

T
671.52
VILC

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

CONTROL DE LAS PROPIEDADES MECANICAS
EN SOLDADURA DE ACEROS ESTRUCTURALES
POR MEDIO DE PARAMETROS SELECCIONADOS



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

Tesis de Grado
previo a la obtención del título de

INGENIERO MECANICO

presentada por
JOSE O. VILLEGAS MOLINA

Guayaquil-Ecuador

1981

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Alberto Torres V.,
Director de Tesis, por su
valiosa ayuda y colaboración
constante para la realiza -
ción de este trabajo.

DEDICATORIA

A mi querida madre Teresa

A mi estimado padre Olmedo



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

A mis hermanas

A mis hermanos

Alberto Torres V.

ING. ALBERTO TORRES V.,

Director de Tesis

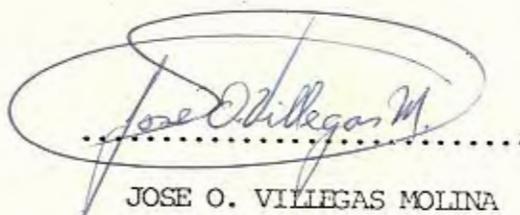


BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



JOSE O. VILLEGAS MOLINA

R E S U M E N

En el presente estudio se trata de establecer relaciones entre los parámetros de soldadura como: voltaje, amperaje y velocidad de movimiento del arco eléctrico con las propiedades mecánicas de una unión soldada. Utilizando para este estudio el acero estructural ASTM A-283-C que es ampliamente utilizado en la industria.

Para establecer las relaciones entre los parámetros de soldadura y las propiedades mecánicas de una unión soldada, se ha seleccionado como proceso de soldadura, los procesos manual y automático con arco sumergido. Siendo estos procesos de soldadura los más utilizados, se ha establecido una relación que controla a los parámetros de soldadura para dichos procesos y las propiedades mecánicas objeto de este estudio, el mismo que es el área de la sección transversal de un cordón soldado.

Finalmente, se expone una parte experimental que trata de aplicar lo analizado en la parte teórica en el trabajo, obteniendo como consecuencia resultados útiles de aplicación en trabajos de soldadura constructiva.

INDICE GENERAL

	Pág.
Resumen.....	IV
Indice General.....	V
Indice de Figuras.....	VI
Indice de Tablas.....	VII
Indice de Micrografías.....	VIII
Indice de Fotos.....	IX
Simbología.....	X
I. INTRODUCCION.....	1
II. FUNDAMENTO TEORICO.....	4
2.1 Estudio de la Soldabilidad de los aceros es- tructurales.....	17
2.2 Estudio del material de aporte.....	23
2.3 Transformaciones microestructurales en la unión soldada (metal base, zona afectada por el calor y zona de fusión).....	63
2.4 Efecto de las variables de soldadura al arco sobre las propiedades finales de la unión soldada.....	70
2.5 Estudio de los procesos de soldadura aplica- bles a estos tipos de aceros.....	94



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

	Pág.
III. TRABAJO EXPERIMENTAL.....	102
3.1 Planificación del trabajo de laboratorio.....	102
3.2 <i>Selección del metal base, material de aporte, procedimiento y equipo a utilizarse.....</i>	<i>104</i>
3.3 Ensayo de deposición libre y de varios pases.	129
3.4 Obtención de muestras para ensayos mecánicos.	129
3.5 Control de Propiedades Mecánicas de la unión soldada.....	133
3.5.1 Para ensayo de deposición libre.....	134
3.5.2 Para ensayo de varios pases.....	135
IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES.....	140
4.1 Mediciones en el área del cordón soldado.....	140
4.2 Relación entre el área del cordón soldado y la dureza.....	141
4.3 Ensayos Mecánicos.....	162
4.3.1 Doblado.....	162
4.3.2 Tensión.....	164
4.3.3 Impacto.....	167
V. Conclusiones.....	173
APENDICE	
Bibliografía.....	176

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
1 Unión Soldada.....	18
2 Microestructuras de las zonas de un cordón soldado en un acero de baja aleación del tipo A-514.....	20
3 Intervalo de temperatura de normalizado, recocido y temple de los aceros al carbono.....	22
4 Arco eléctrico con sus tres zonas.....	26
5 Caída de tensión en las diferentes zonas del arco eléctrico.....	29
6 Régimen eléctrico del arco metálico.....	31
7 Relación entre la temperatura y la viscosidad para diferentes tipos de revestimiento.....	55
8 Unión soldada (ensamble mecánico).....	56
9 Curvas esfuerzo-deformación nominal para varios ace- ros estructurales.....	58
10 Diagrama de equilibrio hierro-carbono.....	65
11 Deposición de un cordón de soldadura sobre una pla- ca plana (26).....	73
12 Efecto de corriente de soldadura sobre la rapidez de fusión del electrodo usando fundente granulado (silicato de calcio) en el proceso de soldadura	

<u>Nº</u>	Pág.
automático.....	76
13 Rangos de voltaje aceptable para varios valores de corriente de soldadura.....	77
14 Efecto del área de la sección transversal sobre la máxima dureza en la zona afectada por el calor (ZAC).....	86
15 Soldadura al arco con gas protector.....	90
16 Soldadura al arco en un proceso MIG.....	93
17 Soldadura por arco con electrodo revestido.....	97
18 Proceso de soldadura al arco sumergido.....	99
19 Probeta de un cordón depositado sobre una placa para prueba de dureza y soldabilidad.....	115
20 Montaje del sistema adoptado para controlar la velocidad de movimiento del metal soldado.....	119
21 Ensamble mecánico indicando probetas de tensión (T) y doblado (D).....	123
22 Probeta para ensayo de tensión.....	124
23 Posibles orientaciones de probetas para ensayo de impacto en placas soldadas.....	125
24 Probetas para ensayo de impacto para un ensamble mecánico. Tipo A.....	125
25 Normograma para determinar el área de la sección transversal de un cordón soldado.....	128
26 Relación de deposición de metal fundido con respec-	

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
to a I/S.....	132
27 Relación de esfuerzo-deformación para la probeta Nº 10 de tensión.....	148
28 Relación de dureza máx. versus área de la sección transversal de un cordón soldado para el ensayo de deposición libre.....	153
29 Relación de esfuerzo máx. versus área de la sección transversal de un cordón soldado, para técnica de múltiples pases.....	154
30 Relación de Propiedades de Impacto (Charpy) versus área de la sección transversal de un cordón para técnicas de múltiples pases.....	155
31 Cordón de soldadura depositado sobre una placa me- tálica indicando las ubicaciones de indentaciones de microdureza Knoop.....	163
32 Matrices para ensayo de doblado.....	165
33 Probeta para ensayo de impacto.....	169
34 Relación directa entre tres parámetros de ensayo de impacto: ensayo de impacto(Charpy), porcentaje de fractura en corte y contracción lateral para un ace- ro estructural.....	172

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1	Propiedades químicas y mecánicas para el acero ASTM-A-283 grado C (20).....	5
2	Propiedades mecánicas y químicas para aceros es- tructurales aprobadas por las normas ASTM (8)....	10-11
3	Sistema de clasificación de electrodos AWS.....	37
4	Interpretación de clasificación de electrodos según AWS.....	38
5	Requerimientos químicos para electrodos revesti- dos, según AWS.....	41
6	Esfuerzo de tensión, punto de fluencia y elonga- ción requerida para el material aportado.....	42
7	Propiedades de Impacto requeridas para el mate- rial de aportación de la serie 60xx y 70xx.....	43
8	Composición química requerida para electrodos....	44
9	Propiedades mecánicas requeridas para material de aporte.....	45-46
10	Electrodos recomendados para aceros al carbono y de baja aleación, según ASTM.....	48 a 51
11	Aplicación de símbolos de soldadura.....	60-61

12	Propiedades mecánicas y químicas típicas del depósito de soldadura del electrodo E6013.....	106
13	Comparación de las propiedades mecánicas y químicas entre el material de aportación con especificaciones AWS (F62 EL12) con las especificaciones Kobe Steel para soldadura automática con arco sumergido.....	107
14	Parámetros de soldadura (SMAW).....	142
15	Medidas de área y longitudes en las tres zonas de un cordón depositado (SMAW).....	143
16	Parámetros de soldadura (SAW).....	144
17	Parámetros utilizados en el ensamble mecánico (SMAW).....	145
18	Parámetros utilizados en el ensamble mecánico (SAW).....	145
19	Resultado de las pruebas de tensión de doce probetas dimensionales.....	146
20	Resultado de las pruebas de tensión de doce probetas.....	147
21	Ensayo de doblado.....	149-150
22	Resultados del ensayo de Charpy.....	151

INDICE DE MICROGRAFIAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1	Estructura de fibras y bandas de segregación en la dirección longitudinal de una chapa de acero suave laminada en caliente. 100 aumentos.....	14
2	Micrografía del acero AST, A-283-C.....	15
3	Línea de fusión de la probeta Nº 3.....	157
4	Línea de fusión de la Probeta Nº 4.....	158
5	Línea de fusión de la probeta Nº 6.....	159
6	Línea de fusión de la probeta Nº 8.....	160

INDICE DE FOTOGRAFIAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1	Equipo para soldadura automática con arco sumergido.....	111
2	Equipo para Ensayo de Doblado.....	112
3	Equipo para Ensayo de Microdureza Knoop.....	113
4	Equipo para Radiografía Industrial.....	114
5	Probeta de Ensamble Mecánico.....	117
6	Radiografía de un ensamble mecánico unido con el proceso automático de arco sumergido.....	139
7	Probeta de una unión a tope con 14 pases de cordones soldados con proceso manual.....	154
8	Ensayo de Doblado.....	166
9	Probetas de Tensión.....	168



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

S I M B O L O G I A

A-283°C	Acero ordinario estructural con especificación ASTM A-283 grado C.
A	Corriente de soldadura en amperios
C	Factor característico de cada proceso
DAN	Unidad de Fuerza (Decanewton)
E.C.	Energía cinética de una partícula
E	Campo eléctrico
e	Carga eléctrica de un electrón
F	Fuerza
Fe ₃ C	Cementita o Carburo de Hierro
H.I.	Energía suministrada a una pieza metálica por el arco eléctrico
K	Constante de Boltzman
L	Línea de fusión de un cordón de soldadura
m	Masa de una partícula
NDB.	Número de Dureza Brinell
.a	Area de la Sección transversal de un cordón soldado.
P	Penetración de un cordón de soldadura
r	Radio de Curvatura

S	Velocidad de avance de la fuente de calor (arco eléctrico).
T	Temperatura de fusión del material de aportación y del metal base.
ΔT	Gradiente de Temperatura
V	Voltaje del Arco Eléctrico
v	Velocidad de una partícula
W	Ancho de una probeta
δ	Solución sólida intersticial formada por hierro delta y carbono $Fe\delta[C]$
γ	Solución sólida intersticial formada por hierro gamma y carbono, llamada también austenita $Fe\gamma[C]$
α	Solución sólida intersticial formada por hierro alfa y carbono, llamada también ferrita $Fe\alpha[C]$
$\sigma_{\text{máx.}}$	Esfuerzo máximo de tensión

CAPITULO I

I N T R O D U C C I O N

El tema escogido en este estudio sobre control de propiedades mecánicas en soldadura de aceros estructurales por medio de parámetros seleccionados, es producto de una serie de incógnitas, dudas o inquietudes presentadas en la seguridad de ciertos tipos de construcciones realizadas con el acero estructural de alta resistencia.

Particularmente se ha seleccionado el acero ASTM A 283-C para analizarlo desde un punto de vista general en uniones soldadas, considerando que éste acero es utilizado generalmente para construcción de tuberías que soportan presión interna, calderos y recipientes de presión (10). Aplicaciones que se han asignado por tratarse de placas de acero al carbono de bajo e intermedio esfuerzo de tensión de calidad estructural.

El presente estudio está encaminado a la determinación de propiedades mecánicas, además de la detección de defectos y errores producidos en uniones soldadas, los mismos que pueden ser disminuidos o eliminados a través de un control adecuado de los parámetros involucrados en soldadura.

La forma de considerar el control adecuado en uniones soldadas, desarrolla un deseo consciente y constante de realizar correctamente todo trabajo desde su principio. Que al ser aplicado actualmente en la industrias, se obtendría un notable éxito en la eliminación de errores y defectos cometidos en construcciones soldadas, ocasionando como consecuencia el aumento de los beneficios.

Este tema considerado en la presente tesis, trata de explicar paso a paso, las diversas etapas seguidas en la parte teórica y principalmente en la parte experimental, de tal manera de proporcionar todos los detalles necesarios para su establecimiento efectivo en aplicaciones prácticas. Además, se puede seleccionar las técnicas específicas más adecuadas a las necesidades de un trabajo en particular, considerando como procesos de aplicación tomados para este estudio los siguientes:

- a.- proceso manual con electrodo revestido (SMAW)
- b.- proceso automático con arco sumergido (SAW)

Primeramente se expondrá en la parte teórica algunas relaciones útiles a ser aplicadas en la parte experimental. Después se mostrará como se organiza la ejecución de una unión a ser soldada, deteniéndose en problemas tales como diseño de juntas según el espesor de planchas, continuando con la selección de los mismos.

Finalmente, se explica detalladamente las ventajas y desventajas de utilizar uno u otro proceso antes mencionados, además de las técnicas operativas seguidas para la ejecución de una unión soldada con el acero en cuestión.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEORICO

ESTUDIO DEL METAL BASE

El metal base en soldadura comprende la pieza misma o material que se va a unir por el proceso de soldadura, el mismo que debe poseer la propiedad de ser soldable, es decir, que permita la ejecución de una unión por soldadura, sin pérdida de sus cualidades de resistencia y ductilidad.

El material de base en este estudio se lo encuentra clasificado según especificaciones ASTM (4) como un acero ASTM-A-283-grado C.

Este acero de calidad estructural es utilizado especialmente en la construcción de recipientes de presión y tuberías de presión para lo cual se lo suministra en forma de planchas laminadas de diferentes espesores.

Las propiedades químicas y mecánicas obtenidas para la clasificación ASTM-A-283-grado C están resumidas en la tabla N° 1 (7).

T A B L A N° 1PROPIEDADES QUIMICAS Y MECANICASPARA EL ACERO ASTM-A-283 grado C. (7)

<u>composición Químicas</u>		
	Análisis chequeado según	
	ASTM	KOBE STEEL LTD.
Elemento		
Carbono (%)	0.10	0.14
Manganeso(%)	-	0.191
Silicio (%)	-	0.30
Fósforo (%)	0.075	0.014
Azufre (%)	0.063	0.010
Cobre (%)	0.18	-
Níquel (%)	-	-
Cromo (%)	-	-
Molibdeno(%)	-	-
<u>Propiedades Mecánicas</u>		
Esfuerzo a la tracción (lb/plg ²)	55000-65600	63700
Esfuerzo a la fluencia (lb/plg ²)	30.000	42.500
Elongación en 8 plg (%)	23	-
Elongación en 2 plg (%)	27	30
Dureza máxima (Knoop)	-	177

La composición química de un acero provee una mejor comprensión sobre las propiedades mecánicas de uniones soldadas. Es importante tener presente los análisis químicos reales de los aceros para realizar estudios sobre soldadura. De esta manera se obtiene una buena apreciación de la influencia de los elementos aleantes en el acero sobre las propiedades mecánicas y químicas de la soldadura.

Los límites permisibles para esfuerzos no necesariamente representan los límites para los cuales el acero variará en la práctica. Por ejemplo en el acero A 212, grado B es permitido variar el esfuerzo de tensión sobre el rango de 70.000 a 85.000 libras/pulgadas² según especificaciones AWS. Pero se asume que tiene un esfuerzo de 85.000 libras/pulgadas cuadradas porque es de gran ductilidad (7).

En muchos de los procesos de soldadura, se aplica calor al metal base. De hecho, a menudo se aplica calor en cantidades e intensidades suficientes para fundir algún metal en el área de la junta, y esto es de gran importancia para poder controlar el calentamiento y enfriamiento del metal base. Luego, mediante el control de estos ciclos de calentamiento y enfriamiento podemos actuar para minimizar muchos efectos indesea-

bles del calor, tales como: la distorsión, ductilidad, y cambio de propiedades mecánicas y químicas del metal base.

Los cambios de temperatura durante la soldadura son más intensos y más críticos que en cualquier otro proceso metalúrgico. Los cambios de temperatura en soldadura rara vez son observados como un tratamiento térmico favorable para un metal. Sin embargo, los métodos de unión por fusión y resistencia, particularmente, producen cambios de temperatura que frecuentemente dan al buen metalurgista unos resultados satisfactorios, si éstos controlan mediante variación de parámetros las propiedades mecánicas deseadas en una unión soldada.

Veremos a continuación un análisis de los aceros estructurales en cuyo caso el metal base explicado en este tema también es involucrado.

Estudio de los Aceros Estructurales

El Instituto Internacional de Soldadura (I.I.S), ha publicado unas recomendaciones para definir las condiciones mínimas impuestas a los aceros de construcción a ser soldados por medio de soldadura por arco eléctrico.

Estas recomendaciones consideran cuatro calidades de acero (1), .

Calidad A. Calidad ordinaria, utilizada en las construcciones poco importantes sometidos a esfuerzos muy ligeros.

Calidad B. Calidad normal, utilizable en las construcciones corrientes y sometidos a esfuerzos normales. Se utiliza este tipo de acero en las construcciones que no se presenten roturas frágiles debidas a las tensiones y a las formas de construcción.

Calidad C. Calidad mejorada, aceros resistentes a la rajadura, utilizables en construcciones o partes de construcciones en que es importante el peligro de rotura frágil.

Calidad D. Alta calidad o acero resistente a la rajadura, utilizable en las construcciones en que es de temer principalmente el peligro de roturas frágiles (1).

Estas calidades de aceros estructurales son las que establecen la diferencia entre un tipo de acero y otro, como a continuación se indica:

Clases de Aceros Estructurales

En la Tabla N° 2 se muestran las propiedades mecánicas y químicas para aceros estructurales y metales de aportación de soldadura, aprobadas por las Normas ASTM (Sociedad Americana para Ensayos de Materiales).

Generalmente, estos aceros tienen límites máximos de contenido de carbono, azufre y fósforo. El manganeso se especifica como un rango en cantidades máximas.

Los aceros de baja aleación y de alta resistencia, generalmente son usados en condiciones de laminados. Los aceros obtenidos de esta manera, poseen propiedades mecánicas mínimas que varían de acuerdo al grado o calidad y al espesor de la placa. El rango de propiedades mecánicas disponibles en este grupo de acero son:

1. Punto de fluencia mínimo de 30.000 a 100.000 psi
2. Esfuerzo de tracción mínimo de 45.000 a 135.000 psi.

Los aceros estructurales al ser soldados, sufren un tratamiento térmico variable consistente en

T A B L A N^o 2

PROPIEDADES MECANICAS Y QUIMICAS PARA ACEROS ESTRUCTURALES

APROBADOS POR LAS NORMAS ASTM (8)

Acero Estructural	PROPIEDADES MECANICAS			COMPOSICION QUIMICA						
	Esfuerzo de Tensión (Ksi min)	Esfuerzo de fluencia (Ksi min)	Elongación en 2 plg. % min.	C máx	Mn máx	P máx	S máx	Si	Cu min	V min
A36	58 a 80	36	23	0.25	-	0.04	0.05	-	0.20	-
A53 grado B	60	35	-	0.20	0.75	0.04	0.05	0.15	0.20	0.01
A242	70	50	-	0.22	1.25	-	0.05	-	-	-
A283 grado C	55 a 65.6	30	27	0.10	-	0.075	0.063	-	0.18	-
A375	70	50	22	0.22	1.25	-	0.05	-	-	-
A441	70	50	-	0.22	0.85	0.04	0.05	0.30	0.20	0.02
A500	58	42	23	0.26	-	0.04	0.05	-	0.20	-
A501	58	36	23	0.26	-	0.04	0.05	-	0.20	-
A529	60 a 85	42	19	0.27	1.20	0.04	0.05	-	0.20	-
A570	55	40	-	0.25	0.60	0.04	0.04	-	0.20	-

T A B L A N^o 2

(Continuación)

Acero Estructural	PROPIEDADES MECANICAS			COMPOSICION QUIMICA									
	Esfuerzo de tensión (Ksi min)	Esfuerzo de fluencia (Ksi min)	Elongación en 2 plg % min	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	V	otros
A572	60	42	24	0.21	1.35	0.04	0.05	0.15	-	-	-	0.01	0.15
A588	70	50	21	0.15	0.80	0.04	0.05	0.15	0.25	0.30	0.20	0.01	-
A514	115 a 135	100	18	0.10	0.40	0.035	0.04	0.20	-	1.40	0.20	-	-

BRUNO A. PÉREZ
 INGENIERO MECÁNICO



un temple y revenido, impuesto por el procedimiento de soldadura, además puede provocar transformaciones microestructurales originando un crecimiento exagerado de grano. Estas variaciones se producen de diferentes formas dependiendo del tipo de acero que se trate.

Propiedades Físico-Mecánicas del Metal Base

Las planchas de hierro estructuras se obtienen bajo los procesos de trabajo que pueden ser:

- 1.- Conformación en caliente, ó
- 2.- Conformación en frío

El trabajo en caliente puede ocurrir con una deformación en condiciones tales de temperatura y velocidad de deformación que se producen simultáneamente la restauración y la deformación.

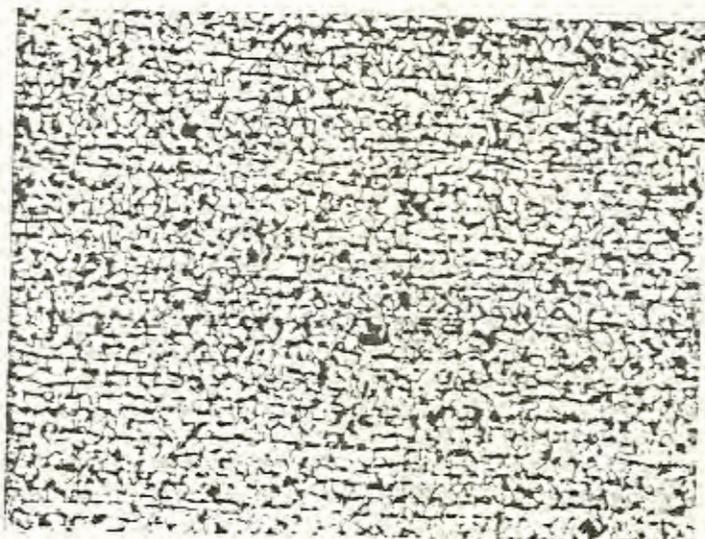
El trabajo en frío es el realizado en condiciones tales que no es posible que se produzcan eficazmente los procesos de restauración. En el trabajo o conformación en caliente se elimina rápidamente el endurecimiento por deformación en un proceso de recristalización. Por medio de este proceso de conformación en caliente se

logran deformaciones muy grandes de tal manera que pueden elaborar rollos de planchas con diferentes espesores.

Producto de las deformaciones, puede observarse al microscopio una estructura de fibras y bandas de segregación en la dirección longitudinal de la chapa de acero como se muestra en la Micrografía N^o 1. (14)

Como consecuencia de la estructura de fibras, las propiedades físico-mecánicas pueden ser diferentes para distintas orientaciones de las probetas de ensayo con respecto a la dirección de la fibra (dirección principal de conformación), la cual representa la anisotropía de los metales. En general, la ductilidad en tracción, las propiedades de fatiga y las de choque será más bajas en dirección transversal (perpendicular a la fibra) que en la longitudinal.

Dentro de las propiedades físicas del metal base, la densidad del acero merece especial atención ya que es muy aplicable para la determinación del peso y otros cálculos de interés, en el que se considera como densidad o gravedad específica de 7.9 (1).



MICROGRAFIA N^o 1

Estructura de fibras y bandas de segregación en la dirección longitudinal de una chapa de acero suave laminada en caliente. 100 aumentos. (14)

Puesto que en la presente investigación se utilizará un acero Kobe A-36, cuya especificación ASTM es cercana a la de ASTM A-283 grado C, a continuación se presenta un estudio metalográfico y de propiedades mecánicas del acero en mención:

Microestructura del acero ASTM A-283 C



MICROGRAFIA N° 2

Micrografía del Acero ASTM A-283 - C

200 x probeta de testigo

- Vista del metal base, muestra la estructura de ferrita-perlita del acero (C = 0.12%).
- Tamaño de grano normalizado ASTM N° 7. El espécimen tiene un tamaño de grano calculado de 7.13.

La micrografía N^o 2, muestra la microestructura del acero ASTM A-283 grado C vista a 200 X, la misma que es una solución sólida intersticial formada por pequeñas cantidades de carbono disueltas en hierro ferrítico. Esta microestructura presenta dos zonas, a saber de:

- Una zona o matriz ferrítica que aparece en forma de granos equiaxiales, de forma relativamente homogénea, característico de la sección transversal en la sección de laminación, y
- Unas zonas oscuras que representan la estructura perlítica ubicada en los bordes de grano de la red ferrítica.

Estas zonas representan la microestructura del metal base obtenida de una placa metálica, cuya microestructura representa una sección de la probeta preparada, pulida y atacada con Nital al 2% y vista al microscopio. Esta sección es obtenida de la parte transversal al de la dirección de laminación y de una parte de la plancha que no ha sido afectada por el calor del cordón de soldadura.

Las propiedades mecánicas y físicas obedecen a las asignadas al acero con una matriz ferrítica. El valor medio de sus propiedades son los asignados en la tabla N° 1.

2.1 Estudio de la Soldabilidad de los Aceros Estructurales.

Una vez analizada la microestructura del metal base, se verá un estudio de la soldabilidad de los aceros estructurales, el mismo que ha sido muy discutido debido a su complejidad. Por esta razón, la Sociedad Americana de Soldadura define soldabilidad como, "La capacidad de un metal a ser soldado, bajo condiciones impuestas de fabricación, en un diseño cuidadosamente seleccionado de estructura y además que desarrolle un servicio satisfactorio en operación".

Como consecuencia del concepto de soldabilidad, en una unión soldada se producen tres zonas bien definidas como se ve en la Figura N° 1, las cuales son:

- a) Una zona de metal fundido, constituida por el metal base (B) y el material de aporte (A) que después de llevado al estado de fusión,

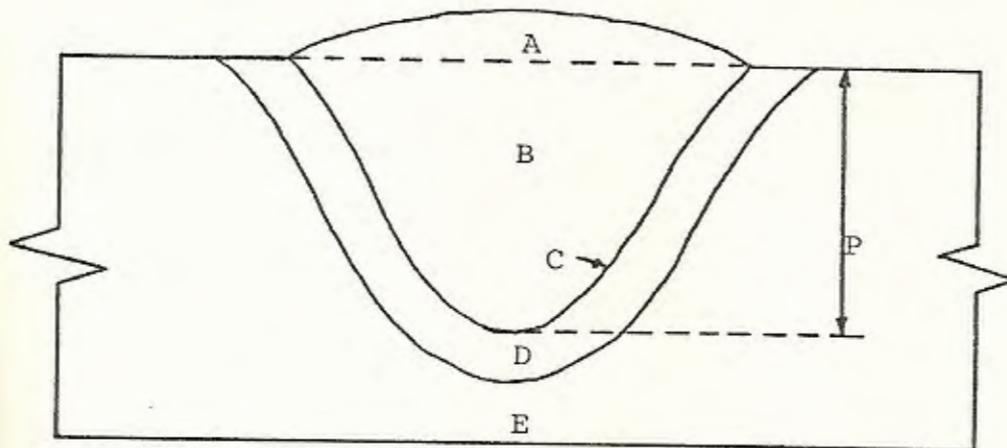


FIGURA N^o 1

La Unión Soldada comprende:

A y B Zona del metal de aporte y metal base fundido

C Línea de Fusión

D Zona afectada por el calor o de transición (mm²)

E Zona del metal Base (mm²)

P Penetración (mm)

se ha solidificado entre los bordes de la unión (línea de fusión).

- b) Una zona intermedia o de transición (zona afectada por el calor) en donde se desarrollan complejos ciclos térmicos según el punto que se considera, y
- c) Una zona del metal base (D), en el que sólo se producen variaciones de temperatura entre ciertos límites.

Estas tres zonas deben ser compatibles, y pueden observarse preparando una macrografía de un cordón soldado sobre una placa metálica.

El cambio microestructural que se presenta en la zona afectada por el calor está determinada por la composición química e historia previa desde la fabricación del metal base y por la respuesta del material a los cambios térmicos típicos en soldadura.

