

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **SOLDADURA DEL ACERO API 5L-X52 MEDIANTE EL PROCESO FLUX CORED ARC WELDING (FCAW) CON TRANSFERENCIA PULSADA**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Metalúrgico  
por los Brs.  
González G., Juan C.  
Soriano R., Gregory G.

Caracas, marzo de 2001

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **SOLDADURA DEL ACERO API 5L-X52 MEDIANTE EL PROCESO FLUX CORED ARC WELDING (FCAW) CON TRANSFERENCIA PULSADA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Vicente Ignoto

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Metalúrgico  
por los Brs.  
González G., Juan C.  
Soriano R., Gregory G.

Caracas, marzo de 2001

## ACTA

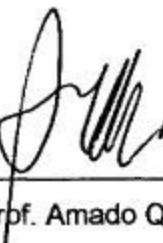
Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado:

### **SOLDADURA DEL ACERO API 5L-X52 MEDIANTE EL PROCESO FLUX CORED ARC WELDING (FCAW) CON TRANSFERENCIA PULSADA**

Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela por los Brs. González G., Juan C. y Soriano R., Gregory G., dejan constancia de lo siguiente:

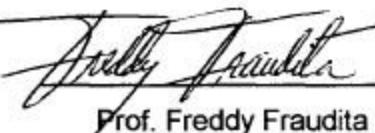
Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrado que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los 16 días del mes de marzo de dos mil uno.



---

Prof. Amado Quintero  
Jurado



Prof. Freddy Fraudita  
Jurado



Prof. Vicente Ignoto  
Tutor

## **AGRADECIMIENTO**

Al profesor Vicente Ignoto, Tutor y coordinador del trabajo, por su asesoría.

A la Ing. Isis Plaza, por su ayuda y recomendaciones, para la realización de este trabajo.

Al Ing. Juan C. Mestre, por su gran ayuda y colaboración.

Al técnico Rómulo Millano por su dedicación y colaboración.

Al Centro Venezolano de Soldadura (C.V.S.) y al personal que labora en este Centro, por la aprobación, apoyo y financiamiento de este trabajo.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela, por permitirnos la formación en esta magna Universidad.

Al profesor Freddy Fraudita Jefe del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

Al prof. Rodolfo Monsalve y Ing. Orlando Gil de la empresa IMOSA.

A la profesora Sonia Camero, por su valiosa colaboración.

A nuestros Padres por ser pilares fundamentales en nuestra vida y formación.

A nuestros amigos, compañeros y a todas aquellas personas que de alguna manera intervinieron en el desarrollo de este Trabajo de Grado.

A Ustedes Infinitas Gracias.

**González G. Juan C.  
Soriano R. Gregory G.**

**SOLDADURA DEL ACERO API 5L-X52 MEDIANTE  
EL PROCESO FLUX CORED ARC WELDING (FCAW)  
CON TRANSFERENCIA PULSADA**

**Tutor Académico: Prof. Vicente Ignoto. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de  
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Año 2001,  
108 p.**

**Palabras Claves:** FCAW-Pulsado, Tubería de acero API 5L-X52, Criterio Burnoff,  
Transferencia Metálica.

**Resumen.** Con el objeto de establecer los parámetros de soldadura del proceso Flux Cored Arc Welding Gas Shielding (FCAW-G) con un modo de transferencia pulsado, para tuberías de acero API 5L-X52 de 500 mm diámetro y 10 mm de espesor, en un diseño de juntas en V, sin talón ni respaldo, donde, se utilizó, como material de aporte un alambre tubular de 1,6 mm de diámetro, denominado comercialmente Outershield 71M (AWS E71T-1) y una protección de Argón con 20% de Dióxido de Carbono (AGAMIX 20). La obtención de los parámetros de pulso, fue realizada basándose en el *criterio de Burnoff*, descrito por Amin<sup>(9)</sup>, en la cual se relacionó: la Velocidad de alimentación ( $V_A$ ) de 3 m/min con una Intensidad media de 165 amp, y se obtuvieron los siguientes valores: Intensidad base ( $I_B$ ) 50 amp, Intensidad pico ( $I_P$ ) 415 amp, tiempo base ( $t_B$ ) 3,4 mseg, tiempo pico ( $t_P$ ) 7,5 mseg. La soldadura se calificó siguiendo los procedimientos de la norma API 1104, apoyada en las normas ASTM E23-91 y ASTM 370, que exige la realización de ensayos *no destructivos como*: inspección visual, líquidos penetrantes y radiografía, y *destructivos como*: tracción, doblado de cara y raíz, ensayo Charpy, ensayo de dureza y un barrido metalográfico. Se concluyó, que los resultados obtenidos cumplen con la norma y por ende son adecuados para la aplicación de las tuberías.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	i
<b>RESUMEN .....</b>	ii
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	iii
<b>I.- FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>	1
1.1.- Soldadura .....	2
1.2.- Proceso Flux Cored Arc Welding (FCAW) .....	3
1.3.- Modo de transferencia.....	5
1.3.1.- Transferencia en un proceso de soldadura de arco eléctrico con alambre macizo.....	5
1.3.2.- Transferencia metalica en FCAW .....	14
1.4.- Predicción de los parámetros de soldadura empleando arco pulsado para la estabilidad del arco y control de la transferencia metálica.....	16
1.4.1.- Predicción de los parámetros del pulso .....	17
1.4.1.1.- Criterio de Burnoff.....	17
1.4.1.2.- Criterio de la transferencia metálica.....	22
1.4.1.3.- Criterio de estabilidad del arco .....	22
1.5.- Metalurgia de la soldadura de los aceros de alta resistencia al Carbono- Manganoso .....	23
1.5.1.- Cordón de Soldadura .....	23
1.5.2.- Zona Afectada por el calor .....	23
1.5.3.- Suministro de calor .....	25
1.5.4.- Metal base no afectado.....	25
1.5.5.- Descripción de la zona afectada por el calor.....	25
1.5.6.- Absorción de gases .....	26
1.6.- Soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación.....	27
1.6.1.- Agrietamiento inducido por hidrogeno .....	27
1.6.2.- Agrietamiento en caliente .....	29
1.6.3.- Grietas de solidificación.....	29
1.6.4.- Griets de fusión de bordes de granos.....	31
1.7.- Discontinuidades en la soldadura.....	32
1.8.- Ensayos no destructivos .....	38
1.9.- Ensayos destructivos.....	44
1.10.- Especificación del procedimiento de soldadura (EPS) .....	46

1.11.- Registro de calificación del procedimiento (RCP) .....	47
<b>II.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>49</b>
2.1.- Descripción de la maquina de soldadura .....	51
2.2.- Material de aporte .....	53
2.3.- Caracterización del material base y depósito .....	53
2.4.- Selección de los parámetros del arco pulsado.....	53
2.5.- Preparación de los Cupones de Pruebas.....	57
2.6.- Ensayos no Destructivos.....	59
2.6.1.- Inspección Visual .....	59
2.6.2.- Inspección por Líquido penetrantes .....	59
2.6.3.- Inspección por Radiografía.....	60
2.7.- Ensayos mecánicos (destructivos) .....	61
2.7.1.- Ensayo de tracción .....	62
2.7.2.- Ensayo de doblado .....	62
2.7.3.- Ensayo de Charpy .....	63
2.7.4.- Macroataque .....	63
2.7.5.- Ensayo de dureza .....	63
2.7.6.- Microataque .....	64
<b>III.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS .....</b>	<b>65</b>
3.1.- Caracterización química y mecánica del material y depósito .....	66
3.2.- Selección de los parámetros de soldadura.....	67
3.2.1.- Criterio de Burnoff.....	67
3.2.2.- Diámetro metálico del alambre tubular.....	68
3.2.3.- Cálculo del volumen teórico de la gota.....	69
3.2.4.- Cálculo del tiempo del ciclo para la transferencia pulsada .....	69
3.2.5. - Parámetros teóricos de la transferencia pulsada (Zona paramétrica)	
.....	69
3.2.6.- Parámetros de soldadura .....	71
3.2.6.1.- Determinación del parámetro óptimo .....	74
3.2.6.2.- Oscilogramas de pulso .....	75
3.2.6.3.- Determinación de la penetración y la altura del cordón.....	81
3.3.- Cupones de prueba.....	83
3.4.- Ensayos no destructivos .....	84
3.4.1.- Inspección Visual .....	84
3.4.2.- Inspección por Líquidos Penetrantes. ....	84
3.4.3.- Inspección por Radiografía.....	85

3.5.- Ensayo mecánicos (destructivos) .....	88
3.5.1.- Ensayo de tracción .....	88
3.5.2.- Ensayo de doblez .....	90
3.5.3.- Ensayo Charpy .....	92
3.5.4.- Macrografías.....	94
3.5.5.- Ensayo de dureza .....	95
3.5.6.- Micrografías .....	97
3.6.- Registro de Calificación del Procedimiento .....	100
<b>IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>104</b>
4.1.- Conclusiones.....	105
4.2.- Recomendaciones.....	106
<b>V.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.- Soldadura FCAW con gas de protección.....	5
2.- Soldadura FCAW Self- shielding (autoprotegido) .....	6
3.- Sección transversal del electrodo tubular.....	9
4.- Diagrama de clasificación de los electrodos FCAW .....	10
5.- Representación esquemática del modo de transferencia pulsada ....	14
6.- Esquema de las fuerzas que actúan en la transferencia.....	15
7.- Gráfico del criterio de Burnoff.....	18
8.- Zona paramétrica predecida según el criterio de Burnoff.....	21
9.- Representación de la zona afectada por el calor.....	24
10.- Grieta por tensión.....	34
11.- Porosidades internas y superficiales.....	35
12.- Inclusiones de escoria .....	36
13.- Representación de una soldadura con falta de penetración.....	37
14.- Falta de fusión.....	37
15.- Socavamiento .....	37
16.- Diagrama de flujo .....	50
17.- Equipo de soldadura MTE DIGITEC 3001 .....	51
18.- Panel de control.....	52
19.- Esquema de la gráfica requerida para determinar. el punto de trabajo .....	54
20.- Sección transversal del electrodo .....	55
21.- Cortes de las probetas para la selección del mejor parámetro de .....	57
22.- Características de los cupones de prueba.....	58
23.- Ilustración de la realización de la soldadura en el cupón de prueba.....	59
24.- Dimensiones de las probetas de tracción.....	61
25.- Dimensiones de las probetas de doblez.....	61
26.- Dimensiones de las probetas sub-estándar Charpy.....	62
27.- Esquema demostrativo de la realización del barrido de dureza .....	63
28.- Zonas donde se realizó la micrografía.....	64
29.- Macrografía de la sección transversal del electrodo utilizado .....	68
30.- Puntos para la determinación de la penetración del cordón.....	81

31.- Macrografía de los cordones realizados con el parámetro 9 .....	82
32.- Fotografía de los cupones de pruebas .....	83
33.- Cupones ensayados por líquidos penetrantes .....	85
34.- Radiografía de la sección 1 del cupón de prueba.....	85
35.- Radiografía de las secciones 2 y 3 del cupón de pueba .....	86
36.- Radiografía de la sección 4 del cupón de prueba.....	87
37.- Probetas de tracción ensayadas.....	88
38.- Doblez de cara.....	91
39.- Doblez de raíz.....	91
40.- Fotografía de las probetas ensayadas por impacto .....	93
41.- Macrografía .....	94
42.- Micrografías del cordón de soldadura en dirección vertical .....	97
43.- Micrografías del cordón de soldadura en dirección horizontal.....	98

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1.- Composición química del material de aporte .....	53
2.- Análisis químico del material base .....	66
3.- Propiedades mecánicas nominales del material base y aporte .....	66
4.- Análisis químico del depósito .....	66
5.- Parámetros de soldadura.....	71
5.- Continuación Parámetros de soldadura .....	72
5.- Continuación Parámetros de soldadura .....	73
6.- Parámetros seleccionados.....	74
7.- Resultados del porcentaje de penetración y altura del cordón.....	81
8.- Parámetros seleccionados.....	82
9.- Resultados de los ensayos de tracción .....	89
10.- Resultados del ensayo de doblez.....	90
11.- Resultados de los ensayos charpy.....	92

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
1.- Relación entre la Corriente media y la Velocidad de alimentación....	67
2.- Zona predicha por el criterio de Burnoff .....	70
3.- Oscilograma del pulso 9 .....	75
4.- Oscilograma del pulso 10.....	75
5.- Oscilograma del pulso 11.....	76
6.- Oscilograma del pulso 12.....	76
7.- Oscilograma del pulso 14.....	77
8.- Oscilograma del pulso 24.....	77
9.- Oscilograma del pulso 25.....	78
10.- Oscilograma del pulso 26.....	78
11.- Oscilograma del pulso 27.....	79
12.- Oscilograma del pulso 28.....	79
13.- Oscilograma del pulso 43.....	80
14.- Oscilograma del pulso 49.....	80
15.- Esfuerzo Vs deformación.....	89
16.- Dureza Vs desplazamiento .....	95

## INTRODUCCIÓN

La construcción de oleoductos de largos trayectos conlleva a la utilización de aceros de alta resistencia y baja aleación en los cuales una combinación de composición química y laminación termomecánica permite incrementar la tensión de fluencia y mejorar la tenacidad junto con la soldabilidad.

La unión de estos materiales pueden favorecer con la utilización de un proceso de soldadura que permita aumentar la productividad. Además, de controlar la transferencia metálica y mantener las propiedades mecánicas. De aquí la necesidad de estudiar nuevos procesos, como el *Flux Cored Arc Welding (FCAW)*.

La soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW), es un proceso de arco eléctrico que utiliza electrodo tubular que en su interior posee diversos materiales pulverizados, que durante el proceso produce un manto de escoria abundante, el cual proporciona una alta productividad y un cordón de excelente apariencia, donde el depósito se encuentra protegido de la contaminación del aire, gracias al flux que está en el interior del electrodo.

En estos procesos es importante controlar la transferencia metálica, que se puede realizar a través del modo de transferencia pulsado que controla además, la energía suministrada al material.

El modo de transferencia pulsado que fue utilizado por primera vez en 1965, consiste en una alteración de la densidad de corriente en dos niveles: alto y bajo. El nivel alto proporciona la fusión rápida y el desprendimiento de la punta del electrodo; el bajo actúa como un nivel base para sostener el arco piloto, conservando la punta fundida y manteniendo la corriente promedio durante un ciclo completo.

Una combinación de alta productividad ofrecida por el FCAW y control de la transferencia metálica debido del modo pulsado, puede convertirse en un proceso eficiente en la construcción de oleoductos.

En función de ello, el objetivo de este trabajo consiste en establecer los parámetros de soldadura del proceso FCAW, con un modo de transferencia pulsado, para la unión de tubería de acero API 5L-X52, y calificar el procedimiento de soldadura a través del EPS (Especificación del Procedimiento de Soldadura) y RCP (Registro del Procedimiento de Soldadura), establecidos en la norma API 1104 (Welding of Pipelines and Relatec Facilities).

# Capítulo I

---

## FUNDAMENTO TEÓRICO

## I.- FUNDAMENTO TEÓRICO

### 1.1.- Soldadura

**Groover, M.**<sup>(1)</sup> define la soldadura como un proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos (o más) partes mediante la aplicación conveniente de calor o presión. La integración de las partes que se unen mediante soldadura se denomina un ensamble soldado.

Muchos procesos de soldadura se obtienen solamente por calor, sin aplicar presión; otros, mediante una combinación de calor y presión; y algunos más únicamente por presión, sin aportar calor externo. En algunos casos se agrega un material de aporte o relleno para facilitar la fusión. La soldadura se asocia por lo regular con partes metálicas, pero el proceso también se usa para unir plásticos.

La soldadura proporciona una unión permanente, en donde las partes soldadas se vuelven una sola unidad. La unión soldada puede ser más fuerte que los materiales originales, si se usa un metal de relleno que tenga propiedades de resistencia superiores a los materiales originales y se emplean las técnicas de soldadura adecuadas.

En general, la soldadura es la forma más económica de unir componentes, en términos de uso de materiales y costos de fabricación. Los métodos mecánicos alternativos de ensamble requieren alteraciones más complejas de las formas (por ejemplo, taladrado de orificios) y adición de sujetadores (remaches o tuercas). El ensamble mecánico resultante por lo general es más pesado que la soldadura correspondiente.

## 1.2.- Proceso Flux Cored Arc Welding (FCAW)

El Ing. **Asta, E.**<sup>(2)</sup> define el proceso Flux Cored Arc Welding (FCAW) como un método de soldeo por arco eléctrico con o sin protección de gas, donde el calor necesario es generado por un arco eléctrico que se establece entre un electrodo consumible y el metal que se va a soldar.

También describe al electrodo como un alambre tubular, desnudo que se alimenta de forma continua, automáticamente y se convierte en el metal depositado según se consume. Este proceso es realizado con la protección de un fúndete contenido dentro del electrodo tubular o alambre tubular.

El proceso tiene dos variantes, una emplea un gas suministrado externamente y otra Self-Shierding (auto protegido), la cual se basa enteramente, en el gas que se genera en la desintegración de los fundentes, dentro del electrodo. En ambos casos el material del núcleo del electrodo produce una escoria que protege la solidificación del material base.

El FCAW es un proceso que combina características de soldadura manual (SMAW) y del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).

### 1.2.1.- *Principales características del proceso*

Los beneficios del FCAW se obtienen con la combinación de tres hechos generales:

1. La productividad debido a un alambre de soldadura continua.
2. Beneficios metalúrgicos que pueden ser obtenidos desde el flux.
3. La escoria que le da soporte y forma a la piletas soldadas (**AWS Welding Handbook, 1993**)<sup>(4)</sup>.

### 1.2.2.- **FCAW con protección gaseosa (FCAW-G)**

**Asta, E.<sup>(2)</sup>** explica el proceso FCAW con o sin protección gaseosa y hace mención de algunos gases utilizados como protección.

En este proceso se usa un gas de protección (usualmente dióxido de carbono o una mezcla de argón y dióxido de carbono) para proteger el metal fundido del oxígeno y nitrógeno del aire que redondean el arco. La composición química del alambre o electrodo tubular es formulada para proveer desoxidantes que se combinen con la pequeñas cantidades de oxígeno debido al gas de protección.

Entre los gases de protección mas utilizados en el proceso se tiene:

**Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>):** Es el gas de protección mas usado en el FCAW. Ya que tiene bajo costo y se obtiene mayor penetración en la soldadura. Una protección con 100% de CO<sub>2</sub>, produce soldadura amplia y de penetración profunda, se logra buen contorno del reborde y hay tendencia hacia el corte en la parte inferior. Comparado con los gases inertes, el CO<sub>2</sub> es relativamente barato. El principal inconveniente de la protección con CO<sub>2</sub> es la tendencia del arco a ser un poco burdo. Esto puede conducir a salpicaduras y dificulta la soldadura.

*Las ventajas más importantes del CO<sub>2</sub> son:*

- Bajo costo
- Gran penetración
- Alta velocidad de soldeo

*Los inconvenientes son:*

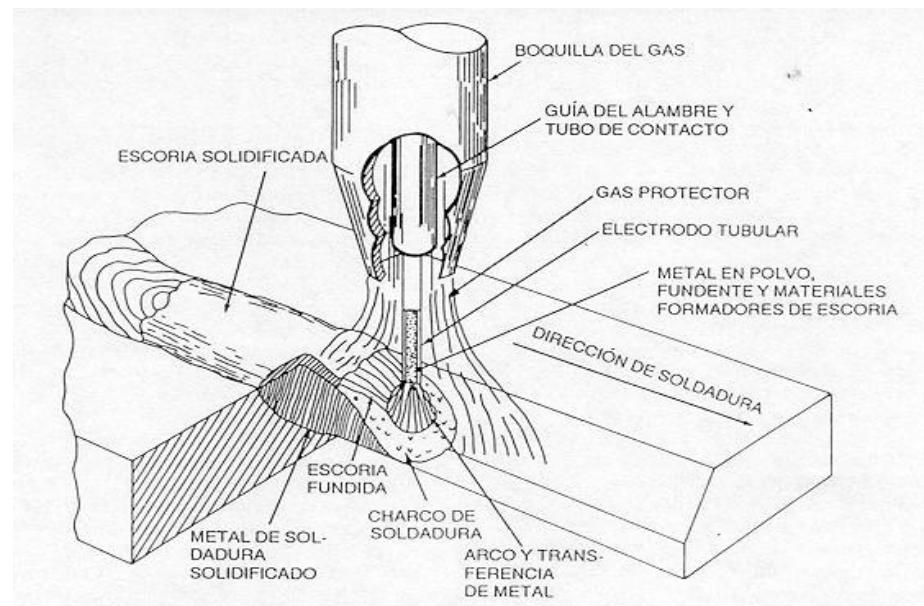
- Se producen gran cantidad de salpicaduras

- No se puede conseguir transferencia "spray", únicamente se puede conseguir transferencia globular o en cortocircuito
- Las superficies de los cordones quedan ligeramente oxidadas

Según **Asta, E.**<sup>(2)</sup> la mezcla de este gas con argón (Ar), diminuyen los inconvenientes antes mencionados.

**Mezcla de gases:** la mezcla de gases de protección permiten aprovechar las ventajas de la combinación de dos gases, ya que un mayor porcentaje de gas inerte mezclado con CO<sub>2</sub> u oxígeno mejora la eficiencia en la transferencia de los desoxidantes contenidos en el núcleo.

La presencia del argón en suficiente cantidad, como gas de protección, resulta en menos oxidación que al usar solo el CO<sub>2</sub>, la relación generalmente utilizada esta constituida de 75% de Ar y 25% de CO<sub>2</sub>. El metal de soldadura así depositado tiene mayor tensión de rotura y de fluencia en comparación a la realizada con el CO<sub>2</sub> puro. Con esta mezcla de gases se obtiene transferencia tipo spray y generalmente se utiliza para soldadura fuera de posición.

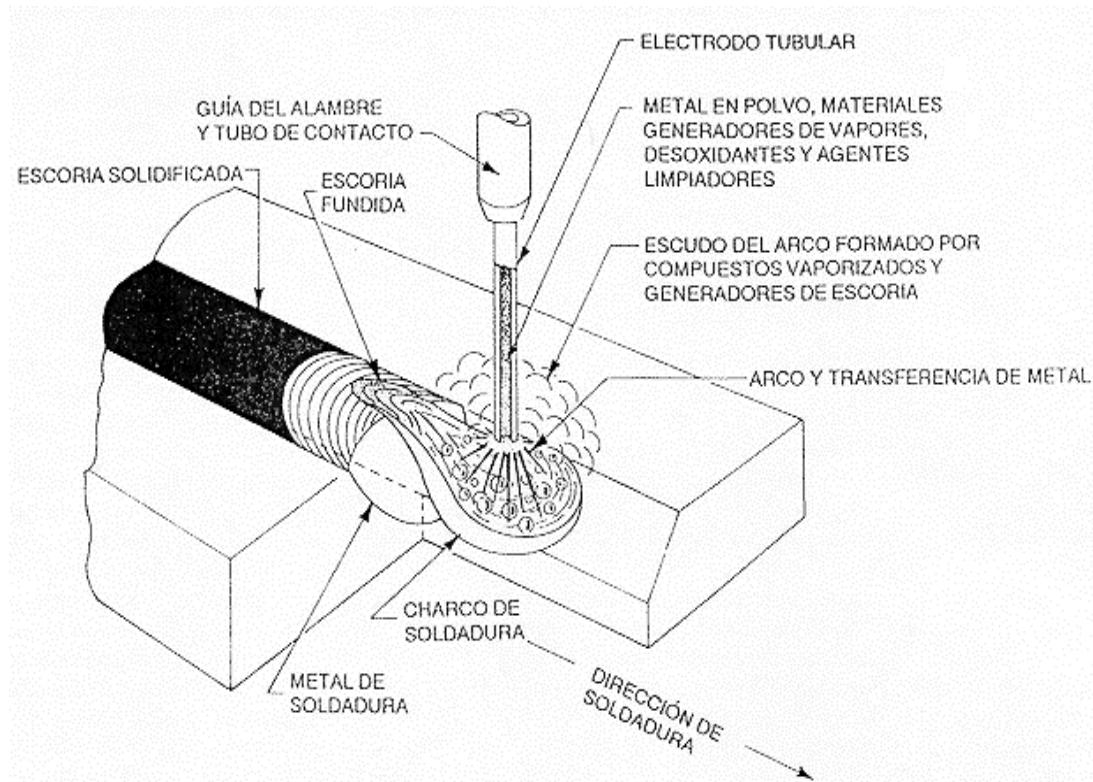


**Figura 1.** Soldadura FCAW con gas de protección<sup>(3)</sup>

### 1.2.3.- *FCAW sin protección gaseosa (FCAW-S)*

En el método auto protegido, la protección es obtenida por la composición del **flux** el cual se vaporiza creando una atmósfera que desplaza el aire circundante y por la escoria que cubre las gotas del metal fundido durante la soldadura. La producción de CO<sub>2</sub> y la introducción de agentes desoxidantes y denitrificantes, a partir de adecuados ingredientes del flux sobre la superficie de la piletas soldadas, explican por que estos electrodos pueden tolerar mayores corrientes de aire que los protegidos por el gas.

Una ventaja de los alambres auto-protectoros es el uso de grandes extensiones de electrodos, lo que permite una buena longitud de alambre no fundido hasta el extremo del tubo de contacto, generalmente se utilizan extensiones de 19 a 95 mm.



**Figura 2.** Soldadura FCAW Self-shielding (Autoprotegido)<sup>(3)</sup>

#### 1.2.4.- **Equipo de Soldo para la soldadura FCAW**

El equipo necesario para la soldadura del proceso FCAW es similar al utilizado para el MIG/MAG, requiere de:

- Fuente de energía
- Fuente de suministro de gas
- Sistema de alimentación de alambre
- Pistola (refrigerada por agua)
- Sistema de control
- Carrete de alambre / electrodo (alambre que actúa como metal de aporte)
- Sistema de regulación para el gas de protección
- Sistema de circulación de agua de refrigeración para las pistolas refrigeradas por agua
- Cables y tubos o mangueras
- Sistema de autorregulación

El *sistema de autorregulación del arco*, cuando el alambre toca la pieza, la intensidad de cortocircuito que se origina es muy elevada, por lo cual el extremo del alambre se funde inmediatamente, estableciéndose un arco (cebado instantáneo), cuya longitud es función de la tensión elegida en la fuente de energía. Una vez cebado el arco, entra en juego el fenómeno de autorregulación, suministrando la fuente de poder la intensidad necesaria para fundir el alambre en la medida del suministro, manteniéndose la longitud de arco correspondiente a la regulación del voltaje elegida.

Si por alguna causa, la distancia entre la extremidad del alambre y la pieza aumenta, la tensión y la longitud del arco aumentarán, pero, al mismo tiempo la intensidad disminuirá, por lo que la fusión será más lenta hasta que se restablezca

la longitud y voltaje inicial. Lo contrario ocurre cuando la distancia entre el alambre y la pieza disminuye. La autorregulación es importante para garantizar la estabilidad del arco, según **Asta, E.**<sup>(2)</sup>.

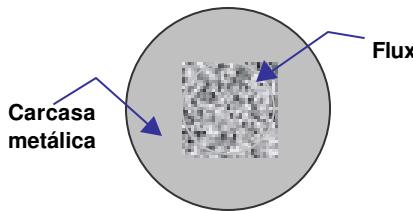
#### **1.2.5.- *Materiales base soldable***

Muchos de los aceros que son soldables con los procesos SMAW, GMAW o SAW pueden ser soldado con FCAW, entre otros se tienen:

- a. Aceros dulces, aceros estructurales, grados de recipientes a presión tales como: ASTM A36, A515 y A516
- b. Aceros de grado estructurales de alta resistencia y baja aleación, ASTM A440, A441, A572 y A548
- c. Aceros aleados de alta resistencia y templado y revenidos, ASTM A514, A517 y A533
- d. Aceros al cromo-molibdeno tales como 1 ¼ Cr - ½ Mo, 2 ¼ Cr – 1 Mo
- e. Aceros inoxidables forjables resistente a la corrosión
- f. Acero al níquel
- g. Acero aleados resistente a la abrasión

#### **1.2.6.- *Alambres o electrodos tubulares***

Consisten en un fleje de acero de bajo carbono o baja aleación, en cuyo interior se colocan materiales aleantes y fluidificantes, que presenta ventaja, cuando se realiza una adecuada combinación de los ingredientes del núcleo, junto con el extremo, generando la producción de soldadura con adecuada velocidad de deposición (figura 3).



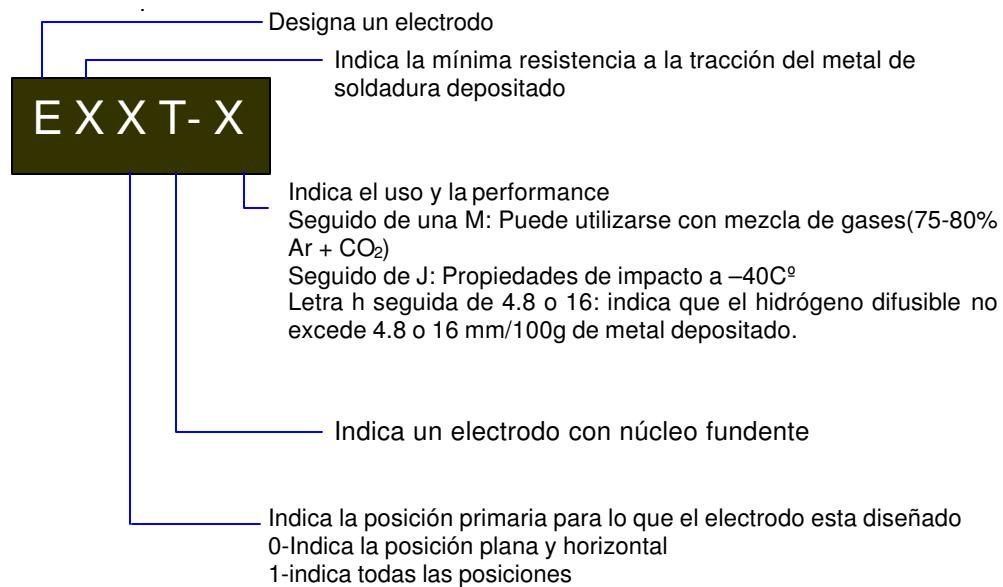
*Figura 3. Sección transversal del electrodo tubular*

#### **1.2.6.1.- Funciones de los ingredientes del Flux**

- Proveer adecuada resistencia mecánica, metalúrgica y a la corrosión del metal de soldadura por ajuste de la composición química
- Promover sanidad del metal de soldadura protegiendo la pileta liquida del oxígeno y nitrógeno del aire
- Eliminar impurezas desde el metal fundido usando reacciones del Flux, producir un recubrimiento de escoria para proteger la contaminación del metal cuando esta solidificando y controlar la forma y apariencia de los cordones en las diferentes posiciones de soldadura en las cuales el electrodo es colocado
- Estabilizar el arco y producir un cordón uniforme con poca salpicadura

#### **1.2.6.2.- Clasificación de los electrodos tubulares**

Los electrodos para acero al carbono se clasifican según la ANSI/AWS A5.20/95<sup>(4)</sup> como se indica en la figura 4.



