



T
672.521
L 426
c.2

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

“Estudio y Control de Soldaduras por
Electroescoria del Acero SAE 1030
en Grandes Espesores”

TESIS DE GRADO
Previa a la Obtención del Título de
INGENIERO MECANICO

Por:

D-4075

CARLOS E. LAYANA RUIZ



Guayaquil - Ecuador

Febrero, 1981

BIBLIOTECA

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"ESTUDIO Y CONTROL DE SOLDADURAS POR
ELECTROESCORIA DEL ACERO SAE 1030
EN GRANDES ESPESORES"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO MECANICO



BIBLIOTECA

POR:

CARLOS E. LAYANA RUIZ

D-4075

GUAYAQUIL-ECUADOR

FEBRERO, 1981

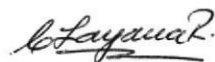
"ESTUDIO Y CONTROL DE SOLDADURAS POR
ELECTROESCORIA DEL ACERO SAE 1030
EN GRANDES ESPESORES"

DIRECTOR DE TESIS



ING. OMAR SERRANO V.

A U T O R



CARLOS E. LAYANA R.



BIBLIOTECA

DECLARACION EXPRESA:

DECLARO QUE: Hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis son de mi exclusiva responsabilidad y que el patrimonio intelectual de la misma corresponde a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

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



BIBLIOTECA

AGRADECIMIENTO

A la ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL



BIBLIOTECA

Al ING. OMAR SERRANO V., Director de esta tesis, por su decidida y constante colaboración en el desarrollo de este trabajo.

A los PROFESORES DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA, y en especial a los del área de Metalurgia.

DEDICATORIA

A MIS PADRES



BIBLIOTECA

A MIS HERMANAS

A MIS HERMANOS

CONTENIDO

	Pág.
TABLA DE CONTENIDO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	15
I. INTRODUCCION	16
II. FUNDAMENTO TEORICO	20
2.1. Descripción del proceso de solda dura por electroescoria.	20
2.2. Aplicaciones del proceso	24
2.3. Estudio de las variables del pro ceso.	25
2.4. Estudio de la unión soldada	47
2.5. Ventajas del proceso de soldadura por electroescoria en la unión de grandes espesores.	64
III. TRABAJO EXPERIMENTAL	68
3.1. Materiales utilizados	68
3.1.1. Metal base	68
3.1.2. Materiales de aporte	72
3.2. Equipo utilizado	74
3.3. Selección de la geometría a soldar se.	78
3.4. Técnica operativa	80
3.4.1. Variación de los parámetros de soldadura: voltajes, co- rriente y velocidad del e- lectrodo.	80
3.4.2. Procedimiento de soldadura	83

	Pág.
3.5. Obtención de muestras para análisis.....	87.
IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES.	94
4.1. Calor suministrado durante el proceso.	94
4.2. Análisis metalográfico de la unión soldada.....	97
4.2.1. Observaciones macroscópicas: geometría de la zona de fusión y zona afectada por el calor, factor de forma y ángulo de encuentro.	97
4.2.2. Observaciones microscópicas: microestructura y tamaño de grano.	117
4.3. Análisis de las propiedades mecánicas.	126
4.3.1. Ensayos de dureza ...	128
4.3.2. Evaluación de la resistencia mecánica	130
4.4. Ensayos no destructivos por ultrasonido.....	130
V. CONCLUSIONES	134
APENDICE I	136
" II	138
" III	140
" IV	142
BIBLIOGRAFIA	143

LISTA DE FIGURAS

FIGURA
N^o

Pág.

1	Componentes principales de un equipo para soldadura por electroescoria usando guía consumible (Ref. 1)	21
2	Componentes principales del equipo convencional para soldadura por electroescoria usando guía no consumible (Ref. 1)	22
3	Esquema utilizado para el cálculo de dilución (Ref. 2).	28
4	Representación esquemática de la deposición de metal por la guía consumible y electrodo (Ref 2).	28
5a	Representación gráfica de una zapata sólida (ó caliente) (Ref. 1).	35
5b	Representación gráfica de una zapata de cobre (Cu) enfriada por agua (Ref. 1) ...	35
6	Representación esquemática de la variación lineal entre corriente y velocidad de alimentación del electrodo (Ref. 3).	37
7	Representación esquemática de la variación de la profundidad de la pileta de soldadura en función de la velocidad de alimentación del electrodo (Ref. 3).	37

8	Representación esquemática de la variación de la profundidad de la pileta de soldadura en función del voltaje para una velocidad del electrodo (Ref. 3).....	39
9	Representación esquemática de la variación del ancho de la soldadura con el voltaje - para una velocidad de electrodo (Ref. 3)..	39
10	Influencia de la velocidad de alimentación del electrodo sobre el ancho de la soldadura (Ref. 3).....	41
11	Representación esquemática de una sección vertical de una muestra soldada por ESW mostrando el factor de forma (Ref. 7).....	41
12	Ilustración gráfica del efecto del voltaje y velocidad del electrodo sobre el factor de forma (Ref. 3).	44
13	Representación esquemática de una sección vertical de la soldadura mostrando el ángulo de encuentro (Ref. 3)	44
14a	Representación de una soldadura con bajo - factor de forma (ángulo obtuso), poca resistencia al agrietamiento (Ref. 2).....	46
14b	Representación de una soldadura con alto factor de forma (ángulo agudo), alta resistencia al agrietamiento (Ref. 2).....	46

15	Representación esquemática de un balance de calor (Ref. 6)	49
16	Comparación del ciclo térmico en los procesos de soldadura manual al arco eléctrico y por electroescoria (Ref. 6)	51
17	Representación de una unión soldada por ESW y las diferentes regiones que se originan (Ref. 3).	53
18a	Representación esquemática de la estructura tipo I (Ref. 6)	57
18b	Representación esquemática de la estructura Tipo II (Ref. 6)	57
19	Variación en la orientación de cristales columnares como resultado de la forma de la pileta de soldadura (Ref. 6)	59
20	Comparación de la velocidad de soldadura con respecto al espesor a soldarse con los procesos ESW y MMAW (Ref. 7)	66
21	Microestructura de un acero SAE 1030, baja amplificación.	71
22	Microestructura de un acero SAE 1030, alta amplificación.	71
23	Componentes del equipo de soldadura por electroescoria utilizado en el presente estudio.	75

24	Características estáticas de la fuente de poder utilizada para el proceso en estudio (Ref. 7)	77
25	Representación de la unión simulada para el estudio del proceso.....	79
26a	Representación del arreglo realizado para efectuar la soldadura por ESW.....	85
26b	Representación del arreglo del extremo <u>li</u> bre del electrodo para obtener un proceso de soldadura estable (Ref. 7)	85
27	Normógrafo utilizado para determinar tamaño de grano (Ref. 12).....	92
28	Estructura Tipo I en un acero SAE 1030 <u>sol</u> dadado por ESW	99
29	Estructura Tipo II en un acero SAE 1030 soldado por ESW.....	99
30	Sección transversal ampliada de un acero SAE 1030 soldado por ESW, soldadura típica de este estudio.....	100
31	Estructura del Tipo IV en un acero SAE 1030 soldado por ESW	102
32	Sección vertical de un acero SAE 1030 <u>sol</u> dadado por ESW. Crecimiento columnar.....	102
33	Sección vertical de un acero SAE 1030 por ESW. Falta de fusión.....	103

34	Sección vertical de un acero SAE 1030 soldado por ESW. Grietas en la dirección de granos columnares.	103
35	Sección vertical de un acero SAE 1030 soldado por ESW. Resultado de reiniciación del proceso.	105
36	Relación entre la profundidad de la pileta de soldadura con el voltaje. - Acero SAE 1030 soldado por ESW.	109
37	Relación entre el tamaño de la zona de fusión y zona afectada por el calor con el voltaje. Acero SAE 1030 soldado por ESW.	111
38	Relación entre el tamaño de la zona de fusión y zona afectada por el calor con la corriente. Acero SAE 1030 soldado por ESW.	112
39	Relación entre el factor de forma con el voltaje. Acero SAE 1030 soldado por ESW.	114
40	Relación entre la penetración y el voltaje para un acero SAE 1030 soldado por ESW.	116

41	Microfotografía compuesta de un acero SAE 1030 soldado por ESW indicando cambios microestructurales desde la zona de fusión al metal base.....	118
42	Microestructura de la zona de fusión de un acero SAE 1030 soldado por ESW (36V, 350A).....	121
43	Microestructura de la ZAC cercana a la zona de fusión de un acero SAE 1030 por ESW (36V, 350A).....	121
44	Microestructura de la ZAC cercana al metal base de un acero SAE 1030 soldado por ESW (36V, 350A).....	123
45	Microestructura del metal base de un acero SAE 1030 soldado por ESW (36V,350A)	123
46	Microestructura de la zona de fusión de un acero SAE 1030 soldado por ESW (40V, 350A).....	125
47	Microestructura de la ZAC cercana a la zona de fusión de un acero SAE 1030 soldado por ESW (40V, 350A).....	125

Pág.

48	Microestructura de la ZAC cercana al metal base de un acero SAE 1030 (40V, 350A)	127
49	Microestructura del metal base de un acero SAE 1030 (40V, 350A)	127
50	Perfiles de durezas a través de la sección transversal de las uniones soldadas de un acero SAE 1030 soldadas por ESW.	129
51	Ensayo no destructivo por ultrasonido de una muestra de acero SAE 1030 soldado por ESW.	133

LISTA DE TABLAS

TABLA		Pág.
Nº		
I	Composición química del metal base Acero SAE 1030 (Ref. FUNASA)...	70
II	Propiedades mecánicas del metal base Acero SAE 1030	70
III	Composición química del metal deposi- tado utilizando un electrodo OK 14.50 y una guía consumible OK 21.32 (Ref. 8)	73
IV	Propiedades mecánicas del metal depo- sitado utilizando un electrodo OK 14.50 y una guía consumible OK 21.32 (Ref. 8)	73
V	Parámetros de soldadura por ESW acero SAE 1030, 28 mm. espesor	82
VI	Condiciones y observaciones de las sol- daduras por ESW (Acero SAE 1030).....	96
VII	Dimensiones de la geometría de las sol- daduras por ESW (Acero SAE 1030).....	107
VIII	Propiedades mecánicas de las soldaduras por ESW (Acero SAE 1030)	131

I. INTRODUCCION

El auge de construcciones metálicas de grandes dimensiones, así como de herramientas de gran capacidad, han forzado la necesidad de que se investiguen o amplien técnicas de construcción existentes con el objeto de obtener procesos rápidos de fabricación, para suplir las necesidades mencionadas.

Actualmente la soldadura ha evolucionado de tal forma que ha permitido, con los diferentes procesos existentes, aliviar en gran parte los problemas que se presentan al realizar grandes construcciones metálicas, cuando se utilizan especialmente uniones empernadas o roblonadas.

Las limitaciones que presentan los diferentes procesos de soldadura, desde el proceso manual al arco eléctrico hasta procesos automáticos, tales como el de arco sumergido para la construcción de represas, puentes, prensas mecánicas y otros, han llevado desde hace unos 30 años, al desarrollo en Rusia de un proceso de soldadura automático llamado soldadura por electroescoria, el cual presenta mayores ventajas para el tipo de construcciones mencionadas.

El trabajo que aquí se presenta tiene dos objetivos fundamentales: el primero es el de iniciar en nuestro medio el estudio del proceso de soldadura por electroescoria aplicado a diferentes aceros estructurales, como una alternativa para la solución de diferentes problemas de soldadura, y el segundo objetivo es el de realizar un estudio y control de la soldadura del acero SAE 1030 de 28 mm. de espesor.

Se inició el trabajo con la puesta a punto del equipo, posteriormente se prepararon muestras con la finalidad de familiarizarse con el proceso además de buscar parámetros de soldadura en base a los cuales se centraría este estudio. Una vez obtenidos los parámetros adecuados con los que se obtuvo una unión soldada libre de fallas, se escogieron parámetros con los cuales se llevó adelante los objetivos de la presente investigación. Realizadas las soldaduras se hicieron ensayos no destructivos por ultrasonido para detectar discontinuidades internas. Se tomaron luego muestras transversales y verticales con la finalidad de realizar mediciones de la geometría de la unión soldada, realizando además con las primeras de ellas ensayos macroscópicos y microscópicos. Se efectuaron además ensayos mecánicos de dureza y evaluación de la resistencia mecánica en toda la unión soldada.

El primer objetivo propuesto se cumplió casi en su totalidad corroborando la teoría del proceso, se pudo comprobar que al aumentar el voltaje, el factor de forma es mayor, indicando esto que se tiene una soldadura con una alta resistencia al agrietamiento. Se comprobó además - que el ancho de la soldadura y la profundidad de la piqueta de soldadura aumenta cuando se aumenta el voltaje.

El segundo objetivo se cumplió en su totalidad. Se obtuvieron soldaduras de calidad demostrando la eficiencia - del proceso. Aunque no se realizaron todos los ensayos - mecánicos usuales debido a la geometría seleccionada, los ensayos de dureza y evaluación de la resistencia mecánica, permiten asegurar que para el caso de usar parámetros de soldadura de 350 amps. y 36 volts. se producen buenas soldaduras en ESW del acero SAE 1030 de 28 mm. de espesor.

Las características metalúrgicas y mecánicas de una unión soldada están dadas por el calor suministrado durante el proceso. El metal base en este estudio presentó cambios - metalográficos de tal forma que su estructura de ferrita acicular (Widmasttaten) en una matriz de perlita fina, se cambió en la zona afectada por el calor a una estructura formada por granos equiaxiales de ferrita en una matriz

de perlita laminar fina (en algunos casos no resuelta). La zona de fusión presentó nuevamente una estructura de ferrita acicular pero con agujas de menor tamaño que las encontradas en el metal base.

Conforme se realizaron soldaduras con parámetros cada vez más elevados, la cantidad de calor suministrado fue mayor, lo que condujo a una menor velocidad de enfriamiento, produciéndose uniones soldadas con menores propiedades mecánicas y un ligero crecimiento de grano.

II. FUNDAMENTO TEORICO

2.1. DESCRIPCION DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ELECTROESCORIA.

El proceso de soldadura por electroescoria (ESW), es un proceso en el cual el calor de una capa de escoria derretida funde un electrodo consumible y los bordes del metal base para obtener una perfecta unión soldada (1). La corriente de soldadura es conducida a través de la capa de escoria derretida por vía electrolítica, obteniéndose el calor necesario para la fusión de la resistencia al paso de la corriente eléctrica, entre el electrodo y la pieza de trabajo (2). La soldadura se efectúa en posición vertical ó en una determinada posición no vertical.

Los procesos principales de ESW son dos: el de guía consumible y el de guía no consumible, cuyos elementos principales se presentan en las figuras 1 y 2 respectivamente.

En la Figura 1 se ilustra el proceso a usarse en este estudio y que es el de guía consumible; en esta figura se observa la fuente de poder, caja de mandos, motor impulsor del electrodo, guía consumible y las zapatas de refrigeración. En este sistema el electrodo

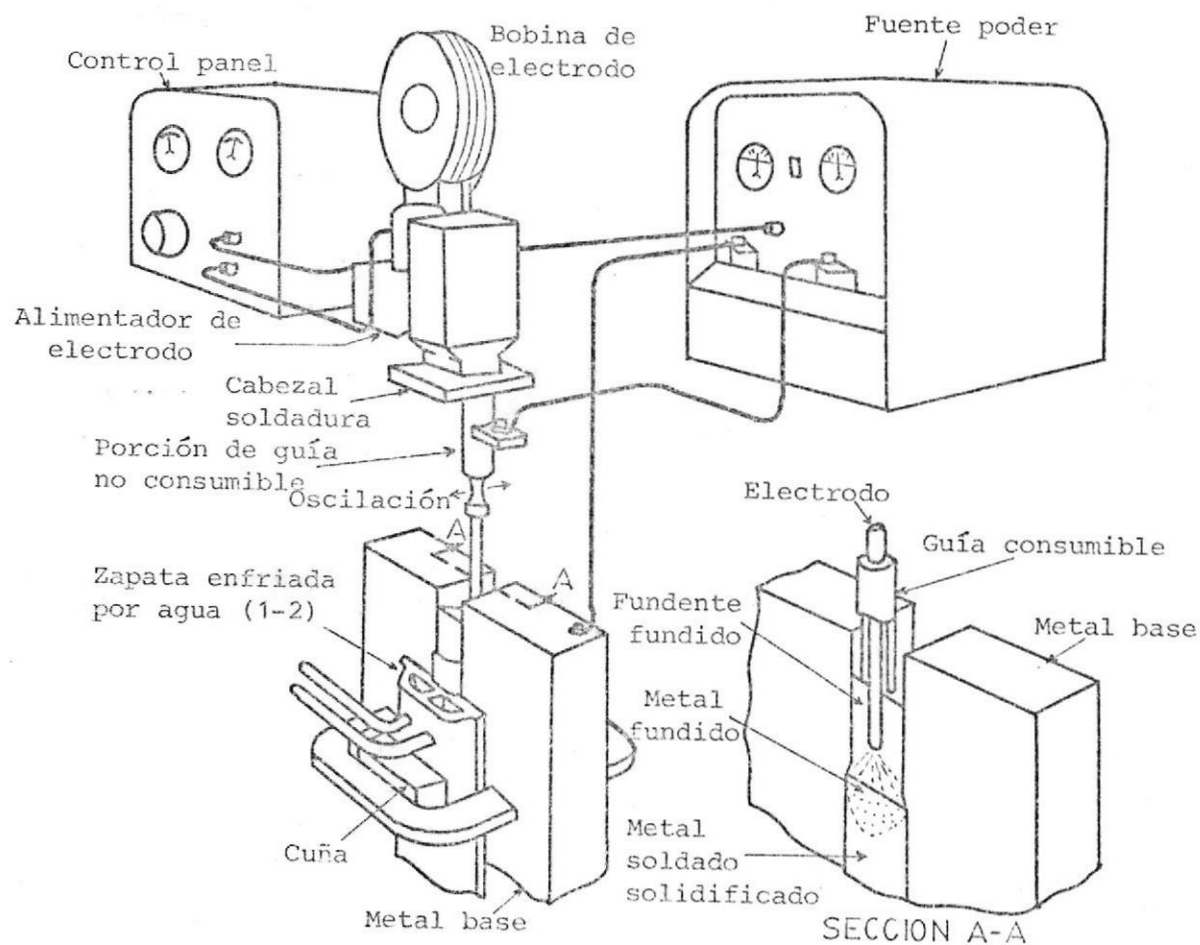


FIGURA 1.- Componentes principales de un equipo para soldadura por electroescoria usando guía consumible (Ref. 1).

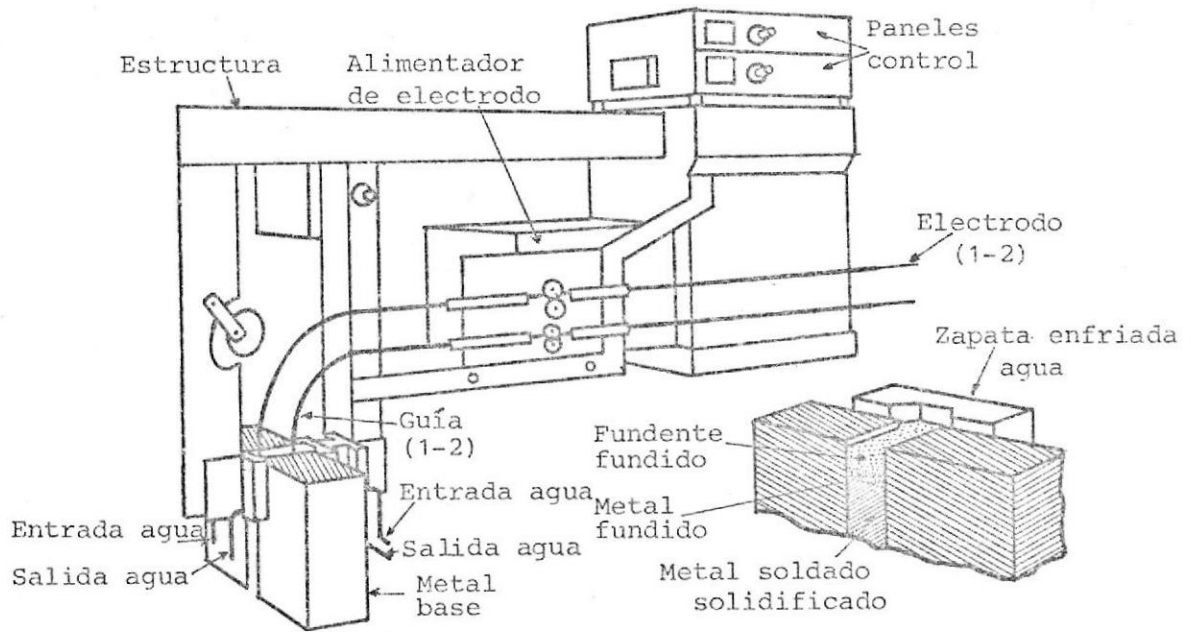


FIGURA 2.- Componentes principales del equipo convencional para soldadura por electroescoria usando guía no consumible (Ref. 1).

es alimentado verticalmente a través de la guía hacia la capa de escoria. En la figura 1 se muestra además una vista ampliada de la soldadura. Al comienzo del proceso el extremo de la guía se encuentra a una cierta distancia del fondo de la pieza, el arco que inicia el proceso se establece entre el electrodo y una bola de lana de acero que sirve de ayuda para este efecto. Cuando el proceso es estable, es decir la capa de escoria ha alcanzado un tamaño adecuado, se extingue el arco y es esta escoria la que continúa derritiendo el electrodo y los bordes a soldarse. El método de ESW es un proceso que se realiza sin interrupciones desde el inicio hasta su terminación. En este proceso la mayor parte del metal de aporte lo proporciona el electrodo de alambre y un 5 a 10% lo aporta la guía consumible (1).