Las diferentes microestructuras que se presentan en un acero de bajo carbono cuando es sometido al proceso de soldadura, se muestra en la figura N° 2 (7), en la que puede apreciarse una microestructura del metal soldado compuesta

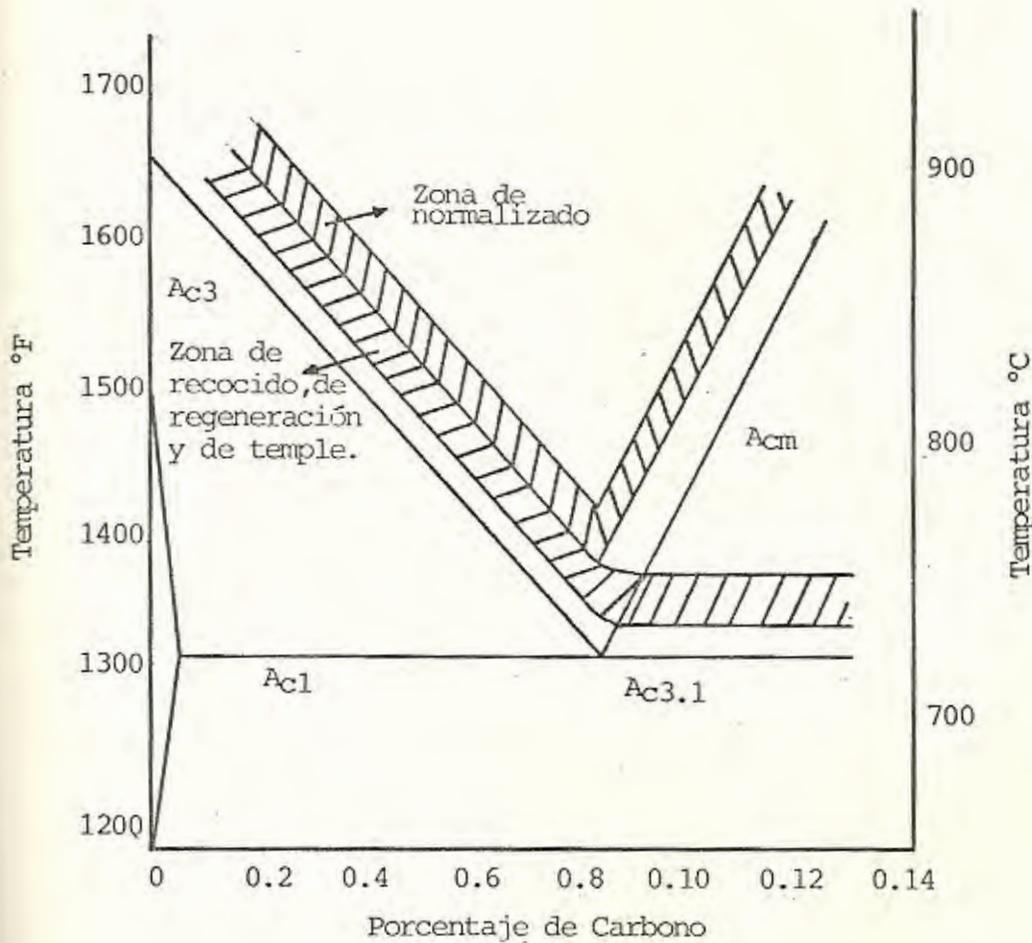
se ha solidificado entre los bordes de la unión (línea de fusión).

- b) Una zona intermedia o de transición (zona afectada por el calor) en donde se desarrollan complejos ciclos térmicos según el punto que se considera, y
- c) Una zona del metal base (D), en el que sólo se producen variaciones de temperatura entre ciertos límites.

Estas tres zonas deben ser compatibles, y pueden observarse preparando una macrografía de un cordón soldado sobre una placa metálica.

El cambio microestructural que se presenta en la zona afectada por el calor está determinada por la composición química e historia previa desde la fabricación del metal base y por la respuesta del material a los cambios térmicos típicos en soldadura.

Las diferentes microestructuras que se presentan en un acero de bajo carbono cuando es sometido al proceso de soldadura, se muestra en la figura N° 2 (7), en la que puede apreciarse una microestructura del metal soldado compuesta

FIGURA N^o 3

INTERVALO DE TEMPERATURA DE AUSTENIZACION
PARA NORMALIZADO, RECOCIDO Y TEMPLE DE LOS
ACEROS AL CARBONO

- $A_{c3} + 27^{\circ}\text{C}$ Zona de recocido completo y temple para los aceros hipo-eutectoides.
- $A_{c3.1} + 27^{\circ}\text{C}$ Zona de recocido completo y temple para los aceros eutectoides e hiper-eutectoides.
- Banda $400-600^{\circ}\text{C}$ Zona de recocido subcrítico [alivio de tensiones y recocido contra acritud.

La soldabilidad de los aceros puede estudiarse mediante tres tipos de análisis que pueden ser:

- Soldabilidad operativa que consiste en ver la posibilidad de obtener la unión de las bases de los elementos que deben soldarse.
- Soldabilidad metalúrgica que indica la relación entre las propiedades de la unión soldada y las del metal base.
- Soldabilidad construccional que indica la posibilidad de formación de concentraciones de tensiones internas y deformaciones.

2.2 ESTUDIO DEL MATERIAL DE APORTE

Los procesos de soldadura al arco eléctrico generalmente requieren del uso del metal de aportación que nos proporcione las mejores propiedades. La Sociedad American de Soldadura (AWS) ha desarrollado especificaciones para estos metales de aportación (como electrodos consumibles o rollos de alambre para material de aportación). La importancia de este sistema de clasificación es ayudar en la elección del material de aportación adecuada para cada trabajo específico.

Un tipo particular de material de aportación puede de-

La soldabilidad de los aceros puede estudiarse mediante tres tipos de análisis que pueden ser:

- Soldabilidad operativa que consiste en ver la posibilidad de obtener la unión de las bases de los elementos que deben soldarse.
- Soldabilidad metalúrgica que indica la relación entre las propiedades de la unión soldada y las del metal base.
- Soldabilidad construccional que indica la posibilidad de formación de concentraciones de tensiones internas y deformaciones.

2.2 ESTUDIO DEL MATERIAL DE APORTE

Los procesos de soldadura al arco eléctrico general - mente requieren del uso del metal de aportación que

nos proporcione las mejores propiedades. La Sociedad American de Soldadura (AWS) ha desarrollado especificaciones para estos metales de aportación (como electrodos consumibles o rollos de alambre para material de aportación). La importancia de este sistema de clasificación es ayudar en la elección del material de aportación adecuada para cada trabajo específico.

Un tipo particular de material de aportación puede de-

positar un cordón de soldadura con alto esfuerzo de tensión y alta ductilidad en soldadura.

El arco eléctrico como fuente de calor

Antes de iniciar nuestro estudio con respecto al material de aportación, es necesario analizar el arco eléctrico.

De acuerdo a conceptos de la física moderna, se define que el arco eléctrico es la manifestación de una emisión de electrones que proviene de un cátodo incandescente bombardeando el ánodo a gran velocidad. Este bombardeo provoca la ionización por choque de los átomos neutros del gas entre el electrodo y el metal base, originando una gran elevación de la temperatura. Concepto que se estudia en la magnetohidrodinámica o estudio del plasma (1).

Esta manifestación de emisión de electrones constituye un mecanismo en el cual la corriente eléctrica es transmitida a través de un gas ionizado a alta temperatura. Es evidente que para esta descarga sea mantenida debe existir un suministro permanente de portadores de corriente o sea de iones.

Los electrones son evaporados del cátodo por efecto termoeléctrico y acelerados por el campo eléctrico hacia la masa de gas donde ceden parcialmente su energía cinética por colisión, manteniendo así la temperatura del gas y la ionización del mismo.

Los iones positivos así producidos en el seno del gas son acelerados hacia el cátodo donde ceden su energía, elevando la temperatura del mismo y manteniendo la emisión termoelectrónica.

En la figura N° 4 se muestra el arco eléctrico formado por el cátodo, un radio de acción y el ánodo, los mismos que están protegidos por un gas protector formado por la combustión del recubrimiento del electrodo. Bajo estas consideraciones, se establece que el libre camino medio de los electrones es del orden de 10^{-5} cm. De esta manera un electrón que parte del reposo (es decir 0°K), tendrá en el momento de la colisión una energía cinética:

$$E.C. = 1/2mv^2 = F \cdot \bar{L} = eE\bar{L} = 4.8 \times 10^{-15} \text{ E. ergios}$$

(1)

donde:

F = fuerza que solicita al electrón

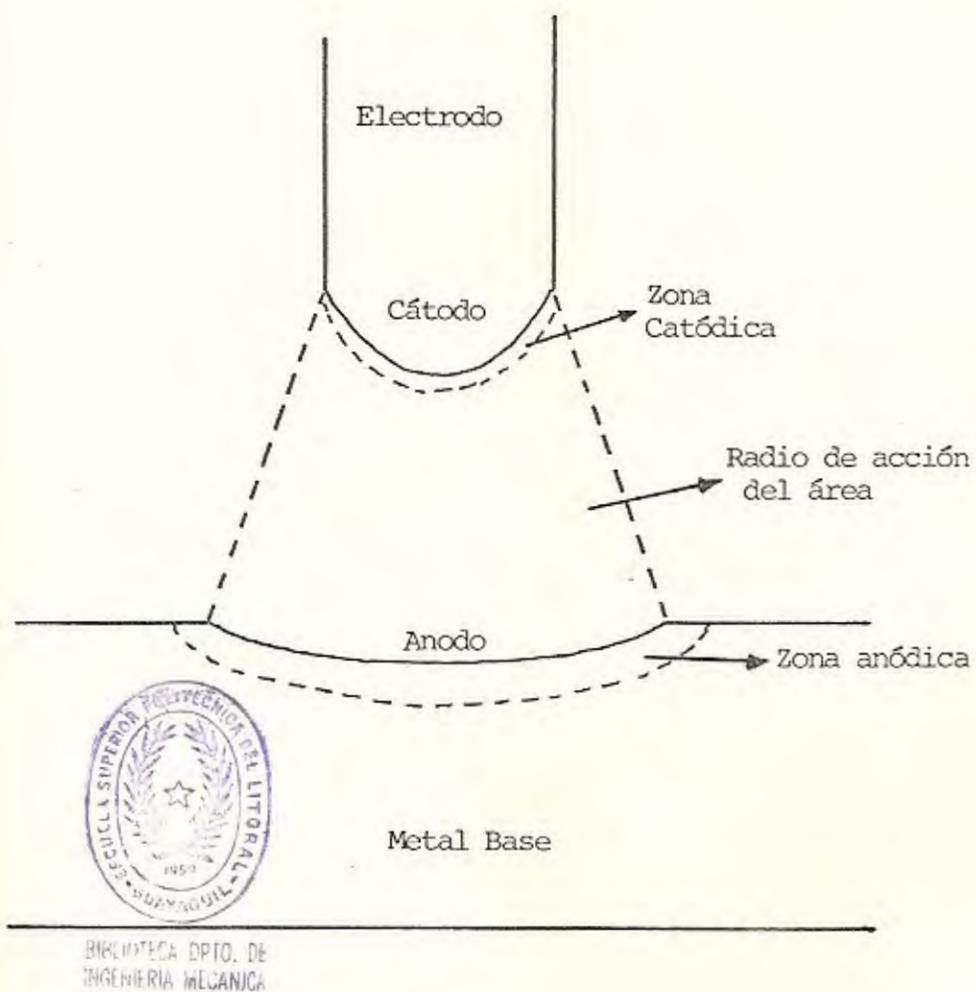


FIGURA N° 4

ARCO ELECTRICO Y SUS TRES ZONAS: (9)

- Zona Catódica
- Zona Anódica
- Zona de la columna del Arco Eléctrico

\bar{L} = libre camino medio

m = masa del electrón

e = carga del electrón

E = campo eléctrico

La energía así adquirida corresponde, de acuerdo a la teoría cinética de los gases a una temperatura absoluta T, tal que:

$$\frac{1}{2}mv^2 = 3/2KT \quad (2)$$

siendo K la constante de Boltzmann.

De esta relación podemos obtener la elevación de temperatura del electrón entre colisiones:

$$\Delta T = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{3/2K} = \frac{2 \times 4.8 \times 10^{-15} \times E}{3 \times 1.38 \times 10^{-16}} = 23E^\circ K = 2.3^\circ K$$

(3)

ya que el valor de E para el arco de helio es aproximadamente 0.1 Statvott/cm.¹

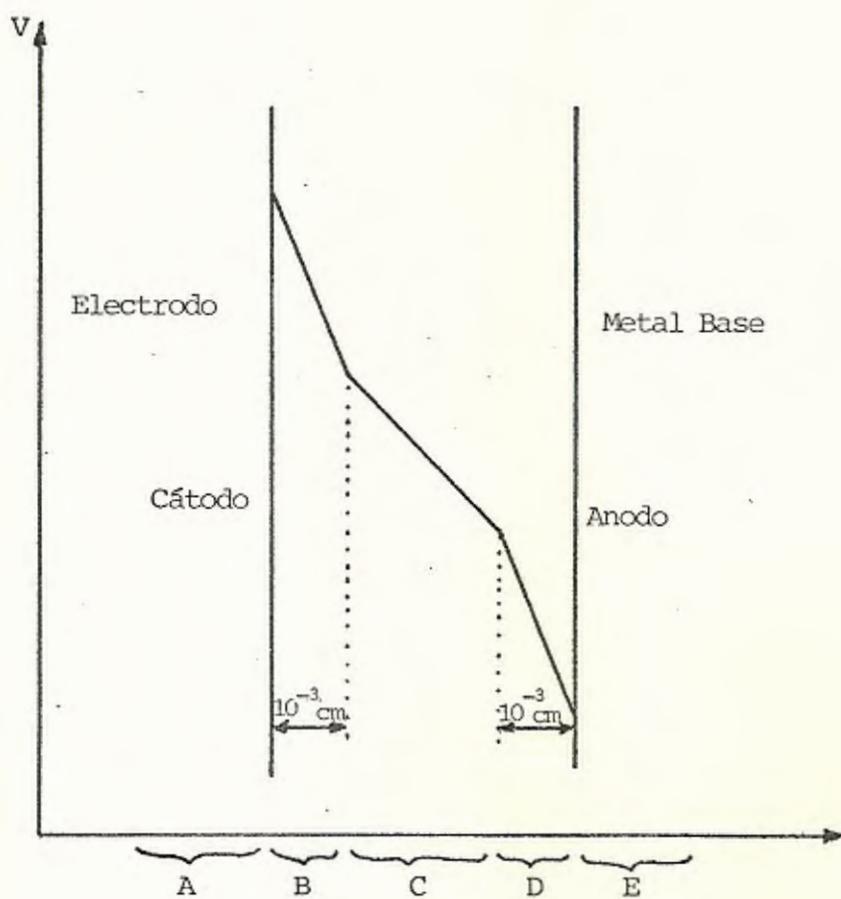
Se considera que sólo el 0.06% de la energía acumulada por el electrón entre colisiones es cedida a los átomos del gas, lo que representa una elevación de temperatura de los mismos de:

$$\Delta T = 0.0006 \times 2.3^\circ K = 0.001^\circ K \quad (4)$$

Este valor de incremento de temperatura es muy pequeño, pero multiplicado por cada vez que un átomo choca 10^{10} veces por segundo, representa un incremento total en la elevación de temperatura de 6000°C para los gases y vapores más comunes a presión atmosférica. En estas condiciones los electrones son acelerados hacia el ánodo y los iones hacia el cátodo, la que bombardean elevando su temperatura y manteniendo la emisión termoelectrónica necesaria para mantener el proceso.

Los arcos empleados en soldadura operan en general con rangos de corriente de 10 a 2.000 amperios y con tensiones de 10 a 50 voltios. Pueden distinguirse en los mismos las siguientes zonas, como se muestra en la Figura N^o 5.

- A. Mancha catódica: es la zona del electrodo negativo que es asiento de la emisión termoelectrónica.
- B. Zona de caída catódica: es la región inmediatamente adyacente al cátodo y que es asiento de una brusca caída de potencial.
- C. Columna del arco: es la parte visible y bri -

FIGURA N^o 5

CAIDA DE TENSION EN LAS DIFERENTES
ZONAS DEL ARCO ELECTRICO

llante del arco, de muy alta temperatura y bajo gradiente de potencial. Constituye el plasma propiamente dicho, o sea gas altamente ionizado y conductor.

- D. Zona de caída anódica: es la región adyacente al ánodo que es también asiento de una brusca caída de potencial.
- E. Mancha anódica: es la zona del electrodo positivo que es bombardeada por los electrones.

En cada zona del arco la potencia desarrollada es proporcional a la caída de tensión, ya que la energía desarrollada por segundo es Voltio por amperio.

En el arco eléctrico, la tensión en bornes y la intensidad de la corriente aplicada, no está ligada por una relación simple como la Ley de Ohm. Por el contrario, las variaciones de estos dos factores, se producen en sentido inverso; cuando la intensidad de la corriente I aumenta, la tensión en bornes V disminuye, primero rápida y después lentamente, lo cual es representado en la Figura N° 6.

Si para una longitud de arco dada, aumentamos

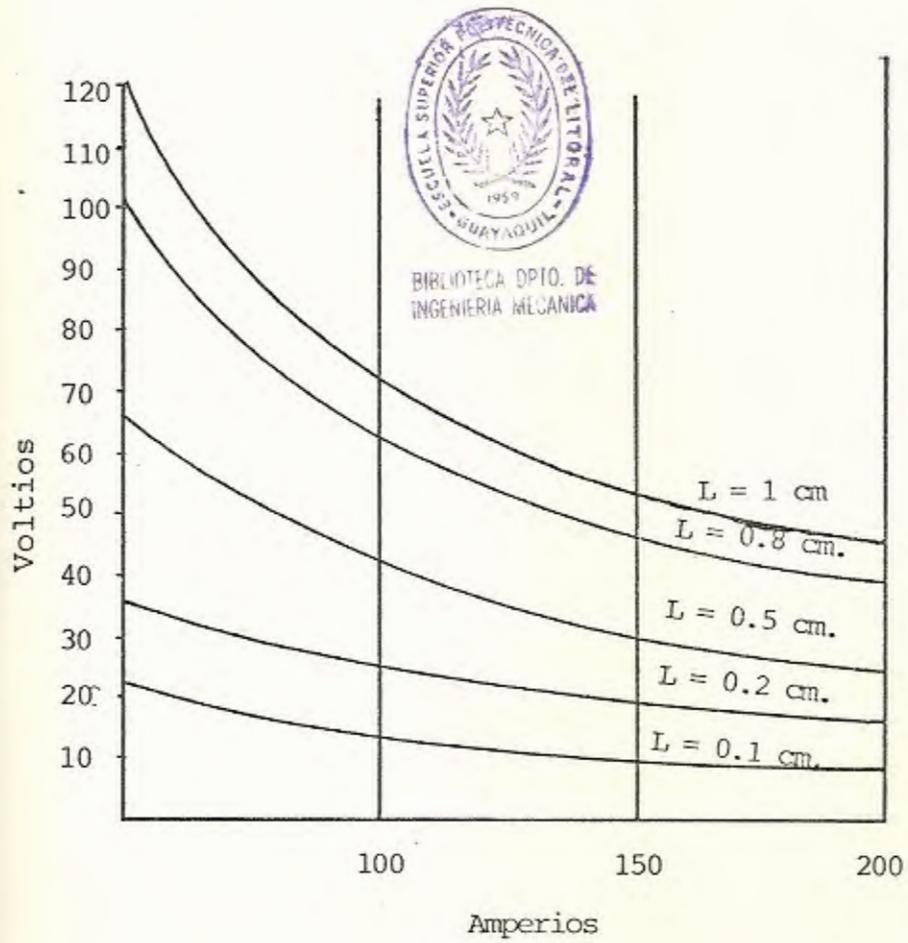


FIGURA N° 6

REGIMEN ELECTRICO DEL ARCO METALICO (1)

sucesivamente la intensidad, se comprueba que a partir de un cierto valor de ésta, el régimen del arco se modifica enormemente, el arco silencioso se vuelve silbante y la diferencia de potencial se independiza de la corriente, de esta manera el régimen se vuelve inestable.

Para las condiciones del arco estable, la tensión en bornes es la suma de las tres diferencias de potencial

$$V = V_c + V_a + V_o \quad (5)$$

de donde: V_c = voltaje en el cátodo

V_a = voltaje en el ánodo

V_o = voltaje en la columna del arco.

Los voltajes en el cátodo y en el ánodo son independientes de la longitud del arco y únicamente dependen de la naturaleza de los electrodos, de esta manera se establece la siguiente relación para un arco metálico:

$$V_c + V_a = \text{constante} = a \quad (6)$$

El voltaje en la columna del arco (V_c), está directamente relacionado con la longitud ℓ del arco y es inversamente proporcional a la inten-

sidad de la corriente del arco eléctrico, es decir:

$$V_0 = C\ell/I \quad (7)$$

De donde para un arco metálico, el voltaje del arco eléctrico es:

$$V = a + C\ell/I \quad (8)$$

De donde para el electrodo de hierro y un arco de ℓ centímetros de longitud tenemos:

$$V = 11 + 5500\ell/I \quad (9)$$

Tipos de Electrodo usados para Soldar Aceros Estructurales

En los procesos de soldadura eléctrica manual y automática generalmente se utilizan materiales de aportación de acuerdo a las propiedades mecánicas deseadas. Por esta razón, la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) ha desarrollado clasificaciones para materiales de aportación (como electrodos consumibles o materiales de aportación en rollos para soldadura), de tal manera de cubrir una amplia gama de consumibles para: aceros al carbono, aceros aleados, aceros inoxidable y aceros resistentes a la corrosión como

también para materiales no ferrosos.

La importancia de este sistema de clasificación es ayudar a la selección correcta de electrodos o materiales de aportación en rollos para cada trabajo específico. Un tipo particular de metal de aportación puede depositar, por ejemplo, un cordón de soldadura de alta resistencia y buena ductilidad.

Los diferentes tipos de electrodos y materiales de aportación son ampliamente utilizados en los procesos de soldadura, y éstos han sido bien desarrollados debido al recubrimiento protector de los electrodos o fundentes utilizados para el proceso de soldadura automática. Estos materiales de protección proveen una limpieza automática y una acción desoxidante en el cráter del cordón depositado. Como estos recubrimientos se queman en la formación del arco eléctrico formando una atmósfera inerte, se produce una acción protectora del metal fundido, aislándola del medio ambiente que tiende a reaccionar con el cordón depositado en el momento de la fusión. De esta manera se consigue que el cordón depositado quede exento de defectos in -

ternos.

La atmósfera inerte elimina el oxígeno y el nitrógeno del medio ambiente, mientras que los residuos quemados del recubrimiento forman un protector del cordón depositado llamado escoria, la misma que facilita la mejor solidificación del cordón depositado.

La diferencia en las características operacionales de los electrodos pueden atribuirse al recubrimiento. El núcleo del electrodo es generalmente del mismo tipo de material a ser soldado. Por ejemplo, para la serie de electrodo 60xx, el núcleo del electrodo corresponde a un acero SAE 1010, con un rango en contenido de carbono de 0.05 a 0.15%.

La calidad a obtenerse con los electrodos revestidos en los cordones soldados y rendimiento de presión dependen del tipo y grueso del revestimiento. Según el tipo de revestimiento, se distinguen seis grupos de electrodos que son: (6)

TIPO

Dióxido de titanio

Acido

Oxidante

TIPO

Básico

Celulósico

Especiales

Dentro de estos tipos de electrodos se clasifican una gran variedad de electrodos que se encuentran en el mercado.

La clasificación de los electrodos, según la Sociedad Americana de Soldadura, ha adoptado una *serie de cuatro o cinco dígitos precedidos por* la letra E, la cual indica que se trata de electrodos recubiertos. Los números que se encuentran a la izquierda de los dos últimos indican el esfuerzo a la tensión en miles de libras por pulgadas cuadradas del metal depositado, el penúltimo dígito indica la fuente de poder, tipo de scoria, tipo de arco eléctrico, penetración y presencia de polvo de hierro. Las Tablas N^o 1 y N^o 2 nos indican el sistema de clasificación de electrodos y la clasificación de los electrodos según la interpretación de los últimos dígitos.

Según la Sociedad Americana de Soldadura, se ha

T A B L A N º 3

SISTEMA DE CLASIFICACION DE ELECTRODOS AWS

D I G I T O	SIGNIFICADO	EJEMPLO
1ª, 2ª y 3ª	Mínimo esfuerzo de tensión	E-60xx = 60.000 lb/plg ² E-110xx = 110.000 lb/plg ²
3ª ó 4ª según el caso	Posición de Soldadura	E-xx1x = toda posición E-xx2x = horizontal y plana E-xx3x = plano solamente

T A B L A N º 4

INTERPRETACION DE LA CLASIFICACION DE ELECTRODOS SEGUN AWS

Ultimo Dígito	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fuente de Poder	(a) CA 0 CD(+)	CA 0 CD	CA 0 CD	CA 0 CD	CA 0 CD	CD (+)	CA 0 CD(+)	CA 0 CD	CA 0 CD(+)
Tipo de Escoria	(b) Orgánica	Rutílica	Rutílica	Rutílica	Rutílica	Bajo	Bajo	Mineral	Bajo
Tipo de Arco	-	-	Medio	Suave	Suave	Medio	Medio	Suave	Medio
Penetración	(c) Profunda	Media	Media	Ligera	Ligera	Media	Media	Media	Media
Polvo de hierro en el revestimiento.	0-10 %	-	0-10%	0-10%	30-50%	-	-	50%	30-50%

(a) E-6010 es CD(+); E-6020 es CA 0 CD

(b) E-6010 es orgánica; E-6020 es mineral

(c) E-6010 es penetración profunda; E-6020 es penetración media

clasificado los electrodos requeridos para soldar aceros estructurales con ciertos requerimientos químicos mínimos para cumplir con los objetivos deseados en lograr ciertas propiedades mecánicas necesarias en un cordón depositado, estos requerimientos químicos se encuentra en la Tabla N° 4, la cual nos indica el porcentaje de los diferentes elementos aleantes en los electrodos de la serie 60xx y 70 xx.

La Tabla N° 5 nos indica una clasificación de electrodos de la serie 60xx y 70xx, indicándonos además el tipo de revestimiento, posición de soldadura y tipo de corriente. (12)

Las Tablas 6 y 7 indican las propiedades mecánicas de los electrodos mínimas requeridas para soldar aceros estructurales.

Para el proceso de soldadura automática con arco sumergido también se clasifican los materiales de aportación con sus respectivos fundentes. Esta clasificación según la composición química se muestra en la Tabla N° 8. Mientras que las propiedades mecánicas se muestran en la Tabla N° 9 , en la que se indica el tipo de combina-

ción material de aportación con fundente como protección del arco eléctrico.

Selección de Electrodo y Material de Aportación de Acuerdo al Proceso

Los electrodos utilizados para soldar aceros estructurales, son seleccionados de acuerdo a la composición química y/o propiedades mecánicas del metal base. De esta manera se trata de que las propiedades mecánicas del metal base, dependiendo del trabajo a realizar, mientras que la composición química del material de aporte y metal base se prefiere que sean iguales o similares para lograr en el mejor de los casos conseguir homogeneidad en la microestructura (5).

Para obtener resultados satisfactorios de la soldadura, se requiere en gran parte de una adecuada selección del material de aportación para el trabajo.

Esta selección puede hacerse tomando en consideración los siguientes factores:

1. Proceso de soldadura a utilizarse
2. Clase de material que será soldado
3. Posición de soldadura
4. Espesor y dimensiones de la pieza a soldar

T A B L A N° 5

REQUERIMIENTOS QUIMICOS PARA ELECTRODOS REVESTIDOS, SEGUN AWS
(Sociedad Americana de Soldadura) (22)

CLASIFICACION AWS	Máx. % de componentes químicos					
	Manganeso	Silicio	Níquel	Cromo	Molibdeno	Vanadio
E7014, E7015 E7016, E7018 E7024, E7028	1.25	0.90	0.30	0.20	0.30	0.8
E6010, E6011 E6012, E6013 E6020, E6027	No requiere composición química					

BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA



T A B L A N° 6ESFUERZO DE TENSION, PUNTO DE FLUENCIA Y ELONGACIONREQUERIDA PARA EL MATERIAL APORTADO

CLASIFICACION AWS	ESFUERZO DE TENSION psi	ESFUERZO DE FLUENCIA psi	ELONGACION %
S E R I E E60			
E6010	62,000	50,000	22
E6011	62,000	50,000	22
E6012	67,000	55,000	17
E6013	67,000	55,000	17
E6020	62,000	50,000	25
E6027	62,000	50,000	25
S E R I E E70			
E7014			17
E7015			22
E7016	72,000	60,000	22
E7018			22
E7024			17
E7028			22

T A B L A N^o 7PROPIEDADES DE IMPACTO REQUERIDASPARA ELECTRODOS DE LAS SERIES 60xx y 70xx

CLASIFICACION AWS	ENERGIA DE IMPACTO MINIMA REQUERIDA
E6010, E6011	20 ft-lb - 20 F
E6027, E7015	20 ft-lb - 20 F
E7016, E7018	20 ft-lb - 20 F
E 7028	20 ft-lb - 0 F
E6012, E6013	No se requiere
E6020, E7014	No se requiere
E7024	No se requiere

T A B L A N º 8

COMPOSICION QUIMICA REQUERIDA PARA ELECTRODOS

CLASIFICACION AWS	Composición Química %						Total otros elementos
	C	Mn	Si	S	P	Cu	
Bajo Manganeso							
Clase							
EL8	0.10	0.30 a 0.55	0.05				
EL8K	0.10	0.30 a 0.55	0.10 a 0.20				
EL12	0.07 a 0.15	0.35 a 0.60	0.05				
Medio Manganeso							
Clase							
EM5K	0.06	0.90 a 1.40	0.40 a 0.70	0.035	0.03	0.30	0.50
EM12	0.07 a 0.15	0.85 a 1.25	0.05				
EM12K	0.07 a 0.15	0.85 a 1.25	0.15 a 0.35				
EM13K	0.07 a 0.19	0.90 a 1.40	0.45 a 0.70				
EM15K	0.12 a 0.20	0.85 a 1.25	0.15 a 0.35				
Alto Manganeso							
Clase							
EH14	0.10 a 0.18	1.75 a 2.25	0.05				

Para el proceso de soldadura automática con arco sumergido se cuenta con alambres electrodos cuya clasificación está basada sobre su composición química, cuyos requisitos a cumplir se encuentran en la Tabla N º según la norma AWS A5.17-76. (24)

T A B L A N º 9

PROPIEDADES MECANICAS REQUERIDAS (13)

Clasificación de fundente AWS	Esfuerzo de tensión psi (MPa)	Esfuerzo de fluencia psi (MPa)	Elongación, min en % (51 mm)	Energía de Impacto, mínimo
F62-EXXX F60-EXXX ^C F62-EXXX ^C F64-EXXX ^C F66-EXXX ^C F72-EXXX F70-EXXX ^C F72-EXXX ^C F74-EXXX ^C F76-EXXX ^C	62 000 (430) a 80 000 (550) 72 000 (500) a 95 000 (655)	50 000 (345) 60 000 (415)	22 ^d 22 ^c	Z-no se requiere impacto 0-20ft-lb -0°F(27 J -18°C) 2-20ft-lb -20°F(27 J -29°C) 4-20ft-lb -40°F(27 J -40°C) 6-20ft-lb -60°F(27 J -51°C)

Las propiedades mecánicas requeridas para alambres electrodos, se indican en la tabla # 8.
La descripción del alambre y fundentes es como sigue:

FXX-EXXX-N

- F = indica fundente
- X = indica el esfuerzo de tensión mínimo en 10.000 lbs/plg²
- X = indica la temperatura más baja para el esfuerzo de impacto
- E = indica electrodo
- XXX = indica la composición química del electrodo
- N = indica el grado nuclear, cuando se aplica

5. Aspecto deseado del cordón
6. Clase de escoria y su adherencia al metal
7. Propiedades específicas que debe poseer el cordón de soldadura.
8. Requisitos de código que debe reunir el electrodo.

