



Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción



“Estudio Comparativo de la Aplicación
de los Procesos de Soldadura SMAW y
GMAW en las Uniones de Tuberías de
Transporte de Combustible”

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:
ANTONIO RIVADENEYRA CAMINO



Guayaquil - Ecuador

Año
2000



AGRADECIMIENTO

Al Sr. Ing. Omar Serrano V.
Director de Tesis por su
apoyo y colaboración para
la realización de este
trabajo.

A la empresa COLIMPO
por la colaboración y
logística de los equipos
para la elaboración de esta
tesis.

DEDICATORIA



A MI HIJO

MI ESPOSA

MIS PADRES

MIS HERMANOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Eduardo Rivadeneira P.
DECANO DE LA FIMCP



Ing. Omar Serrano V.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. José Pacheco M.
VOCAL DEL TRIBUNAL



Ing. Julián Peña E.
VOCAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Antonio Rivadeneyra Camino', written over a horizontal line.

Sr. Antonio Rivadeneyra Camino

RESUMEN

El sistema de transporte en la industria petrolera especialmente la que se dedica a los combustibles, se realiza mediante tubería de especificación API 5LX GRADO 42.

En el proceso de unión de estas tuberías se emplea el proceso de soldadura SMAW (de electrodo revestido) aplicando comúnmente con electrodos E6010, E7010 y E7018.

El presente trabajo consiste en el estudio comparativo de los procesos de soldadura SMAW y GMAW (de electrodo desnudo con gas protector) en la tubería de transporte de los derivados del petróleo.

En este estudio se tomará en cuenta los equipos a utilizar en cada uno de los procesos, la característica de la tubería como su soldabilidad. También se realizarán pruebas de dilución, inspección visual, inspección radiográfica, ensayos de tracción, ensayo de doblado y ensayo de dureza, en muestras de la tubería soldada con dichos procesos para efectuar una comparación en base a los resultados obtenidos.

En la parte final de este trabajo se realizará un estudio económico para determinar cual de los procesos de soldadura es el más conveniente tomando en consideración también los resultados de la experimentación.

Las probetas realizadas mediante el proceso de soldadura SMAW proporcionaron una mayor dilución que las muestras donde se aplicó el proceso de soldadura GMAW, además las probetas obtenidas de los tubos soldados por el proceso SMAW poseen mayor resistencia a la tracción que las muestras soldadas por el proceso GMAW. Con relación al ensayo de dureza el material de aporte de las muestras del proceso GMAW tiene mayor dureza Rockwell B que las muestras del proceso SMAW. Los tubos soldados con el proceso SMAW donde se realizó la inspección radiográfica resultaron sin defectos, condición que no se observó en las muestras soldadas con el proceso GMAW.

El estudio económico determinó que el proceso GMAW es un 52% más económico que el proceso de electrodo revestido, además que el proceso SMAW es un proceso donde se tiene un desperdicio de aproximadamente del 40% del material consumible a diferencia del proceso GMAW, donde el desperdicio del material consumible fue apenas el 5%. También se determinó

que el proceso de soldadura GMAW es un proceso más rápido que el proceso de soldadura SMAW.

INDICE GENERAL

RESUMEN

INDICE GENERAL

ABREVIATURAS

SIMBOLOGIA

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN.....1

CAPITULO 1: PARTE TEÓRICA

1.1. PROCESO ELECTRODO REVESTIDO (SMAW).....	3
1.1.1. FUNDAMENTOS DEL PROCESO.....	3
1.1.2. EQUIPOS.....	7
1.1.3. MATERIALES CONSUMIBLES.....	13
1.1.4. APLICACIONES EN TUBERIAS SOLDADAS.....	18
1.2. PROCESO ELECTRODO DESNUDO (GMAW).....	22
1.2.1. FUNDAMENTOS DEL PROCESO.....	22
1.2.2. EQUIPOS.....	32
1.2.3. MATERIALES CONSUMIBLES.....	39
1.2.4. APLICACIONES EN TUBERIAS SOLDADAS.....	52



CAPITULO 2: PARTE EXPERIMENTAL

CA	2.1. MATERIALES A UTILIZARSE.....	54
	2.1.1. EQUIPOS Y MATERIALES DE TRABAJO.....	54
CONC	2.1.2. CARACTERISTICAS DE LA TUBERÍA.....	60
BIBLI	2.1.3. SOLDABILIDAD.....	63
AP	2.2. PARÁMETROS DE SOLDADURA.....	65
	2.3. PRUEBAS DE SOLDADURA.....	78
	2.3.1. ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	78
	2.3.2. DILUCIÓN.....	85
	2.3.3. INSPECCIÓN VISUAL.....	97
	2.3.4. INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA.....	99
	2.3.5. ENSAYO DE TRACCIÓN.....	102
	2.3.6. ENSAYO DE DOBLADO.....	105
	2.3.7. ENSAYO DE DUREZA.....	107
	2.4. ESTUDIO ECONÓMICO.....	111
	2.4.1. EQUIPOS.....	111
	2.4.2. MATERIALES CONSUMIBLES.....	113
	2.4.3. EFICIENCIA POR TIEMPO.....	114
	2.4.4. MANO DE OBRA.....	115

CAPITULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....116

A

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....128

BIBLIOGRAFÍA

APENDICES

AW

C

CC

CFE

CO

CP

C*

DC

DC*

UP

EP

FGY

F*

ABREVIATURAS

A	Amperios, unidad de corriente.
AC	Corriente alterna
API	Instituto americano de petróleo
ASME	Sociedad americana de ingeniería mecánica
AWS	Sociedad americana de soldadura
C	Carbono
CE	Carbono equivalente
CFH	Pie cúbico por hora, unidad de flujo.
CO₂	Dióxido de carbono
CP	Potencial constante
Cr	Cromo
DC	Corriente directa
DCEN	Corriente directa electrodo negativo, polaridad directa
DCEP	Corriente directa electrodo positivo, polaridad inversa
ERW	Soldadura por resistencia eléctrica
FCAW	Proceso de soldadura al arco por electrodo con núcleo fundente
Fe	Hierro

GMAW	Proceso de soldadura al arco por electrodo desnudo protegido por gas
GTAW	Proceso de soldadura al arco por electrodo de tungsteno y gas protector
H_{AC}	Calor suministrado
HRb	Dureza Rockwell b
I	Corriente
In	Pulgadas, unidad de longitud
IPM	Pulgadas por minuto, unidad de velocidad
KN	Kilo Newton, unidad de fuerza
Lbf	Libras fuerzas, unidad de fuerza
MIG	Proceso de soldadura al arco con gas inerte
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
NEMA	Asociación nacional de manufacturas eléctricas
O	Oxígeno
P	Fósforo
PAW	Proceso de soldadura al arco con plasma
PSI	Libras por pulgada cuadrada, unidad de esfuerzo
S	Azufre

SAE Sociedad americana de ingeniería

SMAW Proceso de soldadura al arco por electrodo revestido

v Velocidad de soldeo

V Voltios, unidad de voltaje

ZAC Zona afectada por el calor

OF

Tu

Td

W

SIMBOLOGIA

F	Factor de consumo de materiales consumibles
MO	Factor de mano de obra y equipos
OF	Factor de operación
Tu	Tiempo de soldadura
Td	Tiempo de parada
W	Factor de potencia

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades mecánicas de los electrodos recubiertos serie E60XX	Pág. 16
Tabla 2	Representación del cuarto dígito en los electrodos revestidos	17
Tabla 3	Número de cordones requeridos para soldadura de tuberías	18
Tabla 4	Especificaciones AWS para los electrodos desnudos para el proceso GMAW	41
Tabla 5	Parámetros de soldadura para el proceso GMAW en tuberías	53
Tabla 6	Composición química del material de aporte proceso SMAW	56
Tabla 7	Composición química del material de aporte proceso GMAW	59
Tabla 8	Composición química del material base	60
Tabla 9	Propiedades mecánicas de la tubería	60
Tabla 10	Designación de las muestras soldadas	65
Tabla 11	Parámetros de soldar para muestra T1 SMAW	66
Tabla 12	Parámetros de soldar para muestra T3 SMAW	Pág. 66

Tabla 13	Parámetros de soldar para muestra T4 SMAW	67
Tabla 14	Parámetros de soldar para las muestras GMAW	73
Tabla 15	Resultados de la características del cordón	86
Tabla 16	Procedimiento del revelado de las películas radiográficas	100
Tabla 17	Resultado de inspección por radiografía	101
Tabla 18	Resultados del ensayo de tracción	104
Tabla 19	Resultados de la prueba de doblado	106
Tabla 20	Resultados del ensayo de dureza para muestras SMAW	108
Tabla 21	Resultados del ensayo de dureza para muestras GMAW	108
Tabla 22	Costos de los componentes para el proceso SMAW	111
Tabla 23	Costos de los componentes para el proceso GMAW	112

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Circuito de soldadura para el proceso SMAW	Pág. 5
Fig. 2	Fundamentos de operación del proceso SMAW	6
Fig. 3	Relación de la corriente y la polaridad con la penetración	9
Fig. 4	Circuito de soldadura para el proceso GMAW	24
Fig. 5	Fundamentos en la operación del proceso GMAW	26
Fig. 6	Tipos de transferencia del metal en proceso GMAW	28
Fig. 7	Componentes de la pistola refrigerada por aire	38
Fig. 8	Equipo de soldar utilizado para el SMAW	55
Fig. 9	Equipo de soldar utilizado para el proceso GMAW	58
Fig. 10	Tubo API 5LX42 de 10 in y 3/8 in de espesor	61
Fig. 11	Preparación de la junta y colocación de alineadores	62
Fig. 12	Realizando soldadura en tuberías con proceso SMAW	68
Fig. 13	Gráfico corriente VS voltaje para muestra T1 SMAW	69
Fig. 14	Gráfico corriente VS voltaje para muestra T3 SMAW	70
Fig. 15	Gráfico corriente VS voltaje para muestra T4 SMAW	71
Fig. 16	Gráfico corriente VS voltaje para las muestras SMAW	72
Fig. 17	Realizando soldadura en tuberías con proceso GMAW	74
Fig. 18	Gráfico corriente VS voltaje para muestra T2 GMAW	75
Fig. 19	Gráfico corriente VS voltaje para muestra T5 GMAW	Pág. 76



Fig. 20	Gráfico corriente VS voltaje para muestra T6 GMAW	77
Fig. 21	Microestructura de la junta soldada para la muestra T2	80
Fig. 22	Macrofotografía para las muestras T1 y T2	81
Fig. 23	Macrofotografía para las muestras soldadas por GMAW	82
Fig. 24	Macrofotografía para las muestras soldadas por SMAW	83
Fig. 25	Macrofotografía para la muestra T8	84
Fig. 26	Representación gráfica de la soldadura para el calculo de la dilución	85
Fig. 27	Gráfico calor suministrado VS Dilución para muestras SMAW	87
Fig. 28	Gráfico calor suministrado VS Dilución para muestras GMAW	88
Fig. 29	Gráfico calor suministrado VS ancho de la ZAC para muestras SMAW	89
Fig. 30	Gráfico calor suministrado VS ancho de la ZAC para muestras GMAW	90
Fig. 31	Gráfico corriente VS ancho del cordón para muestras SMAW	91
Fig. 32	Gráfico corriente VS ancho del cordón para muestras GMAW	92
Fig. 33	Gráfico voltaje VS ancho del cordón para muestras SMAW	93
Fig. 34	Gráfico voltaje VS ancho del cordón para muestras GMAW	94
Fig. 35	Gráfico calor VS ancho del cordón para muestras SMAW	Pág. 95

Fig. 36	Gráfico calor VS ancho del cordón para muestras GMAW	96
Fig. 37	Realizando la limpieza del cordón terminado para ejecutar la en inspección visual	98
Fig. 38	Equipo de ensayo por radiografía de la tubería soldada	99
Fig. 39	Probetas para la prueba de tracción bajo norma ASME	102
Fig. 40	Dimensiones de las probetas de tracción	103
Fig. 41	Dimensiones de las probetas para el ensayo de doblado	105
Fig. 42	Realizando prueba de doblado	106
Fig. 43	Muestras empleadas en el ensayo de dureza	107
Fig. 44	Gráfico barrido de dureza VS posición de la muestra SMAW	109
Fig. 45	Gráfico barrido de dureza VS posición de la muestra GMAW	110

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata del estudio comparativo de procesos de soldadura en una tubería del sistema de poliductos de la costa. Los procesos a estudiarse son el de electrodo revestido (SMAW) y el de electrodo desnudo continuo sólido protegido por gas (GMAW), comúnmente llamado MIG.

Actualmente el único proceso de soldadura utilizado en el sistema de poliductos es de soldadura por electrodo revestido (SMAW), el cual involucra mucho tiempo en la reparación y mantenimiento de la tubería, tiempos en que los derivados del petróleo no pueden ser bombeados a las subestaciones, ni a las plantas de distribución.

Por este motivo es importante el comparar la soldadura de electrodo revestido con un proceso de soldar mas rápido y eficiente que sería una de las soluciones a este problema. El proceso GMAW es un proceso con altas tasas de deposición de material de aporte, por lo que es más rápido el proceso de soldadura. Se debe considerar los equipos a emplearse para la realización de este proceso, además de otros factores como la accesibilidad de mano de obra calificada, materiales consumibles, soldabilidad de la tubería. Se realizará ensayos de tracción, doblado, inspección visual, radiografía industrial, etc., en cada una de las tuberías soldadas con los

procesos a comparar para determinar la fidelidad de cada uno de los procesos. En la parte final se elaborará un estudio económico y se obtendrá cual es el proceso más conveniente. Se proporcionará entonces conclusiones y recomendaciones tomando en cuenta todos los análisis realizados.

CAPÍTULO 1

PARTE TEORICA

En esta sección, se desarrollará todo lo relacionado con los fundamentos teóricos de los dos procesos a compararse, la teoría del proceso de electrodo revestido (SMAW) y de electrodo desnudo protegido por gas (GMAW), los equipos que deben ser empleados, los materiales fungibles, y su aplicación en la tubería.

1.1 Proceso de electrodo revestido (SMAW).

1.1.1 Fundamentos del proceso.

“Soldadura de arco es el proceso de unir dos o mas metales mediante la coalescencia o junta sobre una cara de contacto por medio del calor de un arco eléctrico.” (Ref. 1).

El proceso de electrodo revestido (SMAW) se emplea un alambre de metal sólido de material estirado o colado que se denomina núcleo del electrodo, el cual se encuentra recubierto por un polvo fundente.

El arco se enciende luego de un pequeño contacto entre la punta del electrodo y el material base ya que estos se encuentran conectados mediante un circuito eléctrico, el arco eléctrico atraviesa una zona de aire comprendida entre el electrodo y la pieza de trabajo, el mismo que genera calor, entonces las superficies adyacentes quedan fundidas, lo que permite la unión del material de aporte y el o los materiales bases.(Fig. 1).

El recubrimiento del electrodo produce características físicas y mecánicas que igualan o superan a la del metal base, además de crear un medio de protección a la unión soldada, dejando sin efecto la formación de óxidos y nitruros del medio ambiente, los cuales tienen baja resistencia a la tensión y poca ductibilidad. El revestimiento consiste en una mezcla de silicatos, polvos de fluoruros, carbonatos, óxidos, aleaciones de metal y celuloso. El recubrimiento tiene la propiedad de aislar el alambre o núcleo del material base o pieza de trabajo, además controla el arco en las diferentes posiciones de soldar para las diversas aplicaciones en la industria. Este recubrimiento debe tener un punto de fusión más bajo que la del núcleo y que el metal base. El revestimiento quemado, forma gases y escoria para cubrir el metal de soldadura depositado, protegiendo la soldadura de los agentes oxidantes de la atmósfera, y controlando el enfriamiento de la junta soldada hasta

temperaturas que no permitan la formación de óxidos. La escoria debe tener una densidad mas baja para que pueda ser expulsada rápidamente y en su totalidad de junta soldada al enfriarse.(Fig.2).

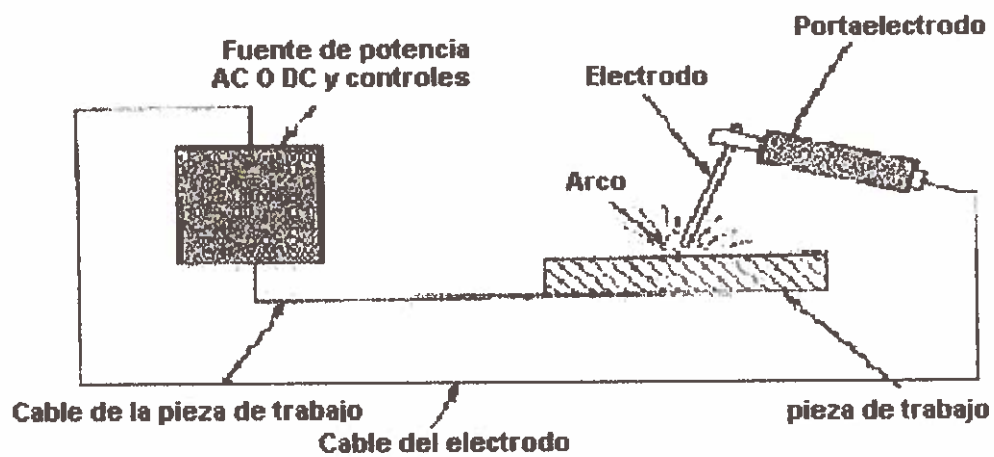


Fig. 1 Circuito de soldadura para el proceso SMAW (Ref. 1)

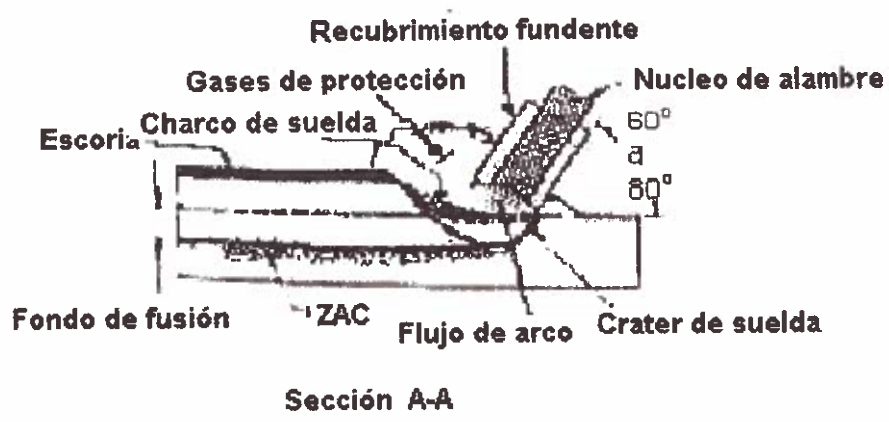
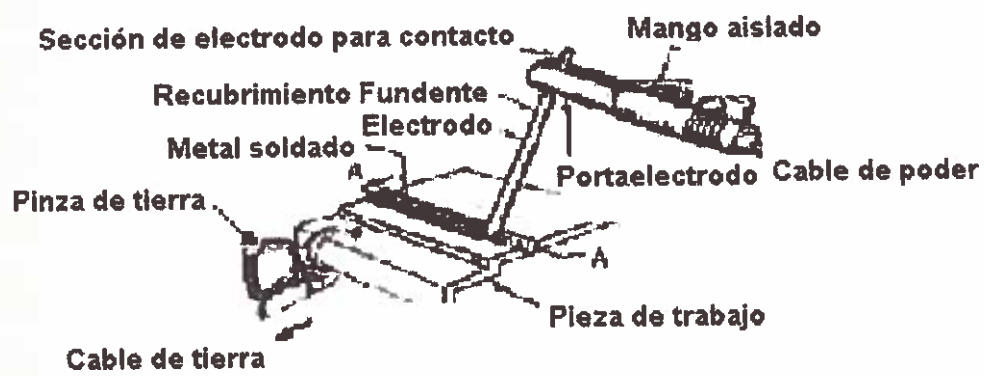


Fig. 2 Fundamentos de operación del proceso SMAW. (Ref. 2)

1.1.2 Equipos

El proceso de soldadura con electrodo revestido, requiere de un suministro continuo y en cantidades suficientes de corriente eléctrica con voltajes apropiados para mantener el arco de soldadura. Esta corriente debe ser suministrada por medio de un control preciso para obtener una máxima eficiencia en la soldadura aplicada, este suministro controlado se denomina fuente de poder. Hay varios tipos y tamaños de fuentes de poder que son utilizadas en el proceso SMAW y son seleccionadas básicamente por los rangos de salida de corriente necesarios para las diferentes aplicaciones de la soldadura de electrodo revestido. La corriente de salida es alterna (AC) o directa (DC) y ambas corrientes producen resultados aceptables para soldaduras en aceros al carbono, pero el tipo de corriente y en caso de la corriente directa la polaridad si tiene influencia directa en la profundidad de la penetración. Tenemos la polaridad directa o electrodo en el polo negativo (DCEN), donde la fusión y las tasas de deposición son más altas que la de polaridad inversa o electrodo positivo (DCEP), mientras la penetración es superficial y angosta, los esfuerzos no son tan severos y existe poca probabilidad a los agrietamientos, este tipo de polaridad es ideal para soldar laminas delgadas de metal y para piezas de trabajo que son muy factibles a la distorsión en el proceso de soldadura, ya que la mayor cantidad de calor se encuentra concentrado en el electrodo, dando lugar a soldaduras más rápidas. Para la polaridad inversa o electrodo positivo (DCEP), produce una

máxima penetración y este tipo de polaridad es la mejor opción para pases de raíz y soldaduras fuera de posición. (Fig. 3). (Ref. 2).

Los
que
inver
com
La fo
real
por
0 44
bi
Un
de
es
util
de
di
a V
2
3
4
5

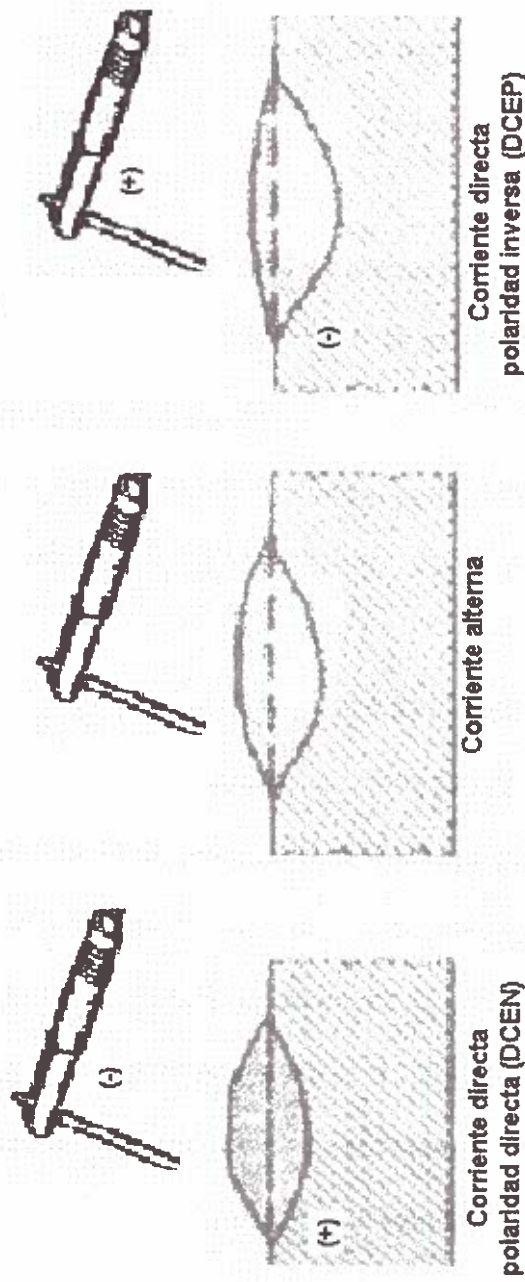


Fig. 3 Relación de la corriente y la polaridad con la penetración (Ref. 2)

Los equipos para soldar más simples constan de un transformador, y otros que tienen transformador rectificador, generador de motor eléctrico, de tipo inversor y otras que poseen componentes movidos por motores de combustión interna.

La fuente de potencia de tipo eléctrica, como la que posee transformadores requiere una alimentación primaria de energía, esta es la energía entregada por el sistema de distribución local o línea de poder y puede ser de 115, 220 o 440 voltios monofásica o trifásica. El amperaje de entrada es relativamente bajos en comparación con la corriente de salida de las maquinas de soldar.

Una fuente de poder simple es un transformador que convierte una corriente de alto voltaje y bajo amperaje, en una de bajo voltaje y alto amperaje el cual es necesario para la soldadura. Este bajo voltaje es mas fácil y seguro de utilizar en el proceso de soldar. Así por ejemplo una simple fuente de poder de corriente alterna (AC) se abastece de el voltaje de entrada de 220 voltios de la línea de poder, el selector del equipo hace posible que el operador ajuste el amperaje deseado para su trabajo, así por ejemplo una corriente de 225 amperios para un electrodo revestido de diámetro 3/16 pulgadas. En relación a la fuente de poder que entrega corriente directa (DC), se tiene un funcionamiento similar, esta también se alimenta de la línea de poder por el voltaje dado por el sistema de distribución eléctrica, y este pasa por el



transformador y luego por el rectificador, el mismo que cambia la corriente alterna a corriente directa, entonces de la misma manera se selecciona el amperaje de salida de la maquina según el tipo de soldadura que se vaya realizar.

Los

El escogimiento de la fuente de poder se realiza mediante los siguientes factores de influencia.

- NE • Tipo de corriente de alimentación.
- La • Disponibilidad del espacio físico en el caso de las industrias.
- tra • Costos del equipo.
- sig • Tipo de trabajos a realizar (trabajo de campo o trabajo en taller).
- CU • Disponibilidad del personal del mantenimiento y reparación.
- fue • Versatilidad del equipo, equipo multiproceso, etc.
- tra • Amperaje máximo de salida.
- NE • Ciclo de trabajo
- NE • Estabilidad del arco y
- se • Componentes de seguridad y seguridad de trabajo.

Una de las clasificaciones de las fuente de poder es de acuerdo a la capacidad de salida de amperios, esta capacidad viene establecida mediante normas proporcionadas por la NEMA (Asociación Nacional de Manufacturas Eléctricas). Estas normas son constituidas por una base de seguridad del

equipo, luego de una evaluación por debajo de la capacidad máxima de sobrecarga que entrega el equipo en un funcionamiento seguro y eficaz por un tiempo determinado.

Los

Los valores vienen dados por medio de los ciclos de trabajo. El ciclo de trabajo es un porcentaje de una base de diez minutos el cual puede operar a una corriente ya establecida de manera segura y eficiente. De esta manera NEMA clasifica en tres grupos las fuentes de poder:

La clase I la cual se denomina a las fuentes de poder que tienen un ciclo de trabajo del 60, 80 y 100% entonces el equipo deberá ir marcado con la siguiente designación NEMA Clase I (60) , NEMA Clase I (80) o NEMA Clase I (100) respectivamente. La segunda clasificación Clase II es para las fuentes de poder que poseen desde el 30, 40, y hasta el 50% de ciclo de trabajo e irán marcadas como NEMA Clase II (30), NEMA Clase II (40) , o NEMA Clase II (50) respectivamente y por ultimo la tercera clasificación de NEMA es para las fuentes de poder que tienen un ciclo de trabajo del 20% y se las denominará como NEMA Clase III (20).

1.1.3 Materiales consumibles

Los materiales consumibles como su nombre lo indica son aquellos materiales que se van desgastando durante la realización del proceso de soldadura. Así tenemos el electrodo revestido, para el proceso SMAW. Todos estos materiales fungibles se encuentran bajos las especificaciones de la AWS (Sociedad Americana de Soldadura).