**Figura 4.** Diagrama de clasificación de los electrodos FCAW

#### 1.2.7.- Ventajas del proceso FCAW<sup>(5)</sup>

- Alta calidad del metal depositado
- Excelente apariencia del cordón, soldadura suave y uniforme
- Excelente entorno de los cordones de filetes horizontales
- Se puede soldar una variedad de aceros con un amplio rango de espesores
- Factor de alta operatividad
- Fácil mecanizado
- Alta tasa de deposición
- Economía en los diseños ingenieriles de juntas
- Arco visible fácil de usar
- La limpieza previa es mucho menor que la que se requiere para la soldadura por arco de metal con protección gaseosa (GMAW)
- Distorsión reducida comparada con la soldadura SMAW

### 1.3.- Modo de transferencia

#### 1.3.1.- *Transferencia en un proceso de soldadura de arco eléctrico con alambre macizo (Mig-Mag)*

Según **Hernández, G.**<sup>(6)</sup>, la transferencia metálica es el mecanismo a través del cual el metal del electrodo se deposita en el material a soldar. La transferencia de metal en el arco puede realizarse básicamente de cuatro formas:

- a. **Transferencia por cortocircuitos:** El metal se transfiere del electrodo a la pieza cuando electrodo contacta con el metal fundido depositado por soldadura
- b. **Transferencia globular:** la transferencia en forma de grandes gotas, con un tamaño mayor que el diámetro del alambre caen al baño de fusión por su propio peso.
- c. **Transferencia en spray:** Se desprende pequeñas gotas del alambre y se desplazan a través del arco hasta llegar a la pieza.
- d. **Transferencia por arco pulsado:** Es un modo de transferencia tipo spray que se produce en impulsos regularmente espaciados, en lugar de suceder al azar como ocurre en el arco-spray. El tipo de transferencia depende del gas de protección, de la intensidad y la tensión de soldeo.

##### 1.3.1.1.- *En la transferencia por cortocircuito*

**Hernández, G.**<sup>(6)</sup> afirma que este tipo de transferencia se obtiene cuando la intensidad y la tensión de soldeo son bajas. Se utiliza para el soldeo en posición vertical, bajo techo y para el soldeo de espesores delgados o cuando la separación en la raíz es excesiva. Los parámetros típicos: Voltaje 16 a 22 V;

Intensidad 50 a 150 A. Se reconoce porque el arco es corto, suele haber proyecciones y origina un zumbido característico obteniéndose mayor eficiencia utilizando un gas de protección de dióxido de carbono.

#### ***1.3.1.2.- En la transferencia globular***

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

#### ***1.3.1.3.- En la transferencia por arco-spray***

Las gotas son iguales y de menor diámetro que el alambre y su transferencia se realiza desde el extremo del alambre al baño fundido en forma de una corriente axial de gotas finas (corriente centrada con respecto al alambre). Se obtiene este tipo de transferencia con altas intensidades y altos voltajes. Intensidades 150 a 500A y voltajes de 24 a 40 V. Los gases inertes favorecen este tipo de transferencia.

La transferencia en spray se puede aplicar para cualquier material base pero no se puede utilizar en espesores muy finos porque la corriente de soldeo es muy alta. Se consiguen grandes tasas de deposición y rentabilidad.

#### ***1.3.1.4.- En la transferencia por arco pulsado***

Es una modalidad del tipo spray, que se produce por pulsos a intervalos regularmente espaciados en lugar de suceder al azar, como ocurre en el arco-

spray. Este tipo de transferencia, se obtiene cuando se utiliza una corriente pulsada, que es la composición de una corriente de baja intensidad que existe en todo momento (es constante) y se denomina corriente de fondo o de base, y un conjunto de pulsos de intensidad elevada denominada corriente de pico. La intensidad de fondo sirve para precalentar y acondicionar el alambre que va avanzando continuamente. La gota saltará cuando se aplique una corriente de pico (figura 5).

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

Las mayores desventajas de este sistema de transferencia es que requiere de energía de corriente pulsada generando: costo elevado del equipo, dificultad de establecer los parámetros adecuados de soldeo debido al gran número de datos que hay que introducir y además sólo se puede utilizar mezclas con bajo contenido en CO<sub>2</sub> (18% máximo).

Sin embargo, actualmente las fuentes de energía la corriente de fondo, la de pico y la duración del pulso están permanentemente establecidas, sólo se puede cambiar la frecuencia de los pulsos. De forma que a mayor frecuencia (mayor numero de pulsos por segundo) mayor es la intensidad efectiva y la tasa de deposición.

Actualmente las fuentes de soldeo para corriente pulsada son de tipo sinérgico, lo que significa que el soldador solo tiene que ajustar la velocidad de avance del alambre y los datos sobre el material de aportación, el gas de protección y el

diámetro del electrodo. A partir de estos datos la fuente de corriente ajusta automáticamente los parámetros de soldadura idóneos.

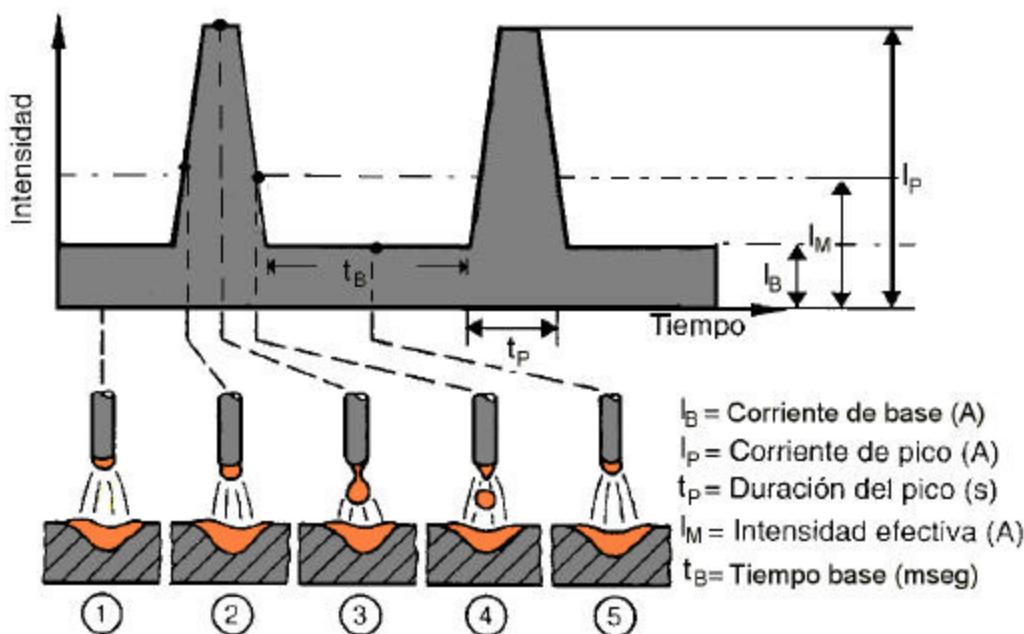


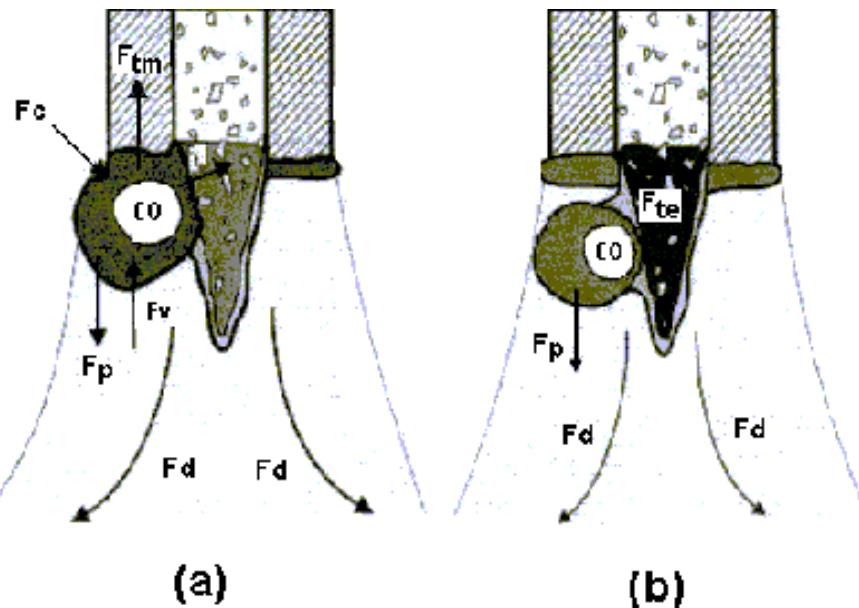
Figura 5. Representación esquemática del modo de transferencia pulsado

### 1.3.2.- Modo de transferencia metálica en FCAW

La transferencia metálica en el proceso FCAW es una combinación de los tipos básicos de transferencia del proceso GMAW, es decir el metal puede ser transferido en forma globular, cortocircuito, spray y modo pulsado. El tipo de transferencia depende de la formulación del fundente interno así como también del voltaje y corriente del arco, según la AWS<sup>(3)</sup>.

**Souza<sup>(7)</sup>** explica que los diferentes tipos de transferencia metálica están relacionadas con un balance de fuerzas que actúan en el desprendimiento de las gotas y por el tipo de proceso de soldadura usado. La Figura 6 representa estas fuerzas que actúan directamente sobre la punta del electrodo y estas son: peso ( $F_p$ ), tensión superficial gota-cáscara metálica ( $F_{tm}$ ), y gota escoria ( $F_{te}$ ), fuerza electromagnética de Lorentz ( $F_c$ ), fuerza de arrastre del plasma ( $F_d$ ), fuerza de

evaporación metálica ( $F_v$ ), y la fuerza debido a las reacciones químicas (formación de burbujas de gases en el interior de la gota de metal fundido)( $F_q$ ).



**Figura 6.** Esquema de las fuerzas que actúan en la transferencia metálica en la soldadura con alambre tubular. (a) gota ligada físicamente a la cáscara metálica. (b) gota ligada a la protección gaseosa<sup>(7)</sup>

**Wang y colaboradores<sup>(8)</sup>** definen las fuerzas de Lorentz como la causante del encuellamiento y la separación de las gotas de metal fundidas desde la punta del electrodo, estas se producen gracias a las fuerzas electromagnéticas que se generan cuando pasa la corriente a través del electrodo. La fuerza de tensión superficial depende del tipo de metal y del diámetro del alambre. La fuerza de arrastre debido al plasma colabora para la separación de la gota al igual que la de gravedad.

Adicionalmente establecen que comparado el FCAW con GMAW, el primero es más complicado debido a la interacción existente entre la cáscara metálica y el núcleo del electrodo. Una sección transversal de un alambre para FCAW es mucho menor que una de GMAW del mismo diámetro, por lo tanto la transferencia metálica en este alambre siempre ocurre a mayores densidades de corriente.

Dentro de la transferencia metálica del proceso FCAW se han observado tres etapas diferentes: formación y crecimiento de la gota, encuellamineto y desprendimiento. Dentro de la etapa de encuellamiento se encuentras dos subetapas, las cuales son similares a las del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW). En la primera de estas subetapas la gota esta ligada a la cascara metálica y en la segunda subetapa esta se encuentra solamente ligada a la protección de la escoria que se encuentra en la punta del electrodo. En la primera etapa de formación y crecimiento de la gota la corriente fluye a través de la gota y la hace crecer, posteriormente comienza la segunda etapa en donde la acción de las fuerzas de Lorentz , de arrastre del plasma producida por el gas de protección, de tensión superficial gota-cascara metálica y gota escoria, peso, de las reacciones químicas y de evaporación metálica actúan de manera tal que logran producir el encuellamiento y la separación de gota desde la punta del electrodo.

#### **1.4.- Predicción de los parámetros de soldadura empleando arco pulsado para la estabilidad del arco y control de la transferencia metálica**

El método de predicción de los parámetros de soldadura empleando arco pulsado, usado en este trabajo de investigación, está basado el trabajo de **Amin, M.**<sup>(9)</sup>, quién lo diseñó en el año de 1.983 y en las modificaciones que hicieron basándose en el mismo método **Rajasekaran y colaboradores**<sup>(10)</sup> en su investigación publicada en el año 1.998.

La predicción de los parámetros del pulso para corriente pulsada esta basada en tres requerimientos esenciales para la técnica de soldadura MIG pulsado (GMAW-P) usado alambre macizo:

#### **1.4.1.- *Predicción de los parámetros del pulso***

1. La velocidad de alimentación del alambre ( $V_A$ ) debe estar balanceada con la tasa de fusión del electrodo, de manera tal que la longitud del arco se mantenga constante (criterio de burnoff)
2. Se debe producir transferencia metálica tipo “spray”, incluso a velocidades de alimentación y voltajes bajos, que son las características de una transferencia metálica tipo globular (criterio de la transferencia metálica)
3. La corriente base ( $I_B$ ) debe exceder un límite mínimo inferior para garantizar un arco estable (criterio de la estabilidad del arco).

##### **1.4.1.1.- *Criterio de Burnoff***

La consideración necesaria al trabajar con este método, es construir una relación funcional que represente todas las posibles condiciones de los parámetros del pulso ( $I_P$ ,  $I_B$ ,  $t_P$ ,  $t_B$ ), pertenecientes a una corriente media específica ( $I_M$ ).

Para la construcción de esta zona paramétrica se debe hallar como primer paso una relación entre la corriente media y la velocidad de alimentación en GMAW-P usando parámetros experimentales según el siguiente procedimiento: realizar soldaduras tomando en cuenta varios parámetros de las mismas, los cuales se seleccionan por ensayo y error, tomando solamente en cuenta los de mayor estabilidad del arco y con una longitud del mismo más o menos constantes.

Una vez seleccionadas las mejores combinaciones, los valores obtenidos de  $I_M$  se grafican con sus respectivas velocidades de alimentación, obteniéndose una gráfica como la figura 7. La corriente media puede ser calculada según la ecuación:

$$I_M = \frac{t_p \cdot I_p + t_b \cdot I_b}{t_p + t_b} \quad [1]$$

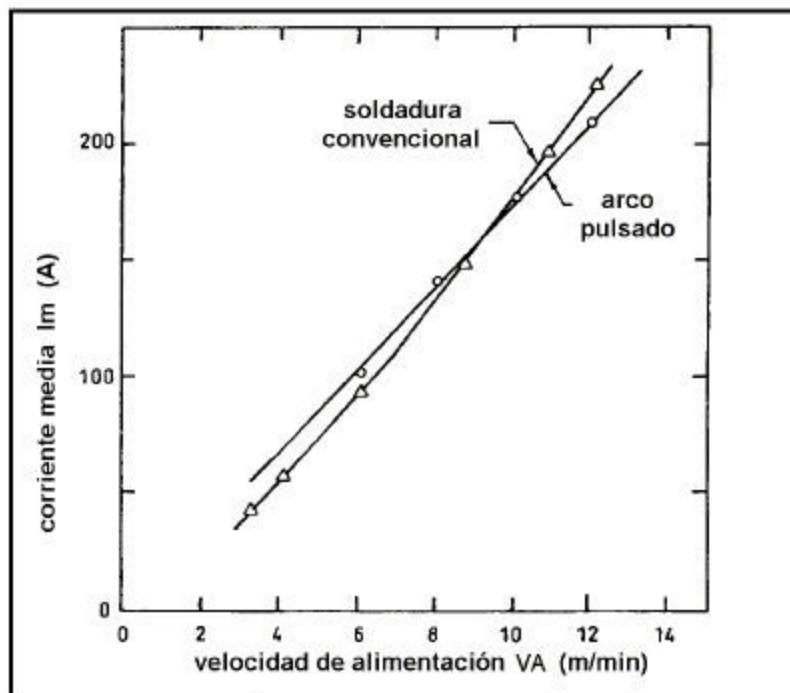
donde:  $I_M$  = corriente media (A)

$t_p$  = tiempo de pico (ms)

$t_b$  = tiempo de base (ms)

$I_p$  = corriente de pico (A)

$I_b$  = corriente de base (A)



**Figura 7.** Gráfico del criterio de Burnoff para soldadura convencional y por arco pulsado

Las correcciones aplicadas por Rajasekaran y colaboradores al método de Amin, es la realización de un gráfico similar, pero empleando soldadura con arco convencional, obteniéndose que ambas rectas (pulsada y convencional) se

interceptan y este punto coincide con los niveles de transferencia spray del material de aporte.

Amin<sup>(9)</sup> en su investigación no asume un tamaño de gota igual al diámetro del alambre usado como material de aporte, pero, Rajasekaran y colaboradores<sup>(10)</sup> si lo hacen, argumentando que al trabajar con tamaños de gotas mayores al diámetro del alambre se puede favorecer la transferencia corto circuito y salpicaduras. Esta suposición se toma empleando la siguiente ecuación:

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

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

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

El tiempo del ciclo del pulso se debe calcular de manera tal que produzca una gota por pulso a diferentes velocidades  $V_A$  usando la siguiente expresión:

$$t_c = \frac{240 \cdot V_D}{\pi \cdot d^2 \cdot V_A} \quad [3]$$

donde:  $t_c$  = tiempo de ciclo (ms)

$d$  = diámetro del alambre (mm)

Como la relación de la figura 7 es lineal podemos tomar la ecuación de una recta para describir ambas:

$$I_M = m \cdot V_A + K \quad [4]$$

donde:  $m$  = pendiente de la recta

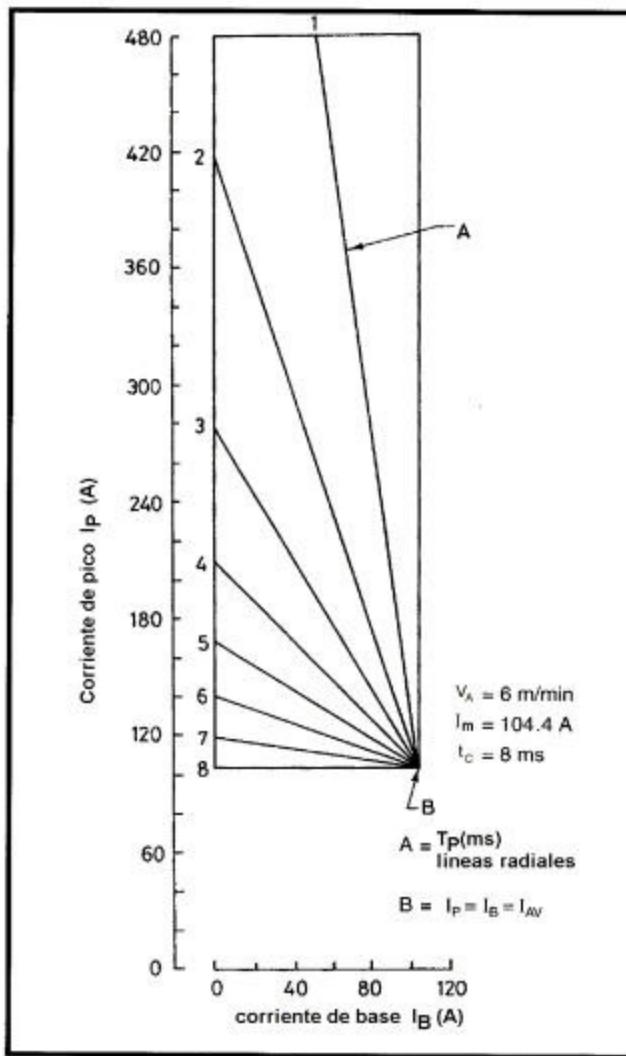
$K = \text{intercepción con la ordenada}$

A partir de la data obtenida se puede despejar  $I_P$  de la ecuación 1:

$$I_P = \left( \frac{t_c}{t_p} \right) I_M - \left( \frac{t_c}{t_p} - 1 \right) I_B \quad [5]$$

Esta ecuación define la relación entre la corriente de pico y la corriente de base para una  $I_M$  (o  $V_A$ ). A partir de esta relación podemos definir una zona paramétrica para un rango entero de duraciones de pulso como se muestra en la figura 8.

Dentro de esta zona paramétrica a un  $I_M$  y  $V_A$  existe una relación lineal entre la amplitud de pulso y la corriente de base, en la cual el nivel de pulso disminuye con un incremento de la corriente de base. El máximo valor posible de amplitud de pulso es limitado por la intersección con el eje donde se encuentra  $I_P$  en donde  $I_B$  se hace cero, dado que los valores negativos  $I_B$  carecen de sentido físico. El mínimo valor posible es el punto común donde  $I_B = I_M = I_P$ . De esta manera se puede variar  $t_p$  con una combinación de  $I_P$  e  $I_B$  alrededor del punto común  $I_B = I_M = I_P$  desde la vertical hasta la horizontal, es decir, desde una pendiente  $\infty$  a  $t_p = 0$  hasta una pendiente igual a 0 a  $t_p = t$ , respectivamente.



*Figura 8. Zona paramétrica predecida según el criterio de Burnoff*

Como resultado se obtiene que cualquier punto con  $I_B$ ,  $I_p$  y  $T_p$  dentro de esta zona paramétrica, representa los posibles valores potenciales de condiciones de pulso para un valor único de  $I_M$  con los cuales podemos garantizar el criterio de Burnoff.

Además, del criterio de Burnoff existen dos criterios considerado en el trabajo de Amin, los cuales no fueron tomados en cuenta en el presente trabajo, estos son:

**1.4.1.2.- *Criterio de la transferencia metálica***

El cual establece que a pesar de que todas las condiciones del pulso expresadas por la ecuación 5 en la zona paramétrica podrían satisfacer el criterio de “Burnoff”, algunas combinaciones podrían no producir transferencia metálica tipo spray, si  $\beta$  no fuesen suficientemente aptas como para transmitir el volumen de gota requerido. Así que la zona paramétrica debe ser limitada para lograr satisfacer el criterio de la transferencia metálica.

**1.4.1.3.- *Criterio de estabilidad del arco***

Este es el último criterio del este método y se basa en la necesidad de limitar la corriente base debido a que el arco no es estable para todos los valores de este parámetro, sobre todo en los valores más bajos.

## 1.5.- Metalurgia de la soldadura de los aceros de alta resistencia al Carbono-Manganeso

La American Welding Society (AWS)<sup>(11)</sup> en su publicación dice que la metalurgia de la soldadura involucra varios pasos, como: solidificación, reacción gas-metal, fenómeno de superficie, y reacciones en estado sólido que ocurren rápidamente durante el proceso.

La soldadura de una junta que esta constituida por diferentes zonas las cuales son: cordón de soldadura, zona afectada por el calor (ZAC) y metal base no afectado térmicamente.

### 1.5.1.- *Cordón de soldadura*

Es la zona que a sido fundida durante el proceso de soldadura, y esta compuesta del material de aporte y el material base, cuando algunas soldaduras no poseen la aportación de material (electrodos consumibles), por ejemplo la soldadura bajo el proceso TIG, sin material de aporte.

La composición química del cordón dependerá de la composición química del material base y aporte, también dependerá de la dilución entre estos. Los elementos tales como el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno pueden aparecer como contaminantes, cuando el metal fundido no es protegido correctamente de la atmósfera, según la AWS<sup>(11)</sup>.

### 1.5.2.- *Zona afectada por el calor*

Es la zona del material base, que está adyacente al metal fundido, y por lo tanto, es susceptible al calor generado durante el proceso de soldadura (figura 9), esta zona se puede determinar realizando un perfil de dureza.

Los fenómenos metalúrgicos que ocurren en esta zona son caracterizados por los ciclos térmicos que sufre el material, y dependen de la cantidad de calor suministrado durante el proceso de soldadura, la temperatura de material base antes de realizar la soldadura, del espesor y la geometría de la junta soldada. Mediante el control de los dos primeros factores se pueden modificar, en cierta forma, la característica de la zona afectada por el calor.

Defectos ocasionados por el ciclo térmico:

- Cambios microestructurales.
- Variación en las propiedades mecánicas.
- Disminución de la resistencia a la corrosión.
- Generación de esfuerzo residuales.

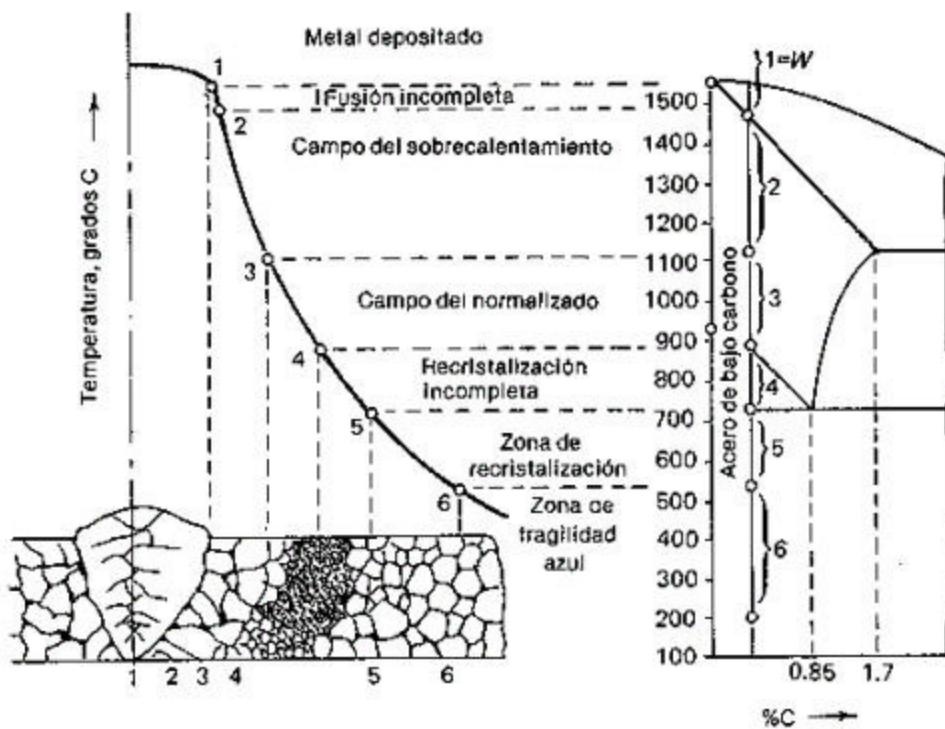


Figura 9. Representación de la zona afectada por el calor.

### **1.5.3.- *Suministro de calor***

El suministro de calor durante el proceso de soldadura es un factor que afecta la temperatura y velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura y la zona ZAC . Al aumentar el suministro de calor, se obtiene mayor temperatura y mayor velocidad de enfriamiento.

Los factores que determinan la entrada de calor en un procedimiento son: La intensidad de corriente de soldadura, voltaje de soldadura y velocidad de avance.

### **1.5.4.- *Metal base no afectado***

Esta es la tercera zona de un proceso de unión de juntas por soldadura, y además es la zona no sufre cambio alguno en el proceso.

### **1.5.5.- *Descripción de la zona afectado por el calor***

Cuando se realiza un procedimiento de soldadura, la velocidad de enfriamiento es violenta, lo que quiere decir que existirá una distribución de tamaño grano no uniforme alrededor del cordón. La zona que esta adyacente al cordón (ZAC) se puede dividir en 5 sub-zona las cuales son:

- a. Zona de fusión incompleta: esta zona se calienta hasta temperaturas elevadas y se forman granos gruesos
- b. La siguiente zona es el campo de sobre calentamiento, en el cual la temperatura disminuye; por lo tanto, disminuye también el tamaño de grano.

- c. Campo del normalizado: los granos en esta zona son finos, ya que, el tiempo de calentamiento no es lo suficientemente largo para que se produzca el crecimiento de los granos austenítico.
- d. Zona de recristalización: Los granos son todavía más pequeños que la zona anterior, esto es debido, a la influencia de la temperatura
- e. Zona de fragilidad azul: se caracteriza por una recuperación de los granos deformados.

Todas estas zonas se ven afectadas por el contenido de carbón y de los elementos de aleación de los aceros. La zona afectada por el calor modifica notablemente la estructura y las propiedades mecánicas del metal base (**AWS<sup>(11)</sup>**).

#### **1.5.6.- Absorción de gases**

Los gases que afectan principalmente en forma desfavorable a las uniones soldadas son: oxígeno, nitrógeno y hidrógeno. El oxígeno y el nitrógeno provienen del aire y el hidrógeno de la humedad ambiental o por la humedad absorbida por el material de aporte.

- Oxígeno: es un elemento muy reactivo, esta reactividad se puede detener con Mn, Si. El oxígeno libre en la soldadura forma  $\text{CO}_2$ , este gas puede ocasionar porosidades (esféricas o vermicular), por lo que se debe dar el tiempo de solidificación necesario para que este se desprenda.
- Nitrógeno: El acero fundido tiene capacidad de disolver grandes cantidades de nitrógeno, esto puede dar formación de nitruros, que aumenta la carga a la ruptura, el límite elástico y la dureza, pero disminuye la ductilidad; puede provocar fisuras en el cordón y en la zona afectada térmicamente.

- Hidrógeno: Este elemento también se puede disolver en grandes cantidades en el acero, cuando el acero pasa de la fase austenita a la ferrita y está cargado de hidrógeno provoca fisuras en el cordón.

## 1.6.- Soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación

Los aceros al carbono y de baja aleación presentan ciertas características en su soldabilidad, las cuales se exponen a continuación:

### 1.6.1.- *Agrietamiento inducido por hidrógeno*

Generalmente ocurre a temperaturas por debajo de 95 °C durante el enfriamiento, o después de un periodo de horas y en algunos casos hasta de días. El tiempo para que ocurra el agrietamiento depende de varios factores tales como; tipo de acero, magnitud de la tensiones en la soldadura y contenido de hidrógeno en el cordón y en la ZAC.