Basado en las consideraciones anteriormente descrita, la Tabla N° 10 nos proporciona una guía para seleccionar electrodos o material de aportación designados a ser utilizados en soldadura de aceros según especificaciones propuestas por la Sociedad Americana para Ensayo de Materiales (ASTM).

Para el proceso de soldadura automática con arco sumergido, tenemos una combinación de material de aportación con fundente granulado, según especificaciones propuestas por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), clasificación A5.20-69 el siguiente material: (13)

F62 EL12

el cual comprende; fundente granulado (F62) y material de aportación (EL12).

Una vez analizada la selección del material de aportación trataremos sobre el diseño y prepara-

T A B L A N^o 10

ELECTRODOS RECOMENDADOS PARA ACEROS AL CARBONO

Y DE BAJA ALEACION, SEGUN ASTM

Especificaciones ASTM	Electrodos Recomendados
A414-72	Nota 1 A7018 o E7028 E8018-C3
A424-73	E7018
A441-74	E7018 o E7028 Nota 3
A442-74	E7018 o E7028
A444-71	Nota 1 y 8
A446-72	E7010-A1
A455-74C	E8018-C3
A486-74	E7018 o E7028 E9018-G
A487-71a	E8018-83 Note 1
A514-74a	E8018-C3 E11018-M Nota 4
A515-74b	E7018 o E7028
A516-74a	E7018 o E7028 E7018 o E8018-C3
E517-74a	E11018-M Nota 4
A526-71	Notas 1 y 8
A528-71	
A529-72	Nota 1
A533-74	E8018-C3 E11018-M
A537-74	E7018 o E7028 E8018-C3
A541-73	E7018 o E7028 E8018-C3 E8018-B2 E9018-B3
A543-74	E11018-M

Tabla N° 10

Cont.

Especificaciones ASTM	Electrodos Recomendados
A570-72 A572-74b	Nota 4 Nota 1 Nota 1 E7018 o E7028 E8018-C3
E573-74 E588-74a	E7018 o E7028 E7018 o E7028 Nota 3
E606-71 E607-70	Nota 1 Nota 1 E8018-C3
E611-72 A615-74a	E9018-G Nota 1 Nota 1
A616-72	E9018-G E11018-M E8018-C3
A617-74	E9018-G Nota 1
A706-74 A36-74 A113-70a A131-74	E9018-G E9018-G Nota 1 Nota 1 Nota 1
A148-73	E7018 E8018-C3 E9018-G
A202-74a A203-74a	E11018-M E9018-G E8018-C1
A204-74a	E8018-C2 E7010-A1 o E7018 E8018-B2
A205-74a A225-74a	E8018-C3 E8018-C3



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

Tabla N° 10

Cont.

Especificaciones ASTM	Electrodos Recomendados
A236-74	E7018 o E7028 E8018-C3 E9018-G E11018-M
A238-71	E8018-C3 E9018-G E11018-M
A242-74 A266-69	E7018 o E7028 Nota 1 E7018 E8018-C3
A283-74 A284-70a A285-74a A299-74a A302-74a A328-70 A336-70a	Nota 1 Nota 1 Nota 1 E8018-C3 E8018-C3 E7018 o E7028 E7018-A1 E8018B2
A352-74a	Nota 9 E7018 E7018A-1 E8018-C1 E8018C2
A356-74	E8018-B1 E8018-B2 E9018-B3
A361-71 A366-72 A372-74	Notas 1 y 8 Nota 1 E7018-E7028 E8018-C3 E9018-G E11018-M

Tabla N° 10

Cont.

ESPECIFICACIONES ASTM	Electrodos Recomendados
A387-74a	E8018-B2
A389-74a	E9018-B3
A410-72	E8018-B2
	E9018-B3
	E8018-C2
	Nota 1
	E7010-A1 ó
	E7018-A1
E178-73&	
E179-73	Nota 1
A181-68	E7018 o E7010-A1
A182-74	E7010-A1, E7018-A1
A199-73	E8018-B2, Nota 9
A200-72	E8018-B2, Nota 9
A209-73	E8018-B2, Nota 9
A210-73	E7010-A1, E7018-A1
	Nota 1 ó E7010-A1
	E7010-A1
A213-74b	E8018-B2
A214-74b	Nota 1
A216-74b	E7018 o E7018-A1
A217-74c	E7010-A1
	E8018-C3
	E8018-B2
A234-74	Nota 1
	E7010-A1, Nota 2
	E8018-B2
A250-73	E7010-A1, Nota 2
A333-74&	E7018 o E8018-C3
A334-74	E8018-C2
	E8018-C1
A335-74a	E7010-A1, Nota 2
	E8018-B2
	Nota 9
A350-74	E8018-C1
	E8018-C2
	E8018-C3

Tabla N^o 10

Cont.

Especificaciones ASTM	Electrodos Recomendados
A369-73 A381-73	Ver A335 y A182 Notas 1 y 2 Nota 5 Nota 5 ó E8018-C3 E8018-82
A405-70 A420-73 A423-73 A426-74 A498-73 A500-74a A501-74 A524-72a A556-73& A557-73	E8018-C3 ó E7018 Ver A335 E7018 & Nota 1 E7018 & Nota 1 E7010-A1 ó E7018 E7018, Nota 1 E7018 E7018

Nota 1 Use cualquier electrodo de la serie E60xx o E70xx

Nota 2 Use E7010-G, diseñada especialmente para trabajos de tubería en el campo.

Nota 3 Use E8018-C1 ó E8010-B2

Nota 4 E7018 ó E8018-C3 son usados frecuentemente para soldadura de filete.

Nota 5 Use electrodos especiales diseñados para soldadura de tubos 5LX, grados x42 y x65.

Nota 6 No use E8018-B2 para aplicaciones de baja temperatura

Nota 7 E7018, E7028 para filetes

Nota 8 Usualmente E6010, es más satisfactorio para acero galcanizado.

ción de juntas soldadas que es un complemento para obtener excelentes resultados de un material correctamente seleccionado.

Estudio de Composiciones físico-químicas de los materiales de aportación.

Los electrodos revestidos están constituidos por un núcleo metálico generalmente de forma cilíndrica, y de un revestimiento de composición química muy variable, según las características exigidas.

La composición de los revestimientos es muy compleja, son mezclas de materias orgánicas y minerales, de modo que cada substancia juega una función determinada, ya sea durante la fusión, ya durante la solidificación. Actuando como: estabilizadores del arco, componentes de la escoria, depuradores del metal, portadores de elementos útiles al metal fundido, etc.

El revestimiento realiza un gran número de funciones cuyo estudio constituye toda la técnica del electrodo, siendo éstas las siguientes:

- Funciones eléctricas del revestimiento
- Función física de la escoria

- Función metalúrgica del revestimiento

La existencia de un arco eléctrico depende del estado de ionización de los gases existentes entre el ánodo y el cátodo. Además, los factores que actúan sobre la estabilidad del arco son numerosos, tales como:

- tensión de cebado en vacío; en corriente alterna son precisas tensiones de cebado más elevadas,
- la potencia de ionización de los metales,
- el poder termoiónico,
- la conductibilidad térmica

En la función física del revestimiento, intervienen dos elementos:

- la naturaleza del revestimiento, que determina la viscosidad de la escoria ,
- el espesor del revestimiento.

La influencia de la viscosidad de las escorias en soldadura, se hace patente no sólo para obtención fácil del material aportado en distintas posiciones sino también para la protección total del metal fundido. Además la velocidad de las reacciones y los cambios entre la escoria y el

metal se facilitan con una escoria fluida.

Debido a estas razones es necesario buscar, como en los revestimientos básicos, escorias poco viscosas, que facilitan la fijación del manganeso o de los elementos especiales en el baño fundido y también para lograr la desulfuración y la desfosforación de la soldadura.

ESTUDIO DE LA UNION SOLDADA

En construcciones soldadas, es muy común la aplicación de uniones soldadas para formar elementos que componen todo tipo de estructuras tales como: puentes, tanques para almacenamiento de líquidos y gases, poliductos, gasoductos, etc., los mismos que soportan diferentes tipos de esfuerzos como: esfuerzos de tensión, compresión, doblado, torsión, esfuerzos cortantes y de impacto.

Los esfuerzos antes mencionados pueden ser esfuerzos principales, los mismos que son calculables, a éstos se agregan los esfuerzos secundarios, que se pueden clasificar en dos categorías, a saber de: esfuerzos secundarios externos e internos, como se muestra en la figura N° 8. (1)

Los esfuerzos secundarios externos son los esfuerzos

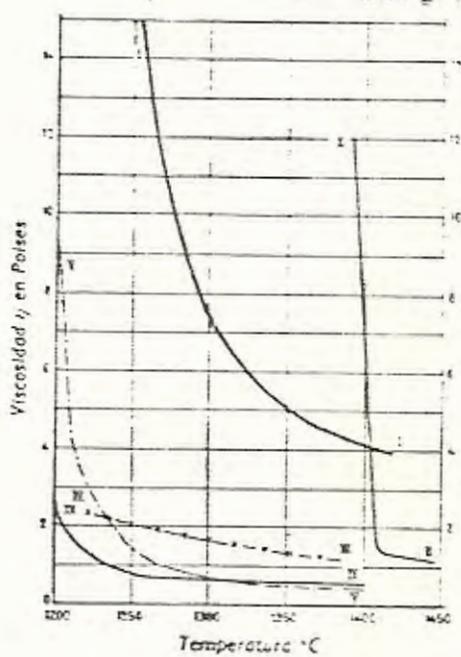
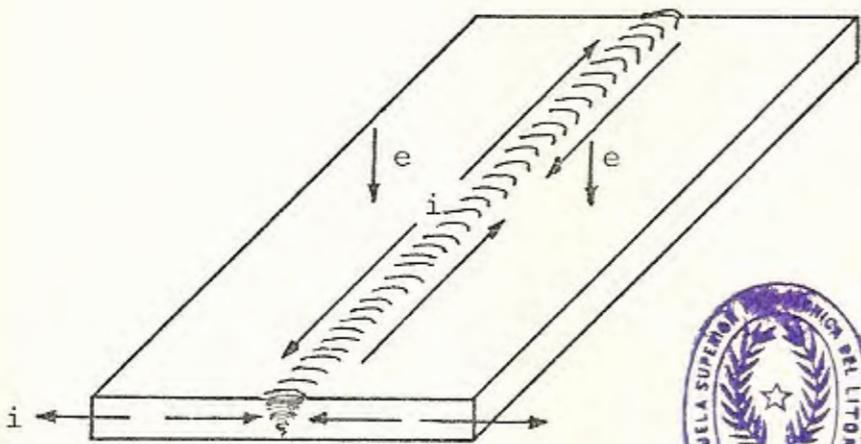


FIGURA N° 7

RELACION ENTRE LA TEMPERATURA Y LA VISCOSIDAD
PARA DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMIENTOS

- I y V Escoria de revestimiento Acido
- III y II Escoria de revestimiento a base rutilo
- IV Escoria de revestimiento básico



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

FIGURA N° 8

UNION SOLDADA (ENSAMBLE MECANICO)

e = esfuerzos secundarios externos

i = esfuerzos secundarios internos

normales, es decir, los esfuerzos que actúan perpendicularmente a la pieza de trabajo (e), y los esfuerzos cortantes son aquellos que actúan paralelo al cordón de soldadura (i). Estos esfuerzos son muy difíciles de determinar, debido a que se producen en la unión soldada por su propia construcción, y actúan sobre las tres zonas indicadas anteriormente.

Para determinar los esfuerzos de tensión, en una unión soldada, se han desarrollado varias pruebas de tensión en diferentes aceros (2) , y luego se han graficado los valores en una curva de esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura N° 9.

Puede apreciarse en la figura N° 9 que el acero ASTM A283 tiene esfuerzos nominales más bajos que los otros aceros estructurales, por esta razón, se considera que los materiales de aportación (E60xx y E70xx), seleccionados para este acero son los más indicados. De esta manera se logra una unión soldada de buenas cualidades mecánicas.

Diseño y Preparación de Juntas

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta cuando se debe efectuar una soldadura, es el adecuado diseño de las juntas. Esto tiene

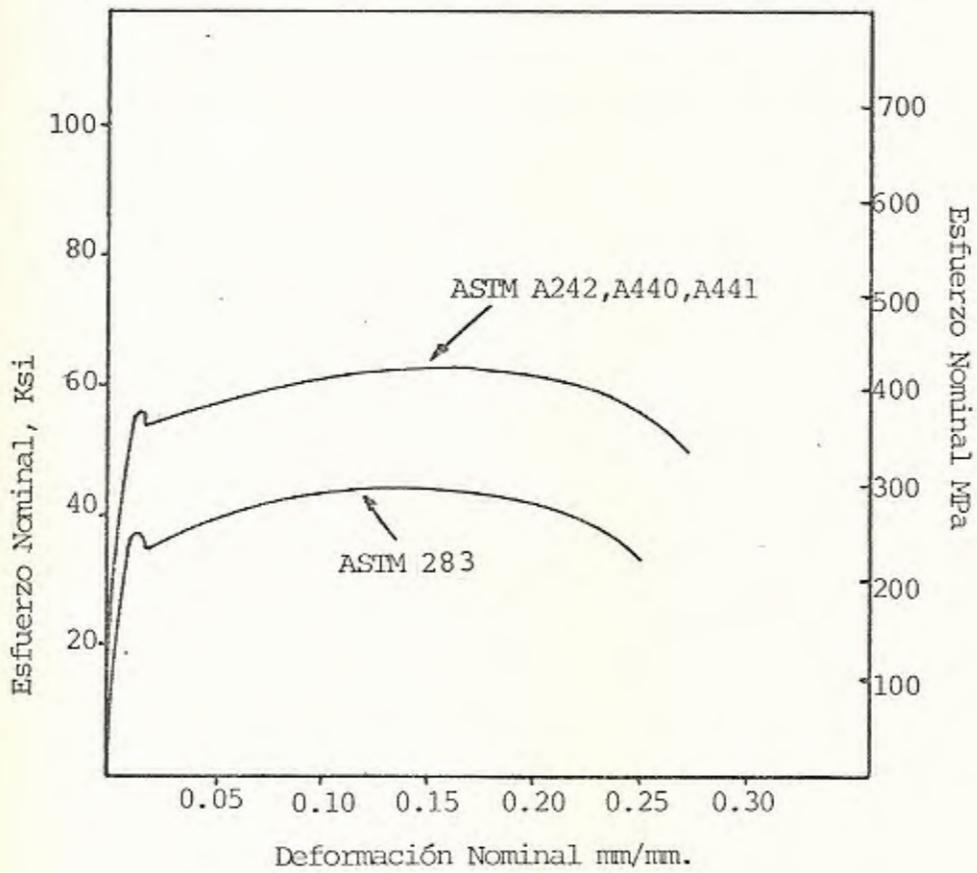


FIGURA N° 9

CURVAS ESFUERZO DEFORMACION NOMINAL
PARA VARIOS ACEROS ESTRUCTURALES

por objeto lograr en la soldadura la penetración correcta y al mismo tiempo minimizar la distorsión.

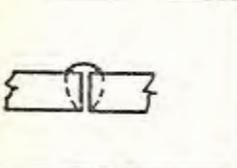
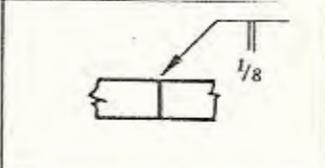
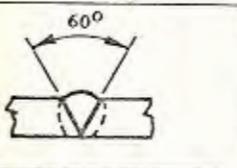
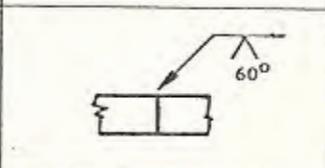
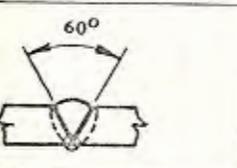
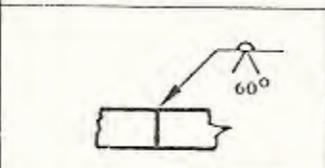
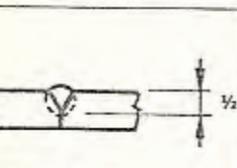
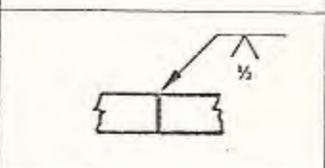
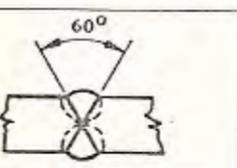
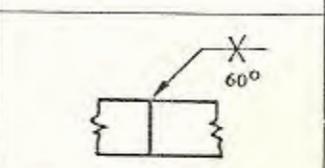
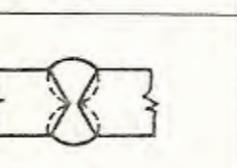
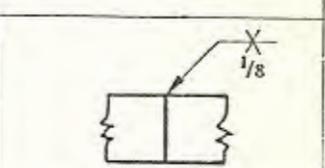
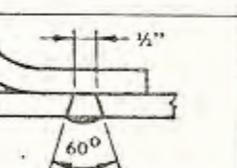
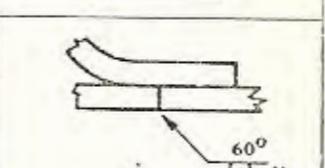
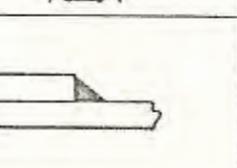
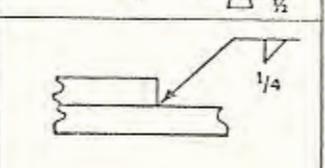
La tabla N^o 11 nos muestra diferentes tipos de juntas que se utilizan muy a menudo en la práctica de soldadura. Los principales tipos de juntas son los diseñados a tope y en V. Los demás diseños son una combinación de los dos antes mencionados. Además, esta tabla nos indica el símbolo de soldadura utilizado para cada junta, según el caso que se trate.

El tipo de junta debe ser seleccionado de acuerdo a la carga que va a soportar la estructura. Una vez seleccionado el tipo de junta, se debe tomar en consideración las siguientes reglas para una aplicación adecuada del diseño:

- Seleccionar la junta que requiera el menor número de pases de soldadura.
- Donde sea posible, se debe eliminar juntas con nivel para usar procesos de soldadura automática con arco sumergido, el cual tiene una profundidad de penetración del arco eléctrico aceptable.

T A B L A N º 11

APLICACION DE SIMBOLOS DE SOLDADURA

TIPO DE JUNTA	SIMBOLO	SIGNIFICADO DEL SIMBOLO
		Indica junta a tope con separación de 1/8 plg.
		Indica junta en V con un ángulo de 60º
		Indica junta en V con un ángulo de 60 grados y un cordón de esfuerzo en la raíz.
		Indica junta en V con 1/2 plg. de raíz
		Indica junta en doble V con ángulo de 60 grados
		Indica junta en doble V con separación de 1/8
		Indica junta en traslape con un punto de soldadura a 60º
		Indica junta en filete

Tipo de Junta	Símbolo	Significado del Símbolo
		Indica junta en filetes con espesores de 1/4 y 3/8 a uno y otro lado del cordón de soldadura.
		Indica junta con ranura en V a 45° y con un filete de 3/8 plg en el cordón de soldadura.
		Indica junta en filete con 1/4 plg del cordón de soldadura
		Indica junta en filete con doble ranura de 1/4 y 1/8 respectivamente.
		Indica soldadura alrededor del tubo con cordones de soldadura de 1/4
		Indica junta en filete con cordone de soldadura espaciadas cada 6 plg. entre centros.
		Indica junta en filete con cordones de soldadura aternadas y espaciadas cada plg. entre centros.
		Indica soldadura en filete con cordones de soldadura de 3/8 y 1/4.

- Usar una separación entre juntas, mínima.
- Sobre placas gruesas, debe usarse juntas del tipo doble V o en V para reducir la cantidad de metal aportado.
- Use un sólo cordón de soldadura donde sea posible para unir tres piezas.
- Diseñar la junta para facilitar la ejecución de la misma.

Estas reglas sirven como guía para un adecuado diseño y preparación de juntas, tomando en consideración varios puntos de vista, tales como: juntas sobredimensionales, juntas económicas y juntas que cumplan con una función específica. Dentro de los tipos de juntas presentadas en la Tabla N° 11 tenemos, juntas a tope en te, en esquina, a traslape y de canto, mientras que los tipos de soldadura o preparación de juntas, pueden ser: de filete, en ángulo recto, ranuradas con nivel en un lado, con visel en V y en doble V, con visel tipo J y con visel tipo U.

En el diseño de juntas soldadas, el diseñador debe especificar el tipo de unión a ser utilizada para soldar dos piezas de metal. Estos dise-

ños son representados por símbolos, los mismos que deben ser claramente interpretados para su ejecución.

El tipo de junta utilizado para unir piezas de materiales estructurales está relacionado con la distorsión del material y esfuerzos internos producto de las transformaciones microestructurales, las cuales veremos a continuación:

2.3 Transformaciones Microestructurales en la Unión Soldada (Metal base, zona afectada por el calor y zona defusión).

Los aceros de bajo contenido en carbono son los materiales más ampliamente utilizados en construcciones soldadas. Cuando el contenido de carbono de estos aceros está limitado a 0.30%, tienen la ventaja que para espesores de hasta una pulgada pueden ser soldados sin calentamiento previo ni tratamiento térmico posterior. Para espesores mayores o contenido de carbono más elevado, la práctica usual es el empleo de electrodos de bajo hidrógeno y/o calentamiento previo de las partes para minimizar la tendencia a la fragilización que presentan estos materiales.

En general, los procesos de soldadura por fusión involucran elevados regímenes de calentamiento y de enfriamiento. Consecuentemente, las microestructuras resultantes de aquellos procesos no corresponden a las de equilibrio. Sin embargo, es útil analizar estas transformaciones considerando el diagrama de equilibrio hierro-carbono que se indica en la figura N° 13.

Las transformaciones más importantes que pueden afectar las propiedades mecánicas son las siguientes:

La transición de fase gama o austenita (cúbica de cara centrada) o ferrita alfa (cúbica de cuerpo centrado) que en el hierro puro ocurre a aproximadamente 900°C. La segunda consiste en la precipitación de carburos cuya solubilidad decae con la temperatura.

En los aceros de bajo carbono, por encima de la línea A₃, los mismos que son austeníticos. Al enfriarse lentamente, comienza la transformación en el instante en que la temperatura cruza la línea mencionada en el punto correspondiente al contenido de carbono del acero que se trate. Esta transformación consiste en la precipitación

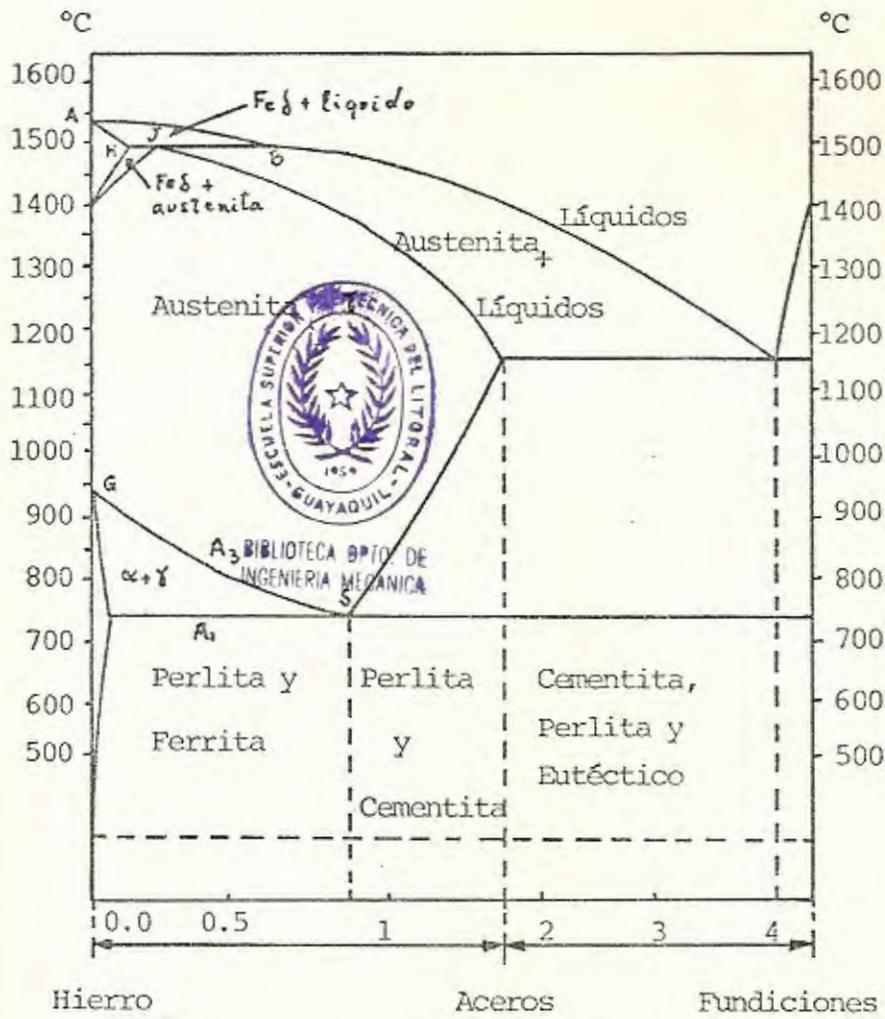
FIGURA N^o 10

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO CARBONO (1)

de ferrita con pequeñas cantidades de carbono en solución, quedando granos de austenita que se van enriqueciendo paulatinamente en carbono a medida que desciende la temperatura.

Aumentando la velocidad de enfriamiento, las temperaturas a las que se producen las transformaciones gamma-alfa disminuyen. A medida que las temperaturas de transformación bajan, la distancia que los átomos de carbono pueden recorrer por difusión disminuye, ya que éste es un proceso activado térmicamente, de modo que se manifiesta una tendencia a la formación de estructuras meta-estables que involucran una menor migración de átomos de carbono.

A velocidades de enfriamiento aún mayores, se presenta un nuevo tipo de transformaciones conocido como martensítico que tiene la característica de no involucrar difusión de carbono sino solamente una distorsión en el retículo cristalino. De todas estas descripciones, se puede decir que generalmente las estructuras resultantes de estas transformaciones son tanto más duras y frágiles cuanto más elevadas sean las velocidades de enfriamiento y más altos los conte-

nidos de carbono.

Para analizar las microestructuras resultantes de los procesos de soldadura por fusión es conveniente considerar separadamente la zona de fusión y la zona afectada por el calor. La primera se caracteriza por poseer una estructura homogénea que en los aceros de bajo contenido de carbono consiste fundamentalmente en granos pequeños de ferrita y carburos precipitados.

Más importante que la zona de fusión es la consideración de la zona afectada por el calor, ya que ella es asiento de transformaciones metalúrgicas que pueden comprometer seriamente el comportamiento mecánico de la soldadura.

En la zona inmediata adyacente a la de fusión, el metal base es llevado a temperaturas por encima a la línea A_3 del diagrama hierro-carbono.

Por lo tanto, en esa zona el material transforma totalmente a austenita con un crecimiento de grano que depende de las condiciones de enfriamiento.

En una zona más alejada de la de fusión, la

peratura alcanza apenas a superar la línea A₃ del diagrama, de modo que si bien habrá formación de granos de austenita, no habrá crecimiento de los mismos. Cuando la pieza se enfríe, quedará una estructura equiaxial de ferrita con carburos precipitados que es más refinada a medida que se aleja de la zona de fusión.