Esta especificación para los electrodos es de la serie AWS A5.X la misma se establece de la siguiente forma:

- Electrodo recubierto para soldadura de arco, de acero al carbono:
A5.1
- Varillas de soldadura de hierro y acero para soldar con gas: A5.2
- Electrodo de aluminio y aleaciones de aluminio para soldadura de arco: A5.3
- Electrodo recubierto para soldaduras de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión: A5.4
- Electrodo recubierto para soldadura de arco, de acero con bajo contenido de aleación: A5.5
- Electrodo de cobre y aleaciones de cobre para soldadura de arco:
A5.6
- Electrodo de cobre y aleaciones de cobre para soldar : A5.7

- Metal de aporte para soldadura fuerte: A5.8
- Varillas de soldadura y electrodos desnudos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión: A5.9
- Varillas de soldadura y electrodos desnudos de aluminio y aleaciones de aluminio: A5.10
- Electrodos recubiertos de soldadura para níquel y aleaciones de níquel: A5.11
- Varillas de soldadura y electrodos para recubrimientos superficiales: A5.13
- Varillas desnudas de soldadura y electrodos desnudos de níquel y aleaciones de níquel: A5.14
- Varillas de soldadura y electrodos recubiertos para soldar hierro fundidos: A5.15
- Varillas desnudas y electrodos desnudos para titanio y aleaciones de titanio: A5.16
- Electrodos de soldadura para aceros al carbono, y fundentes para soldadura de arco sumergido: A5.17
- Electrodos de aceros al carbono para soldadura de arco metálico con gas protector: A5.18
- Varillas de soldadura y electrodos desnudos de aleaciones de magnesio: A5.19

- Electrodo de acero al carbono para soldadura de arco, con núcleo fundente: A5.20
- Varillas de soldadura y electrodos compuestos para recubrimientos superficiales: A5.21. (Ref. 3).

Los electrodos usados en el proceso SMAW tienen diferentes composiciones en el alambre del núcleo, aunque para electrodos de las series E-60XX son de acero al carbono SAE 1010 con un contenido de carbono que va desde 0.05 hasta 0.15%, así también una amplia variedad de tipos y espesores del recubrimiento fundente. Los electrodos normalizados tienen un diámetro desde 1/16 hasta 5/16 de pulgada, las longitudes poseen un intervalo desde 9 hasta 18 pulgadas, aunque cuando existen electrodos para aplicaciones especiales que tiene longitudes superiores a las 36 pulgadas. Los electrodos recubiertos tienen una longitud desnuda aproximadamente de 3/4 a 1½ de pulgada que provee el buen contacto eléctrico entre el portaelectrodo y el electrodo propiamente dicho.

Con relación a la especificación A5.1 electrodos recubiertos para soldadura de arco de aceros al carbono, la especificación comprende los requerimientos de las propiedades mecánicas mínimas, que se muestran en la siguiente tabla 1. (Ref. 4).

Tabla I. Propiedades mecánicas de los electrodos recubiertos serie E60XX.

(Ref. 4).

Clasificación AWS	Resistencia a la Tensión (psi)	Punto de fluencia (psi)	Porcentaje de elongación (%)
E6010	60.000	48.000	22
E6011	60.000	48.000	22
E6012	60.000	48.000	17
E6013	60.000	48.000	17
E6020	60.000	48.000	22

La clasificación de los electrodos revestidos para aceros al carbono de acuerdo al sistema designado por la AWS es el más utilizado en la industria. Este sistema consiste en la designación de la letra "E" por electrodo y cuatro dígitos para los esfuerzos del material depositado menores a los 100 Kpsi, por ejemplo para soldadura E6010, los primeros dos dígitos indican el esfuerzo máximo a la tensión, en este caso sería 60.000 psi de resistencia, en condiciones simples y posteriores al soldeo. Los siguientes tres dígitos indican la posición de soldadura en la cual el electrodo puede ser utilizado de la forma más apropiada. De esta manera tenemos EXX1X, la cual indica todas las posiciones; también encontramos EXX2X que revela que este electrodo deberá ser utilizado solo en posición plana y horizontal en soldadura de filete; y por último los electrodos que poseen la siguiente

designación EXX4X corresponde solo para soldadura vertical descendente. El cuarto dígito nos presenta el tipo de recubrimiento y las características de corriente más favorables para el electrodo. (Tabla 2).(Ref. 2)

Tabla II Representación del cuarto dígito en los electrodos revestidos (Ref. 2)

Cuarto dígito	Tipo de Revestimiento	Tipo de Corriente
0	Alto celulosa	DCEP
1	Alto celulosa, potasio	AC o DCEP
2	Alto titanio, sodio	AC o DC
3	Alto titanio, potasio	AC o DC
4	Polvo de hierro, titanio	AC o DC
5	Bajo hidrógeno, sodio	DCEP
6	Bajo hidrógeno, potasio	AC o DCEP
7	Polvo de hierro, oxido de hierro	AC o DC
8	Polvo de hierro, bajo hidrogeno	AC o DCEP

Donde la corriente directa electrodo positivo o llamada también polaridad inversa (DCEP) es una de las más empleadas, sin embargo cuando solo mencionamos el tipo de corriente sin la especificación de la polaridad, se puede entender que este electrodo revestido puede ser empleado con cualquier polaridad y otorgar resultados favorables en la soldadura.

De esta forma se puede identificar a los electrodos para aceros al carbono, y su recubrimiento. Para el cuarto dígito 0, se tiene un revestimiento de alto contenido de celulosa y cubierto con sodio, el cual brinda una cementación

en el metal fundido, además de ser un agente fundente el cual debe ser utilizado con corriente directa y polaridad inversa.

1.1. 4. Aplicaciones en tuberías soldadas

La aplicación de este proceso de soldar en los sistemas de tuberías, se realiza mediante la técnica de vertical descendente. Este técnica lleva a la utilización de corrientes elevadas y altas velocidad de traslación del electrodo, para realizar soldaduras de varios cordones de pequeña sección. (Tabla 3).(Ref. 4)

x Tabla III Número de cordones requeridos para soldadura de tuberías. (Ref. 4)

Espesor de la tubería en pulgadas	Número de pases
1 / 4	3
5/16	4
3/8	5
1/2	7

Para tuberías de más de 16 pulgadas de diámetro el empleo de alineadores se vuelve necesario para proporcionar un desalineamiento máximo de 1.6 milímetros, si dichos mecanismos fallan o no son utilizados, el corregir estos grandes desordenes será a base de martillazos, lo cual no es recomendado y solo dependería el éxito de la junta soldada de la habilidad del soldador.

Puesto que la soldadura en tuberías es reconocida como una aplicación especializada, los electrodos deben estar designados especialmente para técnicas vertical descendente para soldadura de tuberías. Estos electrodos especiales entonces tendrán una designación tipo EXX10.

La preparación de la junta debe estar bajo las normas ya establecidas como la API 1104. Para tubería hasta de 10 pulgadas de diámetro deben tener un bisel de $30^\circ \pm 5^\circ$, un talón de $1.6 \text{ mm} \pm 0.8 \text{ mm}$, y una separación de raíz de $1.6 \text{ mm} \pm 0.8 \text{ mm}$.

La limpieza de las tuberías es muy importante ya que esta puede ocasionar futuros desperfectos en la soldadura, los tubos vienen por lo general cubiertos con una variedad de revestimientos para su protección a la corrosión y estos pueden ser breas, resinas epoxicas, papel, barniz, etc. Si se trabaja con tubería almacenadas estas pueden estar afectadas de algún tipo de productos de corrosión, humedad, contaminantes orgánicos, etc. Una inapropiada limpieza en los extremos a unir darán como resultado reparaciones costosas y pérdida de tiempo. La limpieza de la junta es esencialmente importante en el pase de raíz, una buena guía para la limpieza de la junta se muestra a continuación y se obtendrá soldaduras con resultados favorables.

1. Humedad y condensaciones de cualquier tipo deben ser eliminadas por completo.
2. Limpiar los extremos a unir tanto interior como exteriormente tomando en cuenta un ancho de por lo menos de 25 mm desde el borde del bisel.
3. Esta limpieza se debe realizar mediante herramientas eléctricas como esmeriladoras utilizando cepillos o abrasivos.

Pase de raíz, se debe emplear un electrodo del diámetro adecuado según el diámetro de la tubería a soldar. Para tuberías de diámetro de 10 pulgadas con espesores de hasta 3/8 de pulgada, se recomienda electrodos de 1/8 de pulgada. Así entonces luego de que el tubo se encuentra preparado y alineado se procede a soldar. Esta soldadura se tendrá que realizar con dos soldadores, los cuales se encuentren trabajando en los extremos opuestos de la circunferencia a soldar, para reducir la distorsión de la junta y mantener uniforme la separación de los bordes, además el electrodo debe ser arrastrado y llevado desde la cima de la tubería cuesta abajo hasta el fondo de la misma, para el soldador que inicia el proceso en la cúspide del tubo. Manteniendo correctas la preparación de la junta y una técnica bien

empleada, la corriente debe ajustarse hasta que sea visible un pequeño orificio posterior al charco de soldadura llamado "ojo de cerradura".

Demasiada baja la corriente puede ocasionar insuficiente penetración o una pobre fusión. Para corrientes muy elevadas pueden causar perforaciones o depósitos globulares de tipo "uva" en el interior del tubo, o socavación externa llamadas "huellas de carreta" o en su defecto socavación interna las únicas que pueden ser reparadas solo por el interior del tubo.

Pase caliente, este es el pase siguiente del pase de raíz el cual debe ser totalmente limpiado con cepillos y discos abrasivos para eliminar los arranques, y las zonas muy convexas mejorando así el contorno del cordón, la socavación muy marcada debe ser eliminada. La corriente a emplearse será suficiente para eliminar totalmente las huellas de carreta y hacer flotar la escoria que se encuentre atrapada en la superficie. La aplicación de este pase se realizara lo más pronto posible después del pase de raíz, y no más allá de los próximos 5 minutos.

Pase de relleno, el pase se debe realizar con un ligero tejido, solo para mantener la fusión en los extremos del bisel, este cordón se lo realizará hasta que llegue al nivel o casi al nivel de la parte superior de la junta, en la parte superior y el fondo del tubo, aunque se requiera más pasadas en las secciones de la tubería que se encuentren entre las 2 y 5 en punto, estas



pasadas son llamadas "costillazo" y se aplican hasta llegar al mismo nivel de las otras secciones de la tubería.

Pase de recubrimiento, el cual es el último pase de la junta soldada, y debe encontrarse entre 1/32 hasta 1/16 de pulgada superior a la superficie de tubería y una solapa de 1.5 mm a los extremos del bisel. La mejor distribución de las tensiones se logra haciendo esta pasada lo más estrecha posible, oscilando el electrodo, lo que también reduce el riesgo de porosidad en la superficie del cordón y ofrece una buena presentación de la junta.

1.2 Proceso de electrodo desnudo (GMAW).

1.2.1 Fundamentos del proceso.

El proceso de soldar con electrodo desnudo continuo (alambre) protegido por gas (GMAW), muchas veces llamado MIG (Metal con gas inerte), termino erróneamente utilizado, ya que en la actualidad este proceso no solo se aplica con gases inertes. Es un proceso de soldadura de arco en el cual el calor de suelda es generado por un arco de el electrodo desnudo continuo entre el material de aporte y la pieza de trabajo, el mismo que se encuentra protegido de los agentes contaminantes por un gas suministrado externamente y sin aplicación de presión. El electrodo es un alambre sólido desnudo que se alimenta de forma continua hacia el área de soldadura. El gas o la mezcla de gases protegen al electrodo, el arco, y el charco, de los

óxidos y nitruros de la atmósfera, este gas es alimentado por medio de la pistola.

Este proceso de soldar se puede realizar básicamente por tres diferentes formas, la semiautomática, mecanizada y la automática. El modo semiautomático es el método más popular para la aplicación de este proceso y consiste en que por medio de un equipo de control el electrodo desnudo se alimenta al área de soldadura y el soldador solo guía la pistola, la longitud del arco se mantiene por medio de una fuente de poder. El método mecanizado es donde la pistola se encuentra conectada a un manipulador de algún género, por lo que no necesita la mano del soldador, el operador se limita al control los dispositivos de longitud de arco, alimentación del alambre y la dirección de la junta, estos son todos los parámetros del proceso de soldadura, por esta razón es el modo menos utilizado ya que se necesita de un operador con mucha experiencia y habilidad para manejar de forma óptima estos controles. En el modo de la aplicación automática los equipos controlan todos los parámetros de soldadura de manera automática, esto es longitud del arco, alimentación del alambre, y dirección de la junta, este parámetro en algunos casos se controla mediante dispositivos sensitivos.

El circuito de soldadura para este proceso de soldar consiste en un fuente de poder, un sistema de alimentación de alambre, la pistola, la fuente que

proporciona el gas protector, cables de conexión y mangueras para la transmisión del flujo de gas. (Fig. 4). (Ref. 5).

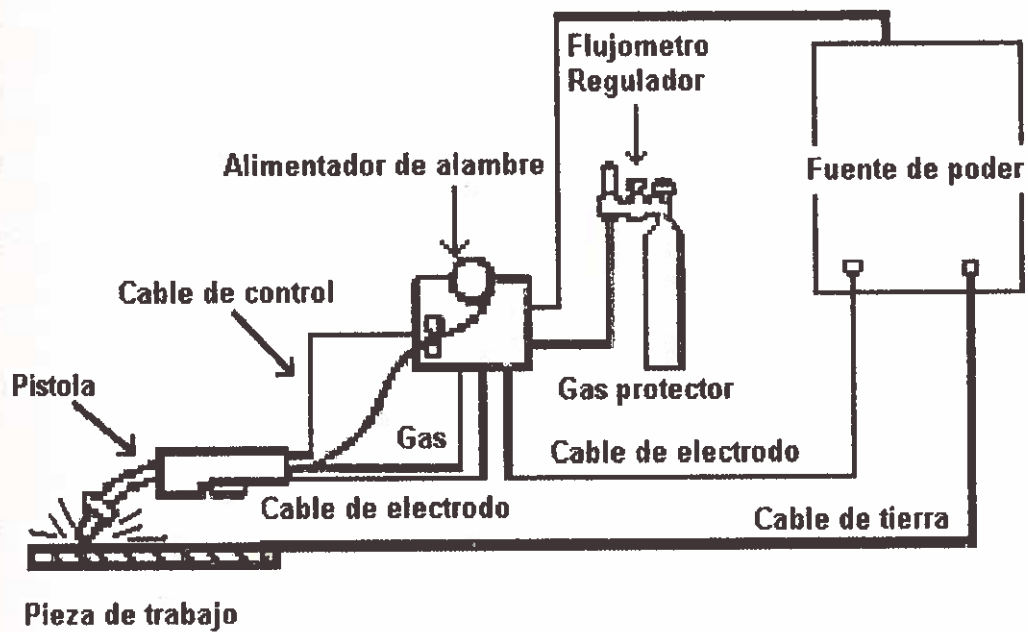


Fig. 4 Circuito de soldadura para el proceso GMAW. (Ref. 5).

El arco eléctrico es producido por el paso de la corriente por medio de un gas que se ioniza por la presencia del flujo de corriente . Se disuelven los átomos y las moléculas del gas e ionizan a los electrones perdidos y abandonan una carga positiva. Los iones positivos del gas entonces fluyen desde el polo positivo al polo negativo, y los electrones fluyen desde el polo negativo hacia el polo positivo. Alrededor del 95% de el calor es transportado por los electrones, y el resto es transportado por los iones positivos. El calor del arco funde la superficie del metal base y el electrodo. La soldadura fundida, las zona de soldadura caliente, y el electrodo son protegidos de la atmósfera por el gas. El electrodo fundido se traslada a través del arco y entra al charco de soldadura. Produciendo un arco con mayor intensidad de calor que muchos de los procesos de soldadura por arco. (Fig. 5).(Ref. 1).

Se enciende el arco por el inicio de la alimentación del alambre activada por el gatillo de la pistola, entonces el electrodo toca la pieza de trabajo, normalmente el arco viaja a través de la pieza de trabajo y no se inicia el arco hasta que el charco de soldadura se forme. La pistola entonces se mueve a lo largo de la junta manualmente o mecánicamente para que los bordes adyacentes se fundan. El metal soldado se solidifica detrás del arco en la junta y así se completa el proceso de soldar.

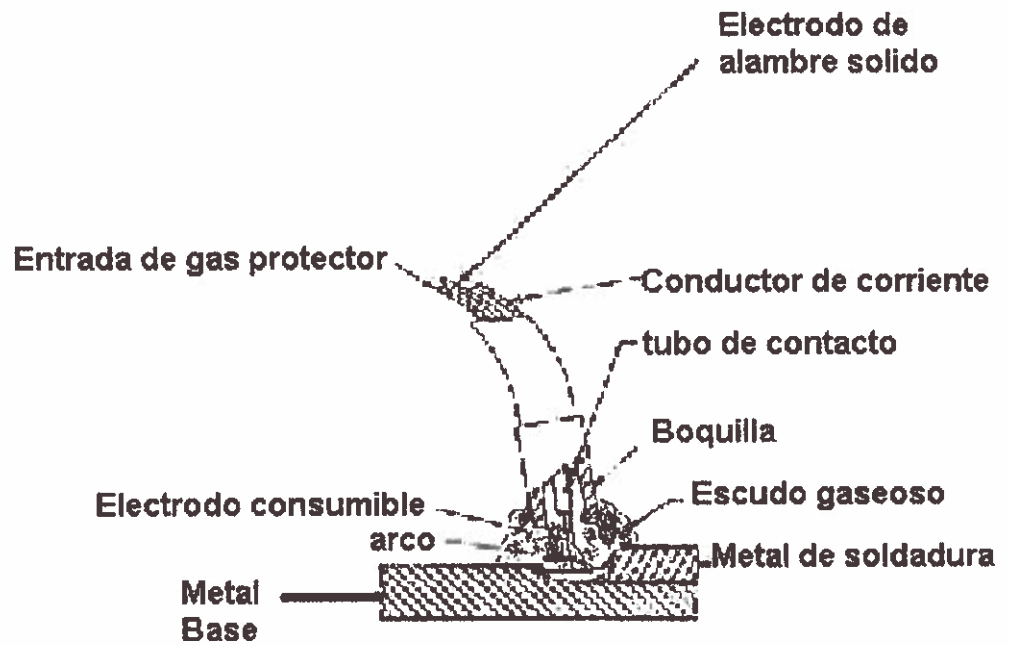


Fig. 5 Fundamentos en la operación del proceso GMAW. (Ref. 1).

El tipo de arco que se obtiene en este proceso viene dado por el modo de transferencia del metal. Estos modos de transferencia son:

- Spray
- Globular
- Corto circuito y
- Spray-pulsado.

El modo de transferencia tipo **spray** es un flujo axial de diminutas gotas, mucho más pequeñas que el diámetros del electrodo continuo, las diminutas gotas atraviesan el arco hacia el charco de soldadura, las finas gotas son emanadas desde la punta del alambre que se estrangula, una gota sigue a la otra, de manera consecutiva sin estar conectadas, los diámetros de las gotas varían de tamaño, se puede decir que todo el tiempo el arco esta sobre el flujo de gotas, una vez que el arco se ha estabilizado.(Fig. 6).

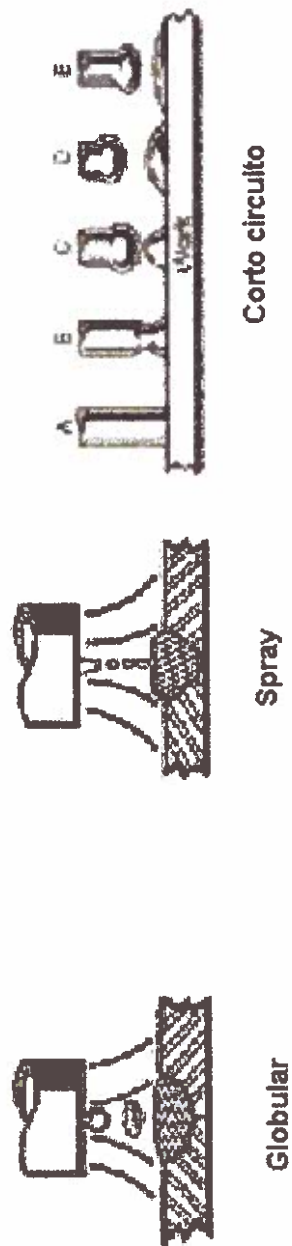


Fig. 6 Tipos de transferencia del metal en el proceso GMAW (Ref. 5)

En la transferencia de este tipo los voltajes utilizados son relativamente altos, la velocidad del alambre y los valores de amperaje son comparados a la transferencia del tipo corto circuito, dando como resultado una densidad de corriente alta, entonces tenemos altas de transmisión de calor, máxima penetración, y muy altas tasas de metal depositado. El tipo spray ocurre generalmente con argón como gas protector, o alguna mezcla de gas rica en argón, indicando además que con gases que tengan más que al 10 al 15% de dióxido de carbono no se puede lograr esta transferencia, por mantener altas tasas de deposición en la soldadura en acero, generalmente esta limitado a la posición plana y horizontal, en soldadura de filete horizontal se puede realizar un solo pase y obtener un buen cordón, sin embargo es importante mencionar que brinda poco chisporroteo ayudando a la limpieza posterior del cordón soldado.

La transferencia **globular** sucede en bajas densidades de corriente y se caracteriza por la formación de una larga gota en la sección final del electrodo continuo llamada "glóbulo", por este motivo el nombre de este tipo de transferencia. La gota se forma en el final del alambre y se estrangula hasta que la fuerza de gravedad supera la tensión superficial del glóbulo, y en ese momento cae al charco de soldadura. (Fig. 6) Este tipo de transferencia se puede producir con todos los tipos de gases protectores, pero no puede ser aplicado en soldadura fuera de posición. Si es utilizado en

soldadura sobre cabeza, la gota de metal fundido caerá dentro de la boquilla de la pistola. Con relación a los parámetros de soldadura como el voltaje, amperaje, y la velocidad de alimentación, son algo altos con relación a las de transferencia en corto circuito. Una de las aplicaciones más comunes es en los aceros de bajo contenido de carbono y como gas protector el dióxido de carbono (CO_2), tomando en cuenta que el CO_2 es un gas mucho más económico que el argón o alguna de sus mezclas, sin embargo la utilización de este gas nos produce buena penetración, el modo globular produce mayor salpicadura, lo que un efecto poco deseable de este tipo transferencia.

Otro tipo de transferencia del metal es el de **corto circuito** y es usada en muchas de las aplicaciones del proceso de soldadura GMAW. Este modo es especialmente bueno en secciones delgadas, tapando aberturas en raíces anchas y para soldaduras fuera de posición, ya que tiene poca transmisión de calor, por lo que es poco utilizado en espesores gruesos. Este tipo de transferencia obtiene este nombre porque el electrodo continuo crea corto circuito tocando al metal base muchas veces por segundo, el alambre se alimenta y pasa por la pistola y el arco y posteriormente chocando a la pieza de trabajo, sin existir transferencia a través del arco, el en curso del proceso de soldadura este ciclo se puede repetir entre unas 20 y 250 veces por segundo, un promedio de las condiciones reales de soldadura se mantiene entre 90 y 150 toques por segundo, el número de cortos circuitos depende de

los parámetros de soldadura, pero entre mayor alimentación de alambre mayor serán los contactos por segundo entre el electrodo y el charco de soldadura.

En la Figura 6, en la sección de la transferencia por corto circuito presentamos la secuencia de este tipo de transmisión, en la parte A el electrodo toca la pieza de trabajo, sin hacer arco y la corriente fluye a través del alambre y pieza de trabajo, en B el calor generado por el flujo de corriente, causa un flujo magnético sobre el electrodo continuo, las propiedades del alambre dificulta el flujo de corriente, creando así una resistencia, produciendo calor, lo que hace perder resistencia dando paso al campo magnético y el electrodo pierde resistencia y se estrangula, en la parte C el alambre empieza a separarse por medio de la gravedad y la tensión superficial, para formar el charco de soldadura y una pequeña porción del alambre es depositado extinguiéndose el arco, finalmente este se separa completamente por fuerza que lo oprime, las cantidades y la dureza del apriete son controladas por la fuente de poder.

La transferencia por corto circuito es usualmente asociada con bajas densidades de corriente y mas bien exactos voltajes de arcos fijos, esto es para soldaduras de aceros y utilizando como gas protector CO_2 a un

amperaje de 120, una buena transferencia requerirá un voltaje de arco sobre los 19 a 20 voltios.

El tipo de transferencia por **spray pulsado**, es un modo de transferencia spray que ocurre mediante pulsos en espacios más bien aleatorios y son suministrados por las fuentes de poder que son especiales las cuales son muy difíciles de encontrar en nuestro mercado, por esta razón no ilustraremos en detalle este tipo de transferencia.

1.2.2. Equipos

Como se mencionó en la sección anterior este proceso de soldar, se puede realizar mediante tres formas mecanizada, automática y semiautomática, solo se ilustrará aquí con relación a la manera semiautomática ya que es la más popular, y las otras dos formas se podrían realizar agregando accesorios como mecanismos transversales, y vigas de apoyo o carril para aplicación automática.

Los componentes básicos para la elaboración del proceso de soldadura son:

- Fuente de poder
- Sistema de alimentación del alambre
- Sistemas de control

- Sistema de alimentación del gas protector, incluyendo mangueras y reguladores de flujos y
- Pistola de soldar.

La fuente de poder, es una fuente de corriente eléctrica, la misma que es obtenida por un transformador rectificador, ya que la corriente alterna es muy raramente utilizada en este tipo de proceso. La corriente continua en el electrodo positivo es la más comúnmente utilizada y en casos en que la profundidad de penetración sea mínima se conectará el electrodo al polo negativo de la salida de corriente de la maquina (DCEN). Como en el proceso SMAW la corriente eléctrica puede ser generada, o transformada ya sea por motores de combustión interna, componentes rotatorios, o por un transformador eléctrico que requiere una fuente primaria de energía y esta puede ser 220 o 440 voltios. La fuente de energía ideal para este proceso es la de corriente directa y voltaje constante, en muchas ocasiones llamadas maquinas de potencial constante o CP, esto nos indica que en esta maquina nosotros podemos tener ajuste de voltaje a diferencia de las utilizadas para el proceso de electrodo revestido en el que tenemos ajuste de corriente o amperaje, pero no por esto las maquinas de corriente constante no se utilizaran en este proceso ya que con un alimentador sensitivo se puede obtener una transferencia de tipo globular o de spray. Una de las características más importantes es el voltaje de arco o longitud de arco, para

la producción de una soldadura en condiciones estables, esta particularidad nos proporciona el control del calor del arco y el chisporroteo, esto incluye entonces el voltaje, la pendiente y la inductancia. La longitud del arco viene determinada por la distancia entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo. En una maquina de potencial constante el control del voltaje de soldadura se encuentra en la parte frontal del equipo y podrá ser ajustada por una perilla de control o una manivela, y el voltaje de arco debe ser mantenido con la ayuda del soldador y el alimentador de alambre. Las longitudes de arco requeridas depende del diámetro del alambre, el tipo del gas protector, la posición de la soldadura, el tipo de junta y el espesor del metal base, el cambio de algunos de estos parámetros para cordones semejantes, nos cambiaran la longitud del arco, por ejemplo el cambio del gas protector de CO_2 a argón nos indica una disminución del voltaje del arco, si la velocidad del alambre y el amperaje se mantiene constante y el voltaje del arco se incrementa el cordón de soldadura se volverá plano y ancho, un excesivo voltaje de arco es la causa de mucho chisporroteo, porosidad y socavación. Una disminución en la longitud del arco produce un cordón angosto con gran convexidad, si disminuimos los niveles del voltaje óptimo la penetración se torna más profunda. En cambio si se tiene excesivo bajo voltaje esto no va a causar porosidad y traslape en los bordes del cordón llamadas "huellas de carreta o carrileras".

Sistemas de alimentación o los alimentadores de alambre, este es el mecanismo que conduce al electrodo continuo a través del cable y la pistola hacia la pieza de trabajo, existen de muchos tipos ya que estos sistemas también puede ser utilizados para procesos como el de alambre tubular y el de arco sumergido, pero el más común es el de alimentación constante, la misma que por lo general viene dada en pulgadas por minuto. La alimentación empieza cuando el soldador presiona el gatillo de la pistola luego que se han fijado los parámetros de soldadura en un modo semiautomático de este proceso, estos alimentadores pueden tener diferentes mecanismo como los de tira, los de jala, los tira y jale, el tipo de alimentación depende de la composición del electrodo continuo y muchas veces del porta alambre o la pistola de soldar. Se puede mencionar que los alimentadores básicamente se componen de los siguientes elementos: un motor eléctrico, los rodillos, el sistema de apriete entre los rodillos y el alambre, el sistema de porta carrete, otros accesorios que permiten la alineación del alambre hacia la pistola de soldar y la pieza de trabajo; es muy común encontrarse con alimentadores que tengan los sistemas de control incorporados, como regulación de la alimentación, control de pulsos de arco, control de parada de arco, control de voltajes para realizar ajustes finos, etc.

