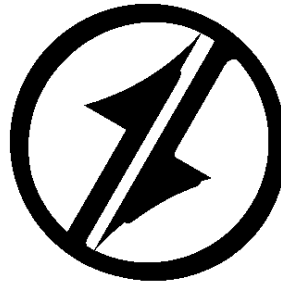


**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA EN EL  
PROCESO DE ARCO ELECTRICO CON PROTECCIÓN DE GAS  
(GMAW) PARA SOLDAR UN ACERO A-27**

**POR**

**ARMANDO GARCÍA SÁNCHEZ**

**TESIS**

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE  
LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO MARZO DE 2009.**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA POR  
PROCESO DE ARCO ELECTRICO CON PROTECCIÓN DE GAS  
(GMAW) PARA SOLDAR UN ACERO A-27**

**POR**

**ARMANDO GARCIA SANCHEZ**

**TESIS**

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE  
LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 29 DE ABRIL DEL 2009.**

# AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme concluir esta etapa de mi vida.

A mi Familia, por su apoyo durante todo el tiempo y días de descanso invertidos en mi maestría.

A mis asesores MC. Mario Trejo Aguirre, Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila, MC. Gabriel García Cerecero, catedráticos y maestros que me apoyaron en mi desarrollo profesional durante mi maestría.

Así también a COMIMSA por la confianza y oportunidad brindada, y a todo el personal de posgrado, laboratorios, CECEES y manufactura, que me han apoyado y ayudado incondicionalmente.

A todos Gracias

## RESUMEN

En la actualidad, muchos componentes de diferentes tipos de acero u otras aleaciones, se recuperan con soldadura, teniendo buenos resultados para volver a utilizarse con buena funcionalidad, tal es el caso de los módulos de bomba de lodos fabricados de acero ASTM A-27 utilizados en los equipos de perforación de la industria petrolera, dichos módulos actualmente se recuperan con el proceso de soldadura de electrodo revestido. El presente trabajo describe la utilidad de las redes neuronales al ser aplicadas para optimizar los parámetros involucrados el proceso de soldadura GMAW, para soldar un acero ASTM A-27. Para esto, se prepararon 33 cupones de soldadura tipo revestimiento de dicho acero. El diseño de experimentos se realizó considerando como variables dependientes amperaje, voltaje, velocidad de avance y extensión del electrodo, la variable dependiente fue la penetración; como material de aporte se seleccionó de acero inoxidable ER 312, y como gas protector una mezcla Ar-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>. Para el tratamiento de los valores arrojados del diseño de experimentos se emplearon sistemas neuronales del tipo retropropagación y perceptrón múltiple. Derivado del análisis experimental se determinó que la variable que más influye en la penetración es la corriente (amperaje). El valor máximo de penetración obtenido fue de 3.3 mm, para una corriente de 260 Amperes, 30 volts, una velocidad de avance de 70 cm/min y una extensión del electrodo de 12.7 mm. Derivado de la aplicación de la técnica de redes neuronales se obtuvieron los parámetros optimizados de 252 amperes, 27.7 volts, velocidad de avance 40 cm/min y extensión del electrodo de 9.92 mm para lograr la penetración máxima de 3.5 mm. El perfil metalográfico y de microdureza llevado a cabo en la sección transversal de la soldadura en las muestras con tratamiento térmico de precalentamiento y postcalentamiento, evidencia una microestructura homogénea de ferrita alotriomórfica y perlita esferoidal en la zona afectada por el calor (ZAC) con valores de microdureza de 211 Hv, en la línea de dilución una microestructura refinada con microdureza de 263 Hv y en la zona fundida de granos

austeníticos columnares con microdureza de 246 Hv. Referente las propiedades mecánicas se observó que son adecuadas para el uso que se pretende. Finalmente cabe mencionar que el presente trabajo incluye la descripción del proceso GMAW, así como la teoría del proceso de solidificación en una soldadura y al final una metodología para la recuperación de dimensiones de piezas de acero al carbono (módulos de bomba de lodos) de modulo de bomba de acero al carbono, con el fin de brindar al lector la información necesaria para una correcta aplicación de soldadura en componentes similares.

## CONTENIDO

<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>2. Justificación e Hipótesis</b> .....	3
<b>3. Objetivos</b> .....	4
<b>4. Estado del arte</b> .....	6
4.1. Proceso de soldadura GMAW.....	6
4.1.1. Principios básicos de operación.....	7
4.1.2. Variables del proceso.....	7
4.1.3. Equipo.....	8
4.1.4. Mecanismos de transferencia del metal.....	9
4.1.5. Electrodo.....	13
4.1.6. Gases protectores.....	14
4.2. Efecto de las variables de soldadura en el proceso GMAW.....	22
4.3. Estudio del efecto de los parámetros del proceso GMAW en la Penetración.....	28
4.4. Transferencia de calor en una soldadura.....	30
4.4.1. Análisis de flujo de calor en la soldadura.....	31
4.3.2. Velocidad de enfriamiento.....	32
4.5. Reacciones Gas-Metal en soldadura.....	34
4.6. Efecto del hidrógeno presente en la mezcla del gas de protección.....	36
4.7. Solidificación.....	40
4.8. Aplicación e soldaduras disímiles en aceros inoxidables.....	46
4.8.1. Migración del carbono.....	47
4.8.2. Zona de dilución.....	48
4.9. Especificación del acero ASTM A-27.....	50
4.10. Material de aporte.....	50
4.11. Diseño de experimentos.....	52
4.12. Sistemas inteligentes.....	53
4.12.1 Redes neuronales.....	53
4.12.2 Optimización.....	54

<b>5. Desarrollo Experimental</b> .....	55
5.1. Diseño de experimentos.....	55
5.2. Preparación de muestras.....	56
5.3. Materiales y técnicas de caracterización.....	58
5.3.1. Técnicas de caracterización.....	58
5.4. Optimización del proceso.....	60
<b>6. Resultados y discusión</b> .....	61
6.1. Caracterización del metal base.....	61
6.2. Penetración.....	64
6.3. Evaluación de la soldadura.....	66
6.4. Propiedades mecánicas de la soldadura.....	71
6.4.1 Dureza.....	71
6.5. Análisis del diseño experimental.....	72
6.6. Optimización del proceso.....	75
6.7. Efecto del precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura en la microestructura.....	76
6.7.1. Resultados de la medición de la penetración de muestras tratadas térmicamente.....	77
6.7.2. Evaluación de la soldadura tratada térmicamente.....	77
<b>7. Conclusiones</b> .....	84
<b>Bibliografía</b> .....	86
<b>Anexo</b> .....	89

## 1. INTRODUCCION

Los módulos de bombas de lodos utilizados en el área de perforación de la industria petrolera son fabricados de acero al carbono en condición de normalizado bajo la especificación ASTM A-27 [1]. Debido a las condiciones en que operan dichos módulos es factible recuperar con soldadura las zonas desgastadas, obteniendo buenos resultados que prolongan el ciclo de vida en servicio.

La recuperación de dichos componentes se realiza utilizando el proceso soldadura de electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés) y electrodos de acero inoxidable. Este proceso proporciona buenas características de penetración y propiedades metalúrgicas de la soldadura aplicada [2-3], la cual posteriormente es maquinada, sin embargo, presenta la desventaja de que la velocidad de depósito es mucho menor comparada con un proceso de soldadura semiautomático como el GMAW, por lo que se considera una alternativa potencial.

El proceso GMAW se utiliza ampliamente en la industria metal-mecánica en sus diferentes modos de transferencia. La calidad de una unión está determinada por la penetración y el perfil del cordón depositado, los que a su vez son afectados por las variables: corriente, voltaje, velocidad de alimentación de alambre y el gas de protección [3].

Se han realizado diferentes investigaciones para estudiar la relación entre los parámetros de soldadura y la geometría del cordón, para lo cual se han aplicado diferentes técnicas de análisis entre ellas la de regresión lineal [4], así como el desarrollo de algoritmos para modelar dicho proceso [5-6]. Recientemente se han realizado estudios sobre el efecto de los parámetros de soldadura en la penetración para el proceso GMAW [7] y varios trabajos para mejorar la modelación y optimización en los procesos de soldadura, en el manejo de parámetros y variables que afectan la calidad. Todos estos estudios muestran que la corriente tiene una gran influencia en la geometría del cordón



y la penetración, y, que los modelos matemáticos derivados de la experimentación pueden ser utilizados para predecir acertadamente la geometría del cordón de soldadura.

Actualmente muchas empresas se apoyan en las nuevas tecnologías como los métodos numéricos, sistemas inteligentes y métodos estadísticos para mejorar y optimizar sus procesos.

En este trabajo se pretende determinar la relación existente entre los parámetros de soldadura involucrados en el proceso GMAW y la penetración en un acero ASTM A-27 así como demostrar que se puede recuperar con soldadura por proceso GMAW, piezas de acero al carbono con las características y calidad de la soldadura adecuada para su uso posterior.

Con la aplicación de herramientas metalúrgicas, técnicas de sistemas inteligentes y estadísticas, se busca encontrar los parámetros óptimos de soldadura para lograr la mayor penetración, aplicando soldadura de revestimiento de acero inoxidable en una placa de acero al carbono. Así mismo se podrá establecer una metodología para recuperar con soldadura los módulos de bombas y otros componentes similares.

## 2. JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS

### **Justificación:**

Actualmente diferentes componentes de acero ASTM A-27 como los módulos de bomba de lodos se recuperan con soldadura utilizando los procesos de arco, electrodo revestido (SMAW), electrodo con núcleo de fundente (FCAW) o electrodo de tungsteno (GTAW), principalmente por la buena penetración que se obtiene, comúnmente debido a la composición química, configuración y al volumen de dichas piezas, normalmente se requiere de un tratamiento térmico post-soldadura y maquinado en la etapa final de la recuperación.

Para el caso del proceso GMAW, en este tipo de acero, es la falta de información referente a la profundidad de fusión que se alcanza, lo que motiva al presente trabajo que pretende establecer una metodología para soldar acero ASTM A-27, analizar su soldabilidad en función de los elementos de aleación, así como la influencia de los parámetros de soldadura en la penetración.

### **Hipótesis:**

De acuerdo con lo planteado anteriormente se propone la siguiente hipótesis:

- Con la aplicación de técnicas como los sistemas inteligentes y estadísticas, es viable optimizar los parámetros del proceso de soldadura GMAW que permitan y sea factible económicamente, recuperar componentes de acero ASTM A-27.

### **3. OBJETIVO**

#### **OBJETIVO GENERAL**

Establecer la relación existente entre los parámetros de soldadura involucrados en el proceso GMAW y la profundidad de fusión en un acero ASTM A-27.

Encontrar los parámetros óptimos de soldadura para lograr la mayor penetración, aplicando soldadura para el revestimiento de acero al carbono con acero inoxidable, con la aplicación de herramientas metalúrgicas, técnicas de sistemas inteligentes y estadísticas.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Definir las características del proceso de soldadura GMAW.
- b. Conocer el efecto de los diferentes parámetros de proceso en las propiedades de la soldadura.
- c. Determinar las características metalúrgicas de la soldadura para la recuperación de componentes de acero al carbono ASTM A-27.
- d. Determinar el efecto de los parámetros de soldadura en la profundidad de fusión o penetración de una soldadura.
- e. Establecer los parámetros óptimos aplicando métodos y técnicas estadísticas para obtener la penetración máxima en el proceso GMAW aplicado a la recuperación de módulos de bomba.

- f. Demostrar que es factible recuperar con soldadura por proceso GMAW piezas de acero al carbono con las características y calidad de la soldadura adecuada para su uso posterior.
  
- g. Definir una metodología para la recuperación mediante el proceso de soldadura GMAW, de los módulos de bomba de acero ASTM A-27.

## **4. ESTADO DEL ARTE**

### **4.1 Proceso de Soldadura GMAW.**

El proceso soldadura de arco con protección de gas (GMAW por sus siglas en ingles), es un proceso cuyo principio de operación se basa en la alimentación automática de un electrodo continuo, consumible, el cual hace un arco eléctrico con la pieza de trabajo protegido mediante un gas de procedencia externa. Los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad y dirección del desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola [7]. Ver figura 4.1

Los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola para soldar, cables, la unidad de alimentación del electrodo o alambre, la fuente de potencia y el sistema de suministro del gas protector.

Este proceso puede ser usado para soldar la mayoría de los metales comerciales, incluyendo aceros al carbono, inoxidable, aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, hierro, titanio y zirconio. Es el proceso preferido para la soldadura de aluminio, magnesio, cobre y muchas de las aleaciones de metales reactivos. La mayoría de los hierros y aceros de baja aleación pueden ser satisfactoriamente unidos por este proceso de soldadura, así como los bajo carbono, templados de alta resistencia, cromo-hierro, de alto níquel y algunas de las superaleaciones en base níquel. Con esta variedad de materiales, las técnicas y procedimientos de aplicación pueden variar ampliamente.

En el caso de los gases de protección el CO<sub>2</sub> o mezclas con argón son convenientes cuando se sueldan aceros de bajo carbono y de baja aleación, mientras que el gas inerte puro es primordial cuando se sueldan aceros altamente aleados, aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, titanio, zirconio, aceros inoxidable y superaleaciones base níquel.

### 4.1.1 Principios básicos de operación

En el proceso GMAW el calor del arco generado entre el electrodo consumible y la pieza es utilizado para fundir las superficies del metal base y el extremo del electrodo. El metal fundido del electrodo es transferido hacia la pieza a través del arco, donde se convierte en metal de soldadura depositado. La protección de gas, que puede ser gas inerte, activo o una mezcla de ambos. El gas de protección envuelve el área del arco para protegerlo de contaminantes de la atmósfera, figura 4.1.

La soldadura puede ser aplicada en forma semiautomática usando una pistola sostenida manualmente, en esta, el electrodo es alimentado por una bobina, o en forma automática que incluye equipos automatizados o robots.

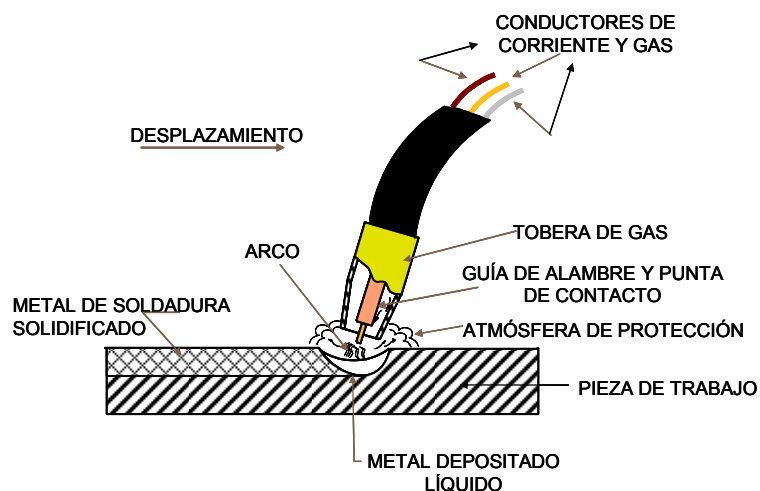


Fig. 4.1. Proceso de soldadura GMAW [7].

### 4.1.2 Variables del proceso

Las siguientes son algunas de las variables que afectan la penetración, la geometría y en general la calidad de la soldadura [2]:

1. Corriente de soldadura
2. Polaridad
3. Voltaje del arco

4. Velocidad de avance
5. Extensión del electrodo
6. Orientación del electrodo (ángulo de desplazamiento)
7. Posición de la unión que se va a soldar
8. Diámetro del electrodo
9. Composición y tasa de flujo del gas protector

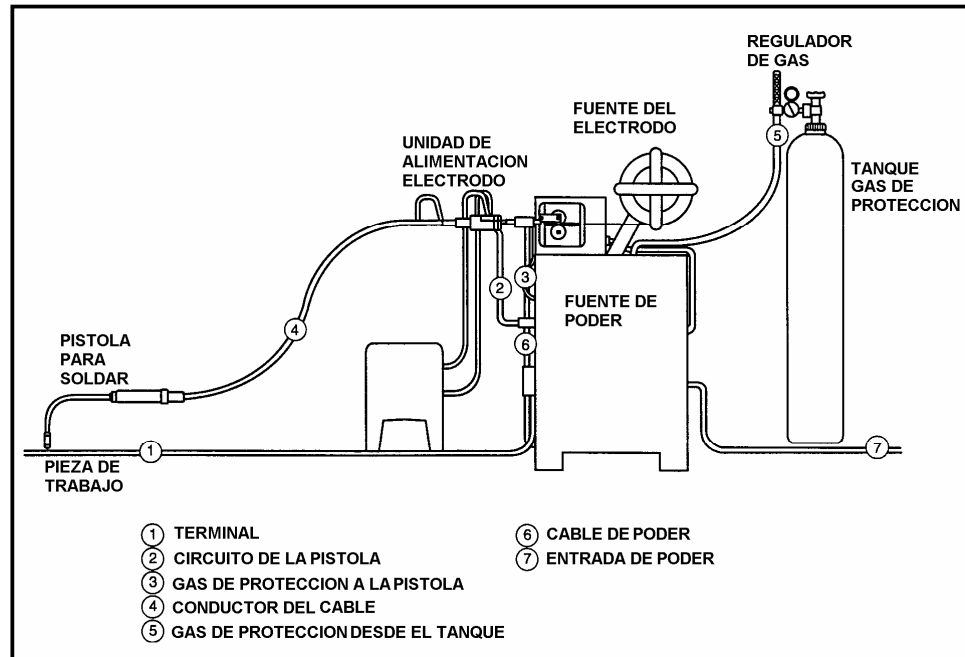
El conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir soldaduras de buena calidad. Estas variables no son del todo independientes, ya que cuando se modifica una, casi siempre modifica una o más de las otras para obtener los resultados que se buscan.

Se requiere considerable habilidad y experiencia para seleccionar los valores óptimos para cada aplicación. Esos valores óptimos son afectados por: (1) El tipo de metal base, (2) la composición del electrodo, (3) la posición y (4) los requisitos de calidad. Por lo tanto, no hay un conjunto único de parámetros que produzca resultados óptimos en todos los casos. En el punto 4.2 se mencionan y detallan las variables que tienen mayor efecto en la calidad de la soldadura.

#### **4.1.3 Equipo**

El equipo básico para cualquier instalación del proceso de soldadura GMAW, figura 4.2 consiste en lo siguiente:

- a) Pistola (enfriada por aire ó agua)
- b) Unidad de alimentación del electrodo
- c) Control de soldadura
- d) Fuente de potencia para soldadura
- e) Suministro regulado de gas protector
- f) Suministro de electrodo
- g) Cables y mangueras para interconexión
- h) Sistema de recirculación de agua (para pistolas enfriadas por agua)



**Fig. 4.2** Equipo del proceso GMAW [7]

#### 4.1.4 Mecanismos de transferencia de metal [19].

Los mecanismos básicos empleados para transferir metal del electrodo a la pieza de trabajo son:

- Transferencia por cortocircuito
- Transferencia globular
- Transferencia por aspersion
- Transferencia pulsada

El tipo de transferencia está determinada por varios factores, entre los más importantes están los siguientes:

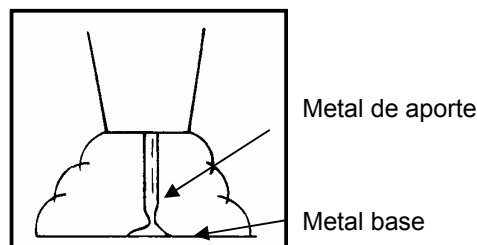
- Magnitud y tipo de la corriente de soldadura.
- Diámetro del electrodo
- Composición del electrodo
- Extensión del electrodo
- Gas protector



### a. Transferencia por corto circuito

La característica principal de este tipo de transferencia consiste en que el metal de aporte haga contacto con el metal fundido generándose un corto circuito como se muestra en la figura 4.3, después se produce un estrangulamiento y el desprendimiento de la gota de metal.

Este tipo de transferencia puede emplear una mezcla de gas protector compuesta por argón y  $\text{CO}_2$  o bien 100%  $\text{CO}_2$ , generalmente se emplean rangos bajos de amperaje y alambre de diámetro pequeño, como los rangos de amperaje son bajos este tipo de transferencia se usa para unir láminas o elementos delgados, también como el charco de metal fundido se solidifica rápidamente puede emplearse en todas las posiciones: plano, horizontal, vertical y sobre cabeza [8].

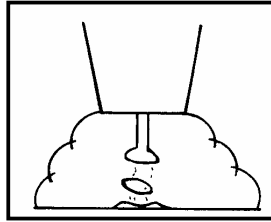


**Figura 4.3.** Transferencia por corto circuito.

### b. Transferencia globular

La transferencia globular ocurre a más altos rangos de amperaje que el cortocircuito, en este tipo el metal de aporte fundido, forma una bola de aproximadamente dos veces el diámetro del electrodo que al hacer contacto con la superficie del metal líquido se funde y se transfiere al charco de metal, ver figura 4.4.

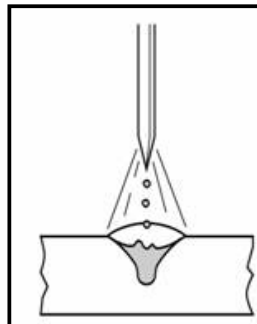
Este tipo de transferencia no es común usarlo debido a que produce mucho chisporroteo y como depende de la fuerza de la gravedad no es posible emplearlo en posición sobre cabeza.



**Figura 4.4.** Transferencia globular

### c. Transferencia por rociado

La transferencia por rociado ocurre a mas altos amperajes que los presentados en la transferencia globular, con diámetros grandes de alambre y una mezcla de gas rica en argón, el proceso genera gran cantidad de calor y por ello se prefiere no emplearlo en láminas o elementos delgados, la transferencia por rociado se limita a soldaduras de filete, ranuras de unión en posición plana y filetes en posición horizontal debido a lo fluido del metal fundido [6,19].



**Figura 4.5.** Transferencia por rociado axial.

Es un modo de transferencia muy estable libre de chisporroteo, se alcanza cuando se utiliza una mezcla de gas rica en argón. Este tipo de transferencia requiere el uso de corriente directa electrodo al positivo y un nivel de corriente por arriba del valor critico llamado “corriente de transición”. Abajo de este nivel de corriente, ocurre la transferencia globular con una relación de gotas por segundo baja. Arriba de la corriente de transición, la transferencia ocurre en forma de pequeñas gotas que se desprenden en una relación de cientos por segundo y son aceleradas axialmente en forma transversal al arco, ver figura 4.5. La corriente de transición depende de la tensión superficial del metal líquido, es inversamente proporcional al diámetro del electrodo, en un grado

más pequeño a la extensión del electrodo, varía de acuerdo a la temperatura de fusión del metal de aporte y a la composición del gas de protección. En la tabla 1, se indica la corriente de transición típica para algunos materiales. Otra característica del modo de transferencia por rociado es la forma de penetración que produce denominada “dedo” la cual puede ser profunda y es afectada por los campos magnéticos, mismos que deben ser controlados para mantener localizada en el centro del perfil de penetración de la soldadura.

**Tabla 1.** Corriente de transición transferencia Globular-Rociado para diferentes tipos de electrodos [7]

Tipo de Electrodo de alambre	Gas de Protección	Diámetro del alambre		Corriente de arco para Rociado (A)
		mm	in.	
Aceros bajo carbono	98Ar-2O <sub>2</sub>	0.58	0.023	135
		0.76	0.03	150
		0.89	0.035	165
		1.14	0.045	220
		1.57	0.062	275
		0.89	0.035	155
	95Ar-5O <sub>2</sub>	1.14	0.045	200
		1.57	0.062	265
		0.89	0.035	175
	92Ar-8CO <sub>2</sub>	1.14	0.045	225
		1.57	0.062	290
		0.89	0.035	180
	85Ar-15CO <sub>2</sub>	1.14	0.045	240
		1.57	0.062	295
		0.89	0.035	195
	80Ar-20CO <sub>2</sub>	1.14	0.045	255
		1.57	0.062	345
		0.89	0.035	150
99Ar-1O <sub>2</sub>	1.14	0.045	195	
	1.57	0.062	265	
	0.89	0.035	160	
Aceros Inoxidables	Ar-He-CO <sub>2</sub>	1.14	0.045	205
		1.57	0.062	280
		0.89	0.035	145
	Ar-H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub>	1.14	0.045	185
		1.57	0.062	255
		0.76	0.03	95
Aluminio	ARGON	1.19	0.047	135
		1.57	0.062	180
		0.89	0.035	180
Cobre desoxidado	ARGON	1.14	0.045	210
		1.57	0.062	310
		0.89	0.035	165
Bronce al silicio	ARGON	1.14	0.045	205
		1.57	0.062	270

#### **d. Transferencia por rociado pulsado**

Este tipo de transferencia es una variación de la transferencia por rociado, pero con arco “pulsado”, es decir la fuente de poder pulsa o varía el amperaje en un rango de corriente varios cientos de veces por segundo, a niveles de corriente altos se forma una pequeña gota de metal fundido que se transfiere a través del arco al charco. Este tipo de transferencia emplea bajos amperajes en comparación con el de rociado convencional, lo cual hace que prácticamente se emplee en cualquier posición y espesores de material [6].