Dependiendo de las microestructuras o transformaciones obtenidas en soldadura, la unión soldada presenta cierta dilatación y contracción del material, la cual trae como consecuencia ciertas distorsiones de la pieza a soldarse. Como consecuencia de esto veremos en el siguiente tema sobre la distorsión de uniones soldadas y su control.

Distorsión y su Control

En los procesos de soldadura por fusión, se suministra calor al metal y lo dilata. Al retirar el calor, el metal y el aire que rodea la zona recalentada, la enfrían y el metal se contrae. (11).

Esta expansión y contracción, si no se regula, puede causar una deformación excesiva del metal.

Por otra parte si se restringe demasiado rígidamente la expansión y la contracción, pueden producir tensiones y flexiones severas que debilitan a la soldadura.

Existen tres reglas que ayudan a prevenir y controlar la deformación:

- 1.- Reducir las fuerzas constantes de la contracción.
- 2.- Utilizar las fuerzas que causan la contracción para reducir deformaciones.
- 3.- Equilibrar las fuerzas de la contracción por medio de otras fuerzas.

En general, cuando menos restringida esté una pieza durante la soldadura, mayor será la distorsión. Para minimizar la distorsión se puede proceder de la siguiente manera, tomando en consideración las tres reglas anteriores:

La preparación de los bordes en doble V o doble U son preferibles porque distribuyen las tensiones simétricamente. Además la simple U es más favorable que la simple V por la misma razón.

En general, la dirección de soldadura debe ser

desde el extremo restringido hacia el no restringido. Además, debe procurarse que la funsión sea lo más localizada posible evitando cordones gruesos que requieran gran cantidad de aporte y calor.

Estas reglas y recomendaciones son muy utilizadas en las prácticas de soldadura para construcciones soldadas.

2.4 Efecto de las variables de Soldadura al Arco sobre las propiedades finales de la unión soldada

La cantidad de calor generada durante la soldadura con arco eléctrico produce muchos fenómenos en el metal soldado tales como: distorsión, esfuerzos residuales, cambios metalúrgicos, modificaciones químicas y así sucesivamente; por lo tanto es necesario realizar un análisis de las condiciones térmicas durante la ejecución de una soldadura.

El arco eléctrico durante la soldadura actúa como una fuente de calor en movimiento sobre la superficie de la pieza a ser soldada, produciendo un ciclo térmico complejo en el área cercana al metal soldado. Los ciclos térmicos en la zona afectada por el calor del cordón soldado, re-

sultan de la rapidez de enfriamiento, la cual va a influenciar sobre el tipo de microestructura a ser formada; además, el cambio en las diferentes zonas del cordón soldado y las transformaciones a austenita, ejercen una gran influencia sobre las propiedades mecánicas de la unión soldada. Luego la rapidez de enfriamiento, entre dos parámetros, depende de las condiciones de soldadura, de esta manera, es necesario comprender la correlación del efecto de las técnicas de soldadura con las características de enfriamiento de la zona afectada por el calor, esto es si la soldadura a realizarse es de importancia.

Antes de analizar el efecto de los parámetros de soldadura sobre la rapidez de enfriamiento, se realizará un breve análisis del efecto de estos parámetros sobre la soldadura.

En la aplicación de la soldadura al arco, existen tres factores, los cuales controlan los resultados deseados; estos factores son: (15)

- 1.- Corriente de Soldadura I
- 2.- Voltaje de soldadura V
- 3.- Velocidad de avance S

La Figura N° 19 muestra el efecto de estas variables de soldadura sobre un cordón depositado, éstas son:

- A) La penetración de un cordón depositado sobre la superficie de una placa, que comprende la distancia que existe desde la superficie de la placa, hasta la parte inferior del cordón soldado.
- B) El área de la sección transversal, formada por la deposición del metal soldado representada por la letra A, y el metal base representado por la letra B.
- C) La relación que existe del metal base fundido al área total de la sección transversal del metal soldado, representado por $B/A + B$ y expresado como una relación o porcentaje, llamada dilución.

La selección de una técnica de soldadura para una aplicación particular, tiene que ver en primer lugar con la selección de la corriente de soldadura (I).

Cuando se produce un aumento en la corriente de

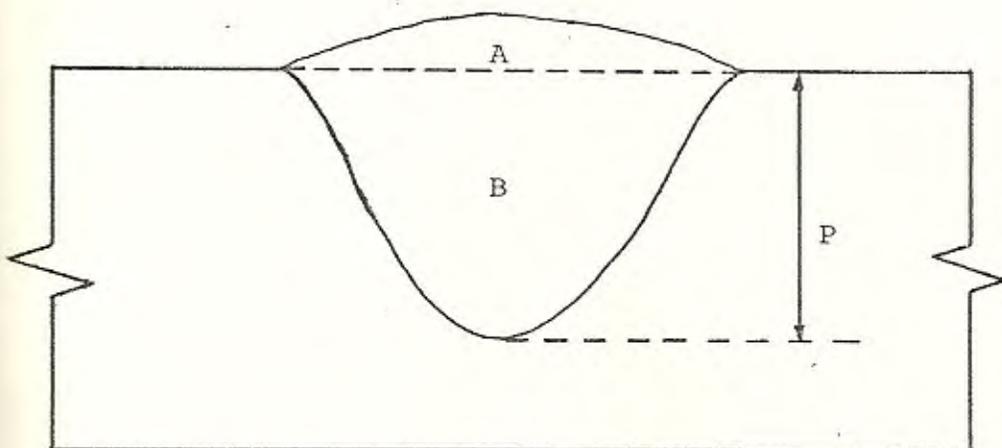


FIGURA N° 11

DEPOSICION DE UN CORDON DE SOLDADURA
SOBRE UNA PLACA PLANA (26)

- A Sobremonta
 B Metal Base fundido
 P Penetración



BIBLIOTECA DPTO. DE
 INGENIERIA MECANICA

$$\text{Razón de Fusión (dilusión)} = \frac{B}{A + B}$$

soldadura, se produce también un aumento de la penetración y un aumento en la rapidez de fundición del electrodo, como se muestra en la figura N^o 12 (15).

La deposición de un volumen de metal soldado en una junta en V está controlado por la velocidad de avance a lo largo de la junta con una rapidez de fundición conocida, el área de la sección transversal de la deposición del metal soldado puede determinarse por cualquier relación de corriente a velocidad de avance como se muestra en la figura N^o 25. Para altas eficiencias, la corriente y la velocidad de avance deben mantenerse en un máximo dependiendo del funcionamiento satisfactorio del proceso de soldadura. Los valores máximos de corriente y velocidad de avance producirán defectos de soldadura como morde - dura*, los mismos que se minimizan cuando se aumenta la corriente y la velocidad de deposición disminuye (15). La selección de un voltaje adecuado con respecto a la corriente de soldadura es importante en el sentido de realizar un

*

cordón de soldadura libre de defectos como mordedura.

La figura N° 13 muestra los límites para los valores de corriente de soldadura versus voltaje de soldadura aceptables para obtener cordones de soldadura libres de defectos.

La combinación del voltaje, corriente y velocidad de avance sobre la penetración está expresada por la siguiente ecuación:

$$P = C \sqrt[3]{I^4/S.V^2}$$

de donde: P = penetración

C = factor característico de cada proceso.

Como puede verse, las propiedades de la deposición de soldadura puede ser influenciada satisfactoriamente por una técnica de soldadura al arco usado durante la deposición, sin embargo, las variaciones en la técnica de soldadura pueden afectar la dilución, solidificación y procesos de transformación del metal soldado.

El efecto de los parámetros de soldadura sobre la rapidez de enfriamiento, será analizado a continuación:

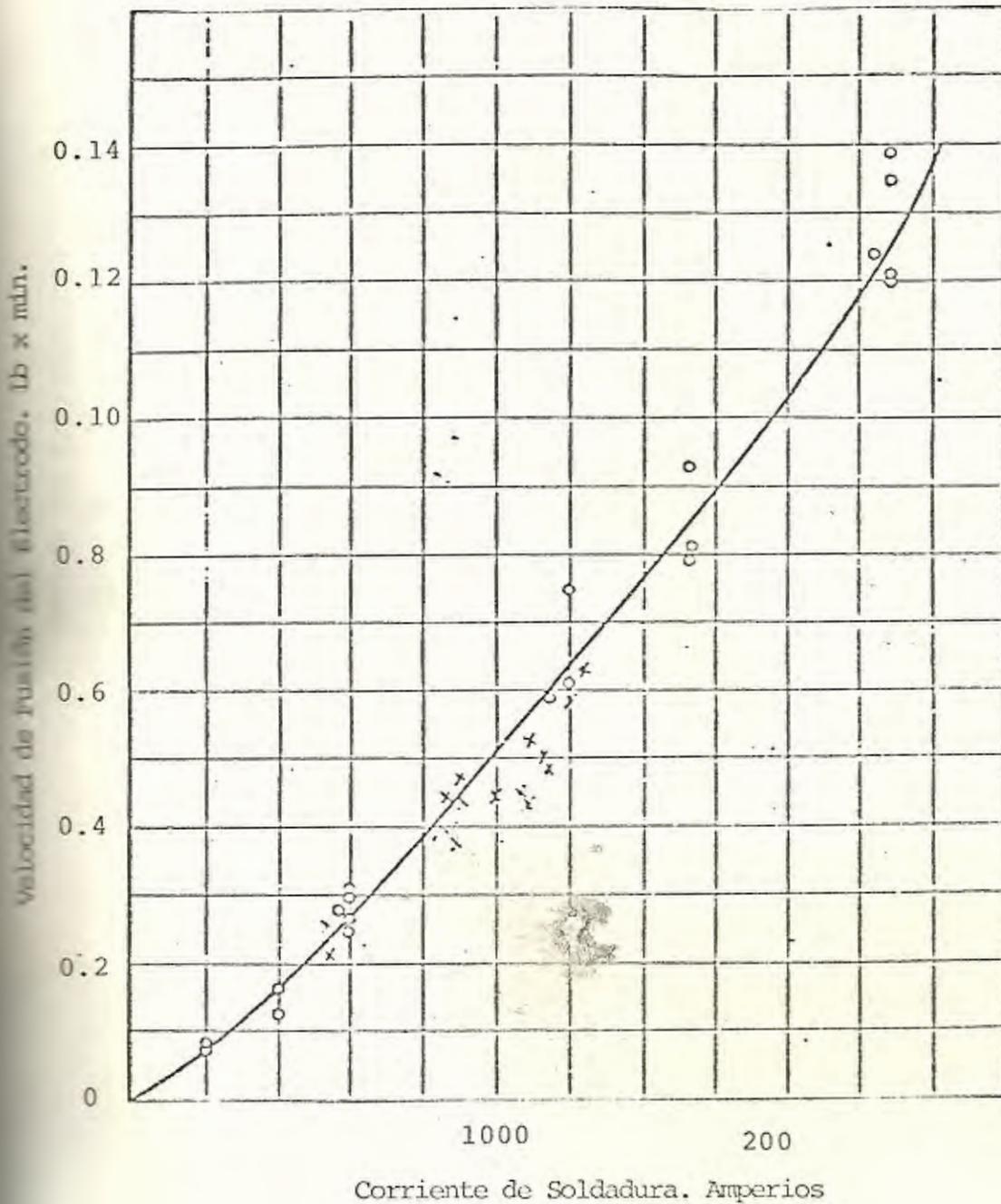


FIGURA N° 12

EFFECTO DE CORRIENTE DE SOLDADURA SOBRE LA RAPIDEZ DE FUSION DEL ELECTRODO USANDO FUNDENTE GRANULADO

(SILICATO DE CALCIO) EN EL PROCESO DE SOLDADURA AUTOMATICO (15)

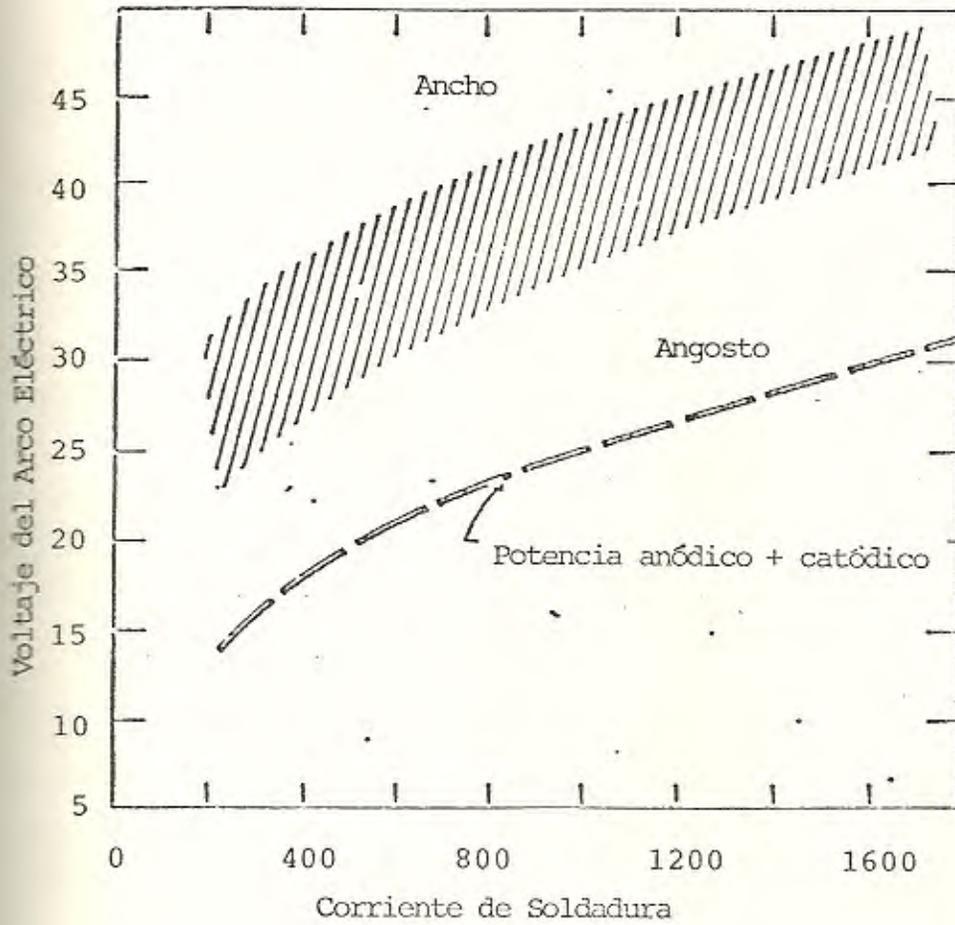


FIGURA N° 13

RANGOS DE VOLTAJE ACEPTABLES PARA VARIOS VALORES
DE CORRIENTE DE SOLDADURA (15)

El concepto de calor suministrado por el arco eléctrico es fundamental para el estudio de flujo de calor en la soldadura, principalmente desde el punto de vista de como la fuente de calor afecta el material a ser soldado.

El calor suministrado por el arco eléctrico, es la cantidad de energía por unidad de longitud de soldadura desde una fuente de calor en movimiento, tal como un arco eléctrico, expresada en joules/mm.

La energía suministrada es calculada a partir de la relación

$$H_{\text{neta}} = \frac{f_1 \times V.I}{S}$$

de donde: H_{neta} es la energía neta suministrada
 f_1 eficiencia de transferencia de calor aproximadamente 0.8

La función principal de la mayoría de las fuentes de calor es fundir el metal. La cantidad de metal que debe ser fundido para producir una determinada longitud de soldadura es dependiente del tamaño y configuración de la junta, el número de pases de soldadura usados, y el proceso de

soldadura.

Existe una cantidad de calor teórico específico (Q), requerido para fundir un volumen dado de metal (desde la temperatura ambiente), la cantidad Q es una propiedad del metal o aleación, y es obtenido por la suma de:

(1) el calor requerido para llevar al metal sólido al punto de fusión, y (2) el calor de fusión, que es el calor requerido para convertir el sólido a líquido en el punto de fusión (2)

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Una aproximación razonable de Q es:

$$Q = \frac{(T_f + 273)^2}{300.000} \text{ J/mm}^3$$

donde T es la temperatura de fusión en °C.

Tanto la energía neta suministrada como la cantidad de calor teórico específico (Q), son variables que aportan energía al metal soldado y de éstos dependen la rapidez de enfriamiento. Para controlar los efectos metalúrgicos en la soldadura, se deberán establecer las condiciones térmicas en el metal soldado y cerca de éste (zona

afectada por el calor), además de lo siguiente:

- 1) La distribución de la temperatura máxima en la zona afectada por el calor.
- 2) La velocidad de enfriamiento en el metal soldado y en la zona afectada por el calor, y
- 3) Velocidad de solidificación del metal soldado.

Para predecir o interpretar transformaciones metalúrgicas en un punto del metal base cerca de una soldadura, se requiere algún conocimiento de la temperatura máxima alcanzada en ese punto del metal base.

La distribución de la temperatura máxima en el metal base adyacente a la soldadura está dada por la fórmula (10)

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4.13\rho C_t y}{H_{neta}} + \frac{1}{T_f - T_o}$$

T_p = temperatura máxima, °C a una distancia Y (mm.) de la línea de fusión.

(La ecuación para T_p no se aplica a puntos dentro del cordón soldado, sino solamente en la

parte adyacente de la zona afectada por el calor).

T_0 = temperatura uniforme inicial, °C de la pieza a soldar

T_f = Temperatura de fusión °C. (Temperatura del líquido y del metal a ser soldado).

= Densidad del material a soldarse, g/mm

C = Calor específico del metal sólido, J/gr°C

= Calor específico volumétrico, J/mm °C

t = espesor de la pieza en mm.

Esta ecuación puede ser usada para varios propósitos entre los cuales tenemos:

- 1) La determinación de T en una localización específica en la zona afectada por el calor.
- 2) Estimar el ancho de la zona afectada por el calor.
- 3) Mostrar el efecto del precalentamiento sobre el ancho de la zona afectada por el calor.

Como se indicó anteriormente, el área en las partes adyacentes del arco eléctrico está sujeto a ciclos térmicos complejos, en el cual se involucra la temperatura inicial de la pieza a soldar.

Después que el metal de aportación ha sido fundido, la rapidez de enfriamiento en la zona afectada por el calor determina el tipo de microestructura y consecuentemente las propiedades mecánicas finales a obtenerse. Como puede verse, este proceso muestra la importancia de relacionar la técnica de soldadura con la razón de enfriamiento alrededor del cordón soldado. Luego la energía suministrada y la rapidez de enfriamiento pueden ser controlados ajustando las técnicas de soldadura para un acero dado. De esta manera será posible establecer un método para predecir la rapidez de enfriamiento (y consecuentemente las propiedades mecánicas).

El método más común de controlar la rapidez de enfriamiento es regulando la energía desarrollada en el arco eléctrico por unidad de longitud. Esta energía desarrollada en el arco eléctrico considerada como una fuente de calor puede ser calculada para determinar la rapidez de enfriamiento y esta energía H , es usualmente calculada en unidades de energía por pulgada lineal de soldadura.

En términos de condiciones de soldadura:

puede ser un factor que controla las propiedades mecánicas uniformes en el metal soldado

De los conceptos que se han presentado se establece una relación entre el área de la sección transversal y la rapidez de enfriamiento; además se puede expresar una relación entre el área de la sección transversal del cordón soldado y las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor y el metal soldado. Con una aplicación adecuada del concepto del área de la sección transversal, es posible establecer relaciones las cuales informarán sobre el control de propiedades mecánicas en soldadura. También puede establecerse un límite sobre los parámetros de soldadura. Estos conceptos proveerán técnicas para la obtención de propiedades mecánicas y así proveerá un método de control básico de calidad especialmente para procesos de soldadura manual con electrodo revestido.

DIFERENTES PROCESOS DE SOLDADURA

La soldadura por arco ocupa un gran campo dentro de los procesos de soldadura; la figura N° 15 detalla la variedad existente, los cuales se describen a continuación:

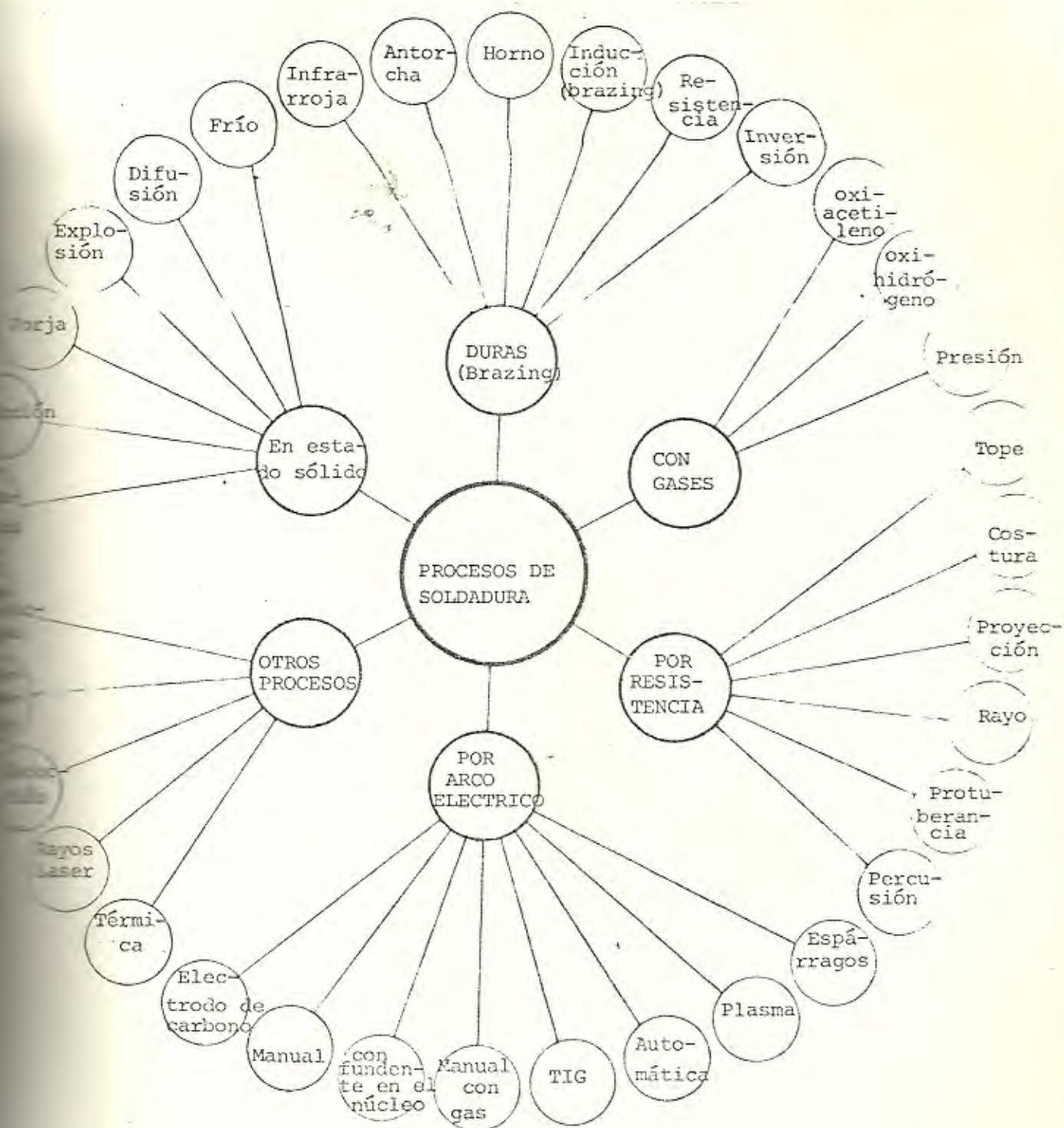


FIGURA Nº 15

CARTA GENERAL DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA

1.- Soldadura al Arco con electrodo sin revestir; en este tipo de soldadura se obtienen deposiciones de baja calidad, presentando las siguientes desventajas:

- se pierden elementos aleantes,
- se produce una defectuosa geometría del depósito,
- existe tendencia a la formación de porosidades,
- se obtienen soldaduras sumamente frágiles.

2.- Soldadura al Arco con gas protector: Se conocen tres tipos de soldadura con gas protector cuyos nombres se abrevian de la siguiente manera TIG, MIG y MAG; el primero usa un electrodo de tungsteno no consumible que sirve solamente para formar el arco eléctrico, mientras que por otro lado se aplica el material de aportación en presencia de una atmósfera inerte compuesta de Argón ó Helio. La figura N° 15 muestra una pistola porta-electrodo de tungsteno y partes principales de este proceso.

Este proceso de soldadura se usa para soldar aceros inoxidable y materiales no ferrosos como

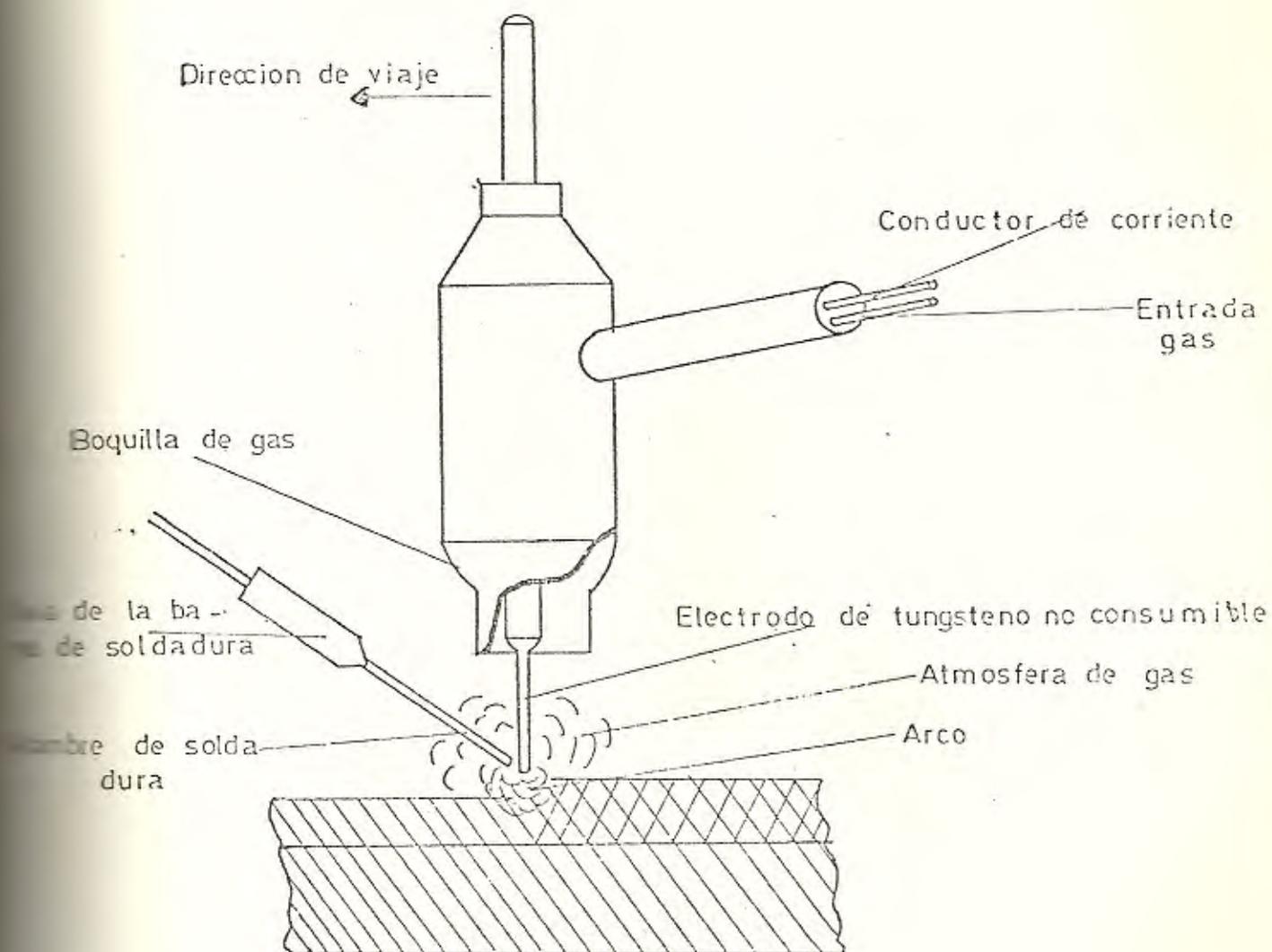


FIG. 15.- SOLDADURA AL ARCO CON GAS PROTECTOR

también aceros al carbono, y es ampliamente aplicado cuando la soldadura a obtenerse exige un alto grado de calidad.

Los procesos de soldadura MIG y MAG se han desarrollado basados en la teoría de utilizar un alambre desnudo para eliminar el revestimiento de los electrodos, el mismo que debe cumplir varias funciones importantes (5), tales como las que siguen:

- 1.- Producen un gas de protección en el área del arco.
- 2.- Facilitan la estabilización del arco de soldadura.
- 3.- Producen limpiadores o desoxidantes del charco de soldadura.
- 4.- Producen elementos de aleaciones para ser depositados en el metal de soldadura.

Se consideró que estas funciones tenían que ser incluidas en el proceso de soldadura MIG para obtener resultados satisfactorios. Los procesos MIG y MAG ofrecen estas funciones en diferentes formas, para lograr las cuatro funciones se utiliza un gas inerte (MIG) o activo (MAG) el mismo

que protegerá al arco eléctrico de elementos extraños o dañinos al cordón de soldadura.

La figura N^o 16 muestra una pistola de soldar con el proceso MIG, la misma que indica las partes más importantes del proceso como electrodo, entrada de gas, guía y atmósfera gaseosa.

Este proceso tiene muchas ventajas cuando se compara con otros procesos de soldadura de fusión por arco, tales como la soldadura normal con arco eléctrico, soldadura con arco sumergido, soldadura automática con electrodo compuesto y la soldadura con tungsteno y arco eléctrico. Este y otros procesos de soldadura tienen aplicaciones particulares, dependiendo del objeto o propósito del trabajo a realizar.

Dentro de los diferentes procesos de soldadura indicados en la figura N^o 15 también existen los procesos de soldadura en estado sólido, por resistencia, soldadura con gas (oxi-acetileno), soldadura de baja resistencia (Brazing) y otros procesos como: soldadura producida por un haz de electrones, de electroescoria, por inducción, soldadura con un haz de rayos laser, entre otras.

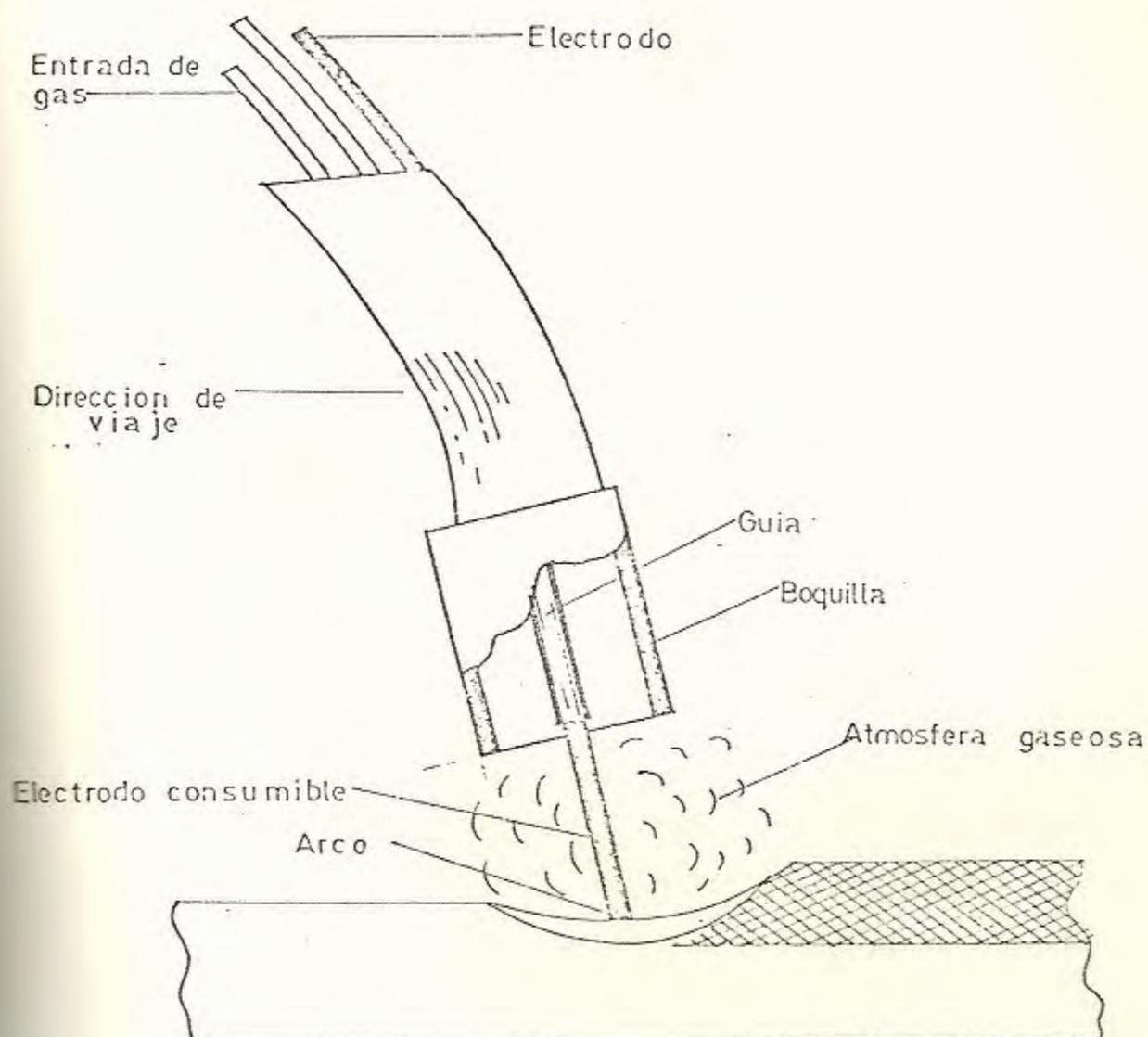


FIG. 16.- SOLDADURA AL ARCO EN UN PROCESO MIG

2.5 Estudio de los Procesos de soldadura aplicables a los aceros estructurales

Según la clasificación de procesos indicados en la figura N° 15, el proceso de soldadura por arco eléctrico es el más utilizado para soldar aceros estructurales de espesores comprendidos entre 3/32 plg y 1 plg. Para esto el proceso de soldadura manual con electrodo revestido (SMAW) y el proceso de soldadura automática con arco sumergido (SAW) son los que más se utilizan para soldar aceros estructurales de baja aleación y alta resistencia. Los otros procesos también se utilizan pero con muchas limitaciones.

Los factores que determinan la selección de un proceso de soldadura pueden clasificarse en dos categorías: aquellos que determinan el acabado final de una estructura, tales como ductilidad, propiedades de tensión, resistencia a la corrosión y facilidades de tratamientos térmicos, y aquellos factores que están definidos por las consideraciones prácticas de fabricación, tales como tamaño de soldadura, limitaciones de

equipo, posición de soldadura, longitudes soldadas, continuidad de soldadura y costo.

Luego, el objetivo de este trabajo es mantener buenas propiedades mecánicas después de soldar; cualquier proceso de suministro de calor será eliminado porque no se podría mantener las propiedades de ductilidad de una unión soldada.

Los siguientes procesos de soldadura al arco eléctrico han sido considerados más aplicables:

Proceso de Soldadura Manual con Electrodo Revestido.

Es uno de los primeros procesos de soldadura que se desarrolló en la industria, es simple, y quizás el más difundido para soldar piezas ferrosas. Este método utiliza un electrodo forrado que consiste de un alambre cubierto por una caja de silicato y otros materiales que entran en forma granulada, tales como: fluoratos, carbonatos, óxidos, aleaciones metálicas y celulosas.

Todos estos elementos son extruidos y horneados, produciendo una hermética cubierta concéntrica que sirve para estabilizar el arco, suministrar

al mismo una atmósfera apropiada mediante la generación de gases, material de aporte y formación de escoria.

El electrodo es sujetado a un porta-electrodo que está conectado a una fuente de poder por medio de cables apropiados. El arco eléctrico se inicia al hacer contacto el electrodo con el metal base en la parte donde se quiere soldar. El calor del arco derrite la junta del electrodo, el fundente o revestimiento y el metal base, formando una aleación que es el cordón de soldadura.

La figura N^o 17 muestra una costura de soldadura efectuada con electrodo revestido, en la que se aprecia el alambre electrodo y el revestimiento o cubierta, además una caja de escoria producida por la solidificación de los elementos del revestimiento después de fundidos.

El arco eléctrico formado entre el electrodo y el metal base desarrolla temperaturas hasta de 600°C con lo cual pueden fundirse fácilmente los metales.

Este proceso de soldadura dispone de los si-

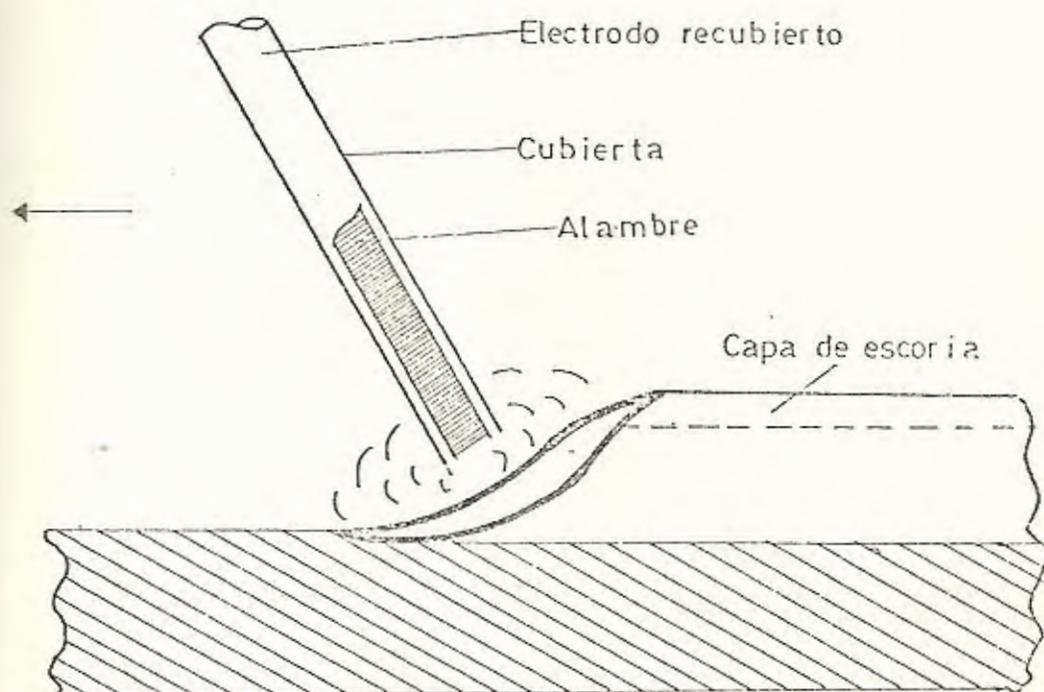


FIG. 97.- SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO

guientes elementos:

1. toma corriente de la red o motores de combustión interna.
2. cables
3. equipo de soldar, transformadores o generadores.
4. pinzas o grapas para tierra y porta-electrodo.

Dentro de las máquinas de soldar se tiene transformadores o rectificadores, además de máquinas con motor de combustión interna y generador, los mismos que tienen la ventaja de ser utilizados en lugares donde no exista corriente eléctrica.

Procesos de Soldadura Automática con Arco Sumergido (SAW).

Este proceso de soldadura es uno de los más difundidos universalmente.

El mismo es un proceso automático en el cual según se indica en la figura N° 18 un alambre desnudo es alimentado hacia la pieza.

Este proceso tiene la características de que el arco eléctrico se mantiene sumergido en una ma-

Dirección de viaje ←

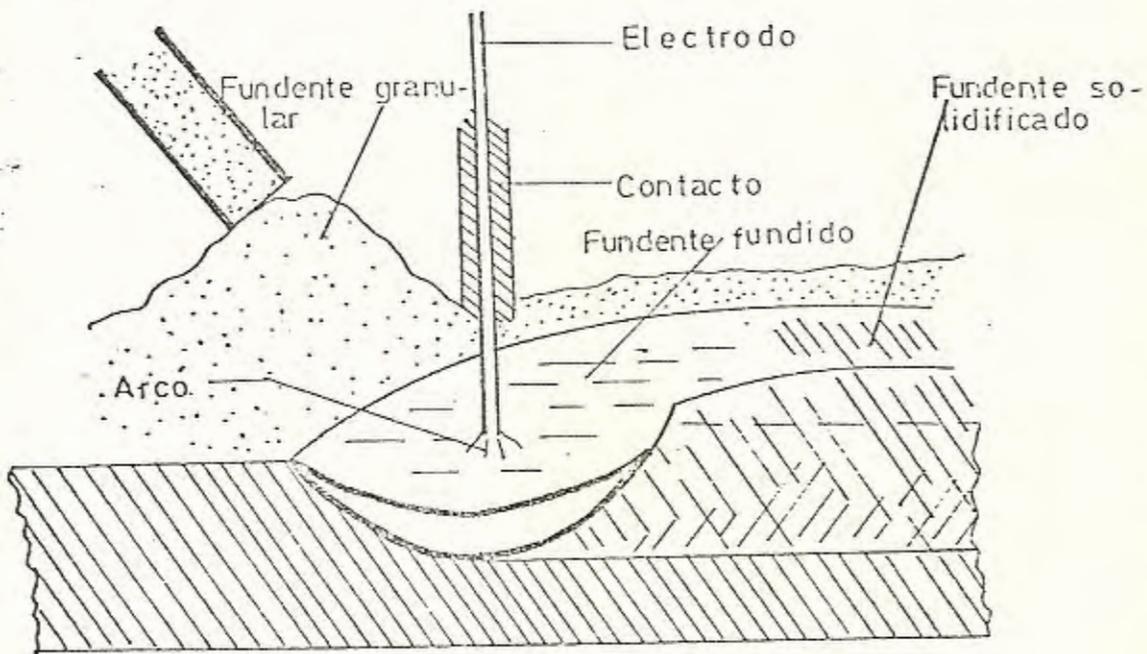


FIG. 18.- PROCESO DE SOLDADURA AL ARCO SUMERGIDO

sa de fundente que es provisto desde una tolva que se desplaza delante del electrodo. De esta manera el arco eléctrico resulta invisible, lo que constituye una ventaja, pues evita el empleo de elementos de protección contra la radiación infrarroja y ultravioleta, que son imprescindibles en otros casos.

Las corrientes utilizadas en este proceso varían en un rango que va desde los 200 hasta los 2000 amperios, y los espesores que es posible soldar varían entre 5 mm y hasta más de 50 mm en una sola pasada.

Este proceso se caracteriza por sus elevados regímenes de deposición y es normalmente empleado cuando se trata de soldar grandes espesores de acero al carbono o de baja aleación.

Debido a la automatización aplicada a este proceso es fácil de controlar los parámetros variando las condiciones de soldadura en las perillas correspondientes de voltaje, amperaje y velocidad de avance, como también se puede variar el diámetro del alambre y el tipo de fundente.

Este método puede usar corriente alterna o directa, prefiriéndose la directa con polaridad inversa para obtener una mayor penetración. En la actualidad se han desarrollado numerosos equipos de arco sumergido, usando electrodos múltiples, electrodos precalentados, con el fin de aumentar la velocidad de deposición. Debido a que el fundente granulado necesita cubrir el arco, este proceso es eficiente sólo para soldaduras de tipo plano y horizontal



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERÍA MECÁNICA

C A P Í T U L O I I I

TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1 PLANIFICACION DEL TRABAJO DE LABORATORIO

Las probetas de ensayo fueron preparadas bajo condiciones de ejecución controladas con equipos de soldadura automática y pre-seleccionando una técnica de soldadura: la primera serie de probetas consistió en depositar cordones de soldadura sobre la superficie de una placa. Esto es para obtener información de la influencia de la técnica de soldadura cuando se usen los procesos de soldadura manual y automático sobre las propiedades mecánicas de la unión soldada, como también para relacionar la influencia del área de la sección transversal del cordón depositado sobre la dureza máxima alcanzada en la línea de interface.

La segunda parte del trabajo experimental consistió en la preparación de seis ensambles mecánicos, preparados mediante la técnica de soldadura de múltiples pases, para obtener información sobre la influencia

del área de la sección transversal sobre las propiedades mecánicas. De las probetas de tensión se obtuvo el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo de tensión a la rotura de la unión, la elongación, dureza y la energía absorbida en los ensayos de impacto (Charpy-V-notch).

Las probetas macroatacadas, probetas para ensayo de doblado de cara y de raíz, y las probetas para ensayo de impacto fueron obtenidas cortando y maquinándolas desde los ensambles mecánicos de prueba, los mismos que fueron preparados usando una técnica de soldadura de múltiples pases con los procesos de soldadura manual y automático.

Las probetas fueron clasificadas de la siguiente manera:

	P R O C E S O S *	
	Manual	Automático
Deposición de un cordón de soldadura sobre una placa	10x	10y
Ensayo de Tensión	1x	7y
Ensayo de doblado de cara	2x	1w
Ensayo de doblado de raíz	20x	10w
Ensayo de Impacto	100xx	100yy
Probetas mecánicas para micrografías	xxx	yyy

* Manual = Proceso de electrodo revestido

Automático = Se refiere a proceso de soldadura con arco sumergido.

Se espera que con los resultados de este trabajo experimental será posible establecer relaciones que proveerán técnicas de fabricación para la obtención de propiedades mecánicas deseadas.

3.2 SELECCION DE METAL BASE, MATERIAL DE APORTE, PROCEDIMIENTO Y EQUIPO A UTILIZAR

El material utilizado en este trabajo fue el acero estructural para recipientes de presión de bajo contenido en carbono, cuya especificación es ASTM a 283°C en placas de 7/16 y 5/8 plg de espesor. (10)

La composición química y propiedades mecánicas las provee el fabricante y se muestra en la sección 2.1.

Como metal de aportación se utilizó electrodos E-6013 de 1/8, 5/32 y 3/16 plg de diámetro, marca con el nombre comercial OK 43-32. Estos electrodos tienen un recubrimiento con una mezcla de minerales y son del tipo rutílico. Las propiedades mecánicas y químicas típicas del depósito de soldadura se muestran en la Tabla N^o 12.

El alambre electrodo para arco sumergido fue una combinación alambre de 4mm de diámetro con fundente F62EL12, fabricado por KOBE bajo el nombre comercial US-36. Las propiedades mecánicas y químicas típicas se encuentran

en la Tabla N^o 13

Los procesos de soldadura manual y automático con arco sumergido fueron los seleccionados para este trabajo de investigación.

La siguiente lista detalla los equipos empleados durante este trabajo:

A) Para proceso manual

1. Máquina de soldar Hobart. Modelo M-250 de 250 amperios. 220 - 3 ϕ genera corriente continua.
2. Torno Universal marca: South-Bend, Tipo A con adaptación de carro transversal para porta-probetas.
3. Medidor de amperaje y voltaje (multímetro) Marca: Simpson.
4. Medidor de voltaje marca: Simpson con rango de voltaje 0-100 volts. para corriente continua.

B) Para proceso automático con arco sumergido

1. Máquina automática de soldar marca ESAB tipo IAD800 de 200 volts. 3 ϕ como fuente de poder (Fig. N^o 1)
2. Cabezal A6S con carrete porta-alambre, depósito de fundente y controles automáticos de velocidad, amperaje y voltaje del arco eléctrico.

T A B L A N° 12

PROPIEDADES MECANICAS Y QUIMICAS TIPICAS
DEL DEPOSITO DE SOLDADURA DEL ELECTRODO E6013

<u>Propiedades Químicas</u>		
<u>Elemento</u>	<u>AWS</u>	<u>ESAB</u>
Carbón (%)	0.08	0.1
Manganeso (%)	0.90	1.2
Azufre (%)	0.02	-
Silicio (%)	0.60	0.4
Cromo (%)	0.10	-
Níquel (%)	0.05	-
Molibdeno (%)	0.03	-
Vanadio (%)	0.01	-
<u>Propiedades Mecánicas</u>		
	<u>AWS</u>	<u>ESAB</u>
Esfuerzo de tensión (Kg-lb/plg ²)	60-70	54-60
Esfuerzo de fluencia (Kg-lb/plg ²)	55	46-52
Elongación 2 plg (%)	17	25-30
Reducción de área (%)	55-75	-
Valores de impacto (Charpy-V-notch) pie/lb		
0°F	46	70
-20°F	26	
-40°F	20-50	

T A B L A N° 13

Comparación de las propiedades Mecánicas y Químicas entre el material de aportación con especificación AWS (F62EL12) con las especificaciones Kobe Steel para soldadura automática con arco sumergido.

<u>Propiedades Químicas</u>		
<u>Elemento</u>	<u>AWS</u>	<u>KOBE STEEL</u>
Carbono	0.07 a 0.15	0.10
Manganeso	0.35 a 0.60	0.142
Silicio	0.05	0.80
Fósforo	0.03	0.013
Azufre	0.035	0.011
Cobre	0.30	-
Níquel	-	-
Cromo	-	-
<u>Propiedades Mecánicas</u>		
	<u>AWS</u>	<u>KOBE-STEEL</u>
Esfuerzo de tensión (lbs/plg ²)	62.000 a 80.000	50.000 a 65.000
Esfuerzo de fluencia (lbs/plg ²)	50.000	48.000
Elongación en 2 plg (%)	22	27
Reducción de área (%)	-	-
Valores de impacto (lbf x pie)		
0°F	20	50
-20°F	20	-
-40°F	20	-

Control de velocidad para alimentación de alambre electrodo

Características del cabezal A6S:

- Intensidad de corriente de soldeo con arco sumergido y/o MIG, MAG de 1500 Amperios como máximo de corriente continua o corriente alterna.
- Velocidad del alambre: 0.1 a 4.1 mt/min.
- Capacidad de porta-bobina: 30 Kg máximo
- Dispositivo de rotación: sobre 360°

La fotografía N° 1 nos muestra el equipo completo de sistema automático de soldeo.

C) Otros Equipos

1. Equipos de máquinas-herramientas de talleres mecánicos de ESPOL como:
 - Sierra mecánica
 - Fresadora Universal
2. Equipo para ensayo de doblado marca Versatester 30 M. de 30.000 lbs a 60.000 lbs. Se muestra en la Fotografía N° 2.
3. Equipo para ensayo de dureza marca AMETEK serie 106-8, modelo N° AK-8; se muestra en la fotografía N° 3.
4. Equipo de cortar oxi-acetileno marca VICTOR con

boquilla N° 2.

5. Equipo de Radiografía Industrial de las siguientes características:

GAMMA INDUSTRIES

IROTOPE: Ir 192 CURIES-110

S/M 98.011 MOD. N° A-2-A

Date: 1-21-81

Este equipo se muestra en la fotografía N° 4, en la que puede verse los cables de mando con un terminal de manivela (A), un container para fuente radioactiva (B) y un cable flexible para dirigir la fuente hacia el lugar de inspección (C).

6. Equipos de Pulido

- Para pulido grueso se efectúan en mesas de pulido suministradas por la casa Handimet, comenzando con las tiras abrasivas de grano más grueso, la # 200 y continuando de manera ascendente con la # 320, 400 y finalmente con la # 600.
- Pulido final-Electrolítico, realizado con el equipo marca LECTROPOL y reactivos químicos adecuados para pulir y atacar aceros. Este equipo dispone de controles para electrolito, velocidad de flujo, corriente de pulido y

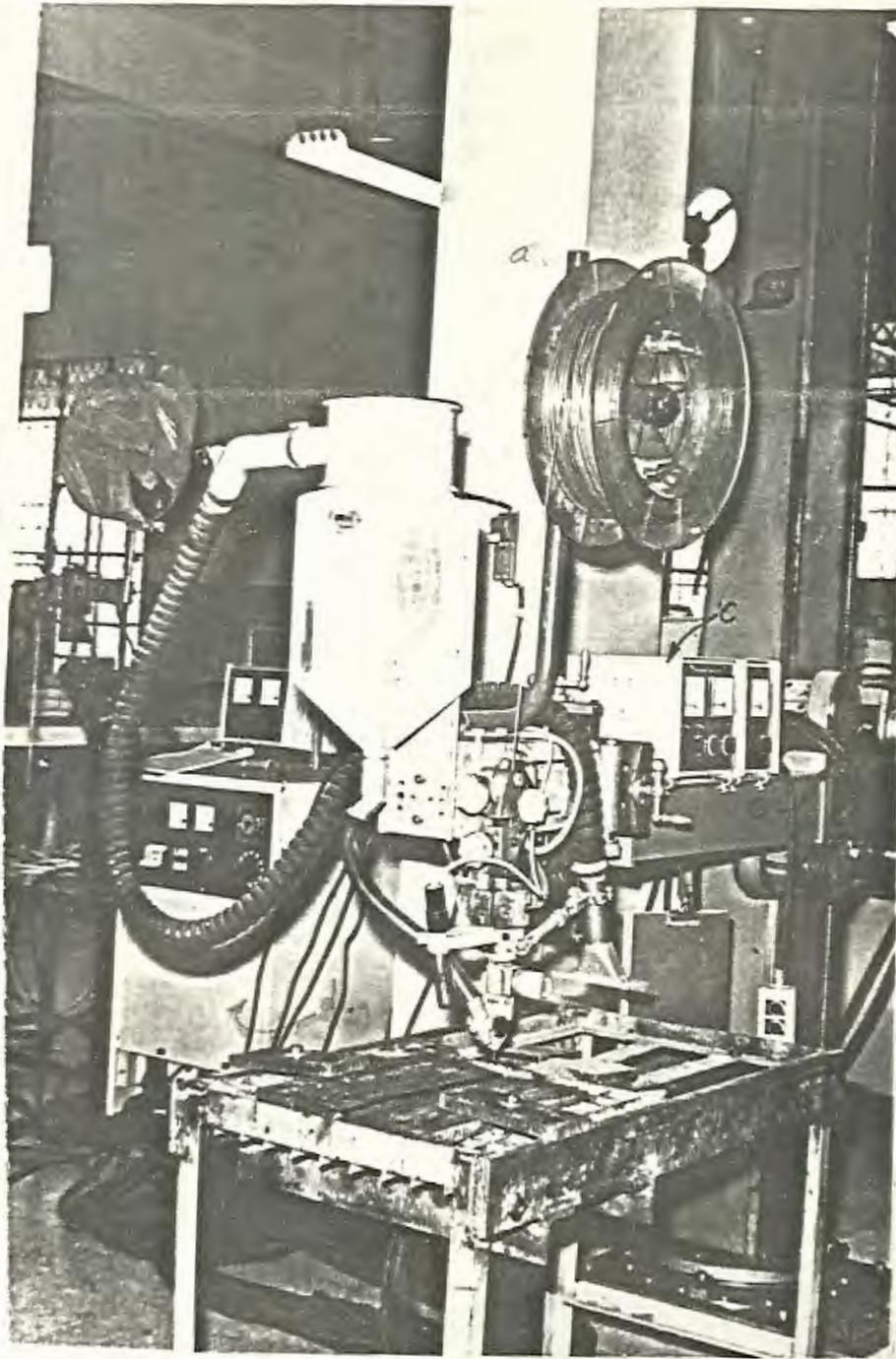
tiempo de pulido.

TECNICA OPERATIVA

Después de la planificación del trabajo de investigación en el que se analizó en forma general las partes en que consiste el trabajo experimental, se tratará a continuación los pasos seguidos para la elaboración de probetas, tanto del ensayo de un cordón depositado sobre una placa como de los ensambles mecánicos, con los procesos de soldadura manual y automática.