Existen varios tipos de rodillos, pueden ser lisos, ranurados, estriados, etc., la correcta selección de los rodillos nos aseguran una apropiada alimentación,

y también depende del tipo alambre que se utilice, además que estos pueden ser de uno, dos o cuatro rodillos impulsadores y pueden tener un piñón incorpora o no, el cual hace juego con el del motor eléctrico dando así el impulso al electrodo continuo y si no lo tiene estos se ajustan mediante tornillos al eje del motor eléctrico. Los rodillos se encuentran hechos según el diámetro del alambre que se vaya a utilizar en el proceso, hay un rodillo para cada diámetro de alambre.

El sistema de alimentación del gas protector, utilizados en el proceso GMAW consiste en la fuente de suministro del gas, el regulador, el flujo metro, válvulas de control y las mangueras de conexión, el gas protector viene suministrado en estado líquido cuando la presentación es de tanques de almacenamiento con vaporizador o en forma de gas para cilindros de alta presión. Los tanques de almacenamiento son utilizados para sistemas de distribución cuando tenemos algunas estaciones de soldadura y todas utilizan el mismo gas protector, en cambio los cilindros de alta presión son utilizados para estaciones individuales de soldadura y se trabaja con válvulas las cuales dan un bajo uso del gas.

Las pistolas de soldar son muy variadas y transmiten la corriente de soldadura al electrodo ya que esta pistola se encuentra conectada al alimentador de alambre por algún sistema de sujeción los cuales son

prisioneros o tipo rosca. Las pistolas pueden ser para sistema automáticos, semiautomáticos, ya que los procesos mecanizados utilizan estos mismos tipos de pistola, la diferencia entre con las semiautomáticas por lo general es que las pistolas semiautomáticas poseen una inclinación en su cuello denominado "cuello de ganso" y también poseen un gatillo para el accionamiento del proceso de soldadura, en cambio las pistolas automáticas son por lo general rectas y a veces el accionamiento del proceso se lo realiza por medio de un switch. Otra de las diferencias de las pistolas es que estas pueden ser refrigeradas por aire o al ambiente y refrigeradas por agua, estas necesitan un sistema adicional de recirculación y enfriamiento del agua. Las pistolas tienen componentes básicos, y son los siguientes:

- El tubo de contacto o la punta guía de salida de alambre
- Boquilla o tobera para el escudo del gas
- Conducto para el alambre o funda el cual guía al alambre desde el alimentador hasta la pieza de trabajo.
- Mangueras de conducción del gas, las cuales transportan el gas desde el sistema de alimentación hasta la pieza de trabajo.
- Cable de potencia, el que lleva la corriente desde la fuente de poder hasta la punta y el alambre. (Fig. 7).

Las pistolas deben ser básicamente ligeras, anatómicamente esbeltas tener un ciclo de trabajo del 100% y poder conectar los consumibles de forma fácil, rápida y segura.

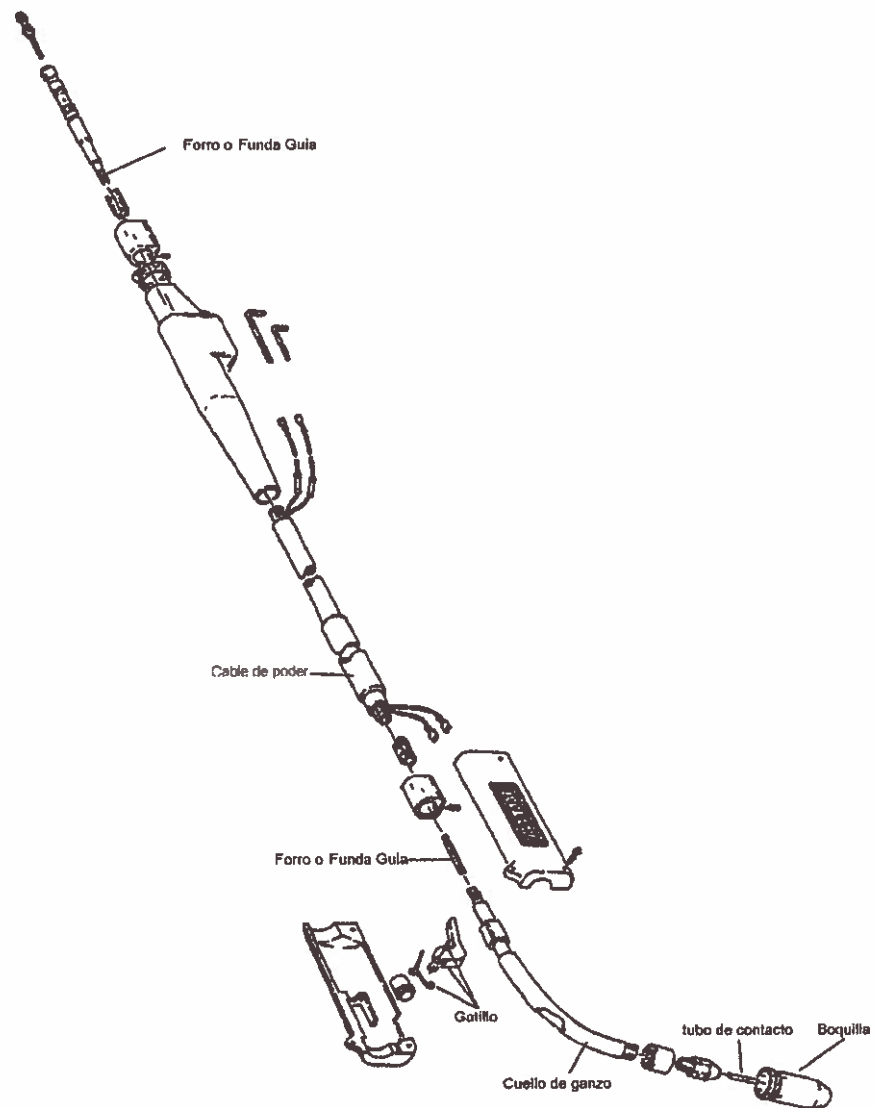


Fig. 7 Componentes de la pistola refrigerada por aire. (Ref. 6)

1.2.3 Materiales consumibles

En este proceso de soldar tenemos como los principales materiales consumibles los siguientes elementos:

- Electrodo continuo o alambre de soldar.
- Gas protector.
- Tubos de contactos y
- Boquillas.

Electrodo desnudo

Los electrodos desnudos continuos o alambre de soldar aunque el término electrodo es mas bien utilizado en el proceso SMAW los cuales son electrodos revestidos, se podría decir que son los electrodos desnudos con el espesor más pequeño que los demás electrodos de los otros procesos, pero existe otra forma de denominarlos a estos materiales de aporte que es alambre sólido los cuales hacen una diferencia de los alambre utilizados para el proceso de núcleo fundente (FCAW). Así mismo la corriente utilizada para estos electrodos puede ser bastante alta, lo cual nos lleva a dos características importantes para el GMAW:

- Las tasas de deposición son muy altas, esto es que las tasas de fusión son muy grandes, las mismas que nos llevan a decir que son favorables las libras por hora de deposición de metal soldado.

- El proceso GMAW se lo podría considerar como un proceso de bajo hidrógeno, ya que el electrodo desnudo utilizado de manera correcta da menor oportunidad de atraer la humedad.

Estos nos ayuda para evitar los problemas de porosidad, cuando es utilizado de manera correcta el electrodo desnudo y el gas protector. Las especificaciones de los alambre sólidos para su manufactura según la AWS son:

Los tamaños y las dimensiones de los carretes son muy variadas pero deben ser de fácil manipuleo y recambio de los mecanismos de porta carrete que se encuentran en las maquinas de soldar, quizás una de las más comunes es el carrete de 12 pulgadas de diámetro exterior. El embobinado de los electrodos continuos debe ser suavemente enrollados, no presentar doblados, ni retorcidos ya que esto no permitirá una alimentación correcta en un momento del proceso de soldadura, y además que este no tenga ni principios, ni finales que sea un alambre totalmente continuo. No se debe mezclar los lote de materia prima para la manufactura de un carrete y así se evita las pequeñas diferencias en su composición química. Deberá también ir identificado la especificación del alambre bajo norma AWS tanto en el carrete como en su envoltura, además de su diámetro y su peso. El alambre debe estar libre se cubrimiento, rajaduras, grabados, etc.

El templado, el grado de dureza y rigidez en una electrodo continuo puede afectar a su alimentación y ocasionar problemas en la junta soldada.

Los electrodos desnudos utilizados para este proceso de soldadura son de similar o igual composición de aquellos empleados en otros procesos, en muchos de los casos los electrodos continuos escogidos depende básicamente de la composición química del metal base, o los electrodos que posean la composición química más cercana posible a la pieza de trabajo, si el alambre utilizado posee características diferentes a estos electrodos es para obtener un máximo en las propiedades mecánicas y mejorar la soldabilidad.

Tabla IV. Especificación AWS para los electrodos continuos en el proceso GMAW. (Ref. 2).

Especificación AWS	Metal
A5.7	Cobre y aleaciones de cobre
A5.9	Aceros inoxidables
A5.10	Aluminio y aleaciones de aluminio
A5.14	Níquel y aleaciones de níquel
A5.16	Titanio y aleaciones de titanio
A5.18	Aceros al carbono
A5.19	Aleaciones de magnesio
A5.24	Zirconio y aleaciones de zirconio
A5.28	Aceros de baja aleación

El sistema de clasificación de los electrodos utilizado en la industria, y que es designado por AWS, por lo general es a base de la composición química, las propiedades mecánicas o ambas. Así podemos mencionar que la letra "E" indica que el alambre es un electrodo que puede ser utilizado para GMAW, la letra "R" nos muestra que también puede ser utilizado como varilla de soldadura para procesos con tungsteno y gas protector (GTAW) o en soldadura de arco con plasma (PAW). Los siguientes dos o tres dígitos indican la resistencia a la tracción nominal del material de aporte. La letra a la derecha de los dígitos indica el tipo del metal del alambre, una "S" muestra que el alambre es sólido. Y el dígito o letras como sufijo indica la composición química especial del alambre. Uno de los electrodos para aceros al carbono tiene la siguiente clasificación ER70S-X, lo que muestra que es un electrodo de 70 Kpsi de resistencia a la tracción y es un alambre sólido, el último dígito tiene diferentes características que se enumeran a continuación.

ER70S-2 posee múltiples elementos desoxidantes por lo que tienen un contenido nominal del 0.2% de zirconio, titanio, y aluminio mezclado con silicio y manganeso. Es conocido como un alambre triple desoxidante ya que ayuda a la remoción de oxígeno en la soldadura, reduciendo la porosidad y a los defectos en la junta soldada. Este electrodo produce

soldaduras sanas en todos aceros semicalmados o calmados, o que contengan varios niveles de carbono. Por sus elementos desoxidantes también se puede soldar en aceros con superficies contaminadas o sucias, este electrodo puede ser utilizado con mezclas de argón-oxígeno, CO_2 , y argón- CO_2 además de ser escogido para soldaduras de fuera de posición inicialmente aplicado solo con transferencia de tipo corto circuito. Una desventaja de este alambre que es difícil de fluir por los extremos del cordón, dando así una copa en el centro de la soldadura y esto puede producir una fusión incompleta.

ER70S-3 este es un electrodo recomendado para todos los aceros al carbono aplicado con CO_2 como gas protector o una mezcla de argón-oxígeno. Este es un electrodo que puede ser utilizado para las soldaduras de pases simples, pero también puede ser empleado en soldaduras multipases en aceros calmados o semicalmados. Este alambre con una mezcla de argón con CO_2 obtiene una dureza superior a la del ER70S-2 y este si da facilidad en el flujo del charco, dando un cordón mucho más plano, además el electrodo permite una soldadura fuera de posición con diámetros pequeños. Cuando este electrodo se aplica con corrientes elevadas y con CO_2 se puede encontrar fallas en las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y su punto de fluencia.

ER70S-4 este electrodo contiene elevado los niveles de manganeso y silicio con relación a los alambre clasificados como ER70S-3 y producen depósitos de soldadura con alta resistencia a la tensión. Este tipo de alambre puede ser empleado con mezcla de argón con CO_2 o simplemente CO_2 , este electrodo es empleado en transferencias corto circuito o de tipo spray. Este alambre no puede ser empleado en aceros que sufran impactos.

ER70S-5 forma parte de los metal de aporte que contienen aluminio en adición al manganeso y al silicio como agentes desoxidantes, utilizando además como gas protector el CO_2 con altas corrientes de soldadura este electrodo puede ser utilizado para aceros semicalmados o calmados, las cantidades de aluminio aseguran los depósitos de los agentes desoxidantes produciendo las soldaduras sanas, esta forma de aplicar este tipo de electrodo nos hace entender que los tipos de transferencias son globular y de tipo spray, para soldaduras frecuente en posición plana.

ER70S-6 este electrodo posee gran cantidades de silicio y manganeso como agentes desoxidantes, se puede permitir grandes cantidades de corriente de soldadura y como gas protector el dióxido de carbono para acero calmado y semicalmado, la calidad del cordón de soldadura depende de los niveles impurezas en la superficie del material base. Este electrodo se utiliza con modo de transferencia corto circuito para soldaduras fuera de posición,

aunque con amperajes altos podemos obtener transferencia de tipo spray las cuales producen cordones uniformes, este es el electrodo más popular por su versatilidad en los tipos de transferencia.

ER70S-7 este tipo de electrodo tiene grandes cantidades de manganeso con relación al ER70S-3 sin embargo la dureza de la suelda es más baja que el ER70S-6 pero más altas que el ER70-3 este electrodo de alambre se lo recomienda con un gas protector de mezcla argón oxígeno, pero puede ser usado con CO₂ o con una mezcla de Argón CO₂, el manganeso ayuda una mejor apariencia del cordón con cantidades relativamente altas de esfuerzo a la tracción y a la fluencia que nos pueden permitir el incremento de las velocidades con relación a los otros electrodos desnudos continuos.

Existen otros tipos electrodos desnudos pero nosotros no los mencionaremos ya que creemos que estos no dan una visión clara de la clasificación de los alambre electrodos desnudos para soldar.

Gas protector

Es otro de los elementos que son considerados consumibles, el propósito primordial del gas protector como su nombre lo indica es proteger el material fundido de soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC) de los contaminación y de la oxidación del medio de la atmósfera. Originalmente

los gases para proteger estas zonas eran inertes y se utilizaba solo el argón y el helio, pero ahora CO_2 es utilizado para diferentes aplicaciones, y sus mezclas con oxígeno y otros gases inertes además de la mezcla con argón son muy frecuentes, estos gases presenta efectos importantes como la característica del arco, penetración, velocidad de soldadura, tendencia al socavamiento, influyen en las propiedades mecánicas y un efecto de limpieza en el cordón de soldadura.

Argón, para soldadura tiene un grado de pureza 99.995%, se diría que es prácticamente puro, es un gas monoatómico, esto es que posee un átomo por cada molécula, es un gas inerte e insoluble en el metal fundido, es un 38% más pesado que el aire, lo cual sería una ventaja para soldaduras en posición horizontal de tipo filete y plana, se puede utilizar en todos los metales, aunque se recomienda para soldaduras en aceros trabajar con mezclas a base de argón. Los resultados con el argón como gas protector dan un cordón en forma de perla, a diferencia con los obtenidos con CO_2 y con Helio como gas protector, también podemos mencionar que bajo los mismo parámetros de soldadura, el patrón de la penetración se comporta de manera diferente que si tuviéramos como gas al CO_2 . El argón es un gas con poco potencial de ionización, lo cual produce un menor voltaje de arco para una longitud de arco dado, y como consecuencia menor calor para un amperaje dado, lo que ayudaría para laminas de espesores pequeños. El

argón es 10 veces más pesado que el Helio lo que nos ayudaría, ya que necesitaríamos menor flujo que este otro gas.

Helio, este es un gas el cual también es químicamente inerte y es usado principalmente en el aluminio, magnesio y aleaciones de cobre. Este es un gas ligero obtenido por la separación del gas natural. Puede ser comercializado como líquido, pero la distribución más frecuente es cilindros de alta presión, es más ligero que el aire, por esta razón deberá ser usado con altas tasas de flujo para así poder obtener una buena protección al proceso de soldadura, estas tasas de flujo van de alrededor de las 2 y tres veces más que las obtenidas por el argón tomando en cuenta en posición plana. El helio es un gas muy normalmente utilizado para soldaduras sobre cabeza, ya que este flota hacia arriba y protege de una forma eficiente al metal fundido. La transferencia de tipo globular es usualmente obtenida con este tipo de gas, y si se desea transferencia spray se podrá realizar manejando grandes cantidades de corriente, aunque estos produce un arco muy caliente con una longitud de arco dado en niveles de corriente normales, por lo que este gas se recomienda para espesores grandes y especialmente da buenos resultados en el cobre, aluminio y magnesio que tienen alta conductividad térmica, el helio generalmente hace cordones anchos y da mejor penetración que las soldaduras producidas con argón. Este gas es un poco más costoso que el argón.

Dióxido de carbono (CO₂), es un gas reactivo y a diferencia de los otros esta es una buena excepción, ya que este puede ser utilizado de ambas formas por si solo o en una mezcla con un gas inerte, puede ser mezclado con oxígeno pero deben ser utilizados necesariamente con otros gas inerte. Aplicado como mezcla este gas mejora la acción del arco y la transferencia del metal, por tal motivo este es ampliamente aplicado para soldaduras en aceros con un tipo de transferencia de corto circuito, un arco de tipo spray no puede ser completamente obtenido con el CO₂ como gas protector, pero si se puede tener soldaduras rápidas y con buena penetración en comparación con el argón, además que este tipo de gas es más económico con los otros gases antes mencionados. El CO₂ se descompone en monóxido de carbono (CO) y en oxígeno (O) a la temperatura del arco, produciendo un efecto de oxidación muy parecido al que se realiza con las mezclas de gases inertes que tienen entre el 8 y 10% de oxígeno. A pesar de este efecto de oxidación se producen soldaduras sanas y libre de porosidad, para un tipo de transferencia globular se realiza con un electrodo continuo del tipo desoxidante y este gas protector. Una de las desventajas es que el CO₂, en el procesos produce bastante dureza y un excesivo chisporroteo, aunque este último se puede controlar con una longitud de arco adecuada.

La mezcla de argón y dióxido de carbono son con una composición del 20% de CO₂ y un 3% de Oxígeno, el resto es argón y nos brindan una protección adecuada para modalidades de corto circuito, spray y spray pulsado, ayudante a las soldaduras de fuera de posición, y dando un proceso con menos chisporroteo, buen acabado y mejor penetración si el gas fuera solo argón.

Tubo de contacto

Otro de los consumibles utilizados en este proceso son los tubos de contactos, la cual es una aleación de cobre, el mismo que permite la transmisión de la corriente eléctrica entre la pistola y el electrodo, entonces el electrodo que es continuamente alimentado y se desliza a través del tubo de contacto y la fricción contra este facilita a la corriente de soldadura. Muchos de los fabricantes introducen una muy ligera curvatura al tubo de contacto para así ganar en el contacto eléctrico hacia el electrodo de alambre, por esta razón los tubos de contactos tienen diferentes diámetros los mismos que están en razón a los diámetros de los alambres a utilizar. Los tubos de contacto deben estar en buenas condiciones especialmente para el tipo de transferencia de corto circuito, no obstante para los otros tipos de transferencia los diámetros interiores deben permanecer redondos aunque tengan por su normal desgaste una pequeña elongación. Si el proceso de soldadura que se esta aplicando tiene mucho chisporroteo se

deberá tener cuidado para que el agujero del tubo de contacto no se tape ya que este obstruiría la normal alimentación del electrodo continuo, por ende dando una mala soldadura, por este motivo existen químicos, los cuales ayudan a que la boquilla y el tubo de contacto no tengan adherencias de chisporroteo. Los tubos de contacto deberán ser revisados continuamente en un proceso de soldar, y estos se desgastan dependiendo de los parámetros de soldadura, el tipo de gas, el tipo de transferencia y el metal base.

Boquillas

Como último consumible podemos mencionar a las boquillas, o también conocidas como **nozzles**, en la parte final de las pistolas se coloca este tipo de elemento los cuales son por lo general de cobre ya que se encuentran en la cercanía del calor producido por el área del arco, los nozzles pueden ser de muchos tipos y formas, aunque los más comunes son aquellos que se enroscan o que se introducen por presión, estos componentes se encuentran aislados eléctricamente de la pistola y de la corriente de soldadura, las formas de estos dependen del tipo de posición y si el proceso es para soldadura de punto. La principal tarea de la boquilla es la de formar la campana protectora producida por el gas. Si los nozzles son superiores a tres pulgadas de longitud esto nos indica que el tipo de transferencia sería spray, para nozzles pequeños como de 1½ a 2½ pulgadas de longitud

estos son utilizados para una transferencia de tipo cortocircuito, esto se hace para permitir la correcta posición del tubo de contacto con relación a la boquilla y al área del arco. Para transferencias de tipo spray y de spray pulsado el nozzle deberá extenderse hasta pasar al tubo de contacto, esta posición permite que el gas de protección sea liberado cerca del arco y así proteger al tubo de contacto de un posible daño u obstrucción, además de proveer de refrigerante al tubo de contacto, para transferencias de tipo cortocircuito el nozzle pasará ligeramente al tubo de contacto permitiendo que este realice una buena transferencia del metal y decreciendo las cantidades de chisporroteo. Las boquillas para la producción de soldadura de punto son diseñadas de manera abierta por el cual permite la expulsión del gas de protección del punto de suelda y estos son básicamente diseñados para tres tipos diferentes de puntos, posición plana, de esquina interior y de esquina exterior. Todos los tipos de nozzle deben ser cambiados regularmente ya que si estos pierden su forma o diseño original no realizarán un buen escudo de protección para la soldadura y esto afectará al cordón de soldadura.

1.2.4. Aplicaciones en tuberías soldadas

Por ser un proceso de soldadura que se lo puede emplear de manera automática, o semiautomática, es importante mencionar que cuando se piensa en la aplicación para tuberías, se piensa también en manipuladores para hacer rotar la tubería, lo cual puede realizarse en los talleres industriales, pero no es aplicable a campo traviesa ya que el medio no lo permite, cuando la tubería puede ser rotada se vuelve en una operación muy simple, ya que todo el proceso puede hacerse en una sola posición y controlar los parámetros de soldadura, aunque cuando existan irregularidades en la tubería y existan algún tipo de accesorios en el tendido estos deberán hacer con el tubo fijo. El diseño de las juntas para tubos de diámetros pequeños son iguales a las del proceso de electrodo revestido, tomando en cuenta que también la secuencia de los pases es similar a las presentadas en los de SMAW, aunque en ocasiones por ser este proceso por tener una mayor de deposición de material el número de cordones disminuye y se eliminan 1 o más de los pases de relleno y todos los pases se realizan con la misma corriente fuera del pase de raíz. En tabla 5 se muestra los parámetros para este tipo de proceso.

→ Tabla V. Parámetros de soldadura para proceso GMAW en tuberías.

(Ref. 2)

Numero de pase	Corriente DCEP (A)	Voltaje (V)	Flujo de gas (pies ³ /h)	Dirección de soldeo
1	100	20	25	Vertical ascendente
2, 3, 4	120	20	25	

Una de las consideraciones es que debe realizar un precalentamiento de los tubos en las zonas donde se va realizar el proceso de soldar, para nuestro tipo de tubería se debe emplear un precalentamiento de 70° F, y mantener una separación de raíz de 1/16 de pulgada, se puede emplear alambre de diámetro 0.9 o 1.2 mm de espesor, aunque con el diámetro más grande el material de deposición será mayor y más rápida será la aplicación del proceso. Las propiedades típicas del material de aporte debe ser de por lo menos 70 Kpsi de resistencia a la tracción, 60 Kpsi de limite de fluencia, y aproximadamente de 25% de elongación. Por estos argumentos el alambre seleccionado para el desarrollo es el electrodo ER70S-6, ya que este da propiedades similares a las antes anotadas, los resultados de las pruebas mecánicas serán anotadas en los capítulo 2 y el análisis en el capítulo 3 del presente trabajo.



CAPÍTULO 2

PARTE EXPERIMENTAL

Se describirá en esta sección el trabajo que se realizó, conjuntamente con las características de los materiales, para cada uno de los procesos en la tubería soldada, también las características de la tubería y por último las pruebas realizadas a la soldadura de la tubería en los diferentes procesos. En la parte final de este capítulo haremos un estudio económico para conocer el proceso más conveniente.

2.1. Materiales a utilizarse

→ 2.1.1. Equipos y materiales de trabajo

Los equipos y materiales que fueron utilizados los vamos a enumerar por proceso de soldadura empleados. Para el proceso SMAW tenemos:

- Una fuente poder de tipo inversor de 5 a 400 amperios (A) DC, el cual es un multiprocesos, de sistema de alimentación monofásica o trifásica que se conecta a una línea primaria de 220 V AC. Clasificación NEMA clase I. (Fig. 8).
- Cable de porta electrodo número 2/0 y porta electrodo de 500 A.



Fig. 8 Equipo de soldar utilizado para proceso SMAW. MODELO XMT 304 MARCA MILLER USA.

- Pa • Cable de pinza de tierra número 2/0 y pinza de tierra de 400 A.
- Sistema de protección para el operador, como careta de soldar con sombra número 11, guantes de soldar, mangas, chaqueta, y polainas.
- Los trabajos de soldadura se realizan con 2 soldadores, y 2 ayudantes.
- La Soldadura requerida es E6010 de 1/8 y 5/32. Norma AWS 5.1.

El electrodo es de marca LINCOLN procedencia americana, tipo fleetweld 5P, siendo un electrodo con revestimiento orgánico, de rápido congelamiento "fast-freeze", para empleos con corriente DC, este electrodo deja una ligera escoria y especialmente diseñado para soldaduras de fuera de posición, la composición química del material de aporte es la siguiente:

Tabla VI. Composición química del material de aporte proceso SMAW.

Composición de los elementos en porcentaje				
Fe	C	Mn	P	S
98.75%	0.14%	0.60%	0.006%	0.011%

Análisis químico realizado en FUNASA

Para el proceso de soldadura GMAW, se utilizo los siguientes materiales:

- Como fuente de poder una maquina de 10 a 35 V. Multiproceso de conexión de alimentación trifásica a 220 V AC, con un ciclo de trabajo al 100% a 200 A.
- Un sistema de alimentación de alambre que posee una gama de velocidad de alambre desde 75 a 750 pulgadas por minuto (IPM). Con un ciclo de trabajo del 100%. Un sistema de acople de rodillos mediante seguros de presión, rodillos tipos ranurados para alambre de 0.9 mm.
- Un sistema de alimentación del gas protector por medio de cilindros de alta presión de 6 metros cúbicos. Y mangueras de $\frac{1}{4}$ para la transmisión del gas hacia la pistola, pasando por el alimentador el cual posee una válvula de paso accionada desde el gatillo de la pistola, un flujómetro regulador el cual permite el paso desde el cilindro hasta las mangueras de transmisión.
- Una pistola de soldar de 250 A con un ciclo de trabajo del 100%, refrigerada por aire, con un forro para alambre de hasta 1.2 mm, con dispositivo para el acople de las boquillas mediante presión, con un aislador incorporado.
- Gas protector mezcla de argon 75%, 20% CO₂ y restante de oxígeno.

- Tubos de contactos del tipo de ajuste roscados, de diámetro 0.9 mm.
Alambre de soldar ER70S-6 de 0.9 mm de diámetro. Norma AWS 5.18. (Fig. 9).