La microestructura del acero al carbono también es un factor que puede generar el agrietamiento en frío o por hidrógeno, disuelto y atrapado en pequeños espacios existentes en el cordón o en la ZAC. El mecanismo que explica como el hidrógeno produce el agrietamiento se describe a continuación:

- El hidrógeno es introducido y disuelto en el baño como hidrógeno atómico.
- A medida que el cordón de soldadura se enfriá, este comienza a sobresaturarse con el hidrógeno, haciendo que cierta cantidad de este difunda hasta la ZAC. El agrietamiento en frío ocurre mas comúnmente en la ZAC debido a que el hidrógeno que entra en el baño de fusión difunde rápidamente en la ZAC y además, muchos metales de aporte tienen menor

contenido de carbono que el metal base para una buena soldabilidad, haciendo más susceptible la microestructura de la ZAC.

- Bajo un enfriamiento rápido, el hidrógeno no tiene el tiempo suficiente para difundir desde la ZAC hasta la superficie libre, quedando por lo tanto atrapado en la ZAC; además, el enfriamiento rápido incrementa el chance de que ocurra una transformación de austenita a martensita en la ZAC.
- El hidrógeno atómico es insoluble en la martensita por lo cual el difunde y se segregá en las discontinuidades: vacancias, intersticios, poros, inclusiones y otras discontinuidades microscópicas. Estas discontinuidades son trampas efectivas del hidrógeno y pueden reducir severamente el coeficiente de difusión del mismo.
- Cuando son aplicados esfuerzos el hidrógeno atrapado difunde a temperaturas ambiente hasta las regiones de mayores esfuerzo de tensión; siendo estas regiones las micro grietas o discontinuidades pre-existentes que actúan como sitios de concentración de esfuerzo. Luego que la concentración de hidrógeno en ó cerca de la punta de la discontinuidad alcanza aplicados externamente o esfuerzos residuales en el material. Se cree que el hidrógeno causa una severa reducción en la energía cohesiva entre los átomos de hierro que se encuentran al frente de la discontinuidad, iniciándose de esta forma el agrietamiento. La propagación de las grietas ocurre en discretos estallidos o paso, los cuales se repiten cuando hidrógeno fresco difunde al frente de la punta de la grieta. A bajo valores de intensidad de esfuerzo el agrietamiento es adecuado para seguir una trayectoria intergranular entre granos previos de austenita transformados en martensita; mientras que con alto valores de intensidad de esfuerzo la trayectoria de la grieta puede ser transgranular.

### **1.6.2.- *Agrietamiento en caliente***

Este termino abarca las grietas que se forma mientras la soldadura esta solidificando ó cuando la misma es recalentada. Puede ocurrir como resultado del efecto combinado de la contracción térmica característica de cualquier proceso de soldadura que involucre calentamiento localizado y enfriamiento, con la falta de ductilidad del metal a temperaturas elevadas como para soportar dichas tensiones.

Cuando las grietas en calientes se manifiestan en el cordón de soldadura se denomina grieta de solidificación y ocurre en la ZAC se denomina grieta de fusión de borde de granos.

### **1.6.3.- *Grietas de solidificación***

Se forma como consecuencia del efecto combinado de factores mecánicos y químicos, es decir, su aparición esta afectada por la tecnología de la soldadura aplicada y por la composición del metal de soldadura. Cuando la composición química es desfavorable es factible evitar las grietas de solidificación mediante una cuidadosa elección de las condiciones de soldadura. Por otra parte, la falta de cuidado en la ejecución de la operación de soldadura puede resultar en agrietamiento, aun en metales que satisfagan estándares normales de composición.

Las grietas de solidificación aparecen en el cordón de soldadura tanto en forma de grietas como microgrietas intergranulares, las cuales no siempre alcanzan la superficie del metal.

Las grietas pueden ser longitudinales en el centro del cordón, orientadas en la solidificación de la piletta liquida, donde el centro de la soldadura es lo ultimo en

solidificar, constituyendo la parte mas débil a la temperatura en la cual se forma la grieta. También pueden presentarse grietas inclinadas y grietas en el cráter.

Durante la soldadura el metal base es mojado por el metal fundido generando la piletta liquida, siendo la composición entre ambos similar al metal base que actúa como un sustrato sobre el cual puede crecer una estructura de solidificación, de esta manera, el liquido simplemente cede su calor latente de fusión y los átomos ocupan posiciones correspondientes en los sitios de red cristalina, extendiendo esta estructura desde el sólido. Este crecimiento se denomina epitaxial y la dirección preferencial de crecimiento de grano será aproximadamente paralela al máximo gradiente de temperatura.

La microestructura producida por la solidificación de la piletta liquida alargada es particularmente sensible al problema de agrietamiento en caliente. El encuentro de la zonas concentradas en elementos residuales, producidas por segregación durante la solidificación en el centro produce grietas centrales en el cordón.

La presencia de impurezas como el azufre, contribuye a la formación de grietas en caliente por intermedio de compuesto de bajo punto de fusión como el sulfuro de hierro que se segregá hacia los bordes de granos y solidifica a 985 °C, reduciendo la cohesión. El agrietamiento en caliente es frecuente en aceros con contenido de 0,1 a 0,5% de azufre.

Afortunadamente, el Manganeso tiene mayor afinidad con el azufre para formar sulfuros en manganeso (SMn), con puntos de fusión elevados, reduciendo notablemente el riesgo de agrietamiento. Para ser efectiva en la prevención del agrietamiento, la relación Mn:S en el metal de soldadura debe ser 20:1 como mínimo. Elementos como P, Si, C Y Ni también contribuyen al agrietamiento en caliente mediante diversos mecanismos.

Las tensiones originadas en la soldadura resultan de la contracción del metal de soldadura durante su solidificación, estando embridoado por el material circulante que se mantiene mas frió. El agrietamiento en caliente es mas probable que ocurra en cordones de raíz debido al tamaño pequeño de estos comparado con la masa del material a soldar.

#### **1.6.4.- *Grietas de fusión de bordes de granos***

Las tensiones propias de la soldadura y una composición particular del material pueden generar descohesión de granos del metal en la región adyacente a la línea de fusión. Normalmente se encuentran como microgrietas no detectadas a simple vista, sino visibles a los líquidos penetrantes o al microscopio.

Durante el ciclo de temperatura alcanzado por el metal cerca de la línea de fusión, las inclusiones de sulfuros tienden a segregarse en los bordes de granos en forma de películas líquidas, lo que disminuye notablemente la resistencia de esta zona. Un acero que se fragilaza de esta manera se denomina “quemado”. Para disminuir notablemente el riesgo a este tipo de agrietamiento, los materiales a seleccionar deben tener en lo posible una relación Mn: 50 ó más, según **Benzo y Capodicasa<sup>(12)</sup>**

## 1.7.- Discontinuidades en la soldadura FCAW

Las discontinuidades son interrupciones en la estructura física de la soldadura. Se considera que las discontinuidades son defectos cuando constituye peligro para el funcionamiento idóneo de la soldadura.

Por definición, un defecto es una condición que debe ser removida o corregida. La palabra “defecto” debería ser cuidadosamente usada, ya que implica que la soldadura es defectuosa y requiere medidas correctas o su rechazo de este modo, algunas reparaciones pueden ser hechas innecesariamente sin un criterio de ingeniería validos que las sostenga. Consecuentemente, en ingeniería se utiliza el termino discontinuidad o imperfección en lugar de defecto.

La significación de la discontinuidad en la soldadura debe ser visto bajo el contexto de la idoneidad para el propósito que debe cumplir la soldadura o ensamble soldado; siendo esta idoneidad un balance entre la calidad, confiabilidad y economía del procedimiento de soldadura.

Existen normas y códigos de aceptación que son usados cuando una discontinuidad ha sido claramente localizada, identificada, medida, determinada su orientación y su significancia estructural cuestionada. Se considera que una discontinuidad es aceptable cuando la misma no sacrifica la confiabilidad de la soldadura o ensambles soldado, según Benzo y Copadicasa<sup>(12)</sup>.

### 1.7.1.- *Tipos de discontinuidades*

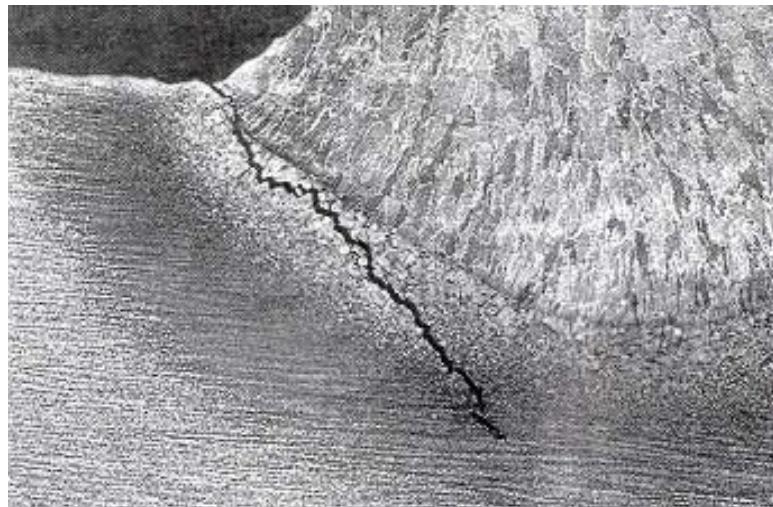
La presencia de discontinuidades superficiales o internas en la soldadura pueden ir en detrimento del desempeño de la soldadura, si excede ciertas características (defectos). Existen amplia información sobre la manera de detectar las causas y

formas de prevenir los defectos 13,14 y 15. Los defectos típicos hallados en soldaduras son:

- Porosidad
- Socavadura
- Solapamiento
- Falta de penetración y fusión
- Rechupes
- Fracturas en el cráter
- Exceso de penetración
- Fractura en caliente
- Inclusiones por retención de escoria, virutas o defectos presentes en el material de inicio

**Grietas de cráteres:** se origina en los cráteres de la soldadura (cavidades que quedan al comienzo o al final del proceso). Si existe una grieta en una soldadura inconclusa, al continuarla se debe refundir el metal en la grieta y luego seguir el soldado. Estos defectos, pueden ser longitudinales, transversales o en forma de estrellas.

**Grietas por tensión:** Es el resultado de los esfuerzos residuales durante el enfriamiento de estructuras rígidas, que pueden ocurrir en cualquier zona del cordón. Estos defectos pueden empezar en el cordón y terminar en la zona afectada por el calor (ZAC). Generalmente, son transversales en la soldadura de un solo pase, y longitudinales en la soldadura de pases múltiples (figura 10).

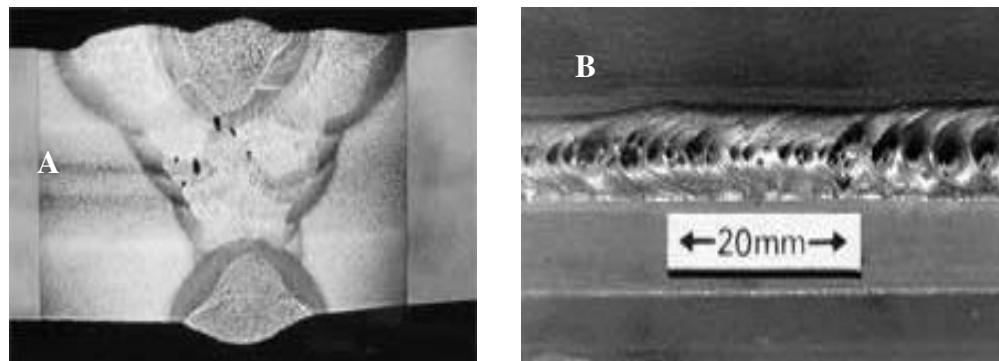


**Figura 10:** Grieta por tensión (Fuente TWI)

**Porosidades:** Son cavidades internas y superficiales (figura 11) que se forman en el metal depositado, ocasionadas por el gas atrapado durante la solidificación. Elementos tales como el azufre, plomo y selenio en el metal base y contaminaciones externas, tales como, aceites, grasas, pintura, herramienta y humedad en el área a soldar pueden incrementar las porosidades en el cordón.

Los poros pueden tener distintas formas y medidas con construcciones o expansiones. La distribución de las porosidades en la soldadura puede ser alineadas, agrupadas, o uniformemente distribuidas.

Los factores que se deben considerar para minimizar la porosidad están relacionadas con la eliminación de la herrumbre, pintura, grasas, aceites, humedad de la superficie; el control del arco eléctrico, con longitud del baño de fusión, los gases de protección, selección y uso del material de aporte, etc.



**Figura 11.** Porosidades internas y superficiales (A: Poros Internos y B: Poros superficiales)  
(Fuente TWI)

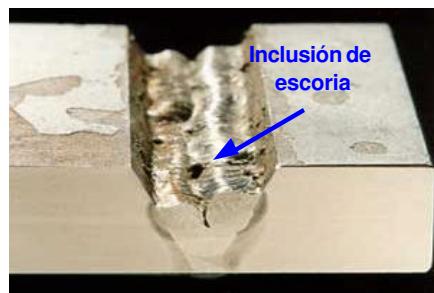
**Inclusiones de escoria (figura 12):** Son inclusiones metálicas y no metálicas, atrapados en el metal depositado, ó entre el metal depositado y el metal base. La mayoría de la veces son de forma no planas y pueden presentarse como globular de pequeños y gran tamaño y como bandas alargadas. Su distribución en el metal depositado puede ocurrir aleatoriamente como partículas aisladas o como líneas de inclusiones continua e intermitente, paralela al eje de la soldadura.

Este tipo de discontinuidades ocurre en la soldadura de los aceros, fabricada mediante los procesos de: electrodo revenido (SMAW), arco sumergido (SAW) y electrodos tubulares con gas de protección (FCAW). La escoria resulta de la reacción química entre los elementos presentes en el baño de metal fundido y el revestimiento protector o Flux.

La soldadura de múltiples pasos son más propensas a las inclusiones de escoria que las soldaduras de un solo paso. El atrapamiento de la escoria puede ocurrir cuando la misma se mezcla con el baño de fusión ó cuando la escoria presente en la superficie no es completamente removida, cubriendo los pasos sucesivos.

Los factores que afectan el atrape de la escoria están relacionados con la velocidad de enfriamiento, temperatura, viscosidad, agitación y geometría de la junta.

Las escorias deben ser removidas de la superficie de la soldadura mediante el uso de un cincel, cepillo de alambre, esmeril etc. Para eliminar la escoria atrapada se debe mantener un tiempo extra el baño de fusión, permitiendo así que la escoria alcance la superficie.



**Figura 12.** Inclusiones de escoria (Fuente TWI)

**Falta de penetración y fusión (figura 13 y 14):** coalescencia incompleta de alguna porción entre el metal depositado y el material base o entre dos capas contiguas de metal depositado.

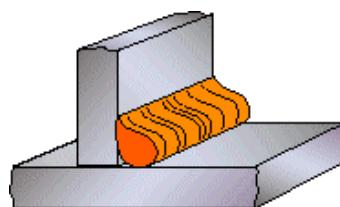
Estos defectos ocurren cuando es insuficiente el calor absorbido por el metal adyacente a la soldadura, causando una fusión incompleta en la interfase metal base metal de aporte, o entre pases sucesivos. La falta de fusión usualmente es alargada en la dirección de la soldadura, con bordes agudos o redondeados, dependiendo de las condiciones de formación.

Para prevenir la falta de fusión y de penetración, el calor aportado debe ser incrementado para permitir la fusión total entre el metal depositado y el metal base, así como entre pases sucesivos en juntas de pase múltiples. La geometría y separación de las juntas deben permitir un control apropiado del arco y del acceso

para el electrodo. La superficie de la junta a soldar debe ser limpiada de todos los contaminantes.



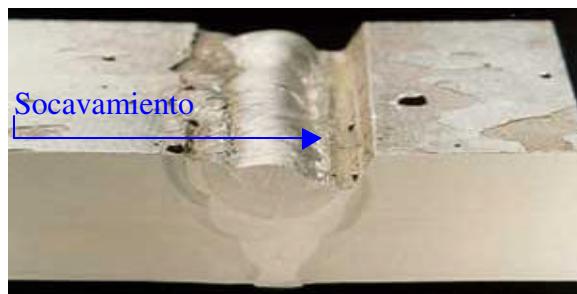
**Figura 13.** Representación de una soldadura con falta de penetración (**Fuente TWI**)



**Figura 14.** Falta de fusión (**Fuente TWI**)

**Socavamiento (figura 15):** Es la falta de metal en los bordes de la soldadura, en forma de surco de longitud variable. Es una garganta localizada en el borde de la soldadura, que ocurre cuando el metal depositado no llena completamente la abertura en la superficie de la junta para formar un empalme liso en los bordes del cordón.

Las socavadura causan algunas veces molestias porque producen una elevación en los esfuerzos, que pueden crear problemas cuando se encuentre sometida a impacto, fatiga y servicio a baja temperatura.



**Figura 15.** Socavamiento (**Fuente TWI**)

## 1.8.- Ensayos no destructivos (END)

Es un mecanismo tecnológico que involucra una serie de métodos que permiten obtener información sobre propiedades, estructura y condición de un material o componente, sin modificar su aptitud para el servicio<sup>(17)</sup>.

### 1.8.1.- *Objetivos de los END*

- Detectar discontinuidades en materiales y estructuras sin destrucción de los mismos.
- Determinar la ubicación, orientación, forma, tamaño y tipo de discontinuidad.
- Establecer la calidad del material, basándose en el estudio de los resultados y en la severidad de las discontinuidades y/o los defectos de acuerdo a las normas de calidad y los objetivos del diseño de calificación.

Las técnicas de END se pueden clasificar en:

- Técnica de Inspección Superficial
- Técnica de Inspección Volumétrica
- Técnicas de Inspección de la Integridad o Herramienta

La **norma API 1104**, incluye criterios para la aceptación de soldaduras en aceros basándose en un número de defectos como penetración inadecuada, fusión incompleta, concavidad interna, exceso de penetración, inclusiones de escoria y porosidad.

El criterio de aceptación de la API 1104 para las discontinuidades es:

**Inclusiones de escoria;** la *inclusiones elongada* no deben tener un ancho mayor a 1,6 mm, teniendo límite de 50 mm por cada 305 mm de soldadura.

**Inclusiones aisladas**, anchura superior a 3,2mm, 105mm de inclusiones de escoria aisladas por cada 305mm (12in) de soldadura. Las indicaciones acerca de la longitud agregada de inclusiones de escoria aisladas no deberán exceder dos veces el menor espesor nominal de la pared y el ancho no deberá exceder la mitad del menor espesor de las paredes unidas.

#### **1.8.2.- *Técnica de inspección superficial***

Mediante esta solo se puede comprobar la integridad superficial de un material. Por tal razón su aplicación es conveniente cuando es requerido detectar discontinuidades que están en la superficie abierta o en profundidades menores de 3mm. Este tipo de inspección se realiza por medio de los siguientes END:

- Inspección Visual (VT)
- Líquidos Penetrantes (PT)
- Partículas Magnéticas (MT)
- Electromagnetismo (ET)

#### **1.8.3.- *Técnicas de inspección volumétrica***

Su aplicación permite conocer la integridad de un material en su espesor y detectar discontinuidades internas que no son visibles a simple vista. Este tipo de inspecciones se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Radiografía Industrial (RT)
- Ultrasonido Industrial (UT)
- Radiografía Neutrónica (NT)
- Emisión Acústica (AET)

#### **1.8.4.- *Inspección Visual***

Es una técnica, que requiere de gran cantidad de información sobre las características de la pieza a ser examinada. Cuando se aplica correctamente como inspección preventiva, detecta problemas que pudieran ser mayores en los pasos subsecuentes de producción o durante el servicio de la pieza. La inspección la debe realizar un personal bien entrenado.

Según **Dallam<sup>(16)</sup>**, esta técnica es importante debido a que permite evaluaciones macrocaracterísticas específicas de una soldadura, tales como:

- Altura: la altura de una soldadura debe ser apropiada para la pieza.
- Localización: una soldadura incorrectamente localizada podría impedir que la pieza funcione correctamente. Un ejemplo no tan extremo es una soldadura a filete con lados de diferente longitud, lo que provoca una distribución desigual de fuerzas y por tanto una ruptura laminar.
- Uniformidad: la distorsión, la posibilidad de retener escoria en soldaduras de múltiples pasos y la distribución uniforme del esfuerzo al soportar carga, dependerán de la uniformidad relativa de la soldadura.
- Defectos: idealmente, una soldadura debería estar libre de defectos macroscópicos. Entre los defectos comunes están: socavadura, falta de fusión, pequeños poros y retención de escoria.

- Altura de Cara: una soldadura debería tener una cara relativamente plana. Si la cara es demasiado convexa, el esfuerzo se concentrará en el pie de la soldadura. Si por el contrario, una cara demasiado cóncava hará que el esfuerzo se concentre en la garganta de la soldadura.

#### **1.8.5.- *Líquidos penetrantes***

La inspección por líquidos penetrantes se emplea para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados. Consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra por discontinuidades del material debido al efecto de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de líquido y se aplica un revelador, (generalmente polvo blanco) que absorbe el líquido que ha penetrado en la superficie y sobre la capa de revelado se delinea el contorno de ésta.

##### **1.8.5.1.- *Secuencia de la inspección***

Para la inspección por líquidos penetrantes se debe realizar varias operaciones previas, las cuales son:

- Limpieza previa: En toda pieza o componente que se inspeccione por este método, se deben eliminar de la superficie los contaminantes, sean óxidos, grasas, aceites, pinturas, etc.
- Aplicación del penetrante: El penetrante se aplica de forma que humedezca totalmente la superficie que se va a inspeccionar (dependiendo del tamaño de la pieza, de su área y de la frecuencia del trabajo). Eliminación del exceso de penetrante: Consiste en la eliminación del exceso de penetrante que no se introdujo en las discontinuidades. Esta etapa reviste gran importancia pues de ella depende en gran parte de sensibilidad del método.

- Aplicación del revelador: La función del revelador es absorber o extraer el penetrante atrapado en la discontinuidades, aumentando o provocando la visibilidad de la sindicaciones.
- Tiempo del revelado: Para que las discontinuidades se puedan revelar debe transcurrir un determinado tiempo, que dependerá del tipo de revelador utilizado.
- Interpretación y evaluación: Despues que a transcurrido el tiempo de revelado la pieza está en condiciones de ser evaluada.
- La calidad de la inspección dependerá principalmente de la norma de aceptación, de la habilidades y de la experiencia del inspector para encontrar y evaluar las indicaciones presentes en la pieza.
- Limpieza final: Despues de culminar la inspección, debe limpiarse la superficie de la pieza. Este paso se puede realizar mediante un enjuague con agua a presión, por inmersión o mediante un removedor, con el objetivo de eliminar el resto del liquido penetrante.

#### **1.8.5.2.- *Ventajas del uso de los líquidos penetrantes***

La inspección por líquidos penetrantes es extremadamente sensible a las discontinuidades abiertas a la superficie.

- La configuración de la pieza a inspeccionar no representa un problema para la inspección
- Son relativamente fáciles de emplear
- Brinda muy buena sensibilidad
- Son económicos

- Son rápidos en cuanto a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil

#### **1.8.5.3.- *Limitantes de los líquidos penetrantes*<sup>(17)</sup>**

- Solo son aplicables a defectos superficiales y a materiales no porosos.
- Se requiere de una limpieza previa, a la inspección.
- No se proporciona un registro permanente de las pruebas no destructivas.
- Los inspectores deben tener amplia experiencia.
- Requiere de la combinación de revelador y penetrante además para garantizar sensibilidad del método.

#### **1.8.6.- *Radiografía*<sup>(17)</sup>**

La inspección por radiografía es un proceso no destructivo del tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física del material.

Se basa en la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, siendo esta última de una longitud de onda muy corta y de alta energía.

Durante la explosión radiográfica, la energía de los rayos X o gamma, es absorbida o atenuada al atravesar el material inspeccionado. Esta atenuación es proporcional a la densidad, espesor y configuración del material que atraviesa.

La radiación ionizante que logra pasar el objetivo, puede ser registrada por medio de impresión en una placa o papel fotosensible, que posteriormente se somete a revelado para obtener la imagen del área inspeccionada; o bien, por medio de una pantalla fluorescente o tubo de video, para después analizar su imagen en una

pantalla de televisión o grabarla en una cinta de video. En términos generales, es un proceso similar a la fotografía, con la diferencia principal de que la radiografía emplea rayos X o gamma y no energía luminosa, como lo hace la fotografía.

### **1.9.- Ensayos destructivos**

Son aquellos ensayos que originan la destrucción de la muestra o por lo menos una sección de esta. La finalidad de estos ensayos es comprobar que una soldadura presente aptitud para su empleo, según una norma específica; es decir, que las propiedades mecánicas o químicas cumplan con los requisitos establecidos en la norma.

Son utilizados para calificar el procedimiento de soldadura y soldadores, también para determinar las propiedades mecánicas tanto del material base como del material de aporte.

#### **1.9.1.- *Tipo de ensayos***

La norma API 1104 establece los siguientes ensayos no destructivos para la calificación de una soldadura:

- Inspección Visual
- Inspección por ultrasonido
- Inspección por Radiografía

**Ensayo de tracción:** La prueba de tracción es la que se usa frecuentemente, para determinar las propiedades mecánicas de materiales y consiste en aplicar una fuerza de tensión a un material hasta la ruptura.

El esfuerzo y el alargamiento se mide continuamente a medida que aumenta la carga y como resultado de este ensayo se obtiene un diagrama de esfuerzo Vs deformación.

Variables importantes en el ensayo:

- Tipo de probeta
- Número, geometría y dimensiones de la probeta
- Calibración del equipo
- Velocidad de aplicación de la carga

**Ensayo de impacto:** La prueba de impacto nos indica la tenacidad de un material, siendo esta, la capacidad que tiene un material de absorber energía. Este ensayo se realiza sometiendo una probeta a un impacto, en esta prueba se registra la cantidad de energía absorbido por el material. El ensayo de impacto se puede realizar a diversas temperaturas.

Variables Importantes del ensayo:

- Tipo de probeta
- Número, geometría y dimensiones de la probeta
- Calibración del equipo
- Posicionamiento de la probeta
- Temperatura del ensayo

**Ensayo de doblez:** El objetivo básico del ensayo de doblado es determinar la calidad, y ductilidad de la soldadura y se realiza doblando una probeta en forma de U y luego se evalúa la superficie doblada. Este ensayo para calificar procedimiento de soldadura.

Variables importantes en el ensayo de doblado:

- Tipo de probeta
- Número, geometría y dimensiones de la probeta
- Colocación de la muestra
- Dimensión del dispositivo del doblado

## **1.10.- Especificación del procedimiento de soldadura (EPS)**

La EPS es un procedimiento de soldadura calificado que proporciona las directrices para elaborar una soldadura de producción y/o reparación, según los requerimientos.

### **1.10.1.- *Contenido de un EPS***

En una EPS se debe considerar todas las variables esenciales, no esenciales y en algunos casos las variables esenciales suplementarias, para cada proceso de soldadura.

### **1.10.2.- *Cambios en el EPS***

Los cambios pueden ser hechos en variables no esenciales de un EPS, sin la necesidad de reclasificar, mientras que una modificación de las variables esenciales o esenciales suplementarias requiere reclasificación del EPS.

**1.10.3.- *Formato***

La información dada en la EPS puede estar en cualquier formato, que satisfaga las necesidades de cada fabricante.

**1.10.4.- *Disponibilidad de la EPS***

Una EPS está disponible en el sitio de fabricación para consultar y revisión por el personal autorizado.

**1.11.- Registro de calificación del procedimiento (RCP)**

Un RCP es un registro de la calificación del procedimiento de los datos de soldadura usados para la elaboración del cupón de prueba, y de los resultados de los ensayos aplicados a las diferentes probetas.

**1.11.1.- *Contenido del RCP***

El RCP debe documentar todas las variables esenciales y cuando sea requerido las variables suplementarias, las variables no esenciales y otras usadas durante la soldadura del cupón de prueba, puede ser registrada a opción del fabricante.

**1.11.2.- *Cambios del RCP***

Los cambios al RCP no son permitidos. El RCP es un registro de lo que ocurrió durante una prueba particular de la soldadura

**1.11.3.- *Formato del RCP***

La información requerida para estar en el RCP, puede estar en cualquier formato que satisfaga las necesidades de cada fabricante. También debe ser enlistados los tipos números y resultados de los ensayos aplicados a las probetas.

**1.11.4.- *Disponibilidad del RCP***

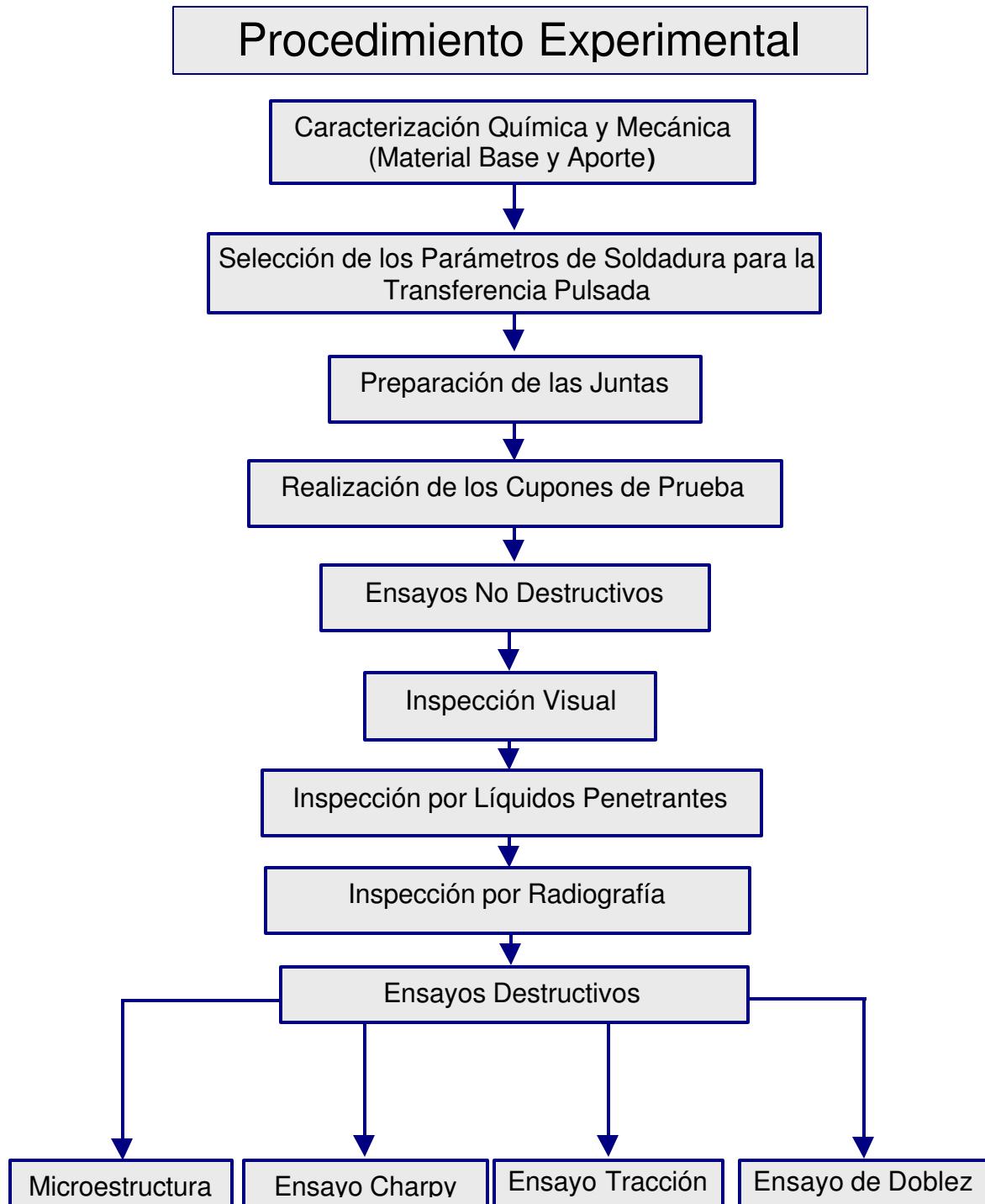
Los RCP usados para soportar los EPS deben estar a la disposición, bajo solicitud, para ser revisados por el personal autorizado, no es necesario que este disponible para el soldador.