El segundo proceso de ESW, es decir el de guía no consumible utiliza una guía de una aleación de cobre-berilo la cual se mueve hacia arriba a la misma velocidad que la soldadura y las zapatas refrigeradas (1). Este segundo proceso a diferencia del primero, presenta la ventaja de que puede ser fácilmente mecanizado usando una unidad compacta para movimiento vertical. Sin embargo, el método de guía consumible presenta 3 ventajas fundamentales frente al método de guía no consumi-

ble y ellas son: Primero, no se requiere algún mecanismo para detectar la posición de la pileta de escoria y no se requiere proveer de elementos mecánicos necesarios para mover las guías y zapatas retenedoras. Segundo, la geometría de la guía puede ser cambiada conforme se tenga una forma irregular de la unión a soldar, y tercero, composición química de la guía puede ser variada a la del metal depositado (3).

2.2. APLICACIONES DEL PROCESO

Inicialmente el proceso de soldadura por electroescoria se usó para soldar uniones verticales de ciertos componentes donde la soldadura por arco manual no podía ser utilizada. Sin embargo, debido a la alta eficiencia del proceso su uso se ha extendido y ha llegado a constituirse en el método básico para la soldadura de metales de grandes espesores (4). Actualmente el proceso es empleado no solo para la soldadura y acabados, tales como recubrimientos superficiales, sino también para propósitos especiales de fundiciones y lingotes (5). La soldadura por electroescoria es usada en la producción de domos de vapor para calderas y otros recipientes de alta presión (6). Es usada también en la fabricación de estructuras para prensas me

cánicas, martinets, placas bases y cilindros para prensas hidráulicas y alternadores, cascos de buques, marcos de hélices, secciones de puentes y numerosas otras construcciones de uniones verticales (6).

De las diferentes aplicaciones del proceso de ESW, es fácil darse cuenta de la variedad de espesores de metales que pueden soldarse, estando comprendidos estos entre 15 y 914 mm (1) y longitudes que varían de acuerdo a la capacidad del equipo y tamaño de la guía, pudiéndose utilizar uno o varios electrodos con ó sin oscilación (3). Entre las razones principales (además de otras que posteriormente se darán) de aplicación de este proceso, se tiene la elevada deposición de metal (hasta 45 lb/hr por electrodo) así como la poca ó ninguna preparación de bordes.

2.3. ESTUDIO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

Las variables de soldadura son aquellos factores que afectan la operación en sí de la soldadura y las características de la unión resultante. Cuando las variables son seleccionadas adecuadamente se obtiene una soldadura de calidad, es entonces importante comprender el efecto de cada variable sobre las diferentes -

propiedades ó características de la soldadura para comprender mejor el potencial del proceso.

Las variables de soldadura pueden ser divididas en dos grupos o clases (2): aquellas que son pre-seleccionadas a cierto nivel y aquellas que son ajustables durante el proceso. Cuando se presenta una determinada situación, o sea una corrección de cierta característica de la soldadura, debe considerarse en primer lugar la variable - que afecta mayormente a esa característica, esto indica que deben usarse las variables en forma correcta y lógica en cada ocasión para evitar irregularidades. Lo último se reduce a lo siguiente: existen variables de soldadura tanto las ajustables como las pre-seleccionadas que controlan una ó dos características de las uniones y que deben ser adecuadamente escogidas.

A. VARIABLES PRE-SELECCIONADAS

Son aquellas que son fijas para la soldadura de una determinada unión. Para el proceso en estudio, estas son: tipo y tamaño del electrodo, tamaño de la guía, tipo de fundente y zapatas retenedoras (2). Estas variables son seleccionadas de acuerdo al material a soldar y a las propiedades mecánicas requeridas.

A.1. Tipo y tamaño del electrodo

Este depende del metal base ó del posterior tratamiento térmico a la soldadura. Todos los aceros de baja y media aleación, así como los de bajos esfuerzos de tensión, con tienen una cantidad relativamente alta de inclusiones, ex cluyendo por supuesto a aquellos de alta calidad ó alta desoxidación. Por esta razón es necesario incluir en el electrodo desoxidantes para neutralizar el efecto de las impurezas en el metal base. Cuando se hace la selección del electrodo de alambre para soldadura por electroescoria, debe considerarse el factor de dilución con el me- tal base. Normalmente la dilución fluctúa entre el 25 y el 60% del metal base. Esta cantidad de dilución es dependiente de las condiciones de soldadura empleadas y puede ser calculada con la expresión siguiente (2):

$$\text{Dilución} = \text{Areas A} / (\text{Areas A} + \text{Areas B}) \times 100 \quad (\text{Ec. N}^{\circ} 1)$$

para determinar areas A y B ver figura 3.

La dilución puede aumentarse con el incremento de calor añadido. En soldadura por electroescoria al igual que en otros procesos es importante que el análisis del metal depositado sea aproximadamente la del metal base así como también las propiedades mecánicas.

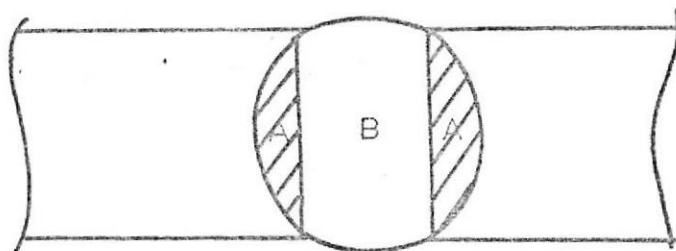
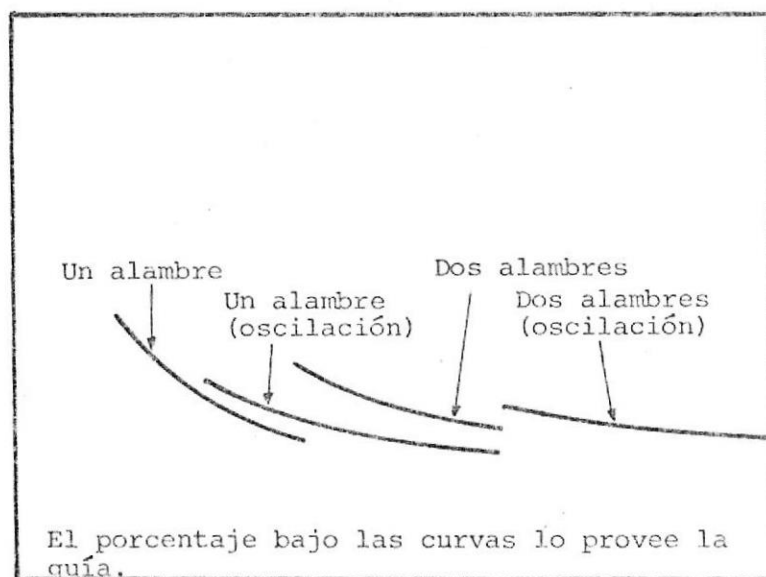


FIGURA 3.- Esquema utilizado para el cálculo de dilución (Ref. 2)

DEPOSICION DE METAL(%)



ESPESOR DE PLACAS

FIGURA 4.- Representación esquemática de la deposición de metal por la guía consumible y electrodo. (Ref. 2).

El diámetro de los electrodos proporcionados por la firma ESAB* varían entre 2 y 5 mm. para rangos de corriente entre 300 y 600 amperios. Con respecto al tamaño del electrodo, la mayor razón de deposición se obtiene para un electrodo de 3,5 mm.

En la figura 4 se presenta a manera de información general una relación esquemática de la deposición en ESW para un electrodo de la firma Hobart*. Actualmente (2) se han hecho diferentes investigaciones referente al recubrimiento del electrodo de alambre usado en electroescoria.

Problemas ocurren debido a la fusión del extremo la guía que se combina con el revestimiento de cobre de los electrodos convencionales. Este material forma una soldadura, la cual asciende por efecto de capilaridad hasta el diámetro interior de la guía y baja la temperatura, debido a la formación de un puente conductor entre el electrodo de alambre y el diámetro interior de la guía, la cual crea problemas en la alimentación del alambre. Por esta razón es necesario utilizar un electrodo recubierto con una película preservativa y lubri

* ESAB y HOBART son fabricantes de equipos y materiales de soldaduras.

cante. En el Apéndice I, se muestra además la forma de calcular el consumo de electrodo requerido - para una unión determinada.

A.2. Tamaño de la Guía

De la misma manera que el electrodo, la guía consumible se derrite sobre el baño de escoria y elimina de esta manera la necesidad de un mecanismo de viaje vertical del cabezal de soldadura. Esto como se puede imaginar evita muchas complicaciones asociadas con el proceso.

La primera función de la guía es la de alinear el electrodo dirigiéndolo a la unión a soldar, dicha guía lleva la mayoría de la corriente de soldadura y la transfiere al electrodo de alambre justo sobre el baño de escoria. Las guías consumibles pueden ser placas, rodillos o tubos los cuales tienen una canal para el paso del electrodo a través de ellas (6). En este trabajo fueron suministradas por ESAB, y consisten en (7): tubos sin costura de pared gruesa generalmente de un acero SAE 1018 que llevan un revestimiento colocado a presión de espesor tal que mantiene constante la profundidad del

baño de escoria; siendo del tipo básico para ambas corrientes. El revestimiento sirve también como un limpiador de la soldadura, de mejor efecto incluso que las escorias ácidas o de rutilo (7). Este recubrimiento es además un aislador que se funde para dar un baño de escoria con propiedades adecuadas tales como: viscosidad, conductividad eléctrica, punto de ebullición y tensión superficial. La cantidad de escoria en el proceso por ESW es pequeña y sus propiedades metalúrgicas no son tan importantes como en soldadura por arco sumergido. El aislamiento además impide que la guía se ponga en contacto con las zapatas refrigeradas ó con los bordes a unirse.

Las guías se designan por el diámetro interior en mm. y por longitud en cm.

A.3. Tipo de Fundente

El fundente es una parte importante en ESW, el cual realiza las mismas funciones que el revestimiento en los electrodos en los procesos manuales. Sin embargo debe cumplir otras funciones tales como:

a. Proveer el calor para derretir el electrodo, guía

y metal base, transmitiendo la corriente.

- b. Proteger el metal fundido de la atmósfera.
- c. Limpiar el metal soldado depositado y
- d. Proveer una operación estable.

El fundente debe poseer además las siguientes características (2):

- Resistencia eléctrica.- Debe ser ésta alta para generar la cantidad de calor suficiente para fundir el electrodo y el metal base. Sin embargo no debe ser demasiado elevada que produzca un arqueo.
- Viscosidad.- Debido a la alta temperatura de trabajo, 1650°C, aproximadamente el fundente debe tener buena viscosidad y distribución de calor uniforme.
- Gravedad específica.- La densidad del fundente debe ser tal que se mantenga sobre el metal durante la soldadura, no dificultando la solidificación del metal.
- Temperatura de Fusión.- Debe ser mayor que la del

metal base, mientras que el punto de ebullición debe ser lo suficientemente alto para que no existan pérdidas de elementos componentes del fundente hacia el exterior en el momento de la soldadura, de tal forma que cambie las características de operación.

- Estabilidad.- Debe ser lo suficientemente estable en un amplio rango de parámetros de soldadura, protegiendo el metal fundido de la atmósfera.
- Inerte.- El fundente derretido debe ser razonablemente inerte para no cambiar el análisis del metal depositado, pero debe desoxidar y librar el metal de impurezas.

Los fundentes utilizados en ESW son generalmente compuestos de Si, Mn, Pb, Cu, Ca, mucho fluoruro de Ca (1). Se conoce que el calor de soldadura es gobernado en gran parte por la profundidad del baño de escoria. Una profundidad excesiva disipa mucho calor causando posiblemente falta o incompleta fusión de las esquinas de la soldadura (2). En cambio, una profundidad del baño poco profundo puede subir excesivamente el calentamiento y derretir la guía sobre la

superficie causando problemas en la alimentación del alambre (2). En general, para todos los espesores de placas y condiciones de soldadura, la profundidad del baño es mantenida constante entre 25,4 mm. y 38, 1 mm. Sin embargo, es importante mantener este rango y ocasionalmente debe añadirse fundente, pudiendo variar la profundidad entre 25,4 y 50,8 mm. sin que afecte la calidad de la soldadura.

A.4. Zapatas retenedoras

Sirven para mantener el metal derretido así como el fundente entre las partes a ser soldadas. En forma general existen dos tipos de zapatas usadas en electroescoria, estas son: zapatas refrigeradas y zapatas sólidas (llamadas también zapatas calientes). En las Figura 5a, b se muestran esquemas de los dos tipos de zapatas mencionadas.

Actualmente se hacen aplicaciones con otros tipos de zapatas como los bloques macizos de cobre que no usan agua para el enfriamiento (1). Las llamadas zapatas calientes son del mismo material a soldar. Según el tipo de unión a realizarse, es posible -

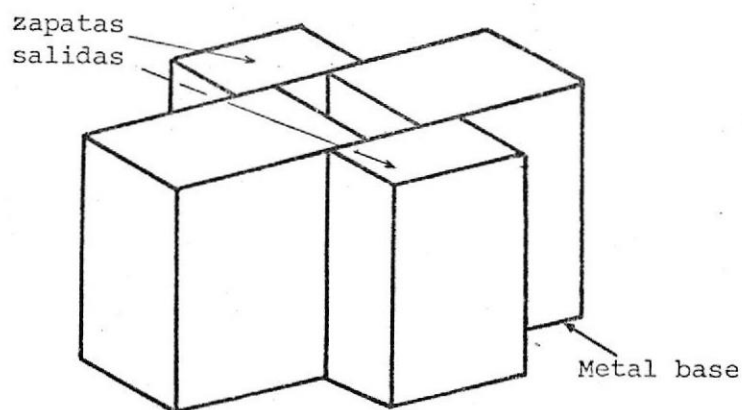


FIGURA 5a.- Representación gráfica de una zapata sólida (ó caliente) (Ref. 1)

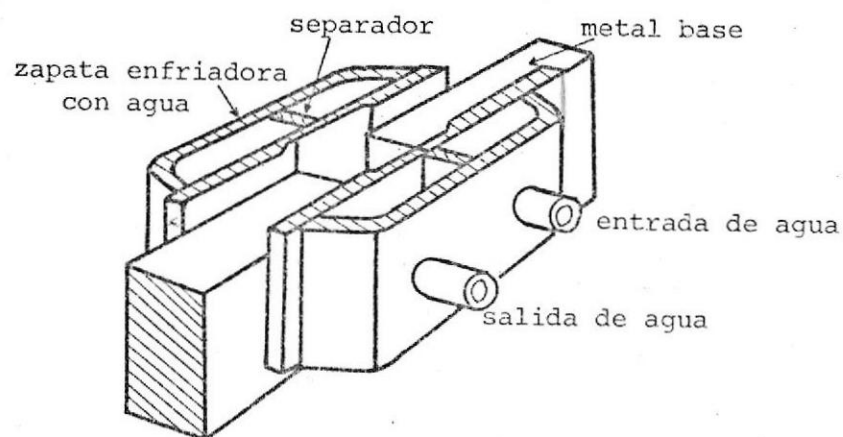


FIGURA 5b.- Representación gráfica de una zapata de Cu enfriada por agua (Ref. 1).

construir uno u otro tipo de zapatas, sean refrigeradas o calientes.

B. VARIABLES AJUSTABLES

Son utilizadas para controlar el proceso de soldadura una vez que las variables pre-seleccionadas han sido establecidas. Estas variables controlan la formación de la soldadura, la velocidad de fusión, la velocidad de deposición y la resistencia mecánica de la soldadura. Dichas variables son: voltaje y corriente, las que pueden ser medidas y ajustadas continuamente, asegurando una buena calidad de la unión (2).

En ESW la corriente está relacionada en forma directamente proporcional con la velocidad de alimentación del electrodo. Ver figura 6. En esta figura se observa la relación lineal entre corriente y velocidad de alimentación del electrodo. Según Paton (6) esta relación se mantiene, aunque a velocidades de alimentación elevadas la proporcionalidad es menos marcada. Esto que se ha mencionado nos lleva a la siguiente conclusión: al referirnos a la variación de la corriente en ESW, nos estamos refiriendo implícitamente a la variación de la velocidad de alimentación del electrodo. Las va

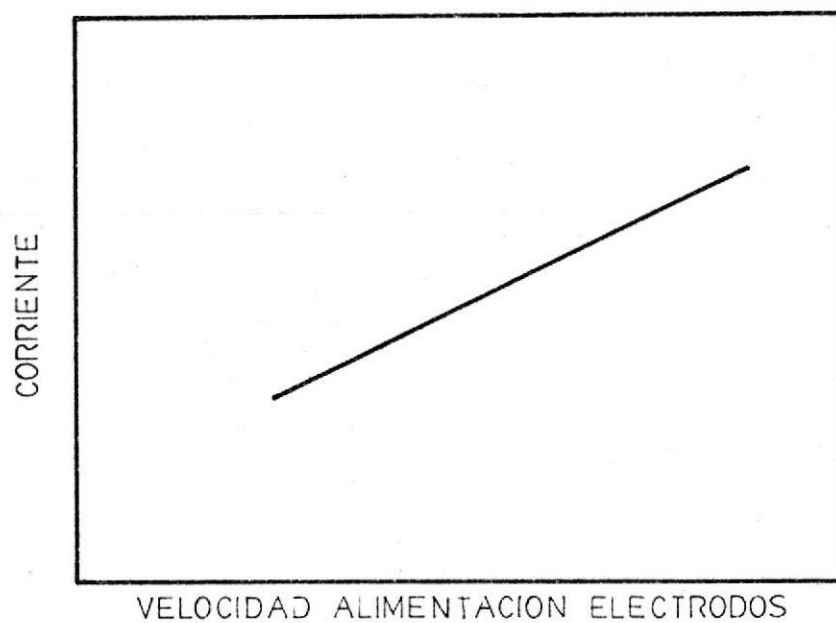


FIGURA 6.- Representación esquemática de la variación lineal entre corriente y veloc. Alim. Elec. (Ref. 3).

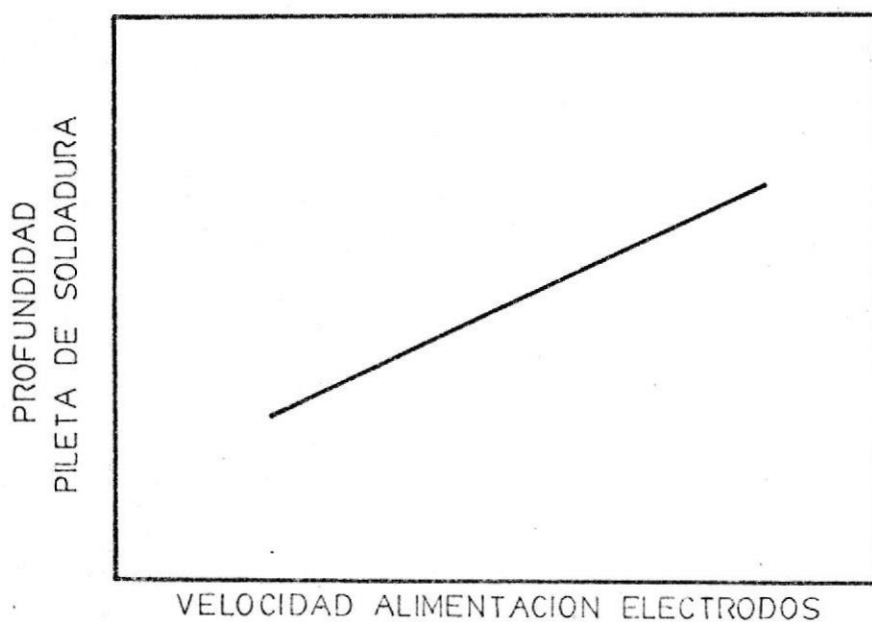


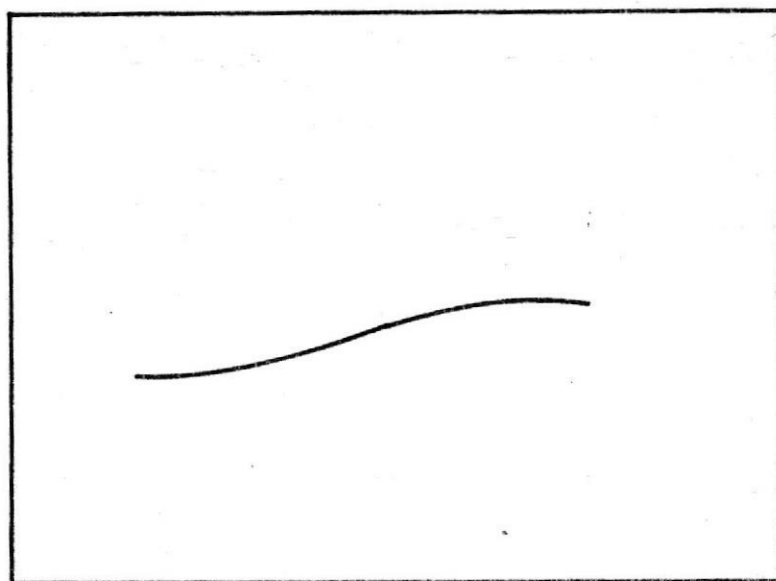
FIGURA 7.- Representación esquemática de la variación de la profundidad de la pileta de soldadura en función de la velocidad. alim. del electrodo (Ref.3).

riables que gobiernan la forma de la pileta en ESW son justamente las llamadas variables ajustables: voltaje y corriente. En las figuras 7 y 8 se muestran las variaciones de la forma de la pileta de soldadura con respecto a las variables ajustables corriente (velocidad de alimentación del electrodo) y voltaje respectivamente.