Proceso de soldadura manual

Para este proceso de soldadura, se prepararon diez probetas de planchas de 4 plg por 8 plg como se muestra en la figura N^o 19, sobre la cual se depositaron cordones de soldadura con diferentes parámetros de soldadura como se muestra en la Tabla N^o 14 . Estas probetas matrices son las que se han preparado para hacer ensayos de dureza y análisis metalográficos. Posteriormente, de estas probetas soldadas se cortaron con sierra mecánica probetas pequeñas transversales al cordón de soldadura de 1 plg de ancho por 2 plg de largo dejando el cordón depositado en la mitad de la probeta, para obtener mejores informaciones de microdureza y microestructura en las tres zonas del cor-



FOTOGRAFIA N° 1

EQUIPO PARA SOLDADURA AUTOMATICA
CON ARCO SUMERGIDO

Se aprecian los siguientes elementos:

- | | |
|---|----------------------------|
| a) electrodo continuo | d) fuente de poder |
| b) tolva para fundente | e) suministro de corriente |
| c) controles de corriente, voltaje y velocidad. | f) cables de tierra |

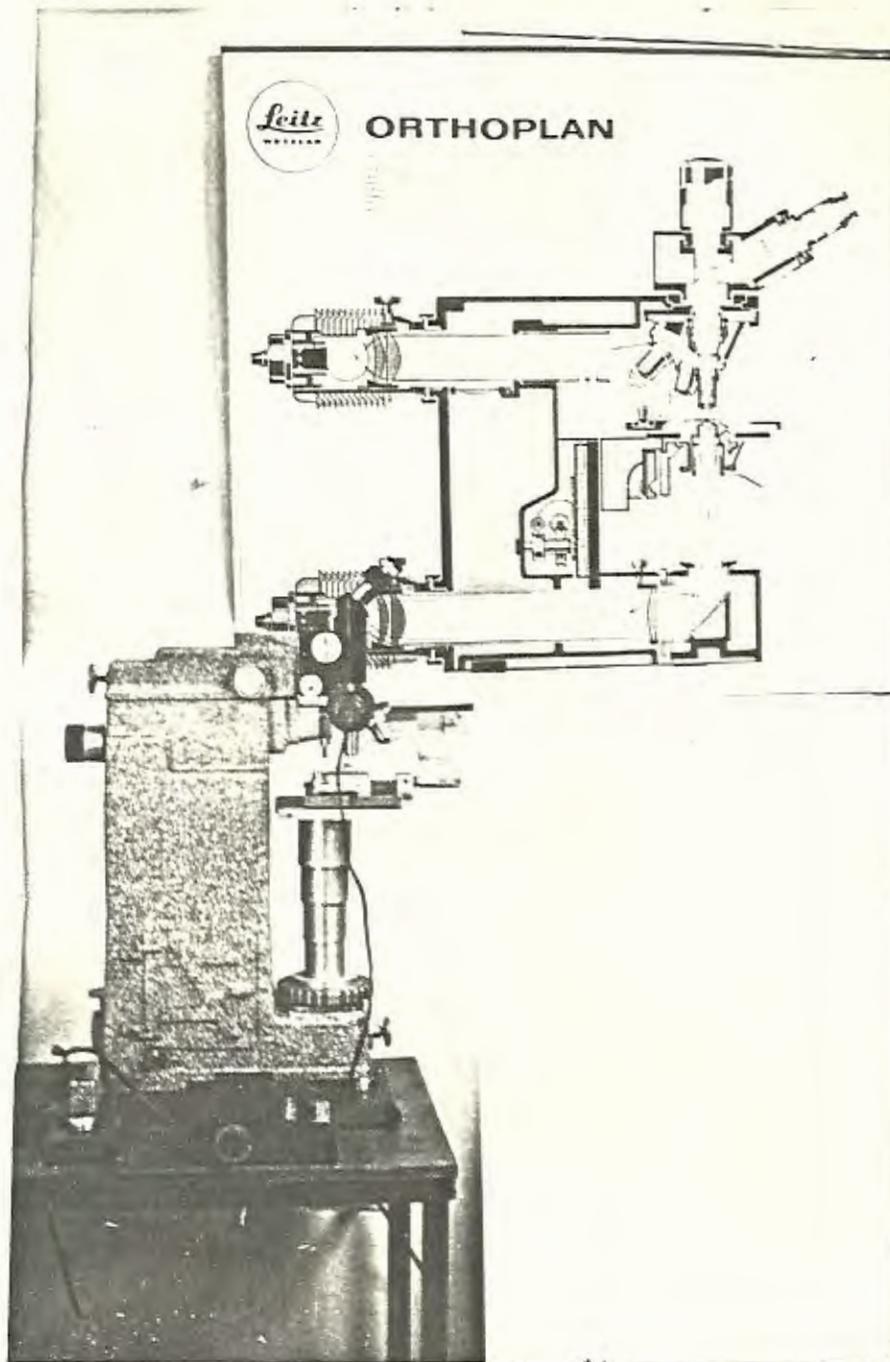


FOTOGRAFIA N° 2

EQUIPO PARA ENSAYO DE DOBLADO

Marca: Versatester 30M

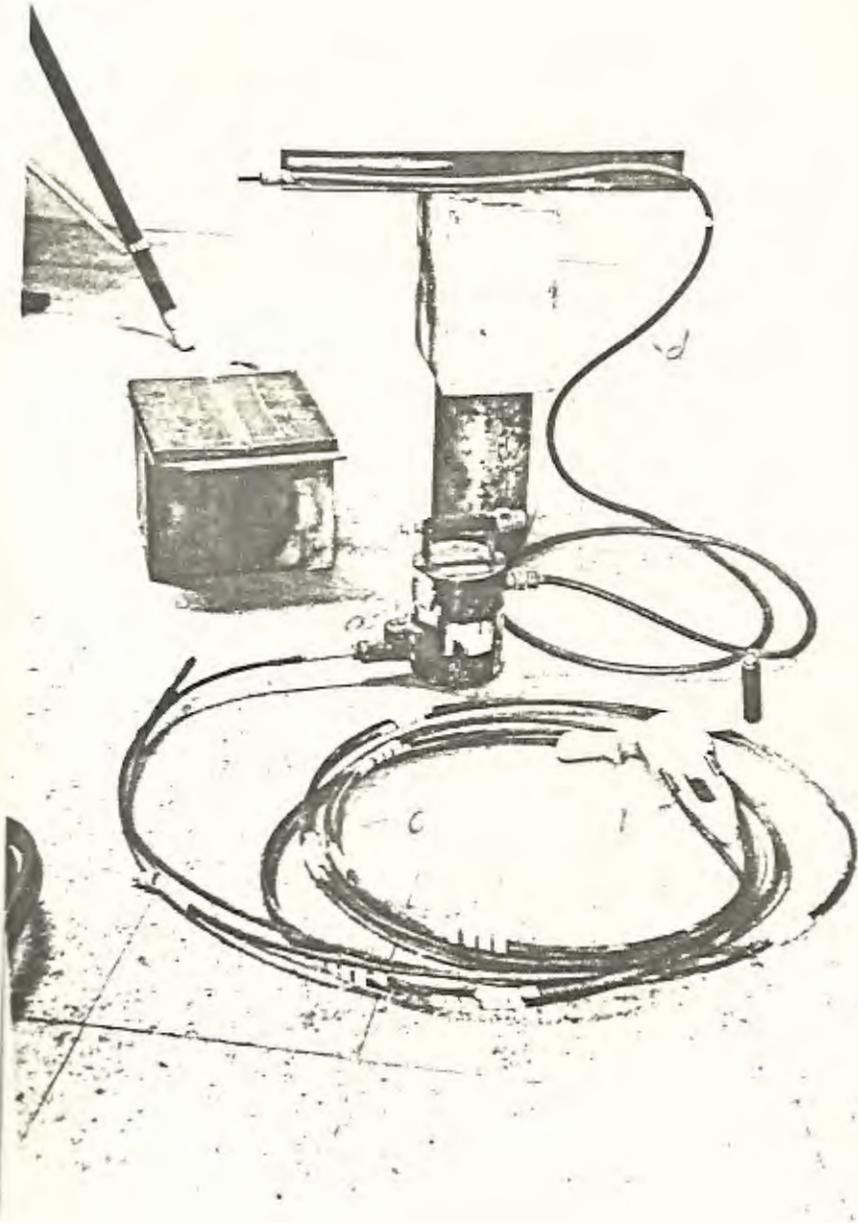
de 30.000 lbs y 60.000 lbs



FOTOGRAFIA N^o 3

EQUIPO PARA ENSAYO DE MICRODUREZA KNOOP

Marca: AMETEK
Serie: 106-8
Modelo: AK-8

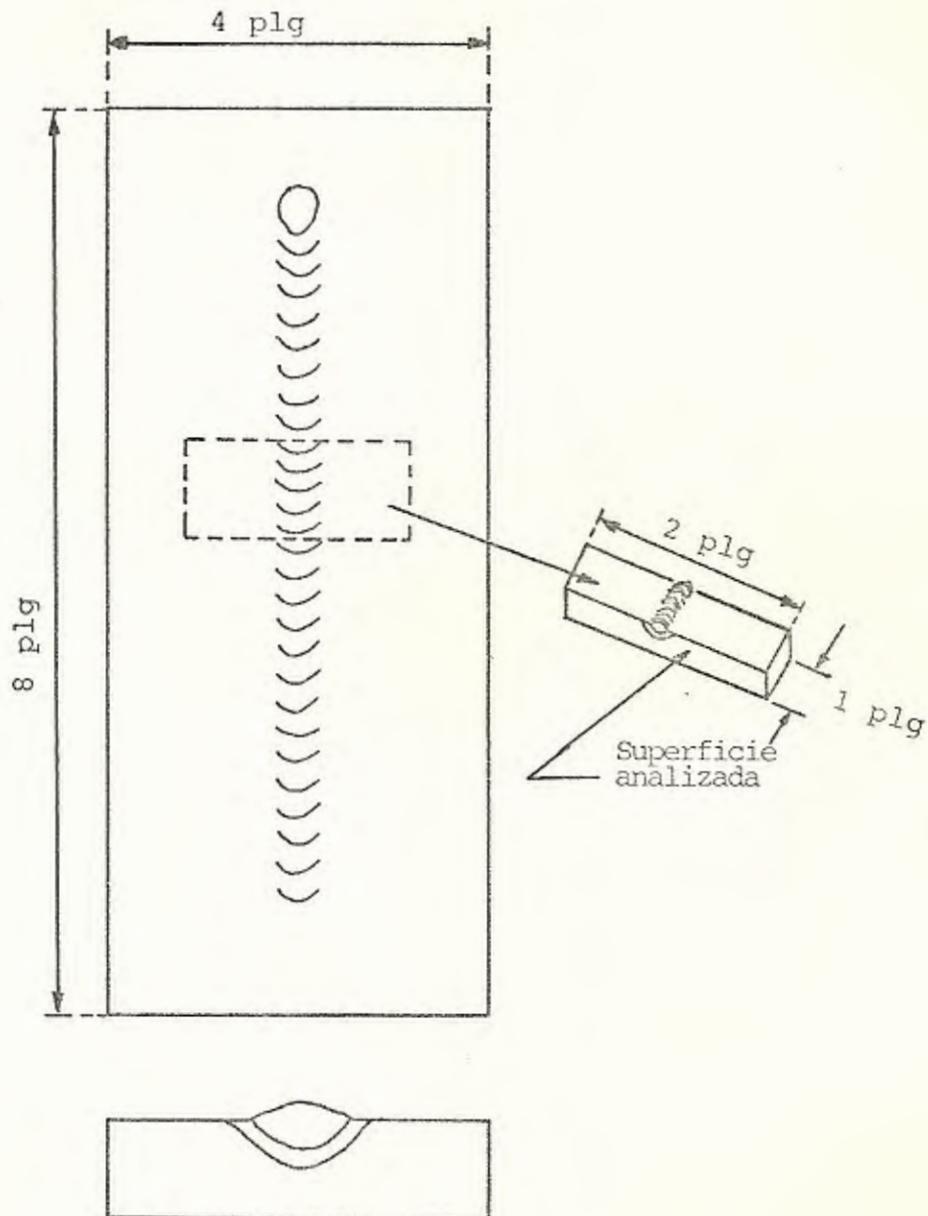


FOTOGRAFIA N° 4

EQUIPO DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Se aprecian los siguientes elementos:

- a. container con fuente radiactiva Iridio 192 Mod. N° A-2-A S/N 98011
- b. unidad de mando mecánico
- c. fundas por las que se desplazan los cables de la unidad de mando mecánico.
- d. manguera flexible para posicionar la fuente radiactiva en el lugar de trabajo.

FIGURA N^o 19

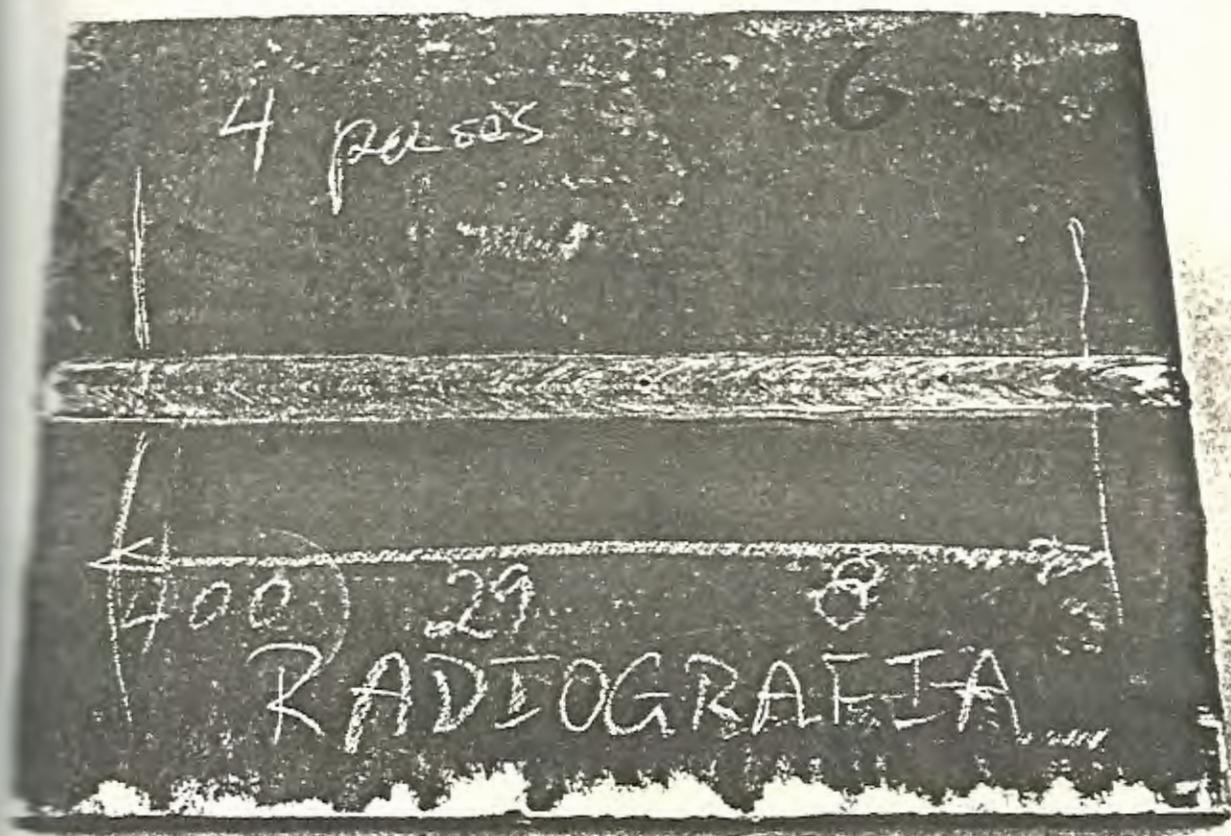
PROBETA DE UN CORDON DEPOSITADO SOBRE
UNA PLACA PARA PRUEBA DE DUREZA Y
SOLDABILIDAD

dón depositado.

Los ensambles mecánicos para este proceso de soldadura, se obtuvieron preparando acero en estudio de 3 plg de ancho por 12 plg de largo con uno de los lados viselados a 30° . Este visel se realizó cortando con el proceso oxi-acetilénico un borde la platina con la inclinación aproximada de 30° , después se esmeriló y eliminó toda clase de impurezas y óxidos producto del corte con acetileno. El espesor eliminado fue de alrededor de 3.2 mm para obtener unas superficies a unir libres de impurezas y de microestructuras no deseables.

La fotografía N° 6 muestra un ensamble mecánico realizado al unir dos platinas como las explicadas anteriormente con junta a tope y en V. Estos ensambles mecánicos se realizaron aplicando los parámetros de soldadura que se muestran en la tabla N° 18. De estos ensambles mecánicos se obtuvieron probetas individuales para los ensayos respectivos de tensión, doblado de cara y de raíz como también para ensayos de impacto.

En vista de la necesidad de controlar estrictamente los parámetros de soldadura, objeto de este estudio, se acordó realizar una serie de juntas preliminares para establecer de la mejor forma posible los valores



FOTOGRAFIA N° 5

PROBETA DE ENSAMBLE MECANICO

- Se ha realizado el mismo diseño de junta para los dos procesos de soldadura (SAW).

de: corriente, voltaje y velocidad de avance del arco eléctrico. Para ésto se adaptó de un mecanismo transportador al carro transversal del torno universal South-Bend, tipo A, el cual dotaba de movimiento controlado la pieza de trabajo a soldarse.

Su funcionamiento fue como a continuación se indica:

Según se muestra en la figura N° 20 , el sistema adaptado para elaborar las probetas matrices con el proceso de soldadura manual, se acordó proveer de movimiento la pieza de trabajo (B) en cualquiera de los sentidos (C) indicados en la figura. Una vez instalado este mecanismo, primeramente se regularon los valores de corriente del arco eléctrico y velocidad de avance de la pieza de trabajo, para luego de pre-fijar estos valores se procedió a formar el arco eléctrico, momento en el cual se accionaba el mecanismo de movilización de la pieza de trabajo; de esta manera se depositaron los cordones de soldadura sobre las probetas y a su vez se tomaron las lecturas de corriente, voltaje y velocidad de avance de cada probeta elaborada, lo cual también es mostrado en la figura N° 20 .

Siguiendo el funcionamiento antes indicado se obtu -

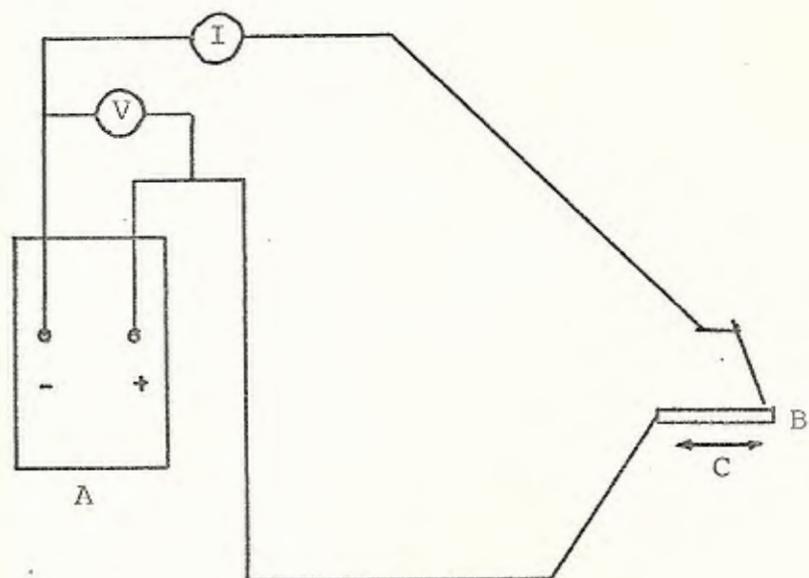


FIGURA N^o 20

MONTAJE DEL SISTEMA ADOPTADO PARA CONTROLAR LA
VELOCIDAD DE MOVIMIENTO DEL METAL SOLDADO

- A Fuente de Poder o Máquina de Soldar
- B Pieza de trabajo
- C Sentidos de Movimiento de la pieza de trabajo
- I Amperímetro
- V Voltímetro

vieron los ensayos de deposición libre de un cordón depositado sobre una placa y de los ensambles mecánicos realizados con el proceso de soldadura manual.

Proceso de Soldadura Automática

En este proceso de soldadura, no fue necesario la utilización del equipo adaptado para realizar probetas en el proceso de soldadura manual. Sino que se limitó a elaborar probetas de las mismas dimensiones que las indicadas en el proceso de soldadura manual para obtener probetas matrices del ensayo de deposición de un cordón de soldadura sobre una placa y de los ensambles mecánicos. Este proceso de soldadura automático dispone de controles automáticos que se controlan por medio de regulaciones bien definidas para los valores de corriente, voltaje y velocidad de avance.

Para obtener probetas matrices con este proceso se procedió de la siguiente manera:

En primer lugar se calibró el equipo que se muestra en la Fotografía N^o 1 con los valores de corriente, voltaje y velocidad de avance del material de aportación según los valores prefijados en la Tabla N^o 18 y para luego proceder a depositar cordones de soldadura sobre la pieza de trabajo. El arco eléctrico

formado entre la pieza y el material de aportación se encontraba sumergido en medio de un fundente granulado el cual después de terminado el cordón de soldadura se eliminó totalmente sobre la pieza para finalmente observar el cordón depositado.

De las probetas matrices obtenidas mediante los procesos de soldadura manual y automático se elaboraron probetas para los ensayos correspondientes de dureza, probetas metalográficas, probetas para ensayo de tensión de la unión soldada, para ensayo de doblado y ensayo de impacto, las cuales se describen en el siguiente tema:

Preparación de Probetas

De las probetas matrices para ensayos de dureza y metalográficas explicadas en el tema anterior, se obtuvieron probetas de cada una de las secciones transversales del cordón soldado, de una pulgada de ancho por dos pulgadas de largo, dejando el cordón de soldadura en la mitad, como se muestra en la figura N° 19 . Estas probetas han sido preparadas, pulidas y atacadas con Nital al 2%, en una superficie para analizar su microestructura y dureza en cada una de las zonas pre-

sentadas en la unión soldada. Este tipo de probeta se ha obtenido para los dos procesos de soldadura manual y automático.

De los ensambles mecánicos se obtuvieron probetas individuales de las dimensiones indicadas en la figura N^o 21 para cada tipo de ensayo. De esta manera tenemos, probetas para ensayos de tracción de sección reducida como se muestra en la fotografía N^o 10 y ubicadas según se muestra en la figura N^o 22. De igual manera se han obtenido probetas para ensayo de doblado de las dimensiones indicadas en la figura N^o 21, las cuales se muestran en la fotografía N^o 9. El tipo de ensayo de tensión fue realizado con las probetas de soldadura transversal como se muestra en la figura N^o 22.

Las probetas de ensayo de impacto se prepararon de las dimensiones indicadas en la figura N^o 24 y localizadas según la posición de la probeta N^o 3 de la figura N^o 23.

Para la preparación de probetas obtenidas de los ensambles mecánicos, se ha tomado como referencia las normas establecidas por la Sociedad

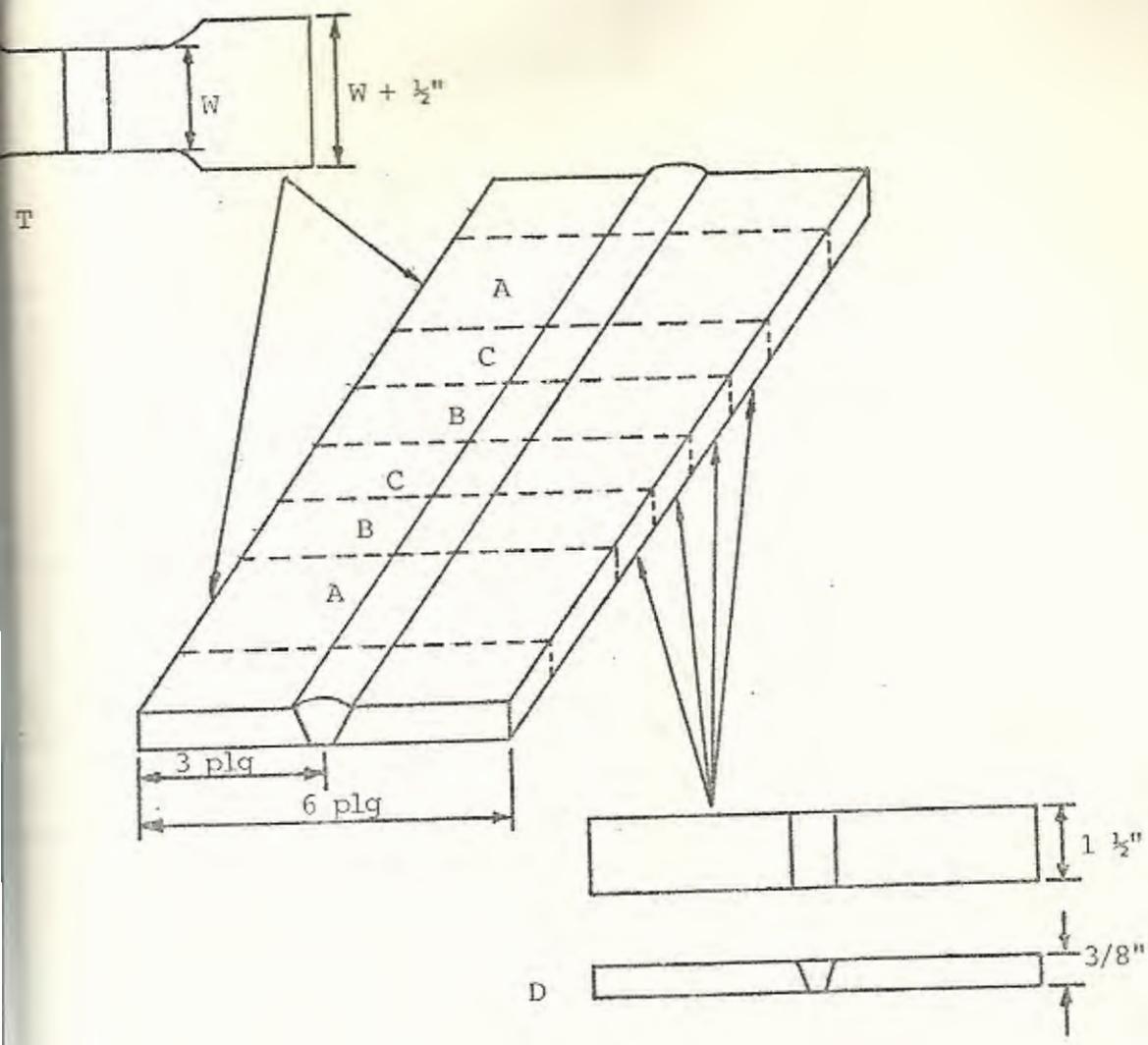


FIGURA N^o 21

ENSAMBLE MECANICO INDICANDO PROBETAS DE TENSION (T)
Y DOBLADO (D)

- A Probetas de tensión con sección reducida
- B Probeta de doblado de Cara
- C Probeta de doblado de Rafz

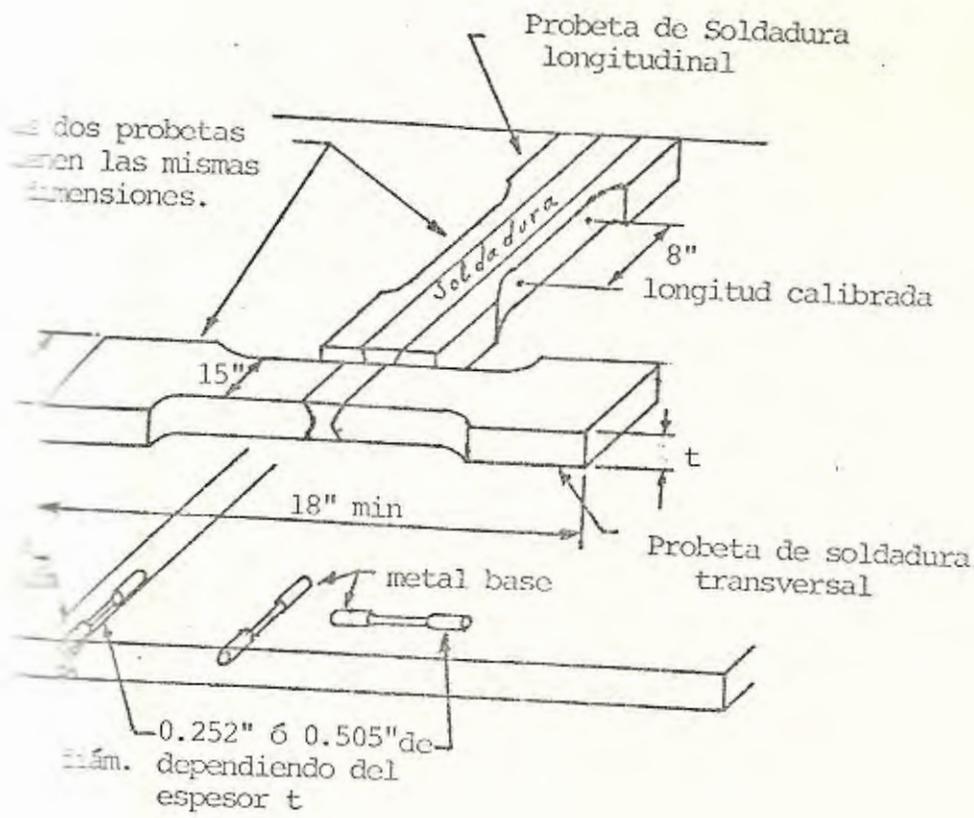


FIGURA N° 22

PROBETA PARA ENSAYO DE TENSION

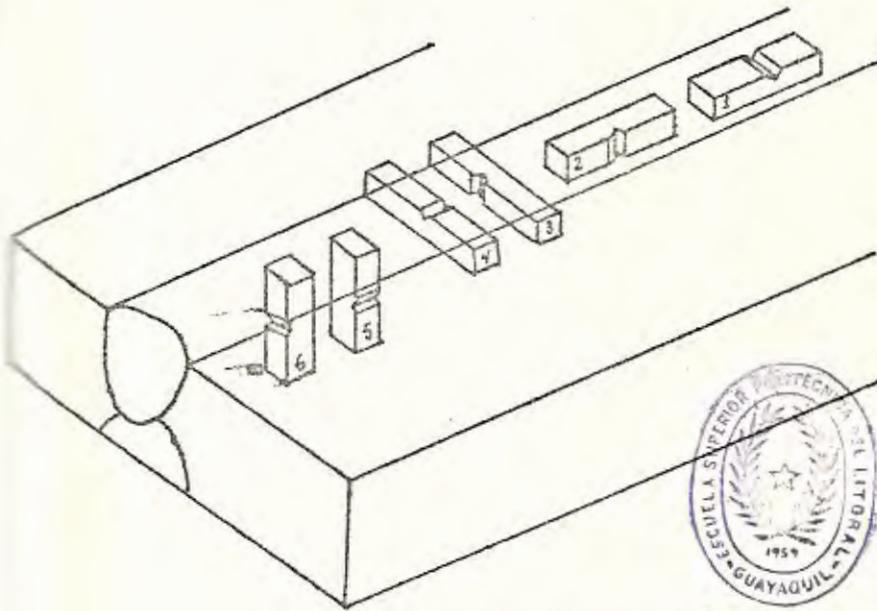


FIGURA N° 23

BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

POSIBLES ORIENTACIONES DE PROBETAS
PARA ENSAYO DE IMPACTO EN PLACAS SOLDADAS

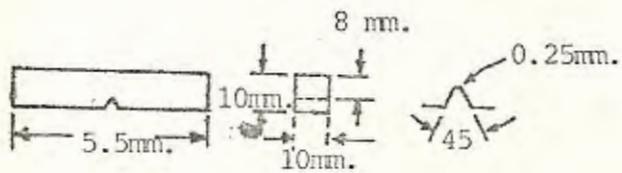


FIGURA N° 24

PROBETAS PARA ENSAYO DE IMPACTO
PARA UN ENSAMBLE MECANICO. TIPO A

Americana de Soldadura (AWS).