# Capítulo II

---

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

## II.-PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



**Figura 16.** Diagrama de flujo

## 2.1.- *Descripción de la máquina de soldadura*<sup>(18)</sup>

Se empleó una fuente de soldadura multiproceso MTE DIGITEC 300, proveniente de LABSOLDA/Brasil. En la figura 17 se muestra la fuente eléctrica y en la figura 18 un detalle del panel de control de la misma. Esta fuente, fue diseñada para operar GMAW (MIG/MAG) con transferencia metálica de arco pulsado.



**Figura 17.** Equipo de soldadura MTE DIGITEC 300

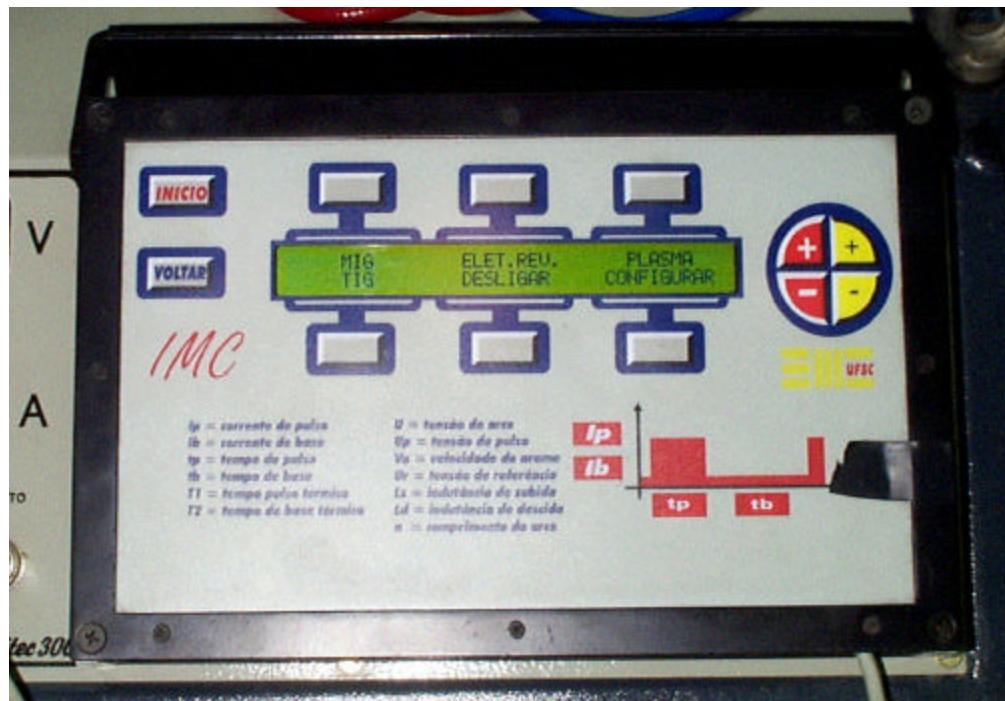


Figura 18. Panel de control

**Registro de los oscilogramas y parámetros de soldadura**, para la adquisición y almacenaje de los datos de los parámetros de soldadura con transferencia pulsada usados dentro esta investigación se empleó un programa denominado OSCILOS versión 4.0 que implementa un osciloscopio digital, incorporado dentro de una computadora, el cual permite realizar funciones específicas para el análisis de procedimientos de soldadura. Este programa, funciona mediante la instalación de unos sensores electrónicos a la fuente de soldadura que permiten registrar la corriente, voltaje, velocidad de alimentación del alambre y flujo de gas.

A través de los registros tomados por estos sensores la computadora presenta en la pantalla el oscilosgrama del proceso mediante el cual podemos monitoriar los parámetros y comportamiento del arco de soldadura. A través de estos registros es posible obtener y analizar los oscilosgramas de corriente y tensión así como la variación en la tasa de alimentación del alambre y flujo del gas, cálculo de potencia y energía aportada por el arco.

## 2.2.- *Material de aporte*

El material de aporte empleado fue un alambre tubular de 1,6 mm de diámetro, marca LINCOLN ELECTRIC, denominado Outershield 71-M para aceros al carbono el cual tiene un requerimiento AWS E71T-1 y una composición química:

*Cuadro 1. Composición química del Material de Aporte*

	%C	%Si	%Mn	%S	%P
<b>AWS E71T-1</b>	0,18	0,9	1,75	0,03	0,03

La información referente a las especificaciones del material de aporte se muestran en el Anexo.

## 2.3.- *Caracterización del material base y depósito*

Se realizó el Análisis Químico para determinar el contenido de Carbono (C), Silicio (Si), Manganeso (Mn) y Azufre (S); expresados en porcentaje en peso. Para determinar la presencia de Si y Mn se utilizó el método de *Absorción Atómica por Espectrofotometría de Llama* y para el C y S el método gasométrico usando el equipo (LECO).

## 2.4.- *Selección de los parámetros del arco pulsado*

Este procedimiento, se realizó con la ayuda del método que reseñado por Amin<sup>(9)</sup> utilizando el Criterio de Burnoff (1.4), considerando el método de ensayo y error, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- La distancia tobera – pieza fijada en 15 mm
- La utilización de una mezcla de gas fija de 80% Ar y 20% CO<sub>2</sub> (AGAMIX 20) con un flujo de 12 lts/min

Seguidamente, se procedió a soldar en diferentes velocidades de alimentación

( $V_A$ ), para una transferencia convencional y pulsada, obteniéndose la intensidad promedio ( $I_M$ ) para cada una de las diferentes  $V_A$ , a continuación se gráfico las datos experimentales derivadas del proceso ( $V_A$  en el eje de las abscisas y  $I_M$  en el eje de las ordenadas), para la transferencia pulsada y convencional.

Posteriormente se ubicó el punto de intersección (punto transición entre la transferencia Spray-pulsada y grobular), tal como se describe en la figura 19.

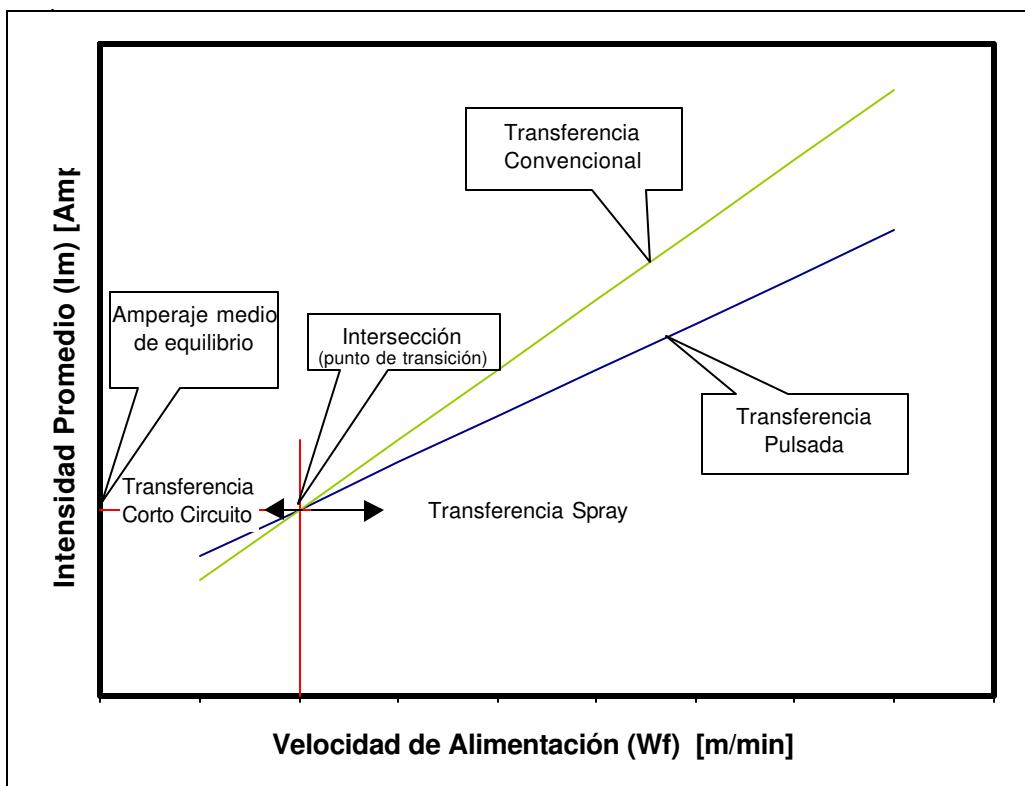
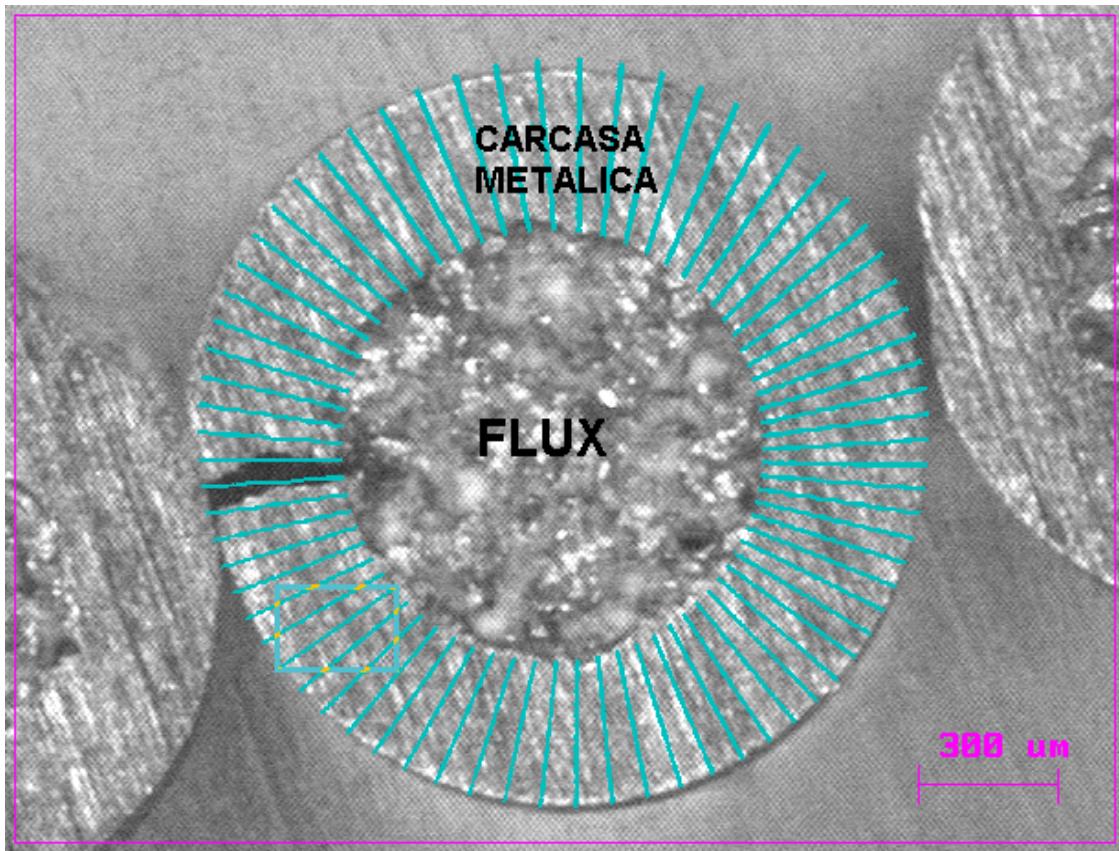


Figura 19. Esquema de la gráfica requerida para determinar el punto de trabajo<sup>(5)</sup>

Con la determinación del punto de transición, se procedió a la elección de una velocidad de alimentación ( $V_A$ ) mayor a la del punto, dentro de la transferencia spray, y se determinó su correspondiente intensidad media  $I_M$ . Posteriormente, por medio de un analizador de imagen se calculó el diámetro metálico del alambre, es decir, el espesor de la carcasa o concha metálica ( $E_{CM}$ ) del electrodo (igual al radio del alambre menos el radio del flux, figura 20).



**Figura 20.** Sección transversal del electrodo

Seguidamente, se calculó el volumen de la gota desprendida ( $V_D$ ); por medio de la ecuación 2, asumiendo que la gota tiene forma esférica y un diámetro ( $D_d$ ) igual al doble del espesor de la concha metálica ( $E_{CM}$ ), implica  $E_{CM}$  igual al radio ( $r$ )

$$V_D = \frac{4}{3} \pi \cdot E_{CM}^3$$

Con el volumen de la gota, se determinó el período o tiempo del ciclo ( $t_c$ ), que es igual a suma entre el tiempo de pico ( $t_p$ ) y el tiempo de base ( $t_b$ ), por medio de la ecuación 3:

$$t_c = \frac{240 \cdot V_D}{\pi \cdot d^2 \cdot V_A}$$

Posteriormente, se procedió con los datos originados por las ecuaciones [4] y [3] ( $I_M$ : Intensidad media y  $t_c$ : Tiempo de ciclo, respectivamente) a aplicar la ecuación [5]. En donde, se varia el  $t_p$  con una razón de 0,5 mseg entre 0,45 y 10,45 mseg, tal que:

$$I_p = \left( \frac{t_c}{t_p} \right) I_M - \left( \frac{t_c}{t_p} - 1 \right) I_B$$

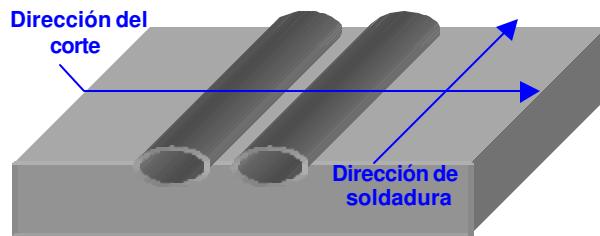
Con los datos generados se construye el **gráfico  $I_B$  Vs  $I_p$**  (Zona paramétrica, igual a la observada en la figura 8) para los diferentes  $t_p$  calculados.

Elaborado el gráfico  $I_B$  vs.  $I_p$ , inmediatamente se procedió a la delimitación de la zona de la siguiente manera:

- a. Se tomarán valores de  $I_B$  entre 20-110 amp con una progresión aritmética de 10 amp.
- b. Se determinaron los cortes de las diferentes curvas  $t_p$  con la vertical que pasa por el valor escogido de  $I_B$ .
- c. Se determinaran las intensidades pico de los puntos encontrados en (b), para cada curva  $t_p$  hasta  $I_p = 450$  amp (límite de la maquina de soldadura).
- d. Realizado esto, se insertaron los parámetros de soldadura ( $V_A$ ,  $t_B$ ,  $t_p$ ,  $I_B$ ,  $I_p$ ) en el microprocesador de la maquina de soldadura, procediéndose a la realización de la soldadura sobre chapa de acero al carbono.
- e. Se registraron las observaciones pertinentes durante y después de la soldadura, tales como, características del cordón, existencia de corto circuito con la ayuda de los oscilogramas (grabado durante el proceso) e iniciación del arco, identificándose cada punto; para la delimitación de la zona de soldadura.

Seguidamente, se procedió a elegir 12 parámetros de la zona delimitada en el gráfico  $I_P$  Vs  $I_b$ , tomando en cuenta la calidad superficial, remoción de escoria y la forma del cordón.

Luego se procedió a la realización de dos cordones de soldadura por cada parámetro, sobre un chapa de acero al carbono. Posteriormente, se cortaron los dos cordones realizados por la mitad en dirección perpendicular a la dirección de soldadura (figura 21),

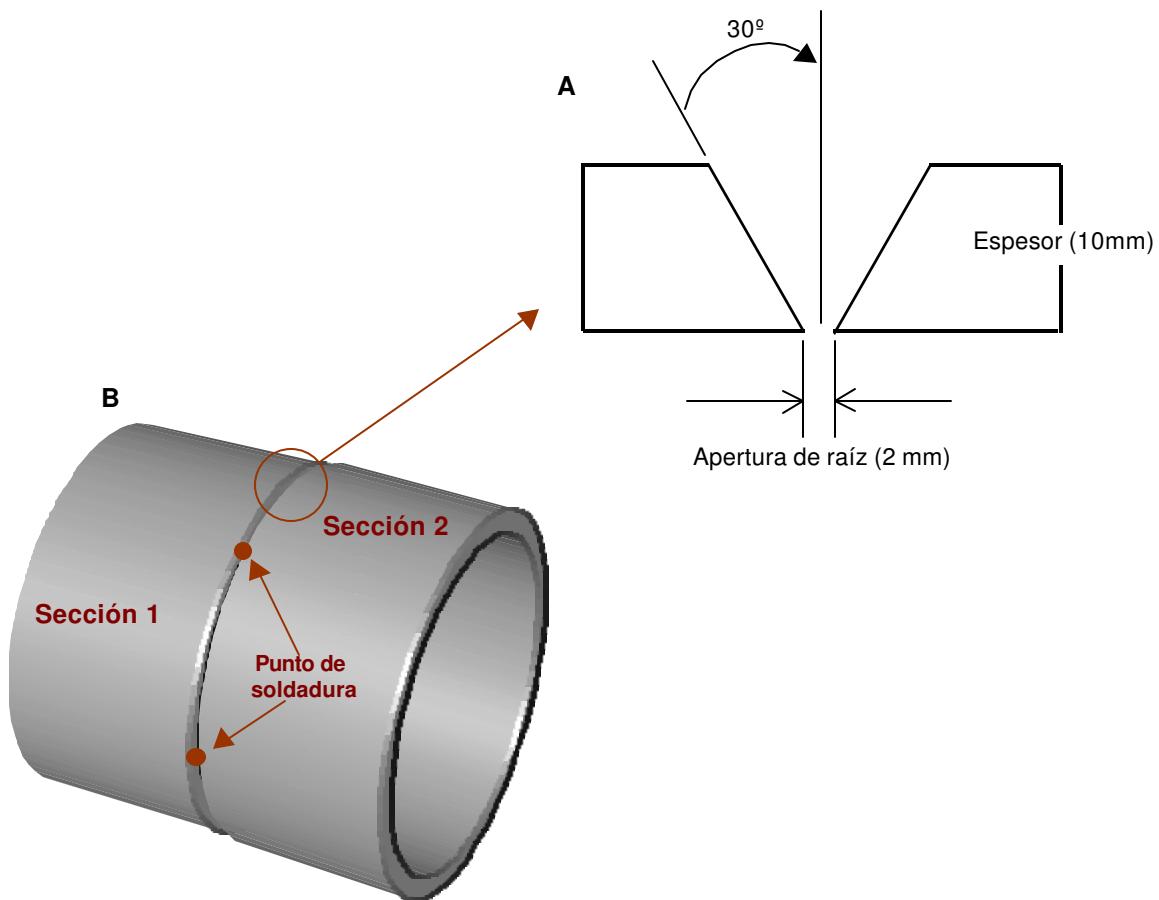


**Figura 21.** Cortes de las probetas para la selección del mejor parámetro de pulso

Para el macroataque se utilizó nital en alcohol al 3% atacándola durante 1 minuto aproximadamente, se tomó una macrografía ampliada en un analizador de imagen para la determinación de la penetración del cordón.

## 2.5.- Preparación de los Cupones de Pruebas

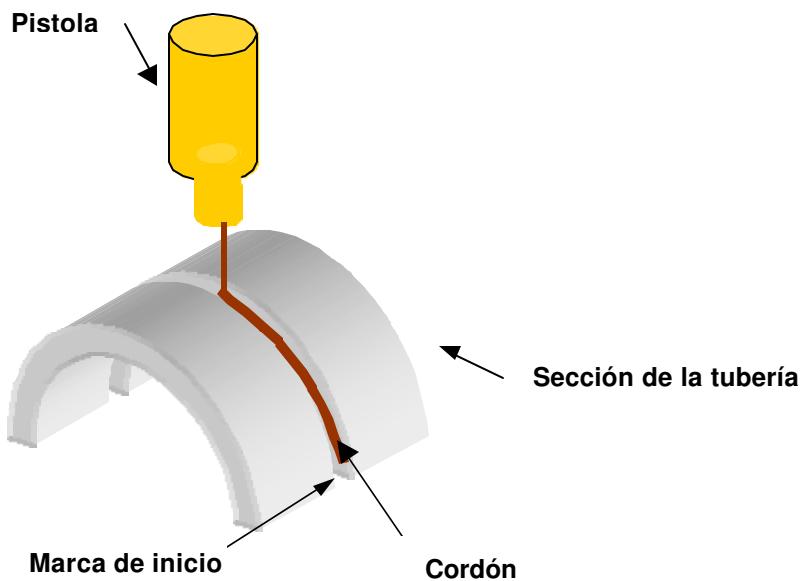
Se maquinaron *juntas de penetración total* en los cupones de pruebas con un ángulo de bisel de  $30^\circ$  con respecto a la vertical y un talón de 1 mm aproximadamente (figura 22(a)). Seguidamente, se puncó la junta en dos secciones de la tubería, dejando una apertura de raíz de 2 mm (figura 22(b)) y se procedió a la preparación de las superficies de soldadura, por medio de un esmeril que contiene una disco similar a una lija 80, posteriormente se marcó la zona de punción.



**Figura 22.** Características de los cupones de prueba, A – Diseño de junta y B – Unión de las secciones

### **Elaboración de la Soldadura**

Esta se realizó de manera manual sobre las secciones cortadas, colocando la pistola de soldadura en un ángulo aproximado a los 90° con respecto al metal base, con una distancia pieza-tobera de 1,5 mm y un flujo de gas AGAMIX 20 de 12 litros/min, se determinó el tiempo y la distancia recorrida durante el proceso (distancia entre la marca inicial y la marca final), para obtener la velocidad de avance ( $V_s$ ).



**Figura 23.** Ilustración de la realización de la soldadura en el cupón de prueba

## 2.6.- *Ensayos no Destructivos*

### 2.6.1.- *Inspección Visual*

Se realizó durante y después de la soldadura, tomando en cuenta criterios como, penetración, calidad del pase de raíz y calidad superficial en cada pasada.

### 2.6.2.- *Inspección por Líquido penetrantes*

Se limpió la superficie de ensayo rociándose con el líquido limpiador marca TECNOEND frotándose con paños secos, inmediatamente se roció la zona de ensayo con el líquido penetrante marca TECNOEND, dejándolo actuar durante 7 minutos, seguidamente se eliminó el exceso de líquidos penetrante con un paño, procediéndose a la aplicación del revelador de la misma marca dejándolo por 10 minutos, para luego inspeccionar visualmente posibles defectos.

### **2.6.3.- *Inspección por Radiografía***

Con un vernier, se midió el espesor del cupón y el cordón de soldadura, luego con la especificación de la película radiográfica (AGFA D4), se procedió a la determinación del voltaje de radiación, la exposición a la radiación y luego con la exposición a la radiación se determinó el amperaje y tiempo de exposición.

Seguidamente, en un cuarto oscuro, se colocó dentro de la funda una película radiográfica doblándose la entrada de la funda y sellándola con tirro, colocándose debajo de la zona del cordón de soldadura sujetándose las esquinas de la funda con tirro, seguidamente se volteó la pieza, colocándose paralelo al cordón la identificación de la probeta con letras y/o números de plomo (así: S1 para la probeta 1, S2 para la probeta 2 y así sucesivamente) manteniéndola unida con tirro, luego se coloco el indicador de la API 1104 paralelo al cordón y del lado opuesto a la identificación del mismo.

Una vez tomada la radiografía de una de las probetas al voltaje y exposición de radiación calculada, se realizó el revelado y posterior secado de la película para determinar el ennegrecimiento de la misma, seguidamente se procedió al recálculo de los parámetros de radiación. Con la intensidad y exposición de radiación recalculada se procedió a la realización de las demás radiografías.

Se realizó luego, el análisis de defectología presente en los cupones de pruebas, marcándose las zonas defectuosas procediéndose a cortar las probetas para los ensayos mecánicos en la zona sin defectos de los cupones de pruebas.

## 2.7.- Ensayos mecánicos

Las probetas obtenidas de los cupones de prueba, se maquinaron y rectificaron según la norma **API 1104** y la ayuda de las normas **ASTM E23-91** y **ASTM A370**. Las dimensiones de las probetas se muestran en las figuras 24, 25 y 26:

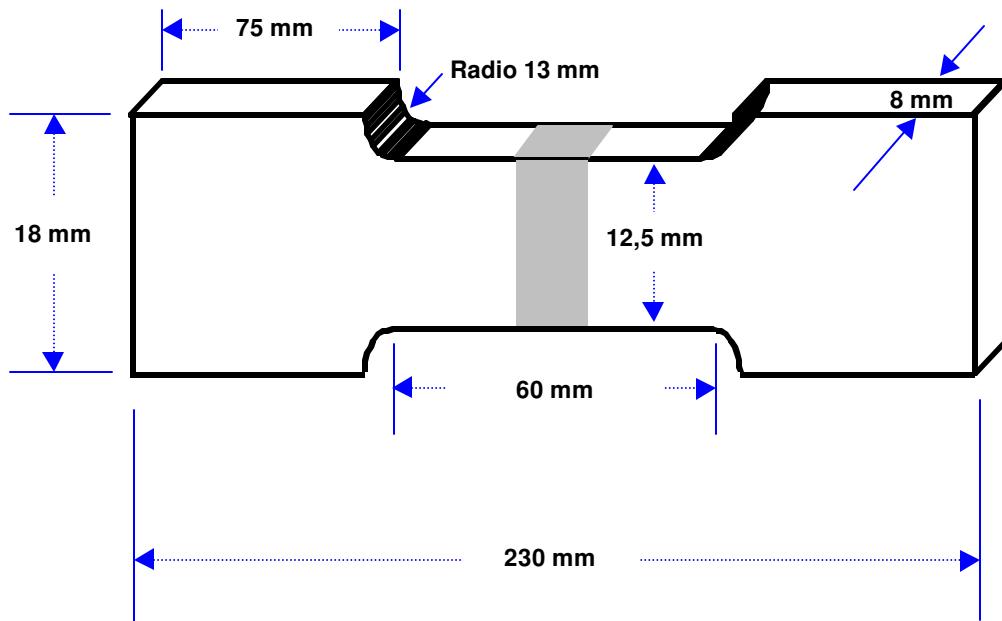


Figura 24. Dimensiones de las probetas de tracción

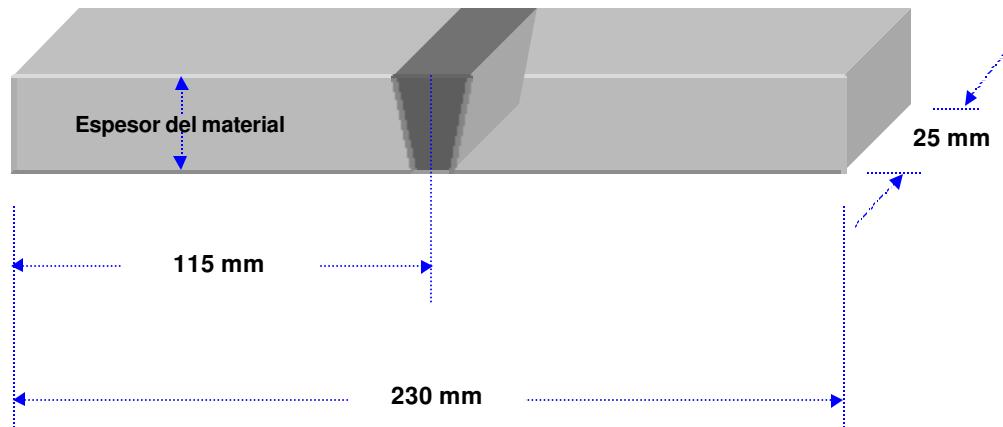
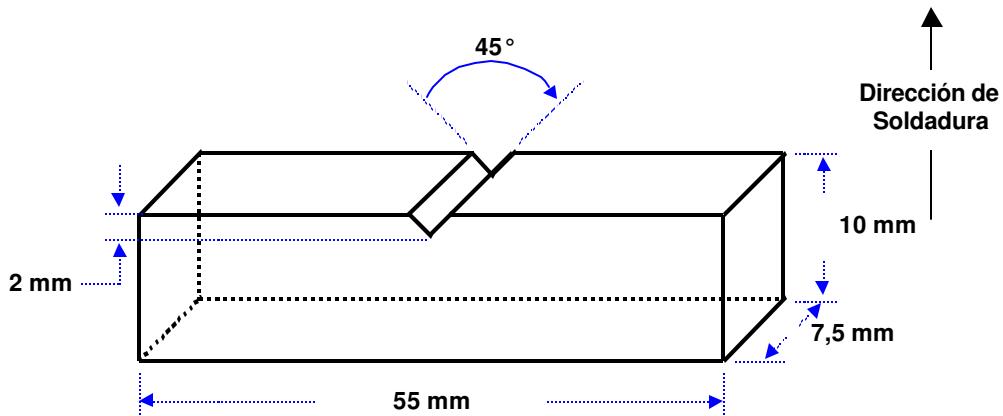


Figura 25. Dimensiones de las probetas de doblez



**Figura 26.** Dimensiones de las probetas sub-estándar Charpy

A continuación, se procedió al rectificado y acabado superficial de todas las probetas hasta una lija número 600.