En la figura 7 se observa como varía la profundidad de la pileta de soldadura al variar la velocidad de alimentación del electrodo. El aumento de dicha profundidad con la corriente de soldadura se debe a dos razones: Primero, una alta corriente para un voltaje dado produce una pequeña garganta entre el electrodo y la pileta de metal, la cual concentra la fuente de calor en el fondo de la pileta de escoria. Segundo, la cantidad de calor transferido directamente a la pileta fundida por las gotas de metal supercalentado, aumenta con el aumento de corriente y por lo tanto con la velocidad del electrodo.

En la figura 8 se presenta la relación entre la profundidad de la pileta de soldadura con el voltaje. Se observa poca variación en dicha profundidad cuanto el vol

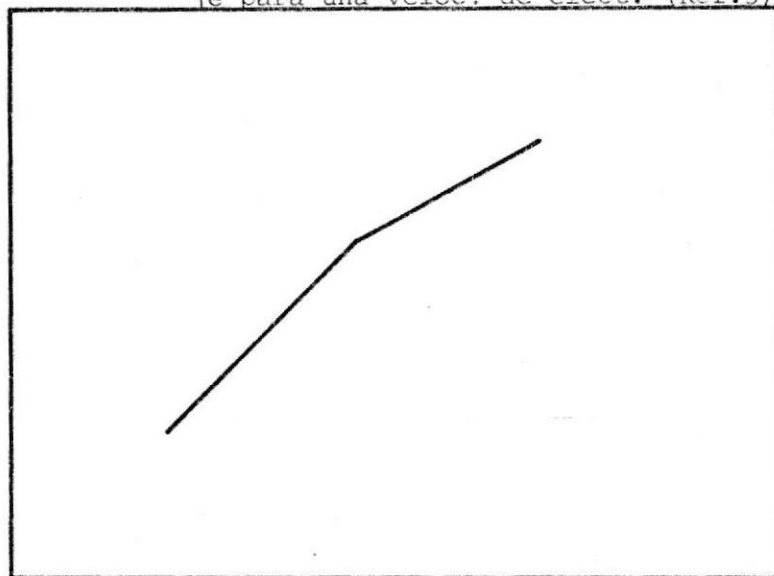
PROFUNDIDAD DE LA
PILETA DE SOLDADURA



VOLTAJE

FIGURA 8.- Representación esquemática de la variación de la profundidad de la piqueta de soldadura en función del voltaje para una veloc. de elect. (Ref.3)

ANCHO DE LA SOLDADURA



VOLTAJE

FIGURA 9.- Representación esquemática de la variación del ancho de la soldadura con el voltaje para una veloc. de electrodo (Ref. 3).

taje. Se observa poca variación en dicha profundidad cuando el voltaje aumenta. El efecto del voltaje de soldadura en este caso se relaciona con la variación del voltaje de salida de la fuente utilizada, cuando se mantiene una velocidad de soldadura constante (6).

En la Figura 9, se representó la variación del ancho de la soldadura con respecto al voltaje. Se observa un aumento pronunciado en las regiones de voltaje medio, mientras que para voltajes altos el aumento en el ancho de la soldadura es menor. Esta variación se debe a que la cantidad de calor de entrada para un determinado espesor de material y número de electrodos utilizados, no es suficiente para aumentar el ancho de la zona de fusión (ancho de la soldadura). Los límites de voltajes menores están limitados por la presencia de falta de fusión y por el desarrollo de un proceso de soldadura inestable, ocurriendo cortocircuitos entre el extremo del electrodo y la pileta de soldadura, lo cual causa chisporroteos. Los límites de voltajes elevados producen también chisporroteos además de falta de fusión (6).

En la figura 10 se presenta la variación del ancho de

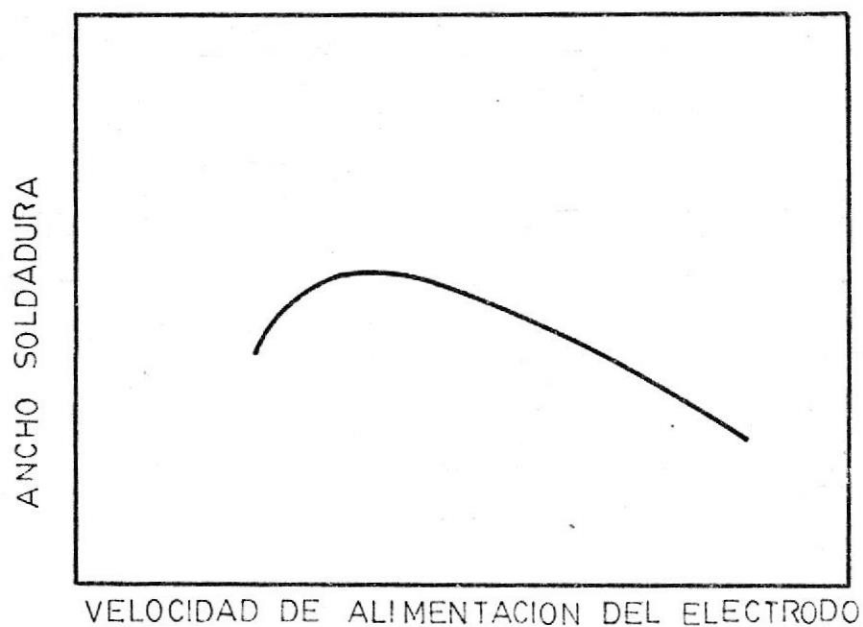
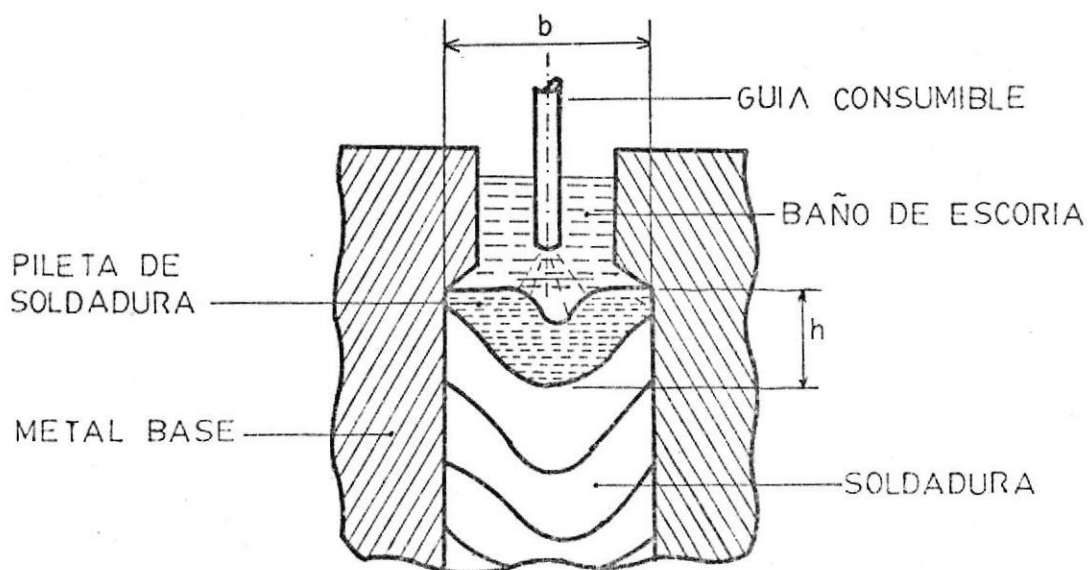


FIGURA 10.- Influencia de la veloc. de alim. del electrodo sobre el ancho de la soldadura (Ref. 3)



$$\text{Factor de forma} = \Psi = \frac{b}{h}$$

FIGURA 11.- Representación esquemática de una sección vertical de una muestra soldada por ESW mostrando el factor de forma (Ref. 7).

la soldadura en función de la velocidad de alimentación del electrodo. Se observa que para altos valores de corriente, la penetración (es decir un mayor ancho de la soldadura) está en razón inversa a la velocidad de alimentación. Esto es debido a la menor influencia que ejercen valores altos de corriente sobre la velocidad de alimentación del electrodo.

En ESW el factor de forma se define como el cuociente entre el ancho de la piletta a su profundidad. En la figura 11, se presenta una disposición o arreglo durante la soldadura por ESW y las variables que intervienen para determinar el factor de forma. El factor de forma se calcula con la expresión:

$$\psi = b/h \quad (\text{Ec. N}^{\circ} 2)$$

donde:

b = ancho de la soldadura

h = profundidad de las piletas

La figura 12 presenta la variación del factor de forma con la velocidad de alimentación del electrodo y el voltaje. Se observa que aumentando el voltaje se aumenta el factor de forma, lo que es lógico puesto - que el ancho de la soldadura aumenta en un valor mayor

con respecto a la profundidad de la pileta, para un voltaje dado. Se observa además que el factor de forma disminuye con la velocidad de alimentación del electrodo, justificándose esto en vista de que el ancho de la soldadura disminuye a partir de cierto valor de la velocidad de alimentación y además, que la profundidad de la pileta va siempre en aumento con respecto a dicha velocidad de alimentación del electrodo.

El factor de forma se define o describe como una medida del patrón de enfriamiento por el cual la soldadura solidifica (2). El factor de forma indica también la manera como los granos desde los lados opuestos se unen en la línea central de la soldadura formando un ángulo llamado ángulo de encuentro. La figura 13, representa la disposición de la unión de los granos resultantes en ESW, y el correspondiente ángulo de encuentro. Dicho ángulo determina el que una soldadura tenga una alta o baja resistencia al agrietamiento. Experimentalmente (2) se ha demostrado que un ángulo de encuentro mayor de 90° da como consecuencia una soldadura de baja resistencia al agrietamiento, mientras que un ángulo menor de 90° da una soldadura de mayor resistencia al agrietamiento. Estos conceptos se ilus

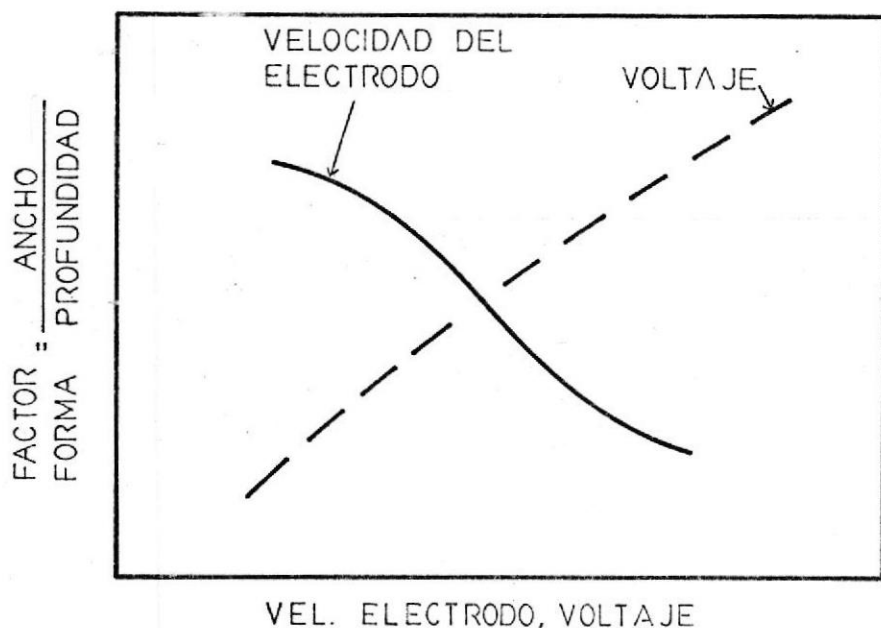


FIGURA 12.- Ilustración gráfica del efecto del voltaje y velocidad del electrodo sobre el factor de forma (Ref. 3).

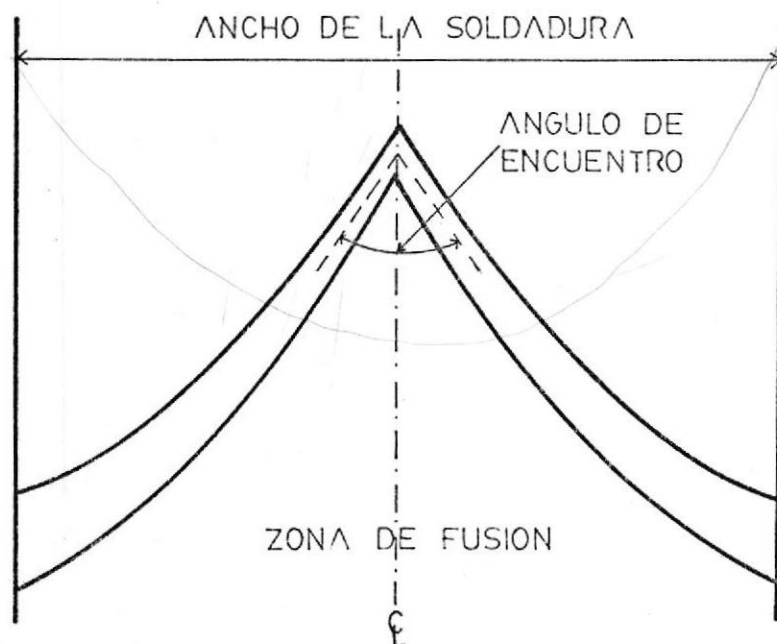


FIGURA 13.- Representación esquemática de una sección vertical de la soldadura mostrando el ángulo de encuentro (Ref. 3).

tran en las figuras 14 a y b respectivamente. En ESW se presentan al igual que en soldadura por arco manual los siguientes defectos:

- Porosidad.- Se forma debido a la presencia de humedad en el fundente o por una fuga de agua en las zapatas retenedoras del lado de la unión.
- Falta de fusión.- Se debe al uso de una corriente muy baja, puede ser causada también por insuficiente oscilación del electrodo y además por una excesiva profundidad de la pileta de escoria.
- Socavadura.- Es quizás lo menos serio en defectos en ESW. Este defecto es indicio de fusión completa y probablemente una unión de calidad; sin embargo, en casos donde la resistencia a la fatiga es un factor importante, es necesario reparar la falla por los métodos usuales de soldadura. La socavadura es causada por un voltaje muy alto generalmente.
- Agrietamiento.- Puede ser causado por una corriente excesivamente alta y por contracciones durante el enfriamiento de la soldadura.
- Inclusiones.- En ESW son mu raras. Generalmente se

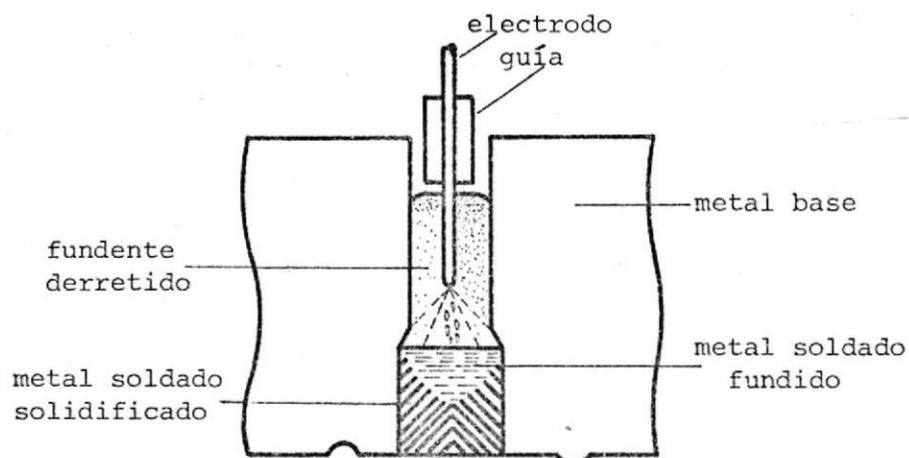


FIGURA 14a.- Representación de una soldadura con bajo factor de forma (ángulo obtuso, poca resistencia al agrietamiento) (Ref. 2).

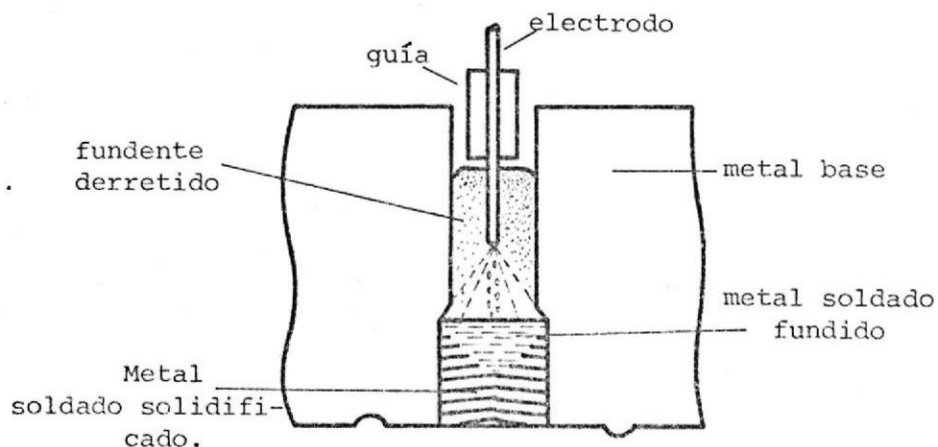


FIGURA 14b.- Representación de una soldadura con alto factor de forma (ángulo agudo, alta resistencia al agrietamiento) (Ref. 2).

deben a materiales no metálicos en la superficie del metal base, o en placas laminadas a soldarse por este método.

2.4. ESTUDIO DE LA UNION SOLDADA

Hasta ahora se han estudiado las variables del proceso de ESW. En esta parte se analizará el efecto de esas variables sobre la soldadura resultante. En ESW, el calor suministrado durante el proceso es el resultado del paso de la corriente a través de la pileta de escoria. La cantidad de calor Q , es determinada por la siguiente expresión (3):

$$Q = V \times I \times t \quad (\text{Ec. N}^\circ 3)$$

donde:

V = voltaje

I = corriente

t = tiempo de duración de la soldadura

Este calor es la principal fuente de entrada de energía, aunque existen otras fuentes producto de las reacciones químicas entre metal y escoria, pero que pueden ser despreciadas (6). Aparentemente se podría pensar que toda la pileta de escoria derretida actúa como fuente de ca-

lor, pero en realidad no ocurre esto, pues solo una limitada región de la escoria calentada, contigua al extremo del electrodo, actúa como tal y es en esta región en donde toda la energía eléctrica es convertida en energía térmica.

La distribución de calor en ESW varía de acuerdo a las condiciones de soldadura. En la figura 15 se ilustra un balance de calor que ocurre durante la soldadura por ESW en un acero de 90 mm. de espesor (6). Se muestra claramente que la mayor parte del calor se transfiere hacia el metal base. A pesar de la alta transferencia mencionada, el consumo de energía por metro de soldadura es considerablemente menor en soldadura por electroescoria que en el proceso por arco sumergido. Esto se debe a que el volumen de metal depositado en ESW es menor para una determinada unión principalmente porque las caras del metal base no requieren biselarse. Se debe considerar también que el calor que va hacia el metal base no se pierde, sino que sirve para precalentamiento del mismo.

Se ha hablado ya de la evolución del calor en ESW; ahora se entra a estudiar en forma más detallada la distribución de calor en el metal base, o lo que es lo mis

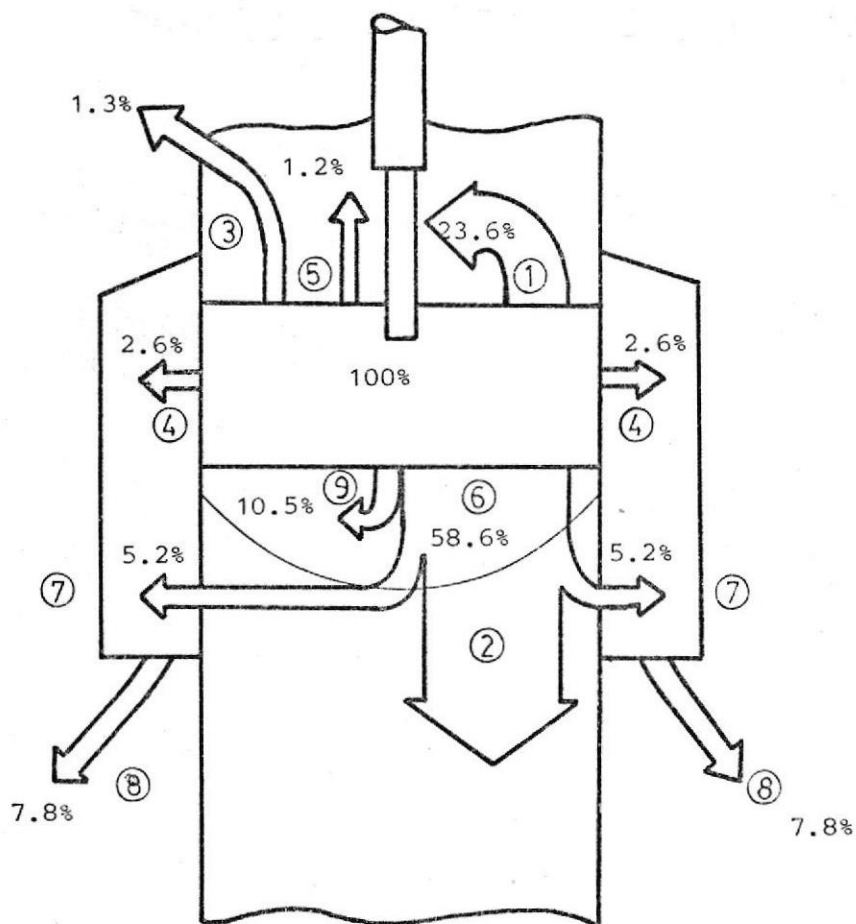


FIGURA 15.- Representación esquemática de un balance de calor (acero de 90 mm. de espesor) (Ref. 6).

