de Rotura | Elongación (%) |       |
|----------------|---------------------------|------------|-------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|-------|
| Corto Circuito | 100% CO <sub>2</sub>      | 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 <sub>2</sub> | 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 <sub>2</sub>  | 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 <sub>2</sub>     | 01-1G        | 38 mm        | Cumple  | Cumple  | Cumple  | Cumple  |       |
|                |                          | 02-1G        | 38 mm        | Cumple  | Cumple  | Cumple  | Cumple  |       |
|                | 80%Ar+20%CO <sub>2</sub> | 03-1G        | 38 mm        | Cumple  | Cumple  | Cumple  | Cumple  |       |
|                |                          | 04-1G        | 38 mm        | Cumple  | Cumple  | Cumple  | Cumple  |       |
|                | 92%Ar+8%CO <sub>2</sub>  | 05-1G        | 180°         | 38 mm   | Falló   | Falló   | Falló   | Falló |
|                |                          | 06-1G        | 180°         | 38 mm   | Falló   | Falló   | Falló   | Falló |

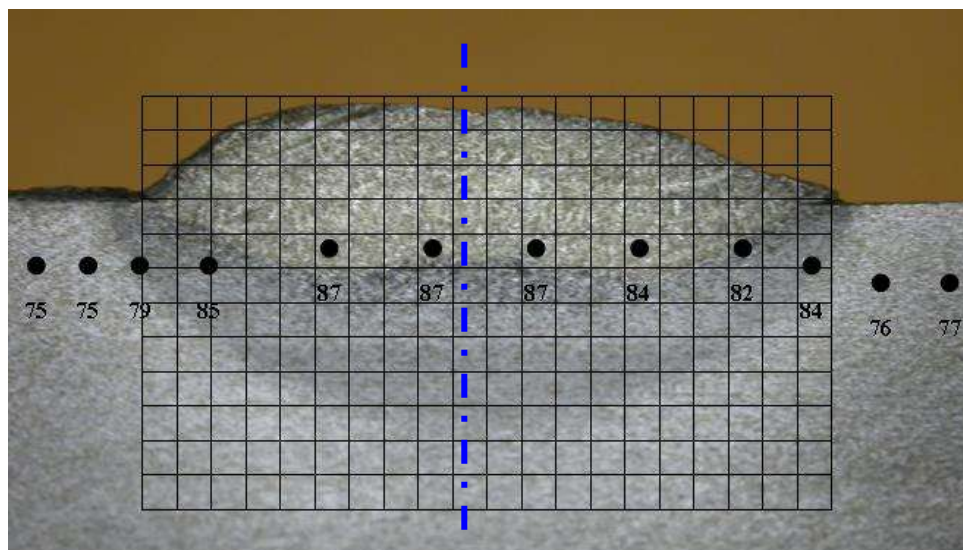
*Dureza:* Se define como su resistencia a la indentación permanente. Un material con buena dureza es resistente al desgaste y al rayado. Las muestras fueron sometidas a este tipo de pruebas, bajo recomendaciones de un proceso precalificado en la Norma AWS D1.1.

#### **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**

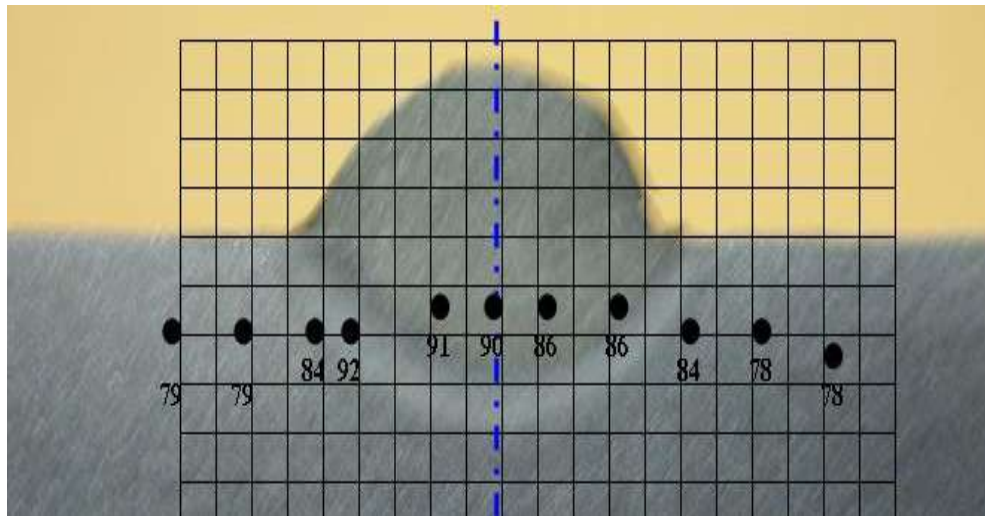


**FIGURA 3.22: Método de Transferencia Corto Circuito con 100% CO<sub>2</sub>**

**Tabla 8**

**Dureza: Corto Circuito 100% CO<sub>2</sub>**

| <b>Distancia (mm)</b> | <b>Dureza (RHB)</b> |
|-----------------------|---------------------|
| -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                  |

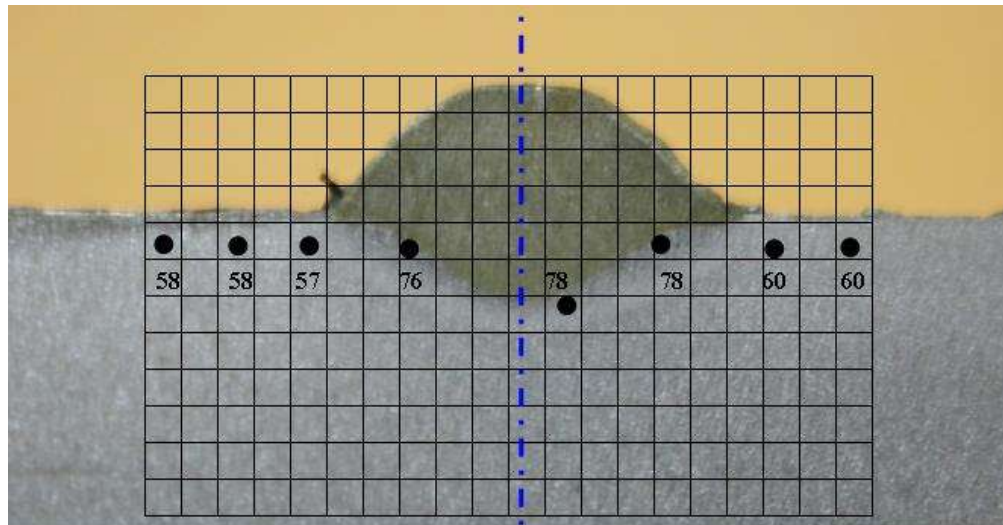


**FIGURA 3.23: Método de Transferencia Corto Circuito con 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>**

**Tabla 9**

**Dureza: Corto Circuito 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>**

| <b>Distancia (mm)</b> | <b>Dureza (RHB)</b> |
|-----------------------|---------------------|
| -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                  |

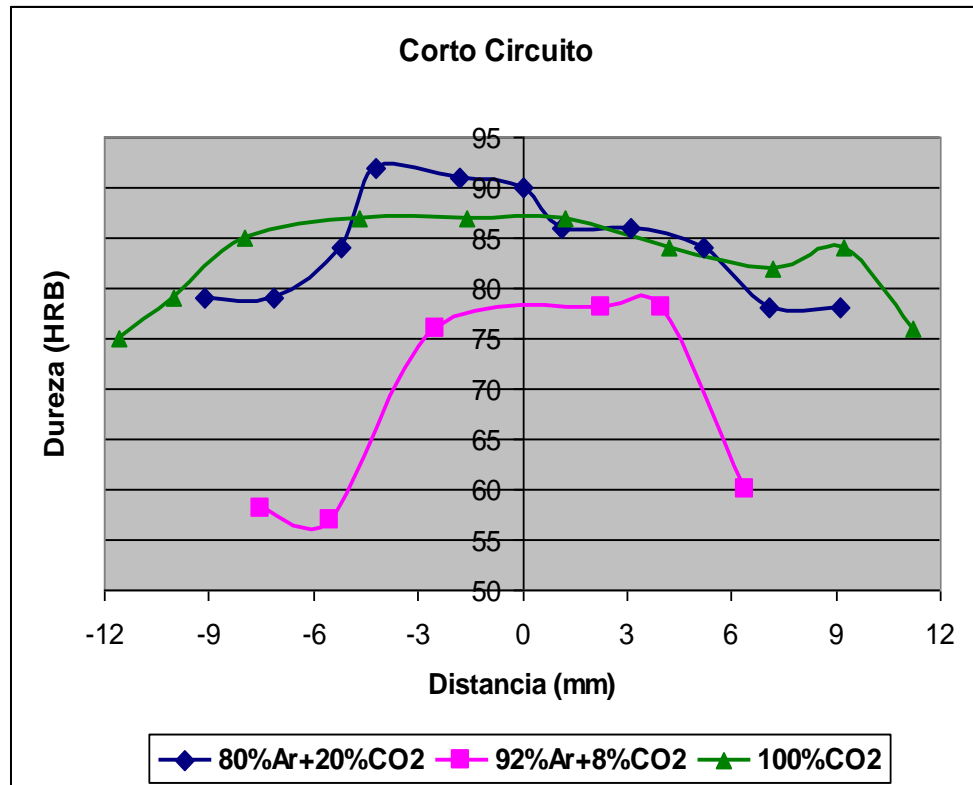


**FIGURA 3.24: Método de Transferencia Corto Circuito con 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>**

**Tabla 10**

**Dureza: Corto Circuito 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>**

| <b>Distancia (mm)</b> | <b>Dureza (RHB)</b> |
|-----------------------|---------------------|
| -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% CO<sub>2</sub>, presentando valores muy cercanos entre sí. Con respecto a la curva de mezcla de 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> 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% CO<sub>2</sub>,