El proceso GMAW generalmente emplea corriente directa y polaridad invertida (electrodo positivo) debido a que se obtiene un arco más estable, la transferencia de metal es más suave y con pocas salpicaduras. La polaridad directa (electrodo negativo) es raramente usada debido a que produce un arco inestable, la velocidad de depósito es más grande, pero se tiene poca penetración.

La corriente alterna no se usa comercialmente debido a un errático comportamiento del arco, como resultado de la extinción del arco cada medio ciclo de la onda de corriente [19].

#### **4.1.5 Electrodo**

El electrodo, alambre ó metal de aporte es clasificado por diversas especificaciones de la Sociedad Americana de la Soldadura, (AWS por sus siglas en ingles) [7]. En general, para aplicaciones de unión, la composición del electrodo es similar a la del metal base. Los electrodos que se usan para GMAW son de diámetro muy pequeño. Son comunes los diámetros de 0.9 a 1.6 mm (0.035” a 0.062”), pero pueden usarse electrodos con diámetro tan pequeño como 0.5 mm (0.020”) y tan grande como 3.2 mm (1/8”). Cuando los diámetros de los electrodos son pequeños y las corrientes relativamente altas, las velocidades de alimentación del alambre en GMAW son altas, desde unos 40 hasta 340 mm/s (100 a 800 pulg/min) para la mayor parte de los metales.

#### 4.1.6 Gases protectores [5].

La función primaria del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales, al calentarse hasta su punto de fusión al aire, presentan una marcada tendencia a formar óxidos y, en menor grado, nitruros. Además, el oxígeno reacciona con el dióxido de carbono. La reacción de estos diversos productos puede causar deficiencias de la soldadura, como porosidad y pérdida de ductilidad. Las reacciones mencionadas se forman con facilidad en la atmósfera si no se toman precauciones para eliminar el oxígeno y el nitrógeno.

Además de proporcionar un entorno protector, el tipo de gas y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre:

- Características eléctricas del arco
- Modo de transferencia del metal
- Penetración y perfil de la soldadura
- Velocidad de soldadura
- Tendencia al socavamiento
- Acción limpiadora
- Propiedades mecánicas del metal de soldadura

La selección correcta del gas de protección para una determinada aplicación es crítica para la calidad de la soldadura. El criterio utilizado para hacer la selección incluye:

- Aleación del alambre
- Propiedades mecánicas deseadas del depósito
- Espesor del material y diseño de la junta
- Condición del material, si tiene recubrimiento, óxido o aceite
- El modo de transferencia de metal
- Perfil de penetración deseado
- Posición de la soldadura
- Condiciones de ensamble

- Apariencia final del cordón deseada
- Costos

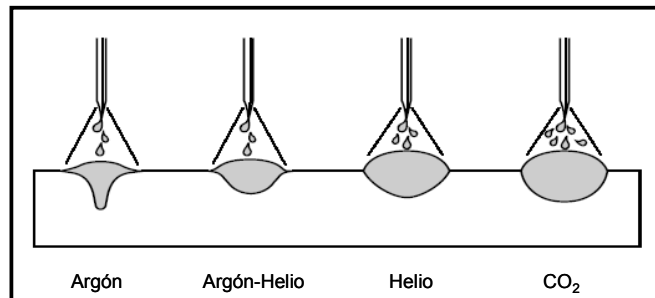
Bajo el efecto del calor del arco, los gases de protección responden de diferentes formas. El flujo de corriente en el arco y la magnitud tienen un gran efecto en el comportamiento de las gotas de metal fundido. Existen tres criterios básicos útiles para comprender las propiedades de los gases.

- Potencial de ionización de los componentes del gas
- Conductividad térmica de los componentes del gas
- Reactividad química del gas de protección con el metal fundido

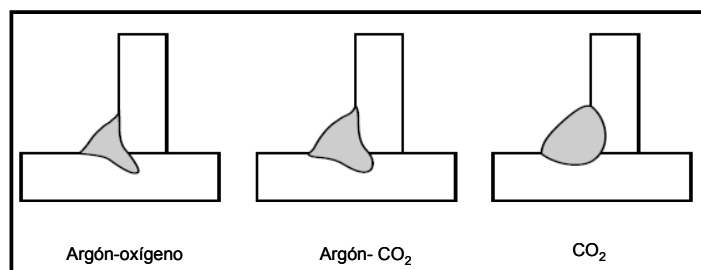
Por lo anterior, es importante detallar la física del arco asociado con algunos gases de protección específicos, que permita la selección del mejor gas de protección para la aplicación. El argón y el helio son dos gases inertes utilizados para la protección del charco de soldadura, el ser inertes significa que químicamente no reaccionan con el metal fundido, sin embargo, en cierto orden llegan a ser conductivos y ese gas en el plasma es ionizado. Gases distintos requieren diferente energía para ionizarse y esto se mide en términos de energía de ionización. Para el argón, la energía de ionización es de 15 eV, el helio tiene una energía de ionización de 24.5 eV. Por lo tanto, el argón es más fácil de ionizar que el helio, por esa razón el argón facilita más el inicio del arco que el helio.

La conductividad térmica o capacidad del gas para transferir energía térmica, es la consideración más importante para seleccionar el gas de protección. Niveles altos de conductividad térmica resulta en más conducción de energía térmica a la pieza de trabajo. La conductividad térmica también afecta la forma del arco y la distribución de la temperatura en la región. El argón tiene mas baja conductividad térmica, alrededor del 10 % del nivel del helio e hidrogeno. La alta conductividad térmica del helio provee un patrón de penetración ancho y reducirá la profundidad. Las mezclas de gas con un porcentaje alto de argón dan como resultado una penetración con un perfil llamado de "dedo"

proyectado hacia el material base. Esto es debido a la baja conductividad térmica del argón. La figura 4.6 y 4.7 muestran el perfil del cordón de soldadura para diferentes tipos de gases.



**Figura 4.6.** Contorno del cordón y patrón de penetración para diferentes gases de protección.



**Figura 4.7.** Efecto de la adición de oxígeno vs. CO<sub>2</sub> al argón de protección.

A continuación se mencionan algunos gases y mezclas utilizados en el proceso GMAW y su efecto en la soldadura [5].

**A) Argón:** Es más pesado que el aire, químicamente inerte, incoloro y sin olor como gas y líquido, constituye poco menos del uno por ciento de la tierra en la atmósfera. Promueve la buena apertura de arco debido a su bajo potencial de ionización, haciendo de éste un ideal escudo contra la contaminación en una serie de actividades industriales y procesos de soldadura. El argón es el gas de protección inerte más común. Comparado con el helio la conductividad térmica es baja. La energía requerida para dejar un electrón y la energía de ionización son bajas y esto resulta en un perfil de penetración de "dedo". El proceso GMAW puede utilizar argón o mezclas de argón para lograr una buena soldabilidad, en donde se requieren buenas propiedades mecánicas, arco

estable y la mejora de productividad. El bajo potencial de ionización del argón crea una excelente trayectoria en el arco y buena estabilidad. El argón produce una estrecha columna de arco con alta densidad de corriente, lo cual provoca que la energía del arco se concentre sobre una pequeña superficie. El resultado es una profundidad de fusión con un perfil característico. El argón se utiliza para materiales base no ferrosos como el aluminio, níquel, cobre, magnesio y sus aleaciones, así como para metales reactivos como el circonio y titanio. El argón y las mezclas de argón seleccionados proporcionan transferencia de rociado con una excelente estabilidad del arco de soldadura, penetración y perfil del cordón. Cuando se sueldan metales ferrosos, el argón es generalmente mezclado con otros gases, como el oxígeno, helio y dióxido de carbono.

**Hidrógeno:** Este es el elemento más ligero, químicamente activo, su alta conductividad térmica hace que sus mezclas sean útiles en determinados procesos de soldadura.

**Dióxido de carbono:** El CO<sub>2</sub> es más pesado que el aire, es un gas incoloro que presenta un olor ligeramente picante, químicamente activo. La mayoría de los gases reactivos no pueden ser utilizados en forma pura para protección; el CO<sub>2</sub> es una excepción. Es utilizado ampliamente como gas independiente, o como componente de mezclas de gases. El CO<sub>2</sub> no puede ser usado para la transferencia de rociado en GMAW. Se utiliza sólo para corto circuito o transferencia globular. En presencia de un intenso calor como un arco de soldadura, se disocia en monóxido de carbono y oxígeno libre y se vuelve activo. Esto se muestra por la siguiente ecuación:



El oxígeno libre, que está disponible en cantidades considerables, reacciona con otros elementos. El CO<sub>2</sub> es un gas activo y produce un efecto oxidante, a menudo se utiliza en la soldadura de acero al carbono. Su popularidad es común debido a la disponibilidad, bajo costo y rendimiento.



La ventaja del  $\text{CO}_2$  es su mayor ancho en la fusión en comparación con el argón. La principal desventaja del  $\text{CO}_2$  en transferencia globular es el exceso de salpicaduras que produce [19]. La soldadura depositada utilizando gas de protección  $\text{CO}_2$ , resulta generalmente muy oxidada. Un alambre de soldadura que tengan mayores cantidades de elementos desoxidantes puede ser utilizado para compensar el carácter reactivo de los gases. En general, se puede lograr con el  $\text{CO}_2$  buenas propiedades mecánicas.

### **Mezclas de gases binarias.**

**Argón -  $\text{CO}_2$ :** El argón -  $\text{CO}_2$  como mezcla se utiliza principalmente en aceros al carbono, baja aleación y aceros inoxidables. El  $\text{CO}_2$  con adiciones de argón permite el aumento de velocidad del avance con mayor penetración. Si aumenta la cantidad de  $\text{CO}_2$  tendrá como resultado un aumento en el nivel de salpicaduras y una disminución en la eficiencia de deposición. En GMAW se pueden realizar pequeñas adiciones de  $\text{CO}_2$ , a niveles altos de corriente teniendo cuidado de mantener estable la transferencia por rociado. Por arriba de 20% de  $\text{CO}_2$ , la transferencia por rociado se torna inestable y periódicamente ocurren transferencias de corto circuito y globular.

**Argón con 1 al 10%  $\text{CO}_2$ :** Estas mezclas se utilizan para la transferencia por rociado y corto circuito en varios materiales y espesores. Una mezcla de 5% de  $\text{CO}_2$  se puede utilizar en GMAW con una transferencia pulsada en aceros de baja aleación y en cualquier posición. Del 5 al 10 % de  $\text{CO}_2$  la columna de arco se reduce. La fuerza del arco que producen estas mezclas son mas tolerantes a las capa de óxido de la laminación haciendo mas controlable el charco de soldadura.

**Argón entre 11 a 20%  $\text{CO}_2$ :** Esta mezcla se utiliza en una gran variedad de aplicaciones en aceros al carbono y baja aleación. En este rango de composición de la mezcla se puede alcanzar la máxima productividad cuando se sueldan metales base de espesor delgado. Con esta mezcla disminuye el exceso de penetración incrementando las velocidades de depósito y avance. A

porcentajes bajos de CO<sub>2</sub> también mejora la eficiencia del depósito ya que disminuye el chisporroteo.

**Argón con variaciones entra el 21% a 49% CO<sub>2</sub>:** Esta gama se utiliza comúnmente para GMAW con transferencia corto circuito en acero al carbono. Esta formulado para proporcionar una frecuencia óptima en la transferencia por corto circuito en los diámetros de alambre mas comunes. Estas mezclas se usan para aplicaciones en alta corriente, como en la soldadura de vigas de espesor considerable, proporciona una buena estabilidad del arco, control del charco de soldadura y buena apariencia del cordón.

**Argón con el 50% de CO<sub>2</sub>:** Esta mezcla se utiliza cuando se requiere alto calor de entrada y profundidad de fusión. Se recomienda para espesores de metal base por encima de 1/8 pulg (3.2 mm). Aumenta la profundidad de fusión en soldadura fuera de posición utilizando transferencia con corto circuito. Proporciona un buen mojado y forma del cordón sin excesiva fluidez, siendo una ventaja para la soldadura de tubería. En materiales delgados será mayor la tendencia al exceso de penetración. Cuando la soldadura es a altos niveles de corriente, la transferencia de metal es similar a la de cualquier mezcla de argón + CO<sub>2</sub>. Con la adición de argón hay una disminución en las salpicaduras.

**Argón con hidrógeno:** La adición de hidrógeno aumenta el calor de entrada, permitiendo mayor velocidad de avance, mayor profundidad de fusión, mejor acción de mojado y un perfil del cordón de soldadura más ancho [5, 10,19]. La mezcla de argón con hidrógeno proporciona una reducción de la atmósfera en el arco, eliminando el oxígeno de la zona de soldadura. Un mezcla típica argón-hidrógeno es del 95% de argón y el 5% de hidrógeno. Las mezclas de argón con hidrógeno se utilizan a menudo para soldar metales como aceros inoxidable austeníticos, níquel y aleaciones de níquel. Las mezclas de Ar-H<sub>2</sub> no deben utilizarse para soldar aceros al carbono o baja aleación. Las mezclas con hidrógeno se utilizan principalmente en aleaciones de aceros con alto contenido de níquel. Los gases que contienen hidrógeno no deben utilizarse

con cobre y sus aleaciones. Ver tabla 1. La tabla 2 nos muestra la corriente de transición globular-rociado para distintos tipos de alambre.

**Tabla 2.** Corriente de transición globular-rociado para diferentes tipos de electrodos [7].

Tipo de electrodo	Diámetro del electrodo (pulg.)	Diámetro del electrodo (mm)	Gas de protección	Corriente de transición Transf. globular - rociado
Acero Inoxidable	0.035	0.9	99% Ar + 1% O <sub>2</sub>	150
	0.045	1.2	99% Ar + 1% O <sub>2</sub>	195
	0.062	1.6	99% Ar + 1% O <sub>2</sub>	265
	0.035	0.9	Ar + Helium + CO <sub>2</sub>	160
	0.045	1.2	Ar + Helium + CO <sub>2</sub>	205
	0.062	1.6	Ar + Helium + CO	280
	0.035	0.9	Ar + H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	145
	0.045	1.2	Ar + H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	185
	0.062	1.6	Ar + H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	255

En las tabla 3 se muestran los principales gases que se usan en la aplicación de GMAW, transferencia rociado. Casi todas las mezclas de gases inertes también pueden contener pequeñas cantidades de oxígeno ó CO<sub>2</sub>. En la tabla 4 se da una lista de los gases que se emplean para GMAW con transferencia con cortocircuito.

**Tabla 3.** Principales gases del proceso GMAW, transferencia rociado [7].

<b>Metal</b>	<b>Gas protector</b>	<b>Espesor</b>	<b>Ventajas</b>
Aluminio	100% argón	0 a 25 mm (0 a 1)	Transferencia de metal y estabilidad del arco; mínimo de salpicaduras
	35% argón-65% helio	25 a 76 mm (1 a 3)	Más alto aporte de calor que sólo con argón; mejores características de fusión con aleaciones Al-Mg de la serie 5XXX
	25% argón-75% helio	más de 76 mm (3 pulg)	Máximo aporte de calor, minimiza la porosidad.
Magnesio	100% argón	---	Excelente acción limpiadora.
Acero al carbono	95% argón+3.5% oxígeno	---	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco de soldadura más fluido y controlable; buena coalescencia y perfil de cordón; minimiza el socavado; Permite velocidades más altas que el argón puro.
	90% argón+8/10% dióxido de carbono	---	Se pueden usar altas velocidades en soldadura mecanizada; bajo costo en soldadura manual
Acero de baja aleación	98% argón - 2% oxígeno	---	Minimiza el socavado; proporciona buena tenacidad
Acero inoxidable	99% argón-1% oxígeno	---	Mejora la estabilidad del arco; buena coalescencia y perfil de cordón, minimiza el socavado en aceros inoxidables de espesor grande
	98% argón-2% oxígeno	Hasta 3.2 mm (1/8 pulg)	Ofrece mejor estabilidad del arco; coalescencia y velocidad de soldadura que la mezcla con 1% de oxígeno para piezas de acero inoxidable delgadas.
Níquel, cobre y sus aleaciones	100% argón	---	Ofrece buen mojado; reduce la fluidez del metal de soldadura.
	argón-helio	---	Mayor aporte de calor que con mezclas con 50 y 75% de helio, lo que compensa la elevada disipación de calor de los calibres más gruesos
Titanio	100% argón	---	. Buena estabilidad del arco; contaminación mínima de la soldadura; se requiere Respaldo con gas inerte para evitar la contaminación con aire de la parte de atrás del área de soldadura.

**Tabla 4.** Gases que se emplean en el GMAW con transferencia con corto circuito [7].

<b>Metal</b>	<b>Gas protector</b>	<b>Espesor</b>	<b>Ventajas</b>
Acero carbono	al 75% Ar +25% CO <sub>2</sub>	Menos de 3.2 mm (1/8 pulg)	Altas velocidades de soldadura sin perforación; mínimo de distorsión y salpicaduras.
	75% Ar+25% CO <sub>2</sub>	Más de 3.2 mm	Mínimo de salpicaduras, aspecto limpio de la soldadura, buen control del charco en las posiciones vertical y sobrecabeza.
	Argón con 5-10% de CO <sub>2</sub>	-	Penetración más profunda, más altas velocidad de soldadura.
Acero inoxidable	90% He +7.5% Ar	-	Ningún efecto sobre la resistencia a la corrosión, zona térmicamente ZAC pequeña, sin socavados, mínima distorsión.
	Argon+2.5% CO <sub>2</sub>	-	
Acero de baja aleación	60-70% He+25-.5% Ar+4.5% CO <sub>2</sub>	-	Reactividad mínima, excelente tenacidad, excelente estabilidad del arco, características de mojado y perfil de cordón, pocas salpicaduras.
	75% Ar+25% CO <sub>2</sub>	-	Buena tenacidad, excelente estabilidad del arco, características de mojado y perfil de cordón, pocas salpicaduras.
Aluminio, cobre, Magnesio, níquel y sus aleaciones	Ar y Ar + He	Más de 3.2 mm	El argón es satisfactorio para lámina, se prefiere argón-helio, para material grueso.

#### **4.2 Efecto de las variables de soldadura en el proceso GMAW [5,7]**

Como se menciona en el punto 4.1.2 anterior La calidad de una soldadura se ve afectada por las variables del proceso, a continuación se definen las más importantes y se analiza su efecto a considerar para el control del proceso de soldadura.

##### **A) Amperaje**

Es una medida de la cantidad de corriente que fluye entre el electrodo y la pieza de trabajo, es la variable primaria que determina el calor de entrada. Generalmente un incremento en el amperaje deriva en incrementos de velocidad de depósito, penetración y dilución (metal de aporte-metal base). El flujo del amperaje a través del circuito eléctrico es el mismo sin considerar

donde se mida. Normalmente se mide con un amperímetro de gancho. Para soldadura con una máquina de voltaje constante (CV), un incremento en la velocidad de alimentación del alambre incrementa directamente el amperaje.

### **B) Voltaje de arco**

Esta variable esta directamente relacionada con la longitud del arco. El voltaje incrementa cuando aumenta la longitud de arco, y por lo tanto la demanda o exigencia de mayor protección del arco. Para soldadura con Voltaje Constante (CV), como el GMAW, el voltaje es determinado o establecido primeramente en la máquina. El voltaje de arco también controla o influye en el ancho del cordón. El voltaje de arco tiene un efecto directo en el calor de entrada.

El voltaje en un circuito de soldadura no es constante, sufre una serie de caídas de voltaje. Considerando un ejemplo: suponiendo que una fuente de poder entrega en un sistema un voltaje de 40 volts. Entre la fuente de poder y la pistola hay una caída de voltaje de 3 volts, asociado con la resistencia del cable. Del punto donde se sujeta el cable de tierra a la terminal de tierra de la fuente de poder existe una caída de voltaje adicional, digamos de 7 volts. Restando los 3 y 7 volts del voltaje original, queda 30 volts para el arco. Este ejemplo, ilustra la importancia de asegurarse que el voltaje usado u obtenido sea el apropiado, cuando se realice un procedimiento de soldadura o una experimentación y podamos reconocer o identificar cualquier pérdida en el circuito de soldadura. El medio más seguro para determinar el voltaje de arco es midiendo la caída de voltaje entre la punta de contacto y la pieza de trabajo. Esto puede no ser práctico para procesos semiautomáticos, el voltaje típicamente se lee de un punto en el alimentador del alambre (donde esta la conexión de la pistola y el cable) a la pieza de trabajo.

### **C) Velocidad de avance**

Es la velocidad a la cual el electrodo es desplazado a través de la junta. Cuando todas las demás variables se mantienen constantes, la velocidad de avance tiene un efecto inverso en el tamaño del cordón de soldadura. Cuando la velocidad aumenta el tamaño del cordón disminuye. En algunos casos, una baja velocidad de avance puede resultar en una reducción de la penetración ya

que el arco afecta en el espesor de la capa de metal fundido a depositar y el charco de soldadura delante del arco.

Cuando se incrementa la velocidad de avance, la energía térmica por unidad de longitud de la soldadura transmitida al metal base desde el arco es al principio incrementada, debido a que el arco actúa más directamente sobre el metal base. A mayores incrementos en la velocidad de avance, menos energía térmica por unidad de longitud se transfiere al metal base. Por lo consiguiente, la fusión del metal base primero incrementa y después disminuye con el incremento de la velocidad de avance [20]. La velocidad de avance es otra variable clave que se utiliza en el cálculo del calor de entrada; si se reduce la velocidad de avance el calor de entrada aumenta.

#### **D) Velocidad de alambre**

Es una medida de la velocidad a la cual el electrodo pasa a través de la pistola y es alimentado al arco. La velocidad de alimentación es directamente proporcional a la velocidad de alimentación del alambre y esta directamente relacionada al amperaje. Cuando las otras variables se mantienen constantes (por ejemplo el mismo tipo de electrodo, el diámetro, voltaje de arco y extensión del electrodo) un incremento en la velocidad de alimentación del alambre conducirá aun incremento en el amperaje. A velocidades de alimentación más lentas, la relación velocidad de alimentación del alambre-amperaje es relativamente constante y lineal. Para altas velocidades de alimentación esta relación puede incrementar, resultando en una velocidad de alimentación alta por Ampere, pero a expensas de la penetración.

La velocidad de alimentación es el método preferido para mantener o registrar en el procedimiento de soldadura, para procesos de alimentación de alambre de voltaje constante. La velocidad de alambre puede ajustarse independientemente y ser medida directamente a diferencia de otras condiciones de soldadura. Es posible utilizar el amperaje como una alternativa, ya que el amperaje resultante a través de la velocidad de alimentación del alambre puede variar dependiendo de la polaridad, diámetro, tipo y extensión del electrodo.

**E) Extensión del electrodo**

También conocido como Electrical Stickout (ESO), es la distancia desde la punta de contacto al extremo del electrodo. Esto aplica solamente en procesos de alimentación del alambre. Cuando se incrementa en un sistema de voltaje constante, la resistencia eléctrica del electrodo aumenta, causando que el electrodo se caliente. A esto se le conoce como calentamiento por resistencia. Cuando la cantidad de calor se incrementa, la energía de arco requerida para fundir el electrodo disminuye. Se puede utilizar extensión del electrodo más grande para elevar la depositación a cierto amperaje dado. Cuando la extensión del electrodo se incrementa sin cambio en la velocidad del alambre, el amperaje disminuye, esto resulta en baja penetración. Cuando se incrementa el ESO, es común incrementar el voltaje establecido en la máquina para compensar la caída de voltaje a través del electrodo.