(1) Calor consumido en derretir el electrodo, (2) calor conducido hacia el metal base, (3) calor consumido en precalentar las caras por radiación desde la pileta de escoria, (4) pérdida de calor desde la pileta de escoria calentando las zapatas retenedoras, (5) calor perdido por radiación, (6) calor consumido en derretir el metal base, (7) pérdida de calor desde la pileta de soldadura calentando las zapatas, (8) total de pérdidas de calor desde la pieza calentando las zapatas, (9) calor consumido en sobrecalentar la pileta de soldadura.

mo el ciclo térmico a que se somete el material al ser soldado y que provocará la formación de las diferentes zonas que se presentan en la soldadura. En ESW el ciclo térmico del metal en la zona afectada por el calor es el que en mayor grado determina la estructura y calidad de la unión soldada. Bajo ciertas condiciones de soldadura, el calor que se acumula en la zona de fusión se difunde muy rápidamente debido al intenso flujo convectivo de metal y escoria derretidos. Esto conduce a la dispersión de la fuente de calor sobre toda la superficie de contacto entre las fases sólida y líquida. Las relaciones analíticas que gobiernan el proceso de soldadura son muy complejas para usos prácticos y no serán razón de este estudio. El ciclo térmico de los puntos en la zona afectada por el calor (ZAC) en ESW pueden ser solo ensayadas por métodos indirectos, este ciclo depende no solo de las condiciones de soldadura sino también de la técnica empleada. En la figura 16 se muestra el ciclo térmico para un acero, tanto para un proceso al arco eléctrico como para un proceso de ESW. Se observa que existe una velocidad de enfriamiento lenta para el proceso en estudio, lo que implica que el calentamiento del metal base es menos concentrado que en el proceso al arco eléctrico. Esta característica del ciclo térmico reduce considerada

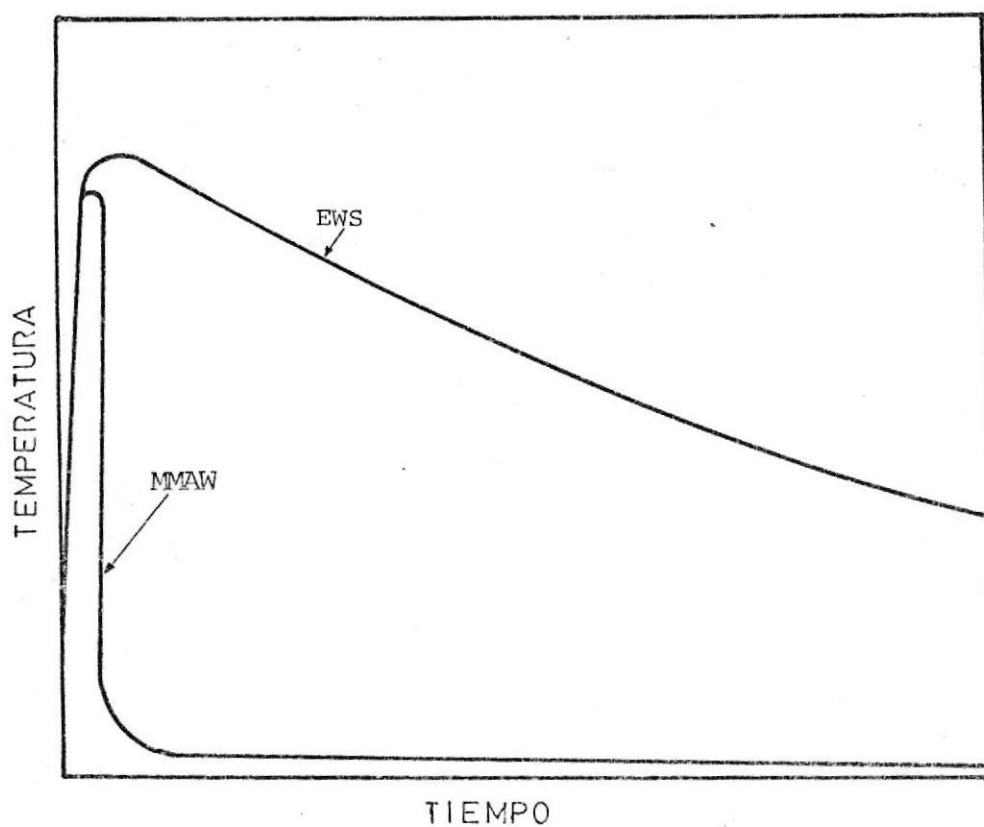


FIGURA 16.- Comparación del ciclo térmico en los procesos de soldadura manual al arco eléctrico y por electroescoria (Ref. 6).

blemente el riesgo de desarrollo de agrietamientos y regiones endurecidas en la zona de soldadura, cuando el acero soldado se enfría al aire.

Realizado este breve análisis se describirán las zonas que se presentan en una unión soldada ESW. Dichas zonas representadas en la figura 17 son: la zona de fusión, la ZAC y el metal base. La zona de fusión es aquella resultante de la solidificación de la pileta de soldadura y cuya característica principal es el de una estructura columnar similar al de una fundición. La ZAC es aquella zona junto a la zona de fusión donde parte de los granos del metal base son licuados durante el proceso de soldadura y otros son solo afectados por la temperatura alcanzada. Finalmente, se tiene el metal base el cual no sufre modificaciones durante el proceso de ESW.

A. ZONA DE FUSION

En la figura 17 se observa un esquema de la zona central ó zona de fusión (ZF) de la unión soldada, la que se caracteriza por una solidificación completa similar a una fundición, o sea que presenta una estructura columnar con orientación radial oca

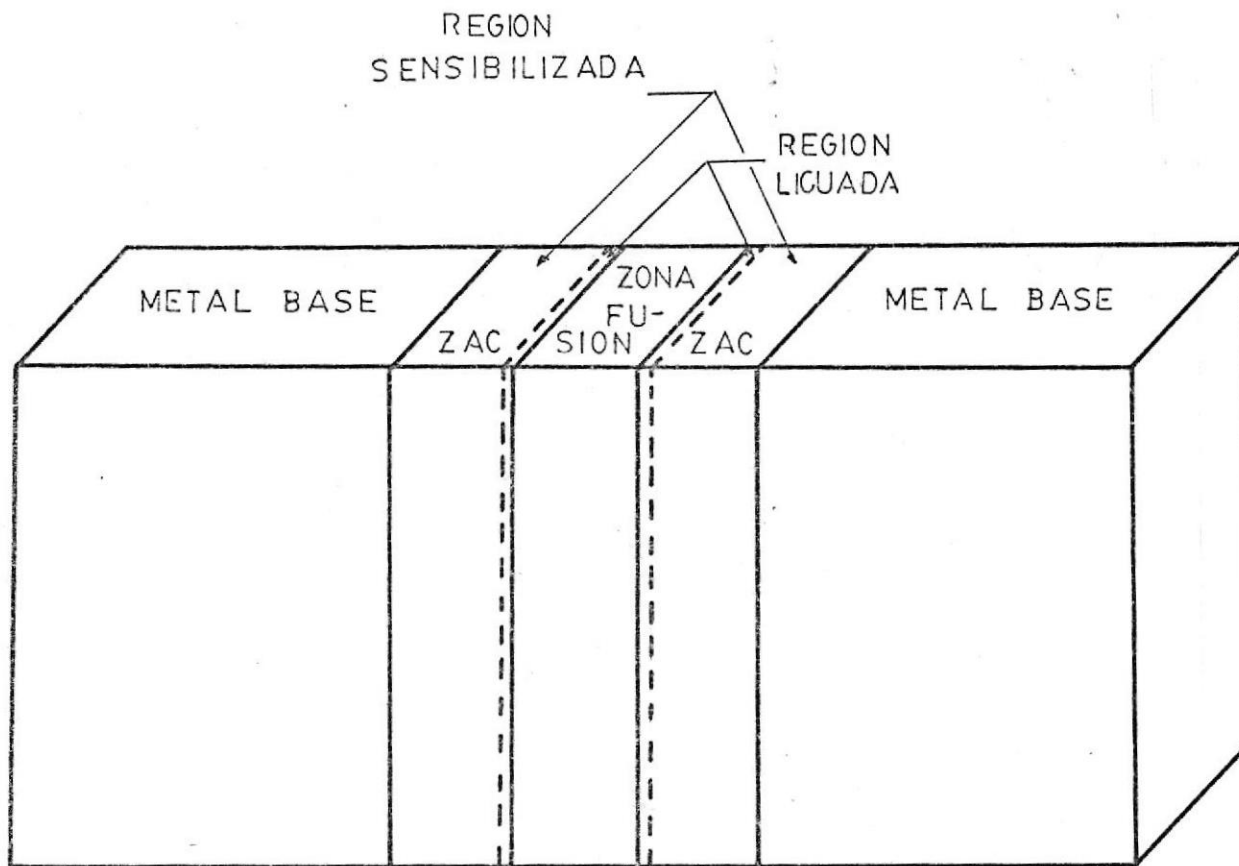


FIGURA 17.- Representación de una unión soldada por ESW y las diferentes regiones que se originan (Ref. 3).

sionada por la forma de remoción de calor (hacia la periferia), y además por un grano de tamaño relativamente grande solidificado desde un gran volumen de metal enfriado a una velocidad muy baja. La estructura de la zona de fusión es en gran parte determinada por la composición química y las condiciones que gobiernan la cristalización primaria de la pileta o baño de soldadura. Las siguientes características son típicas de la cristalización primaria de la pileta de soldadura en ESW (6).

1. Un considerable volumen de metal líquido el cual se enfría lentamente resultando un incremento en el tamaño del grano.
2. Una remoción uniforme de calor sobre toda la periferia de la soldadura determina la orientación radial del crecimiento del cristal (de las caras de la soldadura hacia el centro).
3. La presencia de un volumen considerable de metal líquido y escoria sobre el crecimiento de cristales facilita la desgasificación de la pileta.

La cristalización de la pileta de soldadura comienza desde los granos parcialmente fundidos del metal

base y de otros que crecen alrededor de éstos orientándose hacia el centro en dirección contraria al flujo de calor. La cristalización de la pileta como en otros procesos de soldadura por fusión es un proceso periódico (no uniforme).

La estructura y dimensiones de los cristales en ESW dependen principalmente de las condiciones bajo las cuales el metal solidifica, estas condiciones son determinadas por los siguientes factores:

1. La temperatura de la pileta de soldadura y el tiempo de permanencia del metal a esta temperatura.
2. La intensidad y dirección del calor removido.
3. La intensidad de la agitación del metal líquido debido a las corrientes convectivas, fuerzas electromagnéticas y movimientos de las fuentes de calor.
4. La composición del metal soldado y la presencia de impurezas y aglomerados insolubles.

El número de factores que tienen influencia en las condiciones de cristalización y que consecuentemen

te afectan la estructura y tamaño de grano del metal sólido son muchos y es realmente difícil interpretar todos ellos.

Actualmente no existe una teoría de cristalización que permita predecir la estructura de la unión soldada, lo que hace que se dependa de datos empíricos obtenidos de análisis de macrosecciones cortadas - de soldaduras realizadas bajo diferentes condiciones (6).

En ESW de aceros estructurales de baja aleación, la estructura de la zona de fusión es extremadamente variable. Se pueden distinguir cuatro tipos de estructuras diferentes (6).

En el primer tipo de estructura de soldadura aparecen dos zonas definidas, la primera que se observa en la figura 18a está compuesta de cristales columnares bastos (designados por 1 en la figura) localizados en la periferia de la fusión. En esta zona los cristales crecen principalmente en la dirección del flujo de calor. Como la remoción de calor se hace en la zona de cristales bastos, esta se hace cada vez más retardada y a una cierta distancia

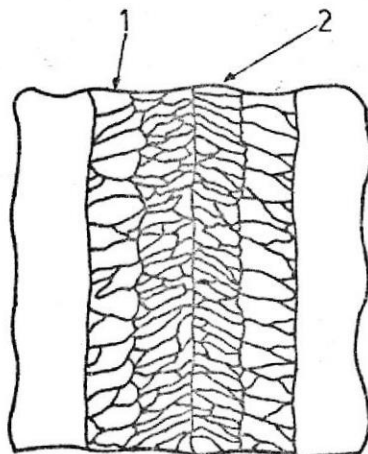


FIGURA 18a.- Representación esquemática de la estructura Tipo I (Ref. 6)

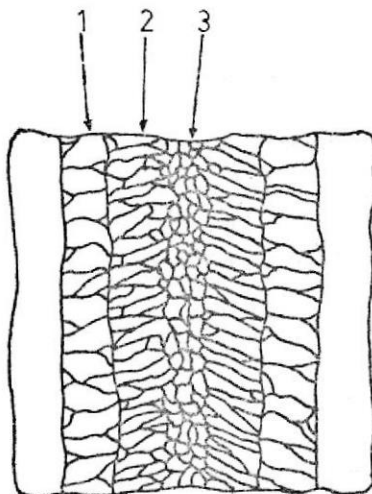


FIGURA 18b.- Representación esquemática de la estructura Tipo II. (Ref. 6)

de la línea de fusión, los cristales columnares bastos se transforman en cristales mas refinados que es la segunda zona que se presenta en el primer tipo de estructura que se estudia. Esta segunda zona se la llama también zona de cristales columnares finos. El ancho de estas zonas varía de acuerdo a la composición de la soldadura, temperatura de la pileta de soldadura, intensidad y dirección de la remoción de calor y forma de la pileta de soldadura. Un aumento en los contenidos de C y Mn en el metal soldado aumenta el ancho de la primera zona. Una corriente - alta aumenta la temperatura de la pileta, aumentando el sobrecalentamiento del metal y reduce la zona de cristales columnares bastos. Si la velocidad de enfriamiento disminuye el ancho de la zona basta es menor. Dependiendo del factor de forma de la pileta de soldadura, los cristales crecen radialmente y sus extremos concurren a tope, ver figura 19 a, en ángulo obtuso figura 19b ó en ángulo agudo figura 19c. Los cristales pueden crecer longitudinalmente y se alinean en la dirección del eje de la soldadura concurrendo desde sus caras laterlaes, figura - 19 d. La diferencia entre las zonas basta y fina de los cristales columnares se reflejan en las propiedades mecánicas.

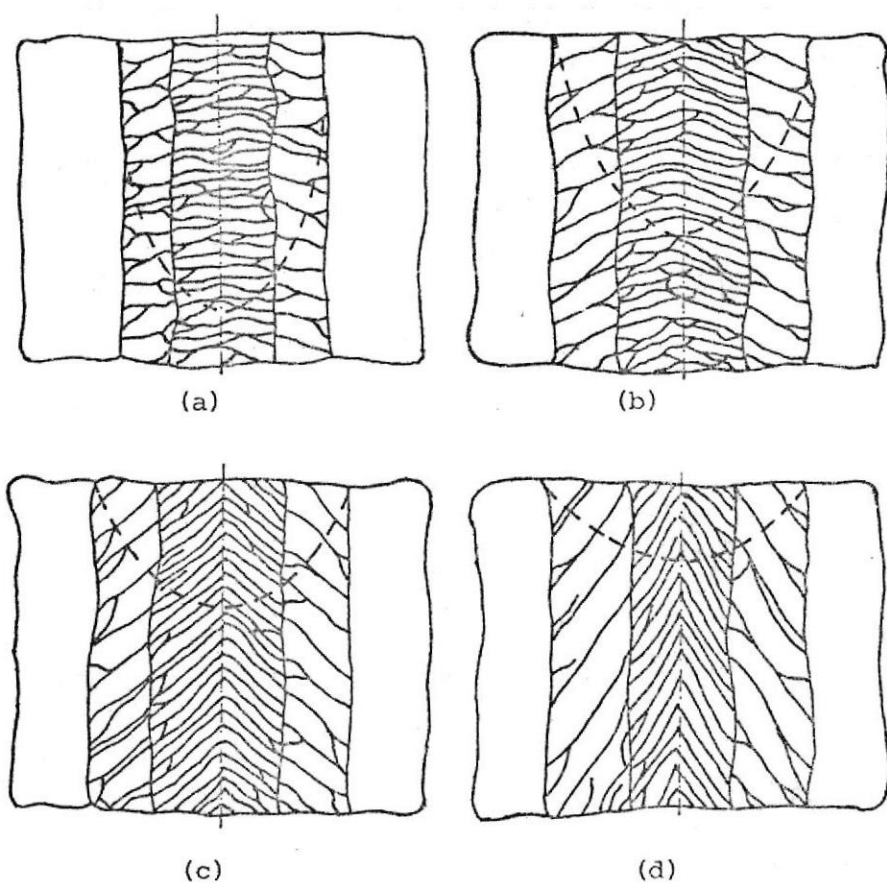


FIGURA 19 a, b, c, d.- Variación en la orientación de cristales columnares como resultado de la forma de la pileta de soldadura: (a) Unión a tope de los cristales (factor de forma 0.8); (b) cristales formando ángulo obtuso (factor de forma 1.5); (c) cristales formando ángulo agudo (factor de forma 2.0); (d) Unión de cristales desde las caras laterales (factor de forma 3.0). (Ref. 6).

El segundo tipo de estructura de zona de fusión que se encuentra en ESW, se presenta en la figura 18 b, Esta figura muestra tres zonas de cristalización. La primera zona de cristales columnares bastos (1), la segunda zona de cristales columnares finos (2), y la tercera zona de cristales equidimensionales (3). Esta última zona es de 4 - 8 mm. de ancho y no penetra el metal base. La presencia de esta zona indica que el enfriamiento de la sección transversal de la pileta de soldadura es considerablemente más lenta. El segundo tipo de estructura se presenta cuando se sueldan aceros estructurales con un porcentaje de carbono mayor que 0,35 y utilizando corrientes elevadas, algunas veces se presentan fisuras en la zona de cristales finos pero sin penetrar en la zona de cristales equidimensionales. La resistencia a las fisuras intergranulares depende de la orientación de los cristales finos.

El tercer tipo de estructura presenta una única zona de cristales columnares bastos, los cuales no poseen una alta resistencia de la soldadura al fisuramiento intergranular. Una de las características de estas soldaduras es la uniformidad de propiedades mecánicas en toda la sección. Este tipo de estructura se pre-

presenta cuando se suelda aceros de varios grados con voltajes y corrientes bajos en grandes espesores de metal por electrodo.

En la estructura del cuarto tipo, se observa una sola zona de cristales finos orientados de la línea de fusión al eje de la soldadura. Las estructuras de este tipo tienen propiedades mecánicas uniformes a través de toda la sección. Se las observa cuando existe poca penetración en el metal base en componentes de pequeña sección y cuando el proceso es interrumpido, además cuando pequeñas cantidades de C y Mn existen en el metal soldado.

Las zonas de cristales columnares basta, fina y equidimensional son formadas por grupos de dendritas, distinguiéndose entre ellas el que la zona basta está desprovista de ramales. Las soldaduras del tipo I y II son de una estructura ferrítica-perlítica widmanstatten, mientras que el tercer tipo posee una estructura de perlita fina laminar. En las soldaduras del primer y segundo tipo a una cierta distancia de la línea de fusión, los cristales bastos se transforman en finos (6) y las estructuras del cuarto tipo son ferríticas-perlíticas, donde la ferrita está distribuída en

forma de red en los límites de grano y la perlita posee una estructura laminar bastante fina.

B. ZONA AFECTADA POR EL CALOR

Esta región es parte del metal base que rodea a la zona de fusión, la cual modifica su microestructura como consecuencia del calor suministrado durante el proceso y principalmente por la máxima temperatura alcanzada. La zona afectada por el calor (ZAC) en ESW puede ser dividida en dos regiones: la región licuada y la región sensibilizada (3), ver figura 17. La región licuada está junto a la zona de fusión, en donde la temperatura alcanzada es suficiente para derretir parcialmente el metal base en sus límites de grano. La siguiente zona es la sensibilizada la cual no se funde, pero como consecuencia de la gran cantidad de calor de entrada y pequeños gradientes de temperatura, sufre efectos de segregación en los límites de grano, lo que provoca fragilidad del metal. Los diversos problemas que se presentan en ESW hacen necesario que se trate siempre de mejorar las características de la ZAC.