Antes de exponer sobre los ensayos de deposición libre y de los ensambles mecánicos, utilizando la técnica de multi-pases, analizaremos la selección de parámetros.

Selección de Parámetros

En vista de la variedad de combinaciones de amperaje, voltaje y velocidad de avance posibles de utilizar en esta experiencia, y además de considerar que de estos parámetros dependen las propiedades mecánicas finales de una unión soldada, se procedió a la elaboración de las probetas de ensayo de deposición libre sobre una placa, pre-seleccionando los valores de amperaje y velocidad de avance de 1 arco eléctrico para obtener una área de la sección transversal predeterminada según el normograma representado en la figura N° 25 .

Para este trabajo de investigación se ha procedido a considerar el tamaño del área de la sección transversal del cordón depositado sobre una placa, tomado como elemento de partida para de -

terminar la intensidad de corriente y velocidad de avance a utilizar.

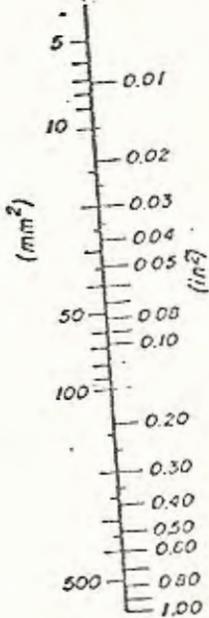
El voltaje del arco eléctrico está relacionado al ancho y presentación del cordón de soldadura depositado, principalmente para el proceso de soldadura automático con arco sumergido, mientras que en el proceso de soldadura manual, el voltaje del arco eléctrico ha sido prefijado por el amperaje seleccionado, aproximadamente 24 voltios.

Con los valores aplicados en los primeros ensayos (deposición de un cordón de soldadura sobre una placa) se tomó como referencia para la elaboración de los ensambles mecánicos, con la diferencia de que en vez de utilizar un área de la sección transversal para un cordón depositado, se utilizó un área de la sección transversal para múltiples pasos. Los valores de las variables seleccionadas se muestran en las Tablas N° 15.

Una vez seleccionado los parámetros adecuados para la elaboración de las probetas, se procedió a su adecuada aplicación para minimizar de-

eraje

Area de la sección transversal (no)



Avance (S)

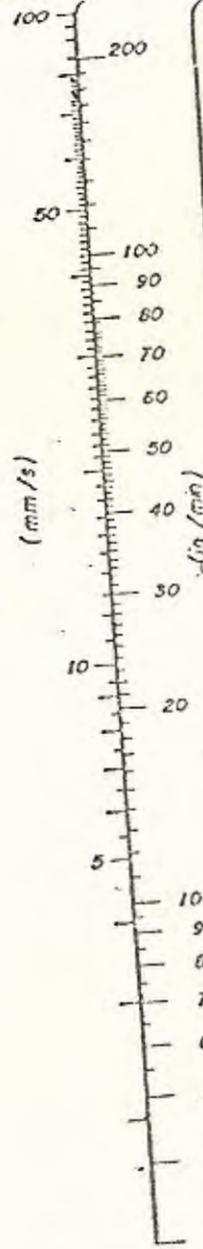


FIGURA N° 25

GRAMA PARA DETERMINAR EL AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE UN CORDON SOLDADO (15)

- A Corriente del Arco Eléctrico
- S Velocidad del Avance del Arco Electrico
- ra Area de la Sección Transversal

fectos o errores producidos por otros factores.

Los valores de amperaje, voltaje y velocidad de avance del arco eléctrico, seleccionados en esta sección, se aplicaron en la elaboración de probetas para ensayos de deposición libre y para ensayos de técnicas con múltiples pases como se explicará a continuación.

1.3 Ensayo de Deposición Libre y de Varios Pases

Ensayo de Deposición Libre

Las probetas de ensayo de deposición libre, representan una forma simple del ensayo de soldabilidad. En este tipo de ensayo, casi cualquier combinación de metal base, metal de aportación, procesos de soldadura y condiciones de soldadura pueden investigarse.

La probeta ensayada se muestra en la figura N^o 19 en la que se indican las dimensiones de 4 x 8 x 3/8 pulgadas.

Este tipo de ensayo durante el presente estudio, consiste en depositar cordones de soldadura sobre una placa para obtener información del efecto de la selección de las técnicas de soldadura

sobre el tamaño del área de la sección transversal del cordón depositado, y estos efectos sobre la máxima dureza en la zona afectada por el calor para procesos de soldadura manual y automático.

Los parámetros de soldadura fueron preseleccionados usando el área de la sección transversal calculada de la figura N°25 , de la cual se ha prefijado valores de áreas comprendidas entre 0.02 plg y 0.10 plg , luego, con estos valores se depositaron cordones de soldadura sobre placas metálicas usando procesos de soldadura manual y automático.

La sección transversal a analizar fue seleccionada de la mitad del cordón de soldadura depositada. Esta sección fue preparada, pulida y atacada con nital al 2% para revelar la microestructura de la zona afectada por el calor y de la sección transversal de la zona de fusión.

De la probeta atacada, además de la información del área de la sección transversal, también se obtuvo el ancho de la zona afectada por el calor como una función de los parámetros de sol-

dadura, la probeta en estas condiciones, se la utilizó para medir el área de la sección transversal directamente mediante la utilización de un planímetro el cual nos amplificaba la imagen para poder hacer lecturas correctas que se aproximaban con mucha precisión a los valores calculados en la figura N° 25.

Además de las informaciones obtenidas de estas probetas, se realizaron mediciones de dureza en la zona de fusión, en la línea de interfase y en la zona afectada por el calor.

Ensayo de Varios Pases

Para el ensamble mecánico, se procedió a seleccionar los valores de los parámetros a utilizar en base al ensayo de deposición de un cordón de soldadura sobre una placa. Conocidos estos valores, es decir, el amperaje, la velocidad de avance del metal de aportación y el tamaño del área de un cordón depositado, se procedió a encontrar la relación I/S de la figura N° 26, luego con la relación de 0.5 lbs/min/1000amp. se seleccionó el área de la sección transversal del cordón de soldadura para múltiples pases.

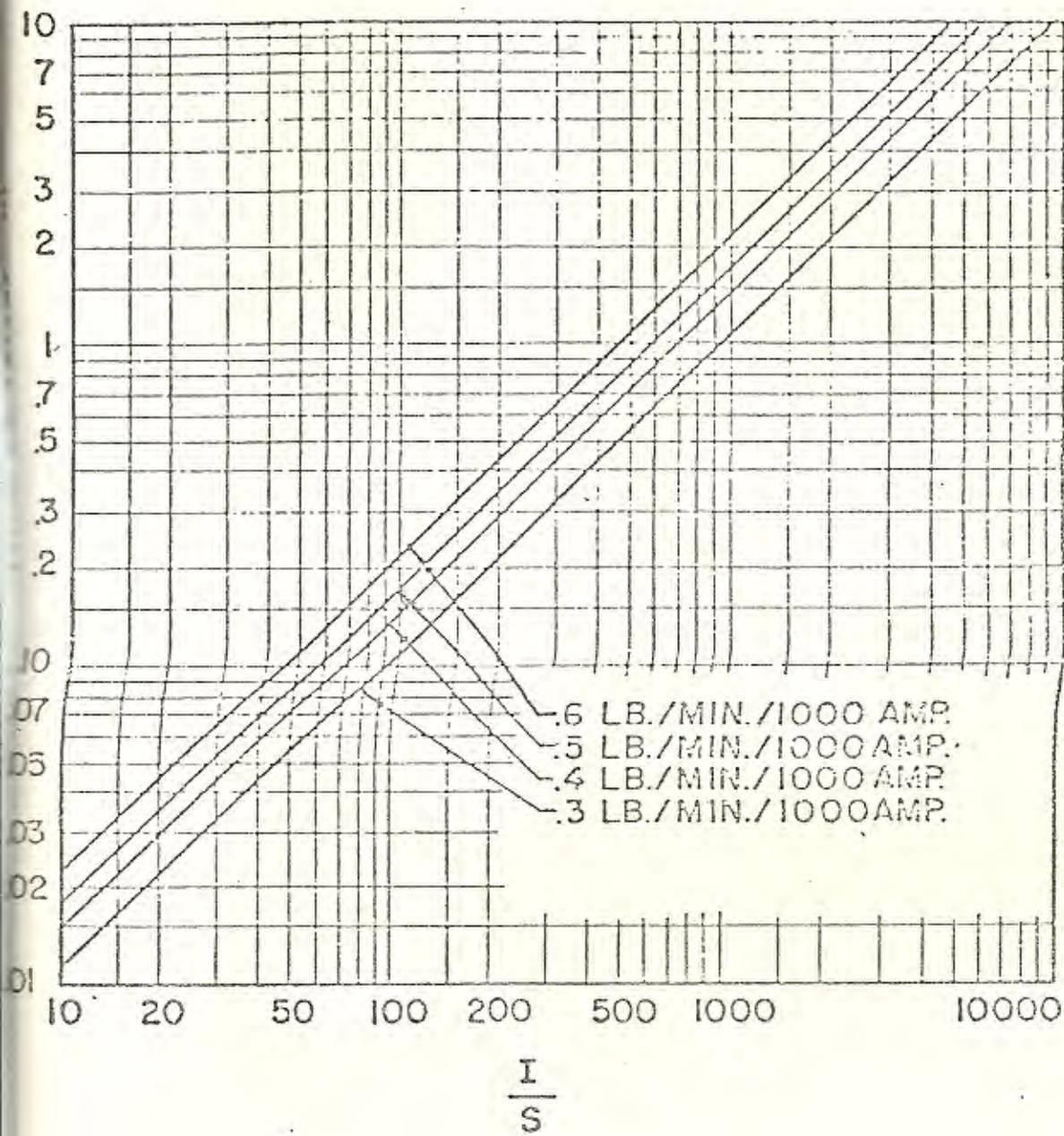


FIGURA N° 26

RELACION DE DEPOSICION DE METAL FUNDIDO

CON RESPECTO A I/S (15)

Con este valor como referencia, se determinó el número de pases a realizar en cada ensamble, esto es dividiendo el área a cubrir por el área de la sección transversal determinada para múltiples pasos. De esta manera, se aplicaron 18, 14 y 11 pases de soldadura para unir las dos piezas con el proceso de soldadura manual. Mientras que para el proceso automático se aplicaron 3, 4 y 5 pases por tener alta deposición, además de trabajar con altos amperajes.

3.5 Control de Propiedades Mecánicas de la Unión Soldada.

De lo explicado en la selección de parámetros, se tomará como referencia para describir el control de propiedades mecánicas de la unión soldada, tomando como referencia el área de la sección transversal del cordón soldado para ensayos de deposición libre y de múltiples pases.

Para el primer caso, es decir, del ensayo de deposición libre de un cordón de soldadura sobre una placa se tomó como variable fundamental el área de la sección transversal del cordón soldado. Dependiendo de esta área se predecía si las

propiedades mecánicas tales como las durezas de los cordones depositados eran mayores o menores. Como consecuencia de este análisis, se encontró que cuando el área de la sección transversal disminuía, la dureza máxima aumentaba, así tenemos que: para un área de 0.028 plg^2 se obtuvo una dureza de 331 unidades de dureza knoop y para un área de 0.06 plg^2 se obtuvo una dureza de 214 knoop, esto es según la tabla N° 16. De esta manera podemos controlar o predecir la dureza máxima de la línea de fusión de un cordón de soldadura variando el amperaje y velocidad de avance del arco eléctrico para obtener mayor o menor área de la sección transversal del cordón soldado, variaciones que se consiguen del normograma de la figura N° 25.

Para el segundo caso, es decir, para ensayos de varios pases en uniones soldadas, el control de propiedades mecánicas también se realizó mediante el área de la sección transversal del cordón soldado.

Así tenemos que para el proceso de soldadura manual, a menor área de la sección transversal de cada cordón, se obtiene el mayor número de pases

para unir una junta, como puede apreciarse en la tabla N^o 17, mientras que el esfuerzo de tensión soportado por esta junta es menor debido a que entre los diferentes pases de soldadura, se produjo un tratamiento térmico de revenido. El mismo comportamiento de las propiedades mecánicas se consigue con los procesos de soldadura automática.

Para el ensayo de la técnica de múltiples pases, se puede apreciar que a medida que aumenta la velocidad de avance del arco eléctrico, manteniendo el amperaje constante, el área de la sección transversal del cordón de soldadura disminuye como puede apreciarse en la figura N^o 25. De esta manera, la variación de los parámetros de soldadura (velocidad de avance y amperaje) se pueden modificar para obtener ciertas propiedades mecánicas requeridas en los diseños de juntas soldadas.

Como consecuencia de lo anteriormente indicado, se establece que el esfuerzo de fluencia de aceros estructurales soldados con técnicas de múltiples pases, varía en forma inversa con el área de la sección transversal de cada cordón de sol-

dadura.

La explicación anterior, se toma como referencia para predecir y controlar las propiedades mecánicas de depósitos de soldadura sobre una placa y de uniones soldadas, con técnicas de múltiples pases.

INSPECCION RADIOGRAFICA DE ENSAMBLES MECANICOS

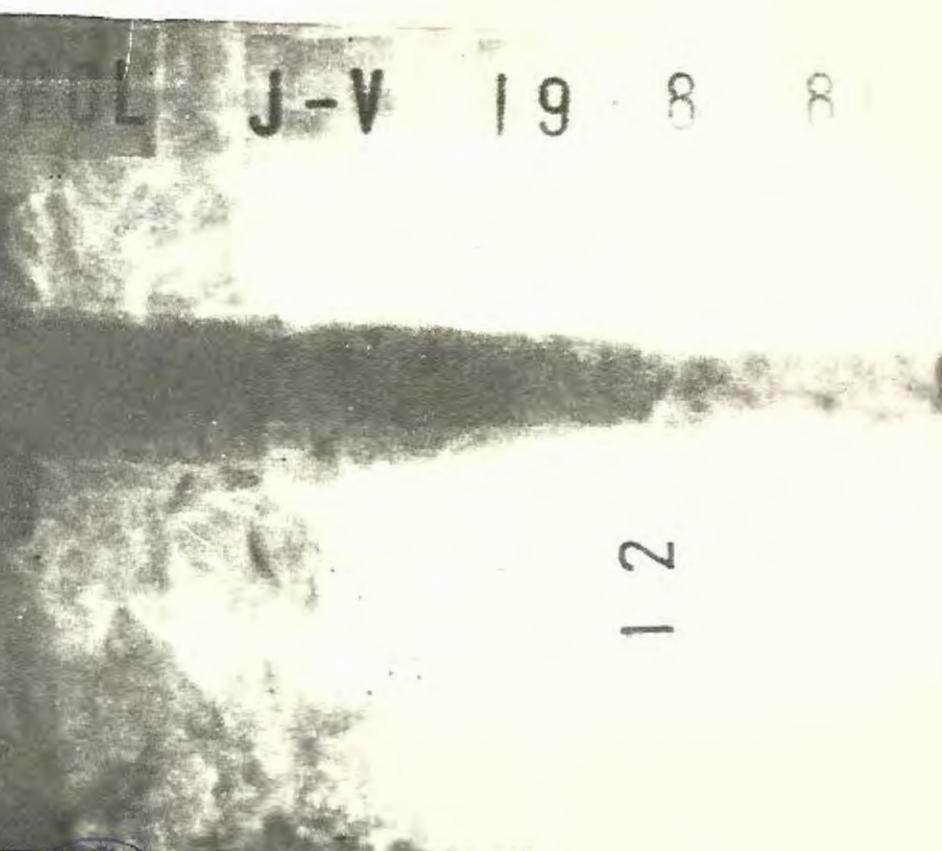
Con el objeto de obtener probetas de ensambles mecánicos libres de defectos internos, se procedió a inspeccionar por medio de radiografías industriales, dichos ensambles mecánicos, antes de proceder a realizar las pruebas mecánicas correspondientes.

Para esta inspección radiográfica se utilizó el proceso de radiografía industrial con rayos gamma que consiste de una fuente radiactiva Iridio 192, la cual emite radiaciones gamma que por su alto poder de penetración en metales, se puede obtener información de defectos internos al grabar cualquier indicación presente en el interior de la probeta examinada sobre una placa radiográfica.

El método de inspección radiográfica consiste de lo siguiente:

1. Prefijar valores de distancia fuente radiactiva Iridio 192 a la película radiográfica en este caso 12 plg.
2. Establecer el tipo de película radiográfica a utilizar, en este caso Dupont 55, que es similar a la Kodak AA.
3. Determinar el tiempo de exposición requerido para radiografiar ensambles mecánicos de 7/16" y 9/16" de espesor con un fuente radiactiva Iridio 192, cuya intensidad de fuente era de 33 curies.
4. Proceso de revelado: en el que se utilizaron materiales químicos como revelador y fijador KODAK para procesar las películas radiográficas.
5. Interpretación: con las películas radiográficas listas a ser inspeccionadas, se determinó que no existía ningún defecto interno en la unión soldada de los ensambles, como ejemplo, se muestra la fotografía N° 8 obtenida de una película radiográfica; en esta foto la parte obscura central nos representa el cordón de soldadura sin defectos, es decir sin porosidades, inclusión de escoria o algún defecto interno producto de la soldada.

Siguiendo lo explicado anteriormente, se inspeccionó todos los ensambles mecánicos antes de proceder con la parte de inspección mecánica.



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

FOTOGRAFIA N° 6

RADIOGRAFIA DE UN ENSAMBLE MECANICO

UNIDO CON EL PROCESO AUTOMATICO DE ARCO SUMERGIDO

C A P I T U L O I V

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

MEDICIONES EN EL AREA DEL CORDON SOLDADO

Para el ensayo de deposición de un cordón de soldadura sobre una placa, se aplicaron los parámetros de soldadura mostrados en la tabla N° 14, además se muestran los valores del área de la sección transversal de los cordones de soldadura y de la máxima dureza knoop obtenida para el proceso de soldadura normal. En la tabla N° 15 se muestran las medidas de áreas, penetraciones y anchos en las diferentes zonas de un cordón depositado para proceso de soldadura normal.

La tabla N° 16 indica los parámetros de soldadura aplicados en el ensayo de deposición de un cordón de soldadura sobre una placa con el proceso de soldadura automática, además se muestra el área de la sección, como también la dureza knoop máxima obtenida.

Las tablas N° 17 y N° 18 indican los parámetros utilizados para los ensambles mecánicos realizados con los

procesos de soldadura manual y automática respectivamente.

En la tabla N^o 19 se indican los resultados de los ensayos de tensión de las probetas transversales que se muestran en la fotografía N^o 9.

Finalmente, las tablas N^o 21 y N^o 22 muestran los resultados obtenidos en los ensayos de doblado y de impacto, respectivamente.

4.2 RELACIONES ENTRE EL AREA DEL CORDON SOLDADO Y LA DUREZA.

La figura N^o 28 nos muestra dos curvas que relacionan la dureza máxima versus el área de la sección transversal del cordón soldado para los dos procesos de soldadura en el ensayo de deposición libre de un cordón soldado, estas dos curvas tienen una tendencia a decaer a medida que aumenta el área de la sección transversal del cordón soldado. Esto nos indica que al aumentar el área, la dureza máxima en la zona afectada por el calor disminuye en este caso.

La figura N^o 29 muestra la relación entre el esfuerzo máximo en Decanewton por milímetro cuadrado versus el área de la sección transversal del cordón soldado en la técnica de múltiples pases, se observa que al au-

TABLA Nº 14

PARAMETROS DE SOLDADURA (SMAW)

Deposición de un Cordón de Soldadura sobre una placa

Placa 7/16"	Energía Suministra- da H.I (J/plg)	Diámetro de electrodo (plg)	PARAMETROS DE SOLDADURA			Area de la sec- ción cal- culada (in ²)	area de la sección medida (in ²)	dureza Knoop (max)
			Corriente (amp.)	Voltaje (volts)	Velocidad (ipm)			
10.1 x	30967.7	1/8	80	25	3.875	0.031	0.028	331
10.2 x	34064.5	1/8	100	22	3.875	0.040	0.039	351
10.3 x	35612.9	1/8	115	20	3.875	0.050	0.049	310
10.4 x	46451.6	1/8	120	25	3.875	0.058	0.051	337
10.5 x	41600.0	1/8	130	24	4.500	0.052	0.052	342
10.6 x	42933.3	1/8	140	23	4.500	0.060	0.048	235
10.7 x	44000.0	1/8	150	22	4.500	0.068	0.062	291
10.8 x	26400.0	1/8	155	22	7.750	0.044	0.037	290
10.9 x	27638.7	1/8	170	21	7.750	0.050	0.044	272
10.10x	27870.9	1/8	180	20	7.750	0.058	0.060	214

* 7/16 plg de espesor, metal base ASTM A283-C.

NOTA: Dureza de metal base: 177 knoop

Tipo de electrodo AWS E6013 en 1/8" de diámetro

T A B L A N^o 15

MEDIDAS DE AREAS Y LONGITUDES EN LAS
TRES ZONAS DE UN CORDON DEPOSITADO (SMAW)

Placa 7/16"	Area de la ZAC ^(a) (in ²) [/////]	Ancho del cordón depo- sitado (in) [c]	Ancho de la ZAC [B]	Penetra- ^(b) ción (in) [P]	A ^(c) (in)
10.1 x	0.003	0.236	0.031	0.28	0.118
10.2 x	0.003	0.236	0.047	0.024	0.122
10.3 x	0.001	0.244	0.043	0.031	0.114
10.4 x	0.002	0.295	0.039	0.059	0.138
10.5 x	0.004	0.354	0.071	0.051	0.154
10.6 x	0.008	0.378	0.051	0.043	0.075
10.7 x	0.005	0.327	0.039	0.031	0.079
10.8 x	0.003	0.402	0.059	0.071	0.157
10.9 x	0.009	0.394	0.079	0.059	0.150
10.10x	0.007	0.280	0.051	0.118	0.197

) zona afectada por el calor

) desde la superficie de la plancha
hasta el borde inferior del metal fundido

) Ancho máximo del metal fundido

PARAMETROS DE SOLDADURA (SAW)

Deposición de un Cordón de soldadura sobre una placa

Placa 5/8*	Tipo de Electrodo (AWS)	Diámetro de electrodo (plg)	PARAMETROS DE SOLDADURA					Area de la sección medida (in)	Dureza Knoop {(máx)}
			Corriente (amp)	Voltaje (volts)	Velocidad (ipm)	# de pases			
10.1 y	EL 12	1/8	200	34	8	1	0.058	246	
10.2 y	EL 12	1/8	350	34	25	1	0.052	316	
10.3 y	EL 12	1/8	400	35	20	1	0.075	241	
10.4 y	EL 12	1/8	500	36	25	1	0.092	265	
10.5 y	EL 12	1/8	600	38	30	1	0.098	230	
10.6 y	EL 12	1/8	360	32	10	1	0.12	307	
10.7 y	EL 12	1/8	380	29	15	1	0.094	280	
10.8 y	EL 12	1/8	420	26	22	1	0.078	250	
10.9 y	EL 12	1/8	450	30	28	1	0.068	226	
10.10y	EL 12	1/8	480	42	35	1	0.062	320	

* 5/8" espesor de placa, metal base ASTM A 283-C

Valores obtenidos en los ensambles mecánicos

a) Proceso manual con electrodo revestido (SMAW)

T A B L A N° 17

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL ENSAMBLE MECANICO (SMAW)

Probeta 5/8	Tipo de electrodo	Diámetro de electrodo (plg)	PARAMETROS DE SOLDADURA			# de pases	.a medida (in ²)
			Corriente (amp)	voltaje (volts)	Velocidad (ipm)		
1 x	6013	1/8	80		3.8	18	0.03
3 x	6013	5/32	150		4.5	13	0.05
3 x	6013	3/16	170		7.8	11	0.06

b) Proceso automático con arco sumergido (SAW)

T A B L A N° 18

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL ENSAMBLE MECANICO (SAW)

Probeta 5/8*	Tipo de electrodo (AWS)	Diámetro de electrodo (plg.)	PARAMETROS DE SOLDADURA			# de pases	.a medida (in ²)
			Corriente (Amp.)	Voltaje (volts)	Velocidad (ipm)		
1 y	EL 12	1/8	200	34	8	3	0.10
2 y	EL 12	1/8	250	34	25	4	0.03
3 y	EL 12	1/8	400	34	15	5	0.06

RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE TENSION DE DOCE PROBETAS
D I M E N S I O N E S

Nº	Espesor mm.	L mm.	a ₁ mm.	a ₂ mm.	C mm.	b mm.	R mm.	Area ini- cial mm. ²
1 x	5.9	255	102.3	102.3	37.2	52.9	10	219.48
2 x	5.9	255	101.3	103.2	37.1	51.2	10.3	218.89
3 x	6.8	252	102.4	97.8	37	51.3	11	251.6
4 x	6.25	253	100.7	100.8	38	51.5	11	237.5
5 x	9	249.5	96.8	91.35	38	51.3	9	342
6 x	9	255	100.9	100.8	36.9	51.7	12	332.5
7.1 y	10.2	234	92.6	88	38.8	51.7	12	395.7
7.2 y	11.2	255	103.3	102.6	37.15	51.4	12	416.08
7.3 y	9.8	229	87.6	89.4	37.4	51.6	10	366.52
7.4 y	9.8	230	88.7	90.9	39.9	51.7	11	391.02
7.5 y	10.65	254	100.4	100.4	38.15	50.9	11	406.29
7.6 y	9	254	100.6	100.6	38.25	50.75	12	344.25

x proceso manual con electrodo revestido (SMAW)

y proceso automático con arco sumergido (SAW)

RESULTADOS

Nº PROBETA	AREA FINAL mm ²	PORCENTAJE DE ELONGACION EN 50,8 mm.	ESFUERZO FIJENCIA DE DAN/mm ²	ESFUERZO MAXIMO DAN/mm ²	ESFUERZO DE RUPTURA DAN/mm ²
1.1 x					
1.2 x	171.5				
1.3 x	173				
1.4 x	148.7	13.28	----		
1.5 x	193	11	39.4	44.087	----
1.6 x	198	30.6	39.3	45.28	----
7.1 y	186.26	17.52	40.71	46.2	38.95
7.2 y	287.92	26.93	----	46.94	45.01
7.3 y	216.06	29.33	----	42.72	----
7.4 y	197.75	20.86	----	47.21	----
7.5 y	252.7	33.66	----	48.73	46.14
7.6 y	219.62	31.1	----	44.96	36.18
	243.2	24	36.59*	41.079	32.81
		34.64	----	47.16	44.42
		15.15	----	45.39	43.3
				45.41	39.46

x proceso manual con electrodo revestido (SMAW)
 y proceso automático con arco sumergido (SAW)

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TENSION DE DOCE PROBETAS

R E S U L T A D O S

N ^o PROBETA	AREA FINAL mm ² .	PORCENTAJE DE ELONGACION EN 50,8 mm.	ESFUERZO DE FLEJENCIA DAN/mm ²	ESFUERZO MAXIMO DAN/mm ²	ESFUERZO DE RUPTURA DAN/mm ²
1.1 x					
1.2 x	171.5	13.28	----	44.087	----
1.3 x	173	11	39.4	45.28	----
1.4 x	148.7	30.6	39.3	46.2	38.95
1.5 x	193	17.52	40.71	46.94	45.01
1.6 x	198	26.93	----	42.72	----
7.1 y	186.26	29.33	----	47.21	----
7.2 y	287.92	20.86	----	48.73	46.14
7.3 y	216.06	33.66	----	44.96	36.18
7.4 y	197.75	31.1	----	41.079	32.81
7.5 y	252.7	24	36.59*	47.16	44.42
7.6 y	219.62	34.64	----	45.39	43.3
	248.2	15.15	----	45.41	39.46

x proceso manual con electrodo revestido (SMAW)
 y proceso automático con arco sumergido (SAW)