En un sistema de voltaje constante, es posible incrementar ambos el ESO y la velocidad de alimentación del alambre de manera balanceada de forma que la corriente permanezca constante. Cuando esto sucede se logra mayor velocidad de depósito. Otras variables de soldadura tales como el voltaje y velocidad del alambre se deben de ajustar para mantener el arco estable y asegurar la calidad de la soldadura. El ESO debe estar siempre dentro del rango recomendado por el fabricante del alambre.

**F) Diámetro del electrodo**

A mayor diámetro se requiere mayor corriente. Para amperaje fijo, sin embargo, electrodos mas pequeños puede resultar en mayor velocidad de depósito. Esto se debe al efecto de la densidad de corriente que se discute mas abajo.

**G) Polaridad**

Es una definición de la dirección del flujo de la corriente, la polaridad positiva (inversa) se logra cuando el cable del electrodo es conectado a la terminal positiva de la fuente de poder de corriente directa (DC) y el cable de tierra se conecta a la terminal negativa. La polaridad negativa (directa) ocurre cuando el electrodo se conecta a la terminal negativa y la tierra a la terminal positiva. La



corriente alterna (AC) no tiene polaridad, pero es un tipo de corriente. Con la AC el electrodo se alterna al positivo y negativo. Para amperaje fijo es posible utilizar mayor velocidad de alimentación del alambre y mayor depósito con polaridad negativa que con positiva. La AC exhibe una mezcla de ambas características de polaridad negativa y positiva.

El campo magnético que circunda cualquier conductor de DC puede causar un fenómeno conocido como soplo de arco, donde el arco es físicamente desviado por el campo. La resistencia del campo magnético es proporcional al cuadrado del valor de la corriente, siendo esto un problema potencial muy significativo en corrientes altas. La AC es menos propensa al soplo de arco y puede usarse algunas veces para sobrellevar este fenómeno.

#### **H) Calor de entrada (Heat input)**

El calor de entrada es proporcional al amperaje de soldadura por el voltaje de arco dividido por la velocidad de avance. Relaciones altas de calor de entrada produce mayor área de sección transversal de soldadura mayor y zona afectada por el calor (ZAC) más grande, lo cual puede afectar negativamente las propiedades mecánicas en la ZAC. Un calor de entrada elevado generalmente resulta en una disminución ligera de la cedencia, resistencia a la tensión en el metal depositado y baja la tenacidad debido a la interacción del tamaño del cordón y el calor de entrada..

#### **I) Densidad de corriente**

Se determina por la división del amperaje entre el área de la sección transversal del electrodo, para electrodos sólidos, la densidad de corriente ( $\partial$ ) es proporcional  $I/d^2$ . Donde, I es la corriente y d el diámetro del electrodo.

Para electrodos tubulares la densidad de corriente es relativa a la sección del área metálica. Cuando la densidad de corriente aumenta incrementará la velocidad de depósito, así como la penetración. Nótese que esta puede lograrse incrementando el amperaje y disminuyendo el diámetro del electrodo. Debido a que el diámetro del electrodo esta en una función cuadrada un

pequeño decremento en el diámetro puede tener un efecto significativo en la velocidad de depositación y en la penetración.

#### **J) Pre calentamiento y temperatura de interpasos**

Se utilizan para controlar la tendencia al agrietamiento de ciertos materiales base. Respecto a las propiedades del metal depositado, para la mayoría de los sistemas Carbono-manganeso-silicio, una temperatura entre pases moderada proporciona buena tenacidad. El pre calentamiento y la temperatura entre pases mayor a 288 °C puede afectar negativamente la tenacidad. Cuando el metal base recibe poco o ningún pre calentamiento, resulta en un rápido enfriamiento que puede deteriorar las propiedades de impacto. Por lo tanto es crítico controlar la temperatura de pre calentamiento y entre pases.

#### **K) Tratamiento térmico posterior a la soldadura**

El tratamiento térmico post soldadura (PWHT por sus siglas en ingles) normalmente se considera necesario para soldaduras de acero, de espesores gruesos (mayores a 20 mm) con el objeto de reducir el alto nivel esfuerzos residuales, mejorar la tenacidad y la tolerancia a defectos en la unión. Los códigos de fabricación normalmente ofrecen una guía en cuanto a tiempo y temperatura para el PWHT. La temperatura máxima está relacionada con la composición química del acero, el tiempo de permanencia (a la temperatura máxima) depende del espesor del material, la velocidad de enfriamiento se relaciona con el tratamiento en particular y al código o estándar de referencia. La velocidad de calentamiento normalmente esta dentro de los rangos de 149 a 177 °C (300 a 350 °F) por hora. El mantenimiento de la temperatura normalmente es de 2.4 min/mm (1 hora por pulgada) del espesor máximo y debe ser uniforme en todo el componente. La velocidad de enfriamiento también esta dentro del mismo rango 149 a 177 °C (300 a 350 °F) por hora. En algunos casos la velocidad de enfriamiento se puede incrementar cuando la pieza ha sido enfriada a temperaturas de 260 a 316 °C (500 a 600 °F). Lógicamente los parámetros establecidos para el tratamiento posterior a la soldadura para cada pieza se deben seguir explícitamente.

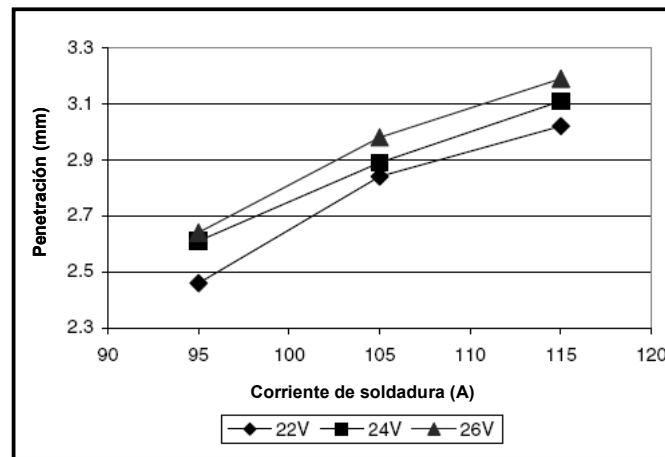
### **4.3 Estudio del efecto de los parámetros del proceso GMAW en la penetración.**

A continuación se estudia el comportamiento de dichas variables sobre la penetración. Analizando el estudio presentado por Karademiz [3] se aprecia el enfoque del efecto en el proceso GMAW, podemos analizar un estudio realizado sobre el efecto de los parámetros de soldadura del proceso GMAW en la penetración en un acero Erdemir 6842. en dicho estudio se utilizaron variables corriente de soldadura, voltaje de arco y velocidad de avance. Se midió la penetración de cada espécimen después de haber sido soldado. Se utilizaron para la experimentación tres valores de corriente, 95, 105 y 115 A, voltajes de 22, 24 y 26 V y velocidad de avance de 40, 60 y 80 cm/min. Como resultado de este estudio fue que el incremento en la corriente aumenta la profundidad de penetración, el voltaje es otro parámetro involucrado con la penetración, sin embargo su efecto, no es tan considerable como el de la corriente.

Una penetración adecuada por lo tanto, alta velocidad de calentamiento y un perfil de soldadura deseado, dan como resultado una soldadura de calidad. Estos factores son afectados por la corriente, voltaje, velocidad de alambre y el gas de protección. La intensidad de corriente de soldadura tiene el mayor efecto en la capacidad de fusión, tamaño, geometría y profundidad de penetración [3].

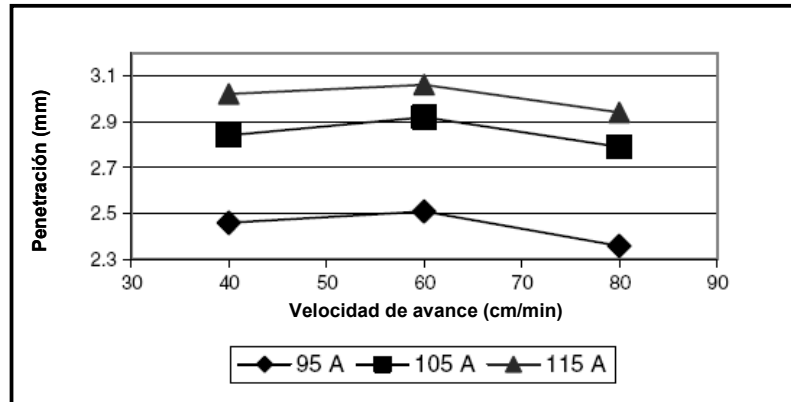
Cuando todos los parámetros permanecen constantes, el área del cordón se expande con el incremento del voltaje; a relativamente bajas velocidades de avance, causa acumulación de metal depositado, un baño líquido mayor y baja penetración. Los valores más altos de penetración se obtienen a valores óptimos de velocidad de avance. En cuanto al gas de protección utilizado, el argón es el preferido en la industria, como mezcla de 15 a 25 % de CO<sub>2</sub>, ya que se obtiene mejor penetración, tamaño y geometría del cordón [5,18].

En este estudio [3] se empleó un acero Erdemir 6842, considerado bajo carbono, se utilizaron muestras de tamaños de 60 x 30 x 2.5 mm como metal base, este acero se utiliza en la fabricación de tubos a presión, se utilizó un aporte G3Si (SG2) de 1mm de diámetro. Los parámetros constantes durante el proceso fueron, espesor del metal base, 2.5 mm, diámetro de 1 mm, mezcla de gas de protección, 82% Ar – 18 %CO<sub>2</sub>, boquilla de 10 mm, extensión del electrodo 15 mm, velocidad de alimentación del alambre, 12 m/min, longitud de arco 3 mm y ángulo de la antorcha de 5°. Los parámetros variables fueron: corriente 95, 105 y 115 A, voltaje de arco 22, 24 y 26 V, la velocidad de 40, 60, y 80 cm/min. El efecto de la corriente sobre la penetración se muestra en la figura 4.8.



**Figura 4.8.** Diagrama penetración vs. corriente para una velocidad de avance de 40 cm/min [3].

Se observa el cambio en la profundidad de penetración cuando se incrementa la corriente, para valores de voltajes de 22, 24 y 26 V, el valor mayor alcanzado de penetración fue de 3.19 mm para 115 A, 26 V. la penetración menor obtenida fue 2.46 mm a 95 A y 22 V. El voltaje también incrementó la penetración en valores de 0.02 – 0.12 mm para 22-26 V respectivamente, sin embargo, su efecto no fue tan relevante como el de la corriente. En cuanto a la velocidad de avance la penetración incrementó en valores de 0.03 a 0.08 mm entre 40 y 60 cm/ min., este valor disminuye después de este punto como se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9.** Diagrama penetración vs. velocidad de avance para una velocidad de avance de 40 cm/min [3]

#### 4.4 Transferencia de calor en una soldadura.

Durante la soldadura por fusión la interacción entre el metal base y la fuente de calor lleva a un rápido calentamiento, fusión y a una vigorosa circulación de metal fundido. En el charco de soldadura, la circulación de este metal fundido, está controlada por la agitación, el gradiente de tensión superficial y por fuerzas electromagnéticas [17]. La transferencia de calor y el flujo del líquido resultantes afectan la distribución de temperaturas en el metal base, la forma y tamaño del charco, el proceso de solidificación, la velocidad de enfriamiento y las cinéticas de transformación en estado sólido en el metal de soldadura y zona afectada por el calor (ZAC).

La variación de la temperatura con el tiempo, a menudo denominada como ciclo térmico, afecta la evolución microestructural, las tensiones residuales y la magnitud de las distorsiones en la soldadura. En la superficie del charco de soldadura, la distribución de temperaturas influye en la pérdida de elementos de aleación por evaporación y en la absorción y desabsorción de hidrógeno y otros gases como oxígeno y nitrógeno, por lo que la composición, la microestructura y propiedades resultantes del metal de soldadura se ven afectadas. En el interior del metal de soldadura, las inclusiones no metálicas crecen o se disuelven dependiendo de la temperatura. La predicción y el control tanto de las temperaturas, las velocidades de circulación del fluido en el

charco y las velocidades de enfriamiento, son esenciales para asegurar la calidad de la soldadura, con la geometría de la zona de fusión deseada, la composición química y la microestructura, así como también bajas tensiones residuales y distorsiones [9].

Dado que la medición de las temperaturas superficiales, dentro de charco líquido o en las zonas que se mantienen en estado sólido es difícil, además de costoso y complejo, un recurso muy utilizado es el uso de métodos de modelación numérica que permitan aportar información de la transferencia de calor durante la soldadura por fusión.

En toda soldadura sólo una fracción de la energía disipada por la fuente de calor es realmente absorbida por el metal base. La eficiencia del arco es un parámetro importante para la medición de la eficiencia de la transferencia de calor durante los procesos de soldadura por arco eléctrico [2].

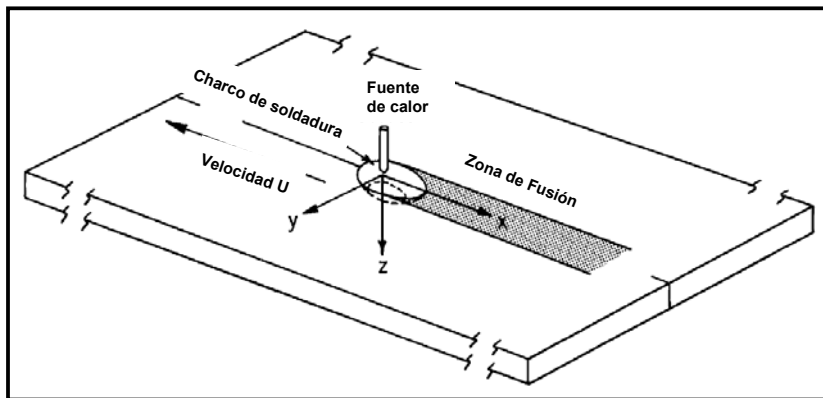
En el charco de soldadura, el calor es transportado por convección y conducción. Debido a la complejidad del fenómeno de flujo de calor convectivo, usualmente los cálculos para transferencia de calor en soldadura se limitan a la aplicación de transferencia de calor por conducción. Sin embargo, este tipo de cálculos representa una aproximación simple y útil al problema de transferencia de calor en soldadura por fusión [14].

A partir del proceso de transferencia de calor desde el arco de soldadura a la pieza y dentro de la misma pieza se determinan parámetros importantes como la temperatura máxima o pico, el tamaño y velocidad de enfriamiento del metal de soldadura y de la zona afectada por el calor.

#### **4.4.1 Análisis del flujo de calor en la soldadura.**

En la figura 4.10 se muestra un esquema de una soldadura en una pieza de trabajo [11]. El origen del sistema de coordenadas se mueve junto con la fuente de calor a una velocidad constante en dirección de  $x$ , excepto en el tránsito

inicial y final de la soldadura, el flujo de calor en la pieza de trabajo de una longitud suficiente es estable o casi estacionario, con respecto al movimiento de la fuente de calor. En otras palabras, para un movimiento notable de la fuente de calor, la distribución de la temperatura y la geometría del charco no cambian con el tiempo. La suposición de este estado-estable fue utilizada primero por Rosenthal para simplificar matemáticamente el flujo de calor durante la soldadura [11].



**Figura 4.10.** Sistema de coordenadas (x,y,z) del movimiento con la fuente de calor [11].

Rosenthal utilizó las siguientes suposiciones simplificadas para derivar ecuaciones analíticas para el flujo de calor durante la soldadura:

1. Flujo de calor estado-estable
2. Punto de la fuente de calor
3. Calor de fusión despreciable
4. Propiedades térmicas constantes, y finalmente
5. No existe pérdida de calor de la superficie de la pieza de trabajo y
6. No hay convección en el charco de soldadura

#### 4.4.2 Velocidad de enfriamiento

Cuando se hace una soldadura ocurren cambios de temperatura, dimensiones, crecimiento de cristales, granos y transformación de fases. El tipo de proceso de soldadura determina, en general, la forma en la que estos sucederán.

La velocidad de enfriamiento es de importancia fundamental y está controlada por el proceso, procedimiento, metal base, material de aporte y masa. El ritmo de cambio disminuye a medida que es mayor la distancia desde el centro de la soldadura. Es obvio que fluctúa considerablemente la velocidad de enfriamiento, y que resultarán distintas microestructuras.

Conforme el metal de la soldadura se solidifica, los cristales forman granos, los cuales se enfrían rápidamente hasta que ya no haya metal líquido. La velocidad de enfriamiento es mucho más rápida de lo que sucede en una pieza fundida o lingote, y por consiguiente, el equilibrio, tal como se representa en el diagrama de hierro-carbono, realmente no se efectúa.

A medida que el metal de la soldadura se deposita sobre el metal base parte de este se funde y se mezcla con el metal de la soldadura, produciendo la dilución de este último. A menos de que la composición del metal de aporte depositado y la composición del metal base sean idénticas, habrá una variación de la composición del metal en la interfase entre la soldadura y el metal base, tal y como sucede en la soldadura del acero al carbono ASTM A-27 utilizando un material de aporte de acero inoxidable ER 312.

Como se mencionó las variaciones tanto en la composición como en las velocidades de enfriamiento dan lugar a cambios en la microestructura. Esta es la razón por la cual la microestructura de la soldadura es importante y debe analizarse.

El área entre la superficie de separación del metal de soldadura depositado, y que se extiende hasta el metal base lo suficientemente lejos como para que ocurran cambios de fase, se conoce como zona afectada por el calor (ZAC), aunque es parte del metal base, se considera una porción de la unión de la soldadura. La zona afectada por el calor y la zona de mezclado son las más críticas en muchas soldaduras. Otro problema de la soldadura es la



segregación durante el ciclo térmico. La segregación se relaciona con la solubilidad de los elementos de los metales particularmente aleaciones.

El carbono, el fósforo, el azufre y algunas veces el manganeso se encuentra a menudo en estado segregado en el acero. El metal fundido tiene una capacidad relativamente alta para disolver los gases que están en contacto con él. El gas es rechazado a medida que los cristales se solidifican, pero pueden verse atrapados debido a una solidificación casi instantánea. Los gases atrapados provocan bolsas de gas y porosidad en la soldadura.

#### **4.5 Reacciones gas-metal en soldadura**

Durante la soldadura, elementos como el hidrógeno, nitrógeno y oxígeno pueden disolverse en el metal depositado y formar porosidad o combinarse con otros elementos de la aleación y formar inclusiones. En los aceros el hidrógeno produce agrietamiento, el nitrógeno aumenta el límite de fluencia y la resistencia a la tracción pero reduce la ductilidad, y el oxígeno promueve la formación de inclusiones. En la soldadura por arco eléctrico los consumibles pueden contribuir a la concentración de oxígeno e hidrógeno en el metal de soldadura. A continuación se analiza el comportamiento de algunos gases en la soldadura de arco.

##### **Oxígeno y CO<sub>2</sub>**

El oxígeno es introducido al metal líquido a altas temperaturas debido a tres fuentes principales. Por los óxidos presentes en el fundente que se disocian en el arco, por reacciones escoria metal en el metal líquido y por la atmósfera que rodea el ambiente del arco. Bajo estas condiciones el oxígeno reacciona directamente con los elementos de aleación en el charco de soldadura, promoviendo la desoxidación y modificando la templabilidad del metal de soldadura.

Al estudiar la absorción de oxígeno (proceso GMAW) en hierro puro usando atmósferas de Ar-O<sub>2</sub> en una cámara cerrada [17] se observa que la cantidad de

oxígeno absorbido a menores presiones parciales de oxígeno es aproximadamente proporcional a  $p_{O_2}^{1/2}$ , mientras que para presiones parciales de oxígeno mayores se vuelve constante a 0.23% algo por debajo del valor de equilibrio a 1 atm. de presión de oxígeno. A bajas presiones parciales de oxígeno el contenido disuelto en el metal líquido disminuye con el aumento de la corriente [17].

Ensayos similares con  $CO_2$  muestran un aumento tanto en el contenido de carbono como en el de oxígeno con la presión parcial  $CO_2$ . Para ambos elementos la velocidad de aumento es menor a mayores niveles de corriente. Muchas son las reacciones posibles entre el Fe y el  $CO_2$ , pero probablemente las que gobiernen el equilibrio sean las Ec. 4.2 y Ec. 4.3.



Siendo la constante de equilibrio K de esta última reacción la que expresa la Ec. 4.4.

$$K = p_{CO} / a_{[C]_D} a_{[O]_D} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Asumiendo que el coeficiente de actividad para cada caso es 1, entonces para una presión de CO de 1 atm., se tiene la Ec. 4.5.

$$[C]_D + [O]_D = 1/K \quad \text{Ec. 4.5}$$

Y expresando las concentraciones en porcentaje en peso (wt%) se tiene la Ec. 4.6.

$$\text{Log } K = 1160/T + 2 \quad \text{Ec. 4.6}$$

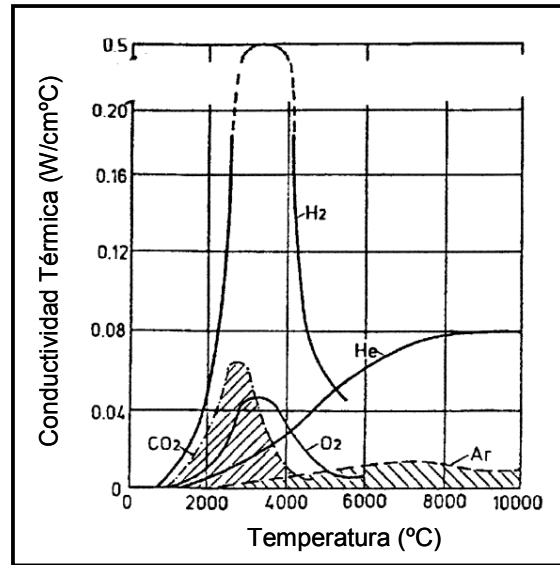
Es conveniente hacer notar que estas expresiones no son representativas de la soldadura real con  $CO_2$  dado que los alambres utilizados en GMAW contienen elementos desoxidantes. El contenido de oxígeno en la soldadura real será menor mientras que el contenido de carbono mayor.

El oxígeno puede ser disuelto en el metal líquido desde la atmósfera del arco o a partir de reacciones metal-escoria. En los casos donde la soldadura se realiza con una atmósfera con bajo potencial de oxidación el factor que controla el contenido de oxígeno disuelto en el metal de soldadura son las reacciones metal-escoria. El oxígeno en la atmósfera del arco afecta las propiedades del metal de soldadura en tres formas: a través de la formación de inclusiones no metálicas, por oxidación de los elementos de aleación y causando porosidad por CO.

Los óxidos precipitan en el metal líquido cuando este se enfría y aparecen en el metal de soldadura como inclusiones esféricas. Estas inclusiones están compuestas de óxidos de Si, Mn y cualquier otro desoxidante que esté presente, junto con sulfuro de manganeso. Los diámetros pueden ir desde 0.05 micrones hasta máximos que pueden alcanzar los 10 micrones, mientras que la fracción en volumen puede llegar hasta un 1%. En general al aumentar la corriente de soldadura aumenta el diámetro de las inclusiones no metálicas [12]. En los procesos que utilizan electrodos consumibles, la oxidación de los elementos de aleación tiene lugar en las gotas que se forman en la punta del electrodo y que se transfieren a través del arco. En general hay poca reacción en el charco soldadura. El Mn y el Si en general son utilizados como desoxidantes en la soldadura por arco eléctrico de aceros al carbono. El manganeso se pierde tanto por oxidación como por evaporación, mientras que el silicio solo se pierde por oxidación.

#### **4.6 Efecto del Hidrógeno presente en la mezcla de gas de protección.**

La mezcla de argón –hidrógeno se utiliza ampliamente en la soldadura por arco de plasma y últimamente ha incrementado su uso como gas de protección para soldar aceros inoxidable austeníticos, ferríticos y martensíticos [10]. El porcentaje recomendado en la mezcla es del rango de 0.5-5%.



**Figura 4.11.** Conductividad térmica de algunos gases en función de la temperatura [10].

Las propiedades físico químicas de cada uno de los gases es muy diferente, por ejemplo la conductividad térmica, la cual se muestra en la figura 4.11. El diagrama muestra que la conductividad térmica del hidrógeno en el rango de temperaturas 3000 y 4500 K es casi diez veces mayor que la del argón. Este rango de temperaturas es el que prevalece en la soldadura de arco. La conductividad térmica afecta directamente el arco y por lo tanto al proceso como tal.