Dolby (3) ha realizado un estudio de las propiedades

mecánicas en la ZAC de aceros al C-Mn de 25 mm. de espesor soldados por ESW. Sus principales conclusiones son:

- Una buena tenacidad se obtiene omitiendo Nb y minimizando el contenido de inclusiones.
- La tenacidad de la ZAC en uniones soldadas por ESW es menor que la obtenida por arco sumergido.

Dolby (3) ha conducido también otras investigaciones referidas a la ZAC de aceros estructurales y aceros para recipientes de presión soldados por ESW. Algunas de sus conclusiones son las siguientes:

- Usar aceros de bajo C
- Usar aceros de grano fino tratados con Al, y con bajo S.
- Usar aceros de alta tenacidad
- Usar aceros con menor contenido intersticial de Nitrógeno.
- Controlar el calor de entrada al proceso
- Control del refinamiento de grano en la ZAC

Mucner (3), ha investigado la selección de aceros pa-

ra ser soldados por ESW. De los análisis de propiedades mecánicas y estructura de la ZAC de uniones soldadas, ha sugerido el uso de aceros con estructura bainítica, bajos en C, S y P. En cuanto al electrodo de alambre y al fundente, Mucner recomienda que el primero debe asegurar la desoxidación de Si, y el segundo debe tener agentes químicos para asegurar una moderada oxidación de Mn durante el proceso.

C. METAL BASE

Esta es la última región del metal soldado, tiene microestructura y propiedades mecánicas invariables, aunque debido a la gran cantidad de calor suministrado en ESW, es muy importante poder distinguir con claridad la transición entre ZAC y el metal base.

2.5. VENTAJAS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ELECTROESCORIA EN LA UNION DE GRANDES ESPESORES

Son numerosas las ventajas del proceso de soldadura por electroescoria frente a los otros procesos convencionales; sin embargo, hay una que es la mas importante y es aquella de su capacidad de poder soldar espesores relativamente importantes a una velocidad de trabajo aproximadamente tres veces superior a la de soldeo manual (7).

Entre otras ventajas se tienen las siguientes:

- Las velocidades de deposición son muy altas comparadas con otros procesos, aproximadamente 25-50% mayor que para soldaduras con arco sumergido con la cual es a menudo comparada. Esta ventaja nos demuestra el tiempo ahorrado soldando con ESW que con otros procesos. En la figura 20 se presenta la variación de la velocidad de soldadura en función del espesor a soldar para los procesos manual al arco eléctrico y ESW usando guía consumible. Se observa claramente que para un determinado espesor de material a soldar, la velocidad de soldadura es hasta 3 veces mayor para ESW que para un proceso manual al arco eléctrico.

- La preparación de bordes es menos costosa y en algunos casos no necesaria. Esta ventaja se fundamenta en el hecho que el proceso es semejante a una colada continua, en el cual el molde lo constituyen las zapatitas refrigeradas o las zapatitas calientes.

- El aporte de calor simétrico en el proceso minimiza las deformaciones laterales así como las tensiones internas. Esta ventaja se pone de manifiesto puesto

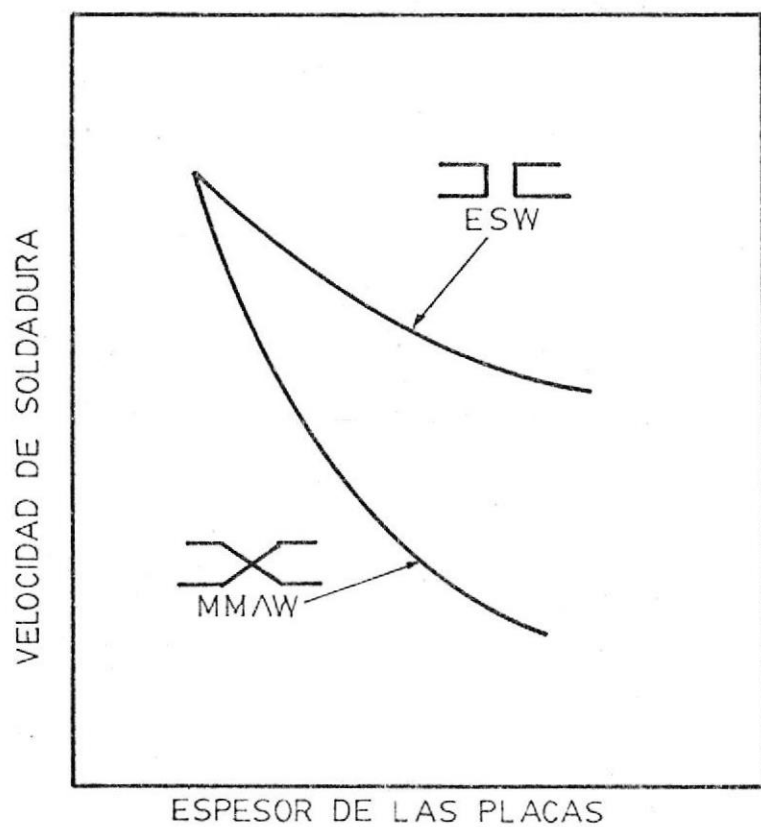


FIGURA 20.- Comparación de la velocidad de soldadura con respecto al espesor a soldarse con los procesos ESW y MMAW (Ref. 7).

que la fuente de calor se localiza simétricamente en la unión. Con respecto a las tensiones internas, estas se reducen ya que la velocidad de enfriamiento es lenta.

- Posibilidad de soldar con corriente continua y alterna.
- El consumo de fundente es mínimo (solo en el arranque) y todo el material de aporte es aprovechado en la unión. La capa de escoria que se forma es delgada y fácil de eliminar.
- El rendimiento es elevado aumentando con el espesor de las piezas a soldarse.

Estas ventajas y otras adicionales que se obtienen con la familiarización del método hacen que el proceso de soldadura estudiado sea uno de los más rápidos y eficientes.



III. TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1. MATERIALES UTILIZADOS

En esta parte se tratarán dos puntos importantes en el desarrollo de este estudio, el análisis del metal base y de los materiales de aporte. El metal base es el que sufrirá cambios debido al proceso de soldadura, es decir debido al calor de entrada, y los materiales de aporte serán básicamente los que decidan las propiedades mecánicas de la unión.

3.1.1. Metal base

El material base utilizado en este trabajo es un acero estructural SAE 1030 en forma de planquilla, procedente de un proceso de colada continua de producción nacional. La composición química de este material fue proporcionada por el fabricante FUNASA y se encuentra en la Tabla I. Las propiedades mecánicas del me

tal base se determinaron a partir de un ensayo de tensión y se presentan en la Tabla II. Se realizó además un ensayo metalográfico de la sección transversal de la palanquilla. La microfotografía de la figura 21, muestra la microestructura de metal base en la que se observan claramente agujas de ferrita o estructura Widmasttaten en una matriz de perlita fina. La estructura widmasttaten es una estructura resultante de una rápida transformación de austenita en ferrita a temperaturas relativamente bajas. En la microfotografía de la figura 22, se muestra la microestructura del metal base a una mayor amplificación.

TABLA I

COMPOSICION QUIMICA DEL METAL BASE

(Acero SAE 1030) (Ref. FUNASA)

C (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)
0.31	0.70	0.027	0.031

TABLA II

PROPIEDADES MECANICAS DEL METAL BASE

(Acero SAE 1030)

Resistencia a la tracción Kg/mm ²	Límite de fluencia kg/mm ²	Alargamiento (%)	Reducción del área (%)
68,12	39.87	16.23	19.73
Dureza 85 R _B			

3.1.2. Materiales de aporte

Los materiales de aporte utilizados para realizar la unión fueron los siguientes:

- Electrodo de alambre (en bobina) cuya denominación es OK 14.50 suministrados por ESAB.
- Tubo-guía consumible, revestida denominada OK 21.32.
- Fundente OK 10.50 (para el arranque).

El tipo de electrodo utilizado fue un electrodo macizo para aceros no aleados, de un tipo de aleación de Mn-Ni - Mo, cuya composición química exacta no se conoce.

El análisis del metal depositado utilizando el electrodo y la guía antes mencionadas se da en la tabla III, mientras que en la tabla IV se presentan las propiedades mecánicas del metal depositado.

En el apéndice II se dan las tablas I y II en las que se presenta el análisis del metal depositado y sus propiedades mecánicas para el electrodo usado y el fundente que se utiliza en el arranque (8).

TABLA III

COMPOSICION QUIMICA DEL METAL DEPOSITADO
UTILIZANDO UN ELECTRODO OK 14.50 Y UNA
GUIA CONSUMIBLE OK 21.32 (Ref. 8).

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Mo (%)
0.10	0.25	1.40	0.40	0.15

TABLA IV

PROPIEDADES MECANICAS DEL METAL DEPOSITADO
UTILIZANDO UN ELECTRODO OK 14.50 Y UNA
GUIA CONSUMIBLE OK 21.32 (Ref. 8).

Límite de tracción Kg/mm ²	Límite de rotura Kg/mm ²	Resistencia al impacto Joules
50	62	50 (a - 20°C)

Se demuestra que el análisis y propiedades del metal depositado en los casos mencionados es similar, lo que es ventajoso para los propósitos que se persiguen en este estudio.

La composición química del polvo o fundente no se la conoce, pero se emplea principalmente una clase de polvo que posee alto contenido de MnO (9). En el Apéndice II se da la composición química de varios fundentes utilizados en ESW. Los mejores resultados se han obtenido con los tres primeros fundentes mencionados en dicho Apéndice.

En los últimos años se han obtenido buenos resultados con fundentes que no contienen óxido alguno, sino que constan preferentemente de uniones de fluor y cloro, siendo tal fundente muy apropiado para la soldadura de aceros de alta aleación (9).

3.2. EQUIPO UTILIZADO

En este estudio se utilizó equipos suministrados por la firma ESAB. La máquina de soldadura utilizada fue la A2 para soldeo bajo escoria. Las características técnicas de la misma se encuentran descritas en la Tabla I del Apéndice III. La figura 23 muestra el

equipo de ESW usado en este trabajo. Se observa en primer plano la fuente de poder y sobre ella la caja de mandos en la que se selecciona y controla el voltaje, y la corriente (velocidad del electrodo), así como también se fija la posición del electrodo. A la izquierda de la figura se observa una estructura sobre la cual va asegurado el cabezal de soldadura en donde se encuentra la bobina del electrodo, el cual, durante el proceso de ESW, pasará a través de la guía consumible.

La fuente de poder utilizada fue un rectificado de capacidad media para soldeo automático LAD 800. Las características técnicas de la fuente se dan en la tabla II del Apéndice III. En vista de que el proceso es automático se usa una fuente de voltaje constante, cuya curva voltaje-amperios se muestra en la Figura 24 (7). Las conexiones eléctricas realizadas entre el cabezal de soldadura y la fuente de poder se realizaron de tal manera de poder soldar con corriente continua con el electrodo a positivo, lo cual es preferible para un arranque corto y un baño de escoria silencioso (estable).

Formando parte del equipo se utiliza una caja de man

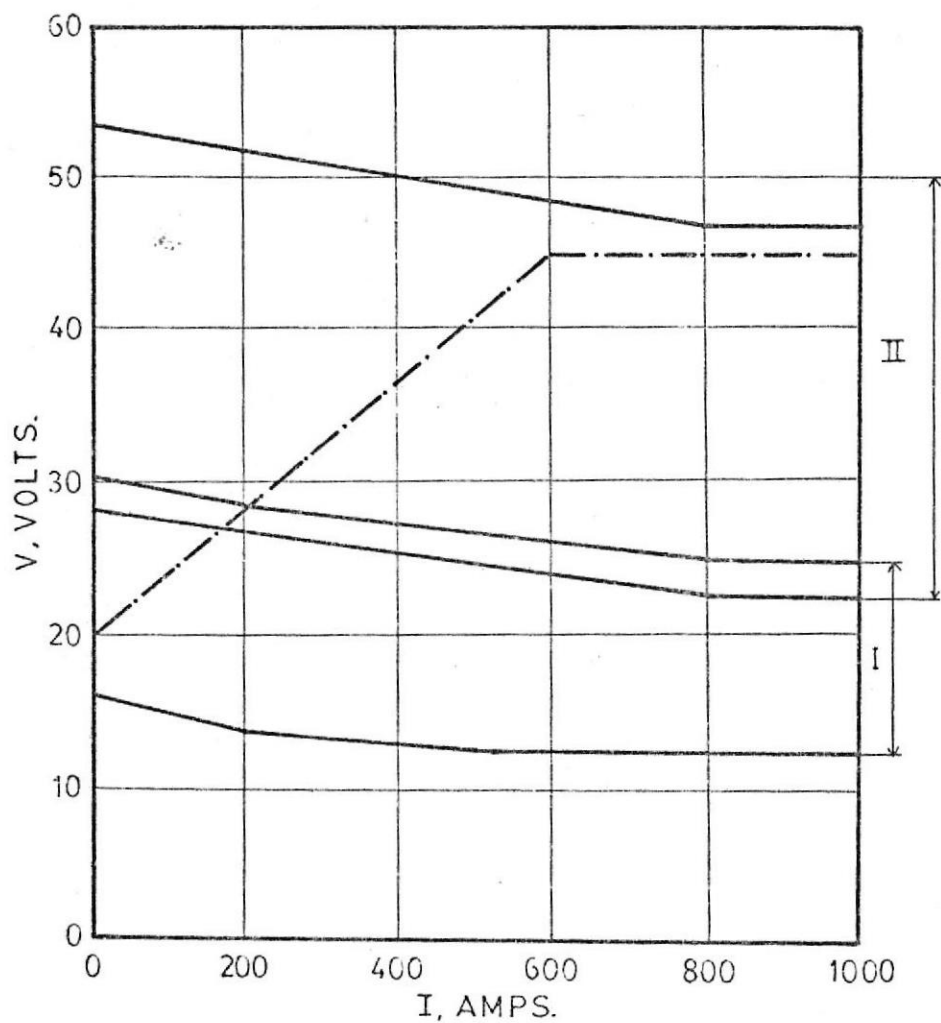


FIGURA 24.- Características estáticas de la fuente de poder utilizada para el proceso en estudio (Ref. 7).

dos A6-PEF sobre la cual se hacen las regulaciones de corriente, voltaje y posición del electrodo.

3.3. SELECCION DE LA GEOMETRIA A SOLDARSE

Por tratarse de un primer trabajo con este proceso de soldadura en nuestro medio, se ha seleccionado la unión que se muestra en la figura 25, en la cual se ha simulado una unión con zapatas calientes como la mostrada en la figura 5a.

Se ha pretendido con la geometría a soldarse estar casi en el límite de la separación máxima de los bordes a unirse. Además ha sido de interés empezar a trabajar con una unión sencilla para posteriormente realizar uniones más complicadas. Comparando las dos últimas figuras se observa que la unión simulada (figura 25) representa realmente una unión utilizando zapatas calientes ó sólidas por el hecho de no estar refrigeradas con un medio externo. En esta geometría se elimina también la necesidad de colocar un bloque de arranque para iniciar el proceso. Este diseño de unión enfatiza la necesidad de que las zapatas sólidas sean del mismo material que el metal base, para lograr la uni-

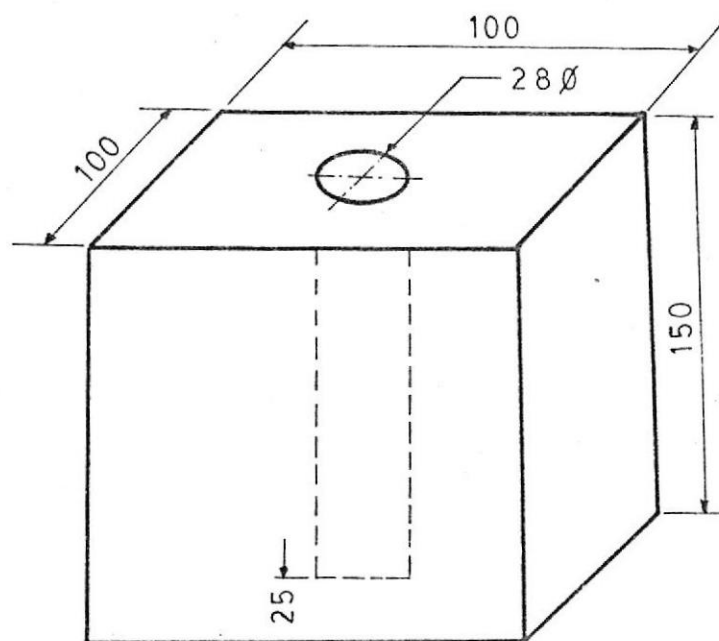


FIGURA 25.- Representación de la unión simulada para el estudio del proceso (medidas en mm.)

formidad de las propiedades mecánicas alrededor de la unión.

3.4. TECNICA OPERATIVA

Uno de los factores importantes de los resultados que se obtienen en un estudio dependen lógicamente de la forma en que se realicen estos, o sea la técnica operativa que se emplea. A continuación se describen ciertos puntos que permitirán entender claramente la forma como se han realizada cada una de las secuencias del proceso.

3.4.1. Variación de los parámetros de soldadura

Con la finalidad de poder desarrollar el estudio y control de la ESW del acero estructural SAE 1030, es necesario variar los parámetros de soldadura puesto que esto proporcionará los elementos de juicio necesarios para un control adecuado y correcto de los objetivos perseguidos. Se inició el presente estudio tomando valores generales de parámetros recomendados para la unión de geometrías rectangulares. Para la unión del pre

sente estudio, es decir una unión circular, se escogieron parámetros iniciales de soldadura de 500 amperios y 38 voltios, lo cual produjo una soldadura agrietada indicando esto que los parámetros escogidos fueron elevados para el espesor a soldarse.

Una segunda soldadura fue realizada con parámetros de soldadura de 450 amperios y 36 voltios, resultando también defectuosa. Posteriormente se probó con parámetros de 400 amperios y 36 voltios, presentándose esta vez fisuras de menor magnitud, lo cual fue un indicio de que se estaba próximo a obtener una soldadura de calidad. Finalmente se realizó una soldadura con 350 amperios y 36 voltios encontrándose esta vez una soldadura libre de defectos. Esto permitió escoger los parámetros de soldadura en base a los cuales se centró el presente trabajo. Los valores escogidos se presentan en la Tabla V. Los valores de corriente sobre los que se basó este estudio fueron 300 y 350 amperios; mientras que el voltaje se varió entre 24 y 48 voltios.

TABLA V

PARAMETROS DE SOLDADURA POR ESW (ACERO SAE 1030)

SOLDADURA #	VOLTAJE (volts)	CORRIENTE (Amps)
1	31	300
2	36	300
3	40	300
4	44	300
5	24	350
6	30	350
7	32	350
8	36	350 o/a.
9	40	350
10	48	350 ✓
11	36	400 ✓
12	36	450
13	38	500

3.4.2. Procedimientos de soldadura

Básicamente la secuencia seguida fue la de preparación de la unión a soldarse, operación del equipo, obtención de muestras para análisis y tabulación de resultados.

A. PREPARACION DE LA UNION

Para iniciar la preparación de la unión, se cortaron de la palanquilla procedente de colada continua, muestras de 150 mm. de longitud, con una sección transversal cuadrada de 100 mm. de lado. Se procedió luego a realizar un agujero (en un torno) para lo cual se utilizó una broca de 28 mm de diámetro, teniendo este agujero una longitud de 125 mm. y estando completamente centrado en la sección transversal de la palanquilla. Con la muestra en estas condiciones se procedió a eliminar las impurezas presentes que pudieran ocasionar durante el proceso de soldadura un estado inestable. Se eliminó mediante tetracloruro de carbono el aceite utilizado para lubricar la broca usada para fabricar el agujero. La humedad fue eliminada precalentando la

muestra a una temperatura de 130°C durante una hora.

El paso siguiente fue colocar la guía consumible simétricamente en la unión, habiéndose colocado previamente una bola de lana de acero de 20 a 25 mm. de diámetro en el fondo de la muestra. En la figura 26a. se presenta el arreglo que se realiza antes de iniciar el proceso de soldadura. La guía se coloca justo sobre la bola de lana de acero, la cual como ya se ha expresado sirve para facilitar el arranque del arco.

El electrodo se alimenta a través de la guía y se posiciona a aproximadamente 10 mm. del fondo de la pieza o superficie de arranque. Esto evitó tener un proceso inestable al tener el extremo libre del electrodo a una distancia mayor que la distancia entre el eje vertical del electrodo y el borde a unir. La condición de estabilidad de ESW se representa en la figura 26b. Una precaución tomada adicionalmente fue la de no comprimir la bola de lana de acero con el objeto de

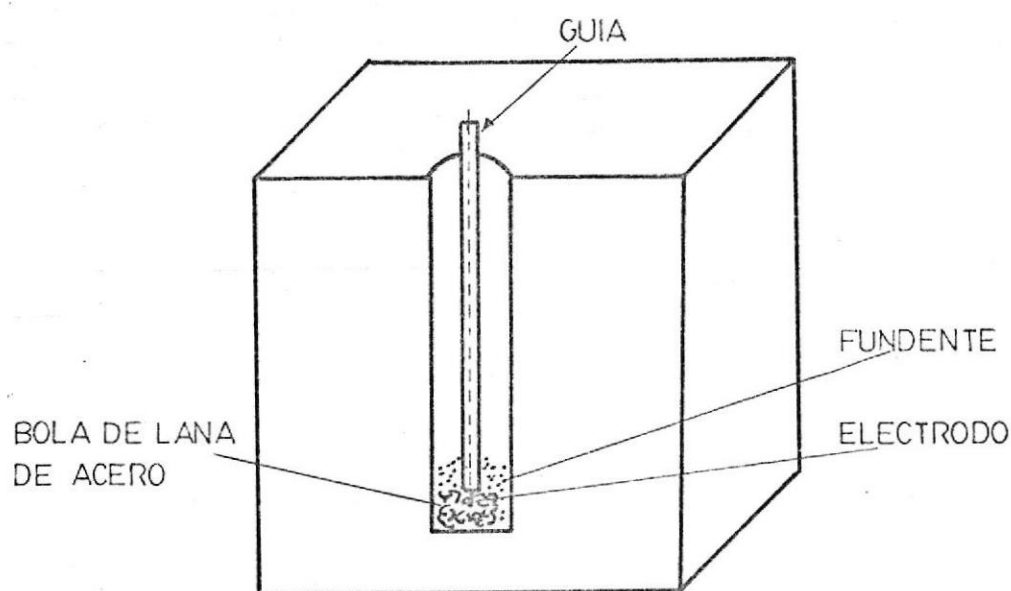


FIGURA 26a.- Representación del arreglo realizado para efectuar la soldadura por ESW.