Fig. 9 Equipo de soldar para proceso GMAW. Modelo XMT 304 / S-22 A MARCA MILLER USA

De marca INFRA y procedencia mexicana es un electrodo para metal de relleno ideal para soldaduras fuera de posición y en transferencia de corto circuito. La composición química del metal de aporte se presenta a continuación:

Tabla VII. Composición química del material de aporte proceso GMAW.

Composición de los elementos en porcentaje				
Fe	C	Mn	P	S
98.04%	0.10%	1.08%	0.008%	0.019%

Análisis realizado en FUNASA

2.1.2. Características de la tubería

Para los dos procesos de soldar se utilizó una tubería API 5L X42, la cual es "fabricada por resistencia eléctrica (ERW)" (Ref. 8), utilizada en el sistema de poliductos de la costa, la tubería presenta la siguiente composición química:

Tabla VIII. Composición química del material base.

Composición de los elementos en porcentaje				
Fe	C	Mn	P	S
98.07%	0.12%	1.22%	0.021%	0.009%

Análisis realizado en FUNASA

Tabla IX. Propiedades mecánicas de la tubería. (Ref. 4)

Resistencia a la fluencia (psi)	Resistencia máxima a la tracción (psi)
42.000	60.000



Fig. 10 Tubo API 5LX42 de 10 in. y $\frac{3}{8}$ in. de espesor.

- A la tubería se la procedió a cortar para realizar nueve tramos de juntas independientes, con una longitud de 8 pulgadas cada una, las cuales se efectuaron con un proceso de corte oxiacetileno de forma manual, hacer un bisel de aproximadamente 30° y un talón de $\frac{1}{16}$ de pulgada, con una separación de raíz de $\frac{1}{16}$ pulgada bajo norma API 1104. (Ref. 7). Toda la preparación de la junta se empleó un torno para asegurar las especificaciones de la norma. Se construyó alineadores para mantener la buena posición de la junta estos se colocaron en el interior de los tubos que fueron soldados, para los dos procesos empleados. (Fig. 11).

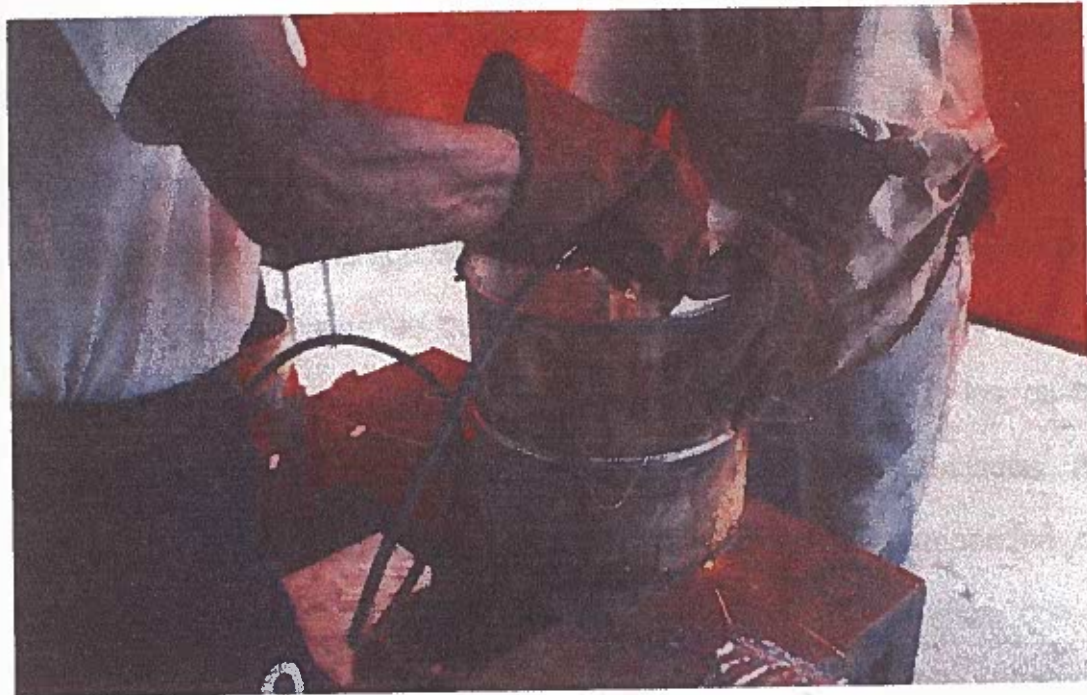


Fig. 11 Preparación de la junta y colocación de los alineadores

2.1.3. Soldabilidad

La soldabilidad es una propiedad de los materiales la misma que establece una compatibilidad del material para ser soldado. Se considera que un material posee buena soldabilidad si se puede soldar sin dificultad, y no es necesario procedimientos costosos ni especiales para obtener similares propiedades que el metal base. La soldabilidad varía según el grado, composición química, y propiedades mecánicas del material que va ser soldado. La soldabilidad también es inversamente proporcional a su endurecimiento y a su grado de dureza en los aceros, por ejemplo un acero que tengan altos niveles de dureza, va a tener una pobre soldabilidad y tendencia al agrietamiento, así tenemos los aceros fundidos, los cuales requieren de procedimientos específicos para poder ser trabajados. Así entonces podemos mencionar que los rangos de dureza dependen del carbono equivalente (CE), los mismos que están relacionados con la composición del acero y vienen dados por la fórmula (Ref. 2):

$$CE = C \% + \frac{Mn \%}{6} + \frac{Cr \%}{5} + \frac{Mo \%}{4} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Todos los elementos se encuentran en porcentaje a su peso en el material base. Las imperfecciones que comúnmente pueden aparecer son la porosidad, y agrietamientos por hidrógeno, en acero de baja aleación como los API de la tubería soldada. La utilización de electrodos básicos generan

bajo hidrógeno y los procesos con gas protector producen pequeñas cantidades de hidrógeno en el charco de soldadura. La composición del acero y la tasas de enfriamiento determinarán la dureza de la zona afectada por el calor (ZAC). Los espesores de la sección y la energía del arco, son los que influyen en las tasas de enfriamiento tomando en cuenta la acción del medio ambiente donde se realiza el proceso. Para aliviar estos efectos debemos considerar los correctos parámetros de soldadura, la elección adecuada del material de aporte y si fuese necesario realizar un pre y post calentamiento para reducir las tasas de enfriamiento brusco y promover el escape del hidrógeno reduciendo así las estructuras sensibles al agrietamiento en la ZAC.

2.2. Parámetros de soldadura

En la siguiente tabla se observan las características de las muestras soldadas y su designación, se tiene el promedio de los parámetros de soldadura empleados en los procesos aplicados.

Tabla X. Designación de las muestras soldadas

Designación de la muestra	Tipo de proceso aplicado	Tipo de técnica	Voltaje (Voltios)	Corriente (Amperios)
T1	SMAW	Vertical Descendente	24.74	118.50
T2	GMAW	Vertical Ascendente	21.37	131.25
T2A	GMAW	Vertical Ascendente	19.75	125.26
T3	SMAW	Vertical Descendente	82.5	121.00
T4	SMAW	Vertical Descendente	30.86	113.60
T5	GMAW	Vertical Descendente	19.86	133.50
T6	GMAW	Vertical Ascendente	18.55	149.75
T7	GMAW	Vertical Ascendente	15.44	150.84
T8	SMAW + GMAW	Vertical Descendente	32.50	115.50

Los parámetros de soldadura debe estar establecidos, para asegurar la buena calidad de la soldadura, los valores amperaje, voltaje, velocidad de soldeo, son para el proceso SMAW los parámetros que se ilustran en la siguiente tabla, para cada tipo de pase en el proceso total de la soldadura. (Fig. 12).

Tabla XI. Parámetros de soldar para la muestra T1 SMAW.

T1 No. Pases	Voltaje (Voltios)	Corriente (Amperios)	Velocidad de Soleo (mm/seg)	Consumo de electrodos 6010	Diámetro del Electrodo (plg)
Pase de raíz	20,42	110,20	4,52	5	1/8
Pase caliente	24,00	126,00	6,12	5	1/8
Pase relleno	27,2	119,50	3,77	5	5/32
Pase relleno	23,23	121,00	3,20	5	5/32
Pase cubierta	29,03	115,75	3,11	6	5/32

Tabla XII Parámetros de soldadura para la muestra T3 SMAW.

T3 No. Pases	Voltaje (Voltios)	Corriente (Amperios)	Velocidad de Soleo (mm/seg)	Consumo de electrodos 6010	Diámetro del Electrodo (plg)
Pase de raíz	82,4	112	5,56	4	1/8
Pase caliente	82,5	117	6,25	4	1/8
Pase relleno	82,6	130	3,10	4	5/32
Pase relleno	82,5	126	2,55	6	5/32
Pase cubierta	82,5	120	3,29	5	5/32

Tabla XIII Parámetros de soldadura para la muestra T4 SMAW.

T4	Voltaje	Corriente	Velocidad de Soldeo	Consumo de electrodos	Diámetro del Electrodo (plg)
No. Pases	(Voltios)	(Amperios)	(mm/seg)	6010	
Pase de raíz	35,4	114	5,00	4	1/8
Pase caliente	35,5	115	5,26	4	1/8
Pase relleno	22,2	121	3,53	4	5/32
Pase relleno	25,7	108	4,44	6	5/32
Pase cubierta	35,5	110	7,62	5	5/32



Fig. 12 Realizando soldadura en tubería con proceso SMAW.

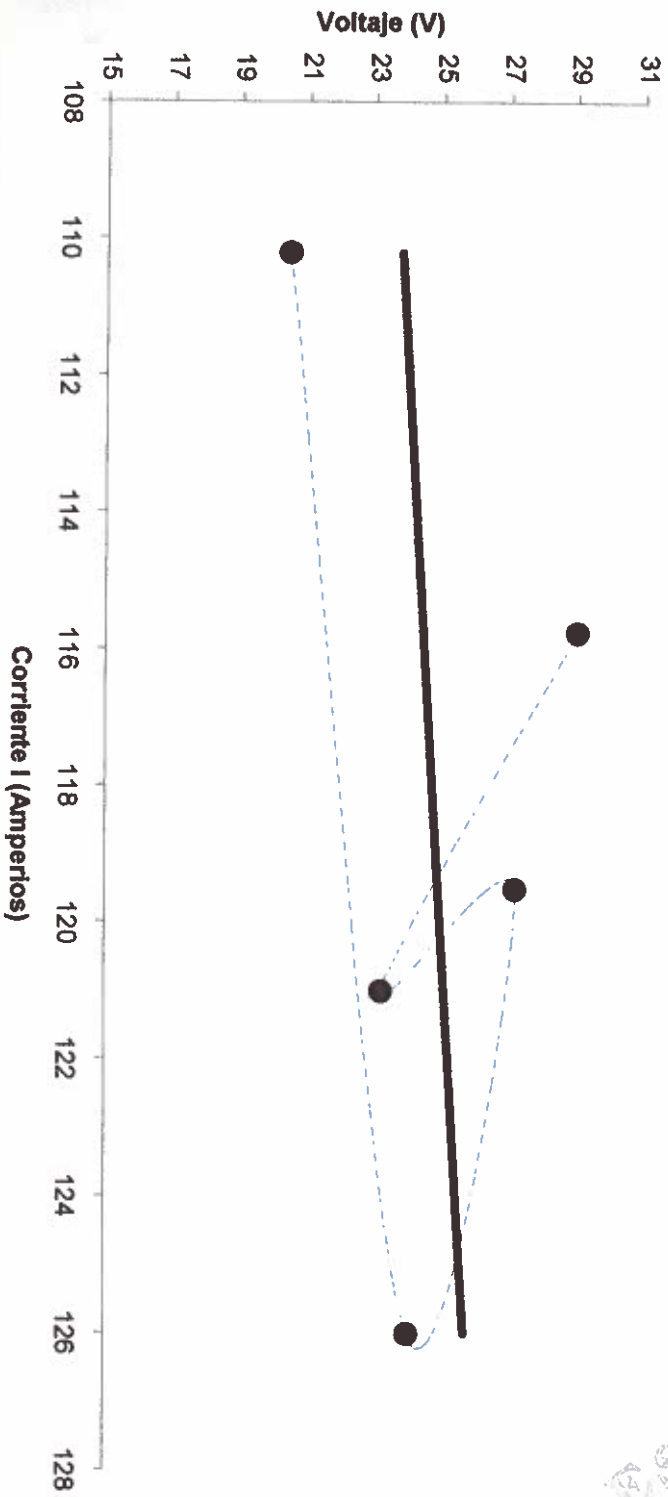


Fig. 13 Gráfico Corriente VS Voltaje para muestra T1 SMAW



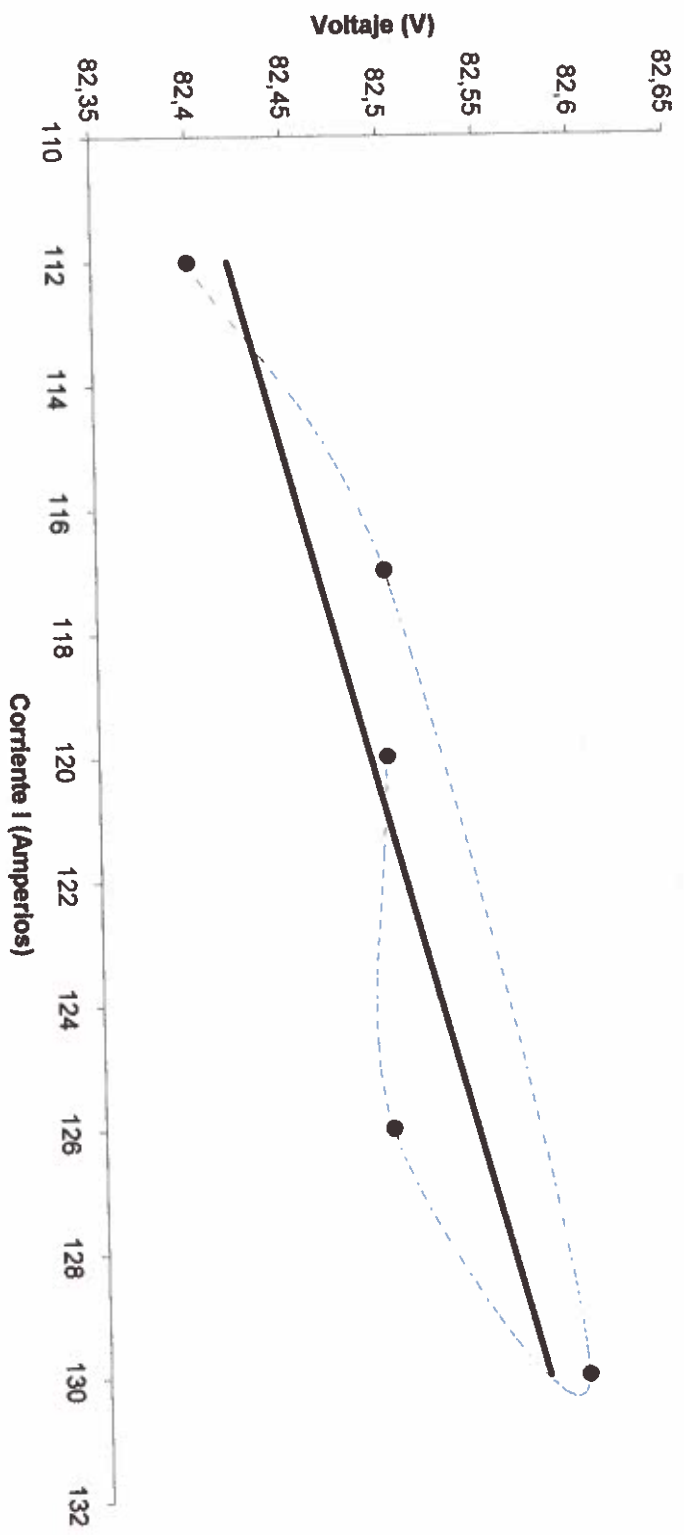


Fig. 14 Gráfico Corriente VS Voltaje para la muestra T3 SMAW

Fig. 15 Gráfico Corriente vs Voltaje para la muestra T4 SMAW

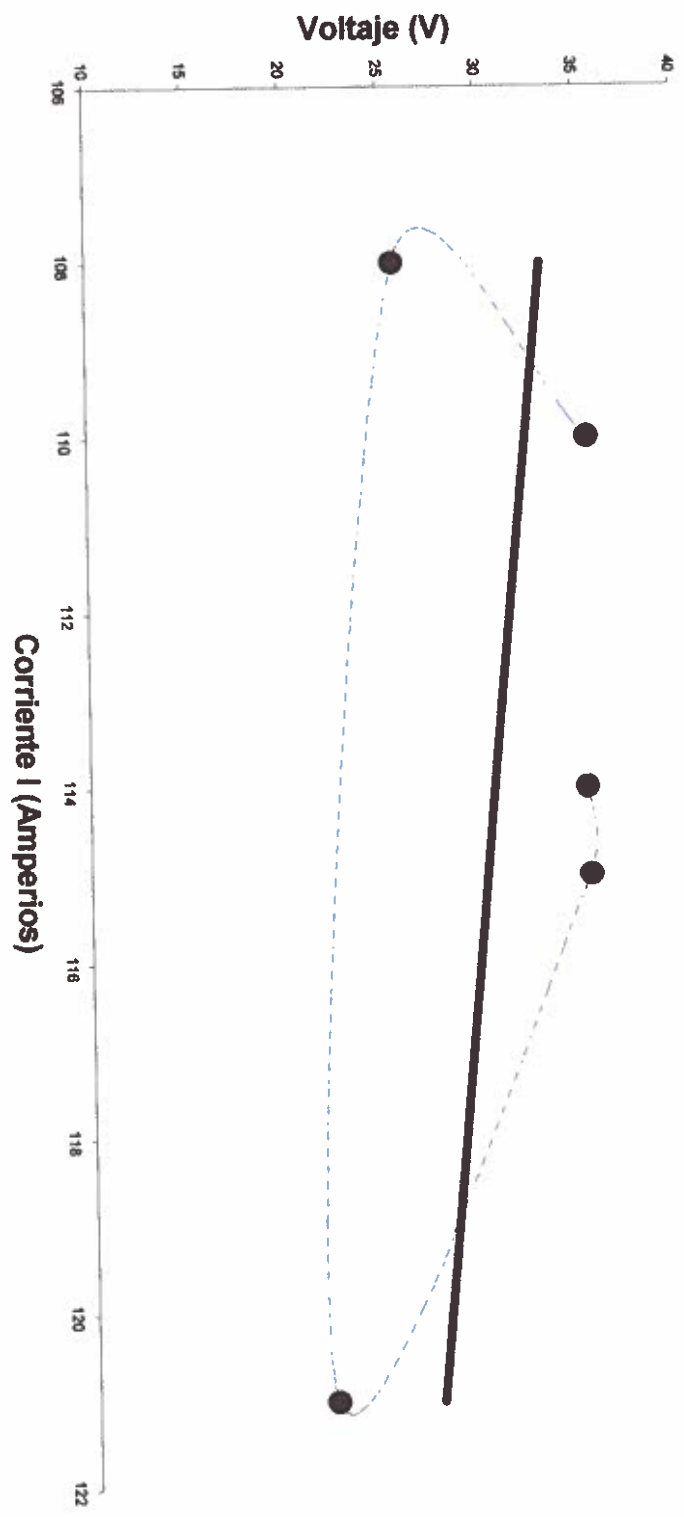
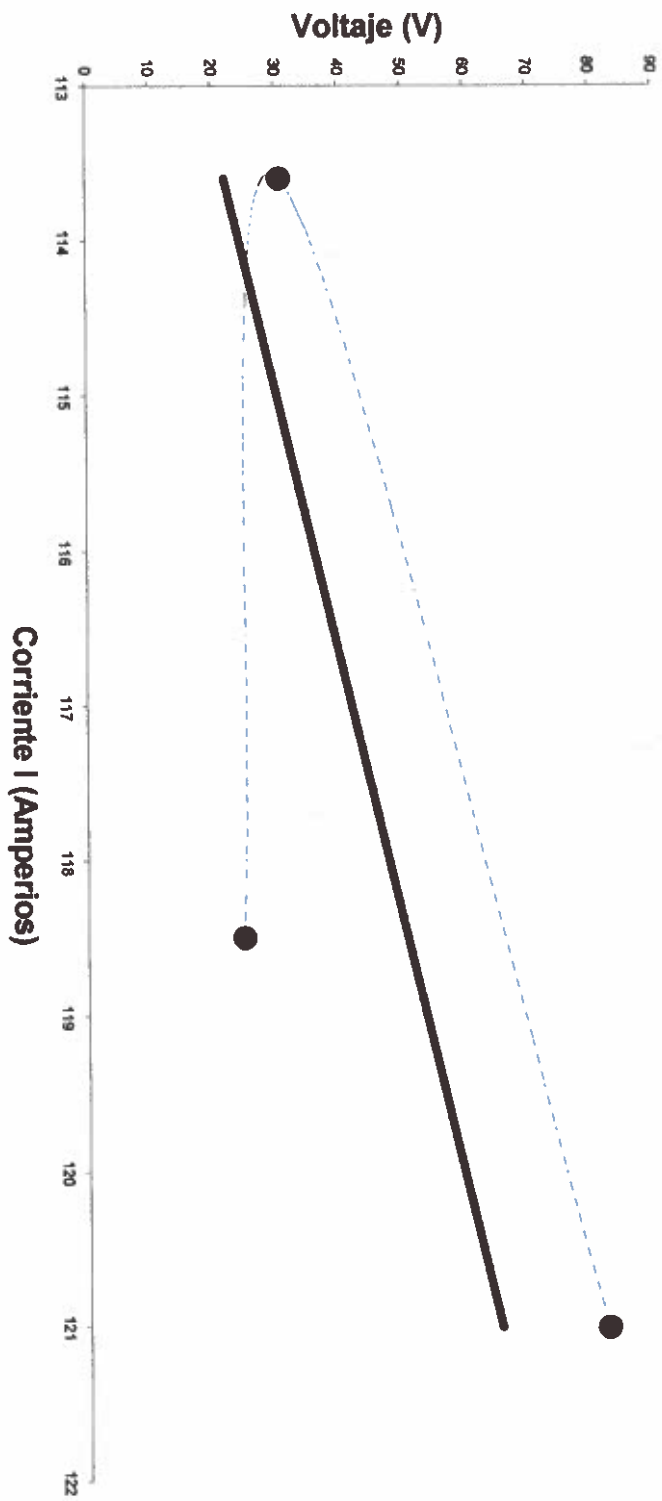


Fig. 16 Gráfico Corriente vs Voltaje para las muestras soldadas con SMAW



Para el proceso GMAW se tomó los siguientes parámetros de soldadura, el amperaje, el voltaje, velocidad de soldeo en milímetros por segundo, velocidad de alimentación del alambre también viene dada en milímetros por segundo, y el flujo del gas protector, para cada uno de los pases y tubos soldados. (Fig. 17)

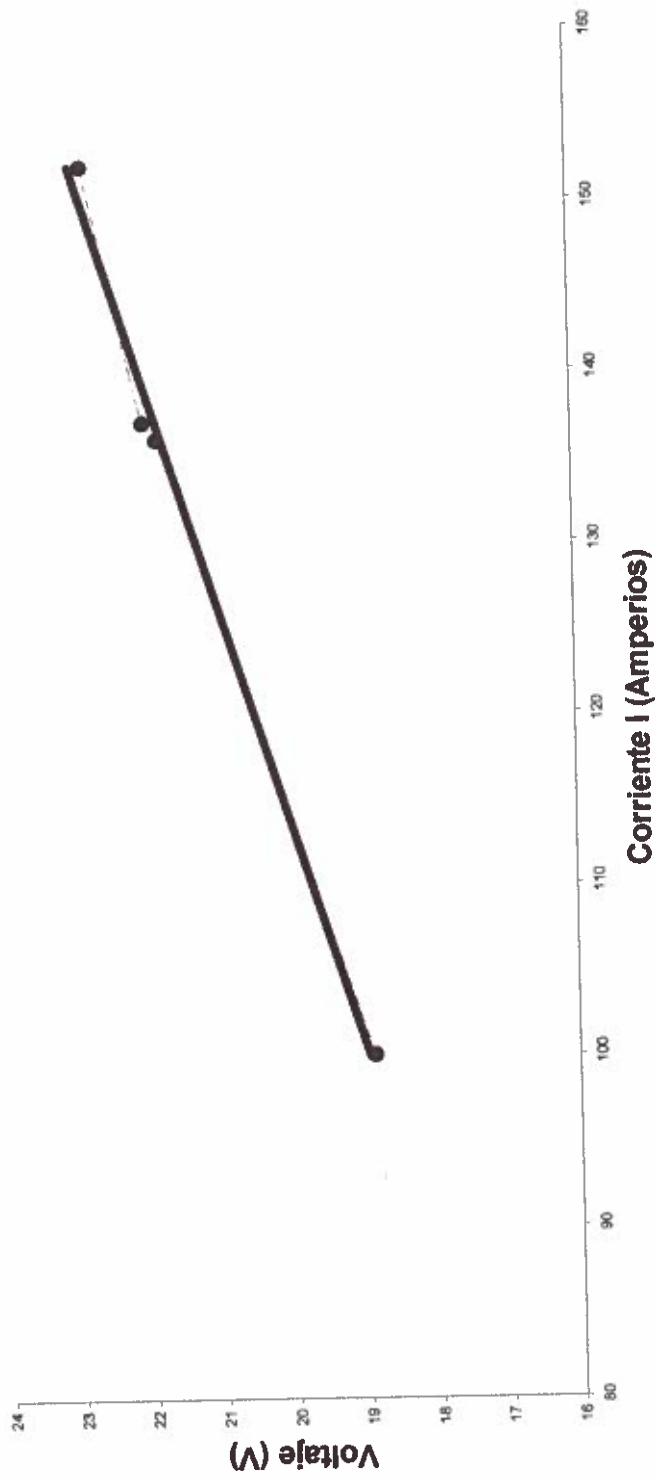
Tabla XIV. Parámetros de soldaduras para las muestras soldadas por el proceso GMAW.

T2 No. Pases	Voltaje (Voltios)	Corriente (Amperios)	Velocidad de Soldo (mm/seg)	Velocidad de Aliment. (mm/seg)	Flujo de gas (pie ³ /h)
Pase de raíz	100	18,88	4,25	82,97	20,00
Pase caliente	136	21,8	3,48	107,95	20,00
Pase de relleno	137	22	2,88	103,72	20,00
Pase de cubierta	152	22,8	5,63	101,60	20,00
T2A					
Pase de raíz	133,75	19,78	3,62	105,83	25,00
Pase caliente	134,25	19,60	3,37	105,83	25,00
Pase de relleno	121,25	19,65	2,94	101,60	26,00
Pase de cubierta	111,81	19,98	2,77	101,60	26,00
T5					
Pase de raíz	157,00	19,90	3,70	101,60	30,00
Pase caliente	125,25	19,675	3,95	101,60	30,00
Pase de cubierta	118,25	20,025	2,81	101,60	30,00
T6					
Pase de raíz	148	18,60	2,83	101,60	26
Pase caliente	146	18,20	2,99	101,60	26
Pase de relleno	148	18,00	3,19	101,60	26
Pase de cubierta	157	19,40	2,83	101,60	26



Fig.17 Realizando soldadura en tubería proceso GMAW.