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

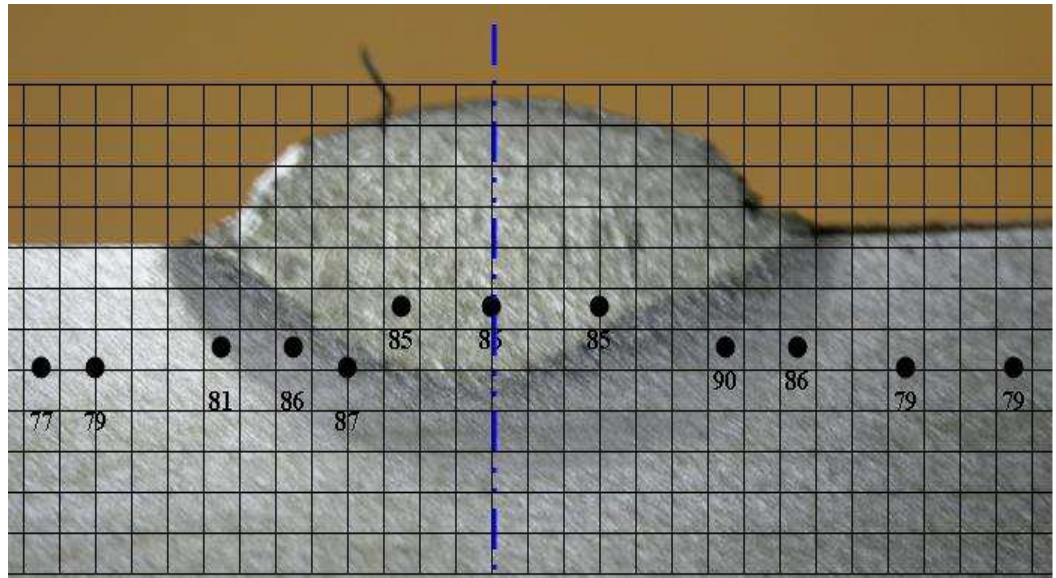


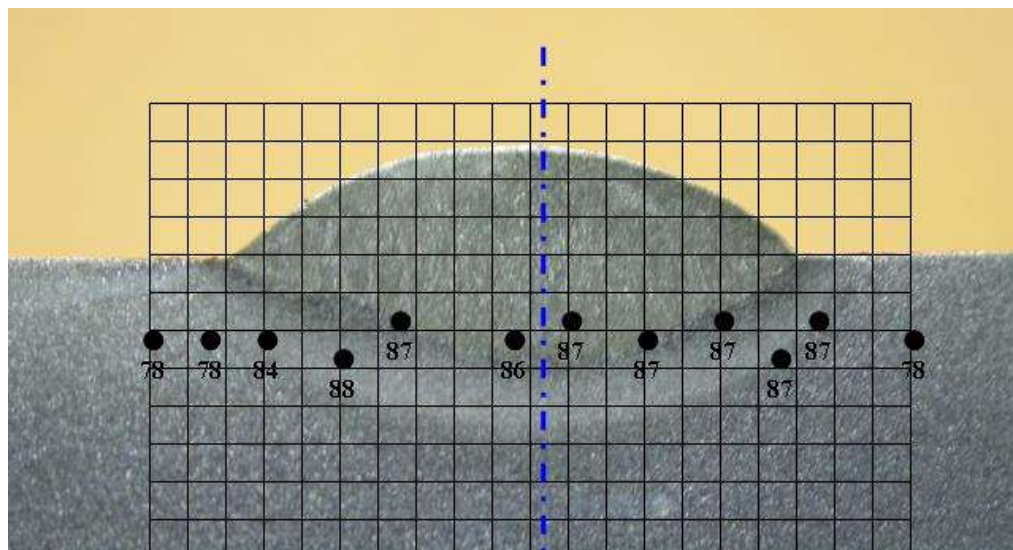
FIGURA 3.26: Método de Transferencia Globular con 100% CO<sub>2</sub>

Tabla 11

Dureza: Globular 100% CO<sub>2</sub>

| 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 |



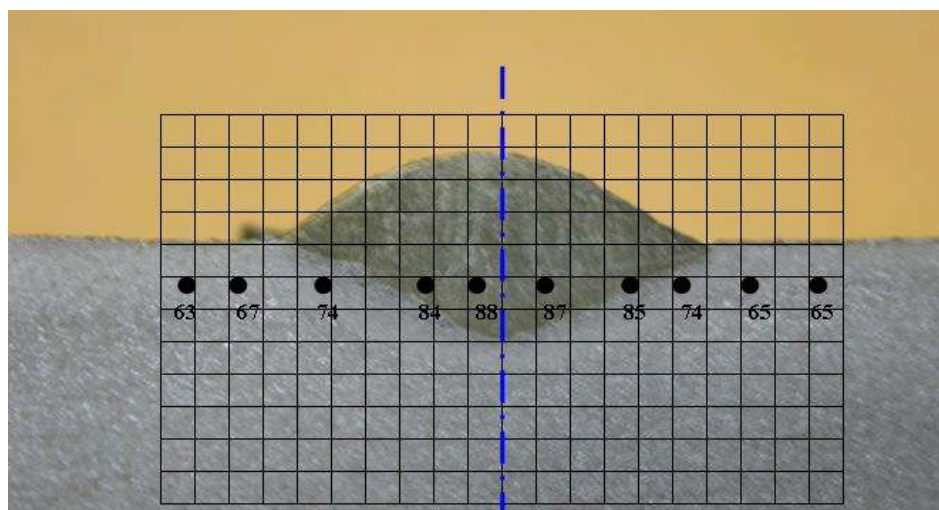
**FIGURA 3.27: Método de Transferencia Globular con 80% Ar +  
20% CO<sub>2</sub>**

**Tabla 12**

**Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>**

| Distancia<br>(mm) | Dureza<br>(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 |



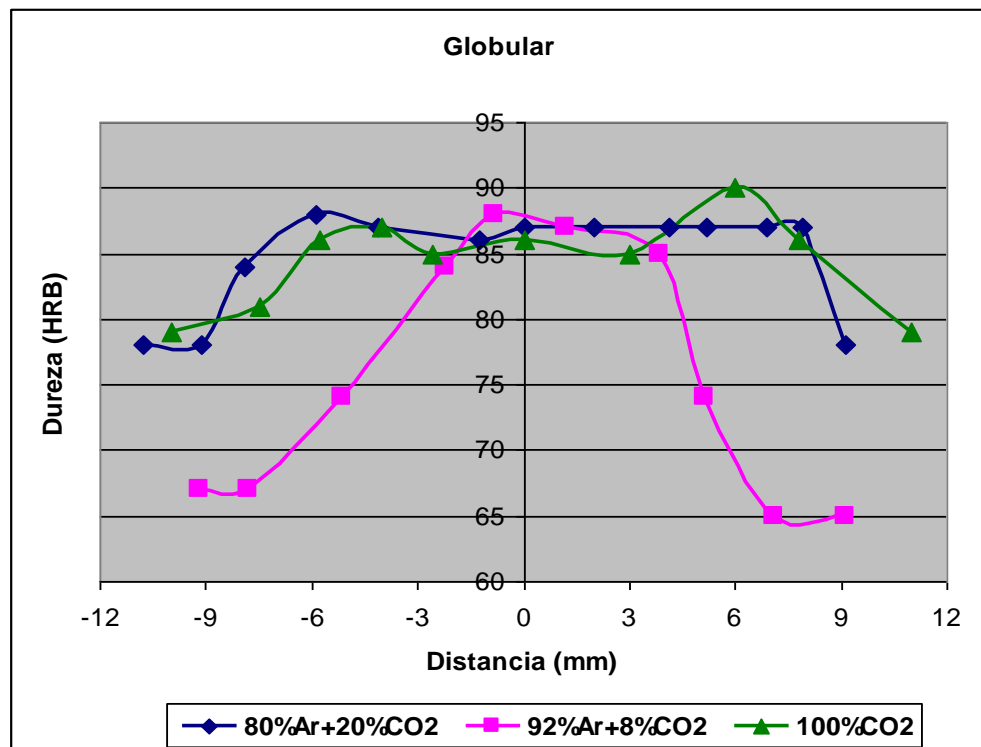
**FIGURA 3.28: Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>**