En la figura 4.12 se muestra la entalpía de cuatro diferentes gases, la entalpía del hidrógeno gaseoso es mayor a la del argón en casi todo el rango de temperaturas. La entalpía del gas de protección afecta la formación, forma del arco y la distribución de la temperatura en el arco también.

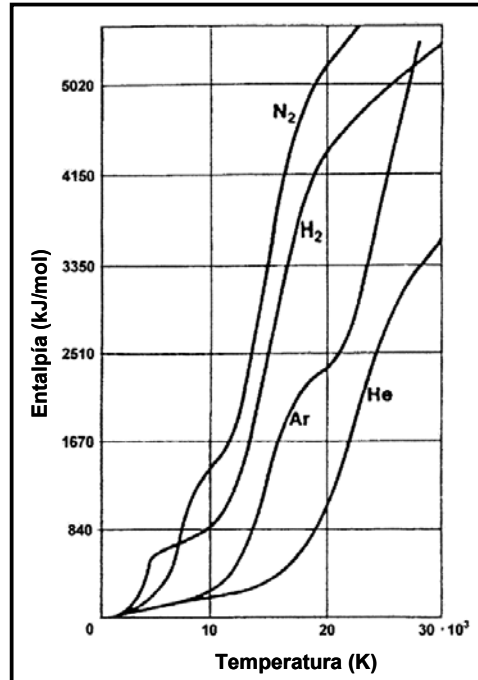
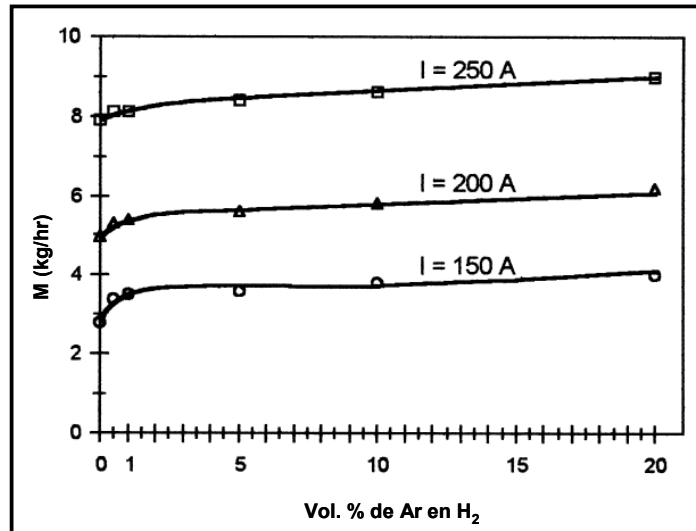


Figura 4.12. Entalpía del gas en función de la temperatura [10].

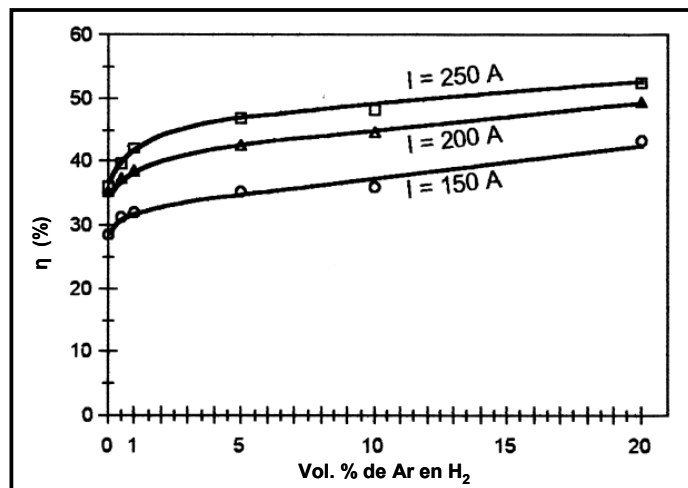
La adición de hidrógeno incrementa variación de voltaje en el arco, y consecuentemente la potencia del arco. Debido a la alta conductividad eléctrica del hidrógeno el arco es mas angosto y la concentración de energía es mayor, lo cual trae consigo una mayor penetración [18]. El hidrógeno como gas reductor impide la formación de óxidos en la superficie de la soldadura, consecuentemente se obtiene una buena apariencia. Sin embargo, la adición de hidrógeno en la atmósfera de protección trae algunas dificultades. El hidrógeno se solubiliza en el metal fundido en gran cantidad, por lo tanto cuando se suelda acero u otros metales puede producir gas atrapado y agrietamiento.

En un estudio del efecto del hidrógeno en argón en el gas de protección en el proceso de soldadura y forma del cordón [10], se analizó el efecto del hidrógeno sobre los parámetros de soldadura, velocidad de depositación, cantidad de metal base fundido y la eficiencia del proceso GMAW. La figura 4.13 muestra la influencia del hidrógeno en el argón sobre la cantidad de metal base y aporte fundidos.



**Figura 4.13.** Efecto del hidrógeno en argón sobre la cantidad de metal base y aporte fundido en proceso GMAW para un acero inoxidable austenítico ( $\varnothing$  del alambre de 1.2 mm, Vel de avance = 0.3 m/min, Longitud de arco = 16 mm, electrodo al positivo [10]).

Se puede establecer que cuando se incrementa el contenido de hidrógeno en el argón para protección la cantidad de material fundido aumenta. También en el proceso GMAW la resistencia eléctrica en el arco incrementa y consecuentemente la intensidad de la corriente disminuye. Sin embargo no se conoce el contenido óptimo de hidrógeno en argón. En la figura 4.14 se muestra el efecto del H<sub>2</sub> en el argón en la eficiencia de fusión para el proceso GMAW, se aprecia que la eficiencia aumenta cuando se adiciona hidrógeno al argón.



**Figura 4.14.** Efecto del hidrógeno en argón del gas de protección en la eficiencia de fusión en proceso GMAW para un acero inoxidable austenítico, electrodo al positivo [10].

#### 4.7 Solidificación.

De todas las transformaciones de fase una de las más ampliamente estudiadas es la transformación de líquido a sólido o solidificación. El proceso de solidificación es el mismo en todos los casos ya sea en un metal vaciado o en una soldadura que une dos sólidos.

Este proceso es controlado por la energía libre de la fase líquida,  $G_L$ , relativa a la del sólido,  $G_S$ . Esto se muestra en la figura 4.15 donde ilustra el comportamiento de un material puro (componente sencillo). Arriba de la temperatura de solidificación,  $T_f$ , la fase líquida tiene una energía libre baja y por lo tanto estable, es decir por debajo de  $T_f$  el sólido es una fase estable. A una temperatura  $T_f$  ambas fases están en equilibrio  $G_L = G_S$ .

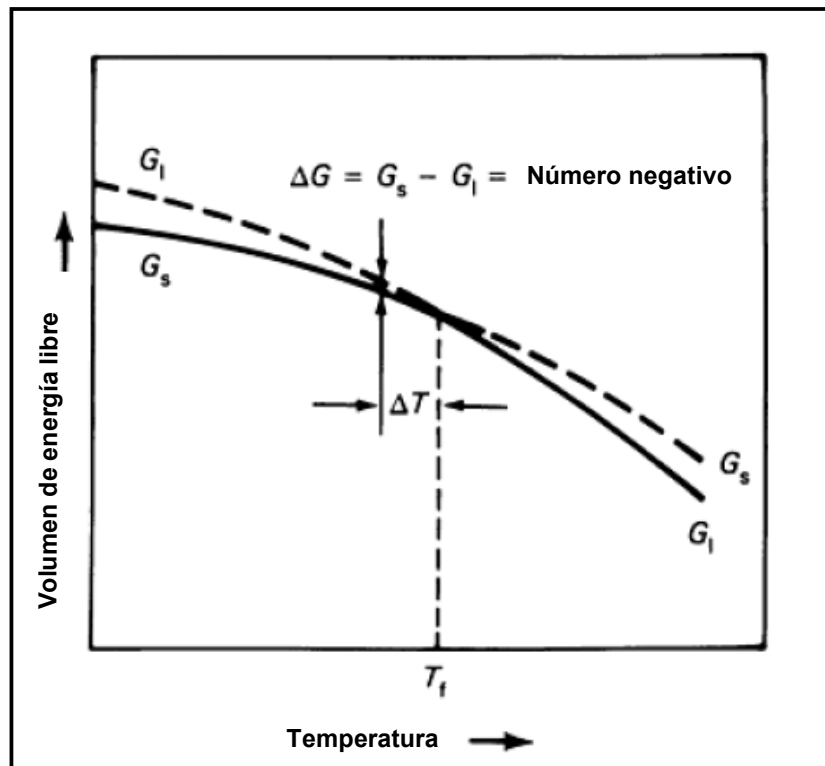


Figura 4.15. Efecto de la temperatura sobre la energía libre de Gibbs [9].

En la transición de una fase a otra, el cambio de energía libre,  $\Delta G$ , es la diferencia entre la energía libre del producto y el reactante. Este cambio de

energía libre puede ser expresado en términos de cambios de la entalpía y la entropía, es decir para la transformación de líquido a sólido durante la solidificación:

$$\begin{aligned}\Delta G &= G_S - G_L = (H_S - H_L) && \text{Ec. 4.6} \\ &- T(S_S - S_L) = \Delta H - T\Delta S\end{aligned}$$

A la temperatura de solidificación,  $T_f$ ,  $\Delta G = G_S - G_L = 0$ , debido a que la energía de las dos fases es la misma y  $\Delta H = T_f\Delta S$  este necesariamente por debajo de  $T_f$  para la solidificación, ya que  $T_f$  esta presente para ambas fases y en equilibrio. Por debajo de  $T_f$ ,  $\Delta G$  no es igual a cero (la figura 4.15 muestra que  $G_S < G_L$ ) y esta dado por la ecuación 4.6,  $T = T$ , donde  $T < T_f$ .

Debido a que  $\Delta H$  y  $\Delta S$  no son funciones que dependen fuertemente de la temperatura, estas pueden ser asumidas para una temperatura independiente. Por lo tanto a cualquier temperatura,  $\Delta H = \Delta H_f$  y  $\Delta S = \Delta S_f$ , donde  $\Delta H_f$  y  $\Delta S_f$  son los valores de cambio de entalpía y entropía para las reacciones de equilibrio a  $T_f$  (esto es, el calor latente de fusión y el cambio de entropía en la fusión respectivamente). Combinando estas expresiones de entalpía y entropía, el factor  $\Delta H = T_f\Delta S$ , y la ecuación 4.6 entonces a una  $T$ , se obtiene:

$$\Delta G = (\Delta H_f/T_f)(T_f - T) \quad \text{Ec. 4.7}$$

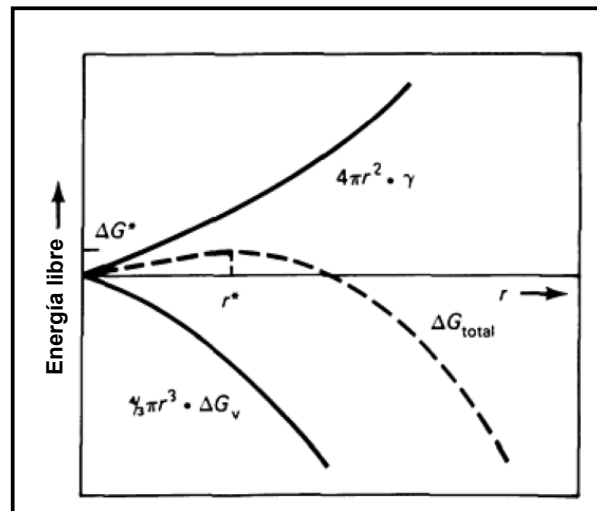
De acuerdo con la figura 4.16  $\Delta G$  es negativo. La cantidad mayor de sobreenfriamiento por debajo de  $T_f(T_f - T)$ , entonces serán mayores las fuerzas termodinámicas para la solidificación.

Sin embargo, cuando las condiciones de la ecuación 4.7 se cumplen, el líquido no se transforma espontáneamente a sólido debajo de  $T_f$ . más bien pequeñas cantidades de sólido nuclean y crecen para producir una solidificación completa. La nucleación crea una nueva superficie, la cual será la superficie entre el sólido y el líquido. La energía por unidad de esta superficie es la energía superficial,  $\gamma$ , la cual es siempre positiva. Para que la solidificación



ocurra, el incremento en la energía asociada junto con la energía de superficie debe estar balanceado por una mayor disminución en la energía libre del sólido relativa a la del líquido. Esto requiere un sobreenfriamiento como se muestra en la ecuación 4.7.

Existen tres maneras en las cuales un sólido puede formarse: nucleación homogénea, heterogénea y crecimiento epitaxial. La nucleación homogénea ocurre cuando no existe ningún cuerpo extraño (pared del molde, partícula sólida en el metal fundido, etc.) sobre la cual se forma el sólido. La figura 4.16 muestra el balance de la tensión superficial y la energía libre por unidad de volumen,  $\Delta G_V$ , como una función del tamaño del núcleo que se forma durante la nucleación homogénea. El valor de  $\Delta G_V$ , es justamente  $\Delta G$  (como se da en la ecuación 4.7) dividido por el volumen molar del sólido,  $V_S$ .



**Figura 4.16.** Formación de la energía libre de un núcleo en función de su radio [9].

Los fundamentos de solidificación de una soldadura son los mismos que en un vaciado, pero con diferentes condiciones límite, por ejemplo, en la soldadura el metal debe adherirse a una pieza y en un vaciado el metal no debe adherirse al molde. Otra diferencia sería que en la soldadura continuamente se aporta calor durante el avance y a un molde no, la temperatura del molde es relativamente uniforme. En contraste con un con un muy grande gradiente de temperatura desarrollado en la soldadura.

En una soldadura a medida que la fuente de calor interactúa con el material, la severidad del ciclo térmico que experimenta el material varía de zona en zona, pudiendo identificarse tres regiones principales en la soldadura. Estas son la zona de fusión, la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base (MB) no afectado por el calor. La zona de fusión es la que funde y posteriormente experimenta la solidificación. Dicha solidificación es influenciada por la composición química del sistema, por la geometría del charco de soldadura y por las condiciones térmicas. Adicionalmente existen otros factores que afectan la solidificación como la presencia de impurezas en el charco de soldadura, la existencia de una considerable turbulencia, un volumen de metal líquido pequeño respecto del metal base y la existencia de grandes gradientes de temperatura en el metal líquido. Además debido a que la fuente está en movimiento la solidificación es un proceso dinámico, que está relacionado con la velocidad de soldadura. Cuando se requiere precalentamiento los gradientes de temperatura se ven afectados.

Los parámetros básicos que controlan el proceso de solidificación son la velocidad de crecimiento ( $R$ ), el gradiente de temperaturas ( $G$ ) el sobreenfriamiento  $\Delta T$  y la composición de la aleación.

La velocidad de crecimiento o velocidad de solidificación es aquella con la que avanza la interfase sólido/líquido o frente de solidificación en el charco de soldadura.

Los gradientes de temperaturas en el sólido  $G_S$  y en el líquido  $G_L$ , en la interfase sólido/líquido, juegan un rol importante en la determinación de la subestructura de solidificación en la zona de fusión.  $G_L$  es el más crítico en la determinación de la morfología de la interfase sólido/líquido en una escala microscópica y es directamente proporcional al flujo de calor en la interfase mencionada. El gradiente térmico en el líquido  $G_L$  es fuertemente influenciado por la convección en el charco. El signo de  $G_L$  también es significativo. Bajo

condiciones de solidificación de charco normales  $G_L > 0$ , pero para líquidos térmicamente sobreenfriados  $G_L < 0$  [14].

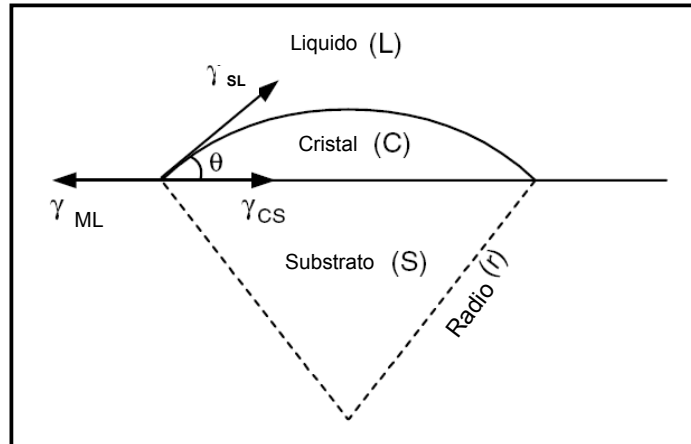
Este gradiente esta en función de las propiedades del material, del proceso de soldadura, de la posición y del calor aportado. En general el gradiente térmico aumenta a medida que la conductividad térmica del material disminuye. Para procesos de soldadura de arco eléctrico, al aumentar el calor aportado aumenta el tamaño del charco de soldadura.

El  $\Delta T$  en solidificación se refiere a la diferencia entre la temperatura líquida de equilibrio de la aleación de composición nominal y la temperatura real. Este es un parámetro crítico que controla la estructura de solidificación y la segregación. El sobreenfriamiento puede estar asociado con el proceso de nucleación de un sólido desde el líquido o con el crecimiento del sólido durante la solidificación. En muchos casos los depósitos de soldadura de aceros de baja aleación comienzan la solidificación con el crecimiento epitaxial de ferrita  $\alpha$  desde el grano parcialmente fundido del metal base en la línea de fusión.

La solidificación epitaxial es un proceso de nucleación heterogéneo. Un embrión sólido de metal de soldadura se forma sobre la superficie del grano del metal base fundido parcialmente. La forma del embrión depende de las energías superficiales del sistema,  $\gamma_{ML}$  (energía superficial metal base-líquido),  $\gamma_{SM}$  (energía superficial metal de soldadura sólido-metal base) y  $\gamma_{SL}$  (energía superficial metal de soldadura sólido-líquido). Asumiendo que  $\gamma_{SL}$  es isotrópico, se puede ver que para un volumen dado de embrión la energía interfacial de todo el sistema puede ser minimizada si tiene la forma de un casquete esférico. El ángulo que esta copa toma respecto de la interfase original se denomina ángulo de mojado  $\theta$ . El ángulo de mojado está controlado por el balance de fuerzas generado por las respectivas energías superficiales. En la figura 4.17 se puede ver un esquema de las fuerzas mencionadas y del ángulo de mojado.

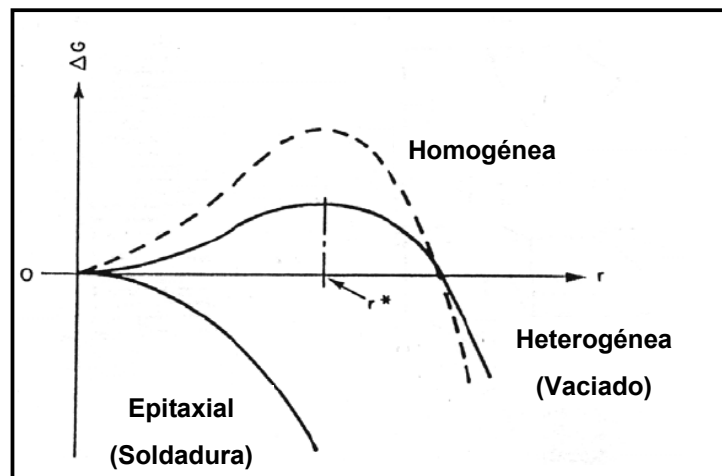
Ya que el metal de soldadura usualmente es muy similar al metal base y que la solidificación es epitaxial el ángulo de mojado es cero y las aproximaciones de las Ec. 4.8 son válidas.

$$\gamma_{SM} \approx 0 \quad \gamma_{ML} \approx \gamma_{SL} \quad \text{Ec. 4.8}$$

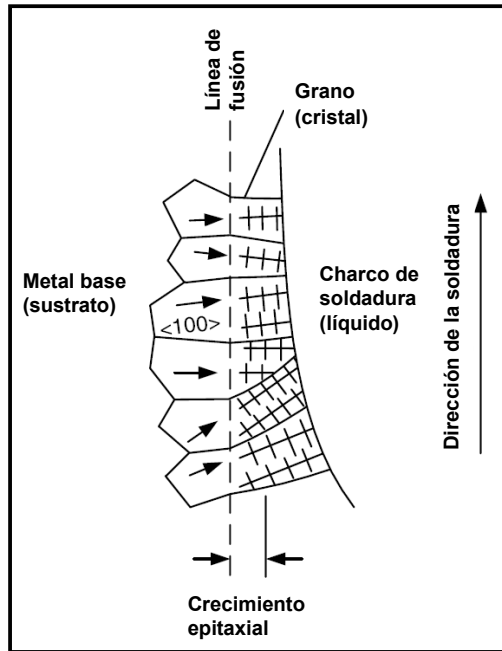


**Figura 4.17.** Esquema del crecimiento epitaxial, fuerzas de energía superficial y del ángulo de mojado [11]

Por lo tanto la barrera energética para la nucleación del metal de soldadura es despreciable, por lo que no se necesita sobreenfriamiento del líquido, y la solidificación ocurre uniformemente sobre todo el grano del metal base. En la figura 4.18 se puede ver un esquema del cambio de la energía libre ( $\Delta G$ ) en la nucleación homogénea, heterogénea y para el crecimiento epitaxial y en la figura 4.19 el crecimiento epitaxial en una soldadura en la línea de fusión



**Figura 4.18.** Energía libre en la nucleación homogénea, heterogénea y epitaxial [17]



**Figura 4.19.** Crecimiento epitaxial de una soldadura cercano a la línea de fusión [11]

#### 4.8 Aplicación de soldaduras disímiles en aceros inoxidable

La soldadura en metales disímiles se aplica frecuentemente en la unión de aceros inoxidable con otros materiales. Este tema es mas importante tocarse donde se requiere una transición en propiedades mecánicas durante el servicio. Por ejemplo, tubería de acero inoxidable austeníticos son casi siempre utilizadas para contener vapor a alta temperatura en plantas de generación de energía. Bajo cierta temperatura y presión, se utilizan los aceros al carbono o baja aleación y la transición de acero inoxidable es muchas veces utilizada por razones económicas ya que el acero al carbono y el baja aleación es mucho menos caro que el inoxidable.

El “cladding” (revestimiento resistente a la corrosión) es otra aplicación común de soldadura de materiales disímiles. Por ejemplo recipientes a presión grandes, son algunas veces revestidos con acero inoxidable para proveer protección contra la corrosión a bajo costo. A la tubería puede también internamente aplicársele “cladding” de acero inoxidable para una protección similar. La aplicación de este trabajo, es parecida al “cladding” que hacen referencia diferente literatura, ya que uno de los objetivos de recuperar con

soldadura de acero inoxidable es aumentar la vida útil del componente de acuerdo al servicio que va a realizar, el cual es precisamente en ambiente corrosivo.

En cualquier aplicación de soldadura en un material disímil es muy importante seleccionar el material de aporte adecuado para obtener una austenita estable y una pequeña cantidad de ferrita en el primer pase de soldadura. Obteniendo esta microestructura es poco probable que se presente agrietamiento durante la solidificación y el material sea lo suficientemente dúctil [13].

Los diagramas de Schaeffler y WRC-1992 se utilizan ampliamente para predecir una aproximación de microestructuras para soldaduras de materiales disímiles.

#### **4.8.1 Migración de carbono**

Existe la probabilidad de que ocurran gradientes significativos en la composición química del metal depositado, particularmente en las regiones adyacentes al metal base. Además la operación a temperaturas elevadas puede causar interdifusión entre el metal depositado y el metal base que cambiarían la microestructura. Una soldadura disímil de un acero al carbono baja aleación y acero inoxidable austenítico, con aporte de inoxidable austenítico ilustra ese problema [15]. El cromo en el acero tiene mayor afinidad por el carbono que el hierro. Cuando se suelda un acero al carbono o baja aleación con un material de aporte que contenga una cantidad significativa de cromo, el carbono podrá difundir del metal base hacia el metal depositado a temperaturas por arriba de 425° C (800° F). La velocidad de difusión esta en función de la temperatura y del tiempo de exposición, incrementando rápidamente por arriba de 595° C (1100° F). La migración de carbono puede tener lugar durante el tratamiento térmico posterior a la soldadura o a temperaturas de servicio elevadas. Los aceros austeníticos tienen mayor solubilidad por el carbono que los ferríticos. Por lo tanto, el empobrecimiento de carbono en un acero estructural o baja aleación es mayor cuando se utiliza un

aporte de acero inoxidable austenítico en lugar de un material de aporte de acero ferrítico. Por otra parte, la migración de átomos de carbono no es un problema serio cuando se utiliza material de aporte níquel-cromo-hierro.