Fig. 18 Gráfico Corriente VS Voltaje para la muestra T2 GMAW



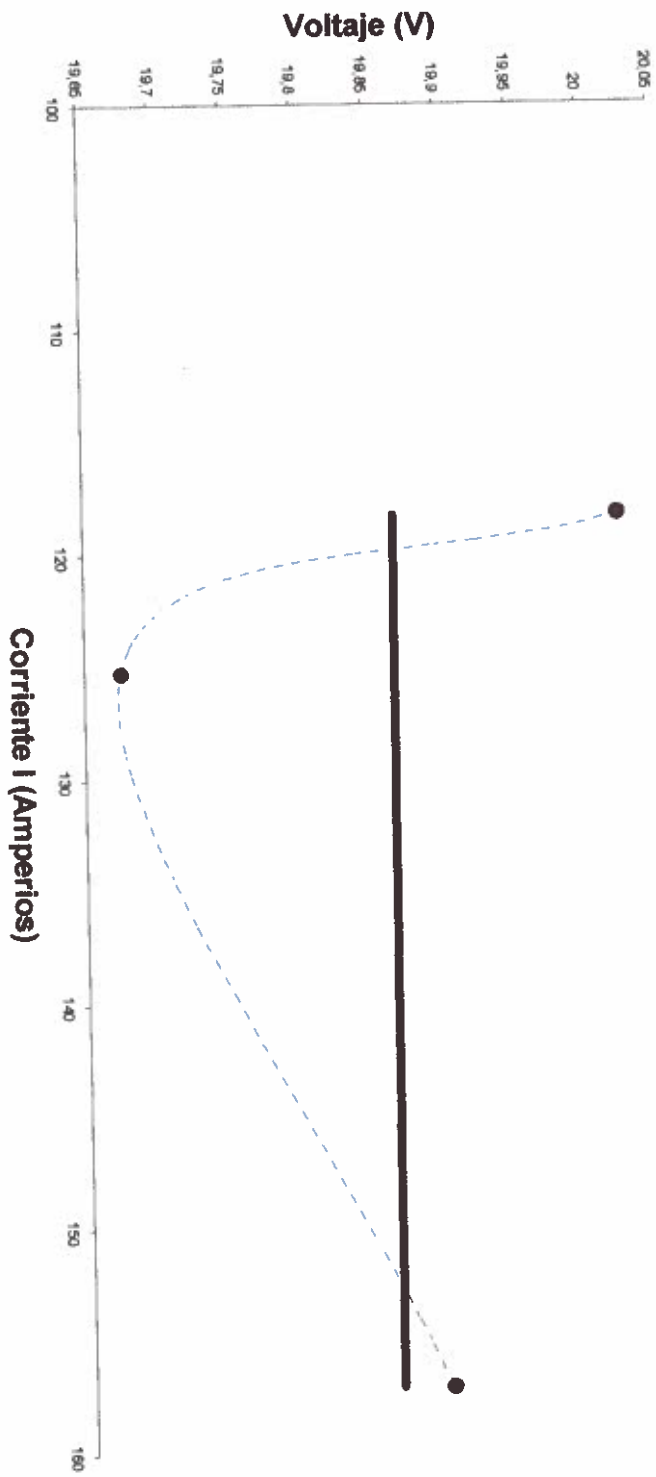
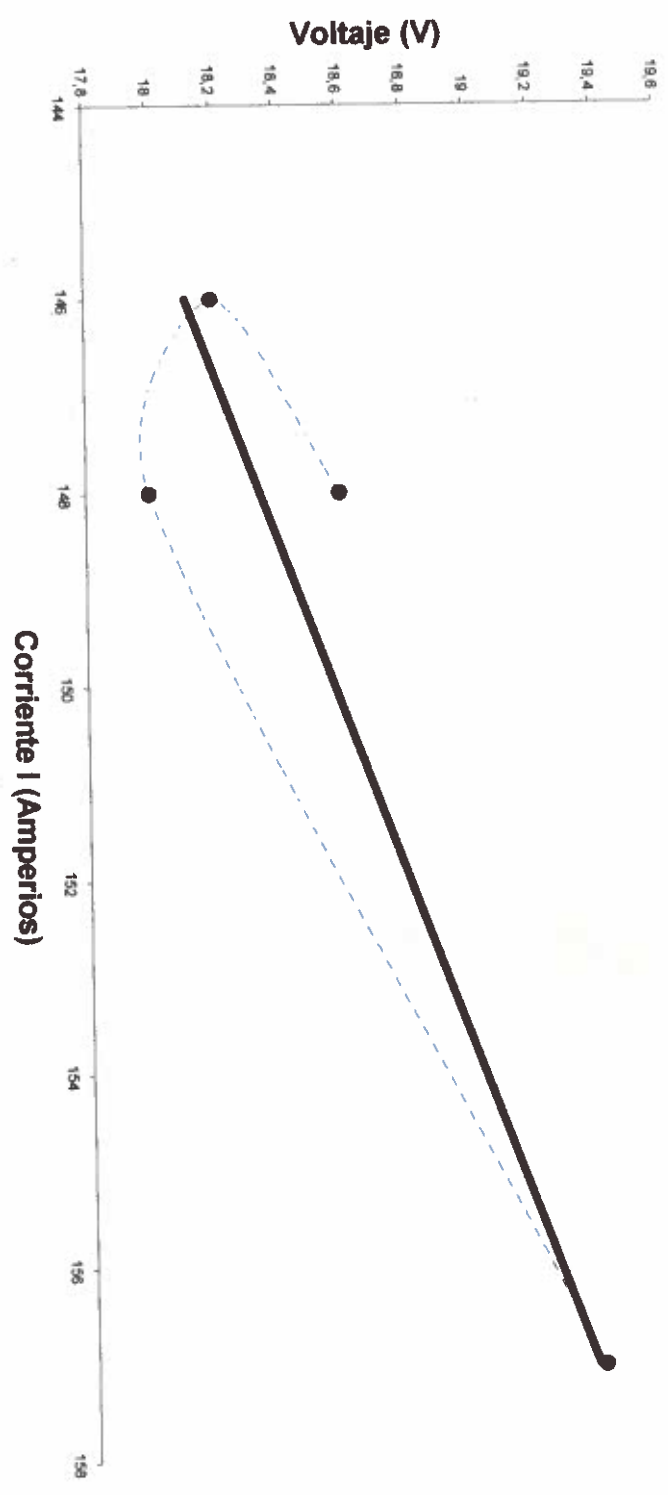


Fig. 19 Gráfico Corriente VS Voltaje para muestra T5 GMAW

Fig. 20 Gráfico Corriente VS Voltaje para muestra T6 GMAW



2.3. Pruebas de soldadura

2.3.1 Análisis Metalografico

La metalografía es una de las principales pruebas a la soldadura ya que con el estudio de la macro estructura podemos conocer las posibles fallas de la junta soldada o grandes desperfectos de los materiales bases, tomando en cuenta la micro estructura podemos observa el tamaño del grano del material de aporte, como las de las piezas de trabajo, y zona afectada por el calor, ya que de esta manera se asegura de las resistencia al agrietamiento en caliente y la transformaciones de la micro estructura, todas estas transformaciones dependen del calor suministrado en el proceso, dados por el voltaje, amperaje y velocidad de soldeo, aunque el proceso de enfriamiento también influye en la micro estructura de la junta soldada y las propiedades mecánicas.

Se preparan las probetas que fueron cortadas de forma manual en las secciones de la tubería según la norma API 1104, para luego ser analizadas en el microscopio y luego tomando una fotografía para que exista un registro. En la primera parte de la preparación se realiza un desbaste grueso con lija de cinta No. 180, pasando al desbaste medio utilizando lija de agua No. 220, 320, 400 y 600 para realizar luego el pulido final en una pulidora de disco con paño tipo MOL, y empleando pasta de óxido de aluminio (alumina

tipo N) como abrasivo sobre un paño tipo DUR, el procedimiento empleado a las probetas para la macrofotografía y a las de Microestructura. Para esta última luego se efectúa un pulido con pasta de diamante tipo B obteniendo una superficie sin fallas, y luego proceder al ataque químico del material con el reactivo NITAL al 3%, el cual es un ácido nítrico diluido en 97 partes de alcohol metílico y 3 partes de ácido, con un tiempo de exposición de aproximadamente 3 segundos, para ser inmediatamente secado, de esta forma queda lista la probeta para ser analizada en el microscopio OLIMPUS PME, donde se realiza un barrido de toda la Microestructura con un aumento de 50X (Fig. 21).

En las muestras utilizadas en la macrofotografía se ataca con el mismo reactivo por un tiempo entre 30 y 40 segundos, la macrofotografía fue realizada con un aumento de 8X en el macroscopio ESTEREO WILD (Fig. 22 - 25).

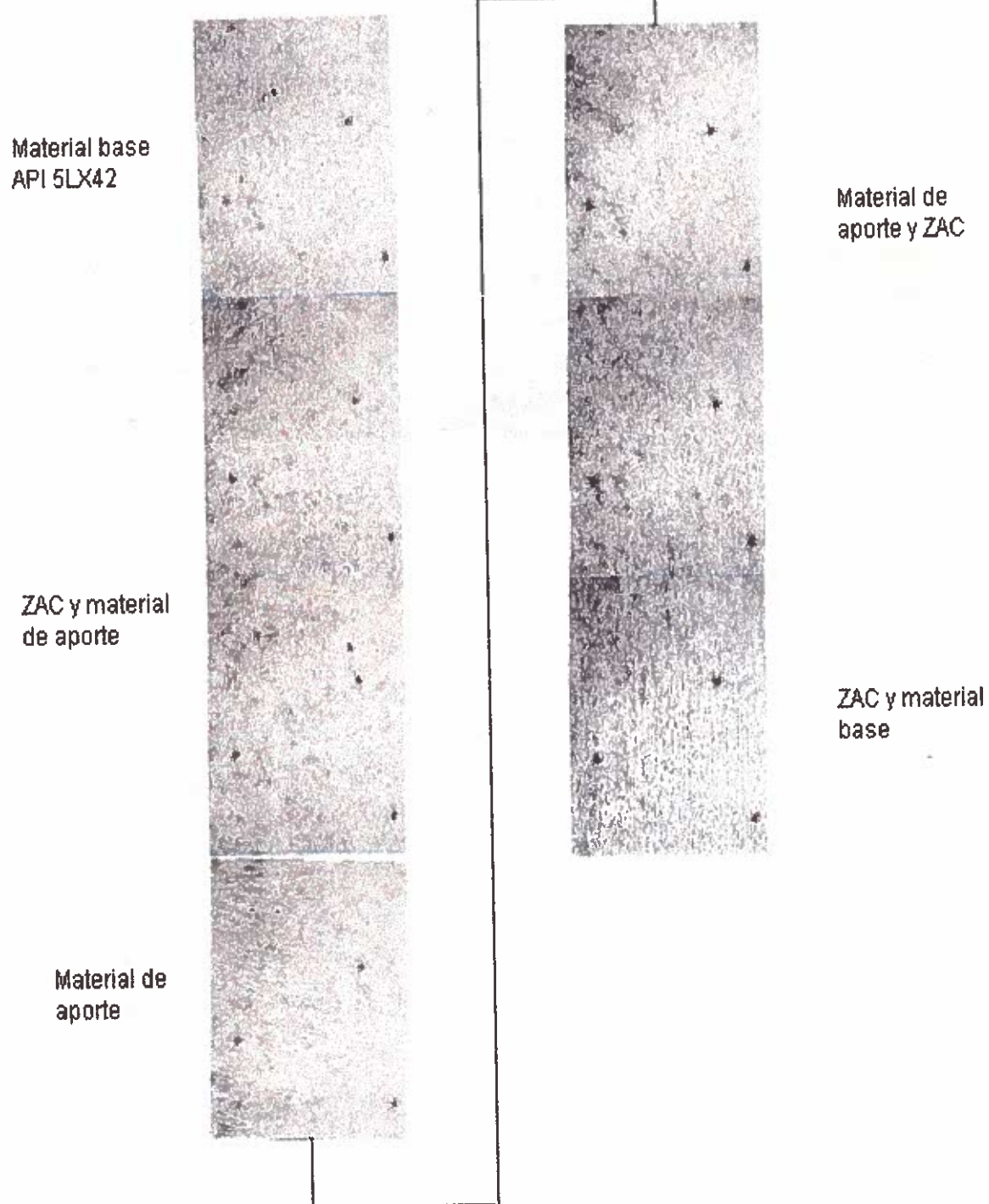
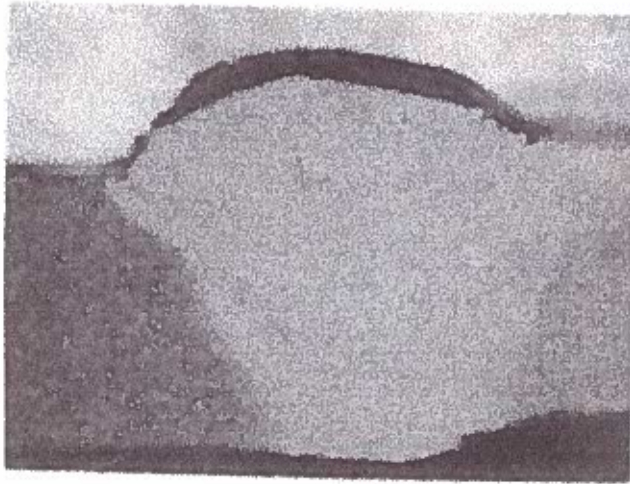
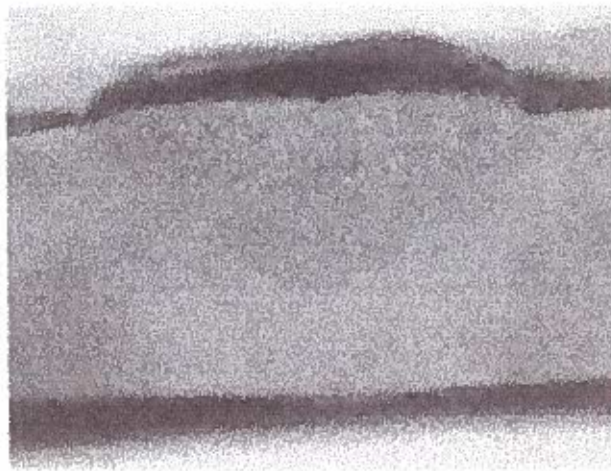


Fig. 21 Microestructura de la junta soldada para la muestra T2

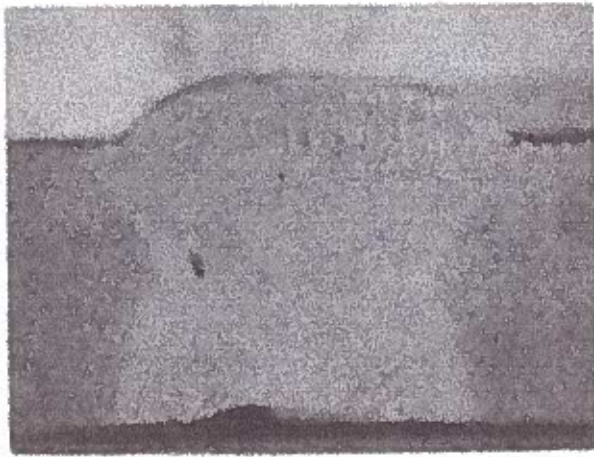


T1 **Proceso SMAW E6010**

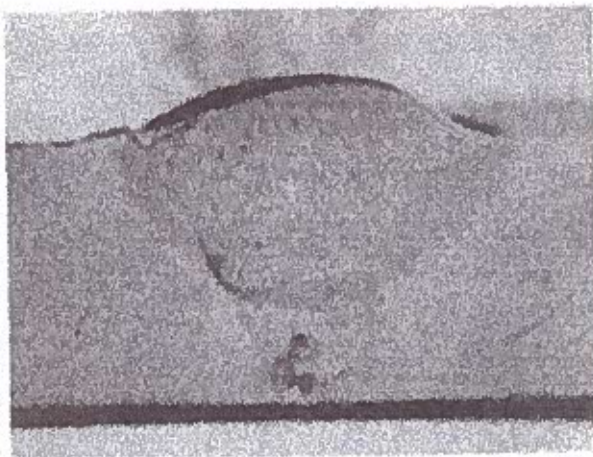


T2 **Proceso GMAW ER70S-6**

Fig. 22 **Macrofotografía para las muestras T1 y T2 Nital 3% - 8X**



T2-A Proceso GMAW ER70S-6

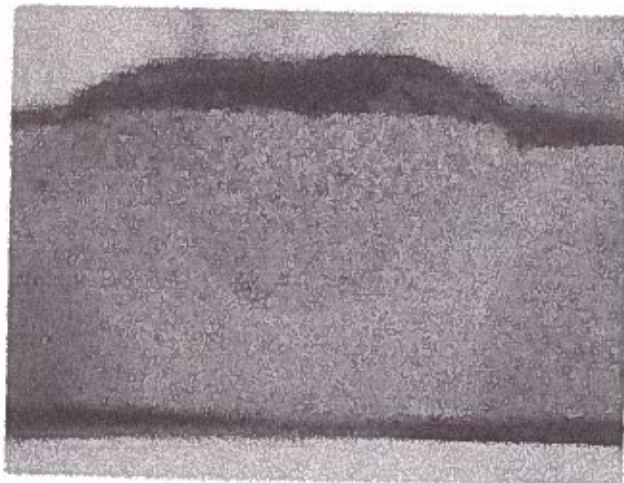


T5 Proceso GMAW ER70S-6

**Fig. 23 Macrofotografía para las muestras realizadas con proceso GMAW.
Nital 3% - 8X**

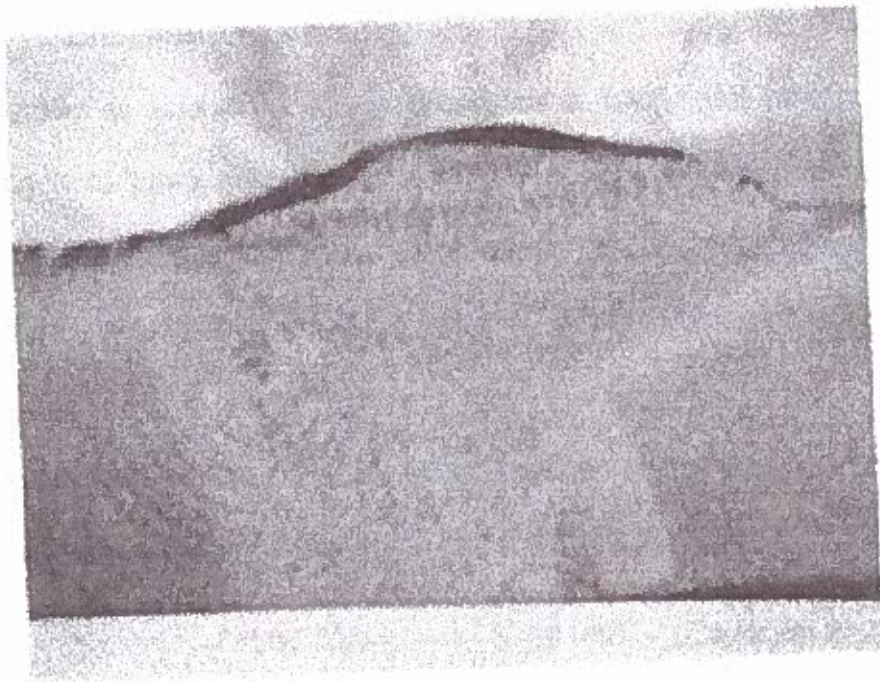


T3 Proceso SMAW E6010



T4 Proceso SMAW E6010

Fig. 24 Macrofotografía para las muestras soldadas con proceso SMAW.
Nital 3% - 8X



T8 Proceso SMAW + GMAW

Fig. 25 Macrofotografía para las muestras T8. Nital 3% - 8X

2.3.2. Dilución

La dilución es una prueba que cuantifica la fusión del material base con relación a la junta soldada, en forma de porcentaje, podemos mencionar además que la dilución viene íntimamente ligado con los parámetros de soldadura, la soldabilidad de la tubería, y las propiedades del metal se aporte.

En este estudio la junta se efectuó un bisel entonces la determinación de la dilución viene dada por la siguiente ecuación: (Ref. 8).

$$DILUCIÓN = \frac{A+B}{A+B+C} * 100\% \quad (\text{Ecuación 2})$$

En el grafico podemos determinar las áreas.

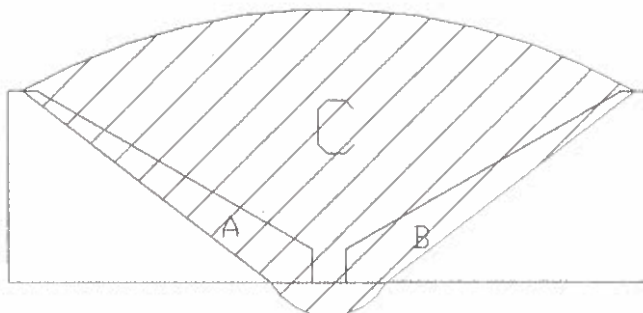


Fig. 26 Representación gráfica de la soldadura para el cálculo de la dilución

En la tabla a continuación se muestra los porcentajes de dilución y del calor suministrado en las tuberías soldadas para los dos procesos aplicadas.

El calor suministrado es calculado por la ecuación a continuación:

$$H = \frac{V * I}{v}, \text{ donde } H \text{ es el calor suministrado y resulta en Joule / mm}$$

V, es voltaje en voltios

I, es la corriente en amperios

v, la velocidad de soldeo en mm / seg.

(Ecuación 3). (Ref. 9)

Tabla XV. Resultados de la característica del cordón para todas las muestras

No. de prueba	Dilución (%)	Calor (Joule/mm)	ZAC (mm)	Ancho del cordón (mm)
T1	63,20	708,50	2,39	13,48
T4	64,87	677,93	3,32	15,97
T3	70,69	2406,11	3,75	13,46
T2	55,76	690,33	1,72	11,98
T2A	56,18	779,35	2,76	11,67
T5	52,56	760,45	1,43	12,78
T6	58,92	938,24	1,94	11,30

Fig. 27 Gráfico Calor Suministrado VS Dilución para muestras SMAW

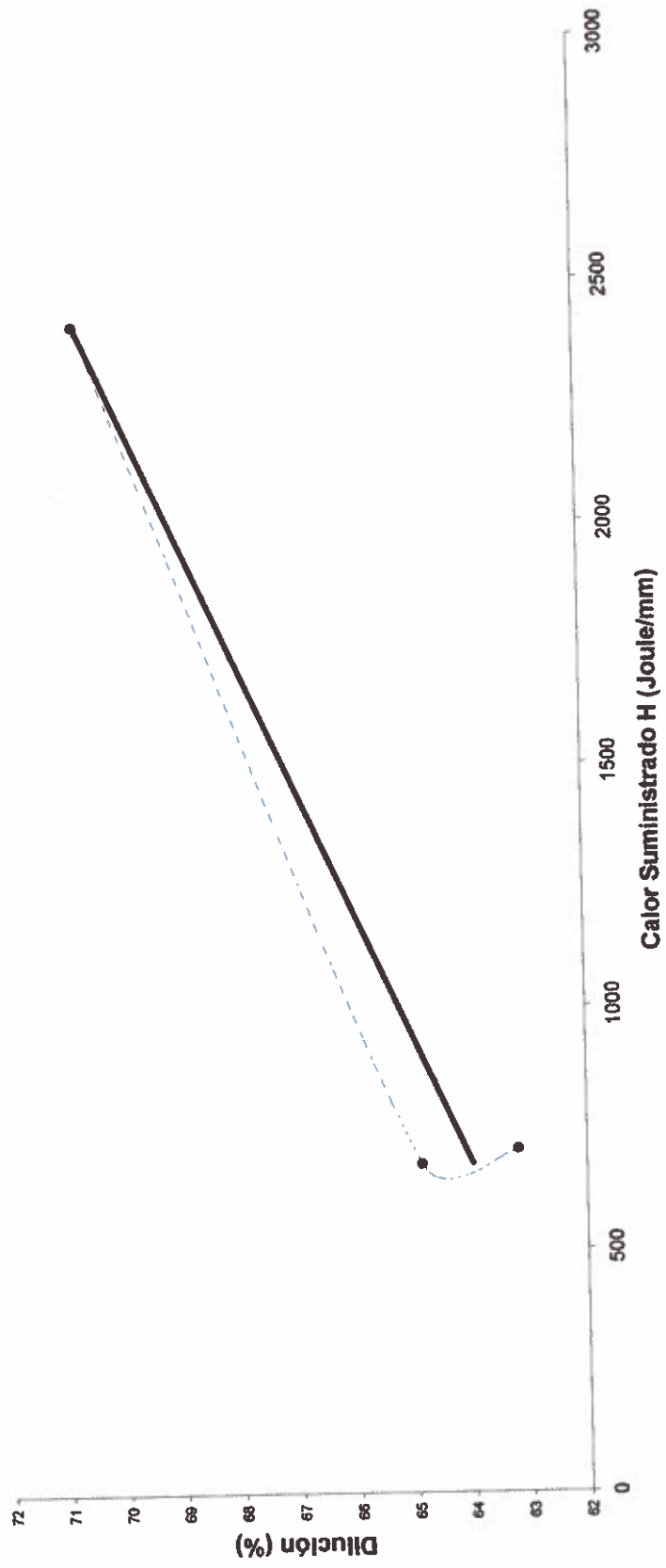
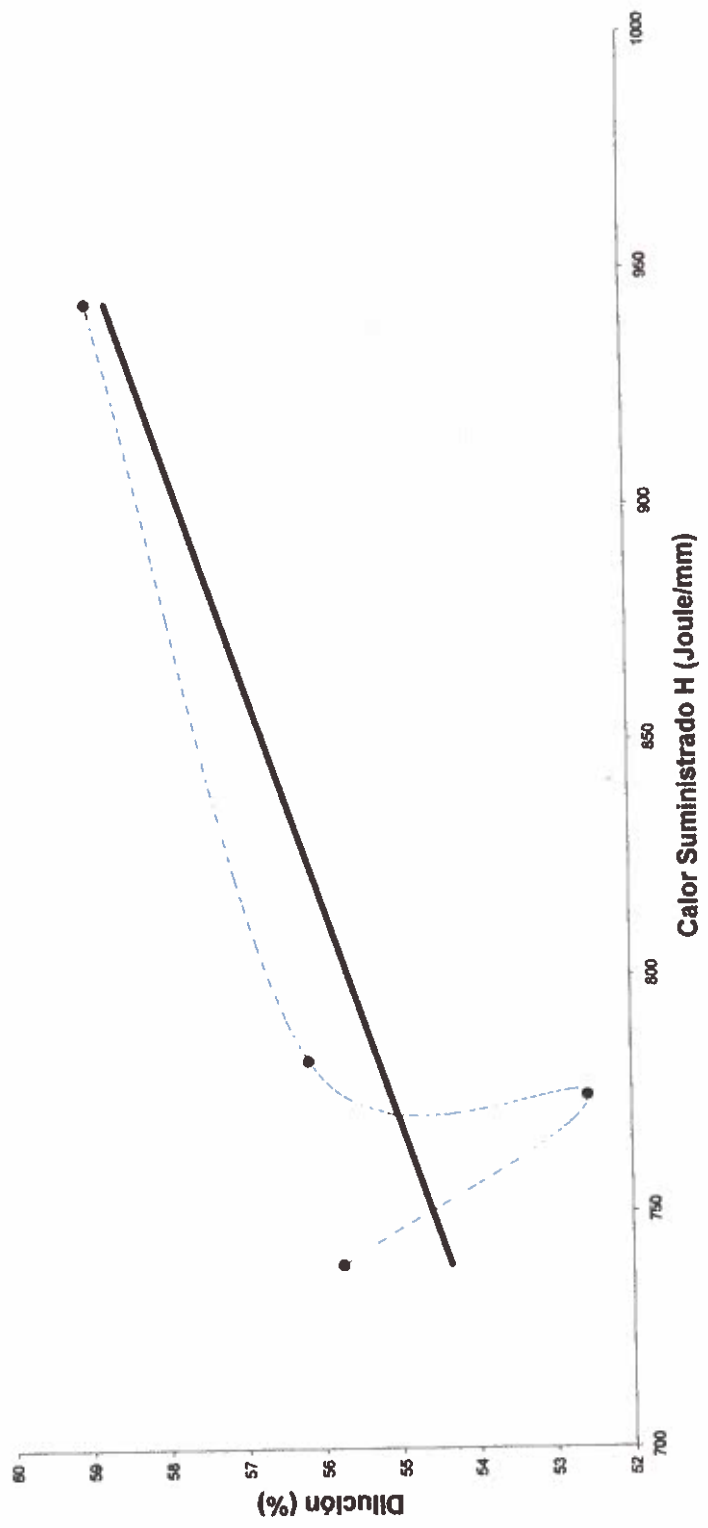