**Tabla 13**

**Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>**

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

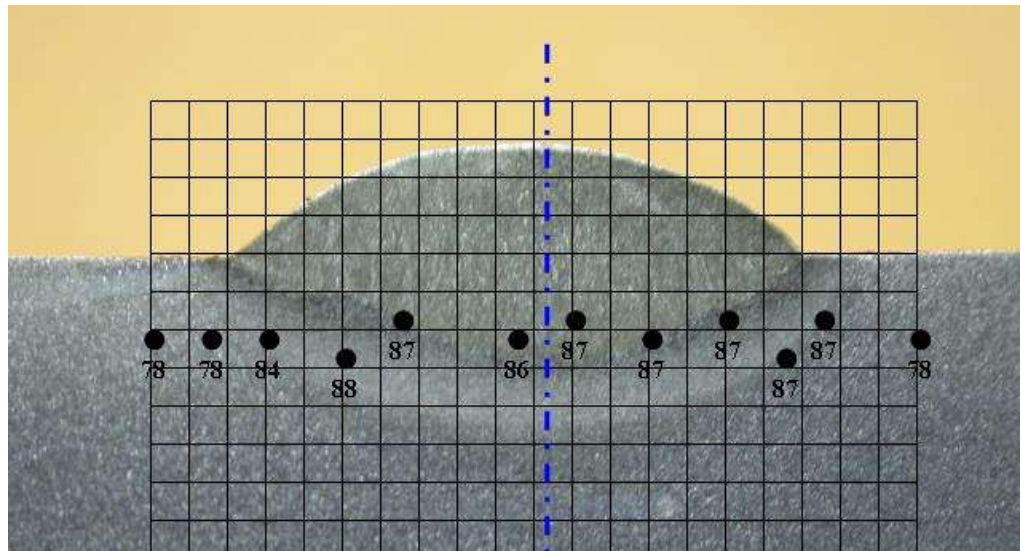
|      |    |
|------|----|
| 1,2  | 87 |
| 3,85 | 85 |
| 5,15 | 74 |
| 7,1  | 65 |
| 9,1  | 65 |



**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% CO<sub>2</sub> 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% CO<sub>2</sub>, y por último el 92%

Ar + 8% CO<sub>2</sub>, cuyos valores de dureza son más distantes en la Zona de Material de Aporte con respecto al resto de las zonas.



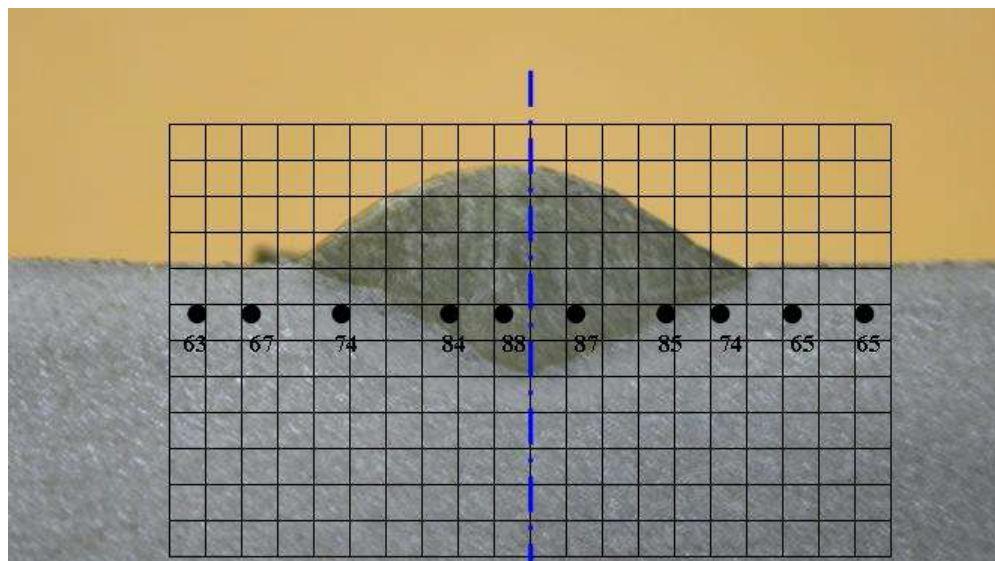
**FIGURA 3.30: Método de Transferencia Globular con 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>**

**Tabla 14**

**Dureza: Globular 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>**

| <b>Distancia (mm)</b> | <b>Dureza (RHB)</b> |
|-----------------------|---------------------|
| -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 |



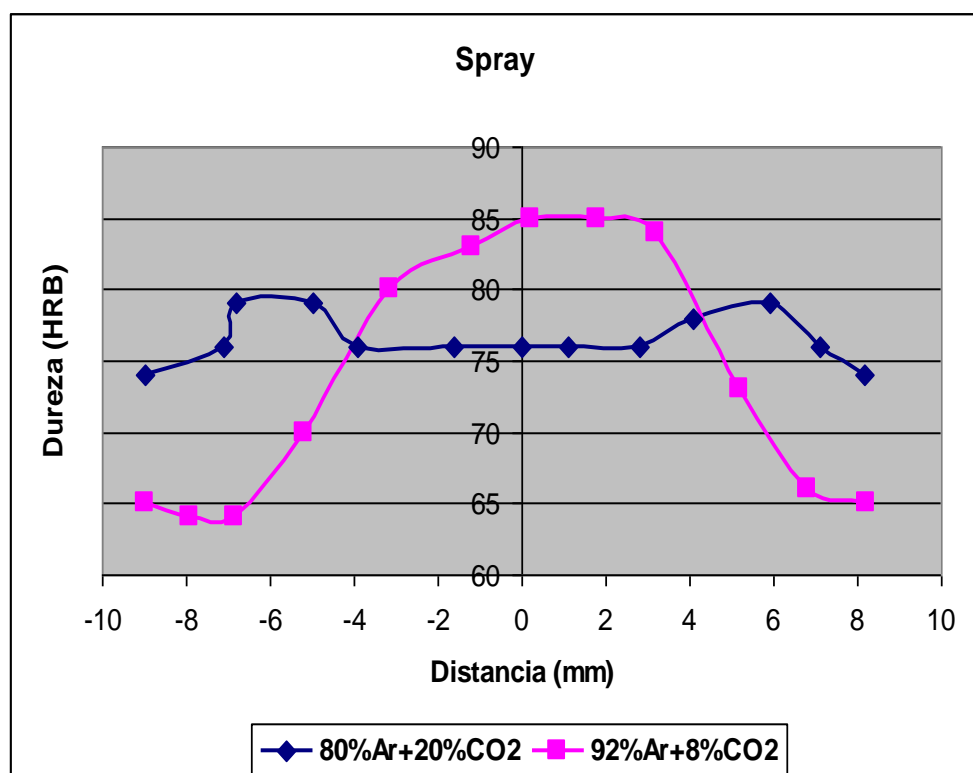
**FIGURA 3.31: Método de Transferencia Globular con 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>**

**Tabla 15**

**Dureza: Globular 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>**

| <b>Distancia (mm)</b> | <b>Dureza (RHB)</b> |
|-----------------------|---------------------|
| -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% CO<sub>2</sub>, 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% CO<sub>2</sub>, 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 Bridgcam 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% CO<sub>2</sub>**



**FIGURA 3.34: Radiografía de la Muestra con 80% Ar +20% CO<sub>2</sub>**



**FIGURA 3.35: Radiografía de la Muestra con 92% Ar +8% CO<sub>2</sub>**

De manera general, las radiografías presentaron en los cordones de soldadura Porosidad, siendo el orden de menor presencia de la misma el siguiente: 100% CO<sub>2</sub>, 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>, y por último de mayor contenido de la misma 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, 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% CO<sub>2</sub> (Corto Circuito)

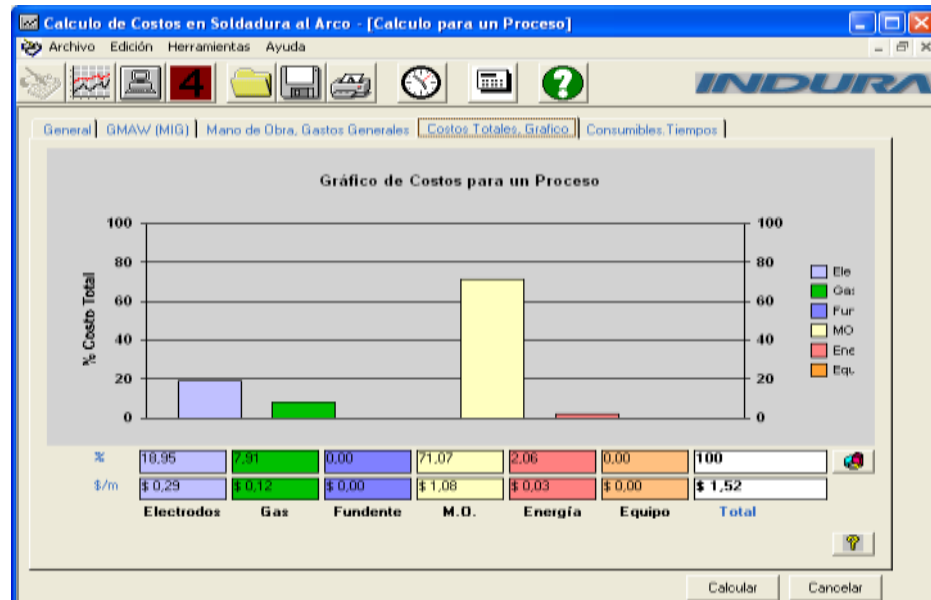


FIGURA 3.37: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO<sub>2</sub> (Corto Circuito)

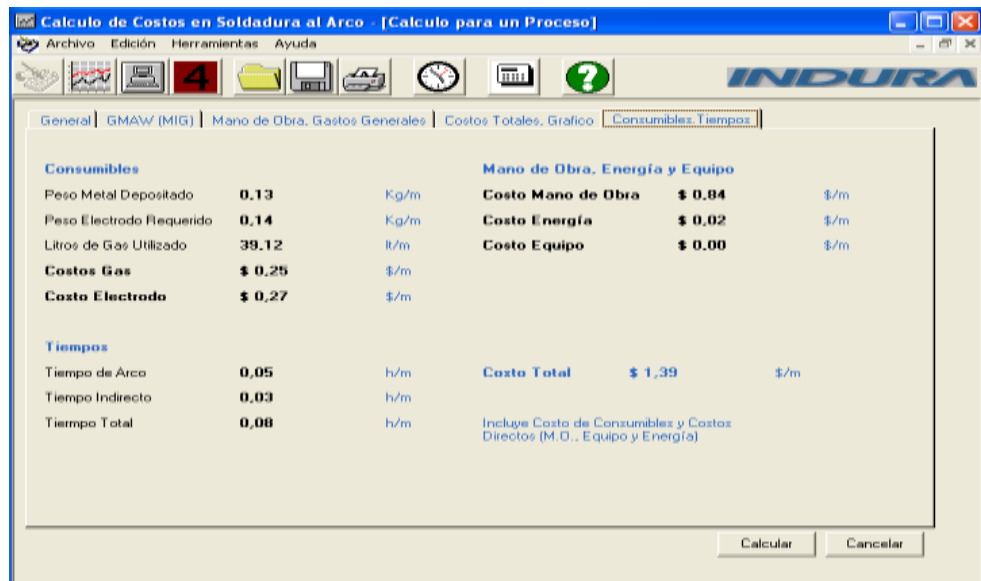


FIGURA 3.38: Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> (Corto Circuito)

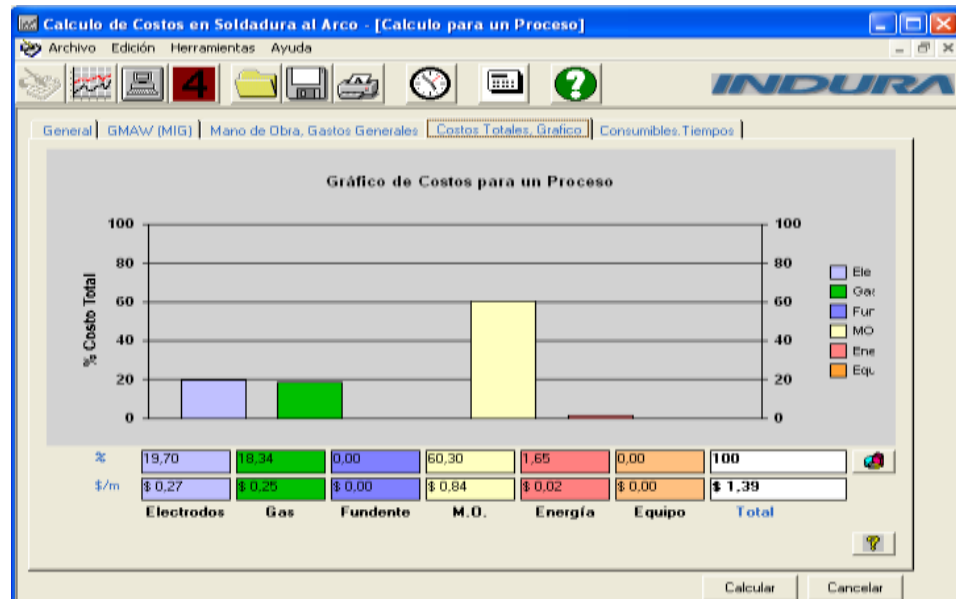


FIGURA 3.39: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> (Corto Circuito)

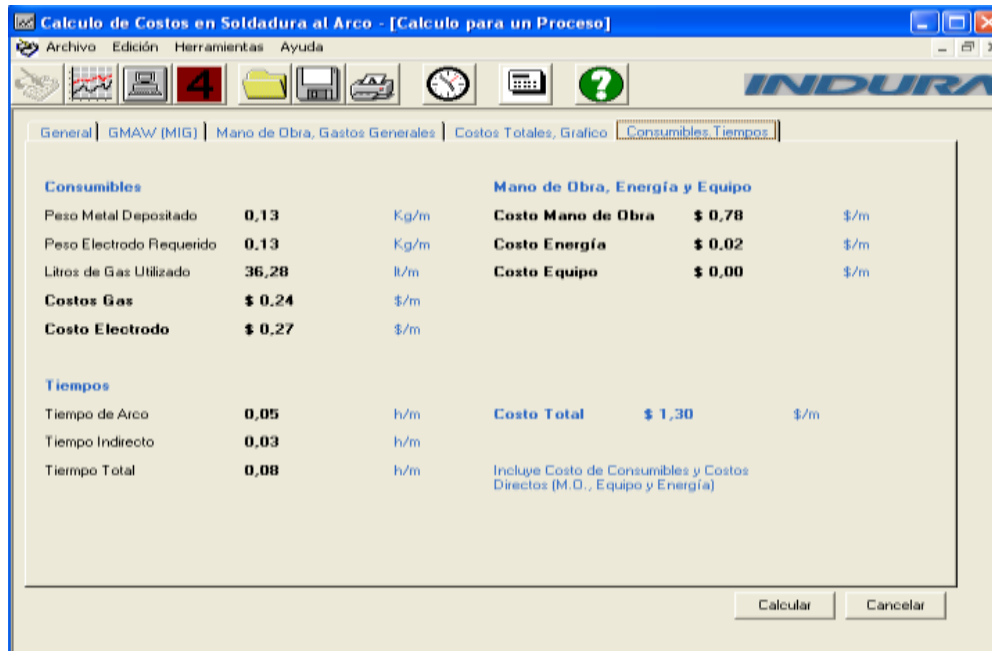


FIGURA 3.40: Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> (Corto Circuito)

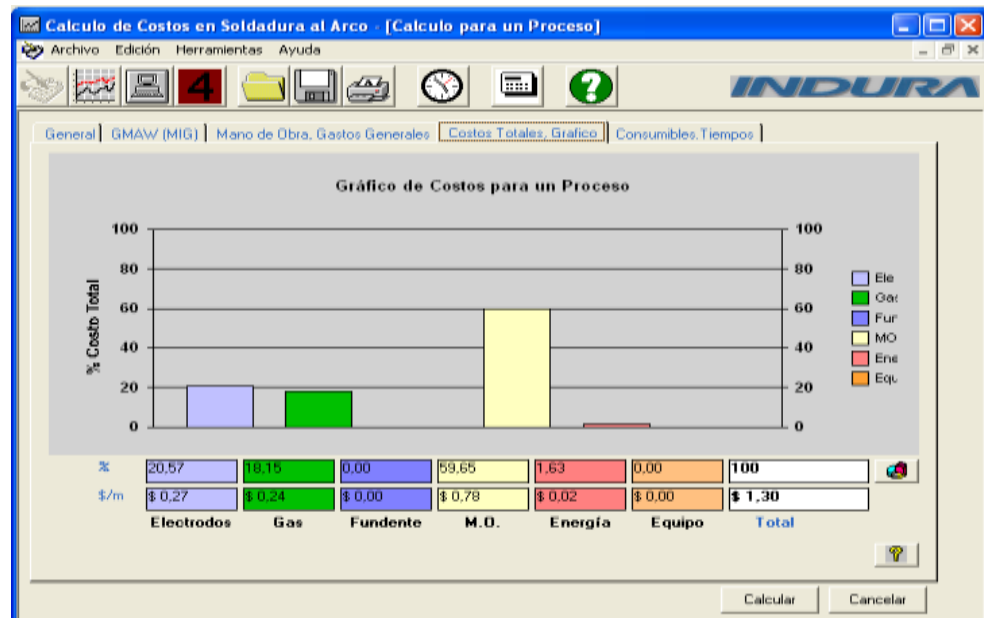


FIGURA 3.41: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> (Corto Circuito)

### Transferencia Globular:



FIGURA 3.42: Cálculo de Costos de Soldadura 100% CO<sub>2</sub> (Globular)

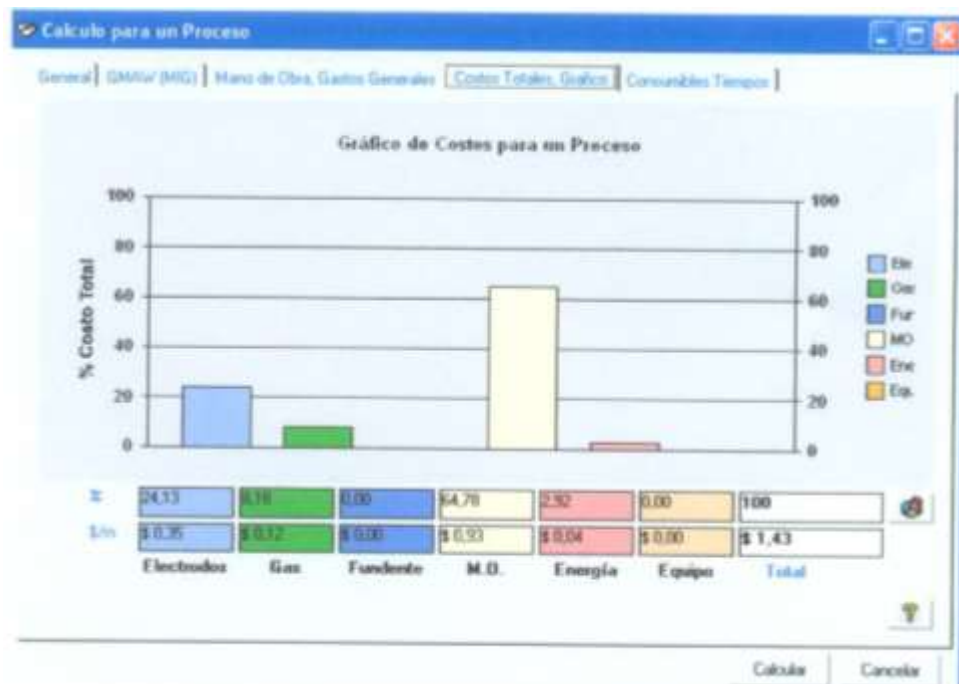


FIGURA 3.43: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 100% CO<sub>2</sub> (Globular)

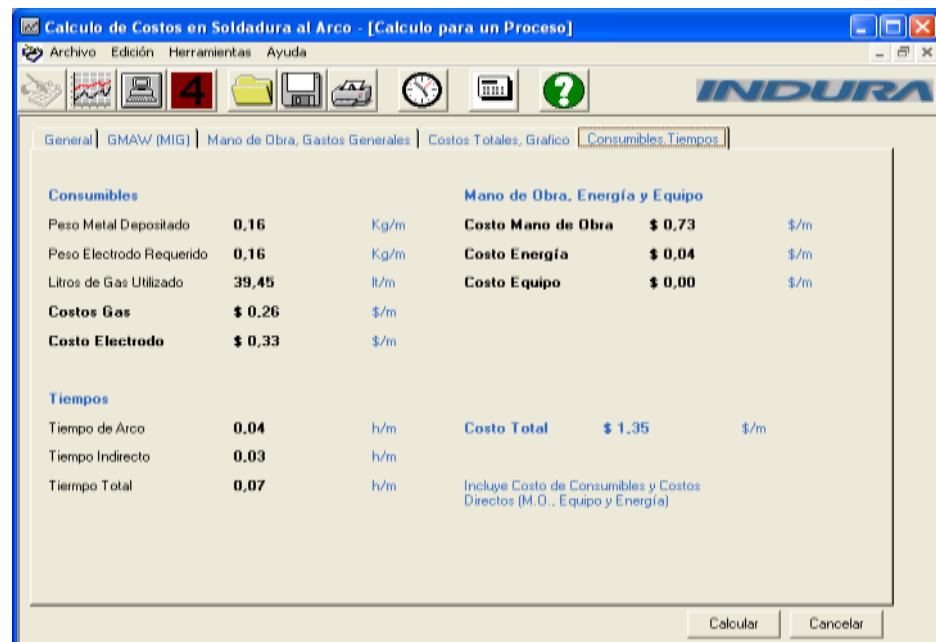


FIGURA 3.44: Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> (Globular)

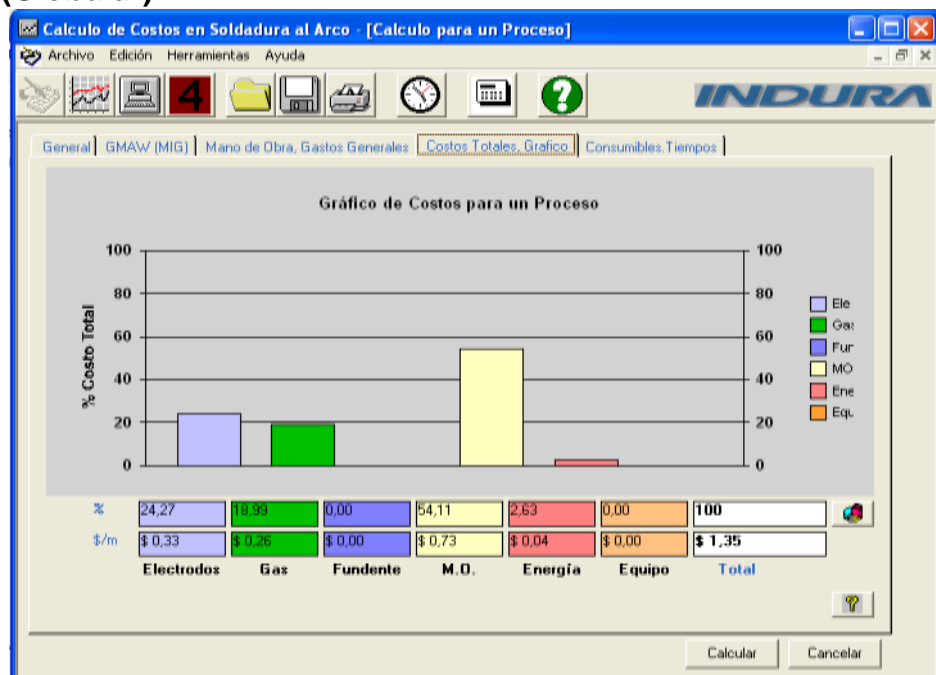


FIGURA 3.45: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> (Globular)





FIGURA 3.46: Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> (Globular)

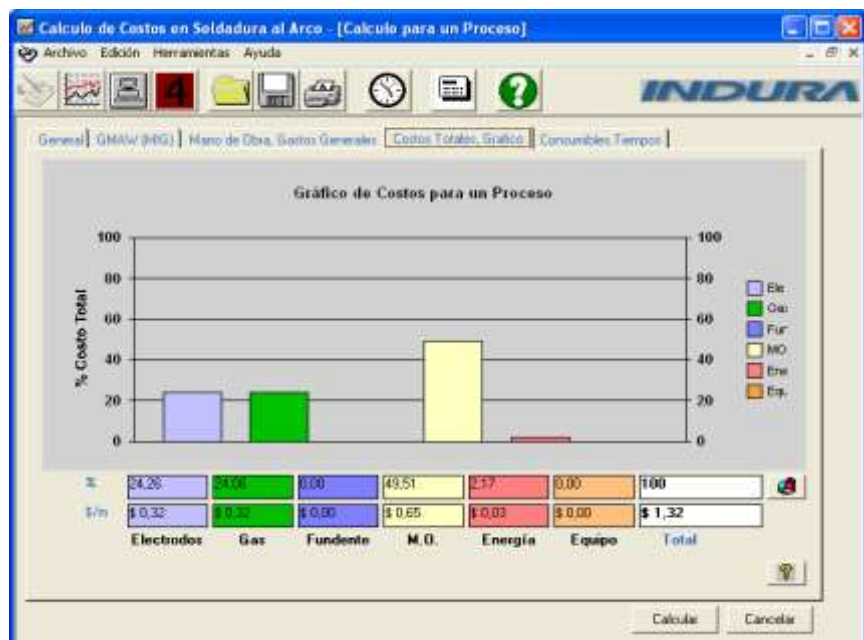


FIGURA 3.47: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> (Globular)