### 2.7.1.- *Ensayo de tracción*

Se determinó el ancho y espesor inicial de la sección reducida de las probetas así como la longitud de calculó inicial (figura 24), procediéndose a realizar el ensayo en un equipo **Instron modelo 8502**, luego de la ruptura se determinó longitud final y con esta se calculó la resistencia máxima y el porcentaje de alargamiento.

### 2.7.2.- *Ensayo de doblado*

Se utilizó un mandril con la dimensiones especificada en la norma API 1104, luego se colocó la probeta debajo, con la cara de doblado en dirección a la del avance del mandril.

Se realizaron cuatro ensayos de dobles (dos de cara y dos de raíz), los cuales son exigido por la norma API 1104.

### 2.7.3.- *Ensayo de Charpy*

Se introdujeron cada una de las probetas en un recipiente con una solución de agua con sal, y se colocaron en el congelador durante 14 horas. Transcurrido el tiempo se sacaron los recipientes rompiéndose la capa de hielo formada para luego medir la temperatura, inmediatamente se extrajeron las probetas ensayándose rápidamente, determinándose la energía de fractura (energía absorbida).

### 2.7.4.- *Macroataque*

Las probetas se pulieron hasta el paño blanco y se atacaron con 3% de nital en alcohol durante 1 minuto, tomándose una macrografía en un analizador de imagen.

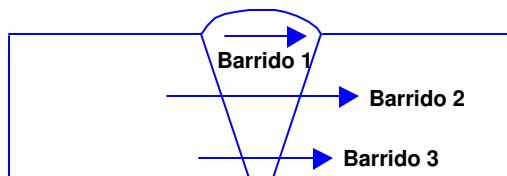
### 2.7.5.- *Ensayo de dureza*

Se realizó un barrido de dureza, similar al representado en la figura 38, donde:

*Barrido 1: Zona superior*

*Barrido 2: Zona central*

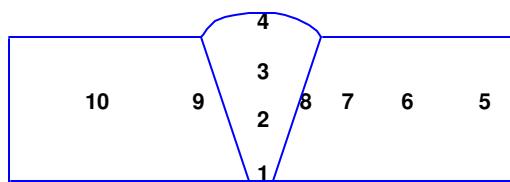
*Barrido 3: Zona inferior*



**Figura 27.** Esquema demostrativo de la realización del barrido de dureza

### 2.7.6.- *Microataque*

La probeta se pulió hasta el paño rojo y se atacó con nital al 2%, durante 30 segundos aproximadamente, realizándose varias micrografía, tal como se muestra en la figura 28.



**Figura 28.** Zonas donde se realizó la micrografía

# Capítulo III

---

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

### III.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

#### 3.1.- Caracterización química y mecánica del material y deposito

En los cuadros 2 y 4 se presenta el análisis químico realizado al material base y al deposito respectivamente. En el cuadro 3 se muestra la caracterización mecánica del material base y aporte.

##### **Material base:**

**Cuadro 2. Análisis Químico del Material Base**

	%C	%Si	%Mn	%S	%Cu	%P	%Ni	%Cr
<b>Material Base</b>	0,15	0,22	0,77	0,005	-	-	-	-
<b>Acero API 5I-X52</b>	0,15	0,20	1,04	0,004	0,01	0,025	0,01	0,02

##### **Propiedades mecánicas:**

**Cuadro 3. Propiedades Mecánicas Nominales del Material Base y Aporte**

	$\sigma_{UTS}$ Ksi (Mpa)	$\sigma_{YS}$ Ksi (Mpa)	Elogación %	CVN Joules
<b>Material Base</b>	65 (450)	52 (358)	35	-
<b>Metal de Aporte</b>	94 (648)	90 (620)	27	52

##### **Cordón:**

**Cuadro 4. Análisis Químico del Depósito**

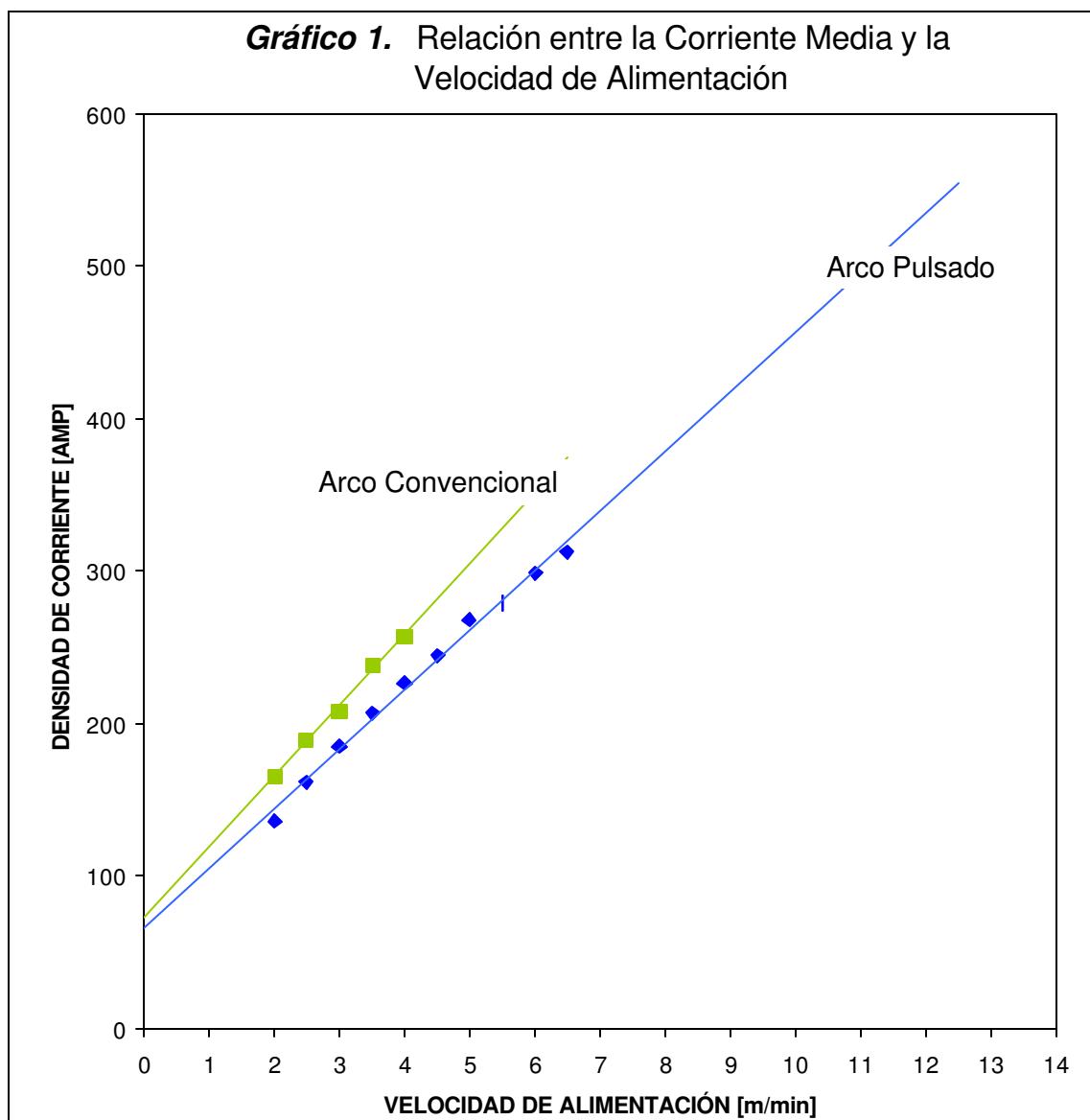
	%C	%Si	%Mn	%S	%P
<b>Cordón</b>	0,08	0,76	1,02	0,011	-
<b>Arco metal</b>	0,066	0,67	1,26	0,0126	-
<b>Nominal</b>	0,06	0,80	1,60	0,015	0,012

Los valores de composición química obtenidos en el metal base y deposito, son similares a los valores establecidos en la norma respectiva; esto permite asegurar que se trabajó con el electrodo y material base especificado.

### 3.2.- Selección de los parámetros de soldadura

#### 3.2.1.- *Criterio de Burnoff*

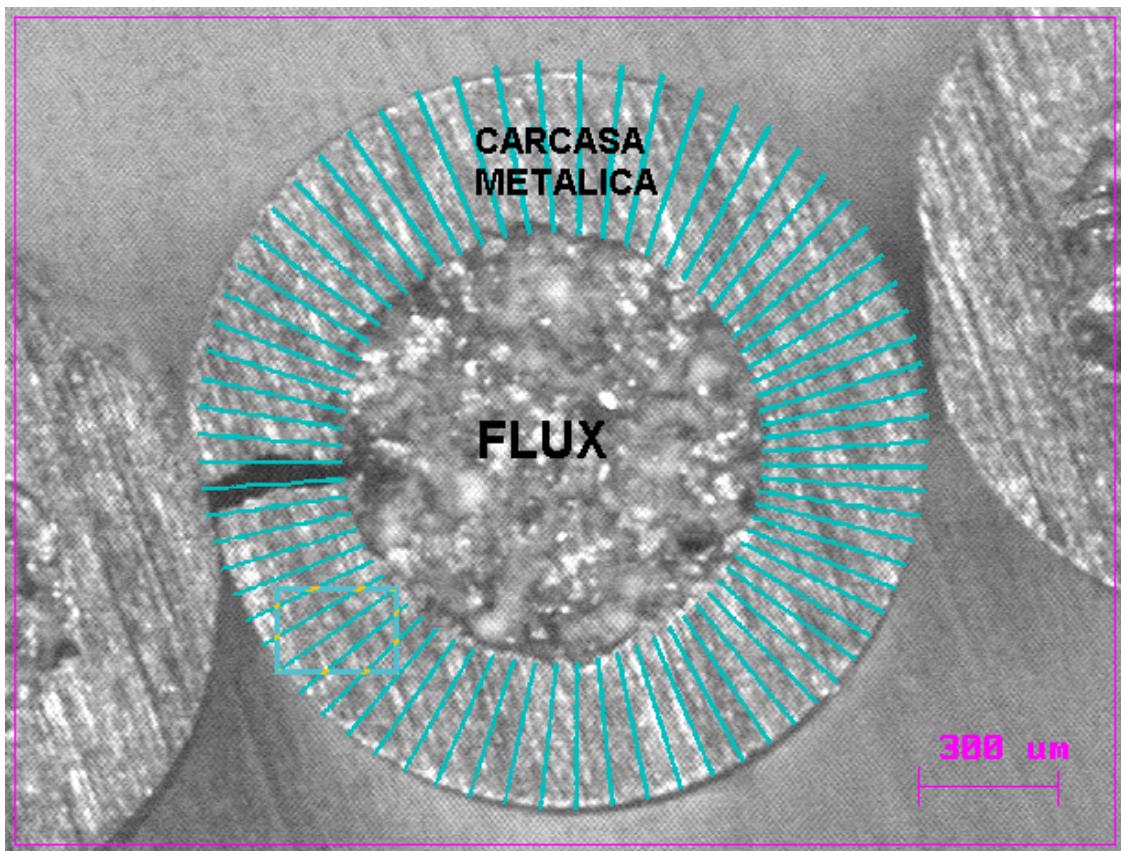
En la gráfico 1, se muestra los resultados obtenidos mediante el criterio Burnoff, con un método de ensayo y error.



De la gráfica 1, fue seleccionado el valor de  $3 \text{ m/min}$  el cual le corresponde una intensidad de corriente media de 165 Amp.

### 3.2.2.- *Diámetro metálico del alambre tubular*

Para calcular diámetro metálico teórico, se determino el espesor y el área de la carcasa o concha metálica, la cual arroja el siguiente resultado.



**Figura 29.** Macrografía de la sección transversal del electrodo utilizado

Promedio del espesor metálico del alambre tubular = 0.41086 mm

### 3.2.3.- *Cálculo del volumen teórico de la gota*

El cálculo del volumen de la gota se realizó a través de la ecuación 2 (pagina 19).

$$V_D = \frac{4}{3} \pi \cdot E_{CM}^3$$

$$V_D = 0,29057974 \text{ mm}^3$$

### 3.2.4.- *Cálculo del tiempo del ciclo para la transferencia pulsada*

El cálculo del tiempo del ciclo se realizó a través de la ecuación 3.

$$t_C = \frac{240 \cdot V_D}{\pi \cdot d^2 \cdot V_A}$$

$$t_C = 10,9570410 \text{ mseg}$$

### 3.2.5.- *Parámetros teóricos de la transferencia pulsada*

La gráfica 2, representa los valores teóricos obtenidos mediante la ecuación 5

$$I_P = \left( \frac{t_C}{t_P} \right) I_M - \left( \frac{t_C}{t_P} - 1 \right) I_B$$

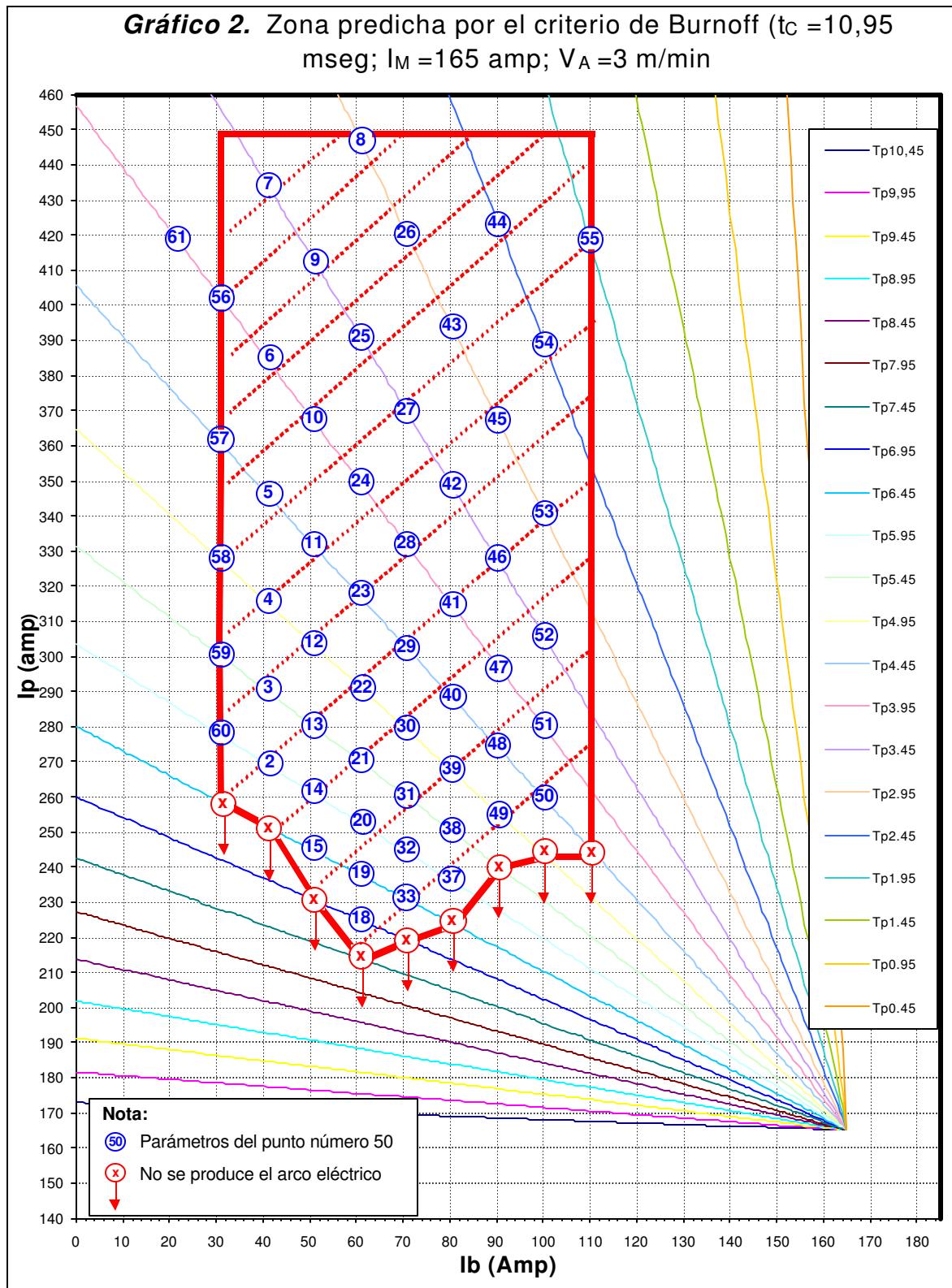
Donde:

$$t_C = 10,9570410 \text{ mseg}$$

$$I_M = 165 \text{ Amp}$$

$$t_P = \text{varia entre } 0 \text{ y } t_C \text{ a razón de } 0,5 \text{ mseg}$$

$$I_B = \text{varia entre } 0 \text{ y } I_M \text{ para cada } t_P$$



### 3.2.6.- Parámetros de soldadura

Los puntos obtenidos por la gráfica 2 siguiendo los pasos antes mencionado, son mostrados en el siguiente cuadro (cuadro 5).

**Cuadro 5. Parámetros de soldadura**

Nº	Tiempo Pico ( $T_p$ )	Tiempo Base ( $T_B$ )	Corriente Pico ( $I_p$ ) [Amp]	Corriente Base ( $I_B$ ) [Amp]	Velocidad de Avance [cm/min]	Velocidad de alimentación [m/min]	Corriente Media ( $I_m$ ) [Amp]	Observaciones
1	6,4	4,5	252	40	16,2	3	-----	Regular
2	5,9	5	270	40	“	“	173	Bien, superficie levantada
3	5,4	5,5	290	40	“	“	175	“
4	4,9	6	317	40	“	“	168	Bien
5	4,4	6,5	348	40	“	“	165	Bien
6	3,9	7	386	40	“	“	163-165	“
7	3,4	7,5	437	40	“	“	166	Bueno, Cordón fino
8	2,9	8	450	60	“	“	164	Muy bueno
9	3,4	7,5	415	50	“	“	162	Excelente
10	3,9	7	369	50	“	“	163	“
11	4,4	6,5	332	50	“	“	164-167	Bueno
12	4,9	6	305	50	“	“	165	Bueno, un poco levantado
13	5,4	5,5	280	50	“	“	167-170	Bueno
14	5,9	5	260	50	“	“	166-170	Levantado
15	6,4	4,5	245	50	“	“	165	Corto circuito
16	6,9	4	230	50	“	“	-----	No Soldó
17	7,4	3,5	215	60	“	“	-----	“
18	6,9	4	225	60	“	“	172-178	C.C., Defectos superficiales

Nº	Tiempo Pico ( $T_p$ )	Tiempo Base ( $T_B$ )	Corriente Pico ( $I_p$ ) [Amp]	Corriente Base ( $I_B$ ) [Amp]	Velocidad de Avance [cm/min]	Velocidad de alimentación [m/min]	Corriente Media ( $I_m$ ) [Amp]	Observaciones
19	6,4	4,5	238	60	“	“	167-173	C. circuito
20	5,9	5	253	60	16,2	3	165	C. circuito ligero
21	5,4	5,5	270	60	“	“	168-174	“
22	4,9	6	291	60	“	“	168	C. circuito, bueno
23	4,4	6,5	319	60	“	“	169	“
24	3,9	7	350	60	“	“	166	Bueno
25	3,4	7,5	392	60	“	“	163-167	Excelente
26	2,9	8	422	70	“	“	158	“
27	3,4	7,5	370	70	“	“	162	Bueno
28	3,9	7	332	70	“	“	163-165	Muy bueno
29	4,4	6,5	304	70	“	“	164-166	Ligero C. Circuito, Bueno
30	4,9	6	280	70	“	“	169	C. circuito, bueno
31	5,4	5,5	260	70	“	“	184	“
32	5,9	5	245	70	“	“	180	C. circuito
33	6,4	4,5	230	70	“	“	174	“
34	6,9	4	220	70	“	“	-	No soldó
35	6,9	4	212	80	“	“	-	“
36	6,4	4,5	223	80	“	“	-	“
37	5,9	5	236	80	“	“	180	C. circuito, cordón delgado
38	5,4	5,5	250	80	“	“	179	“
39	4,9	6	269	80	“	“	177	“
40	4,4	6,5	289	80	“	“	179	“
41	3,9	7	315	80	“	“	176	Bien, C. Circuito
42	3,4	7,5	350	80	“	“	175	Bien

Nº	Tiempo Pico ( $T_p$ )	Tiempo Base ( $T_B$ )	Corriente Pico ( $I_p$ ) [Amp]	Corriente Base ( $I_B$ ) [Amp]	Velocidad de Avance [cm/min]	Velocidad de alimentación [m/min]	Corriente Media ( $I_m$ ) [Amp]	Observaciones
43	2,9	8	395	80	“	“	160	Regular
44	2,4	8,5	424	90	16,2	3	174-177	Bueno, No levantado, delgado
45	2,9	8	368	90	“	“	164	Bueno
46	3,4	7,5	324	90	“	“	170	Ligero C. Circuito, bueno
47	3,9	7	298	90	“	“	170	Bien
48	4,4	6,5	273	90	“	“	181	“
49	4,9	6	255	90	“	“	178	“
50	4,4	6,5	260	100	“	“	175	Inestable
51	3,9	7	280	100	“	“	179-180	C. circuito, Bien
52	3,4	7,5	307	100	“	“	178	Ligero C. C., bueno, no muy ancho
53	2,9	8	340	100	“	“	177-184	“
54	2,4	8,5	390	100	“	“	177-179	Bueno, más ancho que el anterior
55	1,9	9	318	110	“	“	162-167	Muy delgado
56	3,9	7	404	30	“	“	159	Bueno
57	4,4	6,5	361	30	“	“	161	“
58	4,9	6	328	30	“	“	162	C.C., bueno
59	5,4	5,5	303	30	“	“	164	Ligero C.C.
60	5,9	5	277	30	“	“	165	C.C.
61	6,4	4,5	258	30	“	“		No se produce el arco

### 3.2.6.1.- *Determinación del parámetro óptimo*

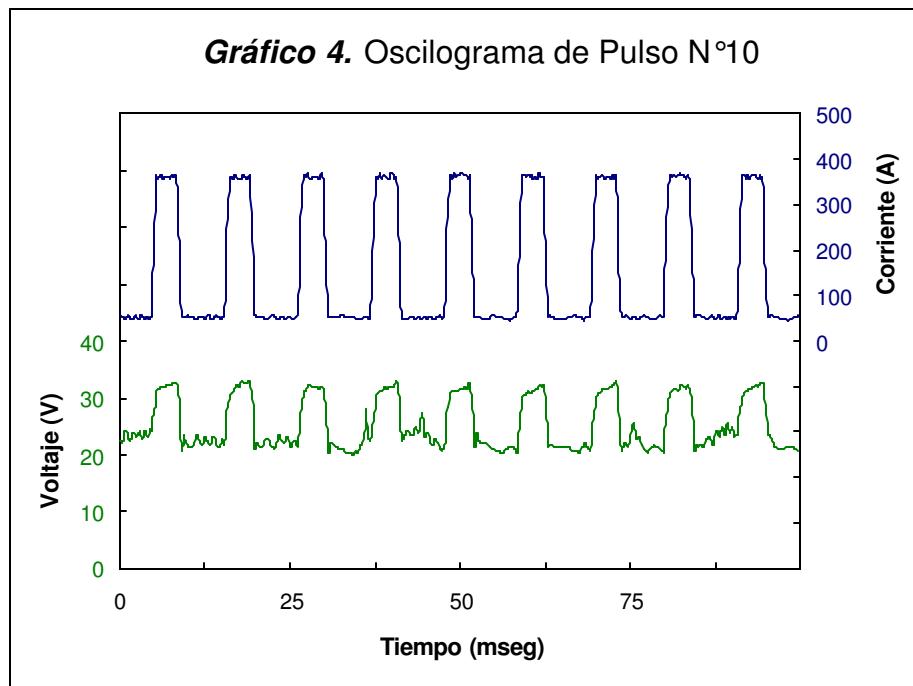
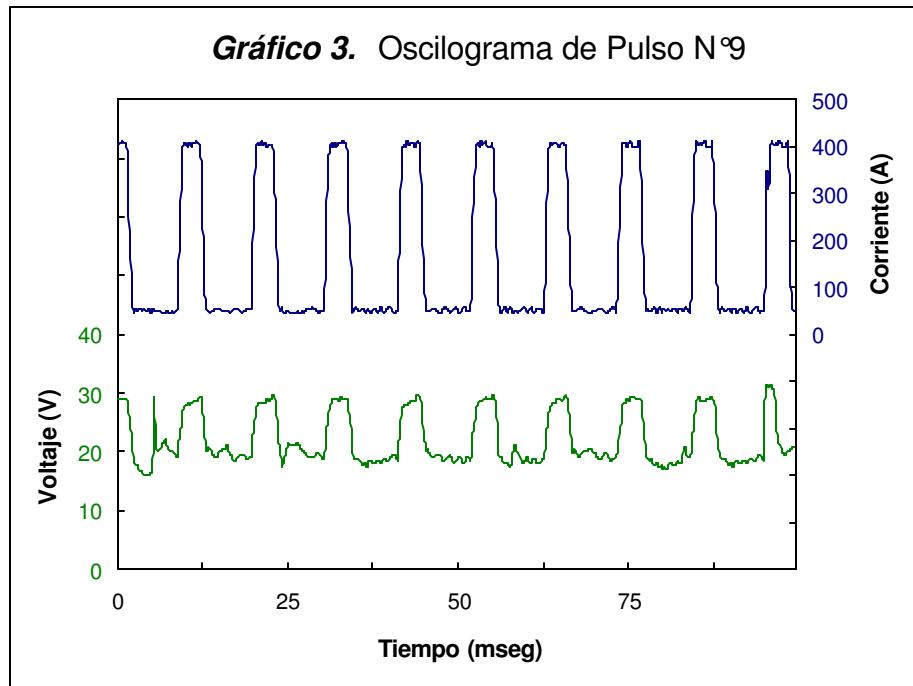
Seguidamente, se eligieron los mejores 12 parámetros (obtenidos del cuadro 5), tomando en cuenta la calidad superficial y la forma del cordón (cuadro 6).

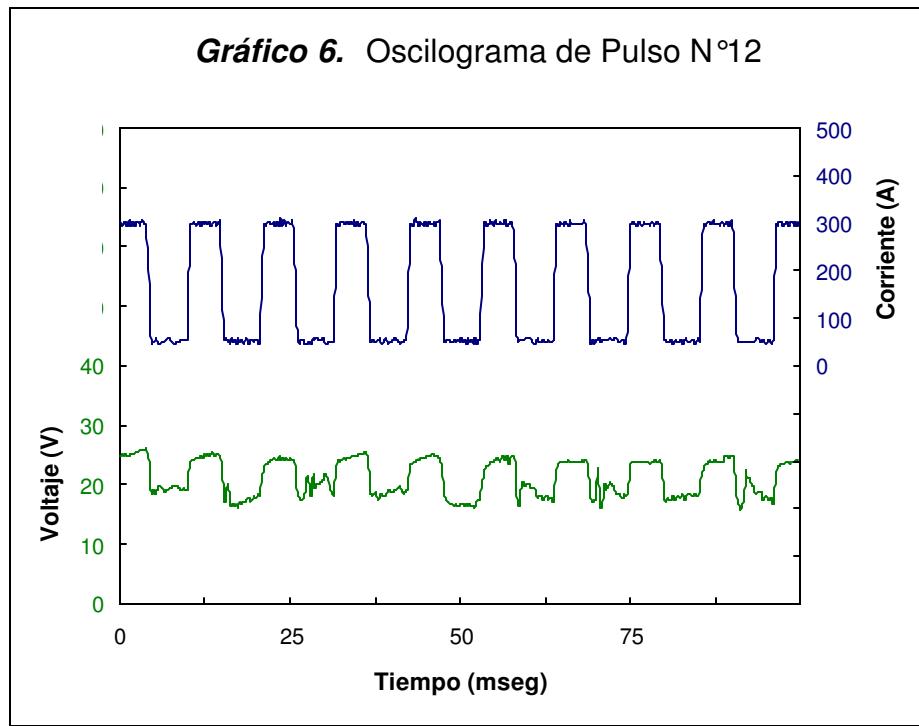
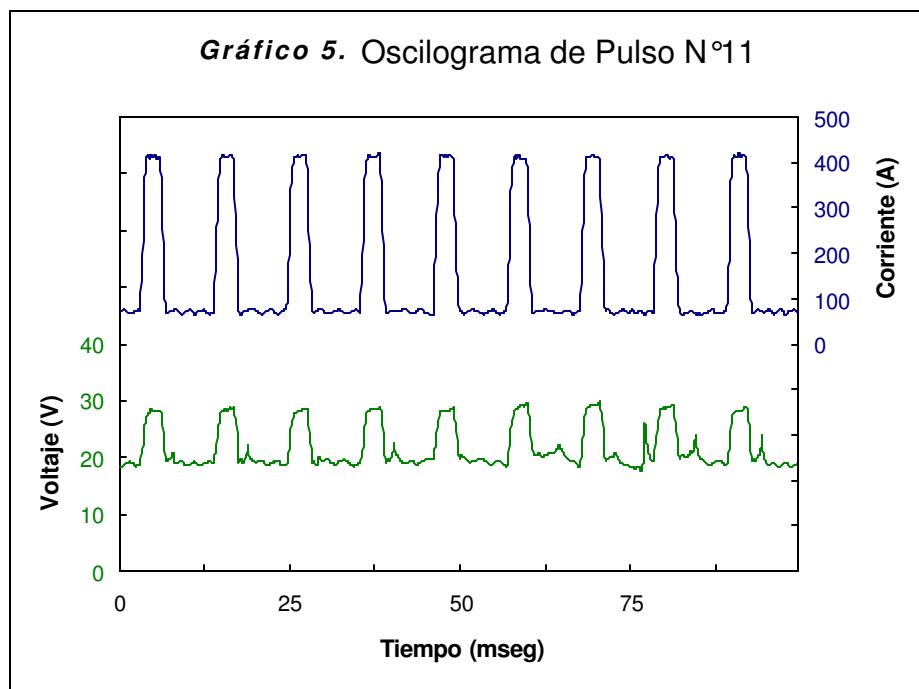
**Cuadro 6. Parámetros seleccionados**