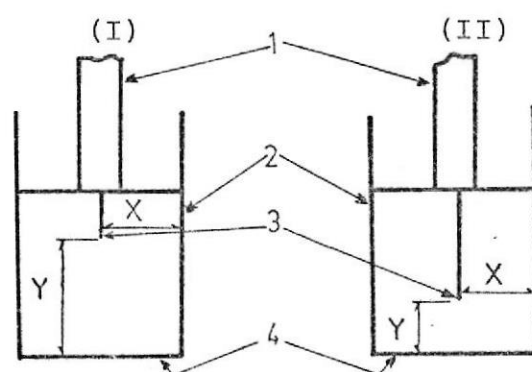


FIGURA 26b.- Representación del arreglo del extremo libre del electrodo para obtener un proceso de soldadura estable (Ref. 7).

1. Guía
2. Metal base
3. Extremo del electrodo
4. Fondo de la pieza

(I) $Y > x$, el proceso es inestable

(II) $Y < x$, el proceso es estable

evitar una falla en el arranque.

B. OPERACION DEL EQUIPO

El equipo empleado en las pruebas de soldadura fue mostrado ya en la figura 23. Al iniciar el proceso, la corriente que pasa a través del electrodo produce un cortocircuito entre el extremo del mismo y la superficie de arranque a través de la bola de lana de acero, la cual se funde al iniciar el arco. Este paso se realiza manteniendo la perilla de inicio del proceso en posición de arranque. Para posibilitar un arranque lo mas corto posible, asegurando a la vez una buena penetración, es necesario aumentar la potencia de entrada sin aumentar la velocidad de soldadura; esto se logra aumentando el voltaje en el arranque en un rango de 4 a 6 voltios, arriba del voltaje requerido (7). Con el objeto de ayudar al revestimiento de la guía a formar un baño de escoria adecuado, se agrega una pequeña cantidad de fundente OK-10.50 que además ayuda a extinguir el arco cuando el proceso es estable. Cuando el proceso de ESW propiamente dicho entra en operación, la

perilla de inicio se coloca en posición de soldadura continuando el proceso en forma automática, hasta su terminación. Una variante que se realizó en este estudio, fue el de añadir el fundente antes de iniciar el arco y no una vez que este se inicia, lográndose buenos resultados.

3.5. OBTENCION DE MUESTRAS PARA ANALISIS

Con el propósito de detectar discontinuidades presentes en la soldadura, antes de obtener muestras transversales y verticales para análisis, se realizaron ensayos no destructivos por ultrasonido.

Se utilizó para el efecto un equipo de ultrasonido - Magnaflux, Modelo PS 702A. Para el ensayo se usó la técnica de eco-pulsátil mediante ondas longitudinales con un transductor de contacto de 2,25 MHz.

En vista de la irregularidad de la superficie de las muestras soldadas, fue necesario mecanizar ligeramente una de dichas superficies para poder obtener un buen contacto entre transductor y la pieza, por medio del aceite utilizado para este efecto. Los ensayos de ul-

trasonido fueron realizados en varias muestras empleándose la misma técnica y demostrando de esta manera la eficiencia del método no destructivo para la detección de discontinuidades internas en las soldaduras realizadas.

El siguiente paso fue tomar muestras de la unión soldada, de la sección transversal, como de su sección vertical. Las muestras transversales de 10 mm. de espesor se tomaron a 65 mm. desde la parte inferior de la unión soldada, utilizándose los 65 mm. referidos, para obtener una muestra vertical de la soldadura incluyendo el inicio de la misma.

Las muestras verticales y transversales, se obtuvieron cuidadosamente considerando los siguientes puntos (11):

- Obtención de muestras representativas de las soldaduras para una correcta evaluación y análisis.
- Cuidadosa preparación de las muestras eliminando rugosidades, para lo cual se rectificó las muestras hasta obtener una superficie completamente lisa incluyendo luego su pulido con lijas de grano muy fino.
- Adecuado macroataque con el reactivo indicado para que

se revele en forma correcta la estructura metalúrgica de interés.

Aquí se consideraron dos puntos:

- Temperatura de ataque
- Tiempo de ataque

El reactivo utilizado para realizar el macroataque fue Nital al 4%, realizándose el ataque a temperatura ambiente por un tiempo de una hora quince minutos. Realizado el macroataque tanto en las secciones transversales y verticales, se procedió a la medición de la geometría de la unión soldada. Se realizó también, en muestras transversales, la identificación de los tipos de estructuras que suelen presentarse en ESW, así como las diferentes regiones que aparecen en ESW.

De las mismas muestras transversales se tomaron muestras pequeñas que incluían todas las zonas de la unión, con el objeto de determinar o identificar la microestructura presente.

Para realizar este microataque se utilizó Nital al 2% durante cinco segundos. Estas observaciones microscópi

cas se realizaron en un microscopio óptico Olympus. Se realizó también la medición del tamaño de grano del metal, para lo cual se empleó el método de Hilliard (12), que es un método simple y directo para esta determinación. El método se basa en la utilización de círculos de 10 y 20 cm. de circunferencia dibujados sobre un papel transparente bajo los cuales se coloca la microfotografía de la zona de medición del tamaño de grano, a fin de contar el número de intersecciones de los límites de grano con dichos círculos. Se debe asegurar de que resulten mas de seis intersecciones entre el círculo y los límites de grano en la zona de interés.

El método de Hilliard se aplica solamente en mediciones de tamaño de granos equiaxiales. Para el cálculo de G (tamaño de grano) se emplea la siguiente ecuación (12).

$$G = - 10,00 - 6,64 \log L_3 \quad (\text{Ec.N}^\circ 4)$$

$$L_3 = L_t/PM \quad (\text{Ec.N}^\circ 5)$$

donde:

P = Número promedio de intersecciones encontradas.

M = Magnificación de la fotografía

L_t = Longitud total sobre la cual se mide las intersecciones.

Con el propósito de simplificar aún más el método, a partir de la ecuación 4, se ha encontrado una solución gráfica descrita en el normógrafo que se presenta en la figura 27, válido cuando se utiliza el círculo de 10 cm. de circunferencia, que fue el usado en esta medición.

La utilización del normógrafo es muy sencilla; usando el número de intersecciones y la magnificación de la fotografía, se unen estos puntos para encontrar el tamaño de grano, interceptando la recta donde dicho valor está tabulado.

Las muestras transversales se utilizaron también para realizar ensayos de dureza, desde la línea central de la soldadura hasta el borde de la muestra atravesando la ZAC y el metal base. Para realizar estos ensayos se utilizó un Durómetro Rockwell, escala B(100 kg) con un indentador de 1/16 de pulgada de diámetro. Los valores de dureza Rockwell, escala B, se convirtieron luego a números de dureza Vickers (DPH), para efectos de graficarlos en una sola escala. La resistencia mecánica se evalúa a partir de la dureza mediante la relación empírica (14):

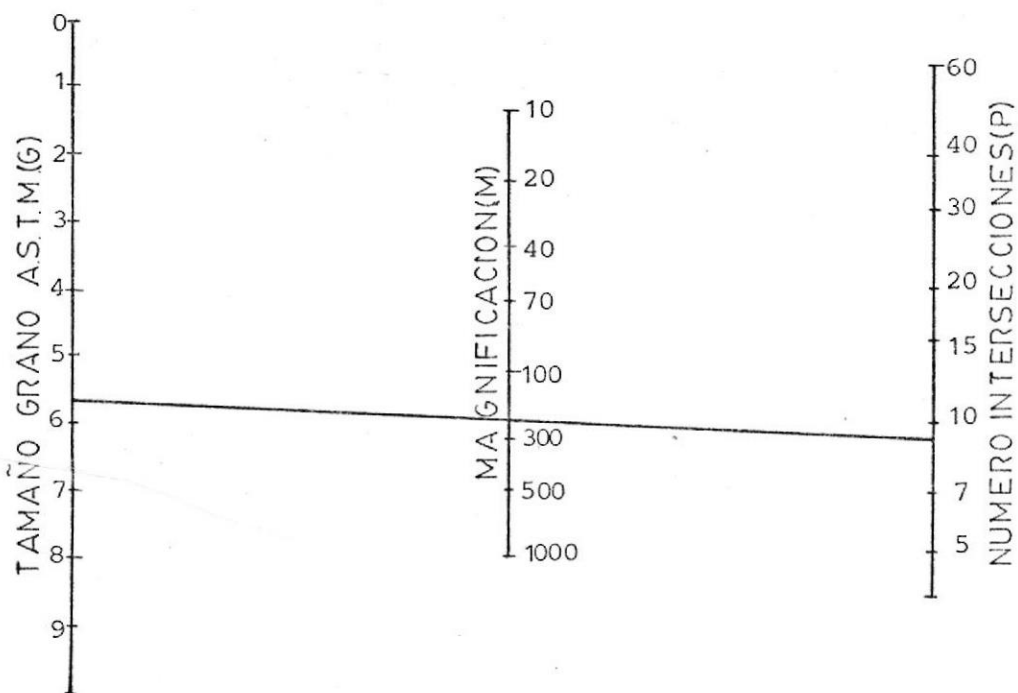


FIGURA 27.- Normógrafo utilizado para determinar tamaño de grano (Ref. 12)

Resistencia mecánica = 0,352 (dureza Brinell) Kg/mm² (Ec.Nº 6)

la cual es válida únicamente para aceros.

La dureza Brinell fue también obtenida por conversión de la dureza Rockwell, Escala B.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

4.1. CALOR SUMINISTRADO DURANTE EL PROCESO

El calor suministrado durante el proceso de soldadura es el responsable de las transformaciones microestructurales, y por lo tanto de las propiedades mecánicas resultantes de la unión soldada.

Es necesario entonces determinar cuantitativamente esta cantidad de calor con el objeto de tener una idea más concreta del problema térmico.

El calor suministrado (CS) en soldadura, se determina con la siguiente expresión (3):

$$CS = \frac{V \times I \times 60}{V_s} \text{ (Joul/m)} \quad (\text{Ec.N}^\circ 6)$$

donde:

V = Voltaje en voltios

I = Corriente en amperios

V_s = Velocidad de soldadura m/min.

V_s se determina de la relación siguiente:

$$V_s = \frac{A_e \times V_e}{A_u} \quad (\text{Ec.N}^\circ 7)$$

donde:

A_e = Area de la sección transversal del electrodo
en mm^2

A_u = Area de la sección a unir en mm^2

V_e = Velocidad del electrodo en m/min.

Los valores de calor suministrado en cada soldadura se presentan en la tabla VI. En dicha tabla se presentan además otros parámetros del proceso, así como también observaciones sobre cada soldadura realizada.

La determinación de la velocidad de alimentación del electrodo se la hizo por interpolación en una carta de cálculo suministrada por la firma HOBART (3) para el diámetro del electrodo utilizado en este trabajo.

La velocidad de alimentación del electrodo para las soldaduras realizadas con una corriente de 300 amperios, se encontró por proporcionalidad con el valor antes hallado, debido a que dicha carta de cálculo no incluye velocidades de alimentación para corrientes menores a 350 amperios. La carta a que se hace referencia se encuentra en el Apéndice IV.

TABLA VI
CONDICIONES Y OBSERVACIONES DE LAS SOLDADURAS
POR ESW (Acero SAE 1030)

SOLDAD. Nº	TIEMPO DURAC. SOLDAD. (Min)	VELOC. ELECT. m/h	CALOR SU MINIST. Joul/m 10^8	OBSERVACIONES DURANTE EL PROCESO
1	7,5	26,1	1,11	Final inestable
2	6,3	26,1	1,29	Exceso fund. inic.
3	5,7	26,1	1,44	Proceso se detuvo y se reinició nuevamente.
4	6,1	26,1	1,58	Inicio estable, final inestable.
5	7,5	30,5	0,86	Inicio inestable
6	6,3	30,5	1,10	Muy estable
7	5,0	30,5	1,14	Final estable
8	5,1	30,5	1,29	Muy estable
9	5,0	30,5	1,45	Adición de fundente antes del arranque
10	4,0	30,5	1,72	Muy inestable
11	7,7	34,8	1,29	Inestable
12	7,5	39,0	1,31	Inestable
13	7,0	43,2	1,38	Muy inestable

4.2. ANALISIS METALOGRAFICO DE LA UNION SOLDADA

Se realizaron análisis macroscópicos y microscópicos de dos muestras de soldaduras. Una de ellas soldada con 350 amperios y 36 voltios que se la considera muy representativa ó típica del presente estudio, ya que esta corriente y voltaje son valores intermedios de los parámetros utilizados en esta Tesis, y dieron como resultados uniones libres de defectos. La otra muestra de soldadura analizada corresponde a parámetros de soldadura mayores y que se la identificará como muestra de un alto calor suministrado. Del análisis macroscópico se determinará la geometría de la unión, tanto para las muestras transversales como para las verticales, mientras que del análisis microscópico se determinará la microestructura y tamaño de grano en la zona de fusión, ZAC y metal base.

4.2.1. Observaciones macroscópicas

Estas observaciones revelaron tres de los cuatro tipos de estructuras que se presentan en ESW cuando se sueldan aceros de baja aleación y que fueron explicados en la sección 2.4. La diferencia de estructuras se debe básicamente

a la diferencia de parámetros de soldadura, lo que conduce a diferentes velocidades de enfriamiento, puesto que la composición química de todas las muestras es la misma.

El tipo I de estructura (sección transversal) se lo tiene en la figura 28 conseguida con parámetros correspondientes a 300 amperios y 40 voltios. Se distinguen claramente las zonas presentes. Se observa también en la zona de fusión una pequeña fisura que no alcanza a penetrar la zona de cristales bastos.

El tipo II de estructura (sección transversal) se presenta en la figura 29. Los parámetros empleados en la misma fueron: 350 amperios y 36 voltios. Se aprecia en esta figura una zona de cristales equidimensionales como indicio de una velocidad de enfriamiento lenta respecto a la de la zona de cristales finos, se observa además en esta soldadura una transición mas o menos clara entre la ZAC y el metal base. En la figura 30 se presenta una ampliación de la figura 29 en

donde se observa con mayor detalle la estructura de la soldadura. En la figura 31 se presenta el tipo IV de estructura que se presenta en ESW para aceros de baja aleación. Se utilizó 350 amperios y 48 voltios. Obsérvase en esta figura una estructura de grano fino en toda la sección correspondiente a la zona de fusión, debido a la elevada temperatura obtenida en el proceso y que aumenta el sobrecalentamiento del metal base, desapareciendo en este caso la zona de cristales bastos. Las grietas que aparecen son consecuencia de los elevados parámetros de soldadura empleados.

En las figuras 32, 33 y 34 se muestra secciones verticales de diferentes soldaduras.

En la figura 32 se presenta una soldadura - en la que se pone de manifiesto el crecimiento columnar de los granos semejantes al de una fundición, se observa además en esta muestra una marcada falta de fusión y porosidades. Estos defectos se presentan comunmente al inicio de una soldadura por ESW, o sea en el blo

que metálico para arranque del arco. Ventajosamente, este bloque no forma parte del cuerpo total de la pieza que se suelda con este proceso. Este bloque, así como las zapatas sólidas son removidas al terminar el proceso.

La figura 33 corresponde a una soldadura realizada con un voltaje muy bajo con el propósito de mostrar el efecto de falta de fusión, contrario a la muestra siguiente que se realizó con un voltaje elevado lo que condujo a un total agrietamiento de la soldadura. Dicha muestra se presenta en la figura 34, en donde se nota dicho agrietamiento en la dirección del crecimiento de grano. Otro defecto que se presenta en esta soldadura es el de un desplazamiento hacia la izquierda de la zona de fusión, como consecuencia de un desalineamiento de la guía con respecto al eje vertical.

Finalmente en la figura 35 se presenta el problema que resulta de la falta de continuidad del proceso, es decir cuando el mismo es

interrumpido por algún motivo y se lo reinicia nuevamente. Se forma lo que se puede llamar una "superficie de enfriamiento" en fundición. En la parte inferior de la figura 35 se tienen los granos columnares con un ángulo de encuentro mayor que aquellos de la parte superior de la figura. A los lados se observan inclusiones de escoria no eliminadas por su difícil posición y no desalojadas al reiniciar el proceso, por falta de calor suficiente para fundirlas. Se observan además fisuras en la ZAC y en el metal base. Estos problemas se presentaron como consecuencia de la interrupción del proceso por haberse trabajado el electrodo en la bobina. Reinicios del proceso en ESW son inaceptables por Códigos y Normas de soldadura (13).

Los resultados obtenidos en lo que respecta a la geometría de las soldaduras, tanto para las muestras analizadas como para la mayoría de las muestras restantes se presentan en la tabla VII. En esta tabla se tabulan el tamaño de la zona de fusión, el an-

TABLA VII

DIMENSIONES DE LA GEOMETRIA DE LAS SOLDADURAS POR ESW
(Acero SAE 1030)

SOLDA DURA #	PENETRA CION (mm)	ANCHO ZAC (mm)	TAMAÑO ZF (mm)	PROFUND. PILETA (mm)	FACTOR FORMA	ANGULO ENCUENT. (°)	DILUCION (%)
1	1	2,5	29	2,5	1,0	148	13
2	2,5	6,5	33	3,25	2,0	86	14
3	2,75	8,0	33,5	3,2	2,5	60	16
4	7	9,0	42	3,3	2,7	50	31
5	--	--	--	--	--	--	--
6	2	5,0	32	2,56	1,95	100	13
7	2,5	5,5	33	2,61	2,10	88	14
8	3	6,0	34	2,30	2,3	76	16
9	7	10,0	42	2,57	2,8	44	31
10	11	18	50	4,5	4,0	40	43
11	2,5	9	33	--	--	--	--
12	4,0	10	36	--	--	--	--
13	5,0	12	38	--	--	--	--

cho de la ZAC, el ángulo de encuentro, factor de forma, porcentaje de dilución, penetración y profundidad de la pileta. De esta tabla se observa que la dilución presenta un aumento conforme se incrementa el voltaje (los valores de V,I están en la tabla V).

Las muestras soldadas números 2 y 6 fueron soldadas con aproximadamente el mismo voltaje (30 y 31 voltios), pero con diferentes corrientes (300 y 350 amperios); sin embargo, tienen la misma dilución (13%). Esto se debe a que el ancho de la zona de fusión es muy similar, por el hecho de que el voltaje ejerce mayor influencia en esta dimensión que la corriente. Este efecto se observa también en los siguientes pares de muestras: 2 y 7, 3 y 8, 4 y 9.