Fig. 28 Gráfico Calor Suministrado VS Dilución para muestras GMAW



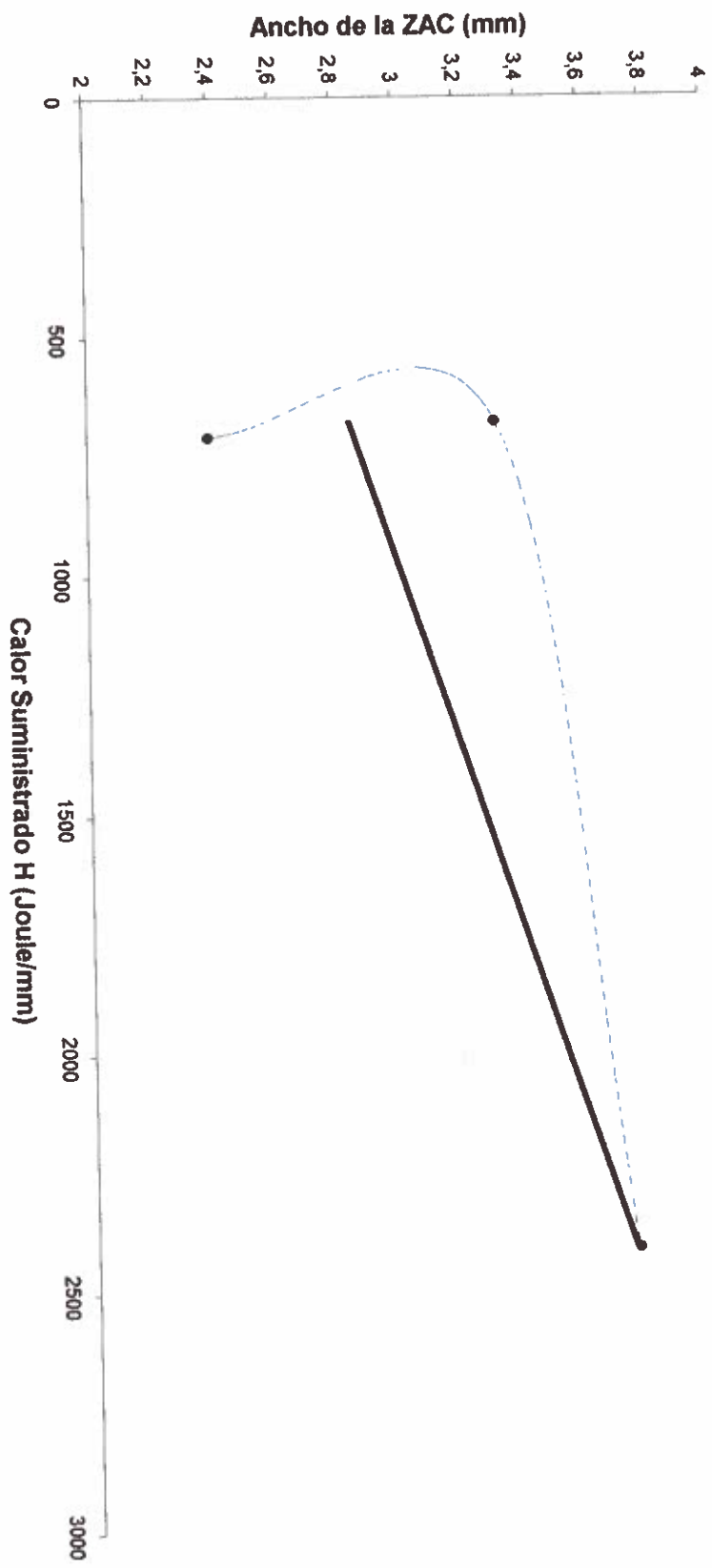


Fig. 29 Gráfico Calor Suministrado vs Ancho de la ZAC para muestras SMAW

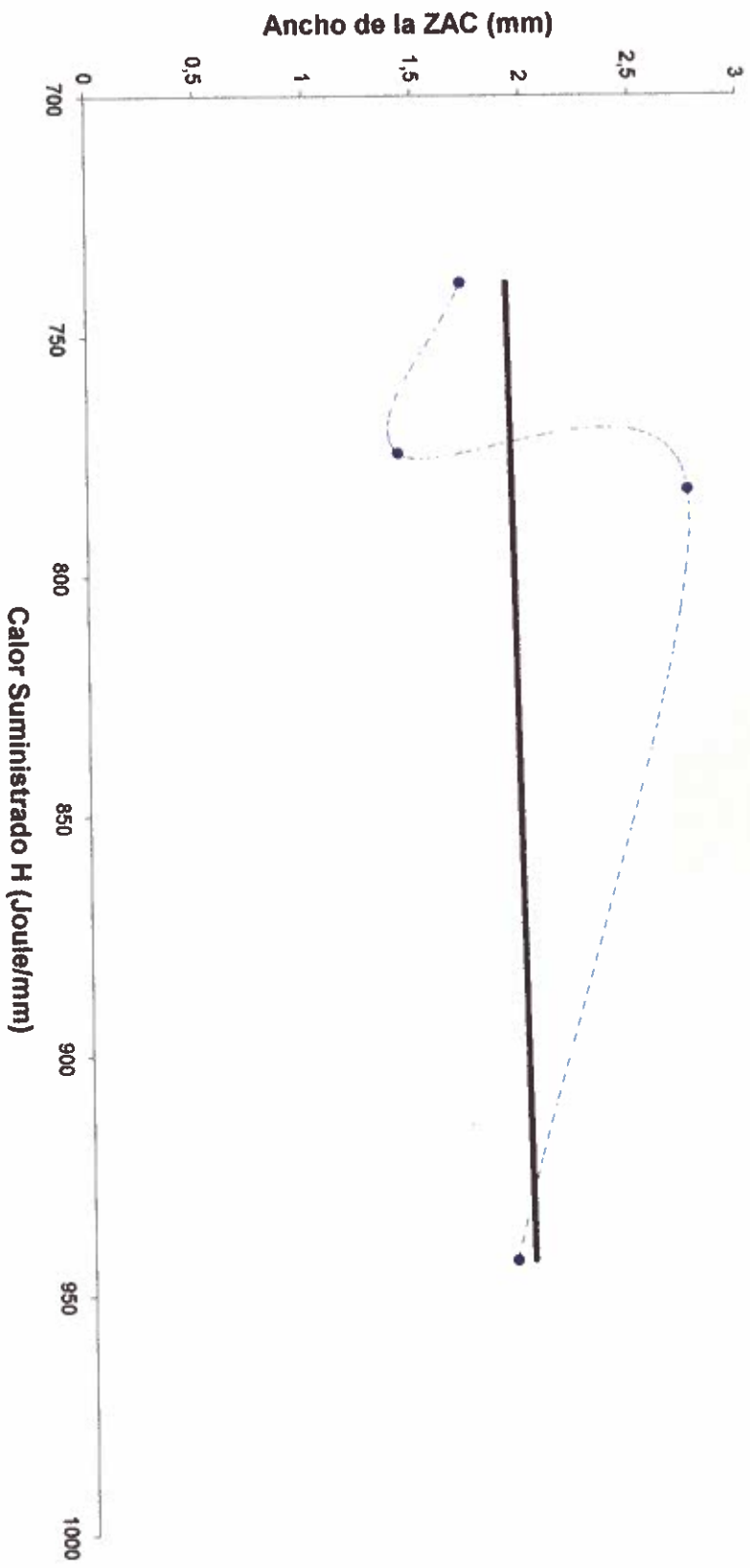


Fig. 30 Gráfico Calor suministrado vs Ancho de la ZAC para muestras GMAW

Fig. 31 Gráfico Corriente vs Ancho del cordón para muestras SMAW

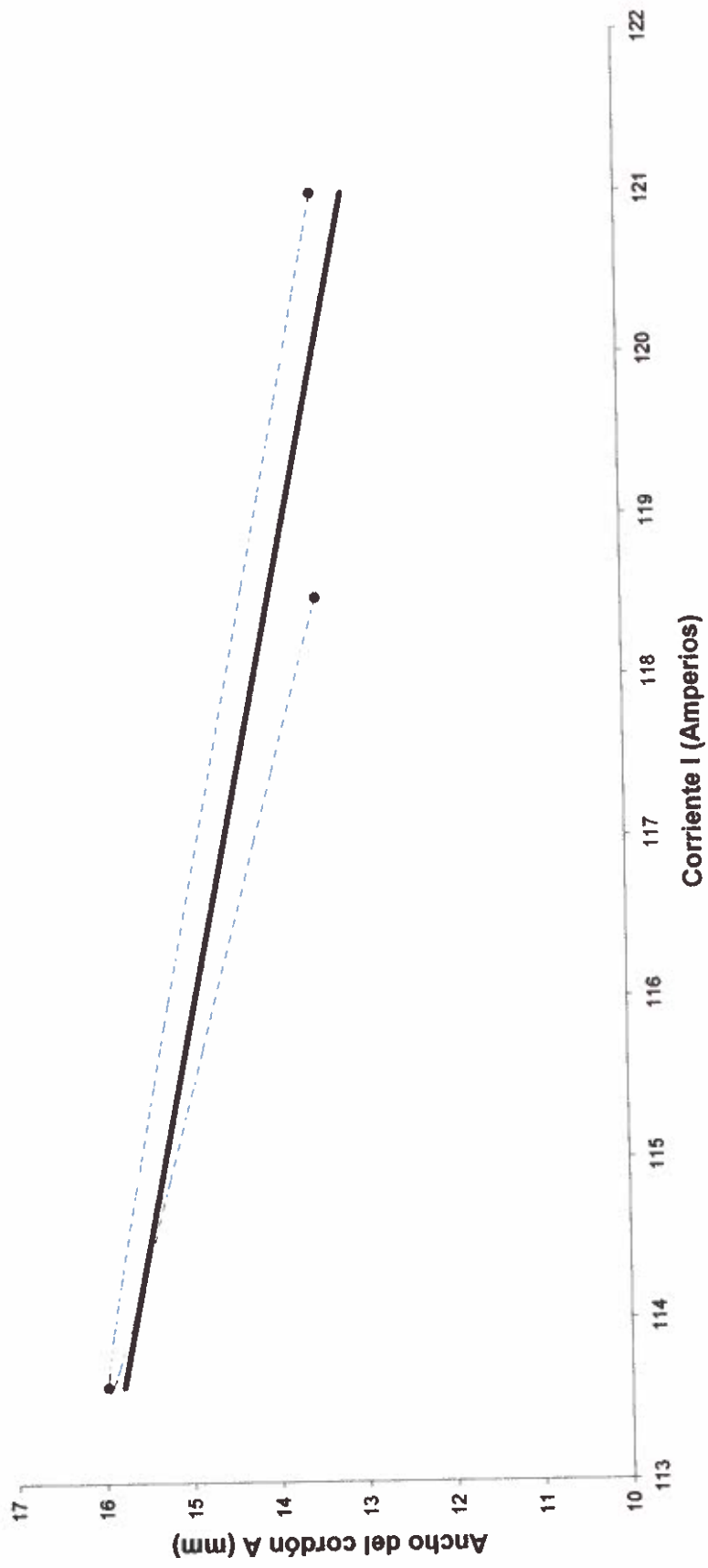


Fig. 32 Gráfico Corriente vs Ancho del cordón para muestras GMAW

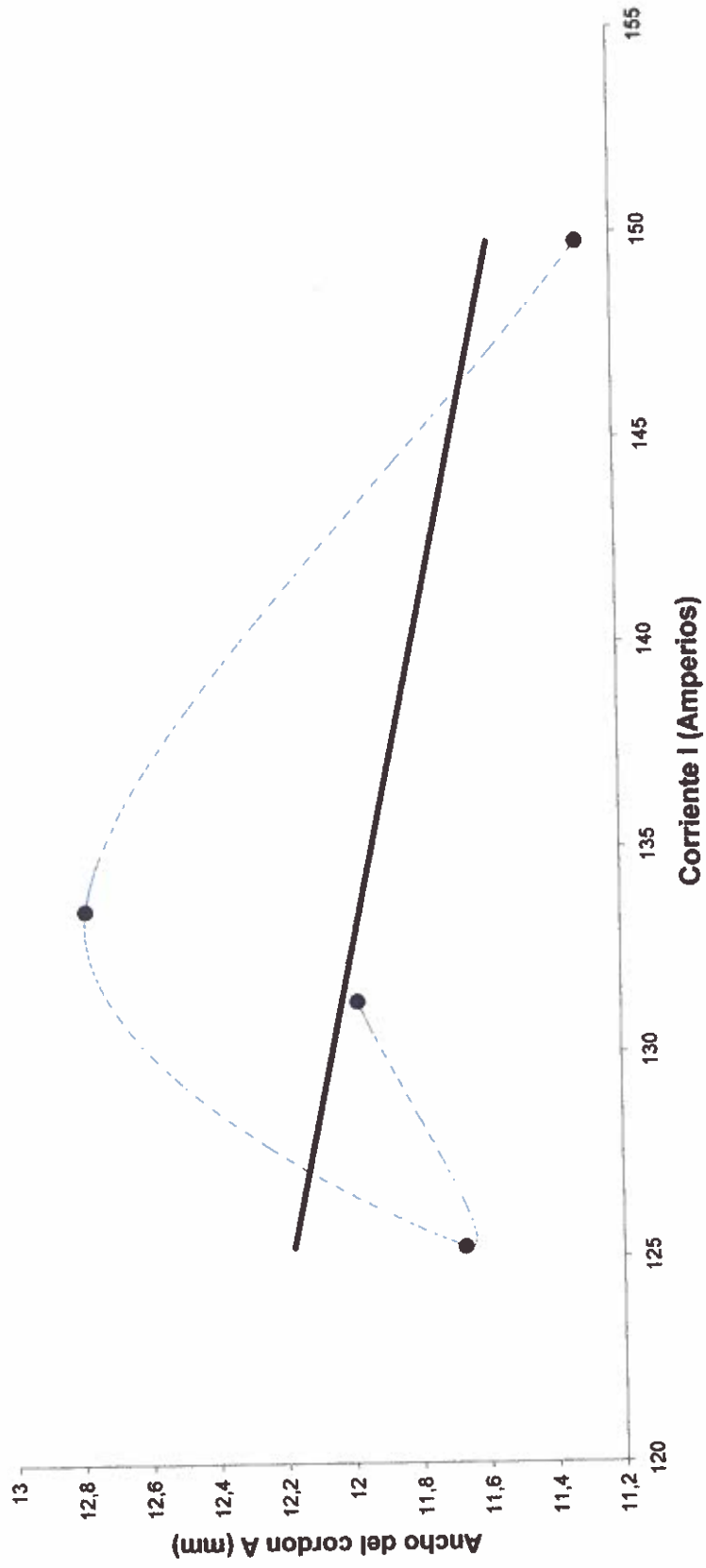


Fig. 33 Gráfico Voltaje vs Ancho del cordón para muestras SMAW

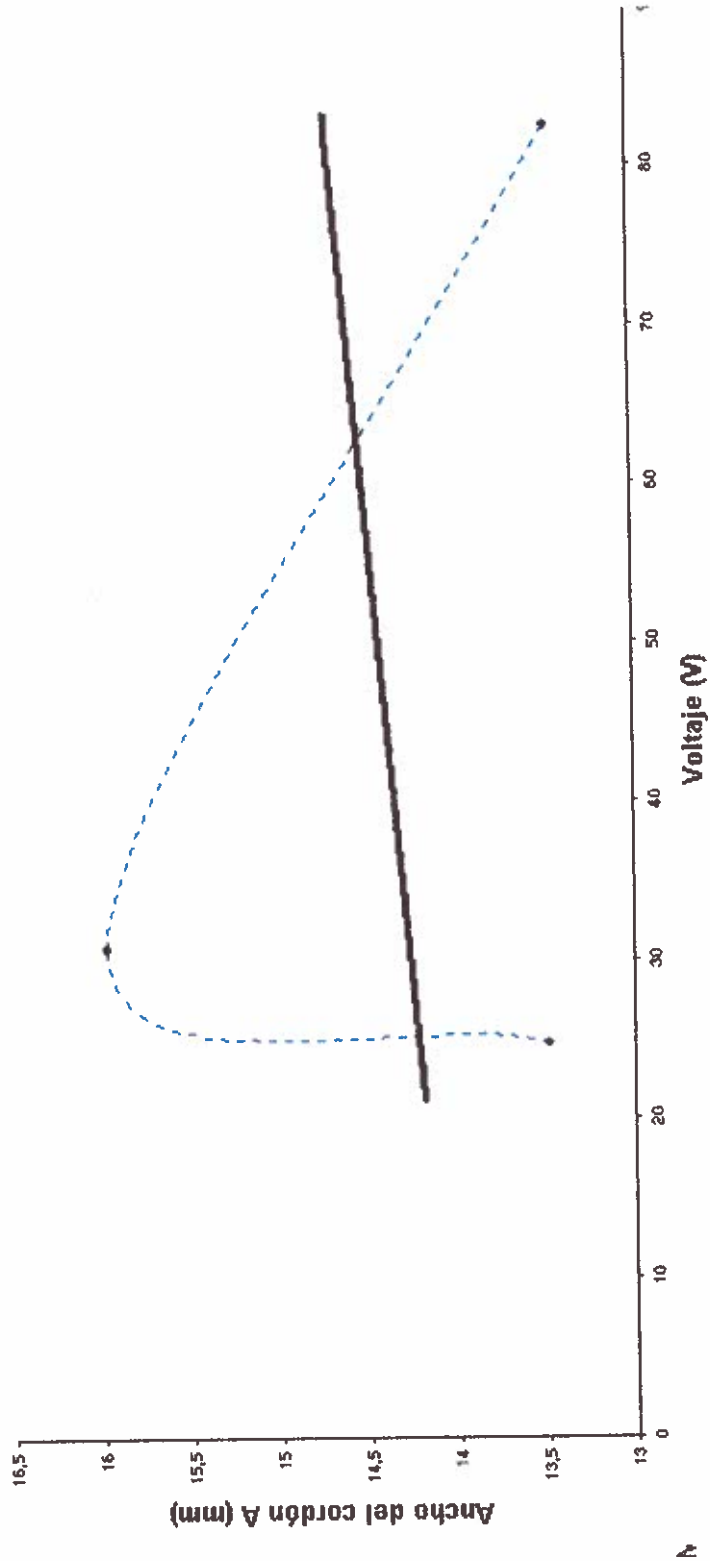
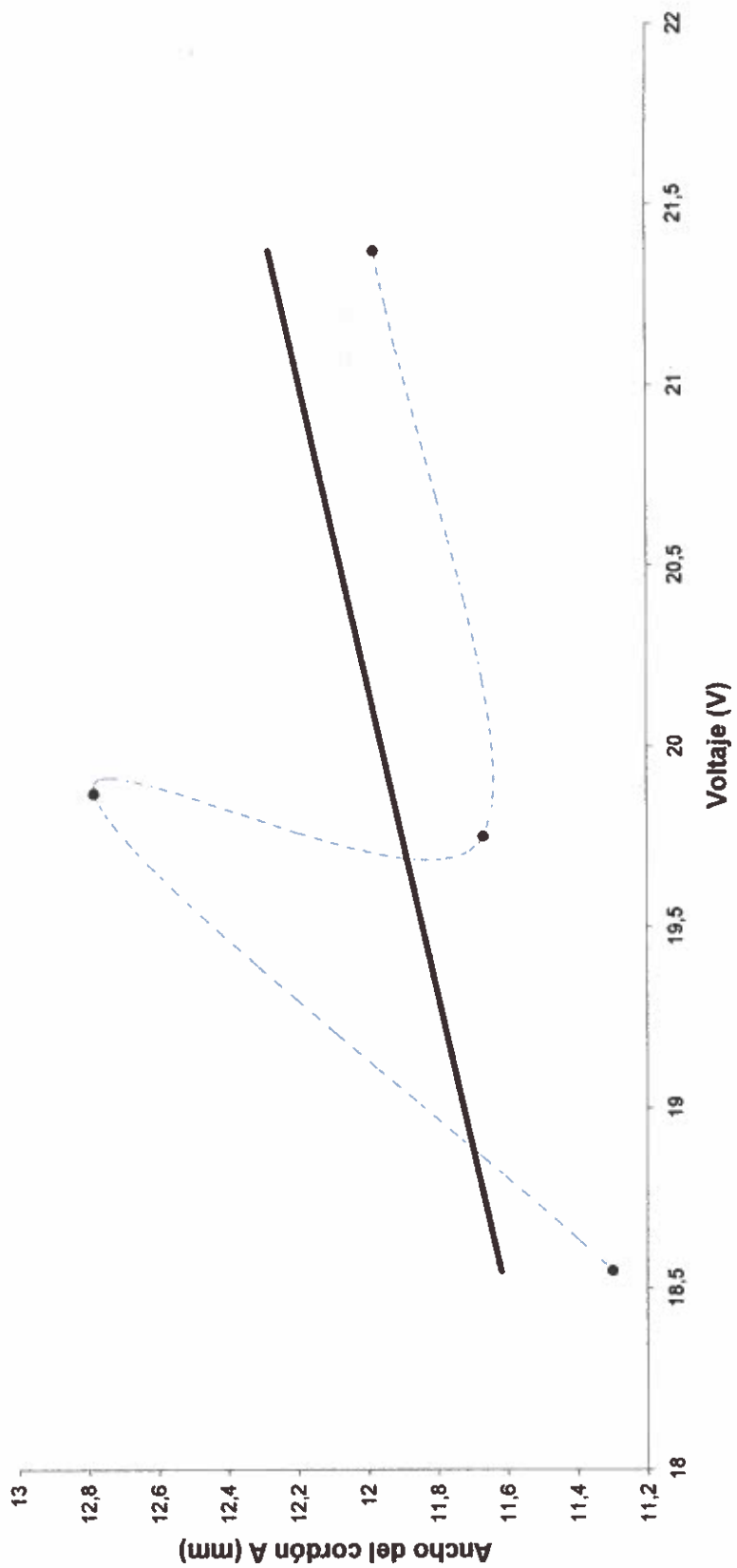


Fig. 34 Gráfico Voltaje vs Ancho del cordón para muestras GMAW



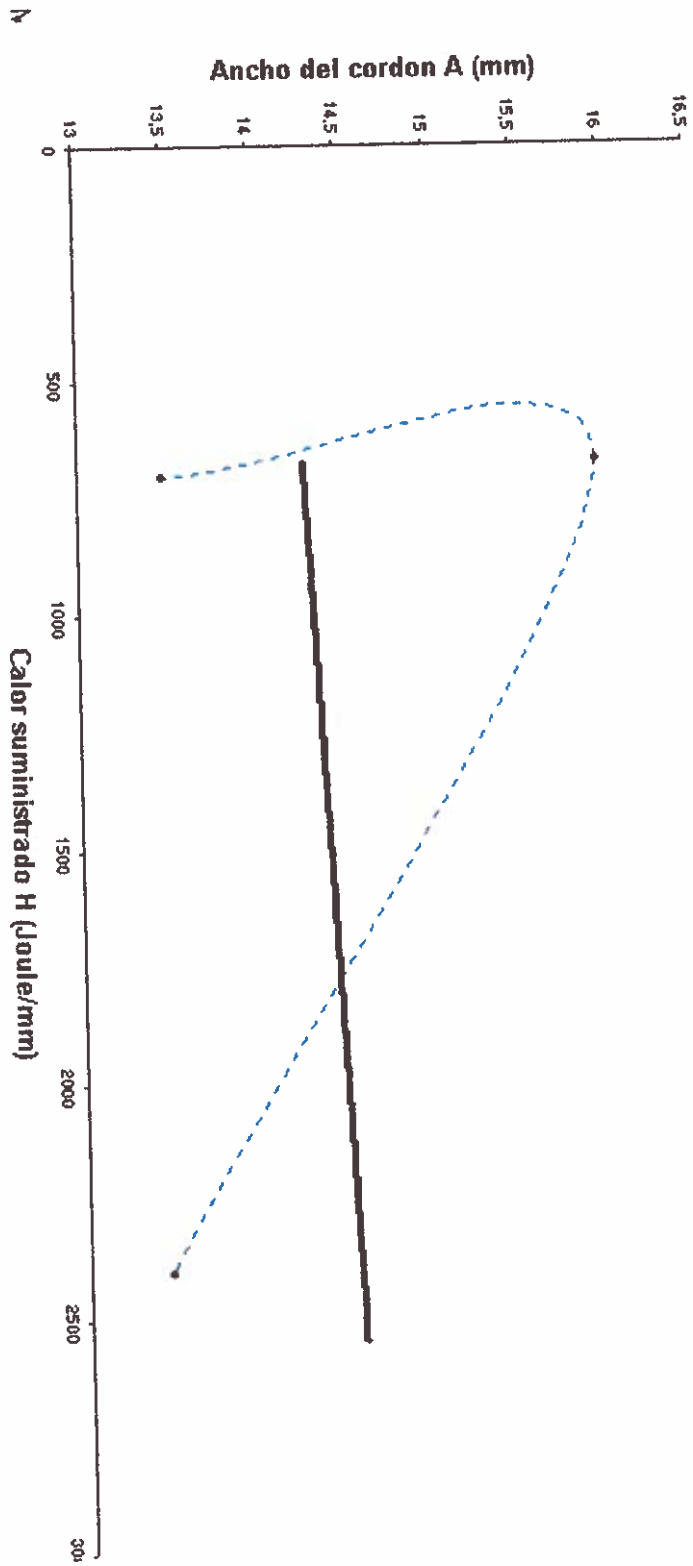


Fig. 35 Gráfico Calor VS Ancho del Cordón para muestras SMAW

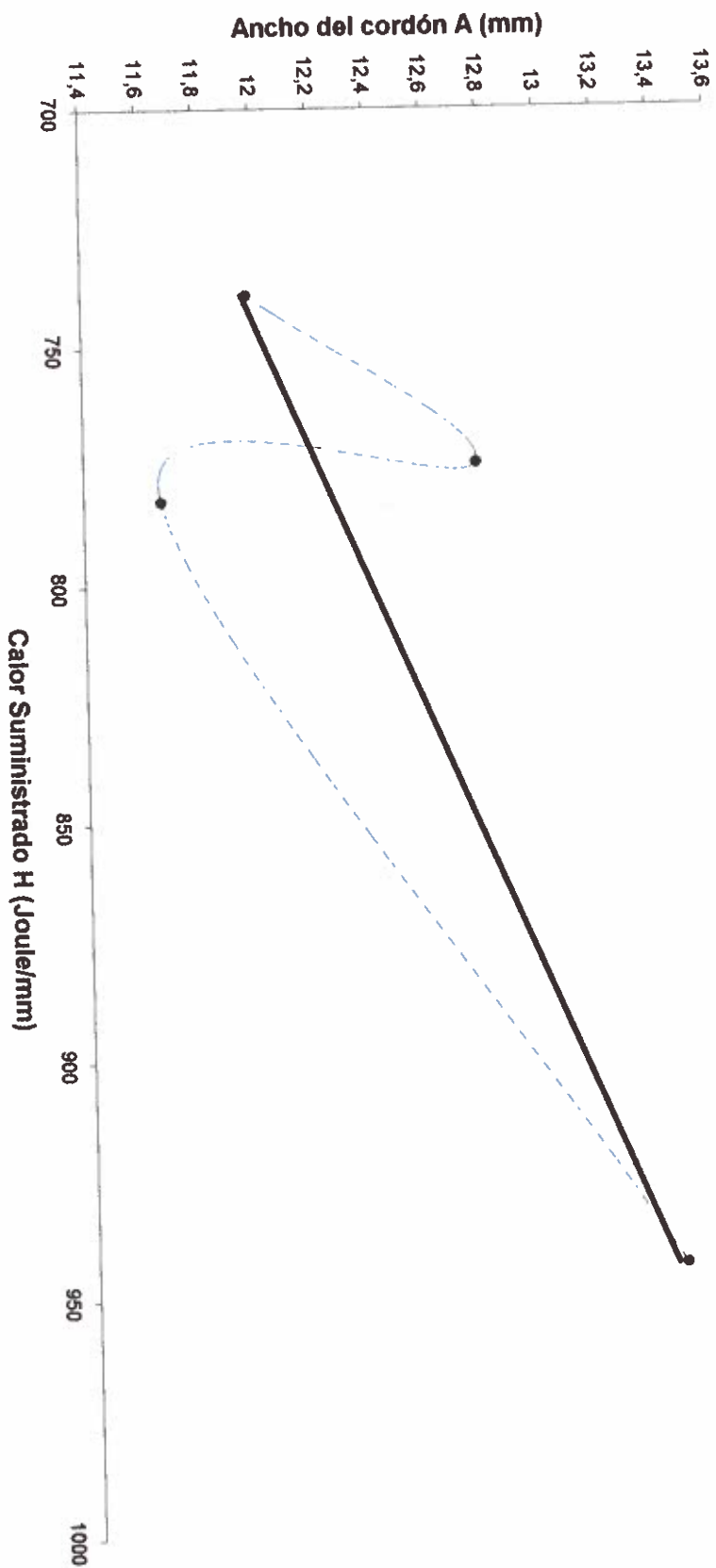


Fig. 36 Gráfico Calor vs Ancho del cordón para muestras GMAW

2.3.3. Inspección Visual

La inspección visual es el método más antiguo y más utilizado en los ensayos no destructivos, y esta no solo se refiere a la observación directa de la junta soldada, sino también a sistemas y componentes de maquinarias, equipos, estructuras, etc., además de analizar las pruebas aplicadas a la tubería. Entonces en la soldadura terminada lo primero que se comprobaba son las características físicas tales como dimensiones, aspecto superficial, poros, socavación, etc.