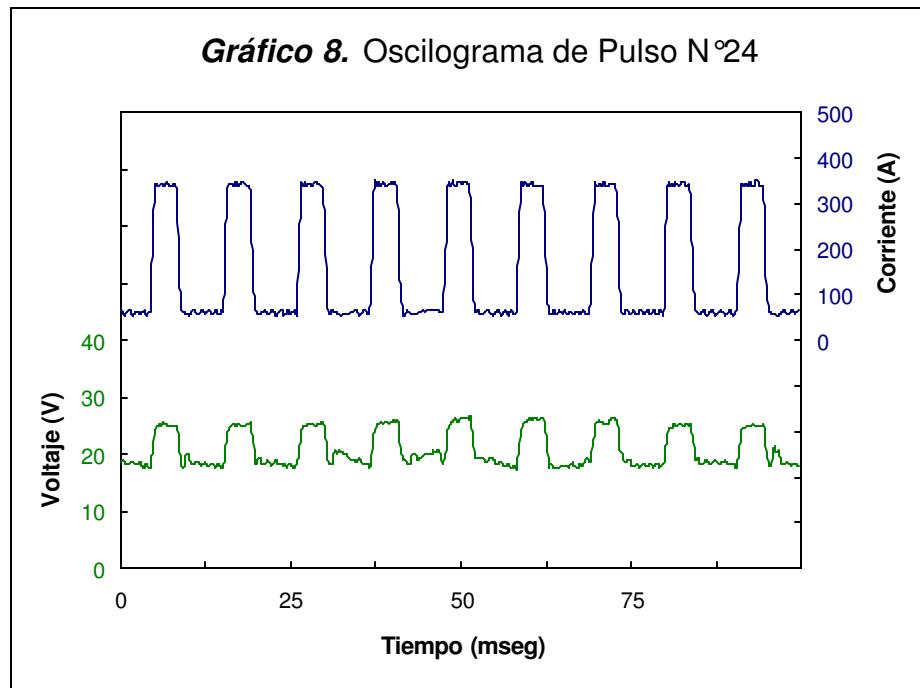
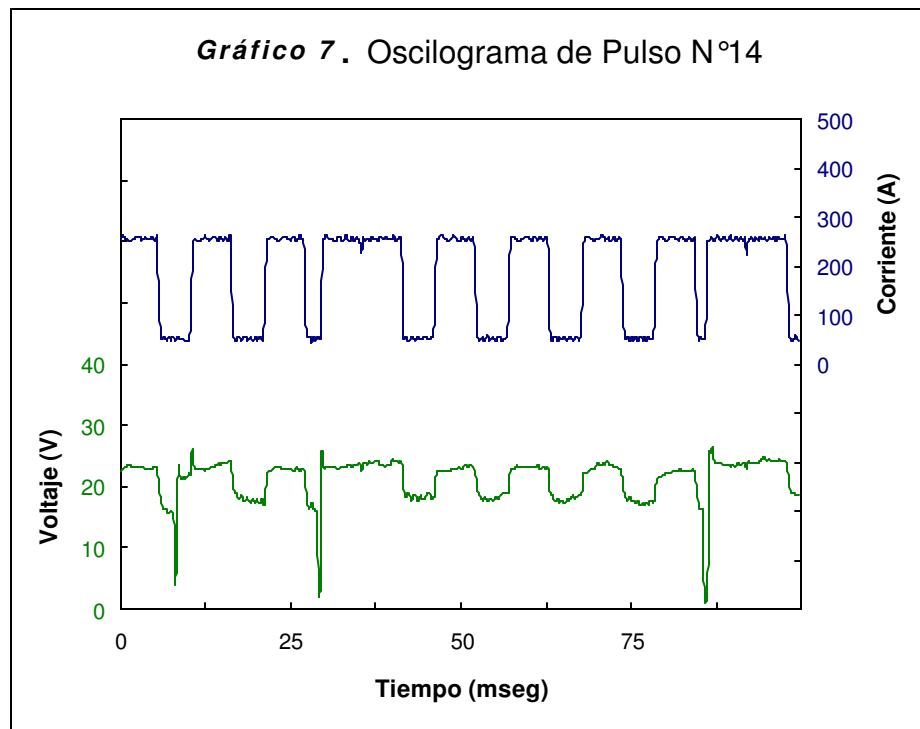
Nº	Tiempo Pico ( $T_p$ )	Tiempo Base ( $T_B$ )	Corriente Pico ( $I_p$ ) [Amp]	Corriente Base ( $I_B$ ) [Amp]	Velocidad Avance [cm/min]	Velocidad de alimentación [m/min]	Corriente Media ( $I_M$ ) [Amp]	Voltaje (V)	Observaciones
9	3,4	7,5	415	50	16,2	3	164-167	22,9	Muy bueno
10	3,9	7	369	50	16,2	3	165-167	21,2	Excelente
11	4,4	6,5	332	50	16,2	3	168-171	22,0	Bueno
12	4,9	6	305	50	16,2	3	171-177	21,6	Bueno, un poco alto
14	5,9	5	260	50	16,2	3	177-173	21,2	Un poco levantado
24	3,9	7	650	60	16,2	3	163-170	22,3	Bueno
25	3,4	7,5	392	60	16,2	3	163-167	21,5	"
26	2,9	8	422	70	16,2	3	164-166	21,4	Excelente
27	3,4	7,5	370	70	16,2	3	168-171	22,4	Bueno
28	3,9	7	332	70	16,2	3	174-179	21,8	Muy Bueno
43	2,9	8	395	80	16,2	3	165-169	19,4	Regular
49	4,9	6	255	90	16,2	3	181-185	19,4	Inestable

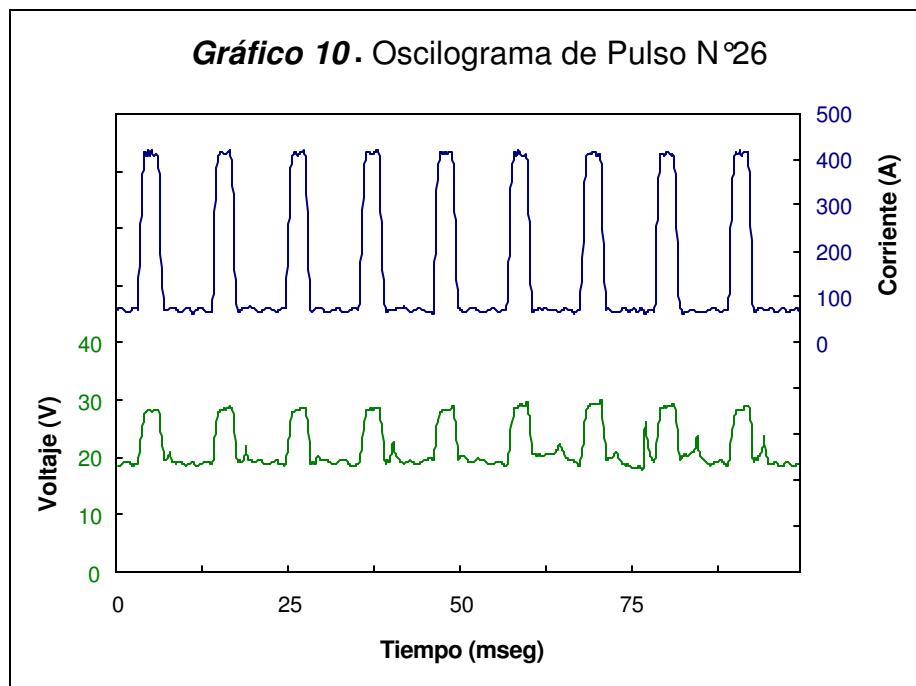
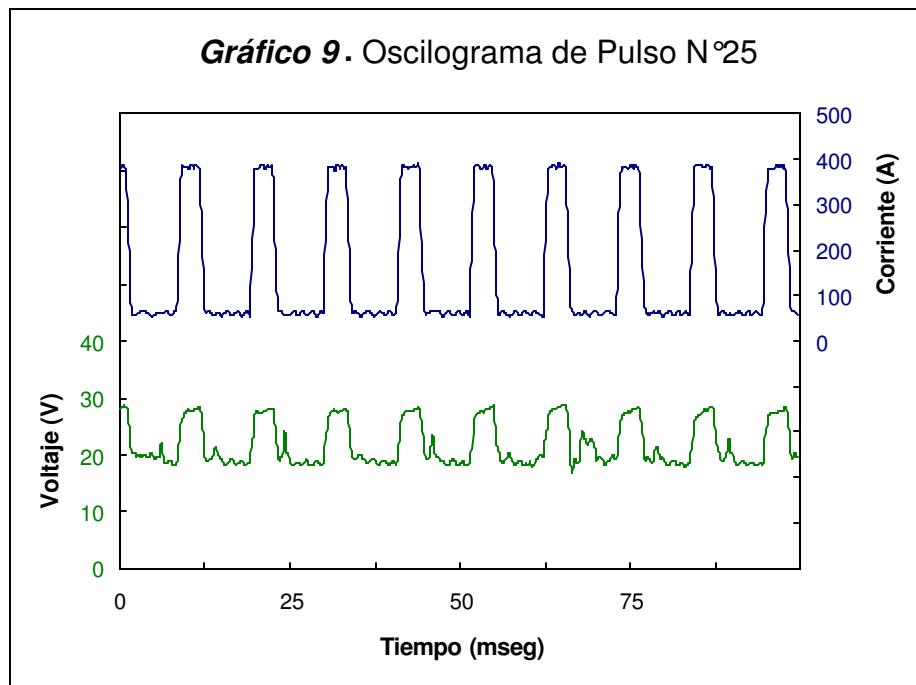
En función de ello, se procedió a la realización sobre chapas de acero al carbono de dos cordones de soldadura por cada parámetro seleccionado, editando y extrayéndose los oscilosogramas de pulso de cada uno, del procesador adaptado a la maquina de soldadura.

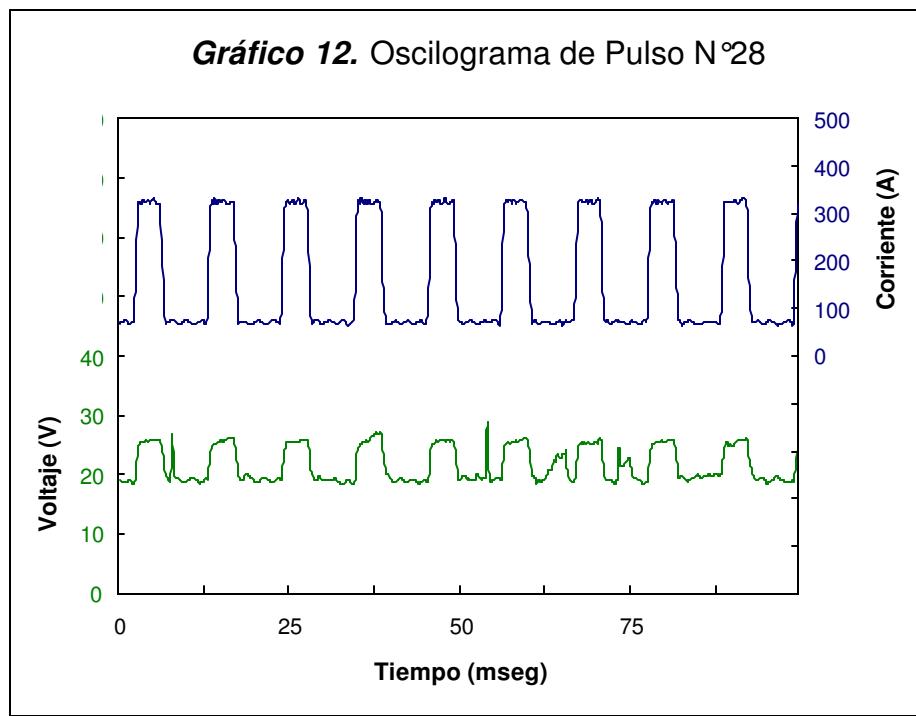
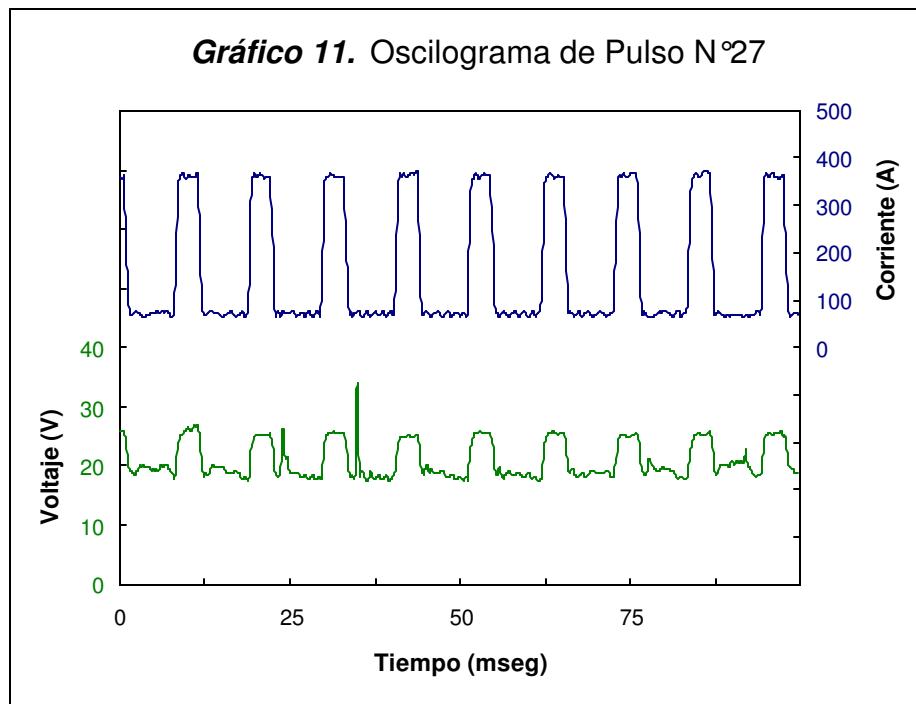
### 3.2.6.2.- *Oscilogramas de pulso*

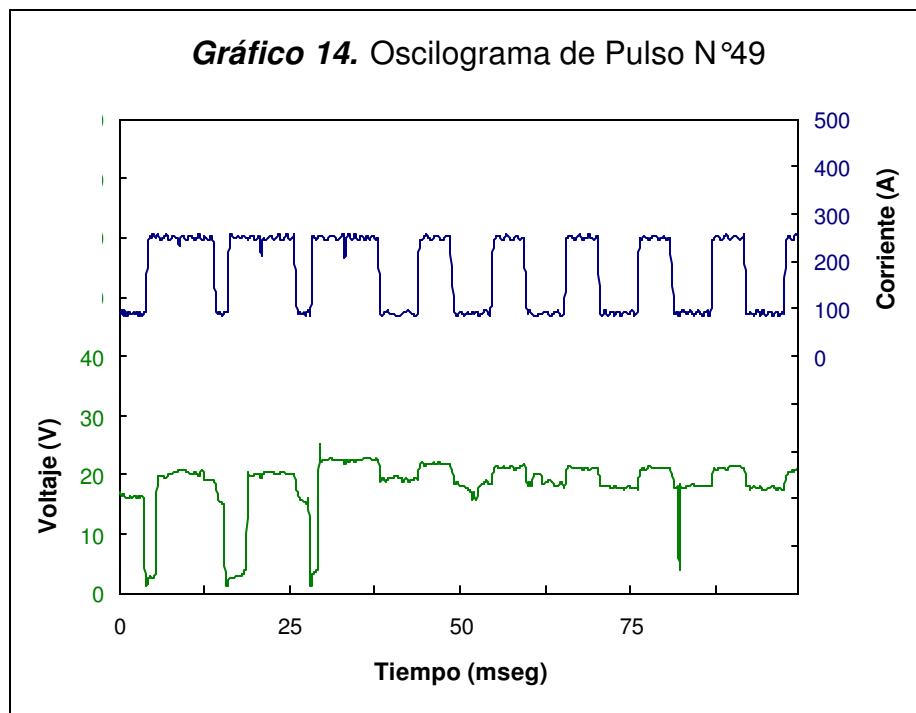
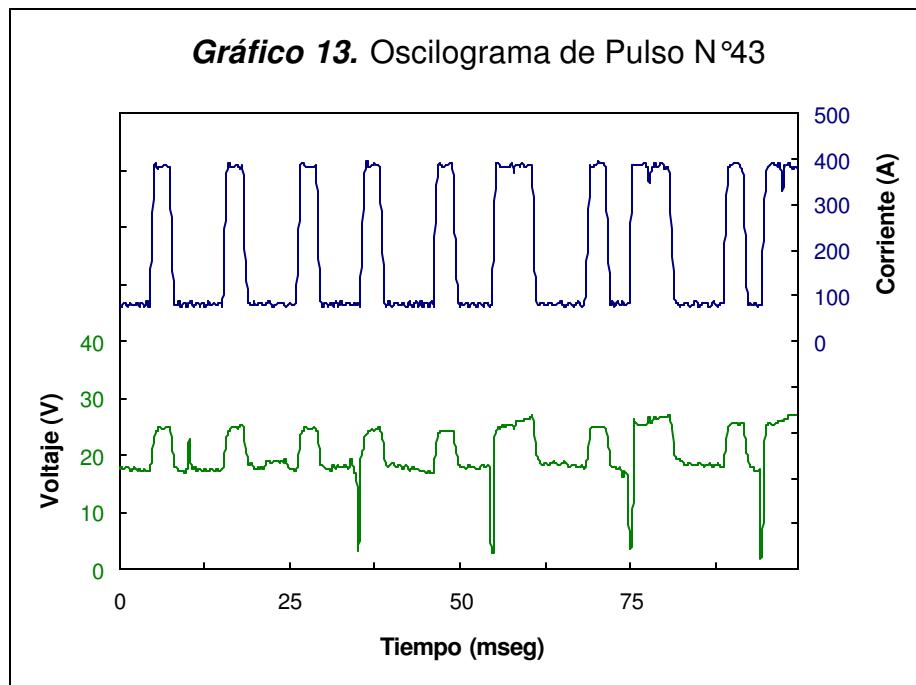






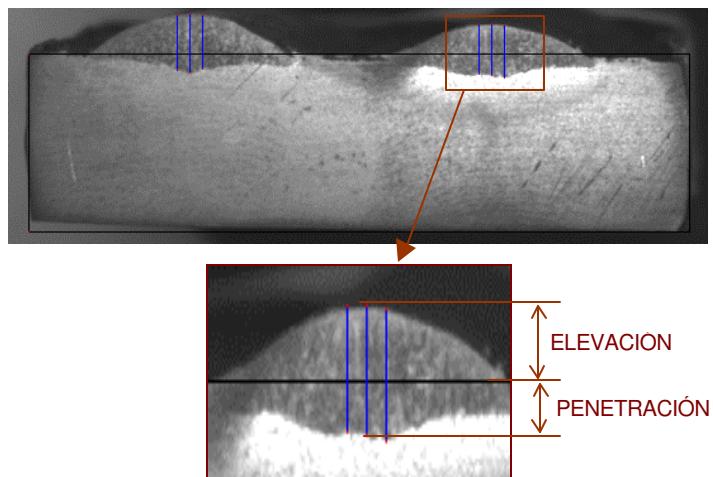






### 3.2.6.3.- *Determinación de la penetración y la altura del cordón*

Para observar los cordones y su penetración, se utilizó nital al 3% atacando durante 1 minuto aproximadamente, se tomó una macrografía ampliada en un analizador de imagen, para la determinación de la penetración del cordón (figura 30).



**Figura 30.** Puntos para la determinación de la penetración del cordón

La determinación del porcentaje de penetración del cordón para cada parámetro originó los resultados que se presentan en el cuadro 7.

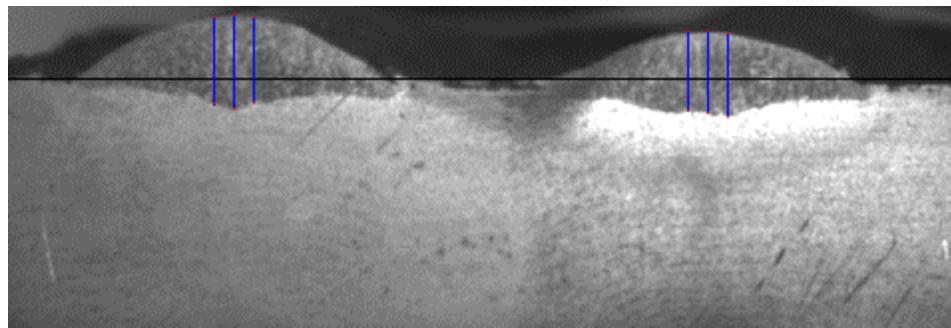
**Cuadro 7.** Resultados del porcentaje de penetración y altura del cordón

Nº	% Penetración	% Altura
9	10,76	64,45
10	9,78	-
11	5,84	80,00
12	9,95	68,31
14	9,75	69,50
24	8,71	71,07
25	7,39	76,69
26	8,73	68,42
27	9,42	68,16
28	10,68	-
43	8,14	71,68
49	8,63	68,56

El parámetro seleccionado, para la realización de la soldadura en los cupones de pruebas es el número 9 del cuadro 6, el cual fue seleccionado según el oscilograma, calidad superficial y los datos generados por la característica de penetración y altura del cordón del cuadro 7. Este parámetro se representa en el cuadro 8 y en la figura 31.

**Cuadro 8.** Parámetros seleccionados (parámetro 9)

<b><math>t_p</math></b>	<b><math>t_B</math></b>	<b><math>I_p</math></b>	<b><math>I_B</math></b>	<b><math>V_A</math></b>	<b><math>I_M</math></b>	<b>Voltaje</b>
3,4 mseg	7,5 mseg	415 amp	50 amp	3 m/min	165 amp	23 V



**Figura 31.** Macrografía de los cordones realizados con el parámetro 9

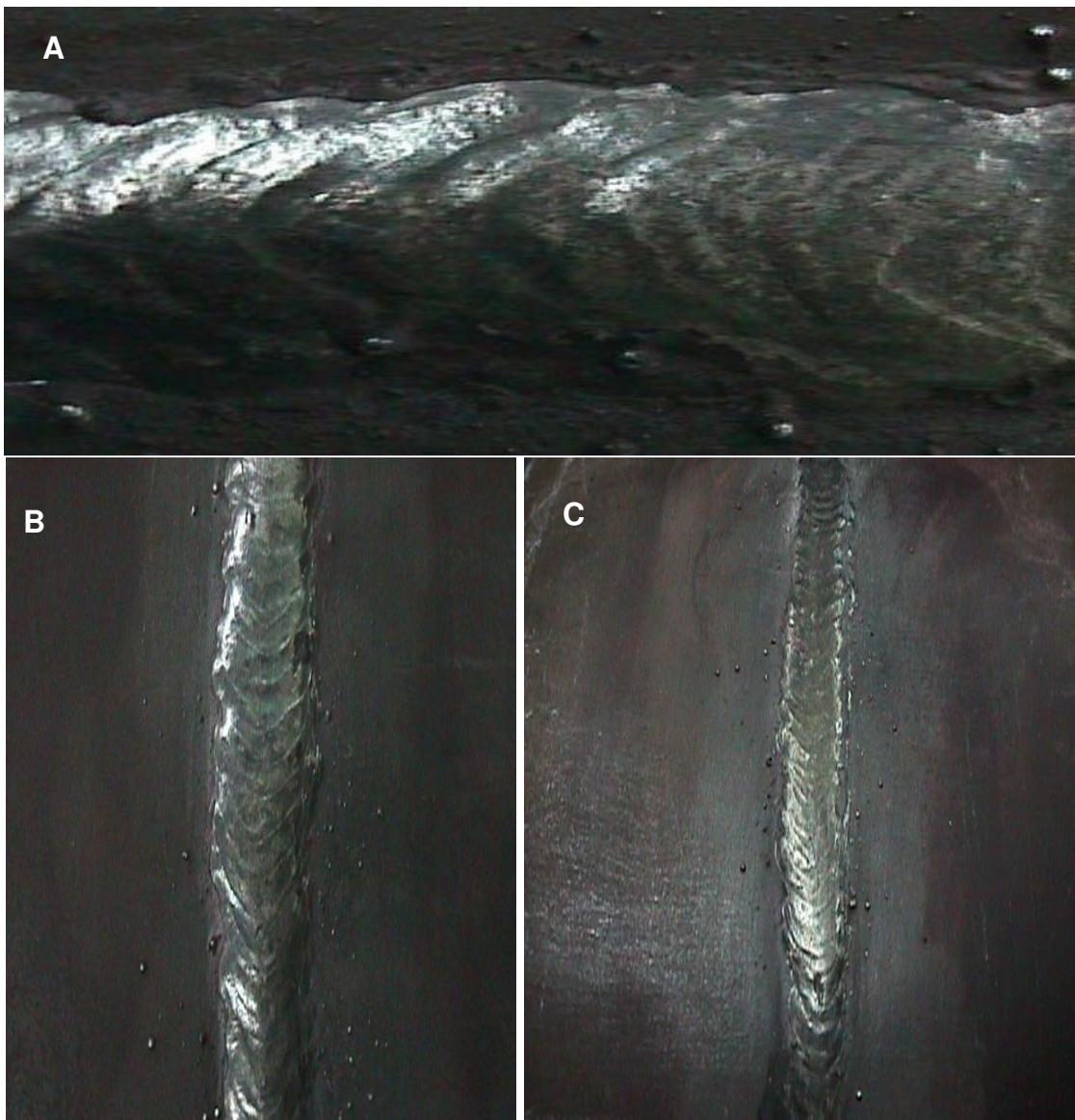
El criterio de selección de los parámetros de soldadura para la transferencia metálica en modo pulsado en el proceso FCAW, es aceptable; aunque el mismo es de mayor aplicabilidad en los procesos de soldadura de alambres macizos (MIG y MAG), debido a la existencia de una relación más directa entre el tamaño de gota producida y los parámetros de soldadura, donde lo consumido del alambre es prácticamente igual a lo depositado durante el proceso de soldado.

Para tener una mayor fiabilidad en el criterio de Burnoff en alambre tubular, hay que saber la manera como afecta el flux durante el proceso de soldadura; debido a su interacción con la atmósfera y la parte metálica durante la fusión, donde hay difusión de elementos del flux y la atmósfera hacia el metal fundido, esto implica que la formación de la gota fundida no depende solamente de la concha metálica.

Sin embargo, los resultados obtenidos para los 12 parámetros seleccionados fueron muy buenos, debido a que produce poca salpicadura y fácil remoción de la escoria.

### 3.3.- Cupones de prueba

Los cupones de prueba obtenidos en el proceso son representados en las figuras 32 (A, B y C).



*Figura 32 A, B y C. Fotografía de los cupones de prueba*

### **3.4.- Ensayos no destructivos**

#### **3.4.1.- *Inspección Visual***

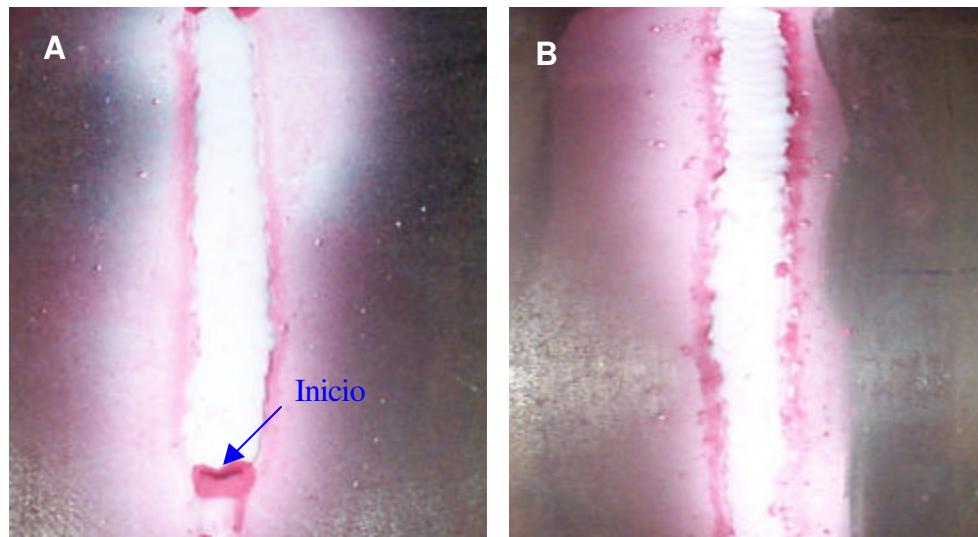
La inspección visual realizada antes, durante y después del proceso de soldadura a los cupones de prueba, mostró la ausencia de discontinuidades superficiales apreciables, observándose algunas salpicaduras cercanas al cordón (figura 32), asegurando el cumplimiento de la especificación dada por la norma API 1104. La ausencia de defectos superficiales, demuestra que el soldador realizó una técnica de soldadura correcta.

Sin embargo, observó la falta de uniformidad en la penetración en los cupones, debido a la ausencia de respaldo, lo cual no pudo ser evitado.

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

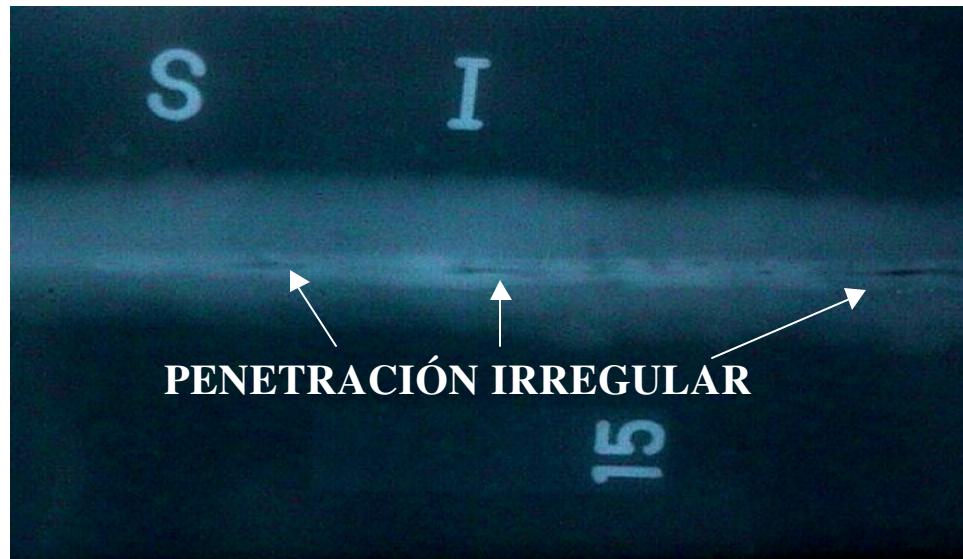
El ensayo por líquidos penetrantes aplicados a todos los cupones de prueba, muestran que no existe discontinuidades relevantes que emergen de la superficie, lo que demuestra que la técnica de soldadura utilizada, esta bien aplicada.

No obstante, en la figura 33 (A), se observa un defecto (poros) producido por el inicio del arco de soldadura y en la figura 33 (B), se observa un contraste de color en la zona unión entre el cordón y el metal base debido a la rugosidad presente en esta zona, la cual no es considerada como un defecto.

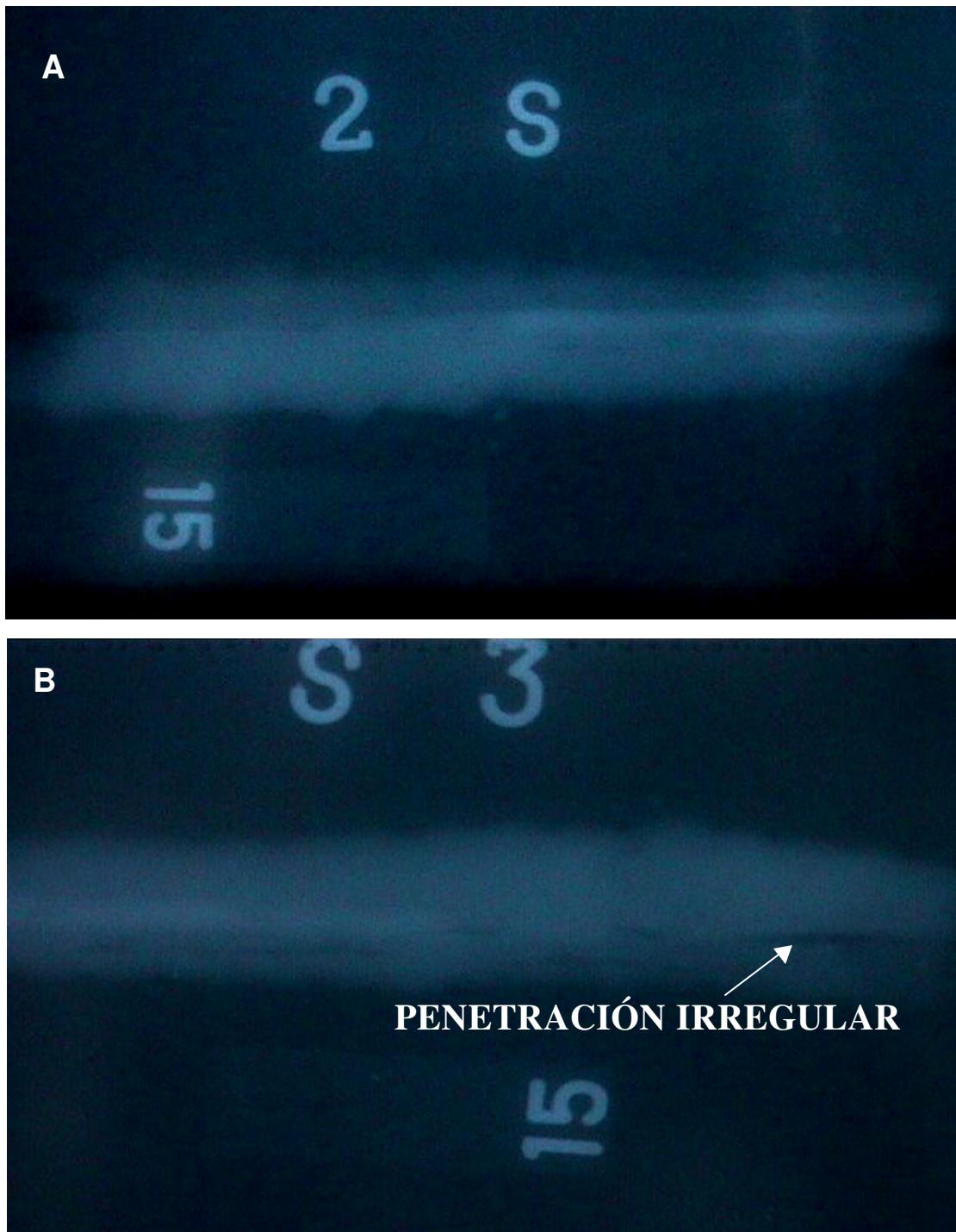


*Figura 33 A y B. Cupones ensayados con líquidos penetrantes*

#### **3.4.3.- Inspección por Radiografía**



*Figura 34. Radiografía de la sección 1 del cupón de prueba*



**Figura 35 A y B.** Radiografía de las secciones 2 y 3 del cupón de prueba



**Figura 36.** Radiografía de la sección 4 del cupón de prueba

Las radiografías realizadas mostraron la existencia de escorias atrapadas, debido a una limpieza insuficiente entre pases y durante el proceso de fusión del electrodo.

En la radiografía S1 (figura 34) y S4 (figura 36), se observan zonas oscuras, con una forma alargada y delgada, en el centro del cordón (falta de penetración), esto es debido (tal como se dijo anteriormente en la inspección visual) a una penetración inadecuada.

Para efectos de la sanidad de los cupones de pruebas, el estándar API 1104 incluye criterios para la aceptación de soldaduras en aceros sobre la base de un número de defectos como penetración inadecuada, fusión incompleta, concavidad interna, exceso de penetración, inclusiones de escoria y porosidad. Se puede resumir la sección del API 1104 como: **'Inclusiones de escoria elongadas:** la suma total de su longitud no deben ser mayor a 50 mm por cada 305 mm de soldadura y no deben tener un ancho de 1,6 mm. **'Inclusiones de escoria aisladas:** las inclusiones de escoria aisladas que excedan los 3,17 mm y cuya suma no excedan los 12,7 mm por cada 304,8 mm de soldadura son aceptada. Las indicaciones acerca de la longitud agregada de inclusiones de escoria

aisladas no deberán exceder dos veces el menor espesor nominal de la pared y el ancho no deberá exceder la mitad del menor espesor de las paredes unidas".

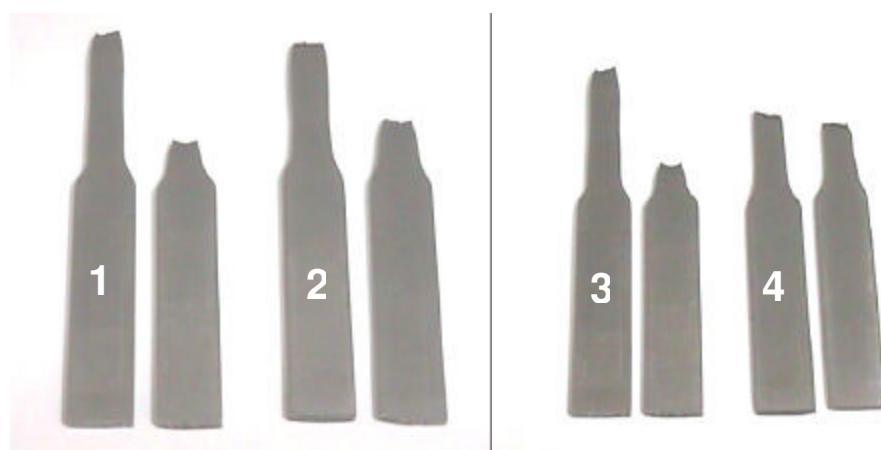
Basándose en esto, se puede decir que todos las radiografías, excepto algunas zonas de la identificada como S1, cumple con las especificaciones mencionadas. Cabe destacar que las probetas de los ensayos mecánicos son tomadas de las zonas sanas de la radiografía.

En esta inspección, se observaron ciertas discontinuidades en la parte interna del cordón, como se puede observar en las figuras 34; 35 (A y B) y 36. Las probetas para los ensayos posteriores fueron tomadas de las zonas sanas o de la zona con discontinuidades aceptables.

### 3.5.- Ensayo mecánicos (destructivos)

#### 3.5.1.- Ensayo de tracción

Se realizaron los cuatro ensayos exigidos por la norma API 1104, en los cuales todas las probetas rompieron dentro de la sección reducida, tres de estas en el material base y una en el cordón, como se muestra a continuación:

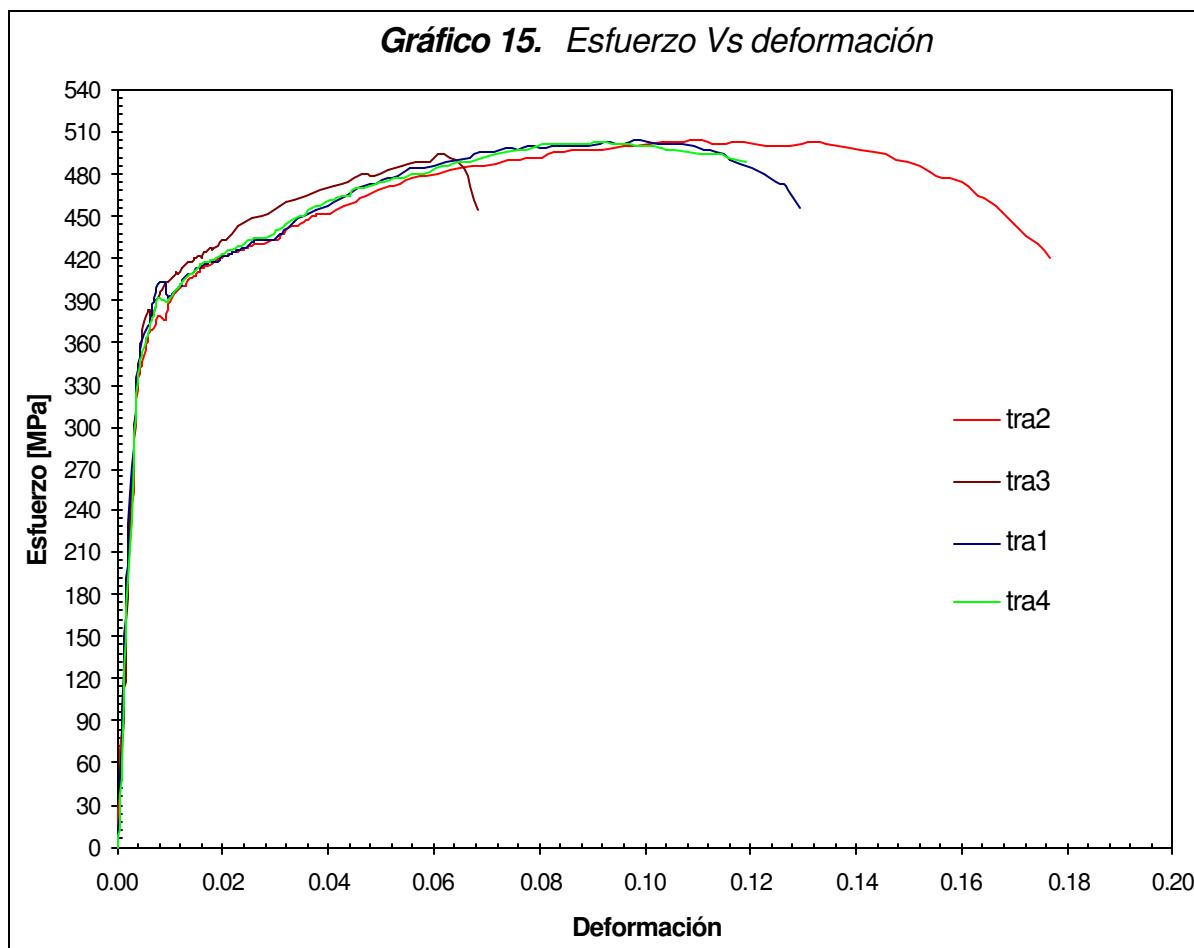


**Figura 37.** Probetas de tracción ensayadas

Los resultados del ensayo de tracción se muestran en el cuadro 9 y en el gráfico 15.

**Cuadro 9.** Resultados de los ensayos de tracción.

Nº Probeta	Ruptura	Resistencia a la tracción				Elongación %	
		$\sigma_{uts}$		$\sigma_{ys}$			
		Mpa	Ksi	Mpa	Ksi		
Tra1	MB	503,69	73,05	405,28	58,78	18,17	
Tra2	MB	503,18	72,98	378,10	54,84	23,25	
Tra3	MB	502,28	72,51	391,83	56,83	22,10	
Tra4	MA	493,27	71,54	388,92	56,41	10,07	
Promedio		500,61	72,61	391,03	56,71	18,39	
Desviación		4,92	0,71	11,19	1,62	5,96	



Se realizaron los cuatro ensayos de tracción exigidos por el estándar API 1104, basándose en el diámetro del tubo. De los resultados obtenidos se puede observar que 3 probetas rompieron en el material base y una lo hizo por el cordón de soldadura con una resistencia a la tracción ( $\sigma_{uts}$ ) igual 493,27 Mpa, el promedio de los valores obtenidos son 500,61 Mpa  $\sigma_{uts}$ , 364,03 Mpa el esfuerzo de fluencia ( $\sigma_{ys}$ ) y 18,39% el porcentaje de deformación (cuadro 9).

En el estándar API 1104, el criterio de aceptación para el ensayo de tracción, viene dado en la especificación 2.6.2.3, la cual dice textualmente “El esfuerzo de tensión de la soldadura, incluida la zona de fusión, debe ser superior o igual al mínimo esfuerzo de tensión especificado del material base del tubo no necesariamente tiene que ser superior o igual al actual esfuerzo de tensión del material, ya que, si el espécimen rompe en la zona de fusión y en la soldadura y satisface el mínimo esfuerzo de tensión, entonces, la soldadura es aceptada”.

En función de ello, se afirmar que los ensayos cumplen con la especificaciones de las normas, inclusive la probeta que rompió en el cordón de soldadura.

### 3.5.2.- *Ensayo de doblez*

Se realizaron cuatro ensayos de doblez (dos de cara y dos de raíz), los cuales son exigidos por la norma API 1104. Los resultados de los ensayos de doblez se muestran en el cuadro 10 y en las figuras 38 y 39.

*Cuadro 10. Resultados del ensayo de doblez.*

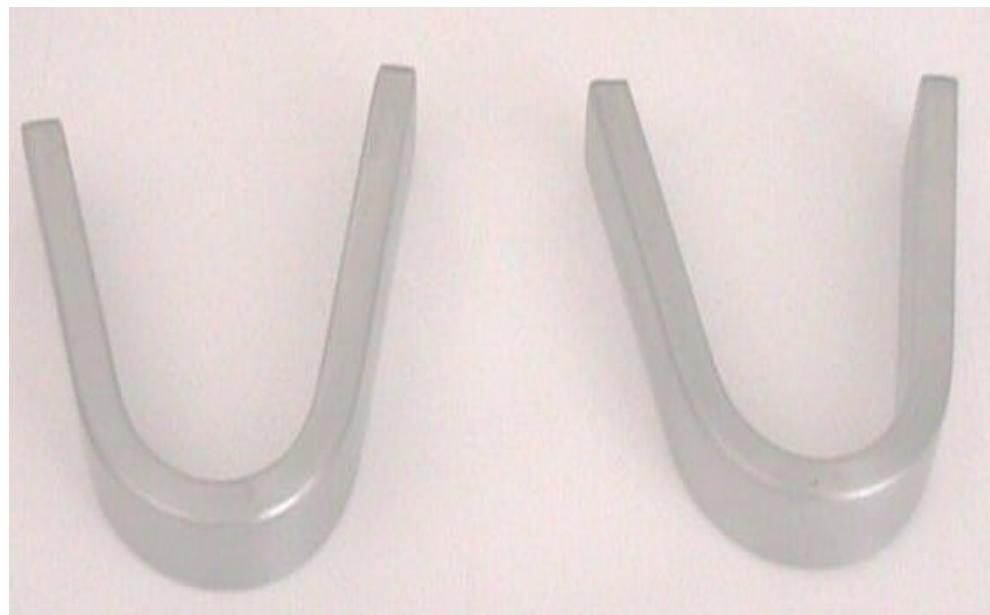
Probeta	Ensayo	Observación
1	D.C	No presento fisuras superficiales
2	D.C	No presento fisuras superficiales
3	D.R	No presento fisuras superficiales
4	D.R	No presento fisuras superficiales

Nota: D.C: Doblez de cara.

D.R: Doblez de raíz.



**Figura 38.** Doblez de cara



**Figura 39.** Doblez de raíz

El criterio de aceptación para el ensayo de doblez, por la norma API 1104, dado por el requerimiento 2.6.4.3, la cual dice: “Las probetas de doblez guiado, no debe

tener defectos abiertos en el cordón o en la ZAC, que excedan de 3,17 mm; medido en cualquier dirección sobre la superficie convexa de la probeta después de ser doblada” cumplen con la especificaciones”.

En este caso, todas las probetas de doblez (raíz y cara) cumplen con la especificación por no presentar defectos abiertos en la superficie convexa. Por lo tanto, se puede decir que el cordón y la zona afectada presenta una buena ductilidad, la cual también es ratificada con el porcentaje de elongación mostrado en el cuadro 9.

### **3.5.3.- *Ensayo Charpy***

Los resultados de los 5 ensayos Charpy realizados se muestran el cuadro 11.

***Cuadro 11. Resultados de los ensayos Charpy.***

Probeta	Energía Absorbida a 0°C en Joules (lbf x ft)
1	80 (59)
2	90 (66,4)
3	120 (88,5)
4	69 (50,8)
5	100 (73,8)
<b>Promedio</b>	<b>84,77 (62,52)</b>
<b>Desviación</b>	<b>13,33 (9,83)</b>



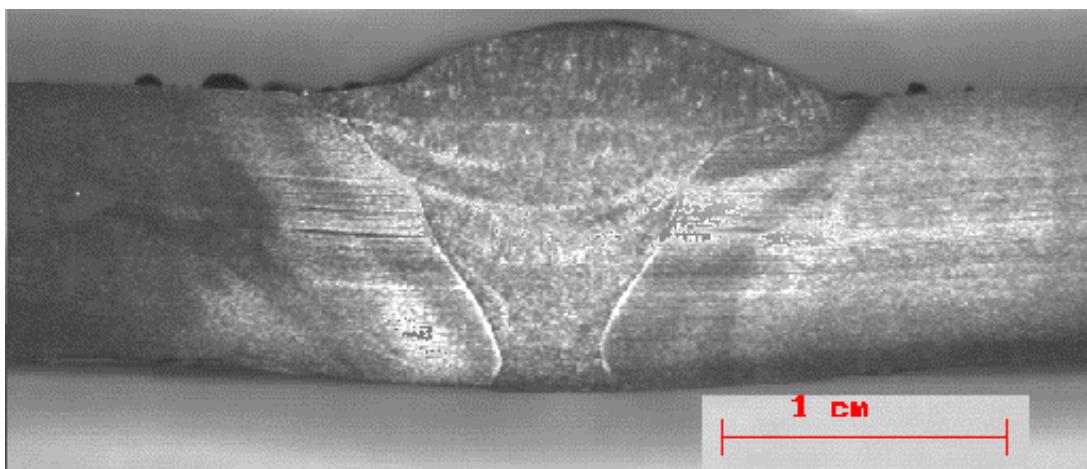
**Figura 40.** *Fotografía de las probetas ensayadas por impacto*

El cuadro 11 presenta los resultados obtenidos en los ensayos de impacto Charpy realizados a 0°C y con probetas subestándar con una sección transversal de 7,5 x 10mm, tomadas de tal manera que la entalla se encuentra en el cordón de soldadura en la dirección del espesor del material. Los ensayos reportaron una energía de impacto promedio de 84,77 Joules y una desviación de 13,33 Joules. El resultado presenta una desviación estándar un poco alta, esto se debe a la dificultad que tiene preparar la entalla y a la poca tolerancia que esta permite.

Sobre la base del trabajo de **Moura y colaboradores<sup>(19)</sup>**, el cual utilizó cupones de pruebas de acero API 5L-X60 con una composición similar al metal utilizado, soldado mediante un proceso SAW, donde la probeta Charpy es obtenida y ensayada bajo las misma condiciones, se puede decir que se obtuvo un resultado bueno, esto también es ratificado por los resultados de impacto realizado por la empresa fabricante de la tubería (Anexo).

### 3.5.4.- *Macrografía*

La macrografía observada es representada en la figura 41.



**Figura 41.** *Macrografía*

Tamaño aproximado de la zona afectada por el calor (ZAC) es igual a  $4,3 \pm 0,4$  mm.

Se realizaron macrografías en las juntas soldadas, en las secciones atacadas, se observan, figura 41, muy bien definidas las diferentes zonas existentes (metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura), así como el pase de raíz y los pases de relleno; también se observa buena geometría (uniformidad y simetría) del cordón.

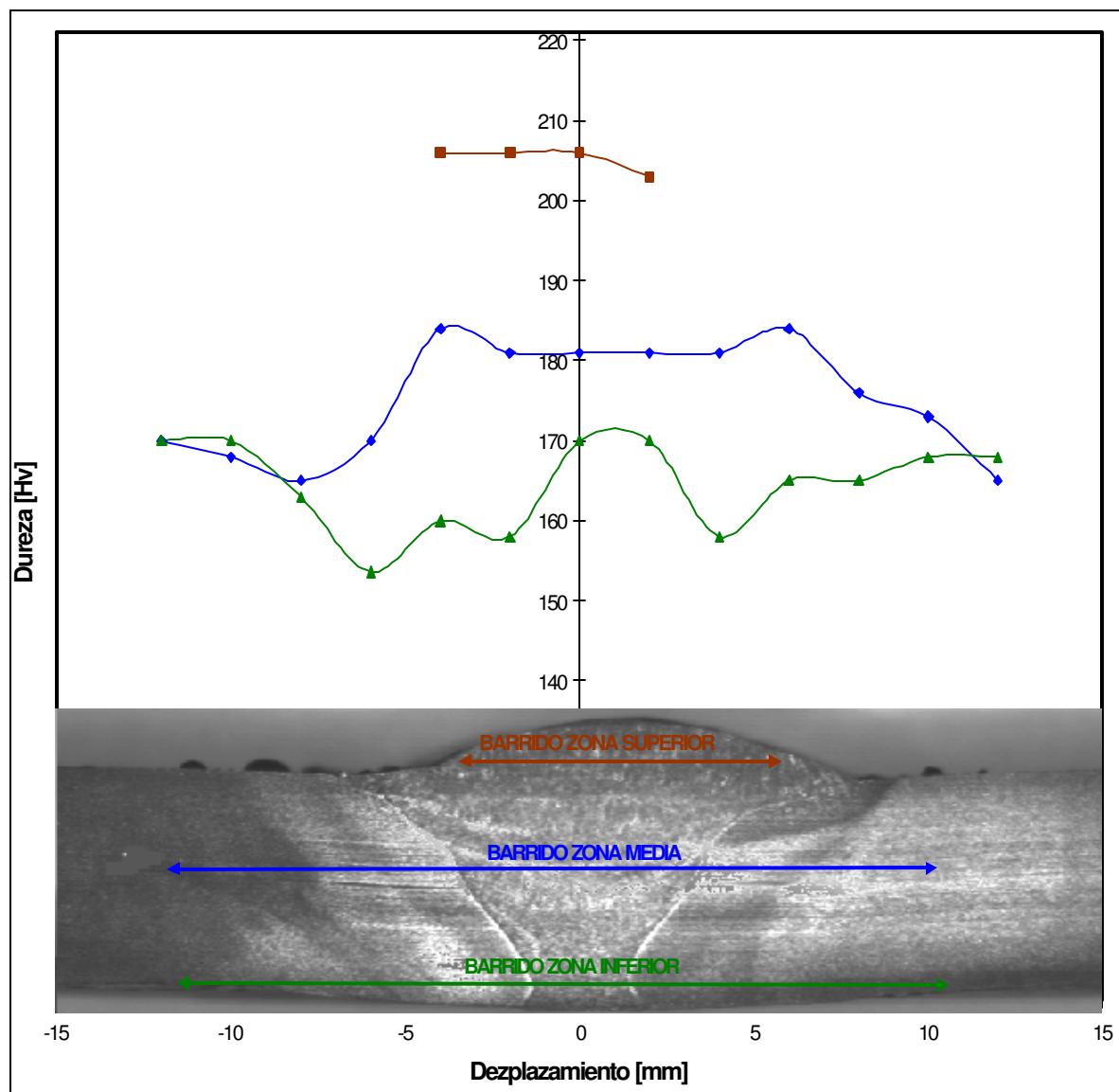
Con la ayuda de la macrografía, se pudo determinar el tamaño aproximado de la zona afectada por el calor el cual arrojó un promedio de  $4,3 \pm 0,4$  mm, siendo una zona pequeña tomando en cuenta el número de pases realizados.

A través de las macrografías se aprecia el efecto del tratamiento térmico que ejerce el pase de relleno sobre la raíz y entre pase; esto origina un reacomodo columnar típica de la solidificación del metal.

### 3.5.5.- *Ensayo de dureza*

Los resultados de la dureza de la probeta están representados en el gráfico 16

**Gráfico 16.** Dureza Vs desplazamiento



Dureza promedio del material base = 164,6 Hv

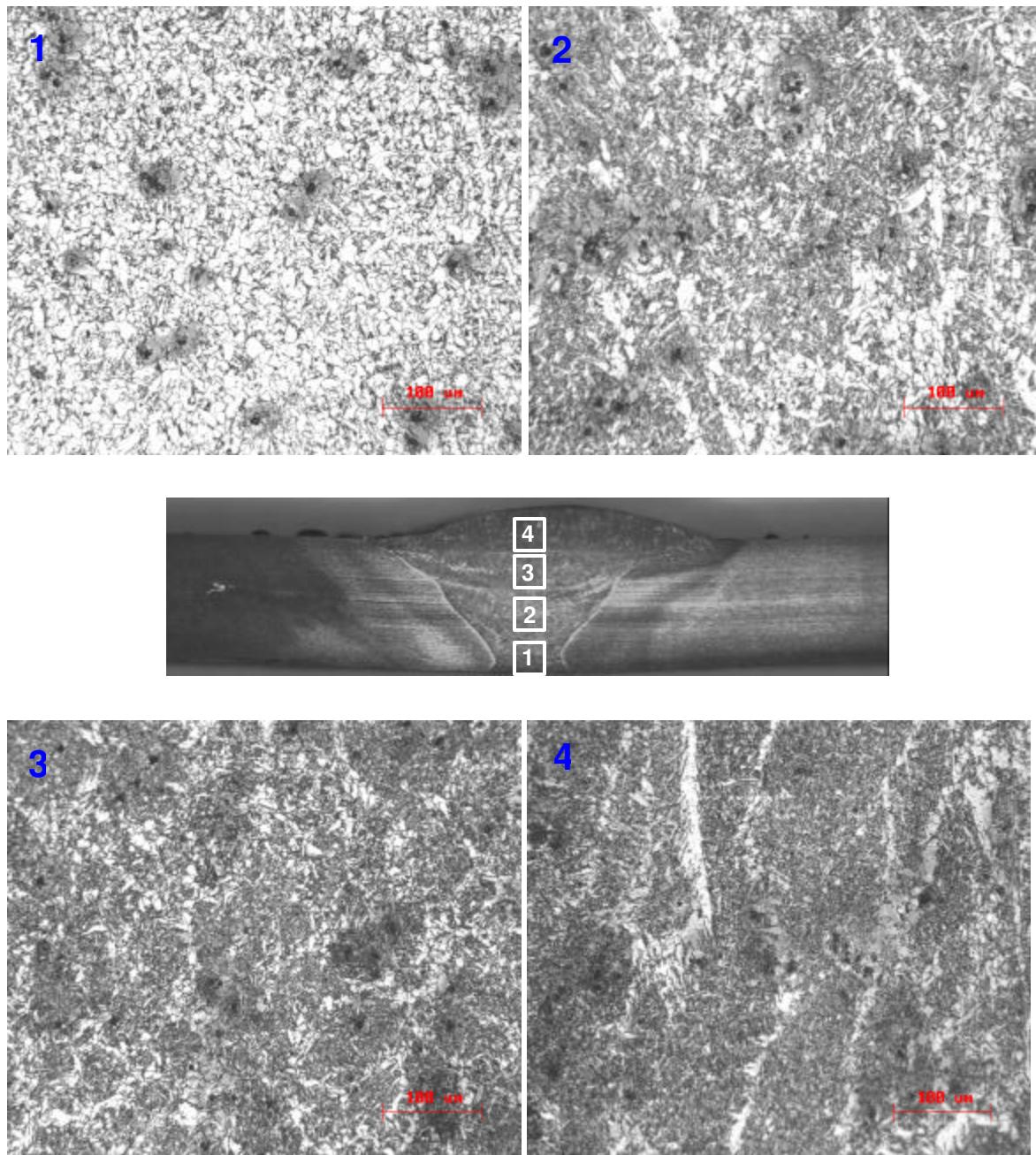
Desviación estándar = 4,56 Hv

En el barrido de dureza (gráfico 16) se observa que el ultimo cordón de relleno presenta una mayor dureza debido a la estructura formada, mayoritariamente constituida de ferrita acicular y estructura dendrítica. Los cordones anteriores a este presentan una menor dureza, ya que se ven afectado por el calor generado durante la ejecución de los pases posteriores.

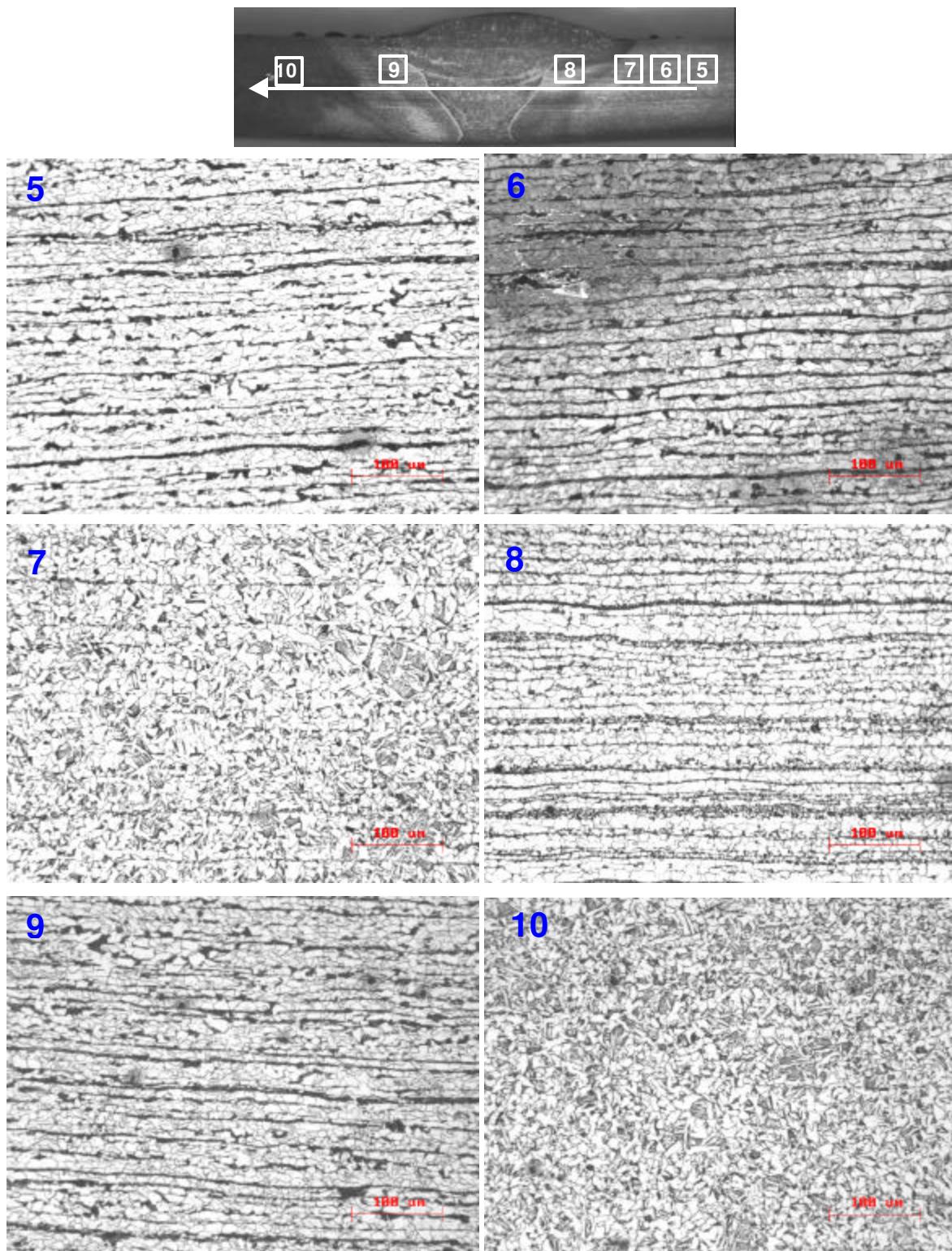
La zona afectada por el calor cercana a la raíz del cupón, es la que presenta menor dureza, motivado a que la zona es afectada por el calor generado por el pase de raíz y los pases de relleno, creando una condición que simula a un recocido.

### 3.5.6.- *Micrografías*

Las micrografías obtenidas según la figura 28, son mostradas a continuación en las figuras 42 y 43.



**Figura 42.** Micrografías del cordón de soldadura en dirección vertical



**Figura 43.** Micrografías del cordón de soldadura en dirección horizontal

Los resultados de estos ensayos muestran una estructura de forma de ferrita acicular en la superficie del cordón, en la zona media se observa ferrita mas ferrita acicular en regiones preferenciales, en la parte inferior del cordón se encontró ferrita. La estructura ferrita acicular se forma a partir de un enfriamiento rápido. Además esta estructura aumenta la tenacidad del material, es decir, que en el cordón se espera que esta estructura aparezca, pero hay que destacar que cuando se realizan mas de un cordón, la estructura de los cordones internos cambia debido al calor generado por pase siguiente. Esto se demuestra con los resultados obtenidos, en los cuales se ve que la ferrita acicular se encuentra en mayor cantidad en la superficie del cordón, y en menos proporción en el interior de este.

En cuanto al barrido realizado en el material base se observó una estructura en forma de banda ferrítico-perlitico. Hay que destacar que esta estructura va disminuyendo de grosor hasta desaparecer en la zona adyacente al cordón, esto se debe al calor generado en el proceso de soldadura.

Estas bandas ferrítico-perlíticas son formadas por una mala práctica de laminación y su eliminación es conveniente, ya que en presencia de humedad produce atrapamiento de hidrógeno lo cual puede inducir a un daño.

### 3.6.- Registro del procedimiento de soldadura (RCP)

 <b>CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.</b>	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA</b> <b>REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO</b> <b>RCP</b>		
RCP SOPORTE Nº: EPS Nº UTILIZADO:		FECHA: CODIGO REF: API 1104	
<b>NOMBRE DEL SOLDADOR:</b>		<b>HOJA:</b> <i>3/2</i>	
<b>PROCESO</b> TIG ( ) GMAW ( ) RAIZ SMAW ( ) FCAW (X) RELLENO SMAW ( ) FCAW (X) OTRO ( )		<b>TIPO</b> (X) ( ) ( ) Manual Semiautomático Automático	
<b>METAL BASE</b> GRADO Y TIPO: API 5L-X52 Nº P: Nº GRUPO: ESPESOR: 10 mm			
<b>DISEÑO DE JUNTA</b> TIPO DE JUNTA: Junta en V RESPALDO: SI ( ) NO (X) MATERIAL DEL RESPALDO: OBSERVACIONES:			
<b>METAL DE APORTE</b>			
ESPECIF. FAB. AWS (Clase) Nº F Nº A DIAMETRO	RAIZ	RELLENO (A)	RELLENO (B)
	<i>E71T-1</i>	<i>E71T-1</i>	<i>E71T-1</i>
OBSERVACIONES:			

PRECALENTAMIENTO				POST-CALENTAMIENTO							
TEMP. MIN ENTRE PASES:	<i>No Aplicar</i>			INTERVALO DE TEMP.:	<i>No Aplicar</i>						
TIEMPO DE PERMANENCIA:	<i>No Aplicar</i>			TIEMPO DE PERMANENCIA:	<i>No Aplicar</i>						
AREA DE CALENTAMIENTO:	<i>No Aplicar</i>			ENFRIAMIENTO:	<i>No Aplicar</i>						
GAS				LIMPIEZA							
TIPO	COMP.	FLUJO		INICIAL: lija 80							
PROTECCION	AGA MIX	Ar 80%	10-15	ENTRE PASES: Cepillo de alambre							
	20	CO <sub>2</sub> 20%									
RESPALDO											
POSICION Y ALINEACIÓN DE LA JUNTA				PROGRESION DE LA SOLDADURA							
POSICION: 1G				PROGRESION:							
Nº DE PUNTOS: 2				TECNICA DEL CORDON:							
DISTANCIA ENTRE PUNTOS: 15 mm				OBSERVACIONES:							
PARAMETROS DE SOLDADURA (MODO DE TRANSFERENCIA PULSADO)											
PASE	PROCESO	MAT. DE APORTE		Corriente				VOLTAJE (Volt.)	VEL. AVANCE (cm/min)	VEL. A. (m/min)	
		Clase AWS	ϕ [mm]	I <sub>M</sub> (amp)	t <sub>P</sub> (mseg)	t <sub>B</sub> (mseg)	I <sub>P</sub> (amp)				I <sub>B</sub> (amp)
Raíz	FCAWG	E71T-1	1,6	165	3,4	7,5	415	50	22,9	16,2	3
Relleno A	FCAWG	E71T-1	1,6	165	3,4	7,5	415	50	22,9	16,2	3
Relleno B	FCAWG	E71T-1	1,6	165	3,4	7,5	415	50	22,9	16,2	3
OBSERVACIONES:											

 <b>CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA</b> <b>METALURGIA - U.C.V.</b>	<b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA</b> <b>REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO</b> <b>RCP</b> RCP SOPORTE N°: EPS N° UTILIZADO: HOJA:				
<b>RESULTADOS DE LOS END</b>					
<p>LOS ENSAYO NO DESTRUCTIVOS CUMPLES CON LAS ESPECIFICACIONES DE LA NORMA API 1104</p> <p>OBSERVACIONES:</p>					
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN</b>					
<b>PROBETA</b>	<b>Ensayo de tracción</b>		<b>Deformación %</b>	<b>Ubicación</b>	
	$\sigma_{UTS}$ Mpa (Ksi)	$\sigma_{YS}$ Mpa (Ksi)			
	503,69 (73,28) 503,18 (72,98) 502,28 (71,54) 493,27 (71,54)	405,28 (58,78) 378,10 (54,84) 391,83 (56,83) 388,92 (56,41)			
	1 2 3 4	18,17 23,25 22,10 10,07	Metal base Metal base Metal base Material de aporte		
	<b>RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLEZ</b>				
	<b>PROBETAS</b>	<b>RESULTADOS</b>		<b>Deformación %</b>	<b>Ubicación</b>
<i>Doblez de cara</i> <i>Doblez de cara</i> <i>Doblez de raíz</i> <i>Doblez de raíz</i>					
<i>Aprobada</i> <i>Aprobada</i> <i>Aprobada</i> <i>Aprobada</i>					
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>No se observaron defectos abiertos a la superficie convexa</p>					
<b>RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO</b>					
<b>PROBETA</b>	<b>Ubicación de la entalla</b>	<b>Tipo de entalla</b>	<b>Temperatura del ensayo</b>	<b>Energía Absorbida</b>	
				<b>Joules</b>	<b>Lb<sub>f</sub> -pies</b>
	1 2 3 4 5	80 90 120 69 100	59 66,4 88,5 50,8 73,8		

OTROS RESULTADOS:

SE CERTIFICA QUE TODO LO INDICADO EN ESTE REGISTRO, ES CORRECTO Y QUE LAS PROBETAS FUERON SOLDADAS Y ENSAYADAS DE ACUERDO CON LOS REGISTROS DE LA NORMA API 1104

ELABORADO POR:

\_\_\_\_\_  
Br. Gregory Soriano  
Br. Juan C. Gonzalez

APROBADO POR:

\_\_\_\_\_  
Ing. Vicente Ignoto

# **Capítulo IV**

---

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## IV.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1.- *Conclusiones*

- 1.- La evaluación del procedimiento de soldadura FCAW-G con transferencia pulsada, aplicado en la tubería API 5L-X52, califica según la norma API 1104.
- 2.- El criterio de Burnoff para la selección de los parámetros de arco pulsado es aplicable al proceso de soldadura con alambre tubular.
- 3.- Los parámetros del arco pulsado calculados,  $V_A = 3$  m/min,  $I_P = 415$  amp,  $I_B = 50$  amp,  $t_P = 3,4$  mseg y  $t_B = 7,5$  mseg, garantiza una adecuada calidad en las juntas soldadas.
- 4.- La soldadura FCAW-G con transferencia pulsada, reportó un excelente acabado superficial con escasas salpicaduras y porosidades.
- 5.- Las propiedades mecánica evaluadas en las juntas soldadas FCAW-G con transferencia pulsada, cumplen con los requerimientos establecidos en la norma API 1104.

## 4.2.- Recomendaciones

- 1.- Ampliar el estudio sobre los parámetros del pulso en FCAW-G.
- 2.- Evaluar los parámetros del arco pulsado en FCAW-G para otras aplicaciones.
- 3.- Estudiar el comportamiento del proceso de soldadura FCAW sin protección gaseosa, para la unión de tubería de Acero API 5L-X52 y otros.
- 4.- Calificación del proceso de soldadura FCAW-G, bajo un sistema sin protección gaseosa y compararlos con este trabajo.

# Capítulo V

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

## V.- REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- 1.- Grooven, Mikell P. *“Fundamento de manufatura moderna”*. México 1997, pag 712-753.
- 2.- Asta E. *“Soldadura de unión con alambres tubulares”*. **Soldador Conarco** n. 113; Argentina, 2000, pag. 9-14
- 3.- AWS. *“Flux Cored Arc Welding”*. **Welding Handbook**. 8va ed., vol. 2, Miami Fl., cap. 5. 1998, pag.159-160.
- 4.- AWS. *“Specification for carbon steel electrodes for Flux Cored Arc Welding”*. An American National Standard, ANSI/AWS. A5. 20-95, 1994.
- 5.- ASM. *“Welding and Brazing”*. Metal Handbook, v. 6, 1993.
- 6.- Hernandez, G. R. *“Manual del Soldador”*. 4<sup>ta</sup> ed, 1996. pag 306-310.
- 7.- Souza P.C.R.D. *“Análise da transferência metálica na soldagem com arame tubular”*. **Congreso V Ibero Americano de Soldagem**, 1998
- 8.- Wang, W.; Lui S.; Jones J. E. *“Flux Cored Arc Welding: Arc, Processing and metal transfer characterization”*. **Welding Journal**, vol. 74, n. 11, 1985, pag. 369-s a 377-s
- 9.- Amin, M. *“Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer arc welding”*. **Metal Construction**, vol. 15, n. 5, 1983, pag 272-278.
- 10.- Rajasekaran S.; Kulkarni S. D.; Mallya U. D. *“Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gsa metal arc welding”*. **Welding Journal**, vol 77, n. 6,1998; pag. 254-s a 269-s.
- 11.- AWS. *“Welding Metallurgy”*. **Welding Handbook**. 8va ed., vol. 1, Miami Fl., cap. 4. 1998, pag. 89-123.

- 12.- Benzo, M.; Capodicasa, A. *"Calificación de procedimiento de soldadura tubo/tubo usados en calderas"*. **Trabajo especial de grado**, Caracas, 1995.
- 13.- ASM. *"Weld Discontinuities"*. **Metals Handbook**, 9<sup>th</sup> ed., Vol 6, American Society for Metals, 1983. P829-855
- 14.- AWS. Welding Handbook. 8va ed., vol. 2, Miami Fl., cap. 5. 1984, pag.187.
- 15.- *"Procedure Handbook of Arc Welding"*. **Lincoln Electric Co.**, 12<sup>th</sup> ed., 1973.
- 16.- Craig B. Dallam, *"Caracterización de Soldadura"*. **The Lincoln Electrical Company**, 1993.
- 17.- Centro tecnológico de ensayo no destructivo. *"Guía de Introducción a los ensayos no destructivos"*.
- 18.- Instituto de soldagem e mecatronica. *"MET DIGITEC 300 (manual de insrtuÇôes)"*. 1<sup>o</sup> edição 1998.
- 19.- Moura M., T.; Cléa Soares M.; Evangelista I.; Marco Antonio dos Santo *"Avaliação das propriedades mecânicas de uma junta soldada de uma tubulação de aço API 5L-60"*. VI Congresso Iberoamericano de soldadura de São Paulo; CT54, 1998, pag. 1-13.
- 20.- Zalazar M.; Quesada H. J. *"Microestructuras producidas en la soldadura de uniones de aceros para tuberías de gran diámetro"*, **Revista Metalurgia**, Madrid, 34 (6), 1998. pag 469-474.
- 21.- Metalography of Weldments, Metals Handbook, 9th ed., Vol 9, American Society for Metals, 1985, p 577-586.
- 22.- D. V. Dorling *"Applying pulsed GMA welding to pipeline construction"* Welding journal; pag. 39-44.

# **ANEXOS**



## Products Navigation

## SELECT SECTION

Click Link Below

- Stick
- FluxCored - Gas Shielded
- FluxCored - Self Shielded
- MIG
- Submerged Arc
- Aluminum
- Stainless Steel
- Hardfacing
- Cast Iron/Alloys
- Cut Lengths

## Search the Site!

Go!

Type in a keyword  
to quickly find what you  
want.

## Outershield 71M

71M is a modified version of our Outershield 71 with improved arc stability and puddle control. It is a high penetrating single and multiple pass all position cored wire. The fast freezing slag increases out-of-position versatility and productivity. The spray type arc has virtually no spatter and the slag is easy to remove.

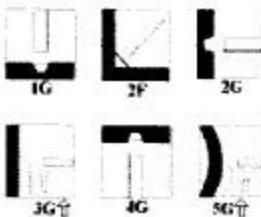
## ADVANTAGE LINCOLN

- Higher out-of-position deposition rates, up to 20% faster, for lower cost welding.
- Higher usable wire feed speeds, typically 50% higher for lower cost welding and greater versatility.
- Reduced smoke levels for greater operator comfort.

## TYPICAL APPLICATIONS

- Bridge, ship, barge or offshore drilling rig construction.
- General fabrication.
- Machinery fabrication.
- Structural fabrication.

## WELDING POSITIONS



## CONFORMANCE

- AWS A5.20-95: E71T-1 & E71T-9
- ASME SFA-5.20: E71T-1 & E71T-9
- ABS: 3SA-3YSA(HH)
- CWB: E480IT-9-CH
- DNV: IIYMS(HH)
- G.L.: 3S-3YSHH
- JIS: YFL-C503R
- Lloyd's: 3S-3YSH10
- N.K.: KSW53G(C)H10
- MIL-E-24403/1D: MIL-71T-1C & MIL-71T-1M
- BV: SA3YMH

## SHIELDING GAS

75-80% Ar / Balance CO<sub>2</sub>  
100% CO<sub>2</sub>

Flow Rate: 40-50 CFH

## DIFFUSIBLE HYDROGEN

Shielding Gas	Typical Results (ml/100g weld deposit)
100% CO <sub>2</sub>	4-9

## DIAMETERS / PACKAGING

Diameter Inches (mm)	10 Lb (5 kg) Spool	25 Lb (11 kg) Readi- Reel®	25 Lb (11 kg) Plastic Spool	40 Lb (18 kg) Eco-Spool	50 Lb (23 kg) Coil	300 Lb (136 kg) Speed-Feed Reel	500 Lb (227 kg) Accu Trak Drum	600 Lb (272 kg) Speed-Feed Reel
.035 (0.9)	EDS26804		ED026805					
.045 (1.1)	EDS20836	ED020840	ED022659	ED026895	ED020844		ED627364	ED020849
.052 (1.3)		ED020841	ED022680		ED020845			ED020850
1/16 (1.6)		ED020842	ED022661	ED026897	ED020846	ED020848		ED020851
.072 (1.8)		ED020843			ED020847			

MECHANICAL PROPERTIES <sup>(1)</sup> - As Welded per AWS A5.20

Required	Yield Strength		Tensile Strength		Elongation (%)	Charpy V-Notch ft-lbs (Joules)	
	psi (MPa)	psi (MPa)	psi (MPa)	psi (MPa)		@ 0°F (-18°C)	@ -20°F (-29°C)
AWS E71T-1	58,000 (400)	70,000 (483)	22	20 (27) min.	—	—	—
AWS E71T-9	min.	min.	min.	—	—	20(27) min.	—
<b>Test Results</b>							
100% CO <sub>2</sub>	88,000 (606)	91,000 (627)	28	35 (47)	23 (31)	—	—
75% Ar / 25% CO <sub>2</sub>	90,000 (620)	94,000 (648)	27	52 (70)	40 (54)	—	—

(1) Typical all weld metal.

## TYPICAL OPERATING PROCEDURES

Wire Polarity Stickout Wire Weight	Wire Feed Speed in/min (m/min)	Arc Voltage (volts)	Approx. Current (amps)	Melt-Off Rate lbs/hr (kg/hr)	Deposition Rate lbs/hr (kg/hr)	Efficiency %
.035"	200 (5.1)	20 - 23	90	2.8 (1.3)	2.3 (1.0)	80
DC+	250 (6.4)	21 - 24	110	3.5 (1.6)	2.8 (1.3)	80
3/4" (19mm)	300 (7.6)	22 - 25	130	4.2 (1.9)	3.4 (1.5)	83
.250 lbs/1000"	350 (8.9)	23 - 26	150	4.9 (2.2)	4.0 (1.8)	83
(Max. recommended WFS for use with 75-80% Ar/balance)	400 (10.2)	24 - 27	155	5.6 (2.5)	4.6 (2.1)	83
CO <sub>2</sub> blends is 600 in/min)	500 (12.7)	26 - 30	175	6.9 (3.1)	5.7 (2.6)	82
	600 (15.2)	28 - 32	195	8.4 (3.8)	7.1 (3.2)	84
	700 (17.8)	30 - 34	215	9.8 (4.4)	8.2 (3.7)	84
.045"	200 (5.1)	24 - 27	140	4.6 (2.1)	4.0 (1.8)	87
DC+	250 (6.4)	25 - 28	160	5.8 (2.6)	5.0 (2.3)	86
3/4" (19mm)	300 (7.6)	26 - 29	185	6.9 (3.1)	5.9 (2.7)	86
.382 lbs/1000"	350 (8.9)	26 - 29	205	8.0 (3.6)	6.9 (3.1)	86
(Max. recommended WFS for use with 75-80% Ar/balance)	400 (10.2)	27 - 30	220	9.2 (4.2)	7.9 (3.6)	86
CO <sub>2</sub> blends is 500 in/min)	500 (12.7)	29 - 32	255	11.5 (5.2)	9.9 (4.5)	86
	600 (15.2)	31 - 34	285	13.8 (6.3)	11.9 (5.4)	86
	700 (17.8)	34 - 37	310	16.0 (7.3)	13.9 (6.3)	87
	800 (20.3)	36 - 40	335	18.3 (8.3)	15.9 (7.2)	87
.052"	150 (3.8)	22 - 25	150	4.6 (2.1)	3.9 (1.8)	85
DC+	200 (5.1)	23 - 26	180	6.1 (2.8)	5.2 (2.4)	85
3/4" (19mm)	250 (6.4)	24 - 27	210	7.6 (3.4)	6.5 (3.0)	86
.507 lbs/1000"	300 (7.6)	25 - 28	240	9.1 (4.1)	7.9 (3.6)	87
(Max. recommended WFS for use with 75-80% Ar/balance)	350 (8.9)	27 - 30	265	10.6 (4.6)	9.2 (4.2)	87
CO <sub>2</sub> blends is 450 in/min)	450 (11.4)	28 - 31	315	13.7 (6.2)	11.8 (5.4)	87
	500 (12.7)	30 - 33	335	15.2 (6.9)	13.2 (6.0)	87
	600 (15.2)	33 - 36	375	18.2 (8.3)	15.8 (7.2)	87
	700 (17.8)	36 - 39	405	21.3 (9.7)	18.5 (8.4)	87
1/16"	125 (3.2)	22 - 25	180	5.4 (2.4)	4.8 (2.1)	85
DC+	150 (3.8)	23 - 26	210	6.5 (3.0)	5.5 (2.5)	85
3/4" (19mm)	200 (5.1)	24 - 27	255	8.6 (3.9)	7.3 (3.3)	85
.720 lbs/1000"	250 (6.4)	25 - 28	295	10.8 (4.9)	9.2 (4.2)	85
(Max. recommended WFS for use with 75-80% Ar/balance)	300 (7.6)	26 - 29	335	13.0 (5.9)	11.0 (5.0)	85
CO <sub>2</sub> blends is 400 in/min)	400 (10.2)	29 - 34	385	17.3 (7.9)	14.7 (6.7)	85
	500 (12.7)	34 - 37	445	21.6 (9.8)	18.4 (8.4)	85
	600 (15.2)	37 - 40	480	25.9 (11.8)	22.0 (10.0)	85
.072"	100 (2.5)	22 - 24	200	5.8 (2.6)	4.8 (2.2)	83
DC+	150 (3.8)	24 - 26	260	8.6 (3.9)	7.2 (3.3)	84
3/4" (19mm)	200 (5.1)	26 - 28	315	11.4 (5.2)	9.6 (4.4)	84

.949 lbs/1000*	250	(6.4)	28 - 30	365	14.2	(6.4)	12.0	(5.4)	85
(Max. recommended WFS	300	(7.6)	30 - 32	410	17.0	(7.7)	14.5	(6.6)	85
for use with 75-80%									
Ar/balance	400	(10.2)	34 - 36	495	22.6	(10.3)	19.3	(8.8)	85

CO<sub>2</sub> blends is 300 in/min)

Note: Shaded areas are to be used with CO<sub>2</sub> gas only.

(1) Use lower voltages with Ar/CO<sub>2</sub> blends. Above data was determined using 100% CO<sub>2</sub>.

## DEPOSIT COMPOSITION

	%C	%Mn	%P	%S	%Si
<b>Requirements</b>					
AWS E71T-1	.18	1.75	.03	.03	.90
AWS E71T-9	max.	max.	max.	max.	max.
<b>Test Results</b>					
100% CO <sub>2</sub>	.06	1.50	.013	.014	.70
75% Ar / 25% CO <sub>2</sub>	.06	1.60	.012	.015	.80

[For more information, request bulletin C3.10 or click here.](#)

[\[Corporate\]](#) [\[Products\]](#) [\[Services\]](#) [\[Find Us\]](#) [\[Site Map\]](#)

Copyright 1999, 2000 The Lincoln Electric Company.

[Legal Notice](#) and [Privacy Statement](#). Powered by [DigiKnow](#).

**LINCOLN**

HOME ELECTRIC

ENGLISH

ESPAÑOL

# Productos y Servicios



## Laminados en Caliente

### Aceros para fabricación de tubería de conducción, soporte y revestimiento - Placa Especificación API 5L X-52

PLACA: Tolerancias | Rangos de Dimensión / ROLLO: Tolerancias | Rangos de Dimensión  
Menú Laminados en Caliente | Búsqueda Rápida

Clasificación de espesor de acuerdo a API 5L	Composición Química - en pesos												Espesor Pulg. (mm)	Requerimientos Físicos										
	C		Mn		P		S		Cr		Ni			C		Tensión		Límite de Esfuerzo Mín.		Resistencia a la Tensión Mín.		Energía de impacto		
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.		Max.	Min.	Max.	Min.	ksi (MPa)	ksi (MPa)	ksi (MPa)	ksi (MPa)	ft-lb (J)	ft-lb (J)	
API 5L-X-52	0.15	1.25	0.025	0.020	0.35	—	0.050	0.060	—	—	—	—	—	0.187	4.75	52	358	86	455	N/A	35 (4)	0.885	22.5	
Pruebas de Impacto (V-N)												Prueba de Dobliz												
Espesor Pulg. (mm)	Diametro de Placa		Promedio Max. en 3 Placas		Promedio Min. en 3 Placas		Espesor Max. (mm)		Angulo < 180°		Dureza (RBr)		Grados equivalentes:											
	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)			ASTM A-572-50											
COMO REQUERIMIENTO SUPLEMENTARIO												—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

#### Características y usos específicos:

- 1.- Acero de alta resistencia baja aleación al columbio-vanadio adecuado para fabricar tubería de conducción recubierta con costura y sin costura, para conducción de hidrocarburos no amargos y sus derivados como el gas natural.
- 2.- Este acero contiene alto nivel de soldabilidad por su bajo carbono equivalente.
- 3.- La norma no define el máximo espesor a fabricar sin embargo en AHMSA es posible fabricarlo hasta 0.885" de espesor.
- 4.- En la mayoría de los aceros para la fabricación de tubería se establece un convenio entre fabricante del acero y el fabricante del tubo, ya que el acero al transformarse en tubo se incrementan o disminuyen sus propiedades mecánicas dependiendo de los siguientes factores dependientes entre si:

4.1.- Espesor.

4.2.- Diámetro de tubería.

4.3.- Adición y cantidad de microaleantes y

4.4.- Proceso establecido por el fabricante de la tubería.

Por tal razón los valores de la prueba de tensión son meramente de base.

- 5.- La prueba de impacto se garantiza de acuerdo a requerimiento del cliente y es establecido en la orden o pedido, los parámetros para placa también son establecidos en el pedido por el cliente.

#### Grados equivalentes:

ASTM A-572-50.- Acero de alta resistencia baja aleación estructural. Similar en propiedades mecánicas.



## REPORTE DE RESULTADOS

**SOLICITANTE:** Brs: Juan Carlos Gonzalez y Gregory Soriano

**FECHA:** 23/06/00

**TITULO:** Análisis químico de Acero al Carbono

**OBJETIVO:** Determinar el contenido de Carbono (C), Azufre (S), Silicio (Si) y Manganese (Mn).

**PROCEDIMIENTO:** Para la determinación de Silicio (Si), y Manganese (Mn) se utilizó el método de Absorción Atómica por Espectrofotometría de Llama. Y para el Carbono (C) y el Azufre (S) el método gasométrico (LECO).

### RESULTADOS:

Muestra	%C	%S	%Si	%Mn
1	0.15	0.005	0.22	0.77

*Por: Marcial Pérez*  
Lic. Olivia Brito  
Jefe Lab. Químico Instrumental

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



## REPORTE DE RESULTADOS

**SOLICITANTE:** Prof. Vicente Ignoto  
**Brs:** Juan Carlos Gonzalez y Gregory Soriano

**FECHA:** 24/11/00

**TITULO:** Análisis químico de Aceros al Carbono API 5L grado 52

**OBJETIVO:** Determinar el contenido de Carbono (C), Azufre (S), Silicio (Si) y Manganese (Mn).

**PROCEDIMIENTO:** Para la determinación de Silicio (Si) y Manganese (Mn) se utilizó el método de Absorción Atómica por Espectrofotometría de Llama y para el Carbono (C) y el Azufre (S) el método gasométrico (LECO).

### RESULTADOS:

Muestra	%C	%S	%Si	%Mn
1	0.08	0.011	0.76	1.02

*Por: M. Lic. Olivia Brito*  
Lic. Olivia Brito  
Jefe Lab. Químico Instrumental

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

IMOSA TUBOACERO FABRICACION, C.A.

CERTIFICADO DE LABORATORIO

PRUEBAS DE IMPACTO (CHARPY-V) (LbxFt)		Dimen. 7.5 x10x55 mm, Temp. 0 °C	
CENTRO DE SOLDADURA	ZONA AFFECTADA POR CALOR	MATERIAL BASE	
	PROBETA No. 1	PROMEDIO	
17	50	48	56
22	100	103	120
24	70	56	60
43	80	70	71
66	100	110	110
	PROBETA No. 2	PROMEDIO	
17	50	48	51
22	100	103	107
24	70	56	62
43	80	70	73
66	100	110	106
	PROBETA No. 3	PROMEDIO	
17	50	48	51
22	100	103	107
24	70	56	62
43	80	70	73
66	100	110	106
	PROBETA No. 3	PROMEDIO	
17	50	48	51
22	100	103	107
24	70	56	62
43	80	70	73
66	100	110	106
	PROBETA No. 3	PROMEDIO	
17	50	48	51
22	100	103	107
24	70	56	62
43	80	70	73
66	100	110	106

DUREZA DEL MATERIAL (HV30)		MATERIAL BASE	
CENTRO DE SOLDADURA	ZONA AFFECTADA POR CALOR	MATERIAL BASE	
	PROBETA 6 TUBO No. 1	POSICION No. 1	
	PROBETA 6 TUBO No. 2	POSICION No. 2	
	PROBETA 6 TUBO No. 3	POSICION No. 3	
	PROBETA 6 TUBO No. 4	POSICION No. 4	
	PROBETA 6 TUBO No. 5	POSICION No. 5	
	PROBETA 6 TUBO No. 6	POSICION No. 6	
	PROBETA 6 TUBO No. 7	POSICION No. 7	
	PROBETA 6 TUBO No. 8	POSICION No. 8	
	PROBETA 6 TUBO No. 9	POSICION No. 9	
	PROBETA 6 TUBO No. 10	POSICION No. 10	
	PROBETA 6 TUBO No. 11	POSICION No. 11	
	PROBETA 6 TUBO No. 12	POSICION No. 12	
	PROBETA 6 TUBO No. 13	POSICION No. 13	