Se presentan a continuación una serie de curvas que permiten apreciar en forma más precisa los resultados obtenidos a lo largo de este estudio. Estas curvas cumplen el objetivo de corroborar la teoría del proceso. En la figura 36, se presenta la variación de la profundidad

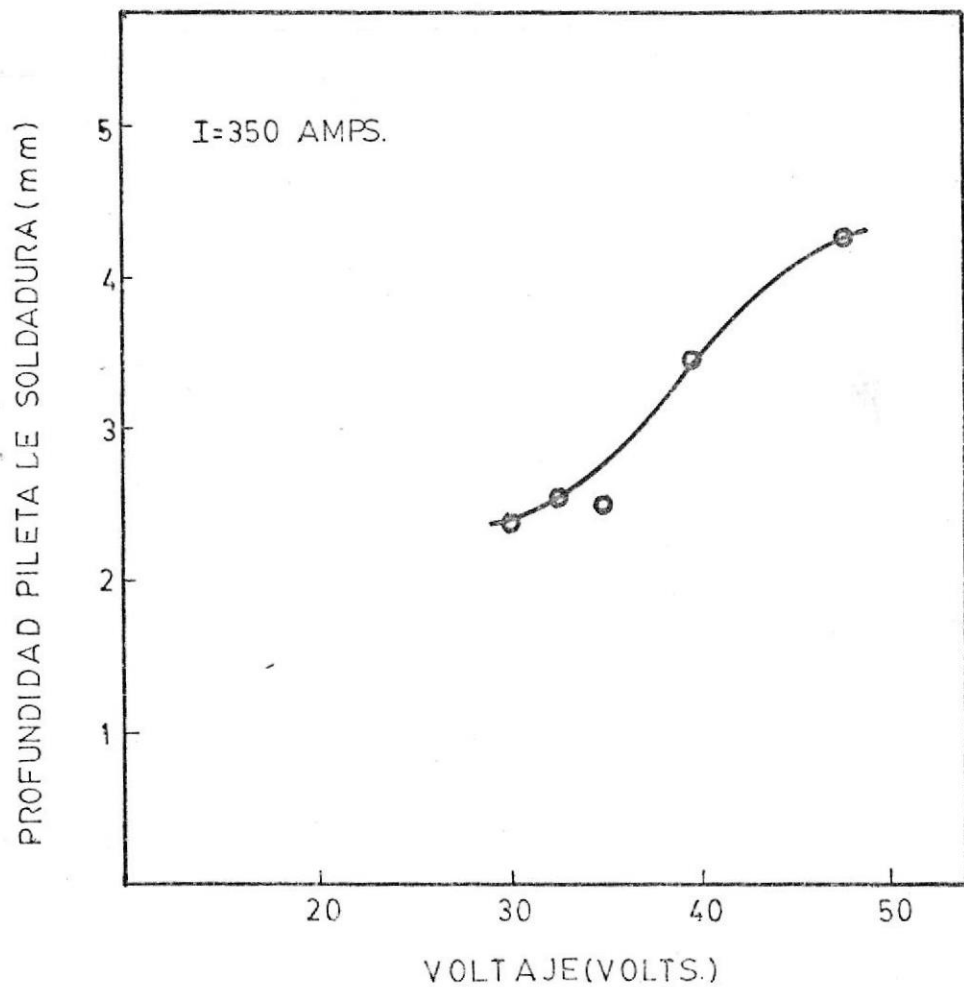


FIGURA 36.- Relación entre la profundidad de la piqueta de soldadura con el voltaje. Acero SAE 1030 soldado por ESW

de la pileta de soldadura con respecto al voltaje. Se observa un aumento algo pronunciado de la profundidad de la pileta a diferencia - de la figura 8, en donde se nota una varia-ción lenta de la profundidad de la pileta. La razón para esta diferencia puede ser que la profundidad de la pileta se determinó a partir - del ancho de la soldadura y del factor de forma, siendo calculado este último por amplifi-cación utilizando negativos de fotografías de las muestras verticales, en donde juega un papel importante el cuidado de tomar una medi-ción exacta. En la figura 37 se presenta la variación del ancho de la soldadura (ancho de la zona de fusión) y de la ZAC al variar el voltaje para un valor de corriente constante. Se nota un aumento constante de la zona de fusión independiente del nivel de voltajes aplicado. Esta curva se diferencia de la figura 9, en la cual el aumento del ancho de la soldadura es dependiente de la región de volta-jes de trabajo. Se observa además en la figu-ra 37 el crecimiento parabólico del ancho de la ZAC, al aumentar V. En la figura 38 se presenta la variación de las dimensiones de la

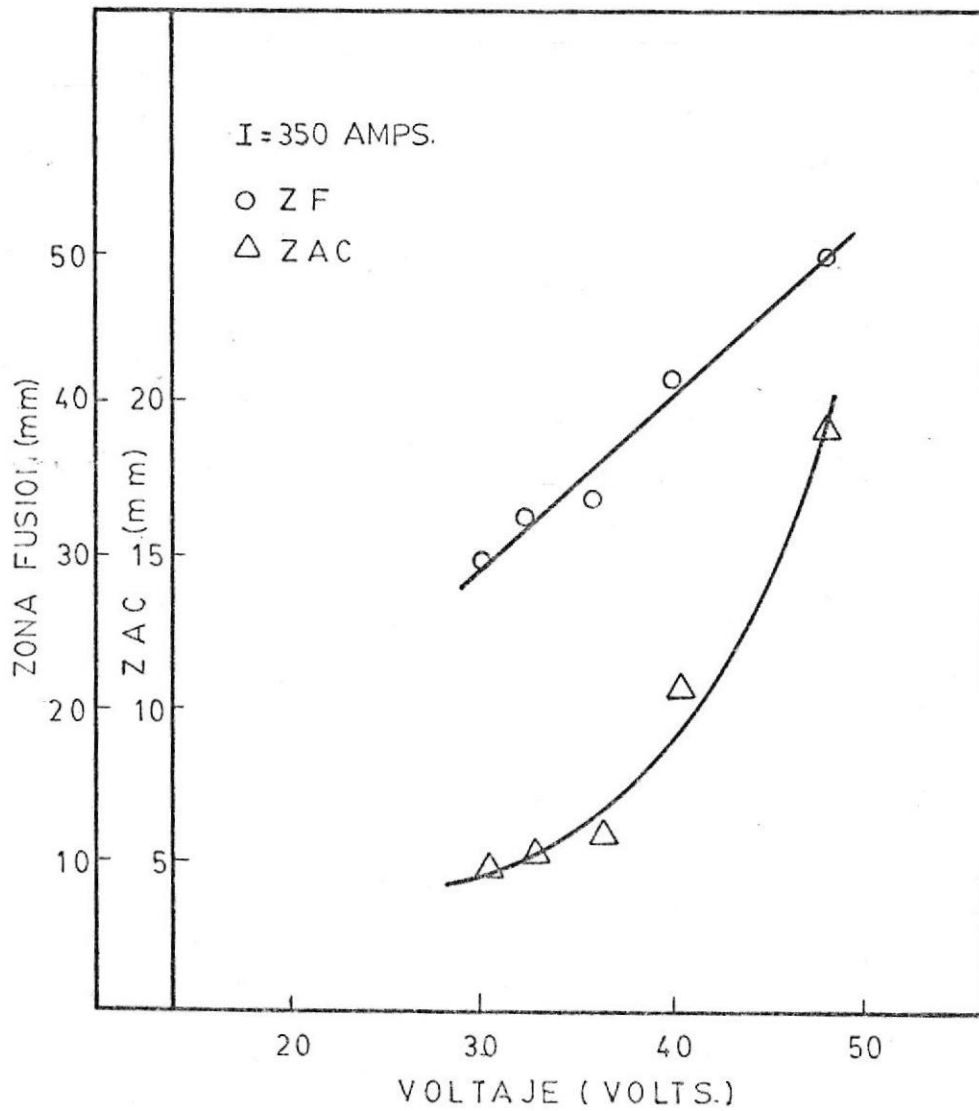


FIGURA 37.- Relación entre el tamaño de la zona de fusión y zona afectada por el calor con el voltaje. Acero SAE 1030 solo dado por ESW.

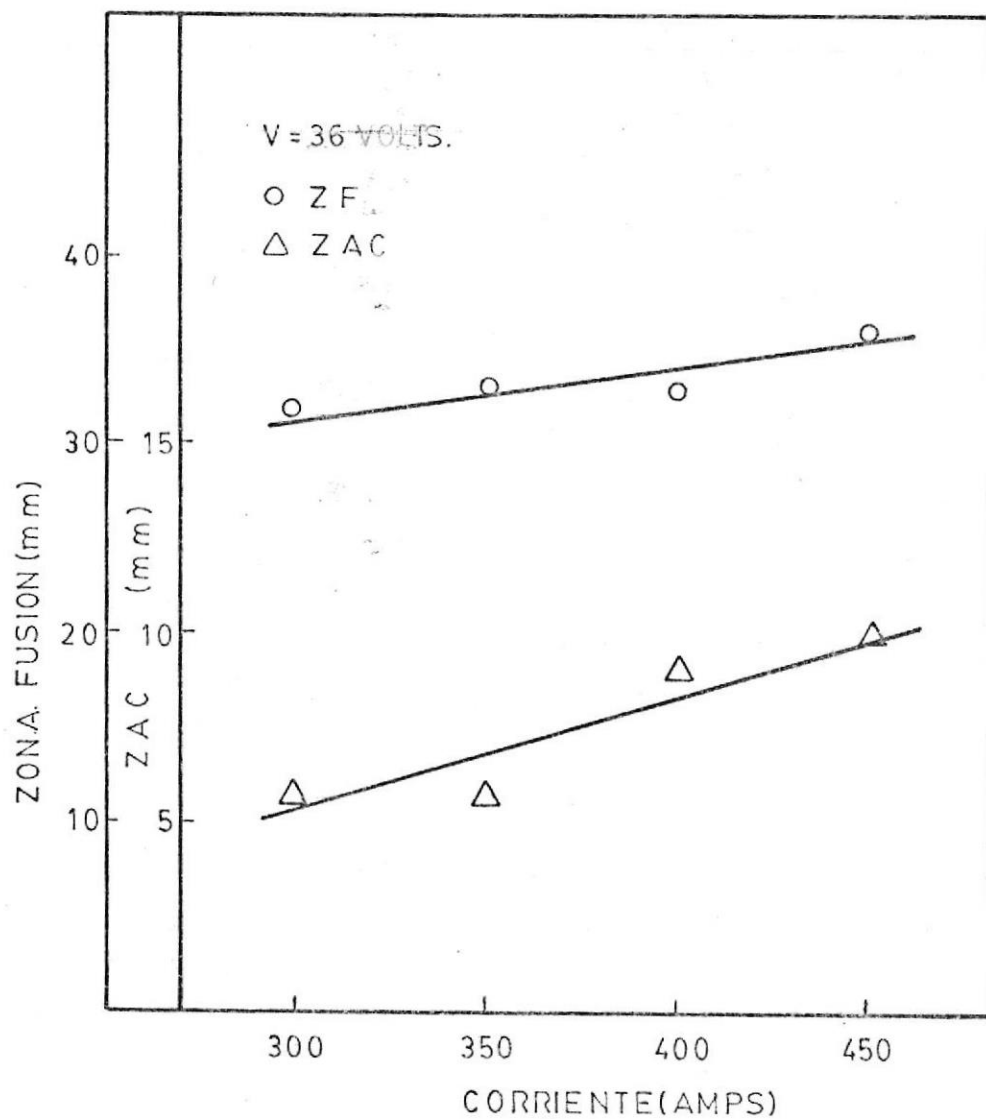


FIGURA 38.- Relación entre el tamaño de la zona de fusión y zona afectada por el calor con la corriente. Acero SAE 1030 soldado por ESW.

zona de fusión y de la ZAC cuando varía la corriente, para un voltaje constante. Se observa de la figura que la variación de la zona de fusión es pequeña, es decir, se podría decir que la variación del ancho de la zona de fusión es independiente de la corriente. Aparentemente - se podría pensar que esto no es lógico ya que la cantidad de calor suministrado es cada vez mayor, pero recuerdese que la figura 10 indica - que el ancho de la soldadura disminuye a partir de ciertos valores de la velocidad del electrodo (valores altos de corriente). Por lo tanto la curva obtenida en este trabajo es válida en el rango de parámetros usados. Adicionalmente, el aumento de la cantidad de calor no solo se traduce como un incremento de la zona de fusión, sino también en una mayor ZAC. En la figura 38 se observa además que el aumento de la ZAC es mayor que el de la zona de fusión, lo - cual se justifica ya que al haber una cantidad mayor de calor suministrado, la ZAC es mayor.

En la figura 39 se presenta el efecto del voltaje sobre el factor de forma, éste aumenta con

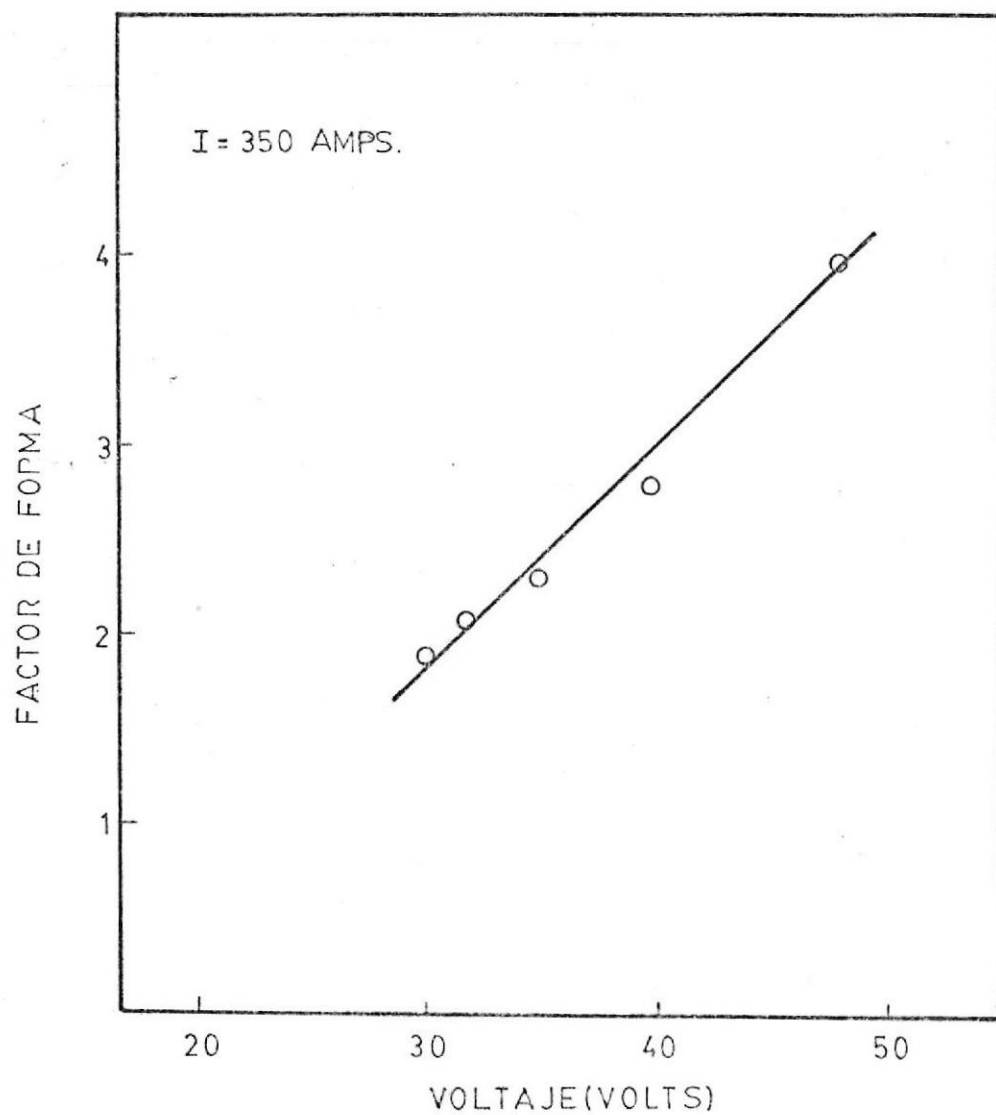


FIGURA 39.- Relación entre el factor de forma con el voltaje. Acero SAE 1030 soldado por ESW.

el voltaje debido a que el ancho de la soldadura se incrementa en una proporción mayor que la profundidad de la pileta al aumentar el voltaje. La misma tendencia se observa en la figura 12 en la cual también se presenta la variación del factor de forma con el incremento de la velocidad del electrodo, lo que no pudo ser efectuada en esta tesis.

Pero si observamos la Tabla VII para las soldaduras números 2 y 6, se aprecia la tendencia de disminución del factor de forma con la velocidad del electrodo, puesto que esas dos soldaduras se realizaron con velocidades de alimentación diferentes (26,1 m/h y 30,5 m/h respectivamente). En la figura 40, se presenta la variación de la penetración con el incremento del voltaje para un valor de corriente constante. Se observa una relación de variación similar a la variación de la zona de fusión como se describió en la figura 37. Esta similitud es lógica por tratarse de relaciones geométricas correspondientes entre sí.

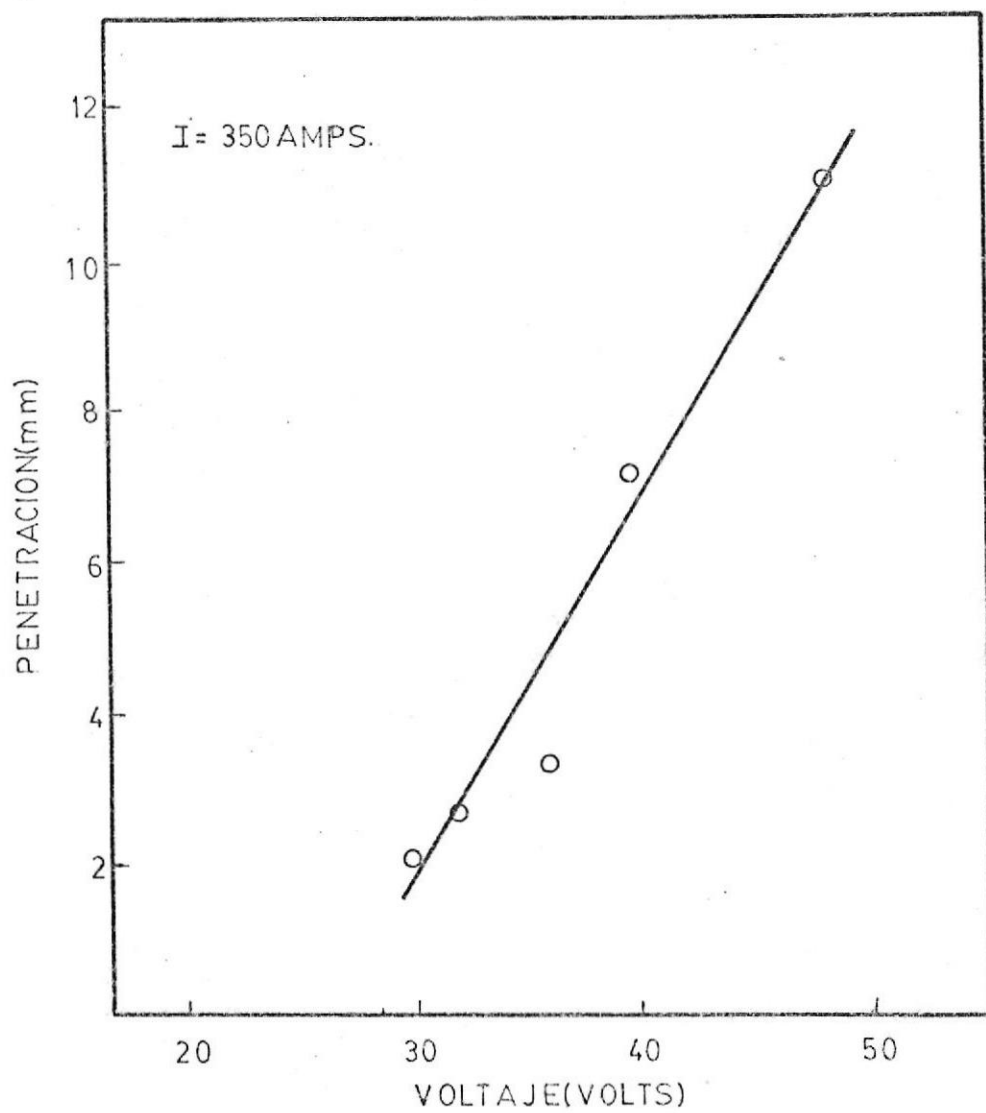


FIGURA 40.- Relación entre la penetración y el voltaje para un acero SAE 1030 soldado por ESW.

4.2.2. Observaciones microscópicas

Con el propósito de tener una idea mas clara de los cambios microestructurales que ocurren en un acero SAE 1030, como consecuencia del ciclo térmico cuando se suelda por el proceso de soldadura - por electroescoria, en la figura 41 se presenta una microfotografía compuesta de una muestra soldada con 36V, 350Amperios. Esta figura representa el proceso de transición ó cambios microestructurales en la muestra, desde unos 10 mm. del centro de la zona de fusión hasta unos 10 mm. dentro del metal base atravezando en toda su extensión la ZAC. Se observan cambios claros en el tamaño y forma de los granos a través de la unión, lo que pone de manifiesto los resultados del ciclo térmico a que se hizo referencia.

En vista de la poca importancia desde el punto de vista comparativo, que reviste la medición del tamaño de grano en la zona de fusión y en el metal base por tratarse básicamente de granos columnares, se hicieron mediciones del tamaño de grano únicamente en la ZAC, en regiones cercanas al metal base y a la zona de fusión, para dos muestras que a

continuación se describen: la primera muestra llamada típica ó representativa (muestra soldada con 36 voltios y 350 amperios) que dió como resultado un calor suministrado de $1,29 \times 10^8$ joules/m y otra soldada con parámetros de soldadura más elevados que produjeron un calor suministrado de $1,45 \times 10^8$ joules/m.

En la ZAC en una región cercana a la zona de fusión en la muestra típica, el tamaño de grano resultante fue ASTM N° 9 mientras que cercano al metal base en la misma ZAC el tamaño resultante fue ASTM N° 8, consecuencia ésta de la baja velocidad de enfriamiento por la menor temperatura en la ZAC contigua al metal base.

Para la segunda muestra analizada, el tamaño de grano cercano a la zona de fusión fue ASTM N° 7, mientras que en la ZAC próxima al metal base el valor hallado fue ASTM N° 8.

Esta diferencia es consecuencia de la menor velocidad de enfriamiento en la zona de fusión al tener esta muestra un calor suministrado mayor.



Estas diferencias de tamaño de grano en las muestras analizadas tienen su origen en el ciclo térmico a que fue sometida la unión soldada.

A continuación y con el propósito de analizar las fases que se encuentran presentes en las dos muestras estudiadas, se analizarán las microfotografías correspondientes.