Este procedimiento de ensayos puede rechazar cualquier cordón de soldadura sin la necesidad de realizar otro ensayo no destructivo, los parámetros de aceptación de la tubería soldada en la inspección visual son:

- La sobre monta o pase de cubierta no debe tener niveles inferiores al que dado por el diámetro exterior del tubo. Ni tampoco niveles superiores a 1/16 de pulgadas del diámetro superior al tubo.
- Este cordón también solapa a los biseles de la junta en 1.5 mm por cada lado, si existen cordones con menores o mayores proporciones de el ancho establecido por la norma, este es criterio el cual puede ser empleado para el rechazo de la tubería soldada.
- Existencia de mordeduras, poros en la superficie del cordón que se encuentran dentro de los rangos de 12.45 % del espesor del tubo.

A la tubería luego de haber realizado el proceso de soldadura, se procedió a la limpieza con cepillos de discos trenzados y se empleo una lupa de 4X para la inspección visual en todo el contorno del cordón.



Fig. 37 Realizando la limpieza del cordón terminado para ejecutar la inspección visual.

2.3.3. Inspección radiográfica

El procedimiento radiográfico se realizó a todas las uniones soldadas bajo una técnica de doble pared con simple imagen, la película utilizada es D7, y con un equipo de radiación SEIFERT de 300 kilovoltios.

Se coloca la tubería soldada en el equipo de radiación casi al nivel del foco del sistema se en cero el instrumento, y se expuso 6 mmA/ minutos con 200 kilovoltios. También se colocó una plancha de plomo para evitar la radiación secundaria.



Fig. 38 Equipo de ensayo radiográfico de la tubería soldada

Luego se procedió al relevado de las películas, las cuales se encontraban en un estuche de plomo, para evitar el paso de luz del medio y no se velaran las películas. La tabla a continuación nos muestra el procedimiento del revelado empleado en este ensayo.

Tabla XVI. Procedimiento del revelado de las películas radiográficas.

Tipo de baño	Tiempo en minutos
Revelador	4
Baño de parada	0.5
Fijador	4

Tabla XVII Resultado de la inspección por radiografía

No. Del tubo	Sección	Tipo de defecto	Tipo de proceso	Aceptado o reparar
T1	A-B		SMAW	ACEPTADO
	B-C			ACEPTADO
	C-A	F		ACEPTADO
T2	A-B	Aa	GMAW	ACEPTADO
	B-C	Aa		ACEPTADO
	C-A	C		REPARAR
T2A	A-B	Aa-C	GMAW	REPARAR
	B-C	Aa		REPARAR
	C-A	Aa-Ab		REPARAR
T3	A-B	F	SMAW	ACEPTADO
	B-C			ACEPTADO
	C-A	F		ACEPTADO
T4	A-B		SMAW	ACEPTADO
	B-C	F		ACEPTADO
	C-A			ACEPTADO
T5	A-B		GMAW	ACEPTADO
	B-C	Aa		ACEPTADO
	C-A	Aa		ACEPTADO
T6	A-B	Aa	GMAW	REPARAR
	B-C	Aa-Ab-C		REPARAR
	C-A	Aa-Ba		REPARAR
T7	A-B	Aa-Ab-C	GMAW	REPARAR
	B-C	Aa-Ab-C		REPARAR
	C-A	C		ACEPTADO
T8	A-B	Aa	SMAW Y GMAW	ACEPTADO
	B-C	Aa		ACEPTADO
	C-A			ACEPTADO

Aa - porosidad

Ab - burbujas tubulares

Ba - Inclusiones de forma y orientación variada

C - Falta de fusión

F - Mordeduras o socavación

2.3.4. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es la resistencia última a la tracción a la carga máxima sostenida y se elaboraron las probetas según norma AWS, las mismas que se puede observar en el figura 39, estas probetas se aplicaron a cada proceso de soldar tubo 4 para SMAW, tubo 2 para GMAW, y al tubo donde se realizaron con los dos procesos de soldar.

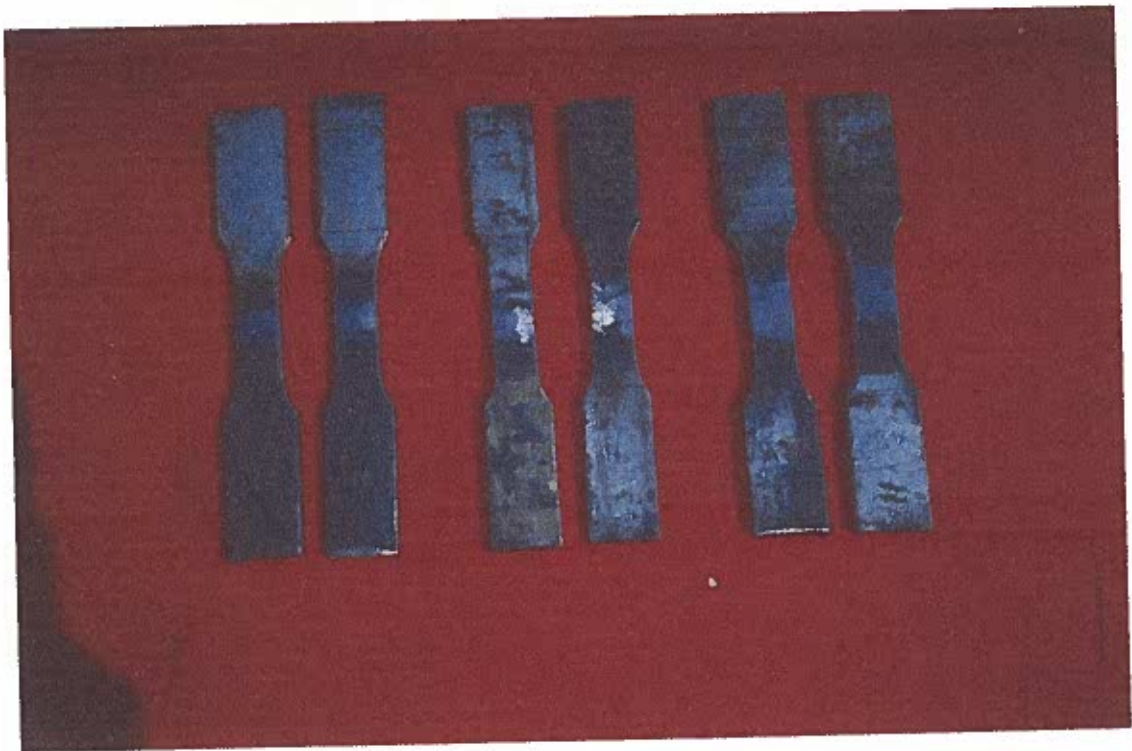


Fig. 39 Probetas para prueba de tracción bajo norma ASME.

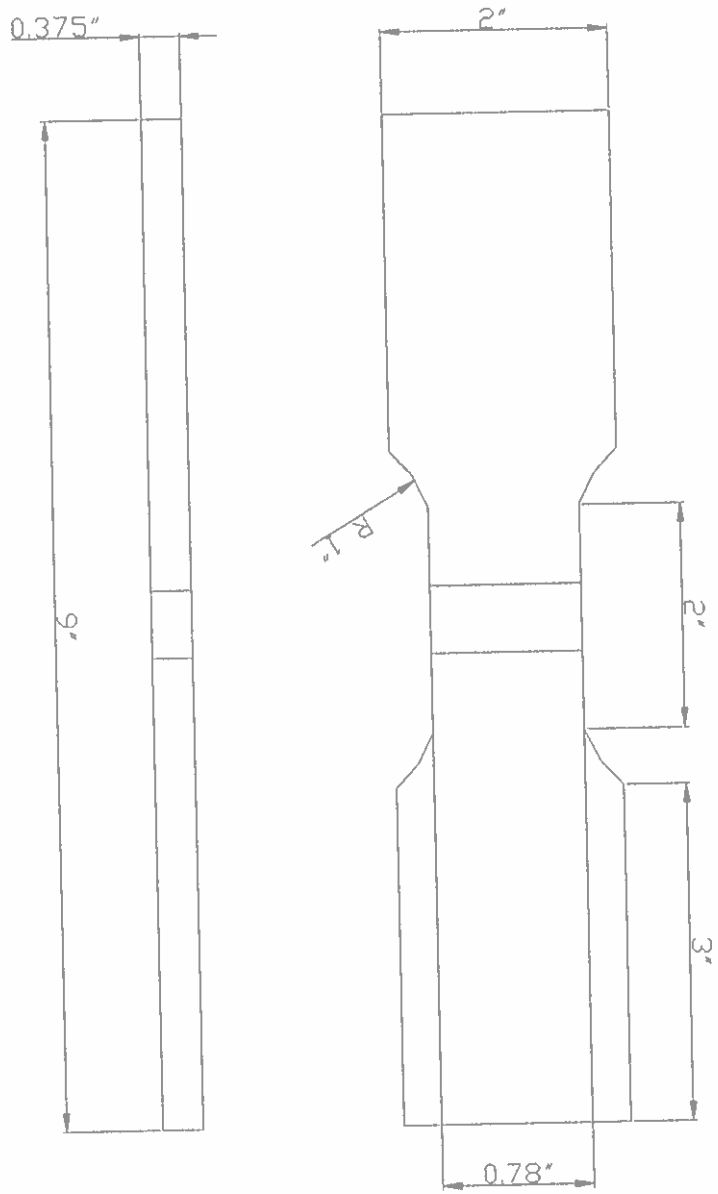


Fig.40 Dimensiones de las probetas de tracción (Ref. 10)

Tabla XVIII. Resultados del ensayo de tracción

Muestra	Espesor [plg]	Ancho [plg]	Area [plg ²]	carga máxima. (KN)	Fuerza max. [lbf]	Esfuerzo σ máximo. [psi]	Porcentaje Elongación (%)
T2-1	0,35	0,78	0,28	92,31	21242,20	76519,35	17,60%
T2-2	0,35	0,78	0,27	94,49	20752,11	75551,23	23,90%
T4-1	0,35	0,78	0,28	98,17	22069,50	79900,98	28,00%
T4-2	0,35	0,78	0,27	98,17	22069,50	81716,91	26,00%
T8-1	0,34	0,78	0,27	96,75	21750,27	80995,10	20,80%
T8-2	0,34	0,78	0,27	93,21	20954,44	78031,56	24,40%

2.3.5. Ensayo de doblado

La prueba de doblado se la realiza a las probetas de los mismos tubos antes usados en la prueba de tracción. Este ensayo se lo hizo tanto en cara como raíz, las probetas están bajo norma ASME A370.

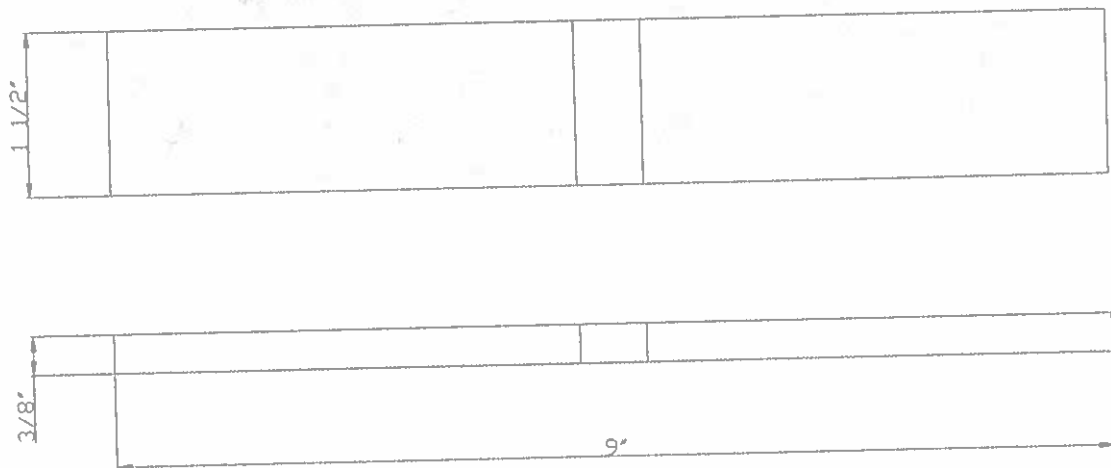


Fig. 41 Dimensiones de la probetas para el ensayo de doblado raíz y cara.
(Ref. 10)



Fig. 42 Realizando la prueba de doblado

Tabla XIX Resultados de la prueba de doblado.

No. del tubo ensayado	Identificación de la probeta	Aceptación o rechazo
T2	Raíz 1	ACEPTADO
	Raíz 2	ACEPTADO
	Cara 1	ACEPTADO
	Cara 2	RECHAZAR
T4	Raíz 1	ACEPTADO
	Raíz 2	ACEPTADO
	Cara 1	ACEPTADO
	Cara 2	ACEPTADO
T8	Raíz 1	ACEPTADO
	Raíz 2	ACEPTADO
	Cara 1	RECHAZAR
	Cara 2	ACEPTADO

2.3.6. Ensayo de dureza

La dureza es concerniente de los metales, y es la habilidad de resistir a la penetración. Los métodos más comunes para medir la dureza, es por medio de un durómetro el mismo que esta bajo escala Brinell o Rockwell, o ambas. Ambos escalas se aplica un penetrador el cual es aplicado con una esfera dura o un diamante dependiendo de la escala. El penetrador es aplicado en la superficie a la cual se mide la dureza mediante una carga estandarizada, la penetración es medida y luego se hace referencia con una tabla de dureza. Las muestras empleadas en la metalografía, son las que utilizamos en este ensayo realizando un barrido a cada una de las muestras tanto con proceso SMAW y GMAW. Las probetas se muestran a continuación.

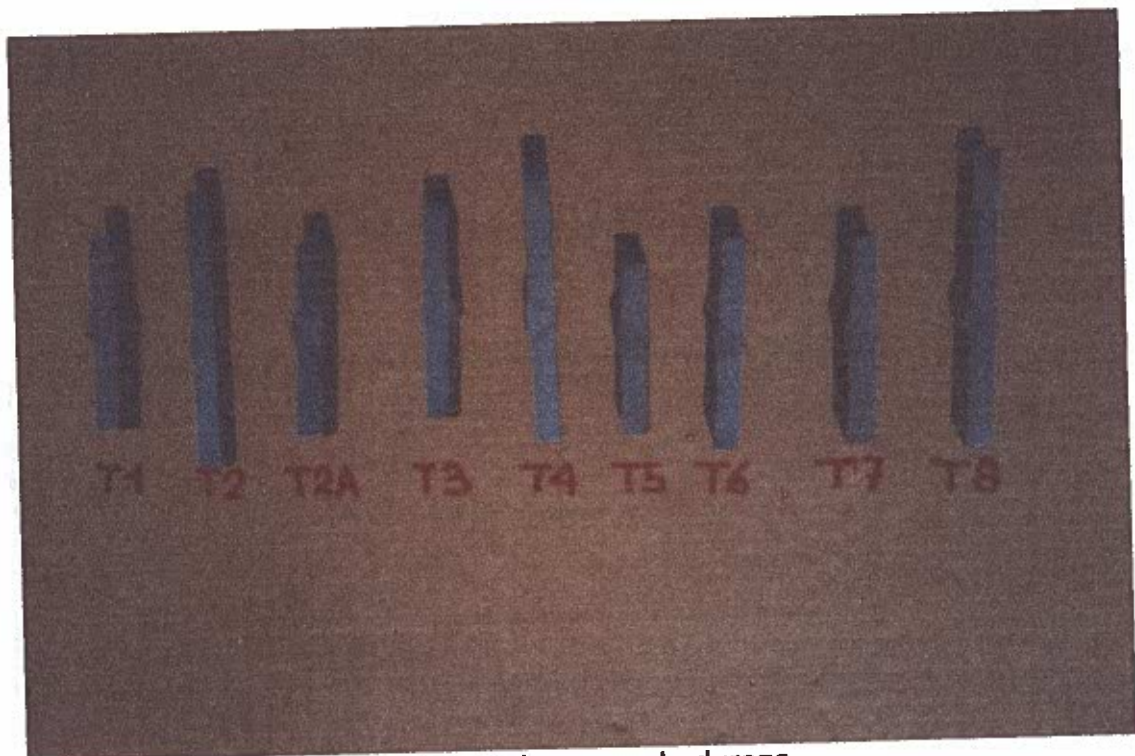


Fig. 43 Muestras empleadas en el ensayo de dureza.

Los resultados obtenidos fueron en escala Rockwell B, y se realizo un promedio de las zonas para obtener el grafico de dureza con relación a las secciones de las muestras.

Tabla XX. Resultados del ensayo de dureza para la muestras soldadas con SMAW

Sección	Dureza HRb
MATERIAL BASE	85,51
ZAC	87,77
MATERIAL DE APORTE	89,71
ZAC	86,00
MATERIAL BASE	85,79

Tabla XXI. Resultados del ensayo de dureza para la muestras soldadas con GMAW

Sección	Dureza HRb
MATERIAL BASE	84,72
ZAC	88,13
MATERIAL DE APORTE	93,00
ZAC	89,25
MATERIAL BASE	85,58

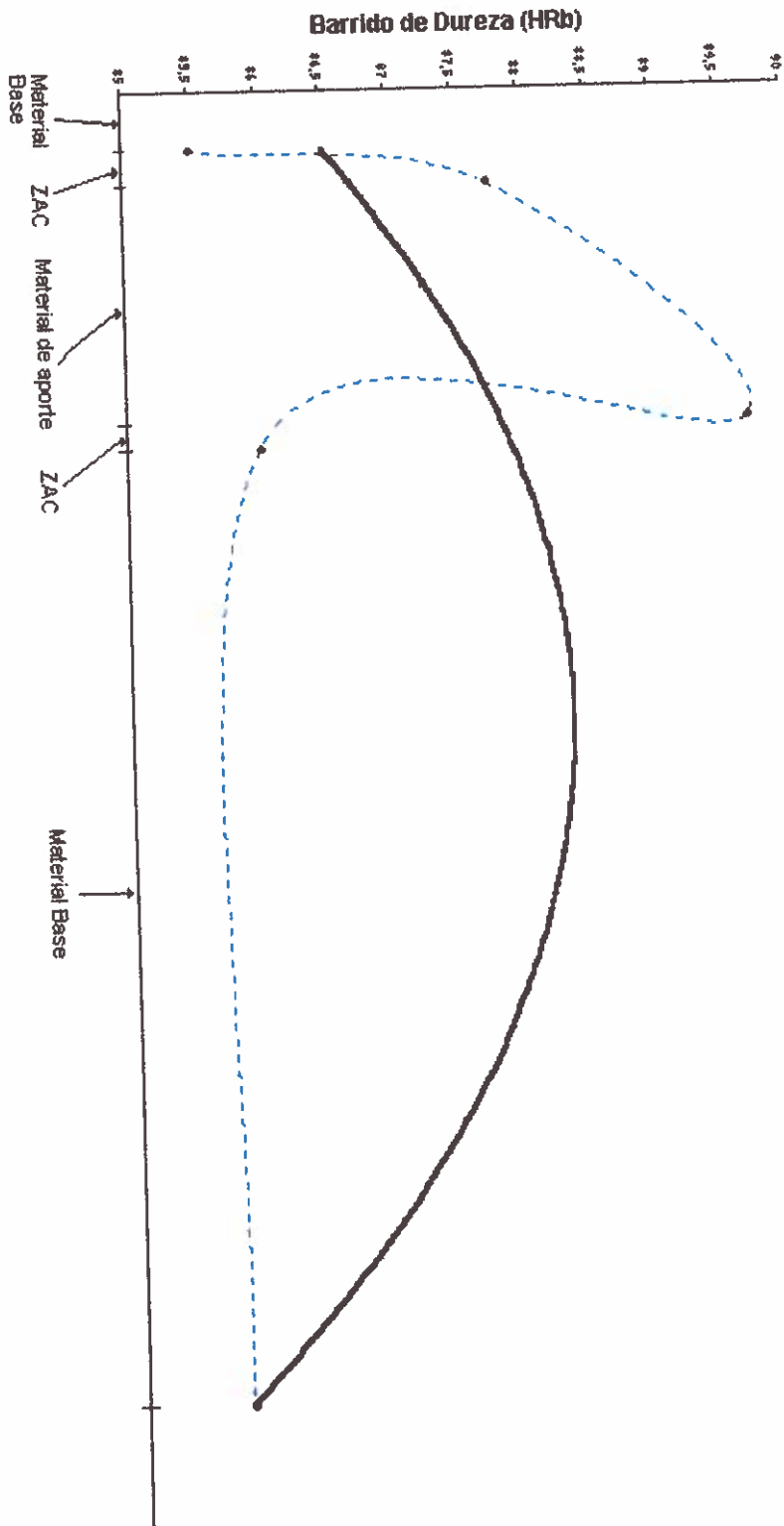
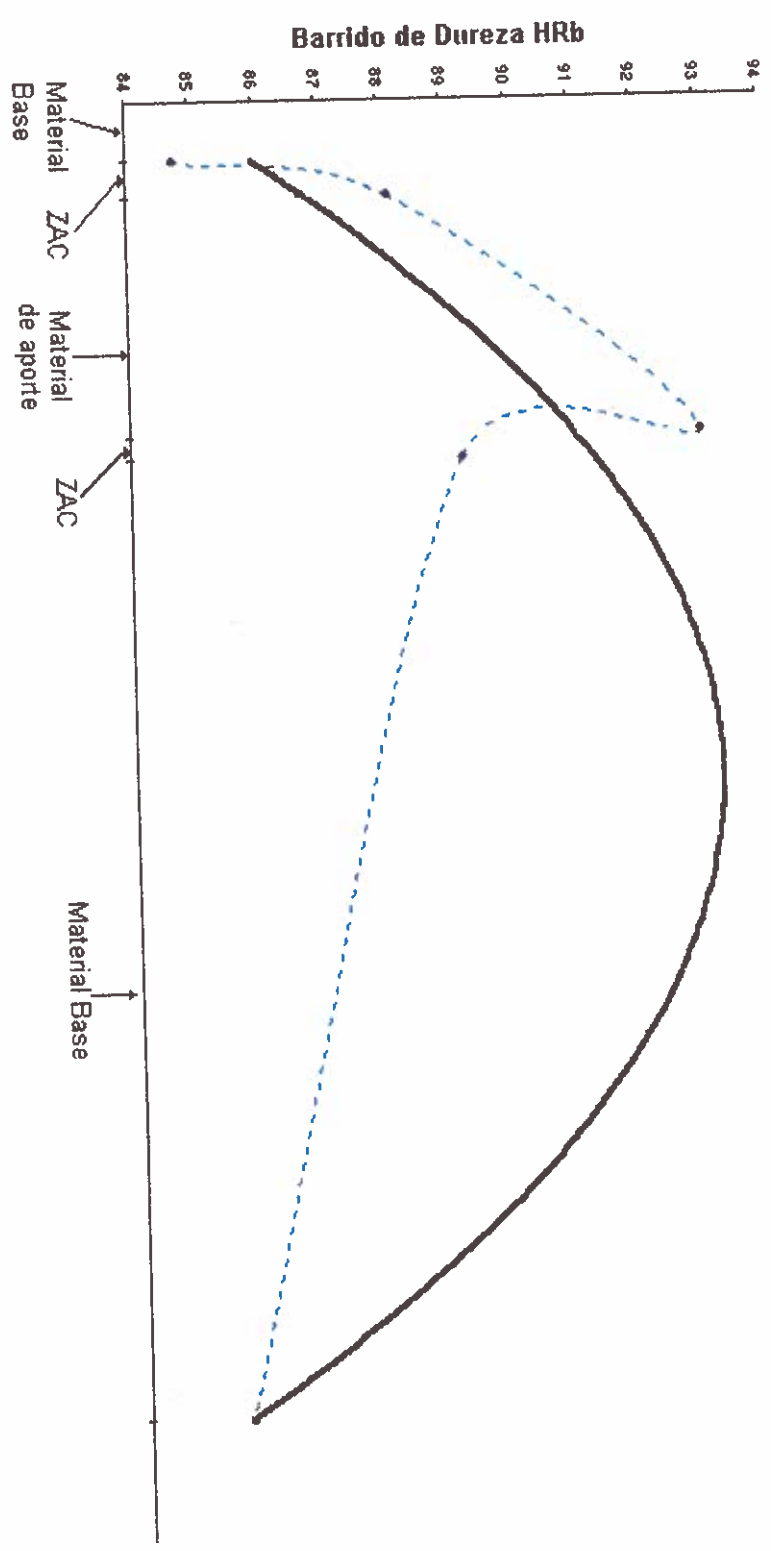


Fig. 44 Gráfico Barrido de Dureza vs Posición para muestras SMAW

Fig. 45 Gráfico Barrido de Dureza vs Posición para muestras GM1W



2.4. Estudio económico

2.4.1 Equipos

Los equipos empleados en este trabajo son la base del estudio económico y representan las condiciones generales con relación a los costos de las fuentes de poder.

Para el proceso SMAW, la fuente de poder, cables de soldar, porta electrodos, pinza de tierra y equipo de seguridad se detalla a continuación

Tabla XXII. Costos de los componentes para el proceso SMAW.

Componente	Valor del mercado actual
Fuente de poder de 400 A	U.S.\$ 4800,00
Accesorios para soldar	U.S.\$ 130,00
Equipos de seguridad	U.S.\$ 280,00

Los equipos de seguridad consisten en todo el atuendo necesario para realizar el proceso de soldadura y son : careta, capucha, mandil, mangas, polainas, guantes, además de la vestimenta del soldador como camisa mangas largas tipo jean, pantalón tipo jean, y botas de cuero sin cordones. Este equipo de seguridad también puede involucrar extinguidores de mano y un pequeños botiquín de primeros auxilios. Este equipo de seguridad es para todos los procesos manuales y semiautomáticos.

Para el proceso GMAW se tiene los siguientes costos en relación de los equipos empleados en la soldadura. Fuente de poder y sistema de alimentación completo, cable de conexión de alimentador a la fuente de poder cable de pinza de tierra, pinza de tierra y pistola de soldar de 400 A.

Tabla XXIII. Costos de los componentes para el proceso GMAW.

Componente	Valor del mercado actual
Fuente de poder de 400 A y sistemas para proceso GMAW	U.S.\$ 6500,00
Accesorios para soldar	U.S.\$ 390,00
Equipos de seguridad	U.S.\$ 280,00

2.4.2. Materiales consumibles

Los materiales consumibles son los empleados en el proceso de soldar, en este caso realizaremos una comparación de costos de estos materiales.

SMAW	COSTOS POR KILO
Electrodo 6010 1/8 (FLEETWELD)	U.S.\$ 4,00
GMAW	
Alambre sólido de soldar 0.9	U.S.\$ 1,57
Tubo de contacto 0.9	U.S.\$ 1,07 c/u
Boquilla estándar	U.S.\$ 12,40 c/u
Cilindro de gas protector AGA MIX 20	U.S.\$ 43,95 c / cilindros

Se tomará en cuenta que tanto el tubo de contacto, la boquilla, y el cilindro de gas protector el cual tiene 6 m³, no se componen de recambio inmediato ya que este trabajo se emplearon aproximadamente 3 tubos de contactos, 1 boquilla, 1.5 m³ de gas protector, estos valores de consumo debe ser tomados en cuenta el análisis económico final.