Para el caso de los módulos de bomba estos no están en servicio a elevadas temperaturas, donde se podría presentar este fenómeno, es durante la soldadura y el tratamiento térmico posterior, para prevenirlo se utiliza un material de aporte como el ER 312 del cual mas adelante en el punto 4.10 se describen sus características.

#### **4.8.2 Zona de dilución.**

La dilución es la cantidad de metal de aporte, que se mezcla con el metal base durante la soldadura. Uno de los factores que influye en la integridad de la soldadura de materiales disímiles es precisamente este fenómeno. En este tipo de soldadura el metal de aporte debe alearse rápidamente con el metal base y producir una soldadura que contenga una matriz dúctil y continua, específicamente el metal de aporte debe ser capaz de aceptar la dilución de elementos aleantes provenientes del metal base, sin producir una microestructura susceptible al agrietamiento [13, 15]. La microestructura del metal depositado, debe ser estable para las condiciones de servicio esperadas.

El control de la dilución juega un papel importante en la parte económica en algunas aplicaciones de cladding (revestimiento resistente a la corrosión) o revestimientos duros. En cada proceso se tiene un factor de dilución esperado, experimentando con los parámetros de soldadura se puede disminuir la dilución, un valor optimo seria entre 10 y 15%. Menor a 10% aumenta la posibilidad de falta integridad de la adhesión, y mayor a 15 % aumenta el costo del metal de aporte. Desafortunadamente la mayoría de los procesos de soldadura proveen considerablemente una mayor dilución [15]. En el caso de los módulos de bomba de lodos se requiere una buena penetración y dilución ya que después de recuperar con soldadura la superficie, esta se le da un acabado mediante maquinado para dar las dimensiones finales.

Para controlar la dilución cada parámetro de soldadura deberá ser cuidadosamente evaluado, determinado y registrado, [15] estos parámetros incluyen:

- Amperaje. Incrementando este parámetro aumenta la dilución. El arco genera más calor y hay más penetración y por lo tanto, se funde mayor cantidad de metal base.
- Polaridad. La corriente directa electrodo al negativo produce menor penetración y resulta en menor dilución que la corriente directa electrodo al positivo. La corriente alterna genera una dilución intermedia entre las dos anteriores.
- Tamaño del electrodo. Para electrodos pequeños es menor el amperaje lo cual resulta en menor dilución.
- Extensión del electrodo. Una extensión del electrodo alta, disminuye la dilución. Una extensión del electrodo corta aumenta la dilución.
- Velocidad de avance. Disminuyendo la velocidad de avance sufre un decremento la cantidad de metal base fundido e incrementa proporcionalmente la cantidad de metal de aporte fundido, lo que deriva en una disminución de la dilución.
- Oscilación. a mayor oscilación menor dilución, la frecuencia de oscilación también afecta, a mayor frecuencia de oscilación la dilución baja.
- Posición. Dependiendo de esta, la gravedad causa que el charco de soldadura corra de frente, permanezca abajo o corra por atrás del arco. Si el charco permanece de frente o por debajo del arco hay menor penetración en el metal base y menor dilución. si el charco de soldadura esta muy retirado del frente del arco será insuficiente la fusión de la superficie del metal base y la coalescencia no ocurrirá.
- Protección del arco. El medio de protección gas o fundente también afecta la dilución, por ejemplo para el proceso GMAW la mezcla de gas que contienen  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ , como se menciona anteriormente en el punto 4.1.6, producen mayor penetración y por lo tanto mayor dilución.



Estas consideraciones deberán ser tomadas en cuenta para la elaboración de los procedimientos de soldadura.

#### 4.9 Especificación de acero ASTM A 27/A 27M

Esta especificación cubre aceros al carbono vaciados para aplicaciones generales que requieren arriba de 70 ksi [485 MPa] de resistencia a la tensión mínima. En la tabla 5 se muestran los diferentes grados o tipos de aceros ASTM A-27, de acuerdo a su composición química.

**Tabla 5.** Requerimientos de composición química para un acero ASTM A-27 [1] (porcentaje máximo o rango dado)

Grado (UNS No.) <sup>A</sup>	Composición %				
	Carbono <sup>B</sup> , max.	Manganeso <sup>B</sup> , max.	Silicio, max.	Azufre, max.	Fósforo, max.
Grado N-1	0.25	0.75	0.80	0.06	0.05
Grado N-2	0.35	0.60	0.80	0.06	0.05
Grado U-60-30	0.25	0.75	0.80	0.06	0.05
Grado 60-30	0.30	0.60	0.80	0.06	0.05
Grado 65-35	0.30	0.70	0.80	0.06	0.05
Grado 70-36	0.35	0.70	0.80	0.06	0.05
Grado 70-40	0.25	1.20	0.80	0.06	0.05

<sup>A</sup> Clase específica 1 o 2 en adición a la designación del grado (ver 9.2)

<sup>B</sup> para cada reducción de 0.01% de carbono abajo del máximo especificado, un incremento de 0.04% de manganeso arriba del máximo especificado deberá ser permitido para un máximo de 1.40 %, para el grado 70-40 [485-275]

#### 4.10 Material de aporte

Para la recuperación por soldadura de los módulos se utiliza material de aporte de acero inoxidable ER 312 debido al ambiente (lodos) en el que va a estar operando el equipo, además el material depositado debe tener buena maquinabilidad.

El material de aporte de acero inoxidable presenta la siguiente composición química nominal, tabla 6.

**Tabla 6.** Composición química del material de aporte propuesto [8]

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Ferrita</b>
0.1%	1.8%	0.45%	30%	9%	0.2%	0.2%	70 FN

Este material de aporte se utiliza para unir todo tipo de aceros de alta resistencia, para uniones de materiales disímiles tales como AISI 309, 320 o aceros AISI 1040 y 4140, así como herramientas y piezas de la industria en general sometidas a fricción, corrosión, impacto o calor, en componentes como abanicos, tuberías y chaquetas de hornos, puede usarse en todas posiciones.

El electrodo ER312 puede aplicarse en aceros con alto contenido del carbono. Por su alto contenido de ferrita, tiene mayor dilución cuando se suelda un metal base no inoxidable. En soldaduras de pases múltiples puede haber una baja dilución en el metal base, por eso tiene que existir un alto contenido de ferrita.

Este alto contenido de ferrita puede llegar a ser frágil a elevada temperatura para interfases a altas temperatura por un largo periodo de tiempo. Su alto contenido de cromo da una buena resistencia a la descamación por arriba de 1100°C (2000°F). El metal de aporte tipo ER312 provee un depósito de soldadura que contiene una gran cantidad de ferrita para prevenir el agrietamiento en caliente [9]. En las tablas 7 y 8 se muestran algunos parámetros para soldar el material de aporte ER 312.

**Tabla 7.** Parámetros para depósitos en transferencia rociado para un electrodo ER 312 [8]

Diámetro	Velocidad de alimentación del alambre	Amps	Volts	Velocidad de depósito
030 in, 0.8 mm	265-550 ipm, 673-1397 cm/min	160-210	24-28	6.5-9.6 lbs./hr., 2.95-4.35 kg./hr.
035 in, 0.9 mm	240-468 ipm, 610-1189 cm/min	170-255	24-30	1.7-12.7 lbs./hr., 3.54-5.76 kg./hr.
.045 in, 1.2 mm	192-360 ipm, 488-914 cm/min	200-300	24-30	6.8-13.6 lbs./hr., 3.08-6.17 kg./hr.
.062 in, 1.6 mm	120-192 ipm, 305-488 cm/min	215-325	24-32	7.3-14.5 lbs./hr., 3.31-6.58 kg./hr.

**Tabla 8.** Parámetros para depósitos en transferencia corto circuito para un electrodo ER 312 [8]

Diámetro	Velocidad de alimentación del alambre	Amps	Volts	Velocidad de depósito
030 in, 0.8 mm	156-312 ipm, 396-795 cm/min	40-120	15-20	1.4-3.8 lbs./hr., 0.64-1.72 kg./hr.
.035 in, 0.9 mm	156-312 ipm, 396-795 cm/min	60-140	15-21	1.6-5.4 lbs./hr., 0.73-2.45 kg./hr.
045 in, 1.2 mm	140-280 ipm, 356-711 cm/min	100-210	17-22	2.4-6.0 lbs./hr., 1.09-2.72 kg./hr.

#### 4.11 Diseño de experimentos

En la literatura se reporta el empleo de diseño de experimentos para llevar a cabo el estudio de las relaciones involucradas en los diferentes procesos de soldadura [4, 5, 6,7]. Uno de los más comunes es el llamado sistema central compuesto. Los diseños centrales compuestos se usan ampliamente para construir modelos de superficie de respuesta de segundo orden. En general el diseño central compuesto consta de un factorial  $2^k$ .

Hay dos parámetros en el diseño que deben especificarse: la distancia  $\alpha$  de las corridas axiales al centro del diseño y el número de puntos centrales [22]. es importante que el modelo de segundo orden proporcione buenas predicciones en toda la región de interés, es decir se requiere que el modelo tenga una

varianza razonablemente consistente y estable de la respuesta predicha en los puntos de interés.

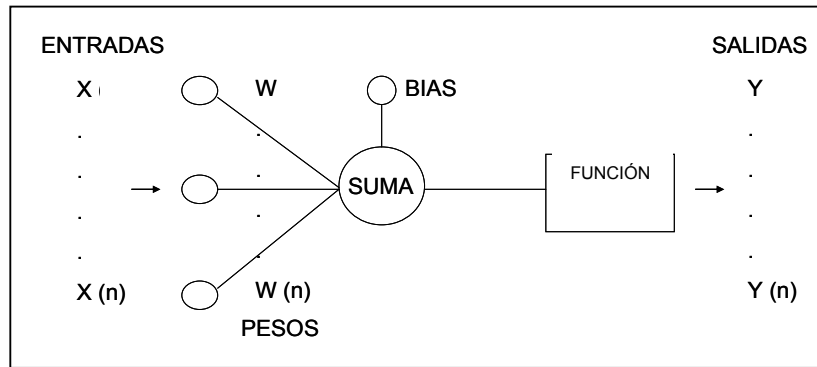
#### **4.12 Sistemas inteligentes**

Un sistema inteligente extrae conocimiento a partir de información usualmente generada en el proceso. El uso de un sistema inteligente implica una nueva concepción de un proceso como un sistema de entradas y salidas. Algunas perturbaciones y ruidos pueden afectar el desempeño del proceso usualmente detectados en las salidas [26].

##### **4.12.1 Redes Neuronales**

Una red neuronal es una interconexión de elementos de un proceso que representa la función de una neurona simple. La interconexión se realiza por una sinapsia artificial llamada peso. Los ajustes de esos pesos alternan el desempeño de la red neuronal. Las redes neuronales tienen la capacidad de aproximar funciones usando información a partir de fuentes históricas y experimentales [27].

Una red neuronal, esta compuesta por un vector de  $n$  entradas, con las cuales, la red trabajará, y una estructura de pesos sinápticos que se utilizan para disminuir o aumentar los valores de entrada, figura 6.20. Contiene un umbral o bias, los cuales se aplican para reducir la entrada a la función de activación, otro componente de una red es el operador matemático suma, donde se hace la operación suma de los componentes de señales de entrada, multiplicados por sus pesos respectivos [23]. Existe la función de activación o transferencia donde se define la salida de la neurona. Para el proceso de aprendizaje su funcionamiento es conocido como, algoritmo de aprendizaje, su objetivo es modificar los pesos con el objetivo de minimizar la función [23].



**Fig. 4.20.** Estructura de una red neuronal [24].

Este sistema posee varios grados de conectividad cuyo ajuste determina el desempeño de la red neuronal. Son capaces de procesar gran cantidad de información mediante modelos matemáticos [23]. Otro componente de una red es el operador matemático suma, donde se hace la operación de suma de los componentes de las señales de entrada multiplicados por sus respectivos pesos. Por último existe la función de activación o transferencia donde se define la salida de la neurona. Para el proceso de aprendizaje su funcionamiento es conocido como, algoritmo de aprendizaje y su objetivo es modificar los pesos que minimicen la función [25].

#### 4.12.2 Optimización

Esta metodología ha sido empleada por varios autores [28, 29 30]; basándose en el empleo de regresión lineal, redes neuronales y sistemas difusos para modelar un proceso. Los procedimientos de optimización involucran una investigación de las condiciones apropiadas para obtener el desempeño deseado en el proceso. Dicha investigación resulta compleja debido a los costos y riesgos involucrados por lo que es recomendable el empleo de modelos conformados por redes neuronales. Por otra parte en la literatura, se reporta [28, 29 30] el uso de redes neuronales para modelar geometrías de soldadura en términos de parámetros de equipo a partir de datos de valores de voltaje, corriente, velocidad del electrodo, velocidad de alimentación, entre otros. Los estudios concluyen que los modelos de redes neuronales son comparables con los esquemas tradicionales de modelación.

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1 Diseño de experimentos

Para determinar el efecto de las variables del proceso de soldadura en la penetración se planteó el diseño experimental de tipo central compuesto y se definieron cuatro variables, amperaje, voltaje, velocidad de avance y extensión del electrodo, en los rangos mostrados en la tabla 5. Dichos rangos fueron establecidos de acuerdo al tipo de alambre en base a la literatura disponible [7,8].

**Tabla 9.** Variables y rangos utilizados para el diseño experimental

<b>Variable</b>	<b>Rango</b>
Amperaje	240-260
Voltaje	26-30
Velocidad de avance	50-70
Extensión del electrodo	12.7-19.05

Se planteo una superficie de respuesta con un diseño central compuesto resultando 33 corridas, como se indica en la tabla 10.

Tabla 10. Diseño central compuesto.

Placa	Amperaje	Voltaje	Velocidad de avance cm/min	Extensión del electrodo (mm)
1	230	28	60	15.87
2	240	26	49.48	12.7
8	240	26	49.48	19.05
7	240	26	70.03	12.7
5	240	26	70.03	19.05
6	240	30	49.48	12.7
4	240	30	49.48	19.05
3	240	30	70.03	12.7
9	240	30	70.03	19.05
19	250	24	60	15.87
21	250	28	40	15.87
23	250	28	60	9.52
10	250	28	60	15.87
11	250	28	60	15.87
12	250	28	60	15.87
13	250	28	60	15.87
14	250	28	60	15.87
15	250	28	60	15.87
16	250	28	60	15.87
17	250	28	60	15.87
18	250	28	60	15.87
24	250	28	60	22.22
22	250	28	80	15.87
20	250	32	60	15.87
29	260	26	49.48	12.7
27	260	26	49.48	19.05
26	260	26	70.03	12.7
32	260	26	70.03	19.05
25	260	30	49.48	12.7
31	260	30	49.48	19.05
30	260	30	70.03	12.7
28	260	30	70.03	19.05
33	270	28	60	15.87

## 5.2 Preparación de muestras

Para el estudio del efecto y optimización de los parámetros de soldadura del proceso GMAW y obtener la máxima penetración, se realizó la experimentación tomando en cuenta las variables que mayor influencia tienen en la penetración y por lo tanto en la calidad de una soldadura, dichas variables son el Amperaje (A), Voltaje (V), y Velocidad de avance (cm/min), además de la extensión del

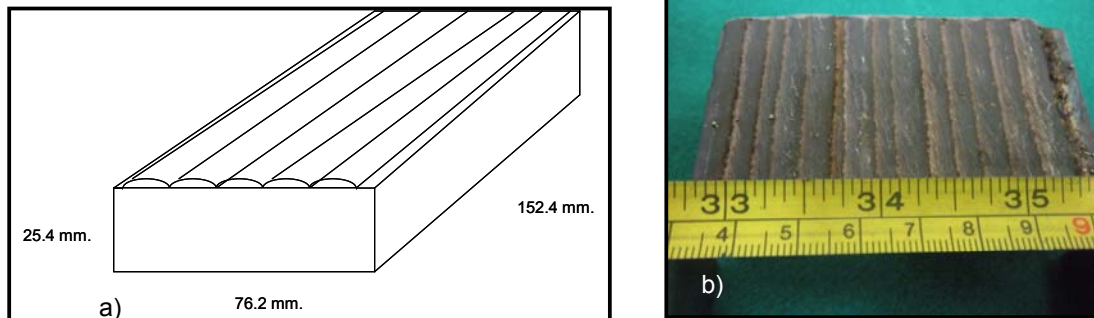
electrodo(mm) [2, 3, 20, 21], se utilizó material base directamente de un modulo de bomba, extrayendo placas de 76.2 X 152.4 X 25.4 mm, ver la fig. 5.3 a). El material de aporte fue acero inoxidable ER 312, el gas de protección fue la mezcla Innox MAG de 3 componentes (Ar-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>) de Infra<sup>®</sup>, condiciones para obtener el modo de transferencia por rociado [3]. Se utilizo una fuente de poder marca Miller<sup>®</sup> modelo Syncrowave, manipulada por un sistema mecanizado desarrollado en COMIMSA (proceso de patentado) figura 5.2. Para llevar a cabo el estudio se planteó un diseño experimental manteniendo constante los parámetros de la tabla 13.

**Tabla 11.** Parámetros de soldadura constantes de la experimentación.

Parámetros	Valor
Espesor de metal base	25.4 mm
Diámetro del alambre	1.14 mm
Longitud de arco	6.35 mm
Flujo de gas	16 LPM
Temperatura de precalentamiento	28 °C
Angulo de la pistola	90 Grados (+0, -5)

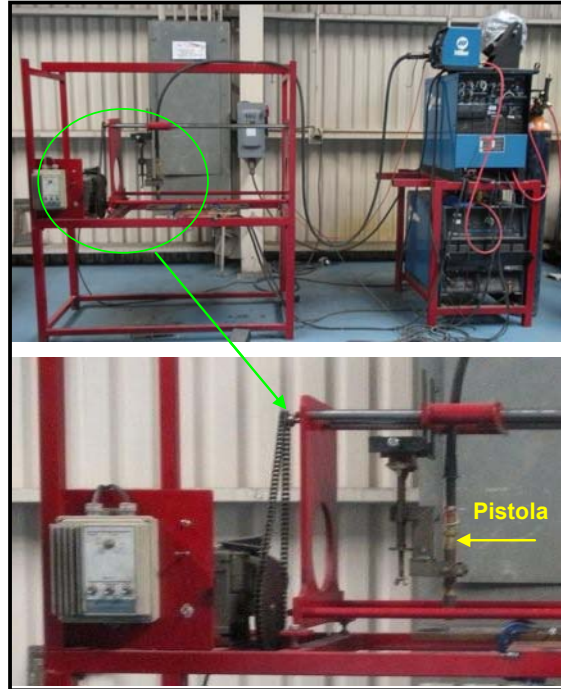
### Aplicación de la soldadura proceso GMAW.

Sobre la placa de prueba se aplicó una capa de soldadura de revestimiento, similar a como se suelda el modulo de bomba para su recuperación, figura 5.1 b).



**Figura 5.1.** Muestras para experimentación, a) Dimensiones del material base, placa de 76.2 X 152.4 X 25.4 mm. b) soldadura de revestimiento aplicada





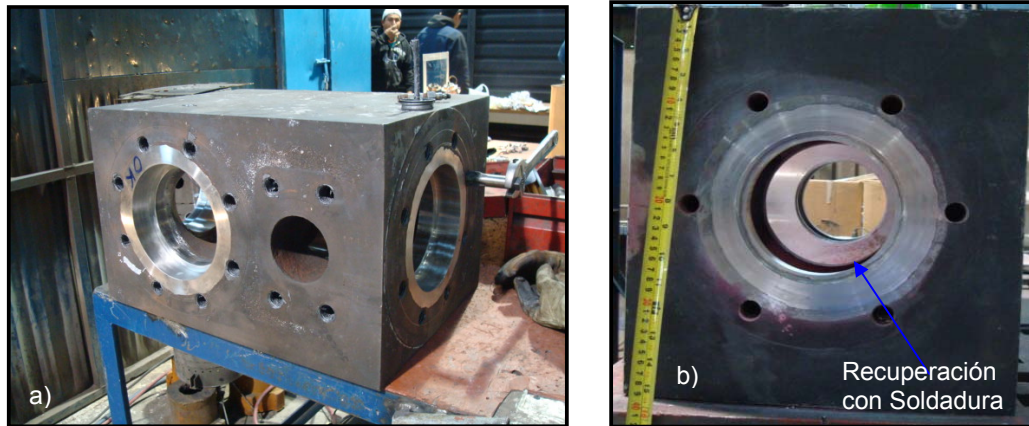
**Figura 5.2.** Equipo mecanizado para la aplicación de la soldadura GMAW.

### **5.3 Materiales y técnicas de caracterización**

#### **5.3.1 Técnicas de caracterización.**

##### **Material base.**

Antes de aplicar el proceso de soldadura se procedió a caracterizar el material base de acuerdo a la especificación A27, con el fin de verificar el tipo y grado de acero, para esto, se extrajo una muestra de un modulo de bomba en desuso. En la figura 5.3 se muestran un tipo de modulo de bombas de lodos. Se realizaron ensayo de resistencia a la tensión, ensayo de dureza, análisis metalográfico y análisis químico.



**Figura 5.3.** a) Módulo de bomba del cual se obtuvo el metal base para la experimentación, b) Zona de recuperación con soldadura.

#### **A) Análisis químico**

Se realizó de acuerdo a la especificación ASTM E1019-2003 para la determinación de carbono por combustión y detección infrarroja, para los demás elementos por espectroscopia de rayos X de acuerdo a la norma E1085-2004

#### **B) Ensayo de resistencia a la tensión**

El ensayo se realizó de acuerdo a la especificación ASTM E 8/03 utilizando un equipo TINIUS-OLSEN® con una capacidad de 60 toneladas, extensómetro LSM-10%-50 a una longitud calibrada de 50.8 mm.

#### **C) Ensayo de dureza**

Se evaluó la dureza al material de acuerdo con la especificación ASTM E18/03 utilizando un microdurometro Future Tech®

#### **D) Análisis metalográfico**

El análisis metalográfico de las muestras del metal base se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM E3 utilizando un microscopio óptico metalográfico Olympus® modelo PMG3 con aumentos de hasta 1000X, se obtuvieron las imágenes y fueron analizadas mediante el software Image Pro-plus®. Se utilizó

un microscopio electrónico de barrido (MEB) modelo JEOL JSM-6490LV para el análisis microestructural y evaluación de la soldadura.

#### **D) Medición de la penetración**

Para medir la penetración alcanzada en las 33 muestras se realizó un ensayo de macroataque de acuerdo a la norma ASTM E45, se utilizó un equipo de estereoscopio óptico (Olympus® 36A).

#### **5.4 Optimización del proceso**

En esta investigación la optimización del proceso se llevó a cabo empleando redes neuronales del tipo retropropagación y perceptrón múltiple, aplicando el software Matlab®, para lo cual se siguió el procedimiento siguiente:

- Obtención de los datos (tabla 15)
- Programar la red neuronal
- Introducir, calcular y evaluar los datos en la red neuronal
- Analizar los resultados

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Caracterización del metal base

De acuerdo a los resultados obtenidos de la caracterización del material base o modulo de bomba utilizado, se determinó que es un acero ASTM A-27 Grado 70 para aplicaciones generales de resistencia a la tensión mínima 70 ksi [485 MPa]. Por lo anterior es un tipo de acero adecuado y recomendado para el tipo de servicio que realizan los módulos de bomba de lodos. Los resultados de la caracterización se detallan a continuación.

#### 6.1.1 Análisis químico

De acuerdo a la composición química obtenida indicada en la tabla 12, esta se asemeja a un acero bajo carbono ASTM A-27 mismo que se corrobora con las propiedades mecánicas (esfuerzo máximo, esfuerzo de cedencia, y alargamiento).

**Tabla 12.** Resultados del análisis químico

% <b>C</b>	% <b>S</b>	% <b>Mn</b>	% <b>P</b>	% <b>Si</b>	% <b>Cr</b>	% <b>Ni</b>	% <b>Mo</b>	% <b>Cu</b>	% <b>V</b>	% <b>Nb</b>	% <b>Ti</b>	% <b>W</b>
0,29	0,013	0,74	0,014	0,28	0,08	0,04	0,04	0,063	0,005	<0,002	<,002	0,003

Vía de análisis.

% C y S por combustión y detección infrarroja ASTM E 1019-2003. Resto por espectrometría de Rx, ASTM E 1085-2004

#### 6.1.2 Ensayo de resistencia a la tensión

El ensayo se realizó de acuerdo a la especificación ASTM E 8/03 utilizando un equipo TINIUS-OLSEN® (60 TON.), extensómetro LSM-10%-50 a una longitud calibrada de 50.8 mm. A continuación se presentan los resultados obtenidos (tabla 13) y se comparan con la especificación de acero ASTM A-27.

**Tabla 13.** Resultados de las prueba de tensión

Identificación	Esfuerzo de cedencia Mpa (Psi)	Esfuerzo máximo * Mpa (Psi)	Elongación en 2" Long. Cal. %
Tensión 1	348 (50,084)	530 (76775)	26
Tensión 2	340 (49,030)	526 (76311)	26
<b>A27 Gr 70-36</b>	<b>250 (36000)</b>	<b>485 (70000)</b>	<b>24</b>

\*CARGA CALCULADA AL 0.2% offset.

### 6.1.3 Ensayo de dureza.

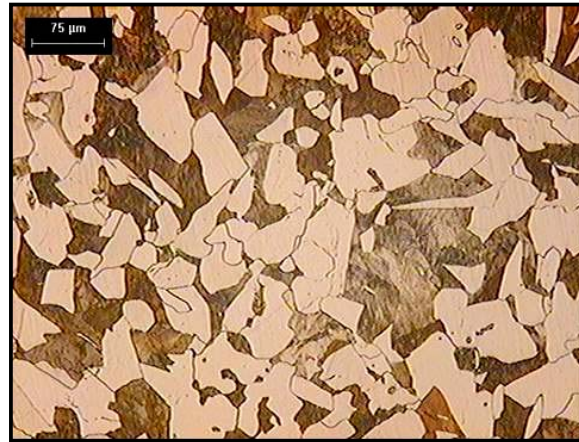
Se realizó las pruebas de ensayos de dureza al material de acuerdo con la especificación ASTM E18/03, en la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 14.** Resultados del ensayo de dureza

Lecturas (HRB)						Promedio
80	80	80	80	80	79	80

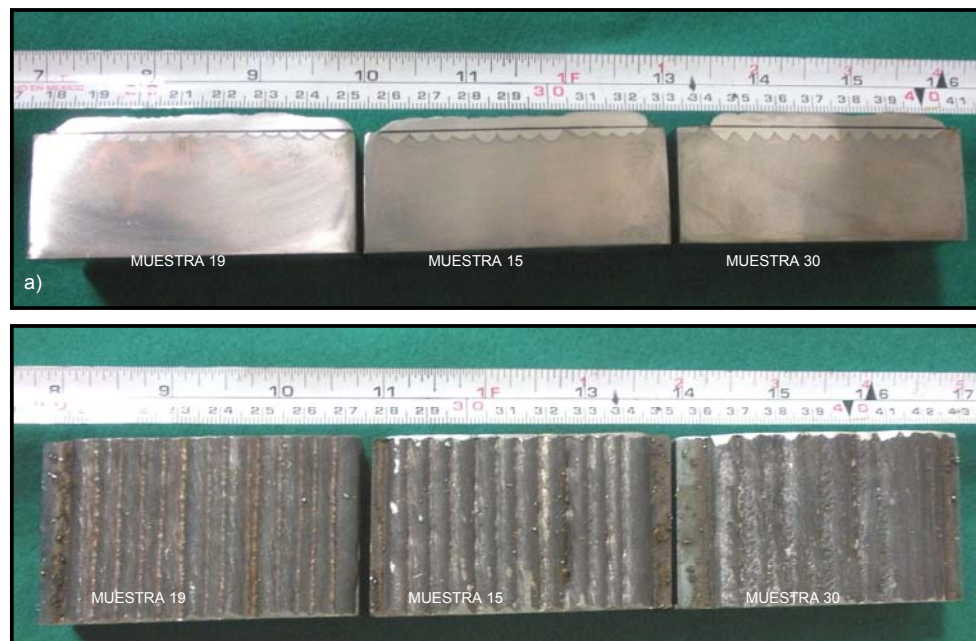
### 6.1.4 Análisis metalográfico:

El análisis metalográfico de las muestras del metal base se llevo acabo mediante la norma ASTM E3. La microestructura consiste de una matriz de granos equiaxiales de ferrita y perlita, tamaño de grano ASTM 7, típica de un acero vaciado. Ver figura 6.1.

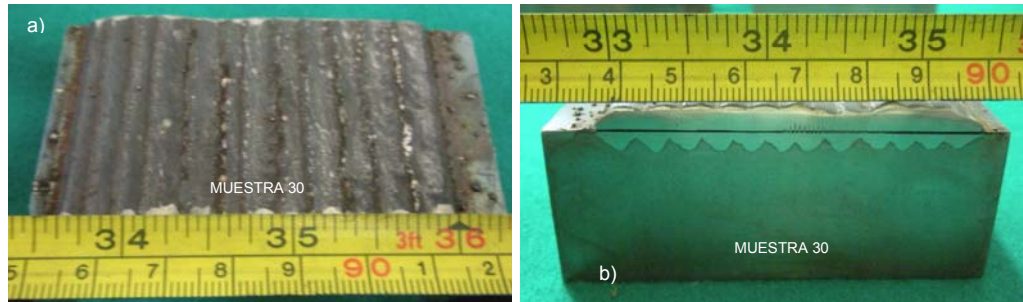


**Fig. 6.1.** Microestructura compuesta por granos equiaxiales de ferrita y perlita (Nital 5%).

Una vez caracterizado el material base a utilizar, se continuó con la preparación de los especímenes para la medición de la penetración y la evaluación metalúrgica. En las figuras 6.2 y 6.3 se ilustra la forma de preparación de las muestras para la medición (muestra 30).



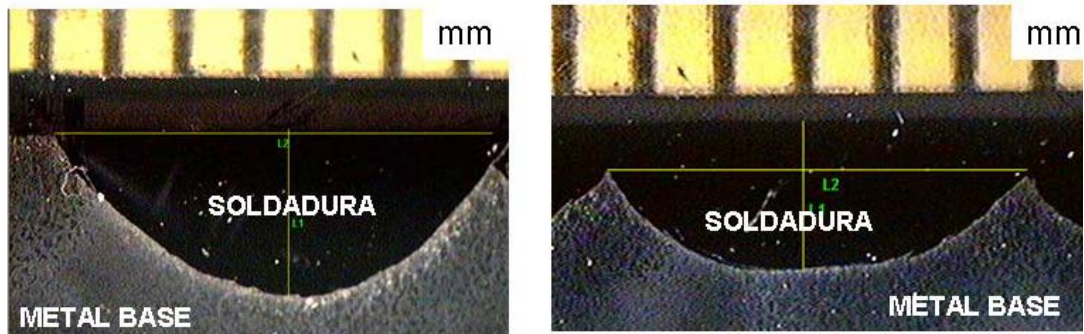
**Figura 6.2.** Muestras de soldadura a) Macroataque donde se muestra la penetración, nital 10%  
b) Vista superior.



**Fig. 6.3.** Vista superior, de la cara de la soldadura, b) Penetración de la soldadura. Muestra 30.

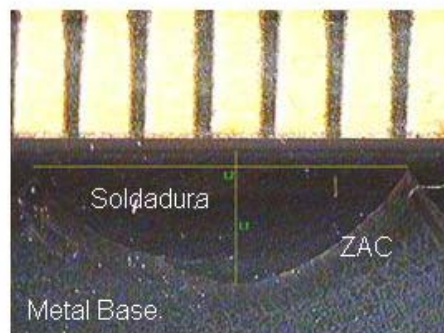
## 6.2 Penetración

Como parte del estudio planteado, se midió la penetración alcanzada, utilizando un estereoscopio óptico (Olympus® 36A). Ejemplos de las mediciones se muestran en la figura 6.4 (a, b y c)



a) Muestra 4

b) Muestra 11



c) Muestra 29

**Figura 6.4.** Medición de la penetración y ancho del cordón en diferentes muestras

Los resultados de la penetración de cada una de las 33 muestras se indican en la tabla 15, en ella se aprecia también los valores del calor de entrada empleados.

**Tabla 15.** Resultados del diseño experimental.

<b>Variable dependiente</b>	<b>Variable dependiente</b>	<b>Variable dependiente</b>	<b>Variable dependiente</b>	<b>Variable dependiente</b>	<b>Variable dependiente</b>	<b>Variable independiente</b>
<b>No de experimento</b>	<b>Amperaje (A)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Velocidad de avance (cm/min)</b>	<b>Extensión del electrodo (mm)</b>	<b>Calor de entrada (J/cm)</b>	<b>Penetración (mm)</b>
1	230	28	60.0	15.9	6670.0	1.7
2	240	26	49.5	12.7	7566.7	2.8
8	240	26	49.5	19.1	7566.7	2.0
7	240	26	70.0	12.7	5346.3	2.1
5	240	26	70.0	19.1	5346.3	2.1
6	240	30	49.5	12.7	8730.8	2.4
4	240	30	49.5	19.1	8730.8	2.2
3	240	30	70.0	12.7	6168.8	2.1
9	240	30	70.0	19.1	6168.8	2.5
19	250	24	60.0	15.9	6000.0	1.4
21	250	28	40.0	15.9	10500.0	2.2
23	250	28	60.0	9.5	7000.0	3.1
10	250	28	60.0	15.9	7000.0	1.9
11	250	28	60.0	15.9	7000.0	2.4
12	250	28	60.0	15.9	7000.0	1.9
13	250	28	60.0	15.9	7000.0	1.9
14	250	28	60.0	15.9	7000.0	2.4
15	250	28	60.0	15.9	7000.0	2.4
16	250	28	60.0	15.9	7000.0	2.3
17	250	28	60.0	15.9	7000.0	2.3
18	250	28	60.0	15.9	7000.0	2.7
24	250	28	60.0	22.2	7000.0	2.5
22	250	28	80.0	15.9	5250.0	2.7
20	250	32	60.0	15.9	8000.0	3.0
29	260	26	49.5	12.7	8197.3	3.1
27	260	26	49.5	19.1	8197.3	2.5
26	260	26	70.0	12.7	5791.8	1.7
32	260	26	70.0	19.1	5791.8	2.6
25	260	30	49.5	12.7	9458.4	3.1
31	260	30	49.5	19.1	9458.4	2.5
30	260	30	70.0	12.7	6682.9	3.3
28	260	30	70.0	19.1	6682.9	2.5
33	270	28	60.0	15.9	7560.0	2.2

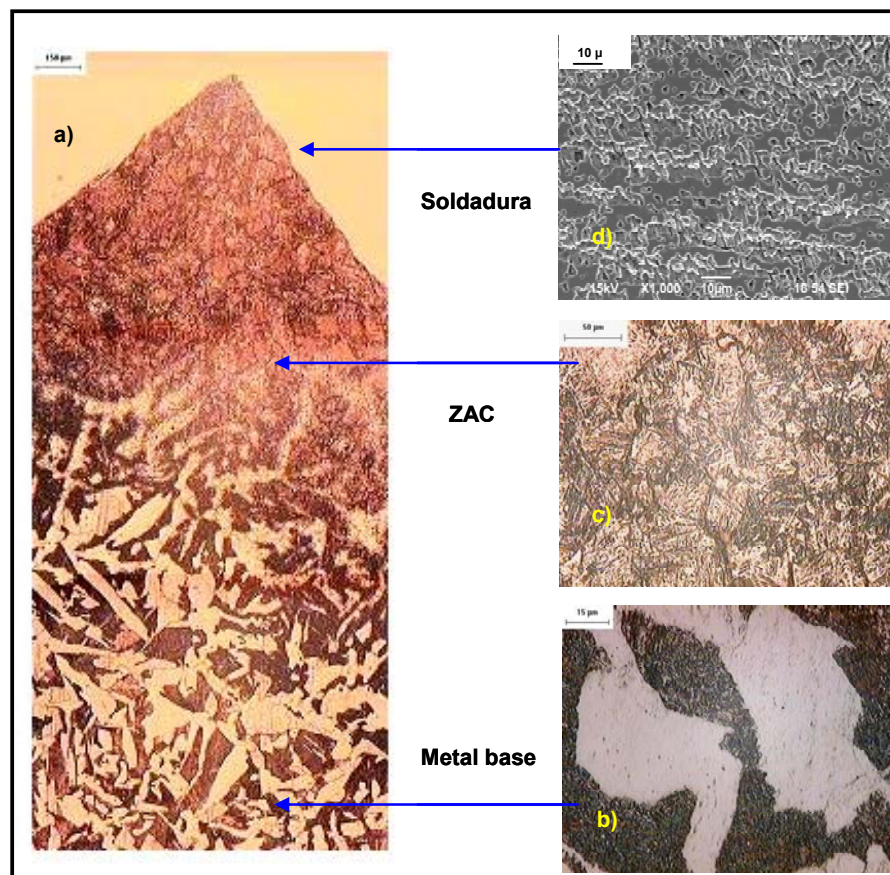


### 6.3 Evaluación de la soldadura

Posteriormente se realizó la evaluación metalúrgica de la soldadura seleccionando tres de las 33 muestras que fueron las numero 19 (menor penetración), 15 (intermedia penetración), y 30 (mayor penetración).

#### **Muestra 19**

El mapeo de la sección transversal de la soldadura, en el cual se observa el perfil metalográfico constituido por granos equiaxiales de ferrita y perlita en metal base (MB), en la zona afectada por el calor (ZAC) se aprecia la presencia de martensita revenida y en la sección de la soldadura presenta granos columnares dendríticos por solidificación, como se observa en la figura 6.5. Los valores de microdureza de cada zona son 203 HRB en el MB, 286 HRB en la ZAC y 221 HRB en la soldadura.

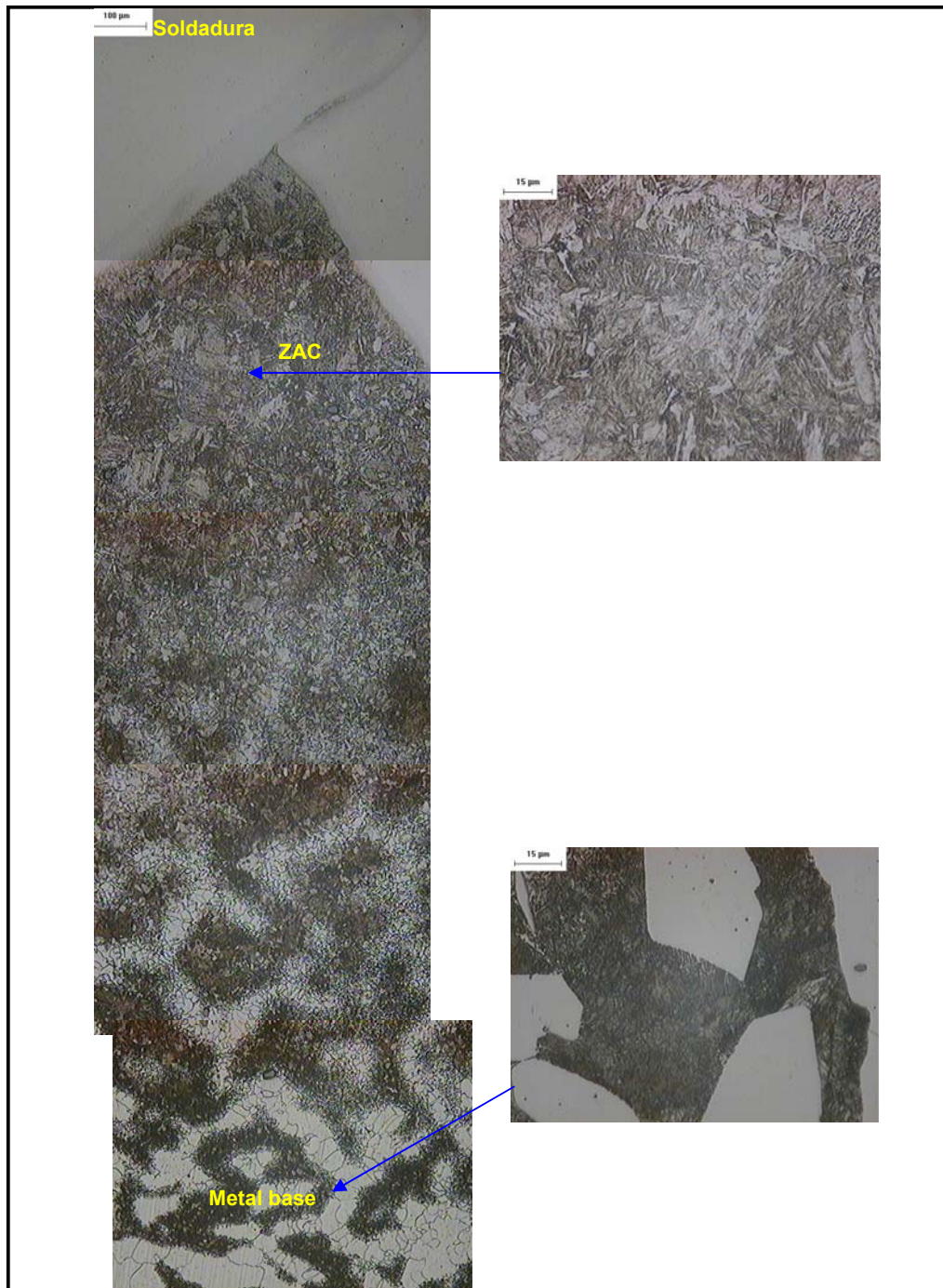


**Figura 6.5.** Perfil metalográfico de la muestra 19.

Se identifican las zonas de la soldadura; a) Mapeo, b) MB, fases ferrita y perlita, c) ZAC martensita revenida 200X (Nital 5%) y d) la soldadura ER312 granos dendríticos (Marble's).

**Muestra 15**

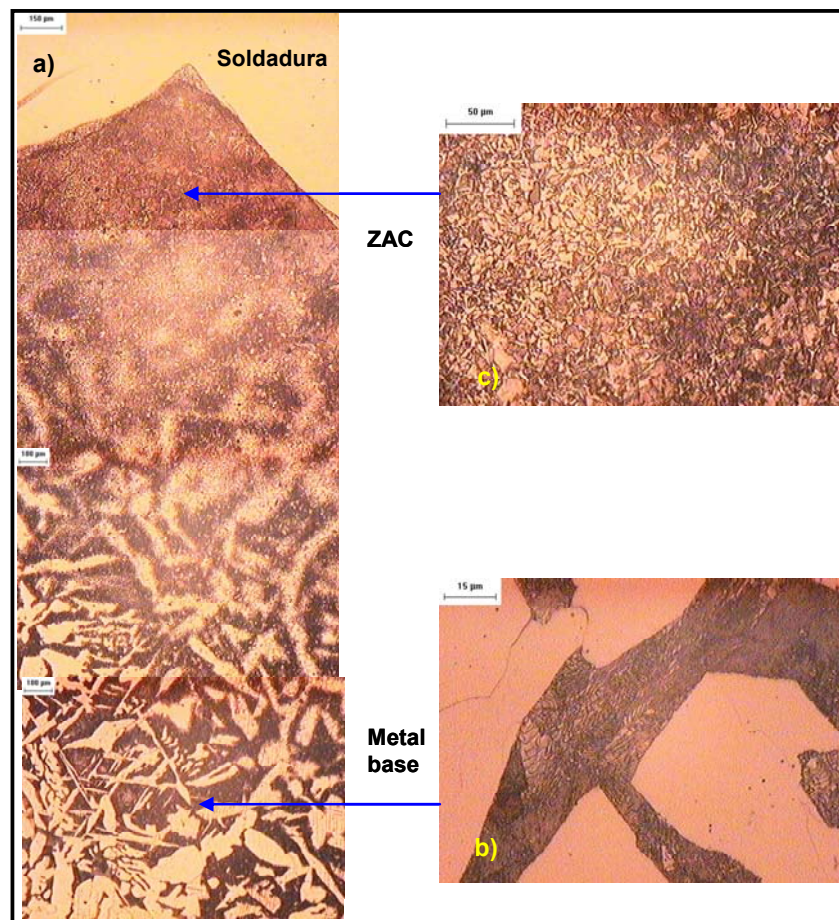
Se realizó un mapeo de la sección transversal de la soldadura, figura 6.6 en el cual se observa el perfil metalográfico constituido por granos equiaxiales de Ferrita y Perlita (metal base), la zona afectada por el calor (ZAC) donde se detecta la fase a martensita revenida. Los valores de microdureza de cada zona determinados son 209 HV en el MB, 334 HV en la ZAC y 232 HV en la soldadura.



**Figura 6.6.** Perfil metalográfico de la muestra 15.  
a) Mapeo, b) MB, ferrita perlita, c) ZAC martensita revenida (Nital 5%)

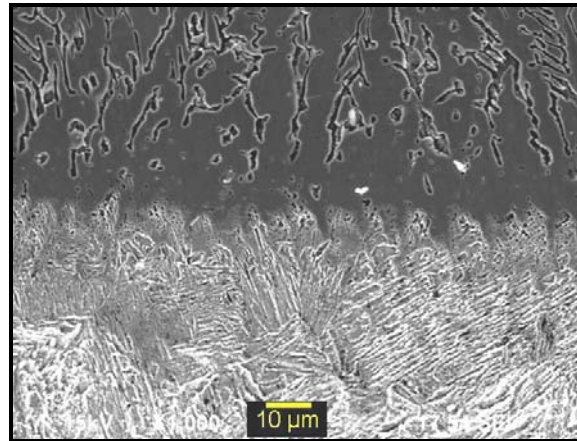
### **Muestra 30**

La sección transversal de la soldadura, figura 6.7 en el cual se observa el perfil metalográfico constituido por granos equiaxiales de Ferrita y Perlita (metal base), la zona afectada por el calor (ZAC) formada por una microestructura refinada de ferrita y perlita. Nótese que a mayor calor de entrada (6,682 J/cm) que la muestra 19 (6,000 J/cm) mostrado en la tabla 14, disminuye la velocidad de enfriamiento, previniendo la formación de martensita en la ZAC. Los valores de microdureza de cada zona son; 202 Hv en el MB, 257 Hv en la ZAC y 257 Hv en la soldadura.



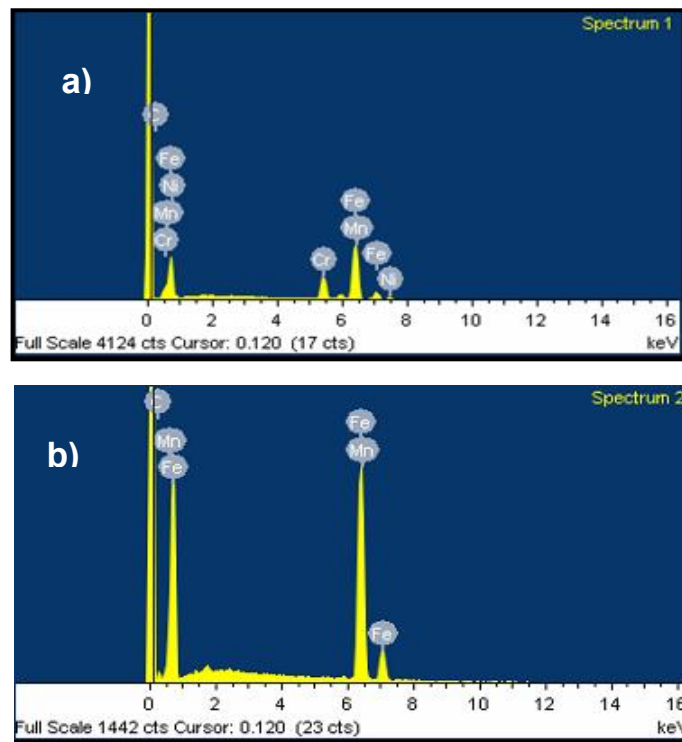
**Figura. 6.7.** Perfil metalográfico de la muestra 30 correspondiente a las zonas de la soldadura; a) Mapeo realizado, b) MB, se observa ferrita y perlita, y c) ZAC microestructura de ferrita y perlita (Nital 5%)

Se analizaron las zonas de la soldadura, en el microscopio electrónico de barrido (MEB). La interfase muestra como se inicia el crecimiento dendrítico luego de nuclear en la superficie del MB. Ver la figura 6.8.



**Figura 6.8.** Interfase del metal base y soldadura. (MEB).

Un microanálisis químico cualitativo por energía dispersiva de Rayos X (EDS) fue realizado en las zonas MB y soldadura. Los espectros indican los elementos químicos característicos de un acero al carbono (MB) y un acero inoxidable (soldadura). Ver la figura 6.9 a y b.



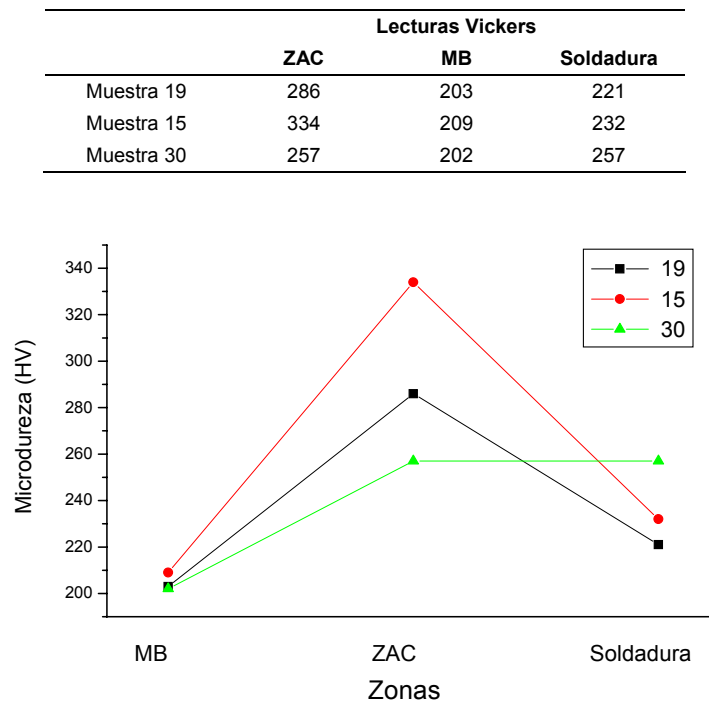
**Figura 6.9.** a) Espectros del metal base y b) de la soldadura. (MEB).

## 6.4 Propiedades mecánicas de la soldadura.

### 6.4.1 Dureza

Una de las características físicas más importante de la sección transversal de la soldadura a considerar es la dureza, cuyos valores representan las transformaciones de fases dúctiles y frágiles.

En la Figura 6.10 se aprecia una gráfica de perfil de dureza realizada en las diferentes zonas de la soldadura de las muestras 19, 15 y 30, en escala Hv. La zona afectada por el calor de los especímenes 15 y 19 presentan alta dureza debido a la presencia de martensita, producida por altas velocidades de enfriamiento.



**Figura 6.10.** Perfil de la dureza en las zonas de soldadura de las muestras analizadas.

Para aceros convencionales con alto contenido de carbono como es el caso que compete en la presente investigación (0.29% de C), es susceptible la formación de martensita con altas velocidades de enfriamiento, a condiciones de calor de entrada de 1,000 J/mm y espesores de placa mayores a 20 mm [16].

De acuerdo al análisis microestructural, en las figuras 6.5 y 6.6 se observa que en las muestras 15 y 19 se forma martensita en la zona afectada por el calor, a diferencia de la muestra 30 (figura 6.7) la cual presenta una microestructura refinada de ferrita-perlita, lo anterior corrobora los resultados del perfil de dureza indicados en la figura 6.10.

## 6.5 Análisis del diseño experimental

Se planteó el diseño experimental y se definieron los niveles (parámetros, rango) de las variables (amperaje, voltaje, velocidad de avance, y extensión del electrodo). Se utilizó un análisis de superficie de respuesta diseño central compuesto (las 33 muestras) en minitab®. Se realizaron las corridas obteniéndose la respuesta sobre la profundidad de penetración de acuerdo a los resultados siguientes:

### 6.5.1.1 Superficie de Respuesta de regresión: PENETRACION: AMPERAJE, VOLTAJE

El análisis se hizo utilizando las unidades sin codificar.

Estimación de los coeficientes de regresión para PENETRACION (mm promedio)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	22.9004	58.2818	0.393	0.699
AMPERAJE	-0.0216	0.3620	-0.060	0.953
VOLTAJE	-1.0056	1.5119	-0.665	0.514
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN	-0.1798	0.2701	-0.666	0.514
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)	0.0153	0.8662	0.018	0.986
AMPERAJE*AMPERAJE	-0.0002	0.0007	-0.336	0.741
VOLTAJE*VOLTAJE	-0.0195	0.0166	-1.175	0.255
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN*	-0.0006	0.0007	-0.893	0.384
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN				
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)*	0.0033	0.0066	0.500	0.623
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)				
AMPERAJE*VOLTAJE	0.0067	0.0046	1.472	0.158
AMPERAJE*VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN	-0.0003	0.0009	-0.297	0.770
AMPERAJE*	-0.0020	0.0029	-0.695	0.496
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)				
VOLTAJE*VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN	0.0083	0.0044	1.864	0.079
VOLTAJE*EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)	0.0020	0.0144	0.139	0.891
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN*	0.0044	0.0028	1.556	0.137
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)				

S = 0.365009 PRESS = 9.71883  
R-Sq = 64.40% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 36.71%

## Análisis de varianza para PENETRACION (promedio mm)

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresion	14	4.3380	4.3380	0.30986	2.33	0.047
Linear	4	2.8493	0.1150	0.02876	0.22	0.926
Plaza	4	0.3358	0.3358	0.08396	0.63	0.647
Interaccion	6	1.1529	1.1529	0.19215	1.44	0.253
Residual Error	18	2.3982	2.3982	0.13323		
Lack-of-Fit	10	1.4888	1.4888	0.14888	1.31	0.358
Pure Error	8	0.9094	0.9094	0.11367		
Total	32	6.7362				

**Parcelas residuales para PENETRACION (mm promedio)**

Resultados de: Hoja de trabajo 2

Superficie de Respuesta de regresión: PENETRACION: AMPERAJE, VOLTAJE,

Estimación de los coeficientes de regresión para PENETRACION (mm promedio)

Plazo	Coef	SE Coef	T	P
Constant	21.8130	60.1204	0.363	0.721
AMPERAJE	0.1817	0.3734	0.487	0.632
VOLTAJE	-2.2263	1.5596	-1.428	0.171
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN	-0.0955	0.2786	-0.343	0.736
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)	-1.3181	0.8935	-1.475	0.157
AMPERAJE*AMPERAJE	-0.0006	0.0007	-0.887	0.387
VOLTAJE*VOLTAJE	0.0079	0.0171	0.464	0.648
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN*	0.0012	0.0007	1.734	0.100
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN				
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)*	0.0177	0.0068	2.610	0.018
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)				
AMPERAJE*VOLTAJE	0.0062	0.0047	1.323	0.202
AMPERAJE*VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN	-0.0003	0.0009	-0.349	0.731
AMPERAJE*	-0.0011	0.0030	-0.355	0.727
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)				
VOLTAJE*VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN	-0.0021	0.0046	-0.467	0.646
VOLTAJE*EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)	0.0243	0.0148	1.637	0.119
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN*	0.0054	0.0029	1.873	0.077
EXTENSION DEL ELECTRODO (mm)				

S = 0.376524 PRESS = 6.71463

R-Sq = 59.62% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 28.20%

## Análisis de varianza para PENETRACION (mm promedio)

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresion	14	3.7670	3.7670	0.26907	1.90	0.100
Linear	4	1.0539	0.7353	0.18383	1.30	0.309
Plaza	4	1.5217	1.5217	0.38042	2.68	0.065
Interacción	6	1.1915	1.1915	0.19858	1.40	0.268
Error Residual	18	2.5519	2.5519	0.14177		
Lack-of-Fit	10	0.7663	0.7663	0.07663	0.34	0.942
Error puro	8	1.7855	1.7855	0.22319		
Total	32	6.3189				

Resultados de: Hoja de trabajo 4



Se analizó un diseño factorial fraccionado para conocer cual variable influía más en la penetración, el resultado fue el siguiente:

### Factorial Fit: PENETRACION versus AMPERAJE, VOLTAJE, VELOCIDAD DE AVANCE

Estimated Effects and Coefficients for PENETRACION (PROMEDIO mm) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		2.4715	0.09837	25.12	0.000
AMPERAJE	0.3837	0.1919	0.09837	1.95	0.075
VOLTAJE	0.2009	0.1004	0.09837	1.02	0.327
VELOCIDAD DE AVANCE CM/MIN	-0.2253	-0.1127	0.09837	-1.15	0.274

De acuerdo a lo anterior, la variable más significativa para la penetración máxima, es el Amperaje según el efecto de las variables consideradas para la respuesta de la penetración. Ver la figura 6.11.

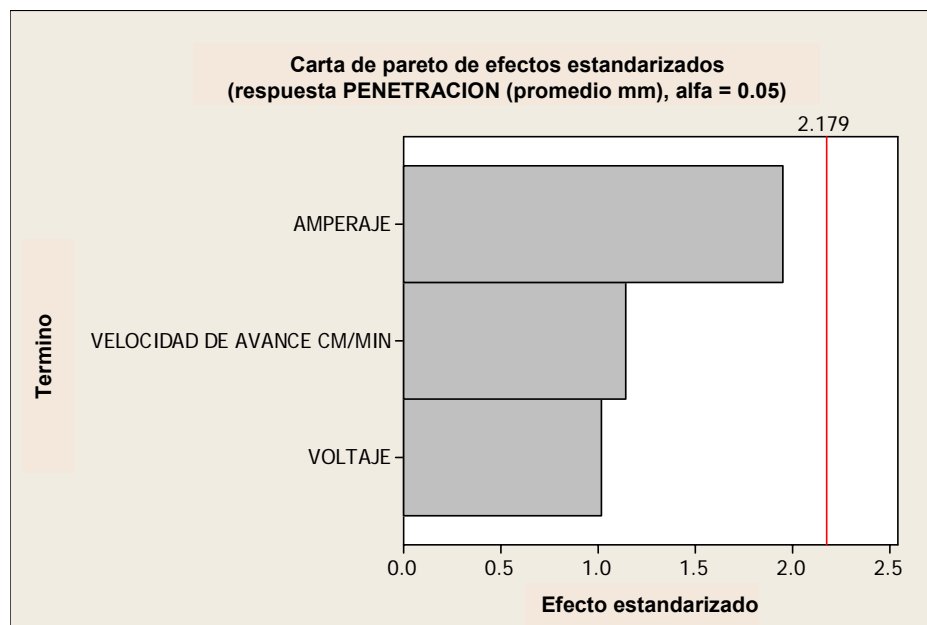


Figura. 6.11. Determinación de la variable significativa del análisis experimental.

Sin embargo no se utilizó este modelo, ya que los resultados estadísticos no fueron aceptables, como se muestra en el análisis de varianza, por ejemplo el valor de  $p$  es mayor a 0.05 y  $R-Sq = 33.92\%$  debe ser mayor a 70 u 80% depende del analista y del proceso que se está analizando.

R-Sq = 33.92%    R-Sq(pred) = 0.00%    R-Sq(adj) = 17.39%

Analysis of Variance for PENETRACION (PROMEDIO mm) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.9535	0.9535	0.31783	2.05	0.160
Residual Error	12	1.8579	1.8579	0.15482		
Lack of Fit	4	0.3484	0.3484	0.08709	0.46	0.763
Pure Error	8	1.5095	1.5095	0.18869		
Total	15	2.8114				

## 6.6 Optimización del proceso

Una vez establecido el efecto de las variables involucradas en el proceso de soldadura GMAW en un acero ASTM A-27, el siguiente paso consistió en establecer los valores óptimos, mediante el empleo de redes neuronales del tipo retropropagación y perceptrón múltiple, lo cual se desarrolló bajo los parámetros siguientes.

- 5 neuronas de la capa de entrada
- 25 neuronas de la capa media
- 1 neurona de la capa externa
- 0.25 la constante de aprendizaje, entre 0.25 y 0.01.
- 0.125 parámetro de momento, menor que uno y positivo.

Los valores óptimos obtenidos de la aplicación de redes neuronales fueron los indicados en la tabla 16.

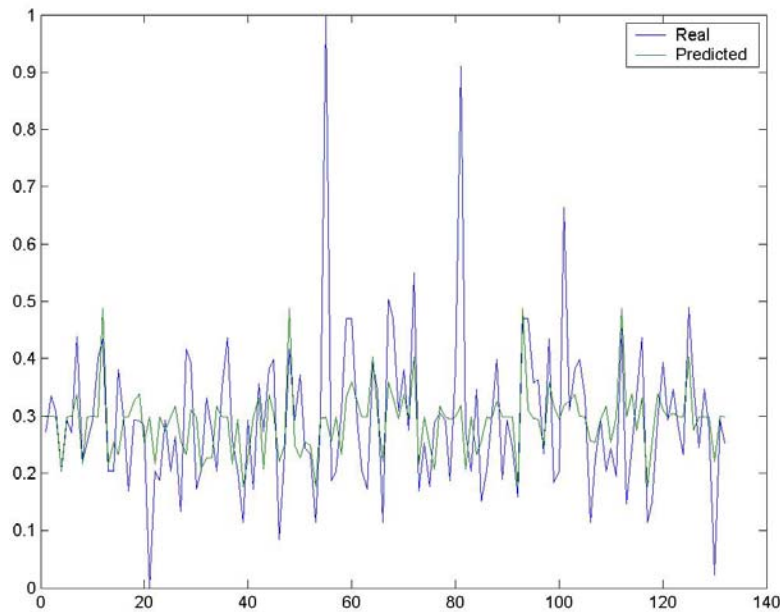
**Tabla 16.** Valores óptimos obtenidos con la red neuronal

Amperaje A	Voltaje V	Velocidad de Avance cm/min	Extensión del electrodo mm
251.8277	27.6935	40.2718	9.9236

El valor máximo de salida o penetración es:

**y =3.4995**

En la figura 6.12, se muestra la correlación de los valores reales y esperados obtenidos de la corrida de la red neuronal.



**Figura 6.12.** Correlación entre valores reales y esperados.

### 6.7. Efecto del precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura en la microestructura.

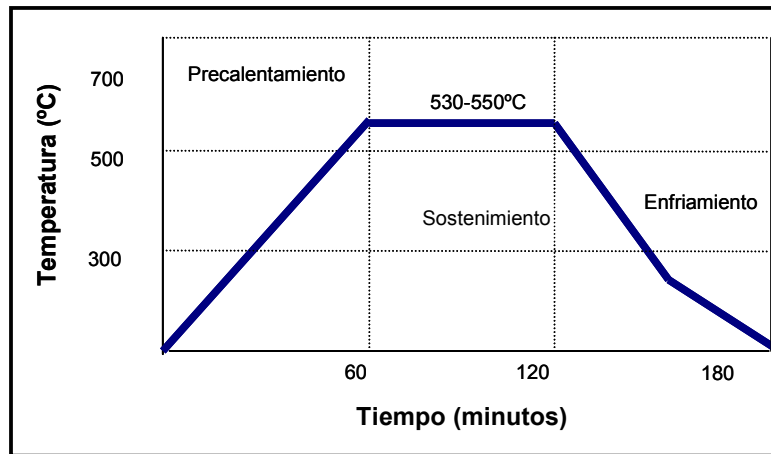
Tal y como se mostró en la evaluación de la soldadura en el punto 6.4 se observa la presencia de martensita y dureza elevada en la ZAC (muestras 15 y 19) por lo que se procedió a analizar el efecto del precalentamiento y el tratamiento térmico posterior a la soldadura, soldando tres nuevas muestras aplicando estas dos variables y utilizando los parámetros de la tabla 17.

**Tabla 17.** Parámetros de soldadura utilizados para el análisis del efecto del precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura y resultados de la medición de penetración.

No. de experimento (de la tabla 18)	Muestra	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (cm/min)	Calor de entrada J/cm	Penetración (mm)
25	1	260	30	49.5	9458.4	3.3
29	2	260	26	49.5	8197.3	3.1
30	3	260	30	70.0	6682.9	3.2

Los parámetros corresponden a las muestras donde se obtuvo una mayor penetración (muestras 25, 29 y 30).

La temperatura de precalentamiento fue de 200° C y el tratamiento térmico posterior a la soldadura se llevo a cabo a una temperatura de 530° C. con un tiempo de sostenimiento de 1 hr., como se indica en la figura 6.13.



**Figura 6.13.** Curva de temperatura vs. tiempo para el tratamiento térmico post soldadura para acero A 27.

### 6.7.1 Resultados de la medición de la Penetración de muestras tratadas térmicamente.

En la tabla 17 se indica el resultado de la medición de la penetración observándose que no hubo diferencia significativa con respecto a las muestras 25, 29 y 30 de la tabla 15.

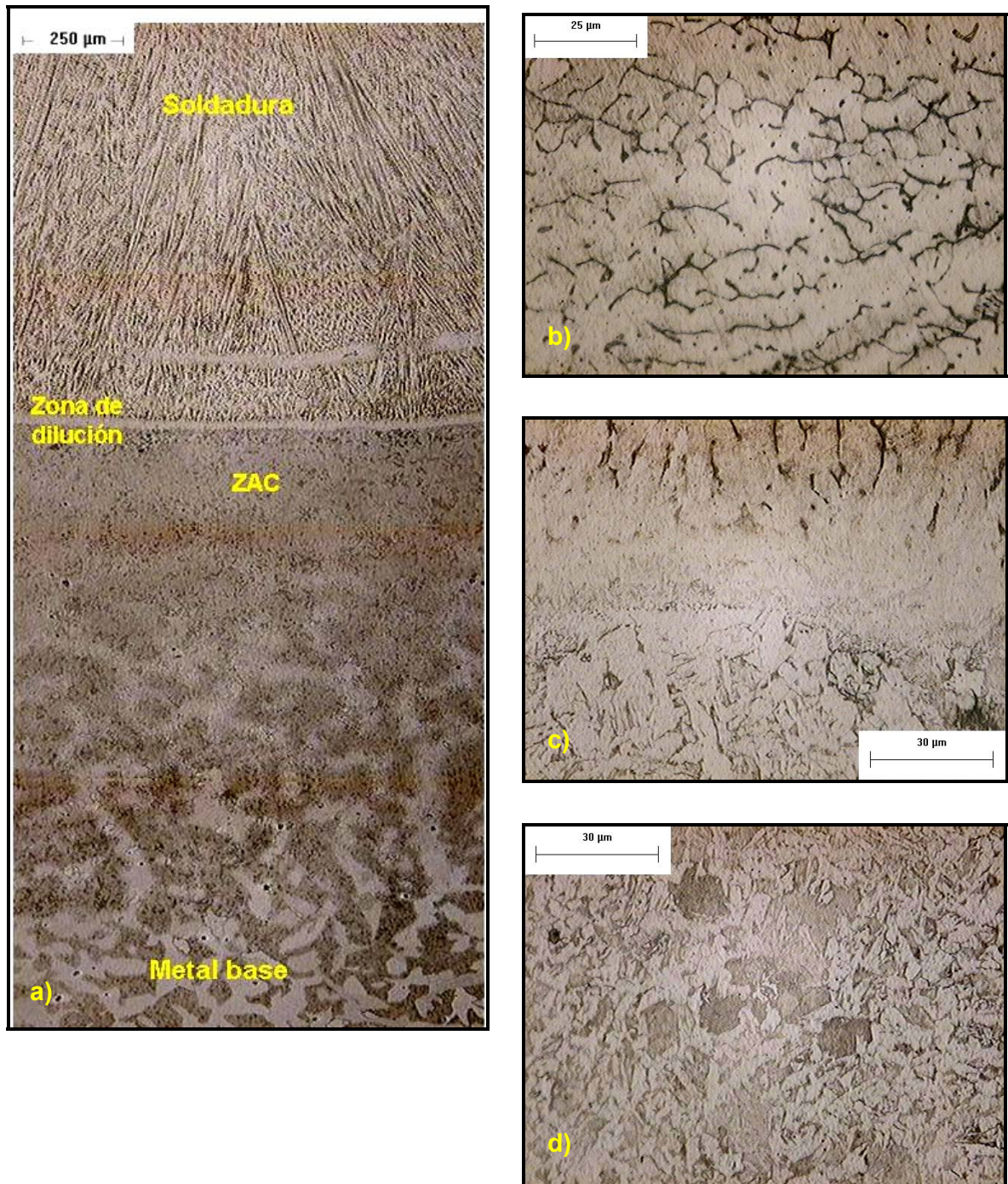
### 6.7.2 Evaluación de la soldadura tratada térmicamente.

La figura 6.14a representa el perfil metalográfico de la muestra 1 (mapeo y acercamientos) evidencia una transformación microestructural de granos equiaxiales de ferrita-perlita en MB a granos refinados de ferrita alotriomórfica y acicular en la ZAC (fig. 6:14d), la soldadura formada por granos austeníticos columnares (fig. 6:14b), Nótese una interfase clara (zona de dilución) entre la ZAC y la soldadura (fig. 6:14b). El crecimiento dendrítico de la austenita se produce al entrar en contacto con los granos de ferrita acicular del metal base.

En la segunda muestra se obtuvieron características microestructurales muy semejantes, como se muestra en la figura 6.15, se observa el crecimiento epitaxial del metal depositado (soldadura) a partir de la interfase. En la figura 6.15 se muestra la microestructura de la zona afectada por el calor donde se aprecia la ferrita alotriomórfica producida por el gradiente térmico y la migración del carbono de la perlita hacia el aporte de acero inoxidable por el alto contenido de cromo. Los granos austeníticos nuclean heterogéneamente en los límites de grano de la ferrita, en diferentes direcciones dependiendo del frente de solidificación promovido por la disipación de calor [16].

La evolución de la microestructura a lo largo de la línea de fusión en soldadura de materiales disímiles puede ser algo complejo. Cuando el metal base es ferrítico a temperaturas cercanas al punto de fusión (aceros al carbono y baja aleación) y metal de aporte es austenítico, el crecimiento epitaxial normal puede ser suprimido. Esto puede dar como resultado la formación de un término llamado *fronteras de grano tipo II* [13]. Las cuales corren ligeramente paralelas a la línea de fusión. En contraste con las *fronteras de grano tipo I*, las cuales resultan de un crecimiento columnar desde granos del metal base hacia la soldadura y orientados ligeramente perpendicular a la línea de fusión.

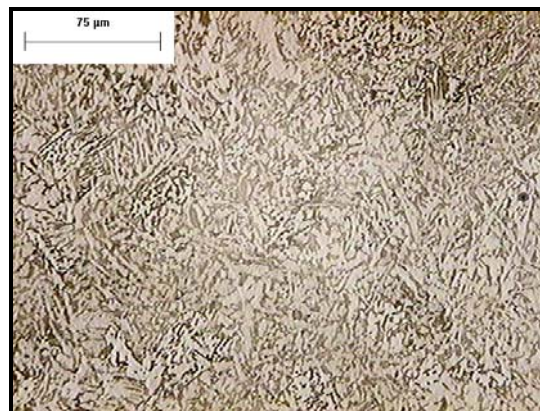
Así mismo se analizó la tercera muestra, la cual presenta una microestructura muy similar a las dos anteriores. En la figura 6.16 se observa en la línea de fusión el crecimiento de granos dendríticos a partir de las *fronteras de grano tipo II*. Esta forma tiene lugar en estado sólido durante el enfriamiento de la soldadura cuando el metal depositado y la ZAC son austeníticas, permitiéndole crecimiento de grano de austenita a lo largo del límite de fusión [13].



**Figura 6.14.** Microestructura de la muestra 1 con precalentamiento a 200° C. a) Mapeo de las zonas de la soldadura, b) Acercamiento a la soldadura, b) a la zona de dilución, c) a la zona afectada por el calor.



**Figura 6.15.** Microestructura de la muestra 2. a) Mapeo de la soldadura, interfase o zona de dilución y zona afectada por el calor.