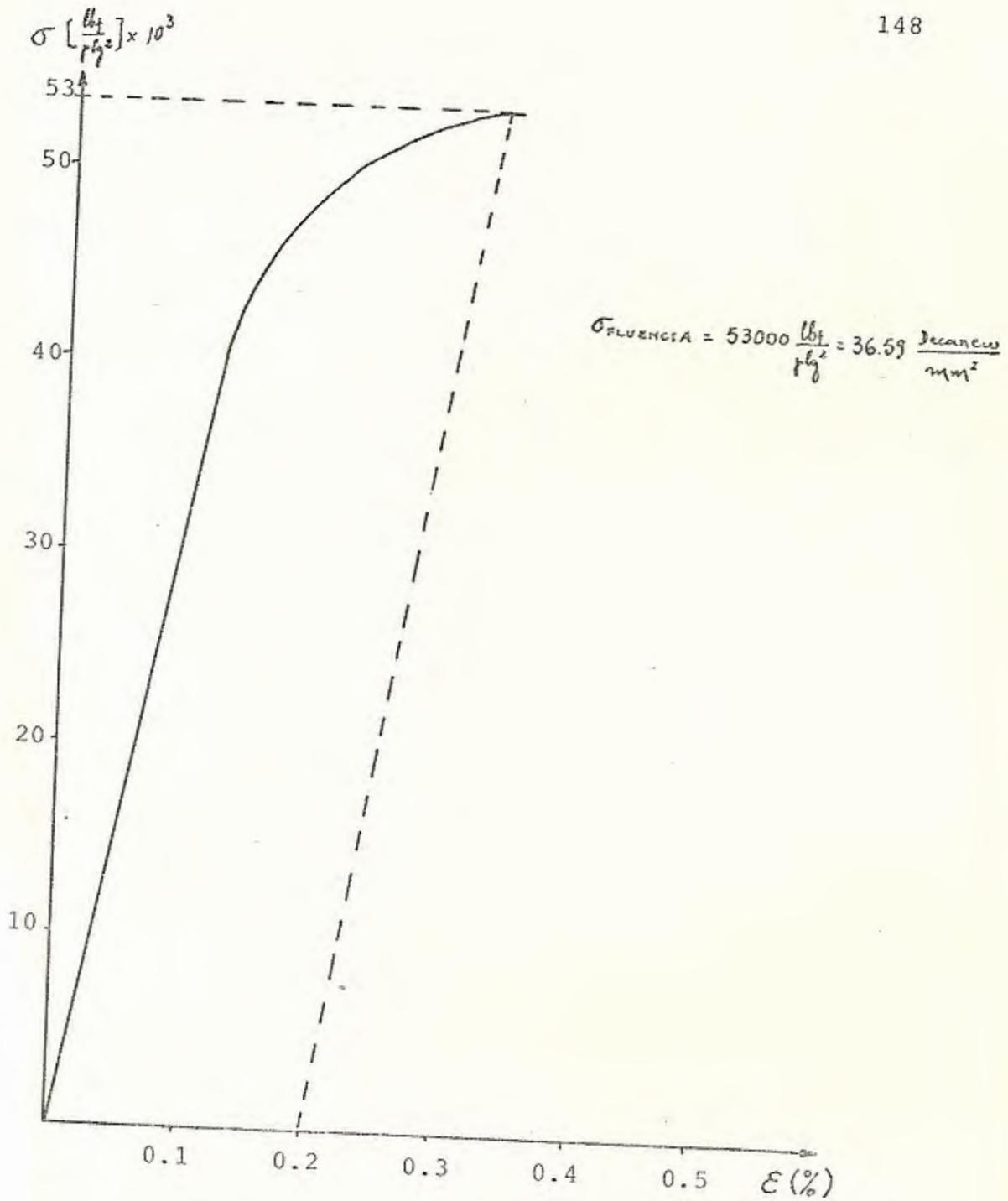
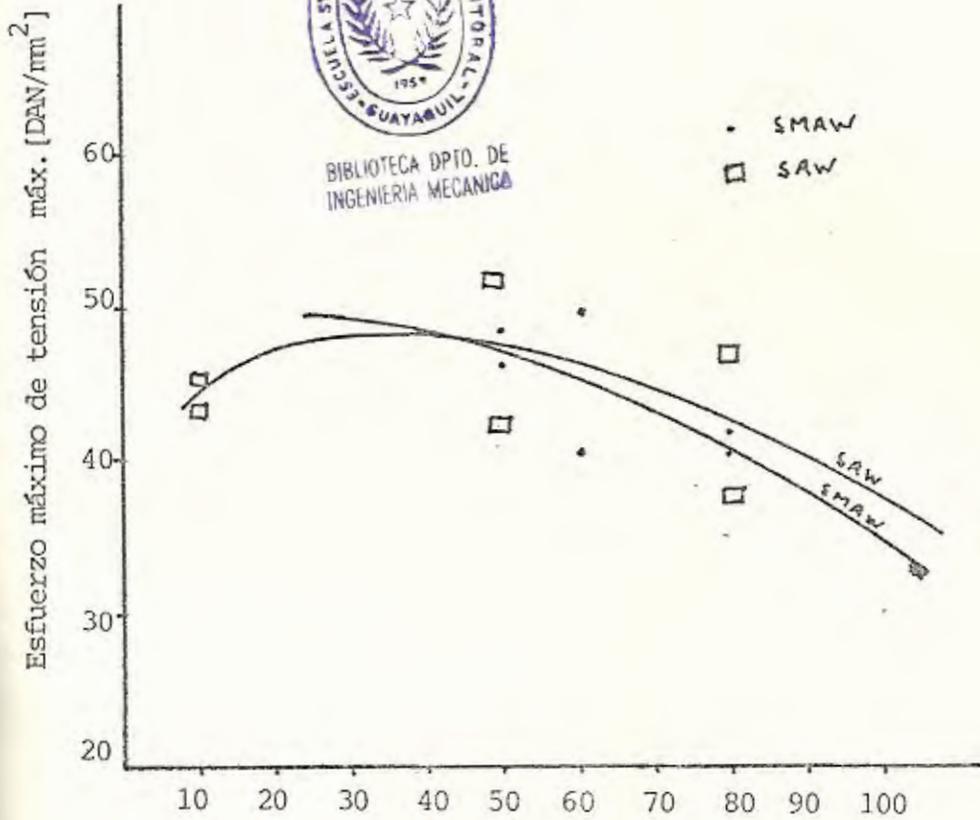


FIGURA N° 27

RELACION DE ESFUERZO DEFORMACION
PARA LA PROBETA N° 10 DE TENSION



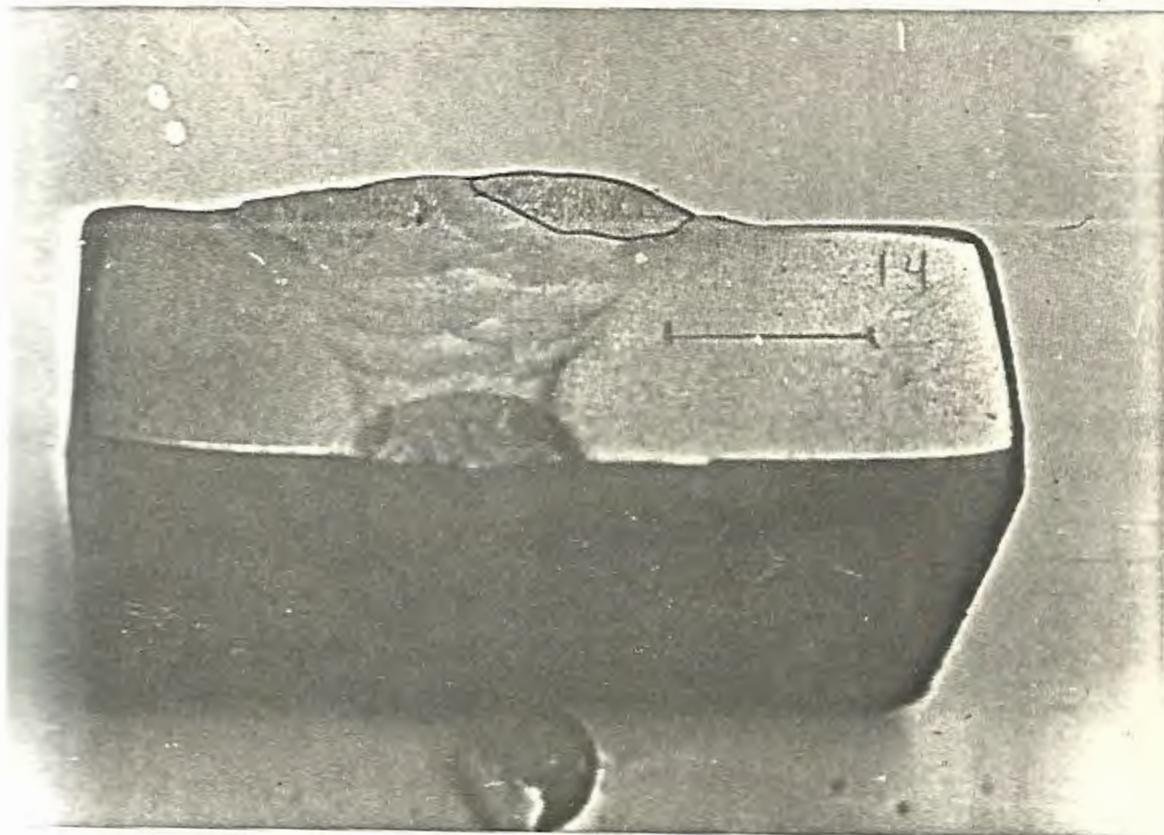
BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA



Area de la sección transversal de un cordón
soldado x 10^{-3} (plg²)

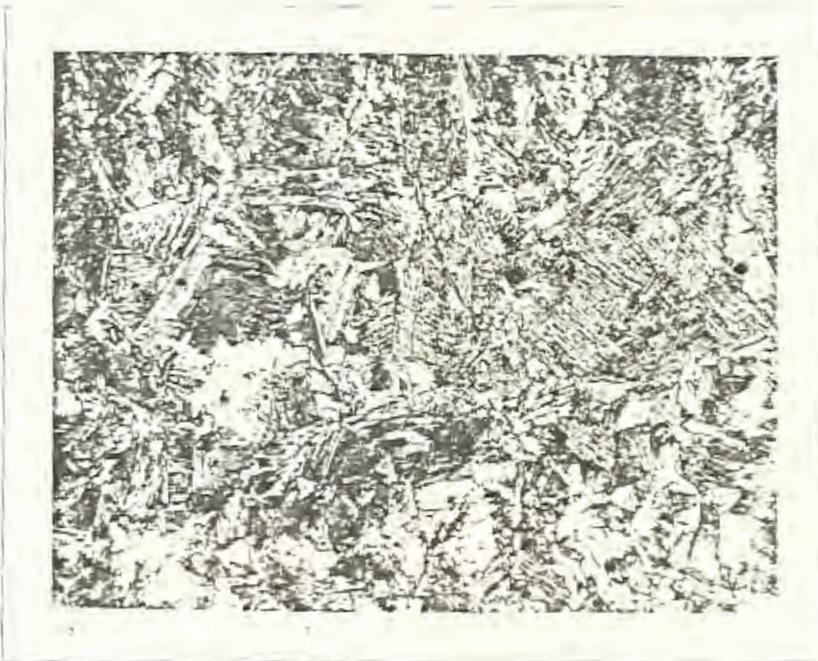
FIGURA N° 29

RELACION DE ESFUERZO MAX. VERSUS AREA
DE LA SECCION TRANSVERSAL DE UN CORDON SOLDADO,
PARA TECNICAS DE MULTIPLES PASES



FOTOGRAFIA N^o 7

Se muestra la probeta de una unión a tope con 14 pases de cordones soldados con proceso manual, se muestra también el último pase del cordón de soldadura.



200x Nital 2%
MICROGRAFIA N° 3
Probeta # 3 (SMAW)

PARAMETROS APLICADOS:

Amp. 115

Voltios 20

Velocidad de Avance: 3.875 plg/min.

En la parte superior de esta micrografía puede apreciarse una estructura columnar orientada del metal depositado, esta estructura relaciona la rapidez de enfriamiento del metal depositado.

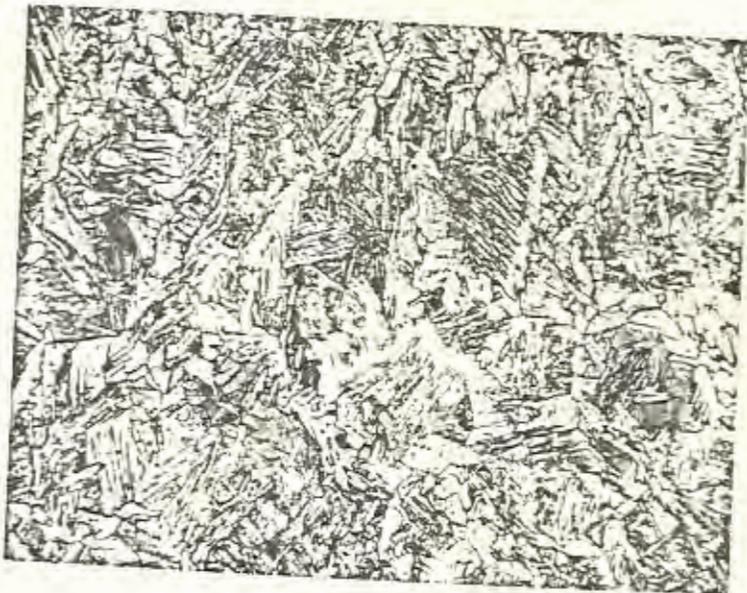
En la parte inferior puede apreciarse una estructura de grano más grueso que la anterior, producto de haber sufrido una variación en la microestructura por calentamiento. Entre estas dos zonas se encuentra la línea de fusión, que es la parte crítica en una unión soldada.

MICROGRAFIA N^o 4

200 x
PROBETA # 4
entre ZAC y metal aportado

PARAMETROS APLICADOS:
Amp. 120
Volt. 25
Velocidad de avance: 3.875 plg/min

Al aumentar 5 amperios y 5 voltios se produce una menor posibilidad de apreciar mejor la línea de fusión entre el metal aportado y la zona afectada por el calor. Esto es una ventaja en soldadura ya que se logra una mejor homogeneidad. La microestructura, tanto del metal aportado como de la zona afectada por el calor son similares a las anteriores.



MICROGRAFIA N° 5

200x

PROBETA # 6

entre ZAC y metal aportado

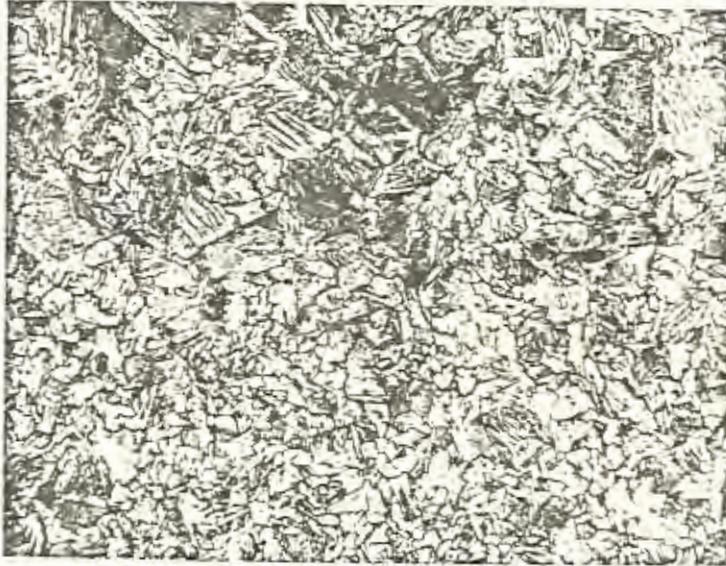
PARAMETROS APLICADOS:

Amp. 140,

Volt. 23

Velocidad de avance 4.5 plg/min

Puede apreciarse que la línea de fusión en esta microfotografía es aún menos definida en las dos zonas, las mismas que se mezclan desde el punto de vista metalúrgico ya que no hay una orientación definida de grano producto del enfriamiento del cordón depositado. La homogeneidad que se logra con estos parámetros es mucho mejor que las dos anteriores.



MICROGRAFIA N° 6

200 x
PROBETA # 8
entre ZAC y metal aportado

PARAMETROS APLICADOS:

Amp. 155
Volt. 22
Velocidad de Avance: 7.750 plg/min

La velocidad de avance también afecta a la microestructura del cordón depositado, aquí puede apreciarse que en la zona afectada por el calor, el tamaño de grano es más pequeño que las anteriores, mientras que en la zona del metal aportado la microestructura tiene cierta orientación desordenada, notándose en esta zona granos columnares no muy definidos como en las anteriores.

EVALUACION DE LOS ENSAYOS DE DUREZA

Los ensayos de dureza sirven para proporcionar información acerca de los cambios metalúrgicos causados por soldadura. Por ejemplo, en aceros estructurales al ser sometidos a altas temperaturas causadas por el arco eléctrico de soldadura, se producen cambios de temperatura que van desde un máximo hasta un mínimo, produciendo por enfriamiento posterior una zona afectada por el calor que en muchos casos pueden dar lugar a la formación de una estructura martensítica, estructura sumamente frágil de alta dureza. Este tipo de estructura no es deseable en uniones soldadas por ser de características muy frágiles.

Los ensayos efectuados en esta experiencia han sido evaluados tomando mediciones de microdureza Knoop como se indica en la figura N° 31. De esta manera se obtuvo como resultado una mayor dureza en la línea de fusión, es decir entre el metal aportado y la zona afectada por el calor (L de la figura N° 31). A partir de este valor de máxima dureza de la línea de fusión, este valor va disminuyendo a medida que se acerca al metal base. De esta manera, se detecta que el cordón depositado para los dos procesos de soldadura manual y automática tienen mejores propiedades

mecánicas que el metal de la base.

La tabla N° 14 nos muestra valores de dureza máxima tomadas en la línea de fusión de cada probeta, mientras que la figura N° 28 nos proporciona una relación de máxima dureza versus áreas de la sección transversal para ensayos de deposición libre.

ENSAYOS MECANICOS

4.3.1 Ensayo de Doblado

Para la evaluación de los ensayos de doblado, se elaboraron probetas normalizadas por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), con lo cual se obtuvo de cada ensamble mecánico de ensayo para cada proceso de soldadura manual y automático, una probeta para doblado de cara y una probeta para doblado de raíz.

Este ensayo consisten en doblar la probeta de ensayo a 90° en matrices estándares de doblado como se observa en la figura N° 32 (3). Durante esta operación, la superficie convexa está sujeta a esfuerzos de tensión, mientras que la superficie cóncava está sujeta a esfuerzos de compresión.

De los doce ensayos de doblado tanto de cara como de raíz, se inspeccionó la superficie convexa para detectar si existía inicio de fisura o fisuras producto

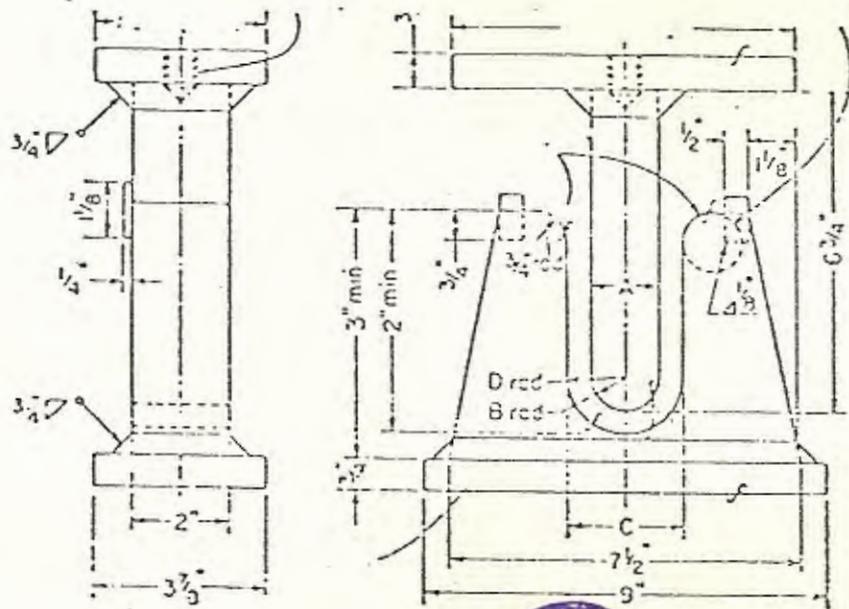


FIGURA N° 32

BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

MATRICES PARA ENSAYO DE DOBLADO



FOTOGRAFIA N° 8

ENSAYO DE DOBLADO

Se puede apreciar 4 probetas ensayadas: dos de cara y dos de raíz; no presentan ninguna fisura, producto de lo cual, los procesos aplicados a estos aceros son los más recomendados, respetando los parámetros aplicados para estos ensayos.

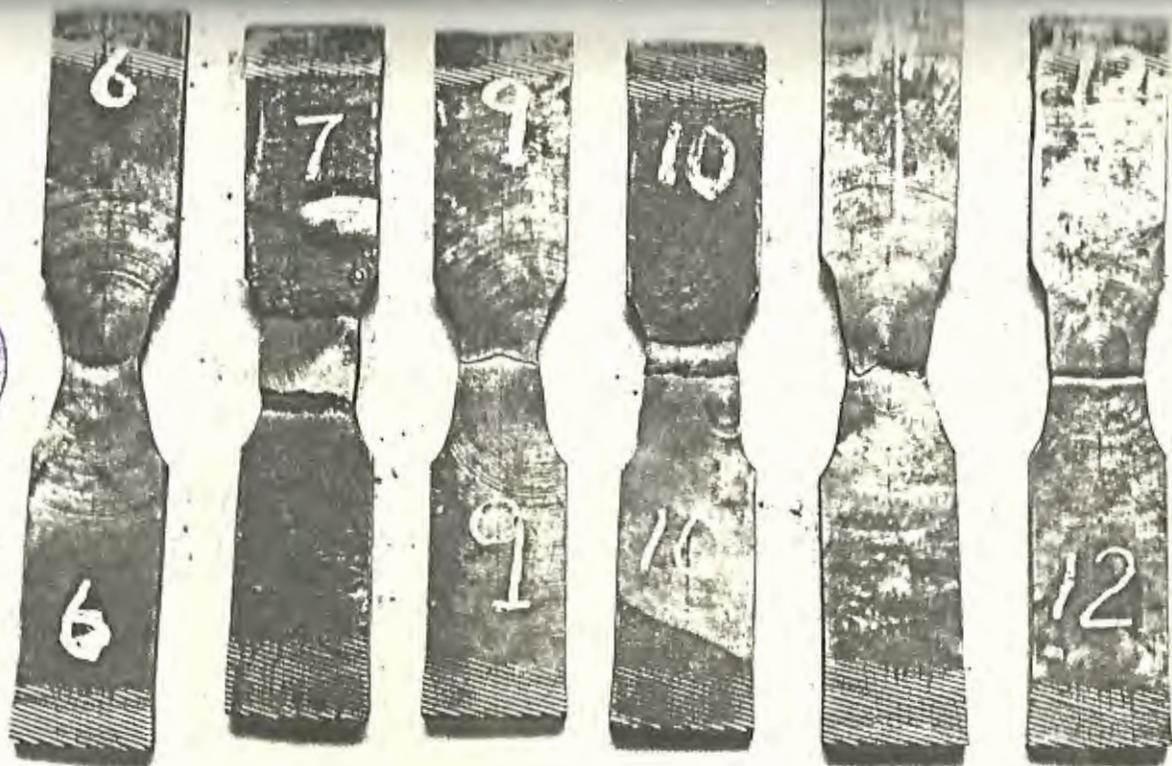
heterogeneidad de la junta soldada, es decir, los parámetros de soldadura varían dentro de amplios rangos, tanto para proceso de soldadura manual como para procesos de soldadura automática.

Sin embargo, los valores obtenidos para este ensayo localizado en la Tabla N° 19 nos proporcionan valores que estan dentro del rango previsto por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) para materiales de aportación.

3.3 IMPACTO

El ensayo de impacto es usado para determinar la energía absorbida en la fractura producida por impacto de una probeta. Este ensayo consiste en aplicar una carga determinada mediante impacto, dejándola caer desde cierta altura sobre una probeta de sección cuadrada como se muestra en la figura N° 33

Según los resultados obtenidos en este ensayo, tabla N° 22 se demuestra que a medida que aumenta el área de la sección, la resistencia al impacto (resiliencia) también aumenta. De esta manera se concluye que mientras mayor sea el número de pases, las propiedades de impacto para una unión soldada son menores. Lo cual significa que entre pase y pase se produce un trata -



FOTOGRAFIA N° 9

PROBETAS DE TENSION

-Se puede observar la rotura cerca de la unión soldada

Según los resultados obtenidos, puede apreciarse que la rotura en la mayoría de los casos, se produce cerca de la unión soldada, dándonos como resultado resistencias de tensión similares a las del metal base. Puede apreciarse también que la elongación también es aceptable para los fines perseguidos.

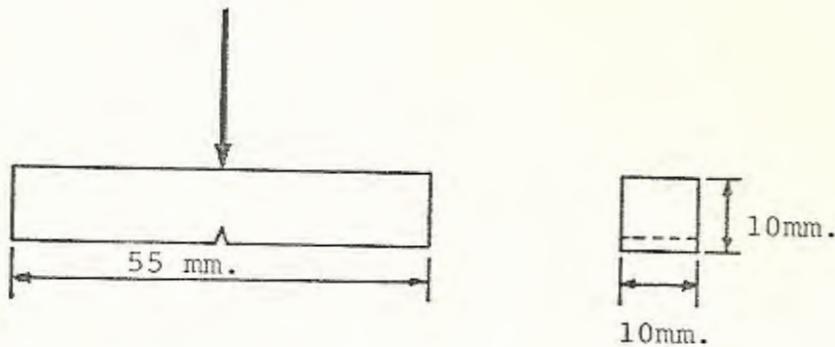


FIGURA N° 33

PROBETA PARA ENSAYO DE IMPACTO

- La flecha indica la dirección de la carga del impacto.

miento térmico de revenido.

En muchos casos la fractura de un material se ha producido u originado por el lugar donde se encuentra una fisura o rajadura. Para el caso del ensayo de impacto, la rajadura tiene origen en la muesca en V practicada en el centro de la probeta.

Los resultados del ensayo de impacto son comunmente realizados en función de los valores de la temperatu-

ra de ensayo, cuyos datos pueden obtenerse por una o más de las siguientes mediciones:

1. Midiendo la energía que es absorbida a una temperatura particular de ensayo, o energía máxima a 100% de la fractura.
2. Midiendo la superficie de fractura que aparece en la probeta después del ensayo, el cual puede influir la temperatura sobre un porcentaje particular del área de las fibras en la sección fracturada de la probeta.
3. Cambio dimensional en la medida de la probeta como una medida de la contracción del ancho por debajo de la muesca en V practicando en la probeta o la expansión del ancho a ambos lados de la sección fracturada de la probeta.

La figura N° 34 ilustra los tres métodos de información en función de la temperatura de ensayo de impacto.

En el ensayo de impacto practicado en esta experiencia se produce el tercer caso, en el cual para una temperatura de 0°C se produjo un 3% aproximadamente de contracción en la sección fisurada, indicándonos

un material dúctil; la tabla N° 22 nos muestra los valores obtenidos en esta experiencia, para lo cual se observa que en las probetas correspondientes al proceso automático con arco sumergido son las que absorben mayor energía.

C A P I T U L O V

CONCLUSIONES

De los resultados del trabajo experimental desarrollado durante este programa de investigación, se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. El efecto del contenido calorífico del área de la sección transversal de un cordón soldado sobre la máxima dureza en la zona afectada por el calor fue verificada en la práctica.

La máxima dureza incrementa cuando el área de la sección transversal de un cordón soldado decrece.

2. Para diferentes rangos de energía suministrada a una placa metálica, se demostró que la relación del área de la sección transversal de un cordón soldado al área y ancho de la zona afectada por el calor tienen una relación inversa con la velocidad de avance del arco eléctrico.

3. Para los procesos de soldadura manual y automática

en la unión de piezas con múltiples pases, la dureza decrece con el incremento del área de la sección transversal.

4. Para uniones con múltiples pases en los procesos de soldadura manual y automático, el metal soldado presenta buena ductilidad como se muestra en los ensayos de doblado
5. La influencia del área de la sección transversal para el proceso manual utilizando electrodo E6013 y F61 EL12 para el proceso automático con respecto a los esfuerzos de tensión a la rotura y de fluencia de una unión soldada fue verificada con los ensayos de tensión. El punto de fluencia y de tensión a la rotura decrece cuando se incrementa el área de la sección transversal de un cordón soldado, en la técnica de multi-pase.
6. Un incremento en el área de la sección transversal significa un incremento de la energía absorbida en el ensayo de impacto

En general, la importancia del concepto del área de la sección transversal de un cordón depositado como

parámetro para establecer propiedades mecánicas de una unión soldada fue confirmada. Además, las relaciones obtenidas obedecen a principios básicos que se confirman con la parte experimental.

BIBLIOGRAFIA

1. Saferian, Daniel: Metalurgia de la Soldadura
Editorial Tecnos S.A. O'Donnell, 27. Madrid -
2. AVNER, Sidney: Introduccion a la Metalurgia Física
3. Welding Handbook, Metals and their weldability
Sixth edition. Section four. AWS
4. ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE
Section II (1968)
5. J. Gonzalez Vásquez. Manual de Soldadura Eléctrica
Ediciones CEAC.
6. Manual de Soldadura ESAB
Materiales de Aportación y equipos de soldadura para
proceso manual y automático.
7. Código ASME para calderos y recipientes a presión.
Sección IX.
Estándares de calificaciones para procedimientos de
soldadura, soldadores y operadores de soldadura.
Edicion de 1974.
8. Lincoln Electric. The Procedure Handbook of arc
Welding.
9. D.L. Glizmanenko. Soldadura y corte de los metales.
10. George E. Linnert. Welding Metallurgy. Vol. 1

11. Ing. L. de Vedia. Séptimo Curso Panamericano de Metalurgia de la Soldadura.
Dpto. de Metalurgia, Buenos Aires-Argentina 1971
12. Specification for Mild Steel Covered Arc-Welding Electrodes
AWS A5.1-69
13. Specification for Bare Carbon Steel Electrodes and fluxes for Submerged Arc Welding
AWS A5.17-76
14. Dieter. Metalurgia Mecánica
15. Ing. Alberto Torres. Control of Mechanical Properties of C-Mn Steel Weldment.