2.4.3. Eficiencia por tiempo

La eficiencia por tiempo se refiere al tiempo tomado por el soldador en realizar una junta soldada completa, tiempo que incluye las limpiezas entre pases, rectificar el contorno del cordón, etc., o sea que se considera desde el pase de raíz hasta el último pase de cubierta. En este caso representa las horas de trabajo, tomando en cuenta que el jornal del soldador es de 8 horas laborables.

Así se tiene que para el proceso de electrodo revestido SMAW, un soldador se demora para realizar el trabajo completo aproximadamente 4.5 horas desde que empieza el primer cordón hasta que termina con la pulida con disco de alambre, listo para la inspección visual de la soldadura. En el caso de la soldadura por electrodo continuo GMAW el proceso se realizó en 2.5 horas desde la primera pasada, hasta que termina puliendo el cordón soldado, en este proceso la utilización de discos abrasivos fue nula, ya que no fue necesario por que los cordones soldados eran casi uniformes y solo presentaban problemas en las secciones del fondo de la tubería, además de no presentar escoria lo que a veces dificulta la acción de limpieza en el proceso SMAW.

Para ambos procesos de soldadura el tiempo entre pases no fue superior a los 4 minutos.

2.4.4. Mano de obra

La mano de obra utilizada es de soldadores calificados API para electrodos revestidos, ya que calificación para tuberías en procesos de GMAW es muy escasa en nuestro medio, pero estos soldadores tenían referencias de haber realizado trabajos con proceso de soldar con alambre tubular en tuberías de grandes dimensiones, en proyectos anteriores con la compañía TECHINT.

También como mano de obra se emplearon a dos ayudantes los mismos que realizaban los trabajos de limpieza entre cada cordón y la limpieza final para la inspección visual. Tomaremos como referencia que los soldadores tienen una tarifa del jornal de U.S.\$ 10,00 por día y los ayudantes de U.S.\$ 4,00 , es importante que soldadores con calificación para procesos GTAW y FCAW, tiene una tarifa por jornal de U.S.\$ 12,00, las mismas que podemos tener como referencia para nuestro proceso de electrodo continuo. Los costos también varían según el sitio en el cual se aplica el proceso.

CAPITULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se realizara el análisis de los resultados obtenidos en el análisis metalografico, las pruebas de dilución, la variación de los parámetros de soldadura con relación a las características de la junta soldada, los ensayos no destructivos y las pruebas de las propiedades mecánicas de la junta soldada. Todos los análisis serán encaminados a comparar los dos procesos de soldadura en las tuberías soldadas.

Análisis metalográfico

En las muestras T2 para la tubería soldada con proceso GMAW, en la figura 22, se puede observar una soldadura sin defectos donde los parámetros aplicados son los que ofrecen los mejores resultados, es importante mencionar que la zona afectada por el calor es apreciable ya que es la sección en donde la coloración es un poco más clara que la tubería y las zonas adyacentes al cordón se encuentren fundidas. Con relación a la figura

24 donde se presenta una tubería soldada por el proceso SMAW la zona afectada por el calor es mayor que en la tubería soldada por el proceso GMAW, tomando en consideración que el voltaje aplicado en la muestra T2 es menor que el aplicado en la muestra T4 esta distribución se aprecia en las figuras 33 y 34 donde el voltaje y el ancho del cordón para los dos procesos de soldadura son directamente proporcionales.

Dilución

En la figura 27 se muestra la variación de la dilución con relación al calor suministrado para las muestras donde se aplico el proceso SMAW, donde la pendiente positiva indica la relación directa del calor suministra con la dilución. En la figura 28 se observa la misma variación para las muestras soldadas con el proceso GMAW donde la relación también es directamente proporcional. Pero los porcentajes de dilución son más altos en el proceso SMAW que los observados para el proceso GMAW, esto se presenta a que el tipo de transferencia aplicado en el proceso GMAW, esto se debe a que la potencia entregada por este proceso es menor en relación al proceso de electrodo revestido, además que hay que tomar en cuenta que las tasas de enfriamiento en el proceso de electrodo desnudo con gas protector son más elevadas que el proceso de soldadura SMAW.

El ancho de la zona afectada por el calor es directamente proporcional con el calor suministrado a la junta soldada, en la figura 29 se puede observar este tipo de variación para las muestras aplicadas con proceso SMAW, y en la figura 30 la variación de las muestras soldadas con el proceso GMAW, pero en este caso el ancho de la ZAC casi se encuentra constante porque los parámetros empleados para las diferentes muestras soldadas con este proceso no podían sufrir grandes variaciones, ya que así se hubiera cambiado el tipo de transferencia del proceso que no es aceptado para la soldadura a tuberías.

Inspección visual

En el ensayo no destructivo de la inspección visual se rechazaron dos muestras una para cada proceso de soldadura. En el caso de la soldadura de la tubería con proceso SMAW la muestra T3, presento una excesiva cantidad de material de aporte en el cordón de raíz, lo que se puede observar en la figura 24. En la tubería soldada por proceso GMAW, la muestra T2A presentaron en la inspección visual poros en la superficie del cordón lo cual fue confirmado después en los ensayos radiográficos, en la figura 23 donde se presenta la metalografía de esta muestra, también se observa la presencia de poros, entonces la muestra fue rechazada. Pero la presentación del cordón de refuerzo en el proceso GMAW es mejor que la mostrada en el proceso de soldadura SMAW.

Inspección radiográfica

En el ensayo radiográfico las muestras de las tuberías soldadas con proceso SMAW todas fueron aceptadas, aunque estas muestran socavación en ciertas secciones, las probetas fueron aceptadas, el resultado de la inspección radiográfica se presenta en la tabla XVII. En el caso de las muestras donde se empleo el proceso GMAW observamos que solo la muestra T5 fue aceptada en todo el cordón soldado, y la muestra T2 se observa que en una de las secciones de la tubería existe falta de fusión. Los tubos soldados por el proceso manual tiene menos tendencia a la porosidad o a defectos en el cordón soldado, debido a que la protección de gases por el fundente en este proceso es más eficiente que en el proceso GMAW, además que los soldadores se encuentran con mayor capacidad y practica para soldar con el proceso de electrodo revestido.

Ensayo de tracción

En este ensayo se observa que la probeta T2-1 no fue aceptada ya que fallo en el cordón soldado, y esto lo atribuimos a la falta de fusión en esa sección, en cambio para la probeta T2-2, el ensayo nos indica que el material de aporte tiene mayor resistencia a la tracción que el material base, por tal motivo la probeta falla en la tubería, aplicando una carga máxima de 94.5 KN, indicando que el proceso fue bien aplicado en esta sección de la tubería.

Para las probetas T4 el ensayo resulto exitoso ya que en ambas probetas fallan en el material base con el mismo valor de carga máxima que es de 98.1 KN, dando también un porcentaje de elongación aproximado del 28%, porcentaje muy superior al porcentaje nominal para este electrodo mostrado en la tabla I. Lo que indica que ambos procesos de soldadura fueron aceptados para este tipo de ensayo.

Ensayo de doblado

En la tabla XIX se muestra los resultados de la prueba de doblado, para el caso de las muestras soldadas en el proceso de electrodo revestido todas las probetas obtuvieron resultado favorable, tanto las probetas de cara, como las de raíz, lo que indica el éxito de la soldadura. Para las probetas que fueron soldadas con electrodo desnudo protegido por gas, el ensayo para la probeta de cara fallo. En relación a este ensayo se observa que la aplicación del proceso SMAW es superior que el proceso de soldadura GMAW. La incorrecta aplicación del proceso de soldadura con gas protector, dan paso a la formación de poros o imperfecciones de manera general, ocasionando defectos en la soldadura y que presentan grieta y rupturas en el ensayo de doblado.

Ensayo de dureza

En este ensayo se muestra que el material de aporte para el proceso de electrodo desnudo es más duro que el proceso de electrodo revestido, la influencia del proceso del electrodo de alambre en la zona afectada por el calor, mantiene que esta zona también sea más dura que con la aplicación del proceso SMAW. Aunque el contenido de carbono es mayor en el proceso SMAW, el número de pases es superior y las tasas de enfriamiento son menores comparando con el proceso GMAW, por lo que la dureza en el proceso SMAW es menor a la del proceso GMAW.

En la figura 44 se observa la distribución de la variación de la dureza con relación a las secciones de la probeta para el proceso SMAW. La figura 45 muestra la variación de la dureza para la probeta soldada con GMAW.

Análisis económico

Para el análisis económico de los procesos de soldadura hay que tomar en de manera general cuenta los siguientes factores:

- Tiempo de preparación de la junta soldar
- Tiempo de ensamble
- Tiempo de punteo o armado
- Tiempo de posicionamiento
- Tiempo de soldadura

- Tiempo de parada, en donde se considera los tiempo del cambio del electrodo, tiempo de movilización de estación, tiempo de cambio de los parámetros de soldadura, etc.
- Tiempo gastado por la cuadrilla, se tomará en cuenta el tiempo en actividades personales.
- Tiempo de limpieza
- Tiempo de desensamble
- Tiempo de alivio de tensiones
- Costo del electrodo
- Costo de los materiales protectores
- Costo de la potencia eléctrica
- Costo de los activos fijos (Overhead).

En algunos casos ciertos factores no son considerados en la ejecución de la soldadura, porque no son necesarios en el proceso de soldadura.

Como se puede observar en el listado de los factores que intervienen en este análisis existen muchos factores que se encuentran relacionados con el tiempo, y no son necesariamente tiempo de arco, ya que se tiene el tiempo de cambio de cambio de electrodo, pulir, remover escoria, etc. El tiempo total de horas de trabajo siempre es mayor que el tiempo de suelda, entonces la relación entre el tiempo de arco(T_u) y tiempo de parada (T_d), se denomina factor de operación (OF) y viene dado por la siguiente formula:

$$OF = \frac{T_u}{T_u + T_d} \quad (\text{Ecuación 4}) (\text{Ref. 4})$$

El resultado viene expresado de forma porcentual.

La ecuación que determina el costo total en los procesos de soldadura es la siguiente:

$$\text{Costo Total} = MO + F + W \quad (\text{Ecuación 5})(\text{Ref. 4})$$

Donde *MO* es un factor determinado por la compañía en la cual se considera los costos de la mano de obra y los equipos a utilizarse. *F* es el valor de los consumibles que serán empleados en el proceso de soldadura. *W* es el costo de la potencia eléctrica empleado en el proceso de soldar.

Formula para establecer el factor *MO*. (Ecuación 6)(Ref. 4)

$$MO = \frac{\text{Total de pies de soldadura} * \text{carga de mano de obra y equipos}}{\text{Velocidad de soldeo} * OF}$$

Para obtener el factor *F* donde se toman en cuenta todos los consumibles vienen este factor viene dado por la ecuación 7.(Ref. 4).

$$F = \text{Consumo de electrodo por pie de soldadura} * \text{Total de pie de soldadura} * \\ * \text{Precio de electrodo} + \text{Consumo de protección por libra de electrodo} * \\ * \text{Total de libras de electrodo} * \text{precio de protección}$$

Para los procesos SMAW y FCAW el análisis de costo de los productos de protección no es considerado, ya que en los precios del electrodo se toma en cuenta el fundente, en el consumo de electrodo por pie de soldadura hay que

considerar la eficiencia del deposito del material de soldadura, la eficiencia el deposito nos indica, las libras de material depositado por cada libra de electrodo, para el proceso de electrodo revestido la eficiencia del deposito es de aproximadamente del 60% al 70%, en cambio para el proceso de electrodo desnudo con gas protector la eficiencia del deposito es del 100%. La potencia se la puede calcular de forma que el tiempo de encendido de la maquina por la potencia de consumo del equipo por el precio de la potencia y el tiempo del equipo encendido. Pero una buena forma de tener el valor de la potencia es de 0.03 \$/lb.

En los procesos de soldadura empleados en la tubería soldada se tiene los siguientes resultados en el análisis de costo:

PROCESO SMAW

Factor de operación

Tu = 19 minutos

Td = 101 minutos

$$OF = \frac{19}{19+101} \approx 0.16 = 16\%$$

Carga por mano de obra y equipos

Equipo de soldar amortización para 6 años, valor del equipo = \$ 4800,00

$$\text{Carga de equipos} = \frac{4800}{6 \text{ años}} * \frac{1 \text{ año}}{8765,81 \text{ horas}} = 0,091 \$/\text{hora}$$

$$\text{Carga por mano de obra} = \frac{10}{8 \text{ horas}} = 1,25 \$/\text{hora}$$

Carga por mano de obra y equipos = 1,34 \$/hora

Total de pies de soldadura

$$L = \pi * D = 3.1416 * 0.83 \text{ pies} = 2.62 \text{ pies}$$

Velocidad de soldeo

$$V = 4,6 \text{ mm/seg} * \frac{3600}{304.8} \text{ pies/horas} = 54,33 \text{ pies/horas}$$

Factor de mano de obra y equipo

$$MO = \frac{2.62 \text{ pies} * 1.34 \$ / \text{hora}}{54.33 \text{ pies / hora} * 0.16} = \$ 0.41$$

Consumo de electrodos por pie de soldadura

$$\text{Consumo} = 23 \text{ electrodos} \approx 1.8 \text{ lb} / 2.62 \text{ pies} = 0.7 \text{ lb/pies}$$

Precio del electrodo

$$\text{Precio} = 1.81 \$ / \text{lb}$$

Consumibles empleados en la soldadura

$$F = 0.7 \text{ lb/pies} * 2.62 \text{ pies} * 1.81 \$ / \text{lb} = \$ 3.32$$

Potencia empleada

$$W = 0.03 \$ / \text{lb} * 1.8 \text{ lb} = \$ 0.054$$

Total de los costos del proceso de soldadura para el proceso SMAW en una junta de tubería soldada

$$\text{Costos totales} = 0.41 + 3.32 + 0.054 = \$ 3,78$$

PROCESO GMAWFactor de operación

$$T_u = 14 \text{ minutos}$$

$$T_d = 65 \text{ minutos}$$

$$OF = \frac{14}{14 + 65} \approx 0.18 = 18\%$$

Carga por mano de obra y equipos

Equipo de soldar amortización para 6 años, valor del equipo = \$ 6500,00

$$\text{Carga de equipos} = \frac{6500}{6 \text{ años}} * \frac{1 \text{ año}}{8765,81 \text{ horas}} = 0,12 \text{ \$/hora}$$

$$\text{Carga por mano de obra} = \frac{12}{8 \text{ horas}} = 1,50 \text{ \$/hora}$$

$$\text{Carga por mano de obra y equipos} = 1,65 \text{ \$/hora}$$

Total de pies de soldadura

$$\Pi * D = 3.1416 * 0.83 \text{ pies} = 2.62 \text{ pies}$$

Velocidad de soldeo

$$V = 4.06 \text{ mm/seg} * \frac{3600}{304.8} \text{ pies/horas} \approx 48 \text{ pies/horas}$$

Factor de mano de obra y equipo

$$MO = \frac{2.62 \text{ pies} * 1.62 \text{ \$/ hora}}{48 \text{ pies / hora} * 0.18} = \$ 0.49$$

Consumo de electrodos por pie de soldadura

$$\text{Consumo} = 0.066 + 0.089 + 0.021 + 0.089 = 0.265 \text{ lb / pies valores de tabla}$$

ver apendice 1.

Precio del electrodo

$$\text{Precio} = 0.71 \text{ \$/lb}$$

Consumo de gas protector por libra de electrodo

$$\text{Consumo} = \frac{20cfh * 0.23h}{0.7lb} = 6.57 \text{ pies}^3 / \text{lb}$$

Total de libras de electrodo

$$\text{Consumo de electrodo} = 0.265 \text{ lb/pies} * 2.62 \text{ pies} = 0.7 \text{ lb}$$

Precio del gas protector

$$\text{Precio} = 7.325 \text{ \$/m}^3 * \frac{1m^3}{35.315 \text{ pie}^3} = 0.207 \text{ \$/pie}^3$$

Consumibles empleados en la soldadura

$$F = 0.265 \text{ lb/pies} * 2.62 \text{ pies} * 0.71 \text{ \$/lb} + 6.57 \text{ pies}^3 / \text{lb} * 0.7 \text{ lb} * 0.207 \text{ \$/pie}^3$$

$$F = \$ 1.445$$

Potencia empleada

$$W = 0.03 \text{ \$ / lb} * 0.7 \text{ lb} = \$ 0.021$$

Total de los costos del proceso de soldadura para el proceso GMAW en una junta de tubería soldada

$$\text{Costos totales} = 0.49 + 1.445 + 0.021 = \$ 1.96$$

De esta forma podemos observar que el proceso de soldar GMAW es más económico que el proceso SMAW. Aunque los equipos de soldar y la mano de obra sea más costosa, estos parámetros influyen muy poco en el análisis de costos total.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:

1. El proceso de soldadura GMAW es más rápido que el proceso SMAW proporcionando mayor cantidad de material depositado en la junta soldada, por lo que el tiempo de ejecución de las juntas fue menor que con el proceso de soldadura por electrodo revestido.
2. El proceso de soldadura GMAW no es aconsejable aplicarlo en zonas donde las condiciones ambientales son adversas, tales como alta velocidad del viento, temperatura ambiente baja, o zonas lluviosas. En estas condiciones, es mejor soldar con el proceso SMAW.
3. El proceso de soldadura GMAW es un 52% más económico que el proceso de soldadura SMAW, ya que los costos de los materiales consumibles y su bajo rendimiento de los mismos elevan los costos generales para el proceso de soldadura SMAW.

Se recomienda lo siguiente:

1. Realizar un entrenamiento y calificación a los soldadores que utilicen el proceso de soldadura GMAW en tuberías, ya que se pudo encontrar que en nuestro medio este proceso de soldadura no es aplicado en forma correcta por falta de una capacitación adecuada. En el caso del proceso de soldadura SMAW los soldadores tienen amplia experiencia en soldar tuberías de diferentes tipos y dimensiones.
2. Un estudio similar para los procesos FCAW (Soldadura de arco por electrodo de núcleo fundente) y SMAW para las tuberías de transporte de combustible, porque el proceso de soldadura con núcleo fundente puede ser aplicado donde las condiciones atmosféricas son adversas, además de ser un proceso de soldadura rápido y más eficiente que el proceso de soldadura SMAW.

BIBLIOGRAFIA

1. AWS. Manual de soldadura, Tomo I, México 8va Edición pp. 44,45
2. ASM. Metal Handbook, Volumen 6, 9na Edición pp. 79,81,126
3. HORWITZ H. Enciclopedia de la soldadura, Tomo I. Ediciones PC pp. 49-50
4. LINCOLN ELECTRIC. Procedure Handbook Of Arc Welding. Edición Especial pp. 4.1-2, 13.3-3
5. MILLER ELECTRIC. Gas Metal Arc Welding, 1era Edición pp. 3, 8.
6. HOBART. MANUAL SERVICE 1era Edición. Mi 250, pp. 1
7. API 1104. Standard for Welding Pipelines And Related Facilities. 1980.
15ava Edición
8. Apuntes personales de Soldadura. 1996



9. DURAN MARCELA. Soldabilidad del acero ASTM A36 con el acero AISI 304 mediante el proceso de arco sumergido (Tesis Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. ESPOL).1998

10. ASTM A370. Standard Methods And Definitions For Mechanical Testing Of Steel Products. 1967 pp 327.

Apéndices

TABLE 12-1. Weight of Weld Metal (Pounds Per Foot of Joint)

d W r dimen- sion	1/16				1/8				3/16				1/4				d W r dimen- sion																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	1/16	1/8	3/16	1/4	1/16	1/8	3/16	1/4	1/16	1/8	3/16	1/4	1/16	1/8	3/16	1/4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1/16	027	053	080	106	159	213	021	083	021	032	050	069	084	092	041	037	031	022	014	0094	015	021	027	032	037	041	045	049	053	057	061	065	069	073	077	081	085	089	093	097	101	105	109	113	117	121	125	129	133	137	141	145	149	153	157	161	165	169	173	177	181	185	189	193	197	201	205	209	213	217	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257	261	265	269	273	277	281	285	289	293	297	301	305	309	313	317	321	325	329	333	337	341	345	349	353	357	361	365	369	373	377	381	385	389	393	397	401	405	409	413	417	421	425	429	433	437	441	445	449	453	457	461	465	469	473	477	481	485	489	493	497	501	505	509	513	517	521	525	529	533	537	541	545	549	553	557	561	565	569	573	577	581	585	589	593	597	601	605	609	613	617	621	625	629	633	637	641	645	649	653	657	661	665	669	673	677	681	685	689	693	697	701	705	709	713	717	721	725	729	733	737	741	745	749	753	757	761	765	769	773	777	781	785	789	793	797	801	805	809	813	817	821	825	829	833	837	841	845	849	853	857	861	865	869	873	877	881	885	889	893	897	901	905	909	913	917	921	925	929	933	937	941	945	949	953	957	961	965	969	973	977	981	985	989	993	997	1001	1005	1009	1013	1017	1021	1025	1029	1033	1037	1041	1045	1049	1053	1057	1061	1065	1069	1073	1077	1081	1085	1089	1093	1097	1101	1105	1109	1113	1117	1121	1125	1129	1133	1137	1141	1145	1149	1153	1157	1161	1165	1169	1173	1177	1181	1185	1189	1193	1197	1201	1205	1209	1213	1217	1221	1225	1229	1233	1237	1241	1245	1249	1253	1257	1261	1265	1269	1273	1277	1281	1285	1289	1293	1297	1301	1305	1309	1313	1317	1321	1325	1329	1333	1337	1341	1345	1349	1353	1357	1361	1365	1369	1373	1377	1381	1385	1389	1393	1397	1401	1405	1409	1413	1417	1421	1425	1429	1433	1437	1441	1445	1449	1453	1457	1461	1465	1469	1473	1477	1481	1485	1489	1493	1497	1501	1505	1509	1513	1517	1521	1525	1529	1533	1537	1541	1545	1549	1553	1557	1561	1565	1569	1573	1577	1581	1585	1589	1593	1597	1601	1605	1609	1613	1617	1621	1625	1629	1633	1637	1641	1645	1649	1653	1657	1661	1665	1669	1673	1677	1681	1685	1689	1693	1697	1701	1705	1709	1713	1717	1721	1725	1729	1733	1737	1741	1745	1749	1753	1757	1761	1765	1769	1773	1777	1781	1785	1789	1793	1797	1801	1805	1809	1813	1817	1821	1825	1829	1833	1837	1841	1845	1849	1853	1857	1861	1865	1869	1873	1877	1881	1885	1889	1893	1897	1901	1905	1909	1913	1917	1921	1925	1929	1933	1937	1941	1945	1949	1953	1957	1961	1965	1969	1973	1977	1981	1985	1989	1993	1997	2001	2005	2009	2013	2017	2021	2025	2029	2033	2037	2041	2045	2049	2053	2057	2061	2065	2069	2073	2077	2081	2085	2089	2093	2097	2101	2105	2109	2113	2117	2121	2125	2129	2133	2137	2141	2145	2149	2153	2157	2161	2165	2169	2173	2177	2181	2185	2189	2193	2197	2201	2205	2209	2213	2217	2221	2225	2229	2233	2237	2241	2245	2249	2253	2257	2261	2265	2269	2273	2277	2281	2285	2289	2293	2297	2301	2305	2309	2313	2317	2321	2325	2329	2333	2337	2341	2345	2349	2353	2357	2361	2365	2369	2373	2377	2381	2385	2389	2393	2397	2401	2405	2409	2413	2417	2421	2425	2429	2433	2437	2441	2445	2449	2453	2457	2461	2465	2469	2473	2477	2481	2485	2489	2493	2497	2501	2505	2509	2513	2517	2521	2525	2529	2533	2537	2541	2545	2549	2553	2557	2561	2565	2569	2573	2577	2581	2585	2589	2593	2597	2601	2605	2609	2613	2617	2621	2625	2629	2633	2637	2641	2645	2649	2653	2657	2661	2665	2669	2673	2677	2681	2685	2689	2693	2697	2701	2705	2709	2713	2717	2721	2725	2729	2733	2737	2741	2745	2749	2753	2757	2761	2765	2769	2773	2777	2781	2785	2789	2793	2797	2801	2805	2809	2813	2817	2821	2825	2829	2833	2837	2841	2845	2849	2853	2857	2861	2865	2869	2873	2877	2881	2885	2889	2893	2897	2901	2905	2909	2913	2917	2921	2925	2929	2933	2937	2941	2945	2949	2953	2957	2961	2965	2969	2973	2977	2981	2985	2989	2993	2997	3001	3005	3009	3013	3017	3021	3025	3029	3033	3037	3041	3045	3049	3053	3057	3061	3065	3069	3073	3077	3081	3085	3089	3093	3097	3101	3105	3109	3113	3117	3121	3125	3129	3133	3137	3141	3145	3149	3153	3157	3161	3165	3169	3173	3177	3181	3185	3189	3193	3197	3201	3205	3209	3213	3217	3221	3225	3229	3233	3237	3241	3245	3249	3253	3257	3261	3265	3269	3273	3277	3281	3285	3289	3293	3297	3301	3305	3309	3313	3317	3321	3325	3329	3333	3337	3341	3345	3349	3353	3357	3361	3365	3369	3373	3377	3381	3385	3389	3393	3397	3401	3405	3409	3413	3417	3421	3425	3429	3433	3437	3441	3445	3449	3453	3457	3461	3465	3469	3473	3477	3481	3485	3489	3493	3497	3501	3505	3509	3513	3517	3521	3525	3529	3533	3537	3541	3545	3549	3553	3557	3561	3565	3569	3573	3577	3581	3585	3589	3593	3597	3601	3605	3609	3613	3617	3621	3625	3629	3633	3637	3641	3645	3649	3653	3657	3661	3665	3669	3673	3677	3681	3685	3689	3693	3697	3701	3705	3709	3713	3717	3721	3725	3729	3733	3737	3741	3745	3749	3753	3757	3761	3765	3769	3773	3777	3781	3785	3789	3793	3797	3801	3805	3809	3813	3817	3821	3825	3829	3833	3837	3841	3845	3849	3853	3857	3861	3865	3869	3873	3877	3881	3885	3889	3893	3897	3901	3905	3909	3913	3917	3921	3925	3929	3933	3937	3941	3945	3949	3953	3957	3961	3965	3969	3973	3977	3981	3985	3989	3993	3997	4001	4005	4009	4013	4017	4021	4025	4029	4033	4037	4041	4045	4049	4053	4057	4061	4065	4069	4073	4077	4081	4085	4089	4093	4097	4101	4105	4109	4113	4117	4121	4125	4129	4133	4137	4141	4145	4149	4153	4157	4161	4165	4169	4173	4177	4181	4185	4189	4193	4197	4201	4205	4209	4213	4217	4221	4225	4229	4233	4237	4241	4245	4249	4253	4257	4261	4265	4269	4273	4277	4281	4285	4289	4293	4297	4301	4305	4309	4313	4317	4321	4325	4329	4333	4337	4341	4345	4349	4353	4357	4361	4365	4369	4373	4377	4381	4385	4389	4393	4397	4401	4405	4409	4413	4417	4421	4425	4429	4433	4437	4441	4445	4449	4453	4457	4461	4465	4469	4473	4477	4481	4485	4489	4493	4497	4501	4505	4509	4513	4517	4521	4525	4529	4533	4537	4541	4545	4549	4553	4557	4561	4565	4569	4573	4577	4581	4585	4589	4593	4597	4601	4605	4609	4613	4617	4621	4625	4629	4633	4637	4641	4645	4649	4653	4657	4661	4665	4669	4673	4677	4681	4685	4689	4693	4697	4701	4705	4709	4713	4717	4721	4725	4729	4733	4737	4741	4745	4749	4753	4757	4761	4765	4769	4773	4777	4781	4785	4789	4793	4797	4801	4805	4809	4813	4817	4821	4825	48