**Figura 6.16.** Microestructura formada por granos de ferrita alotriomórfica y acicular en muestra 2.

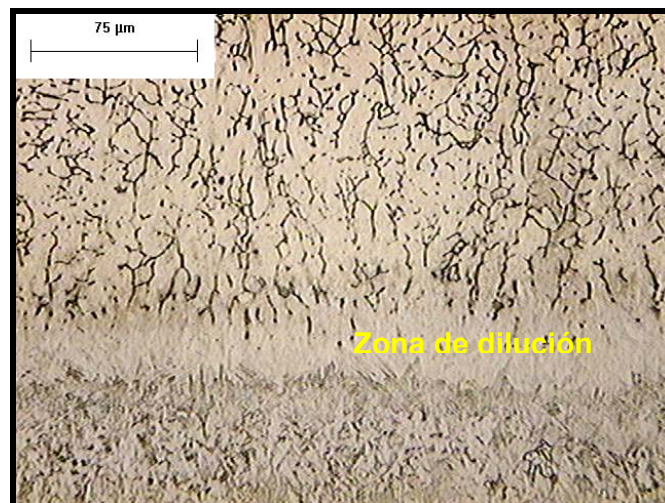


**Figura 6.17.** Microestructura de la muestra 3. Crecimiento de los granos austeníticos de la soldadura a partir de fronteras de granos tipo II.

Algunas veces se puede formar una fase frágil como la martensita a lo largo de la zona de fusión, como sucedió en las muestras 15 y 19 evaluadas en el punto 6.4. En este caso no se presenta tal fase en ninguna de las tres muestras tratadas térmicamente, debido al enfriamiento lento, promovido por el precalentamiento.

Predecir la microestructura en la región de transición resulta difícil debido a que cambia dramáticamente en una distancia muy corta (de 0.5 a 1 mm). Dentro de esta región puede variar significativamente desde la soldadura hasta la ZAC, además de estar sujeta a gradientes térmicos, de concentración y efectos de difusión, por ejemplo si el metal base fuera un acero alto carbono, éste difundiría de la zona afectada por el calor durante la soldadura o el tratamiento térmico post soldadura [13]. Esto puede potencialmente originar una región angosta de martensita a lo largo de la línea de fusión que exhibiría una alta dureza [13]. Si el metal depositado es de alto contenido de cromo como el ER 312, la tendencia de migrar del carbono de la ZAC hacia el metal depositado, durante el tratamiento térmico posterior a la soldadura es mayor.

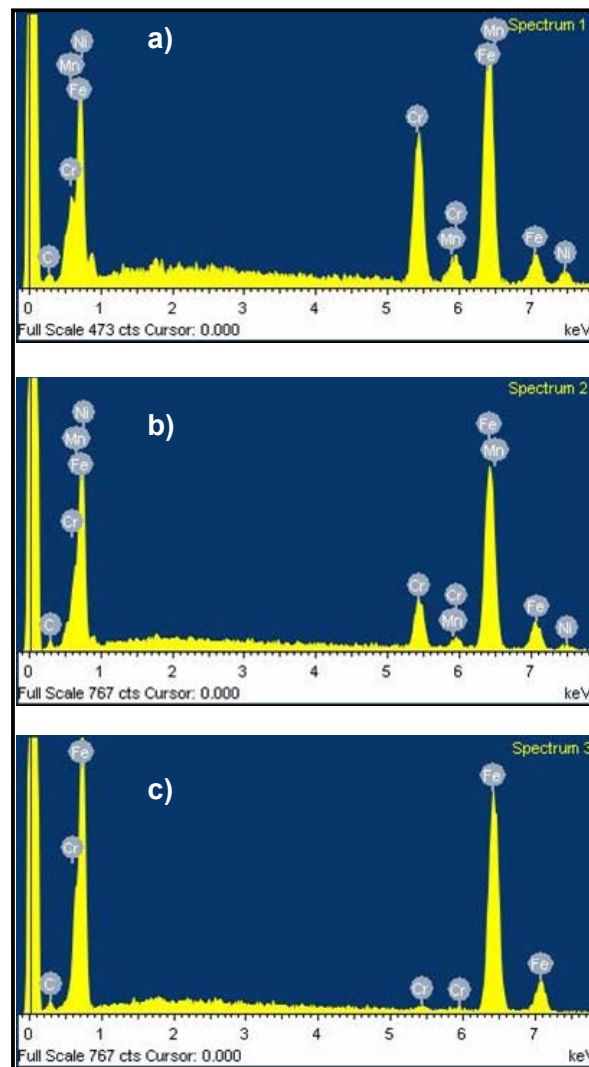
En la figura 6.18 se muestra un acercamiento a la interfase de la soldadura, donde se observa la zona de dilución y el modo de solidificación **epitaxial**.



**Figura 6.18.** Crecimiento de los granos epitaxiales de la soldadura.



Se realizaron microanálisis *químico cualitativo* mediante la técnica de energía dispersiva de Rayos X en el MEB, en cada una de las zonas respectivamente, soldadura, zona de dilución y ZAC como lo muestra la figura 6.19. En las cuales se corrobora por la magnitud de los picos de los espectros la mayor concentración de los elementos Cr y Ni en la soldadura (Fig. 6.19a), menor concentración en la zona de dilución (Fig. 6.18b) y en la ZAC se observan los picos característicos del acero al carbono, tales como el Fe y C (Fig. 6.19c).



**Figura 6.19.** Espectro de análisis químico cualitativo de a) soldadura, b) zona de dilución y c) zona afectada por el calor. (MEB).

El perfil de microdureza realizado en las zonas de la soldadura de los especímenes 1, 2 y 3 se muestra en las figuras 6.20 y 6.21, se indican los valores promedio de dos indentaciones realizadas en cada zona. Nótese la congruencia de la dureza con la microestructura, lo cual se logró mediante el tratamiento térmico aplicado. Ver tabla 19.



Figura 6.20. Perfil de microdureza Hv en las muestras tratadas térmicamente.

	ZAC	DILUCIÓN	SOLDADURA
M1	219	273	237
M2	216	262	246
M3	198	253	255

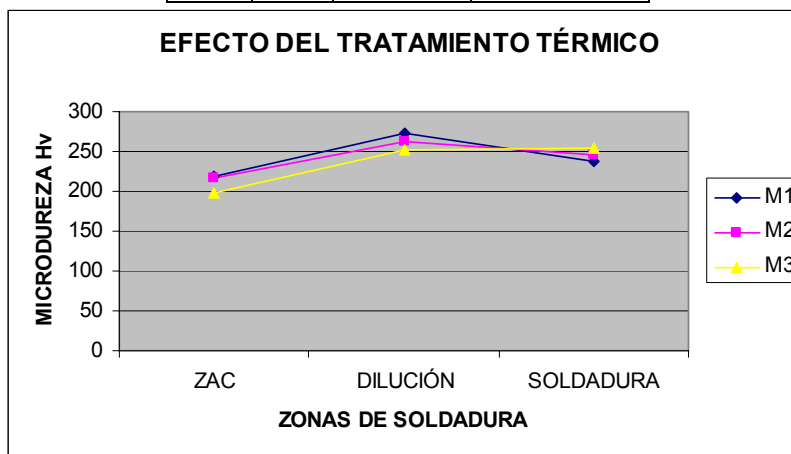


Figura 6.21. Gráfica de dureza en las muestras 1, 2 y 3.

Tabla 18. Microestructuras de las muestras con tratamiento térmico.

ESPECIMENES	1, 2, 3
METAL BASE	Granos equiaxiales de 80% ferrita + 20% perlita
ZAC	Granos de 20% ferrita alotriomórfica + 80% ferrita acicular
ZONA DE DILUCIÓN	50% granos de ferrita acicular + 50% granos epitaxiales de austenita ( <i>fronteras de grano tipo II</i> )
SOLDADURA	100% granos austeníticos

## 8. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados del análisis y experimentación para la optimización de los parámetros de soldadura por proceso GMAW para la recuperación de módulos de bombas de lodos fabricadas de acero al carbono ASTM A27, podemos concluir lo siguiente:

- El material base utilizado en la experimentación corresponde a un acero al carbono vaciado ASTM A 27 con un tratamiento térmico de normalizado. El material de aporte corresponde a la especificación de un acero inoxidable austenítico ER 312, y como gas de protección una mezcla Ar-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>.
- Los valores máximos de penetración obtenidos con la medición fue de 3.3 mm. con valores de 260 Amperes, 30 Volts, una velocidad de avance de 70 cm/min y una extensión del electrodo de 12.7 mm.
- La variable de mayor influencia en la penetración es el amperaje.
- Los valores de los parámetros con mayor influencia en la penetración de acuerdo a los resultados de la optimización son 252 amperes, 27.7 volts, velocidad de avance 40 cm/min y extensión del electrodo 9.92 mm.
- La evaluación metalúrgica de la soldadura se realizó en tres de las 33 muestras que fueron las numero 19 (menor penetración), 15 (intermedia penetración), y 30 (mayor penetración).
- Las muestras sin tratamiento térmico (precalentamiento y postcalentamiento) presentaron fases frágiles en la zona afectada por el calor (ZAC) con valores de dureza desde 257-334 Hv. La formación de martensita revenida (muestras 15 y 19) es susceptible al agrietamiento bajo las condiciones normales de operación de los módulos de bombas. Mientras que la muestra 30 presenta microestructura de granos refinados de ferrotas y perlita (ZAC) y valores de dureza apropiados (202 Hv).

- Las tres muestras tratadas térmicamente evidencian una penetración similar a las 33 muestras soldadas sin precalentamiento ni postcalentamiento. y la transformación microestructural de granos equiaxiales de ferrita-perlita (80%-20%) en el metal base (MB) a granos refinados de ferrita alotriomórfica y acicular (20%-80%) en la zona afectada por el calor (ZAC), la soldadura formada por granos epitaxiales austeníticos crecen en las fronteras de grano tipo II a partir de granos aciculares de ferrita (zona de dilución). Las cuales corren ligeramente paralelas a la línea de fusión.
- El perfil de dureza obtenido en las diferentes zonas de la sección transversal de la soldadura de las muestras con tratamiento térmico, es ligeramente homogéneo pues la diferencia de 35 puntos en la escala de dureza Vickers de la ZAC y soldadura es relativa, así como también la zona de dilución que se incrementa en 52 unidades Vickers de la ZAC.
- El tratamiento térmico favorece la migración de átomos de carbono de la ZAC hacia el metal depositado obteniendo buenas propiedades mecánicas en ambas zonas.

Los resultados se pueden considerar como buenos ya que se tiene una soldadura con buenas características microestructurales y mecánicas para el servicio o la aplicación en los módulos de bomba.

**BIBLIOGRAFIA**

- 1) ASTM A 27/A 27M – 93 Standard Specification for Steel Castings, Carbon, for Suitable for Pressure Service
- 2) Advanced Control Methods for Optimization of Arc Welding  
Ph.D. Thesis  
Jesper Sandberg Thomsen  
Department of Control Engineering, Aalborg University, 2004.
- 3) The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. Vol. 3, Issue 2, 2007, pages 240-245.  
Erdal Karadeniz ,\*, Ugur Ozsarac\*\* , Ceyhan Yildiz\*\*\*
- 4) A 488/A 488M – 04 Standard Practice for Steel Castings, Welding, Qualifications of Procedures and Personnel
- 5) C5.10/C5.10M:2003, Recommended Practices for Shielding Gases for Welding and Cutting
- 6) Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding.  
Journal of Materials Processing Technology, In Press, Corrected Proof, Available online 22 October 2007.
- 7) Welding Handbook eight edition volume 2, Welding Processes  
American Welding Society
- 8) AWS A5.9M;2006 Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Bars
- 9) ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering, Volume 6, ASM International
- 10) Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel.  
J. Tusek, M. Suban, International Journal of Hydrogen Energy (2000)  
369-376
- 11) Welding Metallurgy. Second edition. Sindo Kou, Professor and Chair Department of Materials Science and Engineering University of Wisconsin. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

- 12) J. F. Lancaster, "Welding Metallurgy", 4<sup>o</sup> Ed., Allen & Unwin, Londres, 1987.
- 13) Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. John C. Lippold and Damian J. Kotecky
- 14) Heat Flow in Fusion Welding. Chon L. Tsai and Chin M. Tso, The Ohio State University. ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering, Volume 6, ASM International
- 15) Hardfacing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining. J.R. Davis, Davis & Associates. ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering, Volume 6, ASM International
- 16) Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds. Lars-Erik Svensson. The Esab Group. Esab AB, Gothenburg, Sweden.
- 17) Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. L.A. de Vedia y H.G Svoboda
- 18) Características de fusión de soldaduras GMAW de aceros inoxidable austenísticos. J. Lozano, P. Moreda, C.L. Llorente y P.D. Bilmes. Sornadas SAM 2000- Coloquio latinoamericano de fractura y fatiga, Agosto de 2000, paginas 171-178.
- 19) Review the classification of metal transfer. W. Lucas, D. Iordachescu, V. Ponomarev. IIW Doc. No. XII-1888-06
- 20) Full penetration welding process of T joint of thick plates without gouging or backing material using current pulsed MAG welding. Osamu Yasuda, Masahiko Hirono, Tsuneo Mita. 2005
- 21) A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO<sub>2</sub> arc welding. I.S. Kim, J.S. Son, I.G. Kim, J.Y. Kim, O.S. Kim. Journal of materials processing technology 136 (2003) 139-145.
- 22) Douglas C. Montgomery. Diseños y análisis de experimentos. México. Editorial Limusa Willey segunda edición. 2006.
- 23) Tsoukalas Lefteri y Uhrig Robert. Fuzzy and neuronal approaches in engineering. Wiley-Interscience Publication. EUA. 1998.
- 24) Prediction in Welding Process Using Multiple Linear Regression and Neural Network, R. Praga-Alejo, L. Torres-Treviño, and M. Piña-

- Monarrez . International Journal of Industrial Engineering. ISSN 1072-4761, P. 481-488. 2008
- 25) Babuska Robert. Fuzzy and Neural Control. Delft University of Technology. Holanda. 2001
  - 26) 1 LM Torres-Treviño, JL Acevedo, Intelligent Systems in Industrial and Manufacturing Processes. Editores (2009)
  - 27) Freeman, JA.; Skapura DM. Redes Neuronales. Algoritmos, aplicaciones y técnicas de propagación. Addison-Wesley, México, pag. 306, 1993.
  - 28) K. Y. Benyounis, A.G. Olabi. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches –A reference guide; Advances in Engineering Software, 39, 483- 496 (2008)
  - 29) L. M. Torres–Treviño, M. R. Piña–Monarrez, R. J. Praga-Alejo, A. Reyes-Valdes, and J. Acevedo-Dávila; Comparison between multiple linear regressions and neural networks in optimization welding process. International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice.Proceedings of the 12th Annual. 726-732, Nov 4-7 (2007)
  - 30) L Carriño, U Natale, L. Nele, ML Sabatini, L Sorretino. A neuro-fuzzy approach for increasing productivity in gas metal arc welding procesess, Int J Adv Manuf Technol, 32, 459-467 (2007)

## **ANEXO**

### **METODOLOGÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE DIMENSIONES DE MODULO DE BOMBA DE ACERO AL CARBONO VACIADO.**

De acuerdo a los resultados obtenidos y a la experiencia en la recuperación de dimensiones módulos de bomba de lodos de material ASTM A-27 y con la finalidad de asegurar la calidad de todo el proceso de recuperación, se propone una metodología que contemple todas las actividades de control. Cabe hacer mención que el alcance de este punto cubre solo la parte de la aplicación de la soldadura por lo que la metodología se menciona de manera general y es ilustrativo más no limitativo para proporcionar los pasos a seguir en la reparación general de los módulos de bomba, las etapas a seguir son las siguientes:

#### **I. Registro, desensamble y limpieza**

Identificar y registrar la pieza según los datos proporcionados por el cliente o identificación física de la pieza en el formato correspondiente; Si existe la necesidad de desensamblar algunas partes, esta actividad es llevada a cabo, para después limpiar la pieza mediante chorro de arena.

#### **II. Inspección inicial.**

En esta etapa se realiza la inspección no destructiva mediante una detallada inspección visual para localizar posibles discontinuidades en los cuerpos de los módulos, así mismo realizar la inspección y verificación dimensional de las roscas para el alojamiento de birlos de acuerdo a las ingenierías correspondientes y de las áreas sujetas a rehabilitación como son diámetros, conos y distancias lineales.

#### **III. Premaquinado y preparación para la aplicación de soldadura.**



En esta etapa se realiza el premaquinado del modulo para eliminar el material desgastado y fatigado así como para preparar la superficie para la aplicación de soldadura; el desbaste será de aproximadamente 1/16" en diámetro y en distancias lineales, para posteriormente eliminar posibles defectos mediante pulido con equipo neumático. La eliminación de los defectos debe ser al 100%, para evitar posibles complicaciones posteriores. El monitoreo de eliminación de defectos se realiza mediante ensayos no destructivos (inspección visual y líquidos penetrantes)

#### **IV. Fabricación de elementos necesarios.**

Al mismo tiempo que se lleva a cabo la rehabilitación del módulo de bomba se realiza la fabricación de aquellos elementos que se requieran reemplazar tales como birlos y tuercas.

#### **V. Aporte de soldadura.**

Para la reparación del diámetro interior del molde se utilizarán el procedimiento de soldadura y se empleara a un soldador calificado de acuerdo al estándar ASTM A 488 [4]. En dicho procedimiento se establecen el rango de los parámetros de soldadura, incluyendo la temperatura de precalentamiento y el tratamiento térmico posterior a la soldadura, en caso de que surjan detalles de discontinuidades en el maquinado final se puede realizar el aporte de soldadura mediante el proceso GTAW. El personal que aplique la soldadura deberá estar calificado previamente según lo indicado en el procedimiento de soldadura.

#### **VI. Tratamiento térmico**

El tratamiento térmico que se aplicará a los cuerpos de módulos después de la aplicación de soldadura, será un relevado de esfuerzos de aproximadamente dos horas, después de que se llega a la temperatura de empape que es de entre 530 y 550°C, bajo la siguiente secuencia:

**Primera etapa de precalentamiento.**

Con la pieza dentro del horno, calentar la pieza hasta alcanzar la temperatura de sostenimiento, a una velocidad de calentamiento de 500°C/hr. Llegar hasta una temperatura no mayor a 550°C,

**Segunda etapa de sostenimiento.**

La temperatura de sostenimiento permanecerá a 500°C por hora por cada pulgada de espesor de soldadura aplicada en su punto mayor. Al momento de alcanzar la temperatura indicada se mantiene durante 2 horas en el rango de 530-550°C, (se considera 1 hora de homogenización de temperatura), se monitorea mediante termopares o pirómetro óptico durante todo el tiempo del proceso.

**Tercera etapa de enfriamiento.**

La velocidad de enfriamiento será de 60°C/hr hasta una temperatura de 300°C la pieza permanecerá en el horno, después terminar el ciclo con enfriamiento al aire. Una vez que el modulo a alcanzado la temperatura ambiente se pasa la pieza al taller de maquinado para realizar el maquinado final.

En el ciclo de tratamiento Térmico se deberá considerar lo siguiente:

- Colocar un termopar con calibración vigente en contacto sobre la zona reparada por soldadura para el mejor control de temperatura en dicha área.
- La colocación de la pieza dentro del horno deberá estar debidamente apoyada o soportada para evitar distorsiones.

- El horno deberá contar un registrador/graficador de temperatura con calibración vigente, con la finalidad de tener registro del tratamiento térmico por cada pieza.

## **VII. Maquinado final.**

En esta etapa de maquinado se deja el modulo totalmente terminado con dimensiones finales a  $-0.010''$ , de acuerdo a las ingenierías correspondientes para cada tipo de modulo de bomba. Al faltar aproximadamente  $0.030''$  por cada lado maquinado se realiza la inspección con líquidos penetrantes, y en caso de localizar discontinuidades se debe eliminar mediante equipo neumático o eléctrico y reparar nuevamente mediante proceso de arco eléctrico con electrodo de tungsteno (GTAW por sus siglas en ingles), para continuar el maquinado posteriormente. Al faltar  $0.010''$  para la dimensión final se realiza otra inspección mediante líquidos penetrantes la misma secuencia descrita anteriormente. Esta secuencia se sigue en cada uno de los diámetros, distancias o conicidades que se estén maquinando.

En caso de que se presenten indicaciones que sean causa de rechazo tales como grietas, poros mayores a  $1/64''$  y socavados se deberán eliminar mediante equipo neumático y aplicar soldadura según lo indicado en el punto número V. En esta etapa también se deberán inspeccionar los birlos y tuercas fabricados mediante inspección dimensional e inspección visual según los instructivos indicados anteriormente.

## **VIII. Inspección final.**

En esta etapa se realiza la inspección para verificación de dimensiones finales de acuerdo a las ingenierías correspondientes para cada tipo de modulo de bomba; así como la inspección visual y de líquidos penetrantes del modulo completo; los criterios para discontinuidades inherentes al proceso son, no se aceptan grietas ni socavados, solo se aceptan poros aislados menores a  $1/64''$ .

## **IX. Ensamble y acabado final**

Para cada módulo se aplica la protección mediante aplicación de recubrimiento primario y pintura color blanca para protegerla de la corrosión en las zonas externas del módulo. Posterior a esta actividad se realiza el ensamble de tornillería nueva, incluyendo tuercas según tipo y cantidad indicada en las ingenierías correspondientes para cada tipo de modulo.

**Especificación de procedimiento de soldadura [4]**

Para realizar el depósito se debe contar con una especificación de procedimiento de soldadura calificado, de acuerdo a la especificación A 488/A 488M – 04 Standard Practice for Steel Castings, Welding, Qualifications of Procedures and Personnel

**1) Título**

Soldadura de Módulo de Bomba de acero al carbono vaciado

**2) Procedimiento No. \_\_\_\_\_**

Fecha: \_\_\_\_\_

**3) Alcance**

Este procedimiento incluye la soldadura de módulos de bomba de acero al carbono utilizando el proceso GMAW transferencia por rociado.

**4) Material base**

Indicar la designación ASTM o indicar el análisis químico y propiedades mecánicas, Indicar la categoría tipo o grado del material y la condición y el tratamiento térmico del material antes de soldar

**5) Metal de aporte**

El material de aporte deberá cumplir con la especificación ANSI/AWS y la clasificación correspondiente (ejemplo, A5.18 ER312). Indicar el número A del material de aporte. Para procesos de arco con protección de gas de deberá indicar la composición nominal del gas o mezcla utilizada, así como el flujo.

**6) Preparación del material base**

La remoción del metal deberá ser realizada de acuerdo a lo siguiente:

Indicar el método de remoción del metal tal como cincelado, esmerilado, arco aire, corte, etc. así como el precalentamiento si es requerido durante la remoción del metal. La configuración de la preparación de la soldadura de penetración parcial deberá indicar el radio mínimo de la raíz y el ángulo mínimo de la pared de la ranura. Las superficies de preparación deberán estar libres de aceite, grasa, suciedad, óxido, escoria, o arena del sand blasteado o cualquier otro material que pueda afectar en la calidad de la soldadura. Especificar tipo de inspección de las superficies ejemplo, inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas u otro.

### **7) Precalentamiento**

La temperatura de precalentamiento y de interpasos deberá mantenerse de acuerdo al rango establecido. Indicar temperatura mínima, máxima y si el precalentamiento se mantiene durante la soldadura o hasta que sea realizado el tratamiento térmico post soldadura. Si se aplica un precalentamiento localizado, se deberá indicar la temperatura, zona, distancias mínimas y dirección.

### **8) Posición de la soldadura**

Indicar la posición a utilizar, plana u horizontal, dependiendo de los parámetros de soldadura

### **9) Características eléctricas**

Indicar tipo de corriente, polaridad, frecuencia de pulso para la corriente pulsada.

Electrodo, o tipo de alambre, diámetro; indicar rangos de amperaje y voltaje. Para procesos que utilizan alambre indicar el diámetro, velocidad de alimentación y requerimientos de corriente

#### **10) Detalles de soldadura**

Se deberá indicar el ancho máximo del cordón depositado

Los cráteres deberán llenarse apropiadamente antes de la interrupción del arco

Remover escoria o fundente antes de iniciar el cordón o capa sucesivos.

Se deberá realizar inspección entre pasos de soldadura, indicar el grado de inspección requerida.

#### **11) Tratamiento térmico post soldadura**

El tratamiento térmico posterior a la soldadura deberá consistir de lo siguiente:

Indicar velocidades de calentamiento, temperatura de sostenimiento y cantidades.

Se deberá inspeccionar la soldadura terminada indicando el método y grado de inspección