### Transferencia Spray:

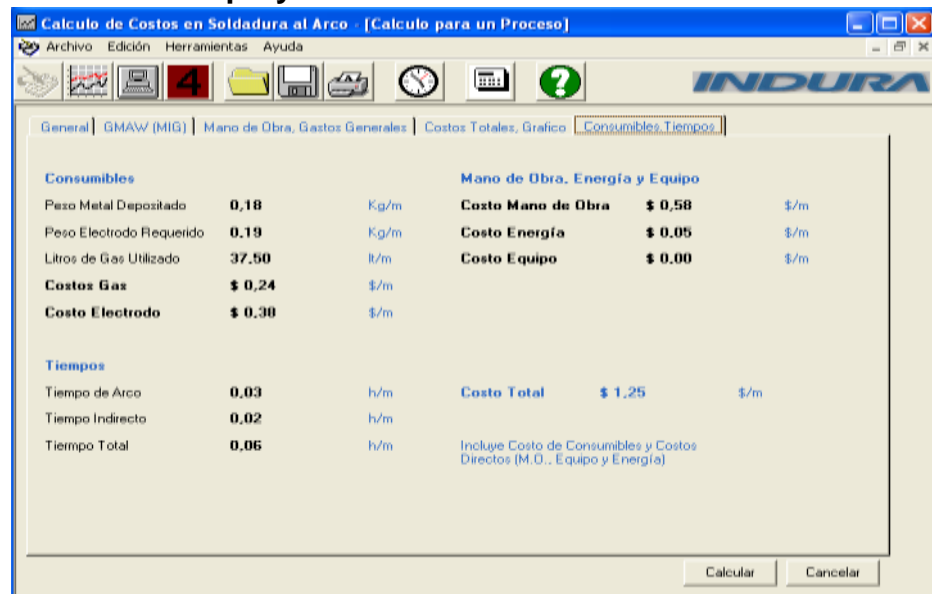


FIGURA 3.48: Cálculo de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> (Spray)



FIGURA 3.49: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> (Spray)



FIGURA 3.50: Cálculo de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> (Spray)

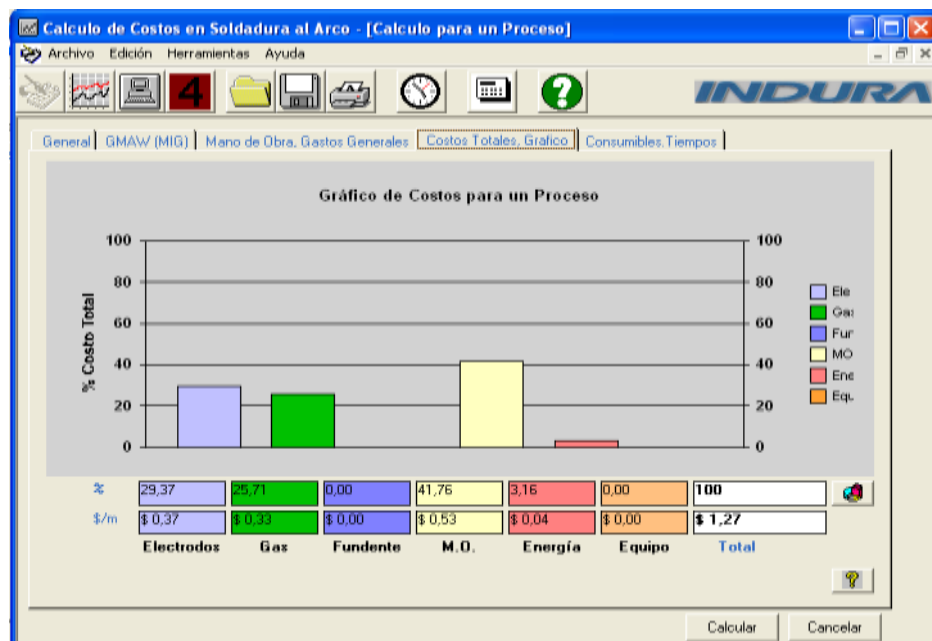
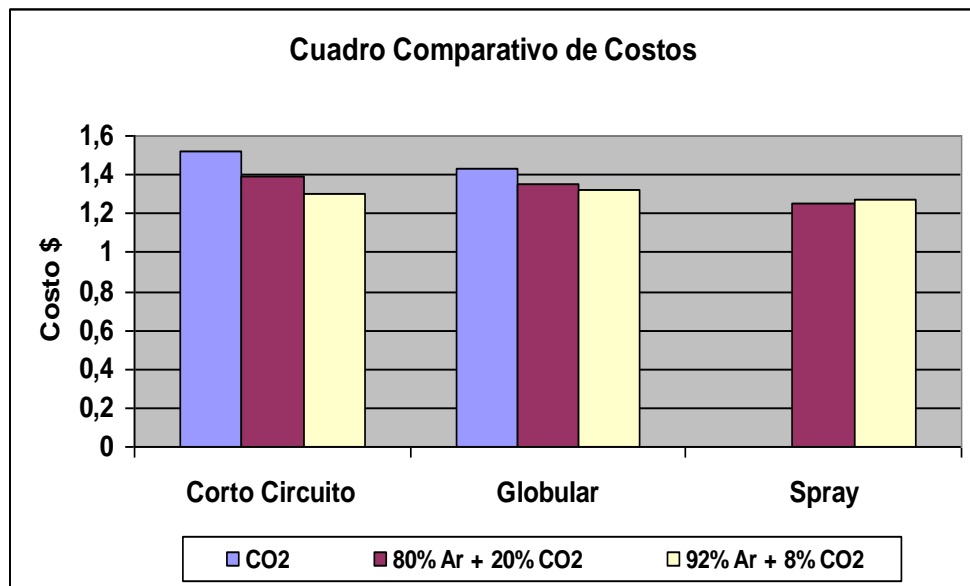


FIGURA 3.51: Presentación Gráfica de Costos de Soldadura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> (Spray)



**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% CO<sub>2</sub>, 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% CO<sub>2</sub>, debe ser controlada estrictamente.
3. Por las elevadas velocidades de soldadura el costo por metro de soldadura es menor con mezclas de gases Ar + CO<sub>2</sub>, a pesar de que el precio de éstas mezclas es más alto que el CO<sub>2</sub>.

**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% CO<sub>2</sub>, para obtener mayores velocidades de soldadura.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- 1.** CARY HORWARD B., MODERN WELDING TECHNOLOGY. Editorial Prentice-Hall, 1979 Capítulo 11, 15
- 2.** Dr. Weld: [www.drweld.com](http://www.drweld.com)
- 3.** Dr. Weld: [www.drweld.com/sprayarc-ns4.html](http://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.