Las microfotografías de las figuras 42 a 45 pertenecen a la muestra soldada con 36 voltios y 350 amperios. En la microfotografía de la figura 42 se muestra la zona de fusión en la que se tiene una estructura compuesta de ferrita acicular rodeada de perlita fina. En la microfotografía de la figura 43 se muestra la ZAC cerca a la zona de fusión. Se observa una estructura compuesta de perlita fina y agujas de ferrita, pero de mayor longitud que las halladas en la zona de fusión. Esto puede ser debido a que esta región se enfrió más lentamente durante el proceso de soldadura lo que provocó un crecimiento de grano. El tamaño de grano correspondiente es ASTM N° 9. En la misma ZAC pero cerca del metal base, la microfotografía de la figura 44 muestra granos de ferrita uniformes o equi-

axiales rodados de perlita fina. El tamaño de grano correspondiente es ASTM N^o 8.

Continuando hacia el metal base se halló una estructura de matriz perlítica con granos de ferrita alargados con tendencia a la formación de estructura Widmastatten. Ver microfotografía de la figura 45. Al comparar esta figura con la figura 22 correspondiente al metal base sin soldar, se aprecia que no existen diferencia entre ellas, concluyéndose que el calor suministrado a esta muestra soldada no es suficiente para cambiar la microestructura del metal base.

En el análisis de la probeta con alto calor suministrado se observó lo siguiente: (soldada con 40 voltios, 350 amperios).

En la microfotografía de la figura 46, se presenta la zona de fusión del especimen analizado. Se observa granos y agujas de ferrita grandes y colonias de perlita de mayor tamaño y mas gruesa que aquella obtenida en la figura 42 de la muestra típica, justificándose la diferencia debido a que siendo el calor suministrado mayor en la

muestra de la figura 46, la velocidad de enfriamiento es menor lo que lleva consigo el aumento del tamaño de grano de la ferrita.

En la microfotografía de la figura 47, se presenta la ZAC cercana a la zona de fusión. Se observa en ella granos grandes de ferrita consecuencia de una posible recristalización por haberse disminuído la cantidad de agujas de ferrita. Se notan además colonias de perlita fina resuelta. Al comparar esta figura con la figura 43 que es una zona correspondiente de la muestra típica, se observa menor cantidad de agujas de ferrita. En la figura 48, se presenta la microfotografía de la ZAC cercana al metal base, observándose en ella granos grandes de ferrita de forma equiaxial, aunque de menor tamaño que los mostrados en la figura 47. Examinando para efectos de comparación la figura 44 que es una zona correspondiente de la muestra típica, se hace notar que la diferencia entre estas dos muestras es su tamaño de grano, (a pesar que se muestra en las figuras igual número de tamaño de grano, por el hecho de que el tamaño de grano se expresa en números enteros). La figura 48 muestra realmente un tamaño de grano

ligeramente mayor. Una cantidad de calor ma -
yor en la muestra de la figura 48, produce una
velocidad de enfriamiento menor y por lo tanto
un tamaño de grano ligeramente mayor.

En la figura 49, se presenta la microestructura
del metal base en la muestra que se analiza. En
ella se observa una reducción de agujas de fe-
rrita, observándose también perlita laminar.

Comparando esta última figura con las figuras 45
y 22 se concluye que no existe diferencia en la
microestructura de estas tres muestras a pesar
de que dos de ellas han sido obtenidas de mueses
tras soldadas. El calor suministrado durante -
ESW no ha sido suficiente para cambiar su microes
tructura.

4.3. ANALISIS DE LAS PROPIEDADES MECANICAS

Los ensayos mecánicos realizados fueron: ensayos de
dureza y evaluación de la resistencia mecánica.

Estos ensayos se realizaron con el objeto de obseres
var los cambios en propiedades mecánicas debido a
la variación de los parámetros de soldadura, para dees

terminar de esta manera aquellos parámetros que reproducen las mejores propiedades mecánicas sin que exista un cambio brusco de ellas a través de la unión.

4.3.1. Ensayos de dureza

Se realizaron estos ensayos en varias muestras. En la figura 50, se presenta la distribución de la dureza desde la zona de fusión al metal base para las dos muestras que se han venido analizando. Se nota en la figura 50 que para la muestra típica o representativa (36V, 350A), la zona de fusión presenta mayor dureza que la muestra obtenida con parámetros de soldadura de 40V, 350A, esto se debe a que ésta posee una cantidad de calor suministrado mayor y por lo tanto la velocidad de enfriamiento es menor lo que lleva consigo un aumento del tamaño de grano y una reducción de la dureza. En la zona correspondiente al metal base, existe una pequeña diferencia en la dureza de las dos muestras, debido a la falta de homogeneidad del material y a variaciones del ensayo, ya que observando las figuras 22, 45 y 49 las cuales corresponden al acero SAE 1030 sin soldar, la primera de ellas y las dos restantes a muestras -

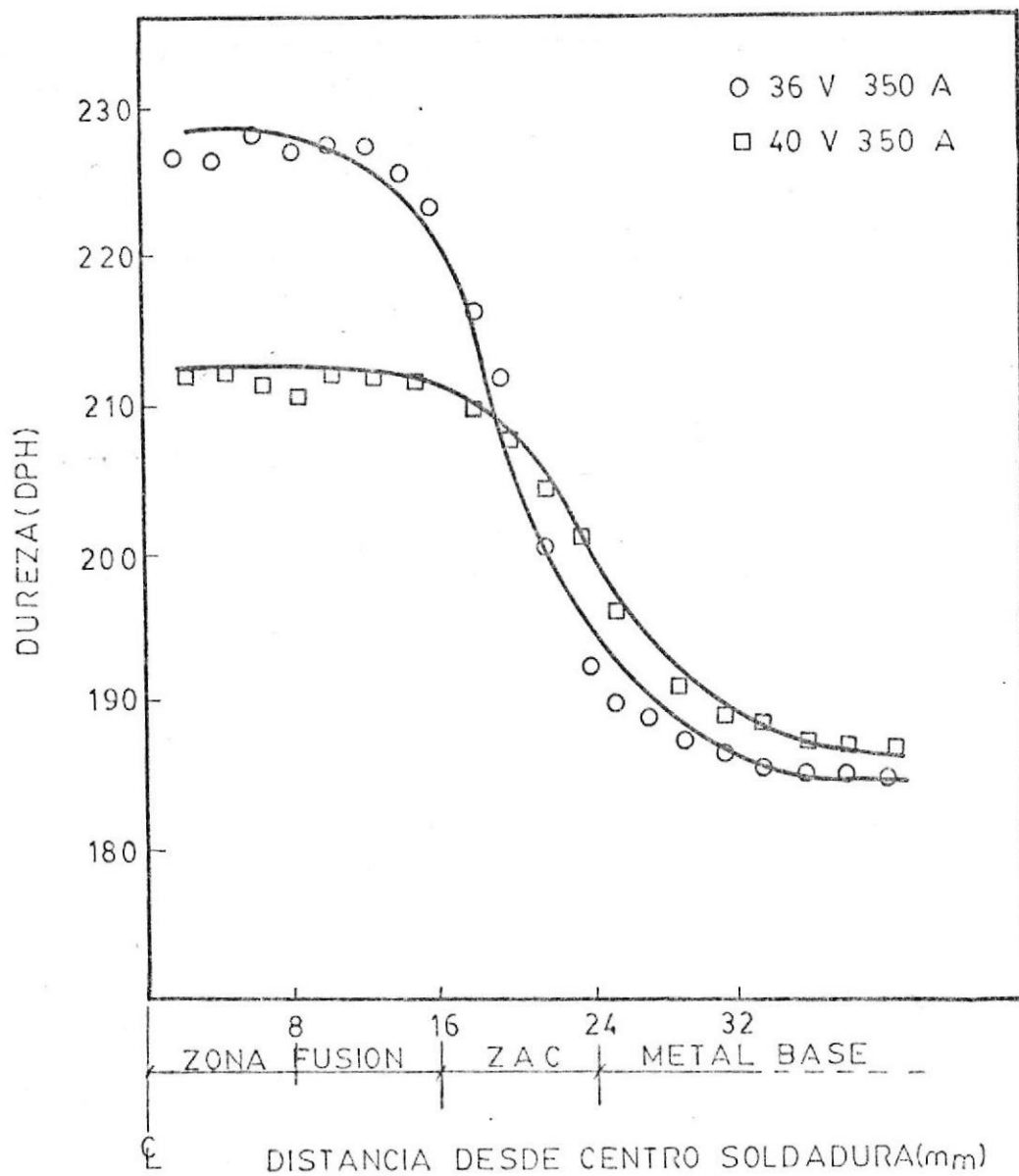


FIGURA 50 .- Perfiles de durezas a través de la sección transversal de las uniones soldadas de un acero SAE 1030 soldado por ESW.

soldadas, se demuestra que no existe diferencia en sus microestructuras.

4.3.2. Evaluación de la resistencia mecánica

De la Tabla VIII se puede observar que la resistencia a la tracción en regiones cercanas a la zona de fusión de la muestra soldada con 36V y 350A, es ligeramente mayor que la resistencia a la tracción en la región correspondiente de la muestra soldada con 40V y 350A. En el metal base sucede lo contrario. Estas diferencias se explican por la diferencia en el valor de la dureza de las dos muestras, producto del ciclo térmico desarrollado.

4.4. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO

Se realizaron varios ensayos no destructivos por ultrasonido en algunas de las soldaduras realizadas, con la finalidad de determinar discontinuidades internas. Se encontraron varias muestras soldadas con defectos de falta de fusión tan solo en el arranque. En la figura 51, se observa una soldadura ensayada por ultrasonido

TABLA VIII

PROPIEDADES MECANICAS DE LAS SOLDADURAS POR ESW

(Acero SAE 1030)

MUESTRA SOLDADA CON (36V, 350A)		MUESTRA SOLDADA CON (40V, 350A)	
DUREZA DPH	RESISTENCIA A LA TRACCION Kg/mm ²	DUREZA DPH	RESISTENCIA MECANICA Kg/mm ²
220	73,63	209	70,1
220	73,63	209,5	70,45
222	74,68	207	69,47
224	75,39	206	69,04
222	74,68	208	69,75
224	75,39	210	70,43
222	74,68	210	70,43
218	72,92	213	71,51
213	71,16	210	70,43
208	69,75	208	69,75
192	64,47	200	66,93
193	64,82	192	64,47
190	63,76	193	64,82
188	63,10	192	64,46
188	63,10	191	64,11
188	63,10	192	64,46
188	63,10	192	64,46
187	62,7	193	64,81
187	62,7	195	65,52
187	62,7	192	64,46
187	62,7	192	64,46

Los valores de DPH fueron tomados cada 2 mm. desde el centro de la zona de fusión hasta el metal base.

que presentó dichos defectos, obsérvese en forma clara el pulso resultante (derecho) del defecto presente. Se observa también en esta figura la disposición del equipo y la muestra durante el ensayo.

V. CONCLUSIONES

1. El acero SAE 1030, de 28 mm. de espesor soldado por el proceso de electroescoria con una corriente de 300 amperios y un rango de voltajes entre 31 y 40 voltios, produce buenas soldaduras. El mismo resultado se obtiene al soldar con una corriente de 350 amperios y voltajes entre 30 y 36 voltios. Esto implica que se obtiene un amplio rango de parámetros de soldadura en los cuales se puede soldar este acero obteniéndose uniones libres de fallas.
- 2. El cambio de propiedades mecánicas, dureza y resistencia mecánica en la unión soldada para las muestras analizadas, no es muy pronunciado, lo que se traduce en la obtención de soldaduras con propiedades mecánicas - próximas al metal base.
3. El tamaño de grano en la ZAC es pequeño, lo que contrasta con el grano grueso que se obtiene en la zona de fusión y en el metal base de las muestras analizadas.
4. La microestructura del acero SAE 1030 cambió desde una estructura Widmasttaten a una microestructura de granos equiaxiales de ferrita en una matriz de perlita fi

na (no resuelta en algunos casos) en la ZAC. En la zona de fusión, se obtuvo nuevamente una estructura Widmasttaten con agujas de menor magnitud que las halladas en el metal base.

5. Las dimensiones de la zona de fusión y ZAC presentan un crecimiento mayor cuando se aumenta el voltaje que cuando se aumenta la corriente. La penetración es una magnitud que está en correspondencia con la zona de fusión, presenta una variación similar. El factor de forma presenta un crecimiento lineal - con el voltaje, como consecuencia del aumento del - ancho de la soldadura en una proporción mayor que la profundidad de la pileta de soldadura. La dilución presenta un aumento con el voltaje independiente de la corriente de soldadura utilizada.
6. El efecto de añadir fundente de arranque antes de iniciar el arco eléctrico en este método de soldadura, permite obtener un proceso estable en menor tiempo.

APENDICE I

CALCULO DE CONSUMO DE ELECTRODO

Para determinar la cantidad necesaria de electrodo cuando se suelda con la máquina A2 de guía consumible (ESW) se utiliza la siguiente expresión:

$$W = 7,85 \times V_e \text{ (gr)}$$

donde:

V_e = Volumen de electrodo requerido

V_e se determina de la siguiente manera:

V_e = Volumen de la unión - Volumen de la guía.

El volumen de una guía con un diámetro exterior d_1 y un diámetro interior d_2 es:

$$V_g = L \times (d_1^2 - d_2^2) \pi / 4$$

El volumen de la unión es:

$$V_u = G \times P \times L$$

donde:

G = Separación de los bordes a soldarse (cm)

P = Espesor de las placas (cm)

L = Longitud de la unión (cm)

El volumen de electrodo requerido es entonces:

$$V_e = L \left[G \times P - \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \right] \text{ cm}^3$$

A manera de información los fabricantes ESAB indican que para producir un metro de unión en ESW, se requieren aproximadamente 5 kg de electrodo para placas de 15 mm. separadas entre bordes 18 - 22 mm. y una guía con diámetros de 8 mm. y 3 mm. exterior e interior respectivamente.



BIBLIOTECA

APENDICE II

TABLA A-I

COMPOSICION QUIMICA DEL METAL DEPOSITADO UTILIZANDO
UN ELECTRODO OK 14.50 Y UN FUNDENTE DE ARRANQUE OK
FLUK 10.50 (Ref. 8)

C	Si	Mn	Ni	Mo
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0.10	0.25	1.40	0.60	0.20

TABLA A-II

PROPIEDADES MECANICAS DEL METAL DEPOSITADO
UTILIZANDO ELECTRODO OK 14.50 Y FUNDENTE
OK 10.50 (Ref. 8)

Límite de tracción	Límite de rotura	Resistencia al
kg/mm ²	kg/mm ²	impacto
		Joules
52	64	80 (a - 20°C)

TABLA A-III

COMPOSICION QUIMICA DE DIFERENTES FUNDENTES
PARA ESW (%) (Ref. 9)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O, K ₂ O	FeO	CaF ₂	S	P
33-36	11-15	21-26	4-7	5-7	-	1,5	13-19	0,15	0,15
33-38	5,5	28-32	4-8	1,0	3-4	1,5	12-16	0,15	0,15
18-22	19-23	7-9	12-15	12-15	1.3-1.7	1,0	20-24	0,05	0,05
46-48	3	24-26	3	16-18	0.6-0.8	1,5	5-6	0,15	0,10

APENDICE IIITABLA A-I

CARACTERISTICAS TECNICAS DE LA MAQUINA A2 PARA
EL PROCESO DE SOLDADURA BAJO ESCORIA (%) (Ref.7)

SOLDADURA

Longitud máxima de la unión vertical	2000 mm.
Separación máxima de los bordes	30 mm.
Espesor máximo de las chapas	15 mm.

EQUIPO

Peso sin bobina	20 kg.
Deslizadera horizontal, carrera máxima	130 mm.
Deslizadera vertical, carrera máxima	130 mm.
Velocidad máxima del alambre	336 m/n

TABLA A-II

CARACTERISTICAS TECNICAS DE LA FUENTE DE
PODER* (Ref. 7)

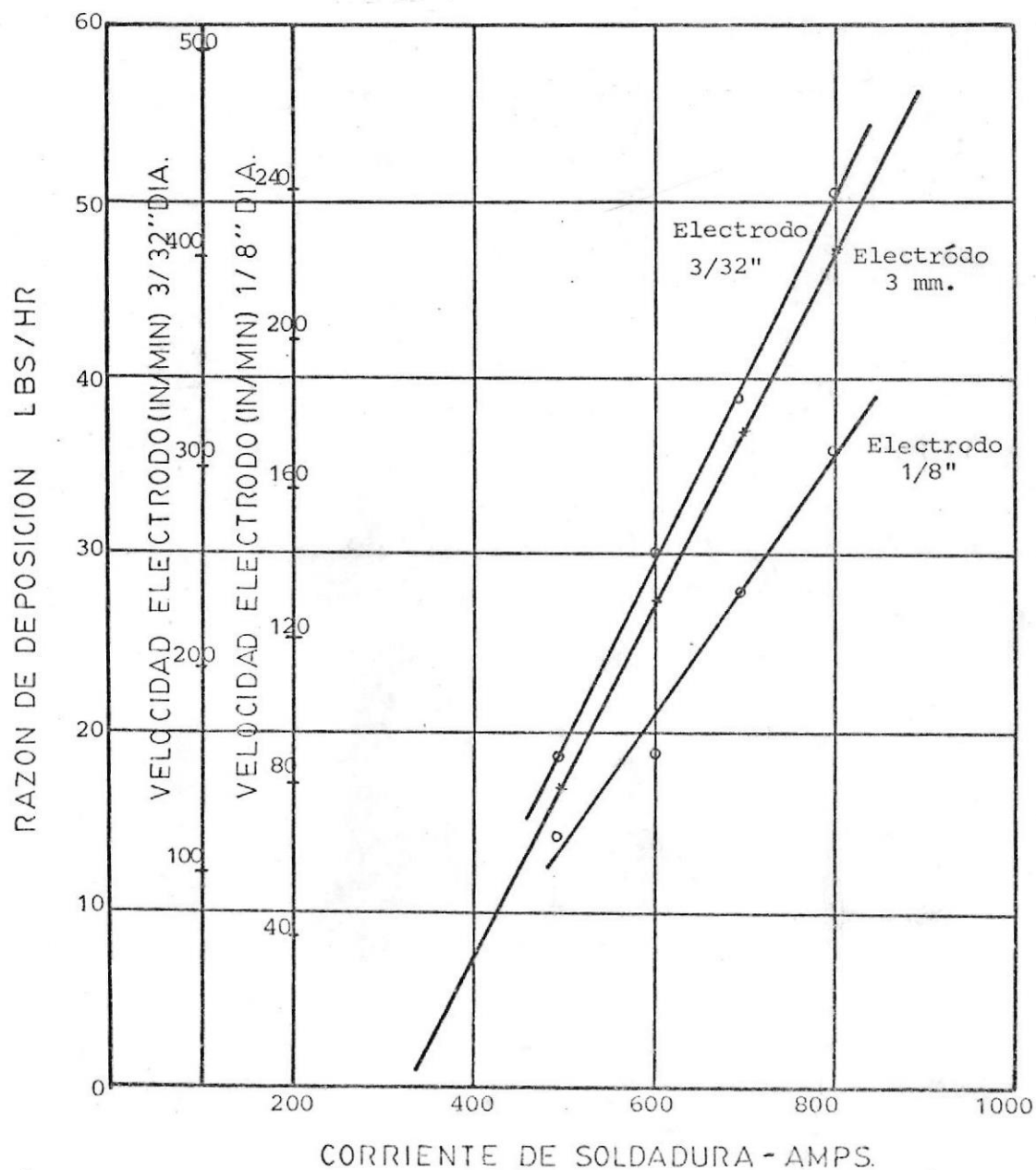
CAPACIDAD	FACTOR DE MARCHA	TENSION EN VACIO
800A, 44V	80%	16 a 54V
710A, 44V	100%	

* Rectificador LAD 800 de capacidad media para soldeo automático.

APENDICE IV

TABLA A-IV

CARTA DE CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ALIMENTACION DEL
ELECTRODO (Ref. 2)



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Metals Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1973.
2. The Porta-Slag Welding Process, Hobart Brothers Technical center. Ohio 1970.
3. Serrano, O., A Comparison of as-welded and stress-relieved 2 1/4 Cr - 1 Mo Steel. Electroslog Weldments: Microstructure and Properties. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, Nov. 1979.
4. Linnert, G. Welding Metallurgy Vol. 2. American Welding Society, 1965.
5. Medina, F., Afino por electroescoria. Revista metalurgia Mecánica, Cenim, España. Vol. 11, # 2, 1975.
6. Paton, B.E. Electroslog Welding. American. Welding Society New York, 1962.
7. Instruction book, A2C.G. para soldadura por electroescoria. ESAB. 1980.
8. Manual de soldadura ESAB. Materiales de Aportación y equipos de soldadura para la soldadura manual y automática. ESAB. 1980.
9. Koch, H., Manual de la tecnología de la soldadura eléctrica por Arco. Mannheim 1965.

10. Culp, J.D., Electroslog Weldments: Performance and need research. Welding Journal. AWS. Julio/1979.
11. Kehl, Principles of metallographic Laboratory practice. Metallurgy and Metallurgical Engineering Series. 1949.
12. Metal Handbook, Vol. 8, Metallography, Structures and phase diagrams, American Society for metals, Metals Park , Ohio, 1973.
13. Linnert, G.E., Welding Metallurgy Vol. 1. American Welding Society, 1965.
14. Sole Pulg, F. Dureza de los metales. Instituto del Hierro y el acero. Julio 1969.



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA