

7
F.L.3.
C.757

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



"EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LA MICROESTRUCTURA
Y PROPIEDADES MECANICAS EN SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA
DEL ACERO SAE-1030"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de

INGENIERO MECANICO

presentada por

CARLYLE CONSTANTE MOREIRA

Guayaquil-Ecuador

1983

A G R A D E C I M I E N T O

A 1a ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL



Al Ing. OMAR SERRANO V., Director
de esta Tesis, por su permanente
colaboración en la dirección de
la misma.

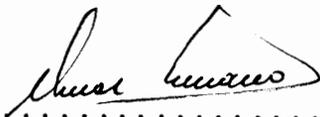
A los Profesores del
Departamento de Inge-
nería Mecánica.

D E D I C A T O R I A

A mis Padres: Víctor (+) y Angélica

A mis Hermanos: Rocky, Walter (+) y Marylina

A Petyta



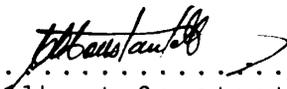
.....
Ing. Omar Serrano V.,

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

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


.....
Carlyle Colbert Constante Moreira

R E S U M E N

Se describe en detalle el método de soldadura por electroescoria, un proceso moderno de soldadura utilizado para la unión de componentes metálicos de gran sección. Se realizan depósitos de soldaduras por electroescoria en el acero SAE-1030 en placas de 32 mm. de espesor provenientes de planquillas obtenido por colada continua. Los parámetros de soldadura que permiten obtener uniones libres de defectos se fijan en 39 voltios y 360 amperios. La microestructura resultante de las soldaduras en la zona de fusión consiste de ferrita fina acicular y perlita. La zona afectada por el calor presenta también esta microestructura acompañada además de algunos granos grandes equiaxiales, crecidos a expensas de la alta temperatura del proceso y a una relativa baja velocidad de enfriamiento. Finalmente, y con el propósito de mejorar la tenacidad, medida mediante ensayos de impacto Charpy, se someten las uniones soldadas a un tratamiento de alivio de tensiones a 690°C, obteniéndose un significativo aumento de la energía absorbida durante el ensayo y una reducción de la temperatura de transición en las diferentes regiones de las soldaduras.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN. . . . .	.VI
INDICE GENERAL . . . . .	.VII
INDICE DE FIGURAS. . . . .	.IX
INDICE DE TABLAS . . . . .	.XVII
INTRODUCCION. . . . .	.19
CAPITULO I	
PROCESO DE SOLDADURA POR ELECTROESCORIA. . . . .	.21
1.1 Descripción del Proceso. . . . .	.21
1.2 Ventajas y Aplicaciones del Proceso. . . . .	.24
1.3 Estudio de los Parámetros de Soldadura . . . . .	.26
CAPITULO II	
2.1 Metalurgia de las Soldaduras por Electroescoria. . . . .	.39
2.2 Influencia del Calor Suministrado durante el Proceso. . . . .	.45
2.3 Influencia del Tratamiento Térmico. . . . .	.50
2.3.1 Microestructura y Macroestructura. . . . .	.51
2.3.2 Tamaño de Grano. . . . .	.53
2.3.3 Resistencia Mecánica y Dureza. . . . .	.54
2.3.4 Propiedades al Impacto. . . . .	.56

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL. . . . .	.60
3.1 Materiales Utilizados . . . . .	.60
3.1.1 Material Base. . . . .	.60
3.1.2 Material de Aporte. . . . .	.62
3.2 Equipo Utilizado. . . . .	.65
3.3 Diseño de la Unión. . . . .	.70
3.4 Técnica Operativa . . . . .	.74
3.5 Ensayo Radiográfico de la Soldadura . . . . .	.79
3.6 Tratamiento Térmico de Alivio de Tensiones. . . . .	.81
3.7 Obtención de Muestras para Análisis. . . . .	.84
3.7.1 Metalografía. . . . .	.84
3.7.2 Tamaño de Grano. . . . .	.86
3.7.3 Tensión. . . . .	.87
3.7.4 Dureza. . . . .	.89
3.7.5 Impacto. . . . .	.93

CAPITULO IV

DISCUSION DE RESULTADOS . . . . .	.95
CONCLUSIONES.	138
APENDICES.	140
BIBLIOGRAFIA.	142

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
1 Esquema del proceso de Soldadura por electroescoria utilizando una guía consumible (Ref.1).....	23
2. Representación esquemática del proceso por electroescoria mostrando la conformación del metal soldado a partir de la fusión del metal base y los materiales de aporte (Ref.2).....	25
3 Representación esquemática de la relación lineal entre la velocidad de alimentación del electrodo y la intensidad de corriente para un diámetro de alambre de 0.238 centímetros (Ref.2).....	28
4 Representación esquemática de la variación de la profundidad de la pileta de soldadura en función la velocidad de alimentación del electrodo (Ref.4).	30
5 Representación esquemática de la variación de la profundidad de la pileta de soldadura en función del voltaje para dos velocidades de alimentación del electrodo (Ref. 4).....	31
6 Representación esquemática de la variación del ancho de la soldadura en función de la velocidad de alimentación del electrodo (Ref. 3).....	32

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
7	Representación de la variación del ancho de la soldadura con el voltaje para dos velocidades de alimentación del electrodo (Ref. 4).....	34
8	Esquema de la profundidad de la piletta (H), ancho del cordón (b_s) y ángulo de enuentro (α)(Ref.2).	36
9	Representación esquemática del efecto de la velocidad de alimentación del electrodo y el voltaje de soldadura sobre el factor de forma (Ref. 4)...	37
10	Representación de una unión soldada por electroescoria y las diferentes regiones que se originan (Ref. 4).	40
11	Esquema de las estructuras típicas de las soldaduras por ESW, Tipos I, II, III y IV (Ref.6).....	43
12	Variación de las características de soldaduras por electroescoria por efecto del calor generado para tres casos distintos (corriente constante)(Ref.9).	48
13	Tamaño de grano ASTM del acero 2 1/4 Cr 1% Mo soldado por ESW para dos condiciones: Sin tratamiento térmico posterior y con tratamiento de alivio de tensiones a 695°C (Ref. 10).....	55
14	Microestructura de la sección transversal del material base del acero SAE-1030.....	63
15	Equipo utilizado en el soldeo automático por el método de electroescoria.....	66

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
16	Fuente de poder LAD-800 y caja control PEF.....	67
17	Conexión eléctrica de la fuente de poder, caja-control y cabezal de soldadura (Ref.11).....	69
18	Esquema de la geometría rectangular a soldar mostrando las dimensiones.....	73
19	Esquema del arreglo de las placas para las soldaduras por electroescoria de geometría rectangular....	75
20	Soldadura del acero SAE-1030 por el proceso de electroescoria antes de la remoción de las zapatas refrigeradas por agua.....	80
21	Muestra de una soldadura del acero SAE-1030 soldado por electroescoria sometida a un tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	82
22	Razón de enfriamiento y calentamiento de la pieza soldada durante el tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	83
23	Esquema de las secciones metalográficas analizadas.	85
24	Esquema del normógrafo para la medición del tamaño de grano (Ref.7).....	88
25	Probeta para el ensayo de tensión de la muestra de soldadura, según norma SA-370 (Ref.12).....	90
26	Extracción de las probetas para ensayo de impacto Charpy del acero SAE-1030 soldado por electroesco-	

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
	ria, para las dos condiciones: sin tratamiento térmico posterior y con alivio de tensiones a 690°C, para las tres zonas..... 91
27	Probeta de ensayo para impacto Charpy del acero SAE-1030 soldado por electroescoria según norma SA-370 (Ref.12)..... 92
28	Sección transversal mostrando la macroestructura del acero SAE-1030 soldado por ESW, sin tratamiento térmico de alivio de tensiones.....100
29	Sección transversal mostrando la macroestructura del acero SAE-1030 soldado por ESW, con tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C.....100
30	Sección vertical mostrando la macroestructura del acero SAE-1030 soldado por ESW, sin tratamiento térmico de alivio de tensiones.....102
31	Sección vertical mostrando la macroestructura del acero SAE-1030 soldado por ESW, con tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C.....102
32	Microestructura de la sección transversal del metal base del acero SAE-1030 soldado por ESW. Sin tratamiento de alivio de tensiones.....104
33	Microestructura de la sección transversal del metal base del acero SAE-1030 soldado por ESW sometido

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
	da a un tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	104
34	Microestructura de la sección transversal de la ZAC del acero SAE-1030 soldado por ESW. Sin tratamiento de alivio de tensiones.....	106
35	Microestructura de la sección transversal de la ZAC del acero SAE-1030 soldado por ESW. Con tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C....	106
36	Microestructura de la sección transversal de la ZAC cercana a la zona de fusión del acero SAE-1030 soldado por ESW. Sin tratamiento de alivio de tensiones.....	108
37	Microestructura de la sección transversal de la ZAC, cercana a la zona de fusión, del acero SAE-1030 soldado por ESW. Con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	108
38	Microestructura de la sección transversal de la zona de fusión del acero SAE-1030 soldado por ESW. Sin tratamiento de alivio de tensiones.....	110
39	Microestructura de la sección transversal de la zona de fusión del acero SAE-1030 soldado por ESW. Con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	110

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
40	Microestructura de la sección vertical de la zona de fusión del acero SAE-1030 soldado por ESW. Sin tratamiento de alivio de tensiones.....	111
41	Microestructura de la sección vertical de la zona de fusión del acero SAE-1030 soldado por ESW. Con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	111
42	Dureza (DPH) Vs Distancia desde el centro de la soldadura de la probeta de acero SAE-1030 soldado por ESW.....	115
43	Energía Absorbida Vs Distancia desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado por ESW. Sin Tratamiento de alivio de tensiones. Ensayo a la temperatura ambiente.....	120
44	Porcentaje de fractura dúctil Vs Distancia desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado por ESW. Sin tratamiento de alivio de tensiones. Ensayada a la temperatura ambiente.....	120
45	Energía absorbida Vs Distancia desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado por ESW. Con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C. Ensayo a la temperatura ambiente.....	122
46	Porcentaje de fractura dúctil Vs Distancia desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado	

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
	por ESW. Con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C. Ensayo a la temperatura ambiente..... 122
47	Energía absorbida Vs Temperatura de ensayo de la ZF del acero SAE-1030 soldado por ESW para las dos condiciones: Sin tratamiento de alivio de tensiones y con alivio de tensiones a 690°C..... 126
48	Porcentaje de fractura dúctil Vs Temperatura de ensayo de la ZF del acero sae-1030 soldado por ESW para las dos condiciones: Sin tratamiento de alivio de tensiones y con alivio de tensiones a 690°C. 126
49	Energía absorbida Vs Temperatura de ensayo de la ZAC del acero SAE-1030 soldado por ESW para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C..... 128
50	Porcentaje de fractura dúctil Vs Temperatura de ensayo de la ZAC del acero SAE-1030 soldado por ESW para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con alivio de tensiones a 690°C..... 128
51	Energía absorbida Vs Temperatura de ensayo de la Zona MB del acero SAE-1030 soldado por ESW para las dos condiciones: Sin tratamiento de alivio de

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
	tensiones y con tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C.....	129
52	Porcentaje de fractura dúctil Vs Temperatura de ensayo de la zona MB del acero SAE-1030 soldado por ESW para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	129
53	Macrofotografías de las probetas de impacto ensayadas a la temperatura ambiente del acero SAE-1030 soldadas por el proceso de ESW, para las dos condiciones: sin tratamiento térmico posterior y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	134
54	Macrofotografías de las probetas de impacto ensayadas a 125°C del acero SAE-1030 soldadas por proceso ESW, para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	135

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
I Composición química del metal depositado utilizando un electrodo OK-1450 y una guía consumible OK-2132 (Ref. 7).....	61
II Propiedades mecánicas del metal depositado utilizando un electrodo OK-14.50 y una guía consumible OK-2132 (Ref. 7).....	61
III Separación de las placas a soldar por proceso ESW en función del espesor (Ref. 5).....	72
IV Observaciones de las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030 a voltaje e intensidad de corriente constante.....	97
V Resumen de los experimentos realizados, cálculo y medición de los parámetros de soldadura.....	98
VI Variación de la dureza de las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030 para las dos condiciones: Sin tratamiento de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C....	114
VII Resultados de las pruebas de tensión de las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030 en las	

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
	dos condiciones: sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con alivio de tensiones a 690°C..	117
VIII	Resultados del ensayo de impacto a la temperatura ambiente de las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030 para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con alivio de tensiones a 690°C.....	119
IX	Resultados del ensayo de impacto a diferentes temperaturas de las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030 para las dos condiciones: Sin tratamiento de alivio de tensiones y con alivio de tensiones a 690°C.....	124
X	Porcentaje de fractura dúctil correspondiente a las probetas de impacto ensayadas a diferentes temperaturas del acero SAE-1030 soldado por electroescoria para las dos condiciones.....	125
XI	Cálculo de la temperatura de transición de las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030 para las dos condiciones: sin tratamiento de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.....	132

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

Los procesos de soldadura por fusión son frecuentemente utilizados en la construcción y ensamblaje de elementos mecánicos. Estos procesos van generalmente asociados con el apareamiento de esfuerzos residuales producidos por la distorsión durante la soldadura, los mismos que pueden provocar la rotura de las piezas soldadas, como por ejemplo en soldaduras de depósitos y recipientes sometidos a presiones internas. Con un adecuado tratamiento térmico posterior al proceso de soldadura se puede lograr la eliminación de los esfuerzos internos, reducir el tamaño de grano y aumentar la tenacidad. Por lo tanto, los tratamientos térmicos de alivio de tensiones en las soldaduras permiten el control de las propiedades mecánicas y propiedades al impacto resultantes.

El propósito del presente estudio está orientado a mejorar las propiedades mecánicas de un acero SAE-1030 soldado por el proceso de electroescoria, utilizando zapatas de cobre refrigeradas por agua. Para este efecto se realiza un tratamiento térmico posterior de alivio de tensiones a 690°C con el fin de proporcionar a las soldaduras resultantes una

buena resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad.

CAPITULO I

PROCESO DE SOLDADURA POR ELECTROESCORIA

1.1 DESCRIPCION DEL PROCESO

El proceso de soldadura por electroescoria (ESW) es fundamentalmente un método automático de soldadura, que utiliza un arco eléctrico solamente en el instante del arranque y durante el tiempo necesario para fundir el fundente utilizado, que cumple el doble papel de electrolito y medio de protección. El calentamiento por efecto joule de una pileta de metal electroconductora líquida sirve para fundir el alambre de aporte, juntamente con una porción de metal base sobre ambos lados de la junta; es decir, que la energía térmica empleada para fundir el alambre-electrodo continuo y las piezas a soldar, proviene de la alta temperatura del baño de escoria fundida que por vía electrolítica conduce la corriente de soldadura. Se puede decir que el calor proviene de la resistencia a la corriente del baño líquido en un circuito eléctrico. El baño metálico resultante y la escoria fundida están contenidos den-

tro de la junta a soldar por zapatas de cobre refrigeradas por agua, convenientemente acopladas a los costados de las placas.

La geometría del sistema es tal, que la interfase sólido-líquido que delimita la pileta de metal fundido rápidamente asume una forma estacionaria que está determinada por la combinación de los parámetros o variables operativas, la separación de la unión y el espesor de las chapas.

El proceso de soldadura por electroescoria utiliza dos métodos: El de guía consumible y el de guía no consumible. En la figura 1 se muestra un esquema del método de guía consumible que se utilizará en la presente tesis. Al iniciar la soldadura se crea un arco entre el alambre-electrodo y la placa de inicio, continuándose hasta que se forma una capa suficientemente gruesa de escoria fundida. Luego la corriente fluye a través de la escoria, la cual mantiene una temperatura suficiente para fundir el electrodo de alambre, las superficies de las placas a soldar y la guía consumible. La parte interior del baño se solidifica por el enfriamiento proveniente de las placas y de las zapatas retenedoras, con lo cual la junta se va formando progre-

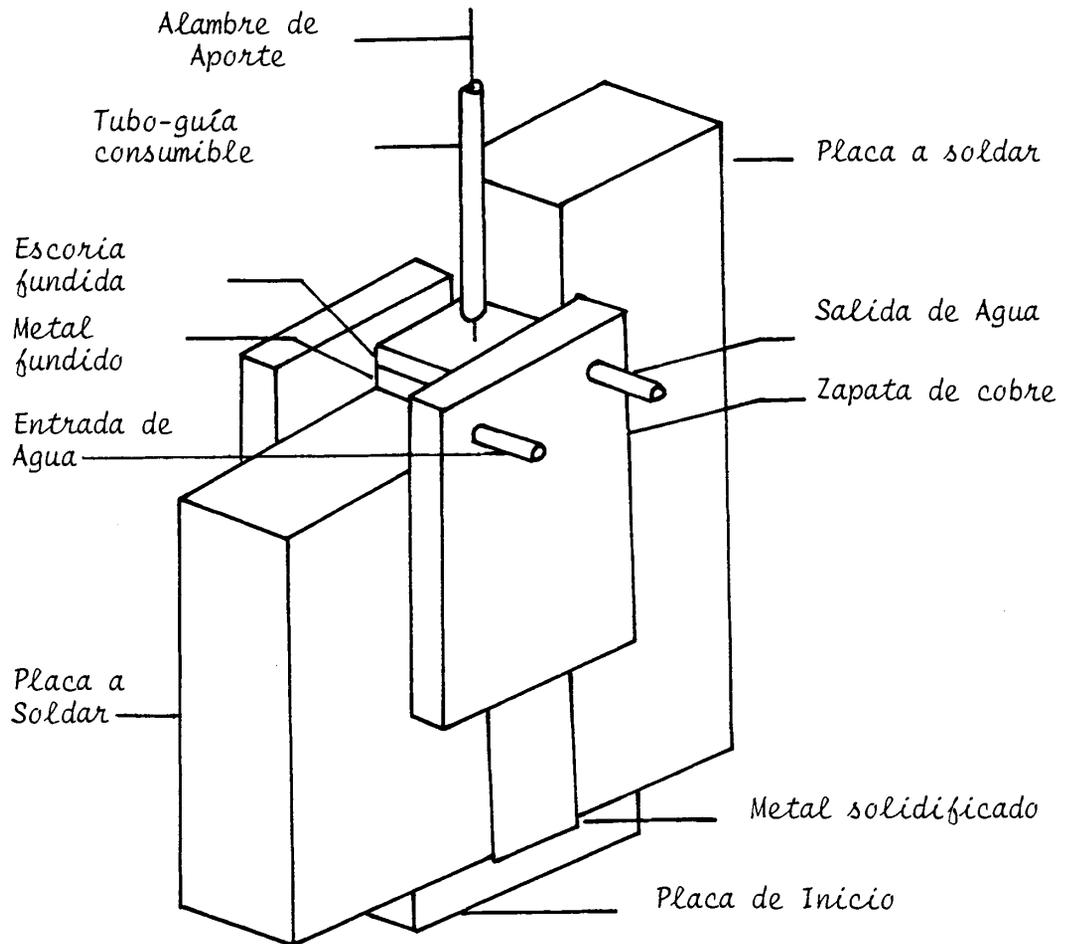


FIGURA 1 - DIAGRAMA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ELECTROESCORIA UTILIZANDO UNA GUIA CONSUMIBLE (REF. 1)

sivamente. La figura 2 también es una representación esquemática del proceso donde se muestra la conformación del metal soldado a partir de la fusión del metal base y los materiales de aporte.

1.2 VENTAJAS Y APLICACIONES DEL PROCESO

Entre las ventajas del uso del proceso por electroescoria, se pueden citar:

- Habilidad para soldar piezas de gran espesor en una sola pasada.
- Mínima preparación de los bordes con relación a otros procesos.
- Aporte de Calor Simétrico.
- Altas velocidades de soldadura.
- La varilla de aporte está protegida todo el tiempo de las contaminaciones.
- El rendimiento del alambre de aporte es del orden del 100%.

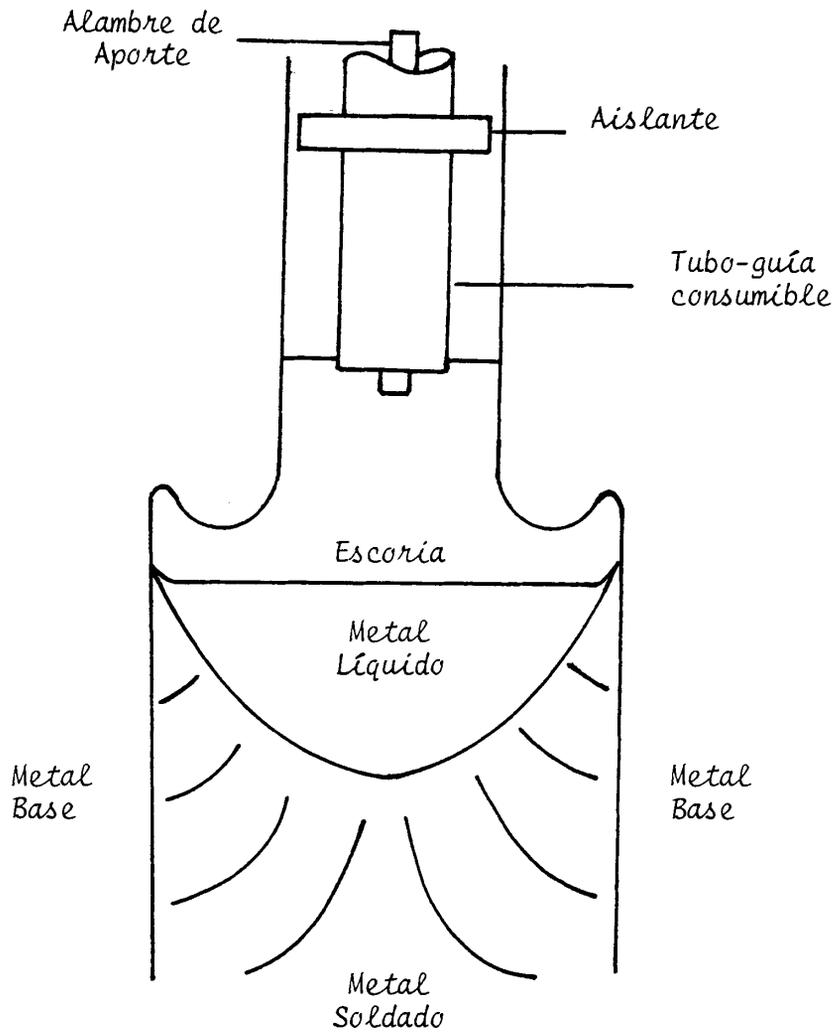


FIGURA 2.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL PROCESO POR ELECTROESCORIA MOSTRANDO LA CONFORMACION DEL METAL SOLDADO A PARTIR DE LA FUSION DEL METAL BASE Y LOS MATERIALES DE APORTE (REF.2).

- Rendimiento elevado que aumenta con el espesor de las placas.

Aplicaciones típicas del proceso de soldadura por electroescoria se las encuentra en:

- Soldaduras de recipientes para líquidos de alta presión.
- Construcciones navales.
- Perfiles estructurales en la construcción de puentes.
- Soldaduras de corazas de turbinas.
- Domos de vapor para calderas.
- Estructuras para prensas hidráulicas.

1.3 ESTUDIO DE LOS PARAMETROS DE SOLDADURA

El control de los parámetros de trabajo durante el proceso de soldadura por electroescoria es muy importante puesto que éstos tienen su efecto sobre la distribución térmica durante el proceso y consecuentemente sobre las

propiedades finales de la soldadura. Los parámetros más importantes del proceso son las variables ajustables: Intensidad de corriente, voltaje y velocidad del electrodo. La interacción entre estos parámetros permite controlar la formación de la soldadura, la velocidad de fusión y la resistencia mecánica.

En el proceso de soldadura por electroescoria la variable independiente velocidad del electrodo controla la intensidad de corriente mostrando una relación lineal (Figura 3). Se observa que la intensidad de corriente varía en forma directamente proporcional con la velocidad de alimentación del alambre electrodo. Investigaciones a este respecto, Paton (3), señala que esta relación se mantiene aunque a velocidades de alimentación elevadas la proporcionalidad es menos marcada. Se puede deducir que, en soldaduras por electroescoria, al referirse a la intensidad de corriente implícitamente se relaciona a la velocidad del alambre electrodo. Existen, sin embargo, factores durante el proceso, tales como pequeñas variaciones en el nivel de escoria, fluctuaciones periódicas de aporte del alambre, arcos laterales entre el tubo-guía y el metal base, que provocan fluctuaciones en la intensidad de corriente.

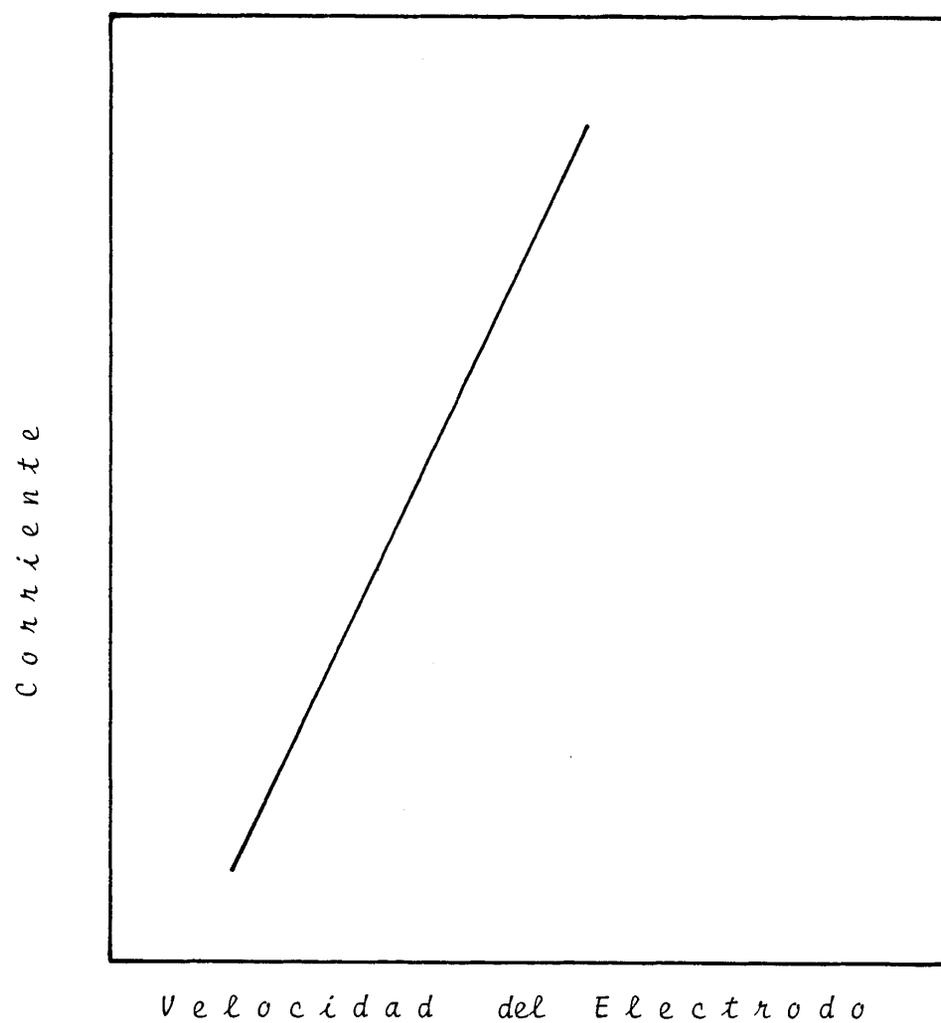


FIGURA 3.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA RELACION LINEAL ENTRE LA VELOCIDAD DE ALIMENTACION DEL ELECTRODO Y LA INTENSIDAD DE CORRIENTE PARA UN DIAMETRO DE ALAMBRE DE 0.238 CENTIMETROS (REF.2).

Durante la soldadura por electroescoria la forma de la pileta está influenciada por las variables ajustables: intensidad de corriente y tensión de soldadura, lo cual se muestra en las Figuras 4 y 5. En la Figura 4 se observa la variación de la profundidad de la pileta de soldadura al variar la velocidad de alimentación del electrodo. El incremento de la profundidad es debido a una alta corriente, para un voltaje dado, la cual produce una pequeña garganta entre el electrodo y la pileta de metal, concentrando la fuente de calor en el fondo de la pileta de escoria (2).

La variación de la profundidad de la pileta de soldadura con el voltaje están esquematizados en la figura 5. Se observa un ligero aumento en dicha profundidad con el incremento del voltaje, lo cual es debido al aumento en la cantidad de calor generado en la pileta de escoria (3). La figura 5 muestra esta tendencia para dos diferentes velocidades de alimentación del electrodo.

En la figura 6 se representa la influencia de la velocidad de alimentación del electrodo sobre el ancho de la soldadura en experimentos realizados a 44-46 voltios según Paton (3). Se observa una relación no lineal

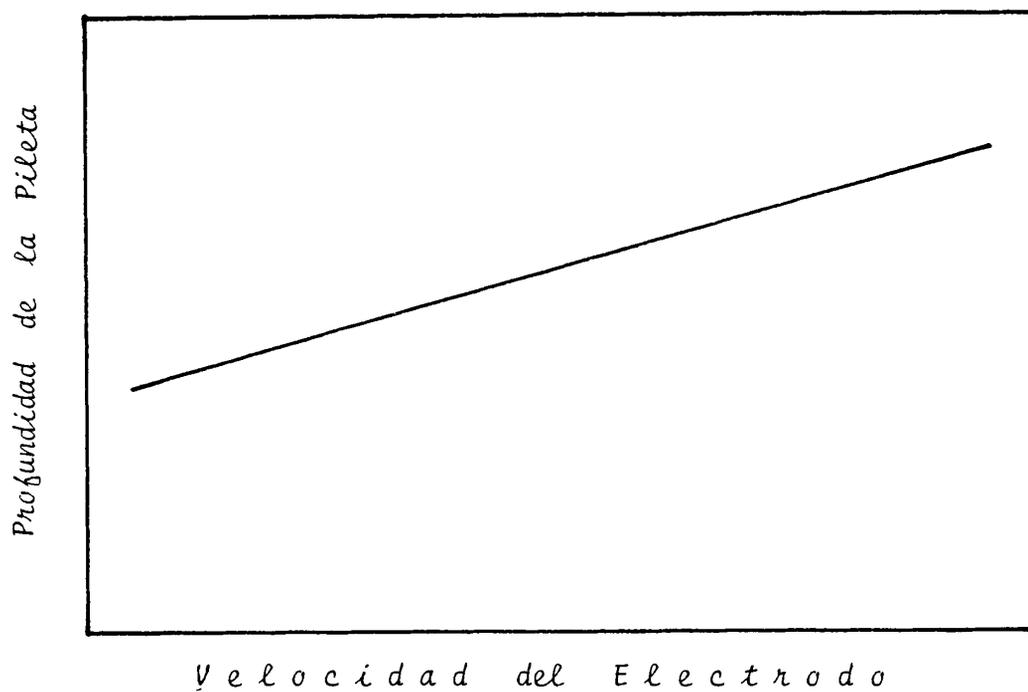


FIGURA 4.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA VARIACION DE LA PROFUNDIDAD DE LA PILETA DE SOLDADURA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE ALIMENTACION DEL ELECTRODO.
(REF. 4)

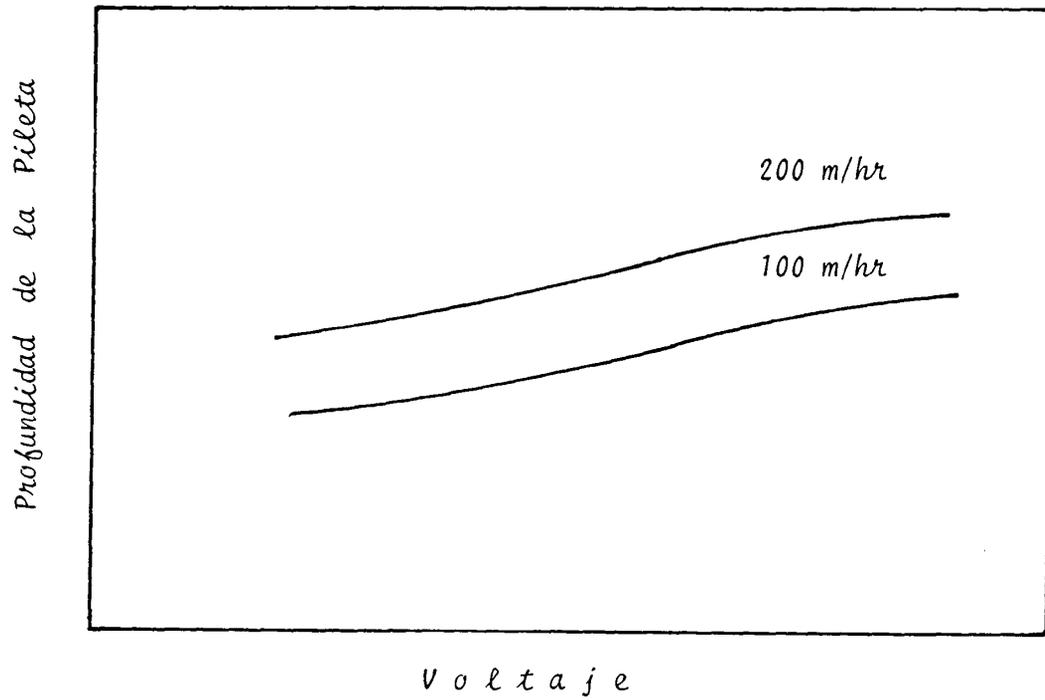


FIGURA 5.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA VARIACION DE LA PROFUNDIDAD DE LA PILETA DE SOLDADURA EN FUNCION DEL VOLTAJE PARA DOS VELOCIDADES DE ALIMENTACION DEL ELECTRODO. (REF.4).

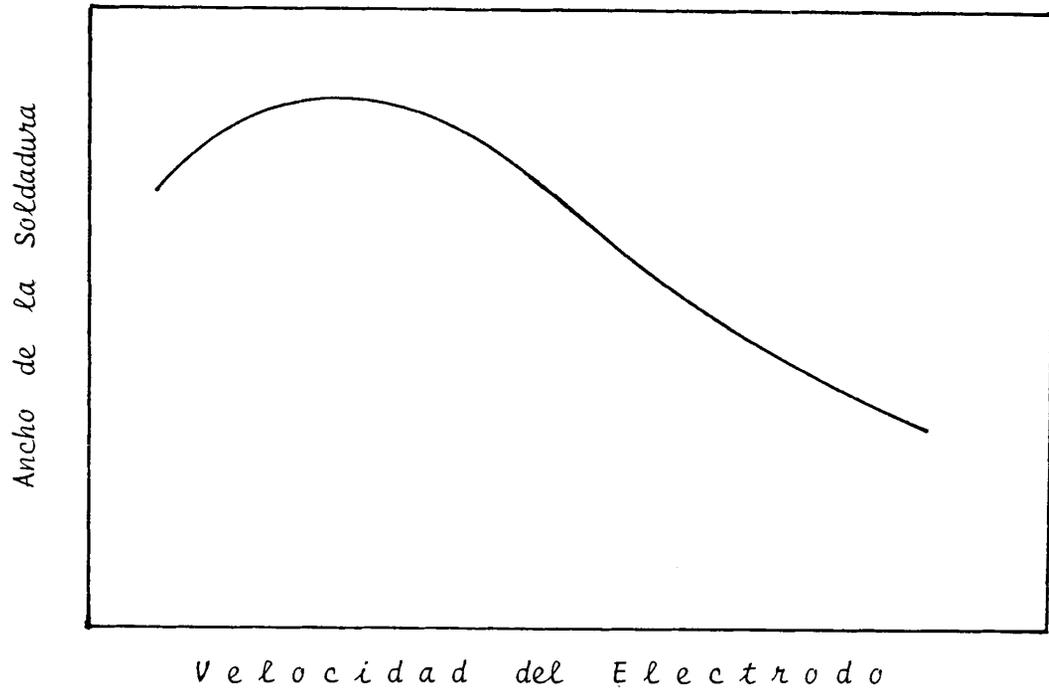


FIGURA 6.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA VARIACION DEL ANCHO DE LA SOLDADURA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE ALIMENTACION DEL ELECTRODO. (REF.3)

para bajas velocidades, notándose un ligero aumento del ancho de la soldadura, lo cual es debido a fluctuaciones en la velocidad del electrodo para bajas intensidades de corriente y por consiguiente variaciones periódicas del calor suministrado, que a su vez incide sobre el ancho de la soldadura. Para rangos de velocidades de alimentación altos se observa un decrecimiento considerable de dicho ancho de la soldadura.

La figura 7 representa la relación entre el ancho de la soldadura y la tensión para dos diferentes velocidades de alimentación del electrodo. Para cualquier velocidad de alimentación se observa que hay una mayor variación del ancho de la soldadura para valores de voltajes medios, mientras que para valores altos el aumento en el ancho del cordón es menor. Esta variación se debe a que la cantidad de calor introducido, para un cierto espesor de material y número de electrodos empleados, no es suficiente para aumentar el ancho de la soldadura (4). Los valores de voltajes bajos están limitados puestos que éstos son la causa de un proceso de soldadura inestable, además de soldaduras con poca penetración. La tensión normal de soldadura en electroescoria es del orden de 30 a 50 voltios (5).

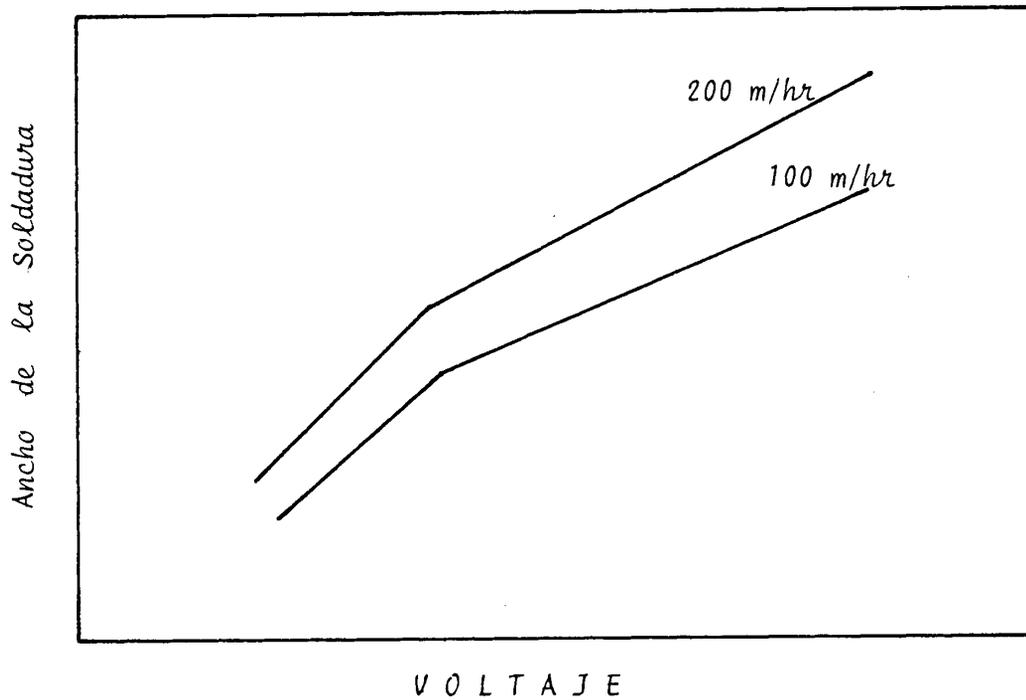


FIGURA 7.- REPRESENTACION DE LA VARIACION DEL ANCHO DE LA SOLDADURA CON EL VOLTAJE PARA DOS VELOCIDADES DE ALIMENTACION DEL ELECTRODO. (REF.4)

En ESW el factor de forma es un excelente parámetro de control del proceso porque tiene en cuenta la geometría del baño metálico a través del ancho (bs), profundidad de la pileta (H) y el ángulo de encuentro (α). El factor de forma se calcula por el cociente del ancho de la pileta a su profundidad.

El factor de forma está relacionado con la orientación relativa de los granos y por lo tanto con el ángulo de encuentro, el mismo que es formado por los granos crecidos a cada lado de la junta encontrados en el centro de la línea de fusión; en otras palabras, el factor de forma controla el ángulo de dirección de crecimiento de los granos respecto del eje de la soldadura. En la figura 8 se puede observar el ángulo de encuentro, es decir la disposición de los granos resultantes en electroescoria, el mismo que permite predecir la resistencia al agrietamiento. Un ángulo de encuentro mayor de 90° (bajo factor de forma) trae como consecuencia una soldadura de baja resistencia al agrietamiento. En cambio si los granos crecidos forman un ángulo de encuentro menor de 90° (alto factor de forma) la resistencia al agrietamiento es alta. En la figura 9 se representa la variación del factor de forma con la velocidad de alimentación del electrodo y el voltaje de soldadura. Se observa que dicho factor disminuye con

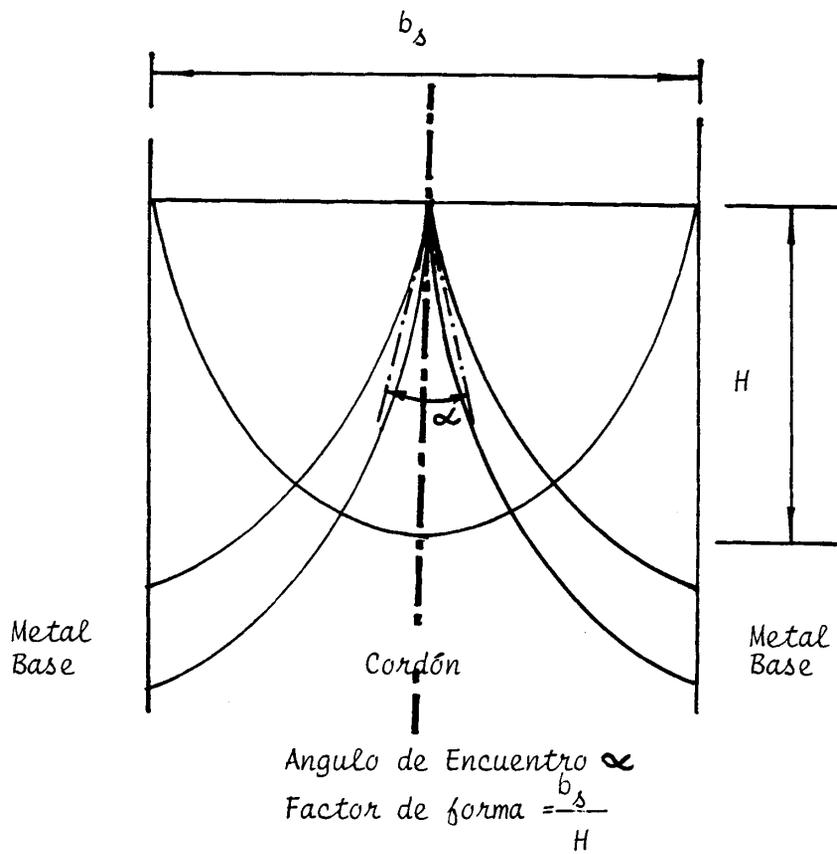


FIGURA 8.- ESQUEMA DE LA PROFUNDIDAD DE LA PILETA (H), ANCHO DEL CORDON (b_s) y ángulo de encuentro (α). (REF.2)

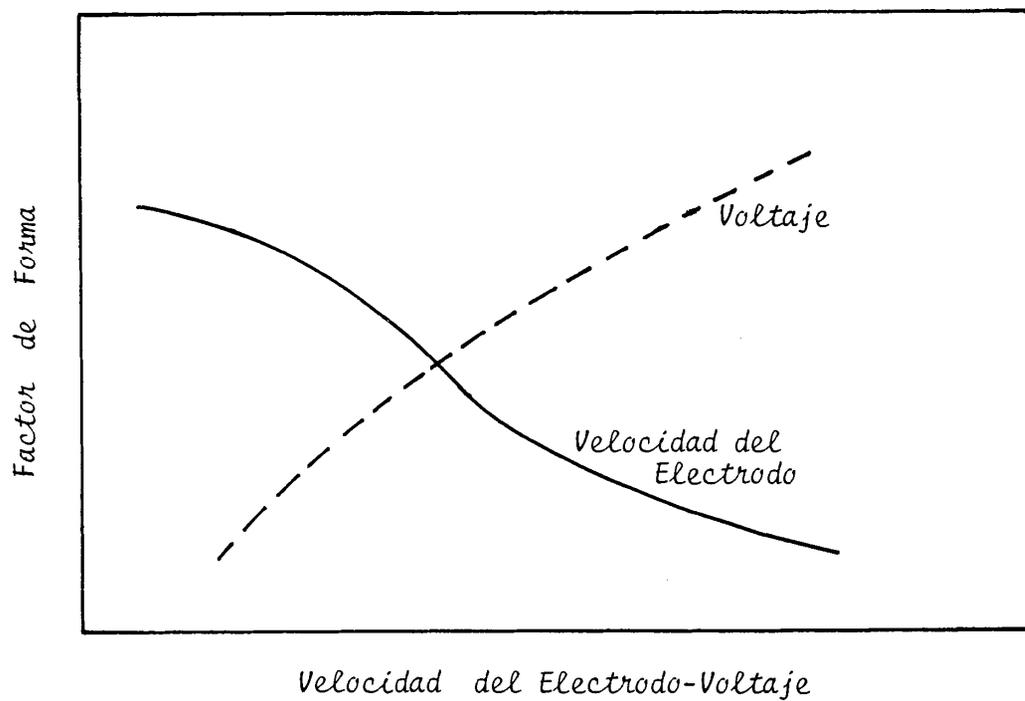


FIGURA 9.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ALIMENTACION DEL ELECTRODO Y EL VOLTAJE DE SOLDADURA SOBRE EL FACTOR DE FORMA. (REF. 4)

la velocidad de alimentación del electrodo, lo cual es debido a que la profundidad de la pileta de soldadura aumenta con la velocidad de alimentación del electrodo (Fig. 4). Además, se puede observar un aumento del factor de forma con el voltaje de soldadura, lo cual es explicable puesto que la tensión tiende a incrementar mayormente al ancho del cordón con respecto a la profundidad de la pileta.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA

2.1 METALURGIA DE LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA

Desde el punto de vista metalúrgico es conocido que las soldaduras por electroescoria tienen significantes diferencias de otras soldaduras hechas por procesos convencionales; como se afirmó antes, ésto se debe principalmente a que el calor introducido durante el proceso es muy alto. La figura 10 muestra esquemáticamente las diferentes regiones metalúrgicas que se presentan en las soldaduras por electroescoria, las cuales son producto de diferentes condiciones de enfriamiento dando como resultado diferentes microestructuras. En dicha figura se esquematizan tres zonas perfectamente diferenciadas. En el centro de la soldadura se observa la llamada zona de fusión (ZF) la cual ha sido sometida a un proceso completo de solidificación teniendo características análogas a la de una fundición. Adyacente a la zona de fusión está la zona afectada

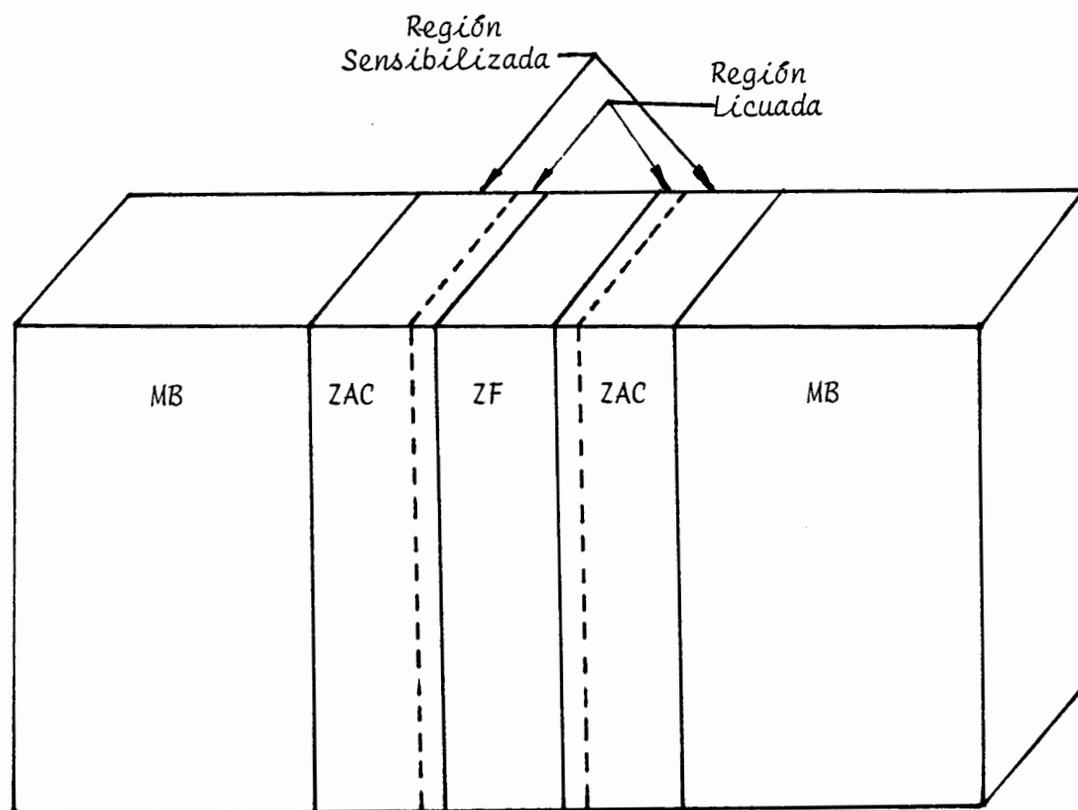


FIGURA 10.- REPRESENTACION DE UNA UNION SOLDADA POR ELECTROESCORIA Y LAS DIFERENTES REGIONES QUE SE ORIGINAN. (REF. 4)

por el calor (ZAC), la cual es parte del metal base, teniendo como característica la de poseer un tamaño de grano crecido debido a la temperatura máxima alcanzada en el momento de la soldadura y a una baja velocidad de enfriamiento. La zona final de la soldadura por electroescoria es la zona de metal base, la cual se mantiene inalterable en su microestructura y propiedades. El tamaño y forma de los granos de una región a otra son diferentes. Seguidamente se describirán las distintas regiones metalúrgicas enfatizando sus diferencias microestructurales.

a.- Zona de Fusión

En soldaduras por electroescoria, la zona de fusión presenta una estructura columnar con orientación radial, la misma que es ocasionada por la extracción calórica que se orienta hacia la periferia. El tamaño de grano es relativamente grande y se ha solidificado desde un gran volumen de metal líquido con una velocidad de enfriamiento controlada por las zapatas refrigeradas por agua. La estructura columnar del metal solidificado se originó a partir del crecimiento epitaxial de los granos del metal base parcialmente fundidos y del crecimiento de los granos nucleados sobre

las zapatas refrigeradas (2). Los granos crecen en la dirección más aproximada a la extracción calórica. Estas direcciones son aproximadamente perpendiculares a la superficie de la pileta.

La estructura de la soldadura solidificada en aceros de bajo carbono y baja aleación está conformada por zonas de granos columnares gruesos y finos (3). Los granos bastos son relativamente formados en la línea de fusión del cordón de soldadura y próximo a esta región, hacia el centro de la soldadura se encuentra la región de granos finos altamente alargados también apuntando hacia el centro de la soldadura. Esta región no siempre es evidente y su tamaño puede variar dependiendo del proceso de soldadura y la composición química del metal depositado. En la figura 11 se muestra esquemáticamente las estructuras típicas de las soldaduras por electroescoria. Se observan cuatro tipos diferentes de estructuras cuya conformación depende del tipo de material soldado y de las características térmicas del proceso. La forma y orientación relativa de los granos del tipo I está representada en dicha figura. Se observa una zona de granos columnares finos en la proximidad del eje de la soldadura (zona 1). Exterior a esta zona y adyacente a la zona afectada

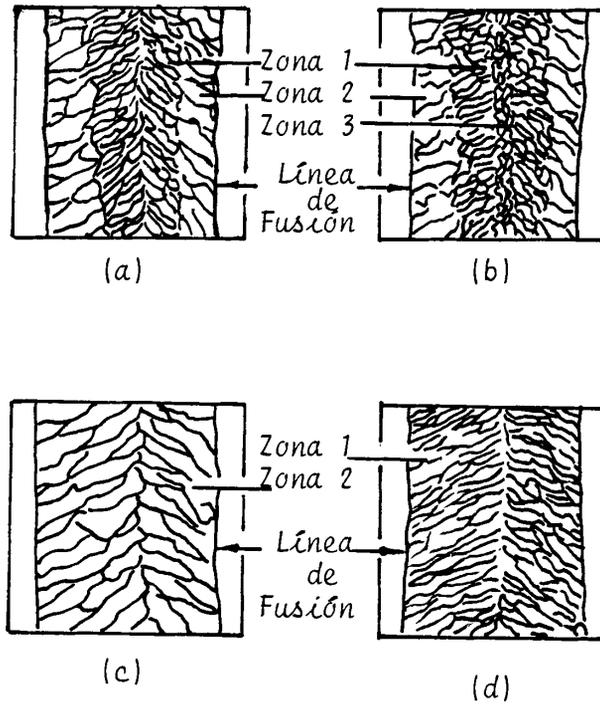


FIGURA 11.- ESQUEMA DE LAS ESTRUCTURAS TÍPICAS DE LAS SOLDADURAS POR ESW. (REF. 6).

- (a) Tipo I
- (b) Tipo II
- (c) Tipo III
- (d) Tipo IV

térmicamente, se encuentra la zona de granos columnares bastos (zona 2). El tipo II de estructuras, consta además de las zonas características (1) y (2) correspondiente al tipo I, de una zona de granos equiaxiales en el centro de la soldadura. La zona de fusión del tipo III está compuesta solamente de granos columnares bastos (zona 2), en contraste con la zona de granos columnares finos (zona 1) característica del tipo IV de estructuras. Estudio más detallado al respecto se encuentra en la Ref. 7.

b.- Zona Afectada por el Calor

La zona afectada por el calor en soldaduras por electroescoria puede ser clasificada en dos regiones: La región licuada y la región sensibilizada (Fig. 10). La región licuada es una zona de granos crecidos adyacentes a la línea de fusión. La temperatura que se alcanza durante la soldadura es suficiente para fundir parcialmente el metal base en los límites de granos. La región sensibilizada no sufre ninguna fusión y es una zona de grano parcialmente refinado. Debido al alto calor introducido durante el proceso y a los pequeños gradientes térmicos resultantes, esta región puede sufrir segregación en los límites de grano, lo

que puede conducir a la fragilidad.

c.- Metal Base

La región final de las soldaduras por electroescoria es el metal base no transformado, el cual posee microestructura y propiedades mecánicas sin alteración, debido a que el calor introducido no ha sido suficiente para cambiar las características originales.

2.2 INFLUENCIA DEL CALOR SUMINISTRADO

La naturaleza de la generación de calor es de considerable importancia puesto que de ella resultan las propiedades mecánicas de las uniones soldadas. En las soldaduras por electroescoria algunas variables pueden afectar la generación de calor y su distribución. El flujo de calor durante el proceso determina la dirección de solidificación de la pileta líquida, así como los cambios en las propiedades en el metal base y en la zona afectada por el calor. Por lo tanto, el calor suministrado durante el proceso de soldadura es el responsable de las transformaciones microestructurales y de las propiedades mecánicas resultantes. El calor suministrado proviene de la corriente, el voltaje y

la velocidad de soldadura a través de la pileta de escoria. Durante el proceso, el calor es extraído de la pileta derretida por las zapatas de cobre refrigeradas por agua, por el metal base y por el enfriamiento del metal fundido justo debajo de la pileta líquida. También ha sido observado que el calor en la superficie de la soldadura es a menudo no simétrico, lo que probablemente es causado por la variación en el contacto de las zapatas con la superficie de las placas y por el desalineamiento de la guía.

Como se ha mencionado, son algunas variables las que afectan la generación de calor y su distribución. El calor introducido por unidad de longitud está dado por:

$$Q = \frac{V \times I \times 60}{V_s} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\text{Tensión} \times \text{Corriente} \times 60}{\text{Velocidad de Soldadura (pulg/min)}}$$

$$\text{Donde } V_s = \frac{F_e}{F_g} \times V_e \quad (2)$$

F_e = Sección del alambre de aporte: πr^2

F_g = Sección de la separación entre placas: $g \times t$

V_e = Velocidad del alambre (Pulg/min).

r = Radio del alambre de aporte

g = Abertura o separación de las placas

t = Espesor de las placas a soldar

$$Q = \frac{V \times I \times 60 \times g \times t}{\pi r^2 \times V_e} \quad (3)$$

Existiendo una relación lineal entre I y V_e , de acuerdo al gráfico de la Hobart (Ref. 8), página 28, se tiene:

$$V_e = \frac{I - 315}{1.13} \quad (4)$$

$$Q = \frac{V \times I \times g \times t \times 60}{\pi r^2 \left(\frac{I - 315}{1.13} \right)} \quad (\text{Joules/pulgada}) \quad (5)$$

De lo expuesto se deduce que los parámetros de soldadura, corriente y voltaje, son los factores determinantes en la generación de calor y que por lo tanto permiten controlar el proceso de soldadura.

La figura 12 muestra el efecto de estos parámetros en la generación de calor. Se observan tres casos en la combinación de voltaje e intensidad de corriente: El caso I ocurre a voltaje relativamente alto para una intensidad de corriente dada. Se observa que el alambre de aporte alcanza una corta distancia hacia el interior del baño de metal líquido, por consiguiente el

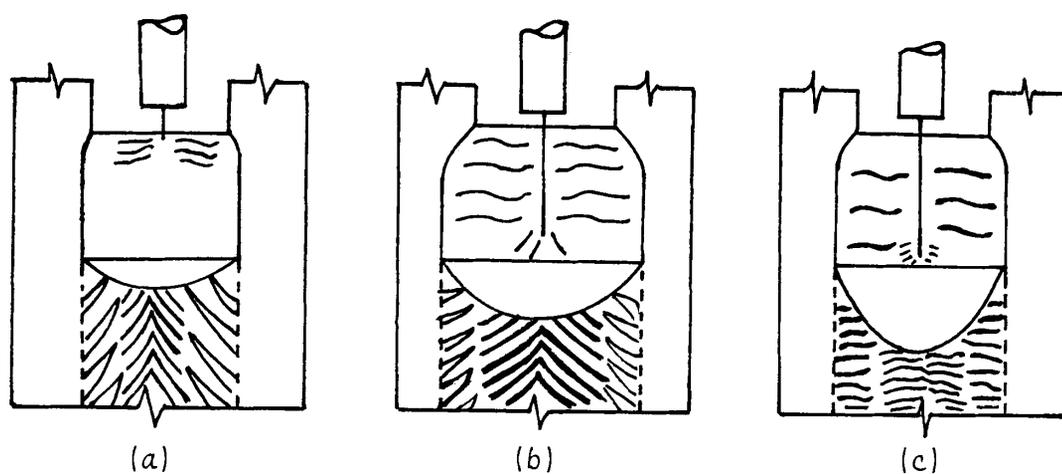


FIGURA 12.- VARIACION DE LAS CARACTERÍSTICAS DE SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA POR EFECTO DEL CALOR GENERADO PARA TRES CASOS DISTINTOS (CORRIENTE CONSTANTE). (REF. 9)

- (a) Caso 1: Voltaje alto
- (b) Caso 2: Voltaje medio
- (c) Caso 3: Voltaje bajo

calor generado estará concentrado en esta región provocando que una gran porción del mismo será perdido por radiación. La forma de la pileta muestra una profundidad pequeña lo que afecta a la penetración en el metal base. El caso II es producido cuando se suelda con un voltaje medio manteniendo la intensidad de corriente constante, el electrodo alcanza una moderada distancia dentro de la pileta fundida y la corriente fluirá del electrodo hacia el baño generando calor que es más aprovechable para la penetración. Por lo tanto, la forma de la pileta muestra mayor profundidad y ancho con relación al caso anterior, resultando un aumento en el ángulo de encuentro. Finalmente, se observa el caso III el cual tiene lugar a un bajo voltaje y manteniendo la intensidad de corriente del caso anterior. Se observa que el electrodo se extiende cercanamente al fondo de la pileta del metal líquido. El calor generado en el proceso es concentrado en una zona pequeña de la pileta entre el extremo del electrodo y el fondo del baño, lo cual significa que la fuente de calor es extremadamente localizada, la pileta toma la forma de un paraboloide y los granos solidificados forman un ángulo de encuentro mayor de 90° , decreciendo el factor de forma, lo que provoca una estructura de baja resistencia al agrietamiento.

De esta manera la magnitud del calor suministrado influye la geometría resultante de las soldaduras por electroescoria. A un aumento del calor introducido corresponde un aumento del ancho de la zona afectada térmicamente. Estudios realizados a este respecto (Ref.2) demuestran que manteniendo la intensidad de corriente constante y variando la tensión de soldadura el resultado es un aumento del calor suministrado desde 660 KJoule/cm a 1037 KJoule/cm y por lo tanto un incremento en el ancho de la zona afectada térmicamente, en aproximadamente 3 milímetros. La dilución es afectada también por el incremento del calor suministrado. Un aumento en el voltaje y por lo tanto del calor suministrado, produjo un incremento de la dilución hasta un valor de 58%. La dilución del metal base en la soldadura se calcula por la expresión:

$$D = \frac{F_s - F_g}{F_s} \times 100 \quad (6)$$

Donde: F_s = Area transversal de la soldadura (mm^2)

F_g = Area transversal de la separación entre las placas a soldar (mm^2).

2.3 INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TERMICO

Las tensiones residuales originadas por la contracción

de la soldadura durante la solidificación del metal fundido, pueden provocar por sí solas las roturas de las piezas soldadas por el proceso de electroescoria. La rotura puede producirse en el cordón mismo o en la zona afectada térmicamente. Por consiguiente, es recomendable el procedimiento de un tratamiento térmico adecuado con el objeto de restaurar la tenacidad de la zona afectada térmicamente (10), antes de poner las piezas soldadas en servicio.

Debido al uso generalizado de las soldaduras por electroescoria como un procedimiento para unir secciones de puentes, perfiles para la construcción de edificios, recipientes sometidos a presiones internas, etc., se han establecido códigos de calificación de las soldaduras (6). Estos recomiendan un tratamiento térmico posterior de alivio de tensiones. Por otra parte, son considerables los esfuerzos de varios investigadores que han dirigido sus estudios referentes al tema. El efecto del tratamiento térmico de normalizado en las soldaduras por electroescoria también ha recibido considerable atención en la literatura (4).

2.3.1 Microestructura y Macroestructura

Las características mecánicas de las soldaduras

por electroescoria varían de manera considerable de una zona a otra como resultado de las diferentes microestructuras que poseen cada una de las regiones. Uno de los problemas que se presentan en las soldaduras realizadas por este proceso es el tamaño de grano grueso que se desarrolla sobre todo en la zona afectada por el calor. Resultados de estudios y ensayos en soldaduras sometidas a tratamientos térmicos posteriores al proceso reportan un mejoramiento en las propiedades mecánicas de las piezas soldadas. Bentley (4), ha investigado el restablecimiento de las propiedades mecánicas en la zona afectada térmicamente por sucesivos tratamientos de normalizado para cuatro diferentes aceros. Con el tratamiento de normalizado se reducen los esfuerzos residuales, creando además una microestructura uniforme sobre ambos lados de la unión entre el metal base y la zona de fusión. El tratamiento además logró afinar el tamaño de grano basto de la zona afectada por el calor. Mejores resultados fueron obtenidos por Malinovska y Hrivnak (4) mediante un tratamiento térmico de recocido a 750°C en aceros soldados por electroescoria de 0.15-0.19%C y 1.21-1.23%Mn, seguido de un nuevo calentamiento a 630°C por 10 horas y enfriamiento en el horno. El resultado final revela un refinamiento del tamaño de grano basto de la zona afectada por el calor.

Soldaduras realizadas por el método de electroescoria en acero de 2 1/4 Cr-1%Mo (Ref. 10) han reportado poca variación en la zona metal base después de un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 695°C. La estructura característica de esta zona es de granos equiaxiales conteniendo ferrita proeutectoide más granos de bainita superior. La zona afectada térmicamente presentó casi la misma estructura después de dichos tratamientos térmicos que los obtenidos en la condición sin tratamiento térmico posterior de alivio de tensiones. La zona de fusión después del tratamiento térmico mostró una estructura caracterizada por ferrita acicular y bainita revenida. Antes de dicho tratamiento la estructura presentó granos columnares bastos típicos de estructuras fundidas solidificadas lentamente. La microestructura de esta zona fue bainita fina más ferrita acicular.

2.3.2 Tamaño de Grano

El tamaño de grano para un acero aleado 2 1/4Cr-1% Mo soldado por electroescoria y sometido a un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 695°C ha sido también estudiado (10). La medida de tamaño de grano aumentó con relación a la misma muestra sin trata -

miento térmico posterior al proceso. La figura 13 muestra el comportamiento de dicho acero antes y después del tratamiento. Se observa que la curva superior corresponde a la medida del tamaño de grano para muestras obtenidas de las soldaduras sin tratamiento de alivio de tensiones y la curva inferior muestra la variación del tamaño de grano de una soldadura con alivio de tensiones a 695°C. Los granos son inicialmente muy grandes en la zona afectada por el calor adyacente a la línea de fusión con valor ASTM-1 (curva superior), todavía dentro de la zona afectada por el calor hacia el lado del metal base el tamaño de grano decrece a un ASTM 7. Entrando a la región del metal base se encuentra que dicho tamaño de grano cambia a un valor ASTM 5. Aunque el tamaño de grano cerca de la zona de fusión de esas soldaduras es grande, las pruebas mecánicas no asociaron falta de tenacidad con dicho tamaño de grano grueso.

2.3.3 Resistencia Mecánica y Dureza

Los investigadores Malinovska y Hrivnak (4) estudiaron estas propiedades mecánicas en aceros 0.15-0.19%C y 1.21-1.23%Mn, soldados por electroescoria y sometidos posteriormente a un tratamiento de recocido a 750°C y

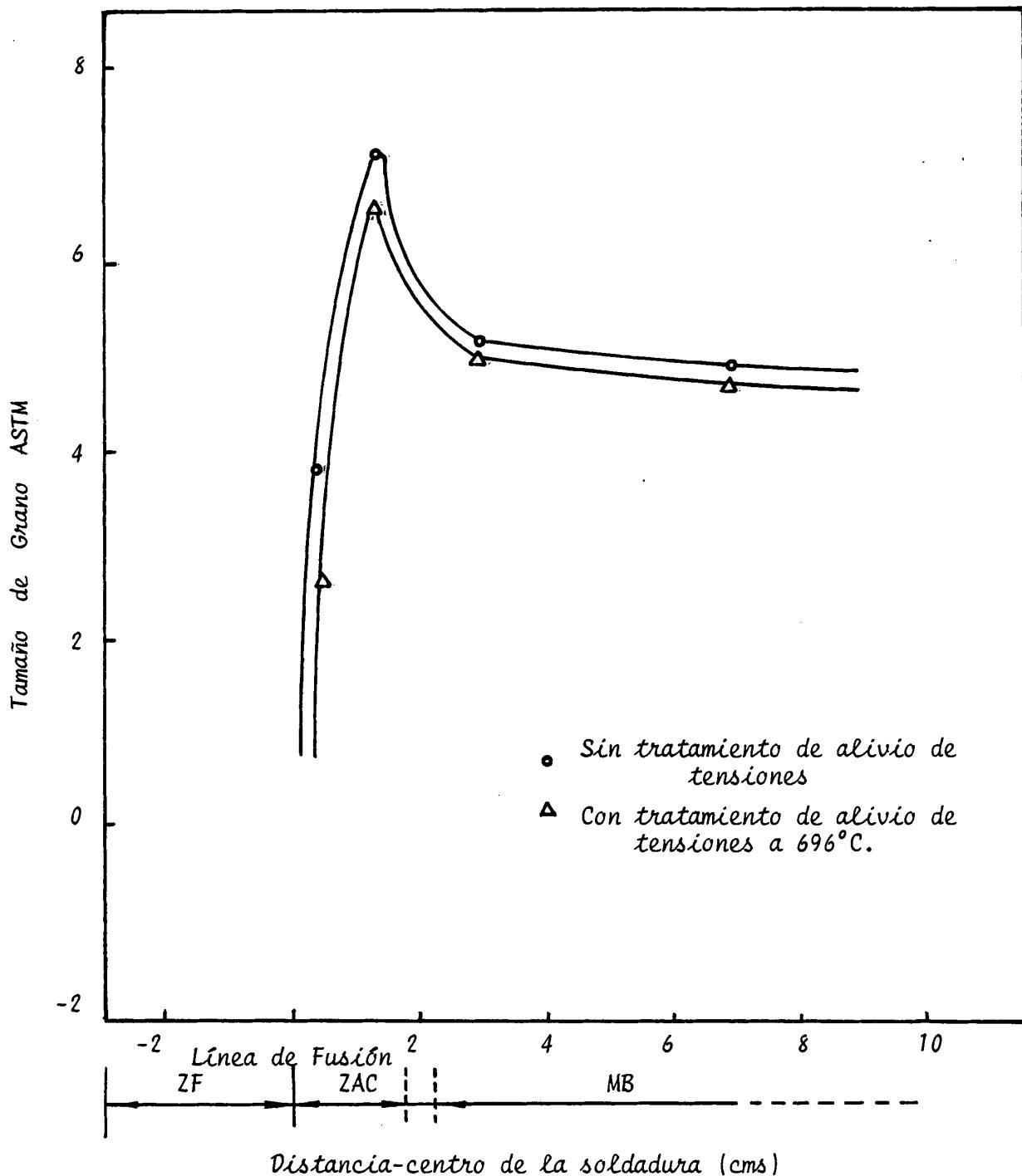


FIGURA 13.- TAMAÑO DE GRANO ASTM DEL ACERO $2\frac{1}{4}$ Cr-1%Mo SOLDADO POR ESW PARA DOS CONDICIONES: SIN TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR Y CON TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES A 695°C. (REF. 10).

enfriamiento al aire, seguido de un nuevo calentamiento a 630°C durante 10 horas y enfriamiento en el horno. Dichas propiedades, en cuanto se refiere al límite de fluencia y resistencia a la tracción, reportaron valores satisfactorios.

Para el acero 2 1/4 Cr-1% Mo (10), soldado por electroescoria y sometido a un posterior tratamiento de alivio de tensiones a 695°C, se detectó una ligera reducción del límite elástico y del esfuerzo a la tracción, con un pequeño aumento en la ductilidad en comparación con las pruebas realizadas en muestras obtenidas de soldadura sin ningún tratamiento térmico posterior al proceso. Este decrecimiento en los esfuerzos deberá ser atribuido a cambios microestructurales de los carburos aleados que se forman en dicho acero 2 1/4 Cr-1% Mo.

2.3.4 Propiedades al Impacto

Como se indicó anteriormente, Bentley (4) investigó el restablecimiento de las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor por sucesivos tratamientos de normalizado para cuatro diferentes aceros suaves.

Realizados los ensayos de impacto a una sola temperatu-

ra se reporta que la tenacidad de la zona afectada por el calor fue marcadamente mejor después del primer tratamiento de normalizado. Aceros con alto contenido de azufre recuperan solo el 50% de la tenacidad inicial por medio de un tratamiento térmico. Esto se debe principalmente a la formación de sulfuros en los granos de austenita.

Los investigadores Malinovska y Hrivnak (4) también han reportado mejora en las propiedades de la tenacidad tanto para la zona de fusión como para la zona afectada por el calor después de un normalizado, en aceros de 0.15-0.19%C. En la zona de metal base la tenacidad no fue afectada significativamente.

Resultados similares fueron encontrados por Makara, Yegorova y Novikok (4) para aceros de bajo contenido de carbono y con un contenido de manganeso de 0.09% en soldaduras por electroescoria y sometido a posteriores tratamientos térmicos.

Los estudios realizados por Brawn y coautores (4) reportan favorables resultados sobre las propiedades al impacto después de un normalizado y revenido en aceros de baja aleación soldados por el proceso de electroescoria. Demostraron que las propiedades al impacto en

la zona afectada por el calor son restablecidas por un tratamiento de normalizado hasta 950°C seguido de un revenido a 650°C por 20 horas. La tenacidad de dicha zona fue aumentada por un posterior revenido puesto que el normalizado por si solo no puede producir un marcado restablecimiento de las propiedades en la zona afectada por el calor. Malinovska y Hrivnak (4) encontraron que las propiedades de impacto son mejoradas con relación a las obtenidas por un normalizado para aceros de 0.15-0.19%C, mediante un recocido a 750°C durante cinco horas, enfriamiento al aire y seguido de un nuevo calentamiento a 630°C durante 10 horas y enfriamiento al aire. Soldaduras realizadas por electroescoria del acero 2 1/4 Cr-1% Mo (Ref. 10) han reportado energías al impacto de 15 Lb-pie en la zona de fusión para las muestras en la condición sin tratamiento térmico posterior. Sin embargo, cuando la zona de fusión de estas mismas soldaduras fue ensayada después de un tratamiento térmico de alivio de tensiones a 695°C y 760°C, las energías absorbidas durante el impacto fueron 75 Lb-pie y 170 Lb-pie, respectivamente. Es de anotar que las propiedades al impacto de las muestras correspondientes a la zona afectada por el calor variaron en el mismo sentido.

De lo estudiado anteriormente se deduce en forma clara la conveniencia de realizar en los aceros soldados por electroescoria un tratamiento térmico posterior al proceso. El análisis de las microestructuras resultantes después de los tratamientos de normalizado y recocido de alivio de tensiones, dan como resultado una estructura más homogénea, lo cual incide positivamente en las propiedades mecánicas de las soldaduras. Los tratamientos térmicos antes mencionados llevan consigo una disminución en el tamaño de grano en el caso del normalizado, sin embargo, en algunos casos se observa un ligero aumento en el tamaño de grano como en el caso del acero aleado 2 1/4 Cr-1% Mo sometido a un posterior tratamiento térmico de alivio de tensiones a 695°C, resultando en una reducción de la dureza. Es por lo tanto, necesario tomar en cuenta estas situaciones. Las propiedades mecánicas a la tracción reportan resultados satisfactorios con el tratamiento térmico posterior así como el mejoramiento de las propiedades al impacto.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIALES UTILIZADOS

3.1.1 Material Base

Los aceros estructurales son indudablemente los materiales más ampliamente utilizados en soldaduras. Por esta razón el presente estudio está orientado al uso de aquellos tipos de aceros de contenido de carbono medio y bajo. En nuestro medio, FUNDICIONES NACIONALES S.A. proporciona palanquillas de aceros estructurales SAE-1030 de dimensiones de 100 x 100 mm. de sección, por seis metros de largo, procedentes de la fusión de chatarras en un horno eléctrico y luego solidificado por el método de colada continua.

Las palanquillas del acero SAE-1030 son de medio contenido de carbono y se las utiliza principalmente para la fabricación de varillas de construcción, mediante procesos de laminación en caliente. Sin embargo, estas palanquillas con un adecuado tratamiento térmico pueden ser utilizadas en aplicaciones tales donde se puede emplear el proceso de soldadura por electroescoria.

La figura 14 muestra la microestructura del material base seccionada de una palanquilla del acero SAE-1030. Esta muestra microatacada por técnicas metalográficas está compuesta de agujas de ferrita en una matriz de perlita. A esta estructura se la denomina Widmanstätten que es el resultado de una transformación de austenita en ferrita a temperaturas relativamente altas, seguido de un enfriamiento rápido.

3.1.2 Material de Aporte

a) Metal Aportado: El metal de aporte para realizar el proceso de soldadura por electroescoria en el acero SAE-1030, corresponde al electrodo fabricado por la casa ESAB, denominado OK-1450 de 3.5 mm. de diámetro. Este electrodo sirve como material de aporte para aceros no aleados y es de un tipo de aleación de Mn-Ni-Mo.

b) Guía Consumible: Además del electrodo macizo, la guía consumible se funde también para formar parte de dicho metal depositado y formar así el cordón de soldadura. La guía consumible es un tubo sin costura proporcionado por la misma casa ESAB del tipo OK-21.32, revestida de un fundente que mantiene constante la pro-



Fig. 14.- Microestructura de la sección transversal del material base del acero SAE-1030

fundidad del baño de escoria derretida y además actúa como protector durante el proceso. El tubo-guía consumible debe estar libre de grasa, polvo, humedad. Antes del proceso debe ser tratado prolijamente para eliminar la humedad y otros contaminantes. Un análisis del metal depositado utilizando el electrodo y guía consumible antes mencionadas se dan en las Tablas I y II. Puesto que la función primaria del tubo guía consumible es la de dirigir el alambre electrodo hacia el fondo de la cavidad, ésta debe alinearse simétricamente en dicha abertura de la unión a soldar. Con ésto se logra igual distribución de calor y por lo tanto una fusión simétrica del cordón. Otra función del tubo guía es la de transportar la mayoría de la corriente de soldadura para transferirla al electrodo justo arriba del baño. De lo expuesto se deduce que el electrodo y la guía consumible son la más importante contribución en la ejecución de las soldaduras por electroescoria. Es de anotar que la guía consumible funde justo arriba del baño de escoria y elimina la necesidad de un mecanismo especial para ir moviéndola verticalmente, como sucede en el caso de la guía no consumible. Esto simplifica grandemente el proceso y evita muchas de las complicaciones normalmente asociadas al proceso de electroescoria guía no consumible. Las guías utilizadas en la presente te-

TABLA I

Composición Química del metal depositado utilizando
un Electrodo OK-1450 y una Guía Consumible OK-2132 (Ref. 7)

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

TABLA II

Propiedades Mecánicas del Metal depositado utilizando
un Electrodo OK-14.50 y una Guía Consumible OK-2132 (Ref.7)

Límite de Tracción (Kg/mm)	Límite de Rotura (Kg/mm)	Reducción de Area (%)	Ensayo de Impacto (Joules)	Dureza (Rb)
62	50	19.7	50 (-20°C)	85

sis tienen 18 cms. de largo.

c) Fundente : Para el arranque del proceso, la estabilización del mismo se agrega fundente del tipo OK-14.50 proporcionado por la casa ESAB. La composición química de este fundente no está perfectamente establecida , pero emplea una clase de polvo que posee un alto contenido de MnO.

3.2 EQUIPO UTILIZADO

Para la ejecución de las soldaduras por electroescoria en el acero SAE-1030 fue utilizado el equipo ESAB-A2 que es una máquina ligera con guía alambre consumible. La máquina está particularmente destinada a la ejecución de uniones rectilíneas de placas de gran espesor. La figura 15 muestra parte del equipo utilizado en el presente trabajo. Se observa el cabezal de soldadura con su portabobina, la estructura para la fijación de la máquina, las zapatas de cobre para enfriamiento, la guía consumible y la bobina de alambre-electrodo. En la figura 16 se muestra la otra parte del equipo y se observa la fuente de poder con la caja-control PEF. Esta fuente de poder es un rectificador a tensión constante, de capacidad media para soldaduras automáticas denominada LAD-800. Consta de dos escalas de regula -

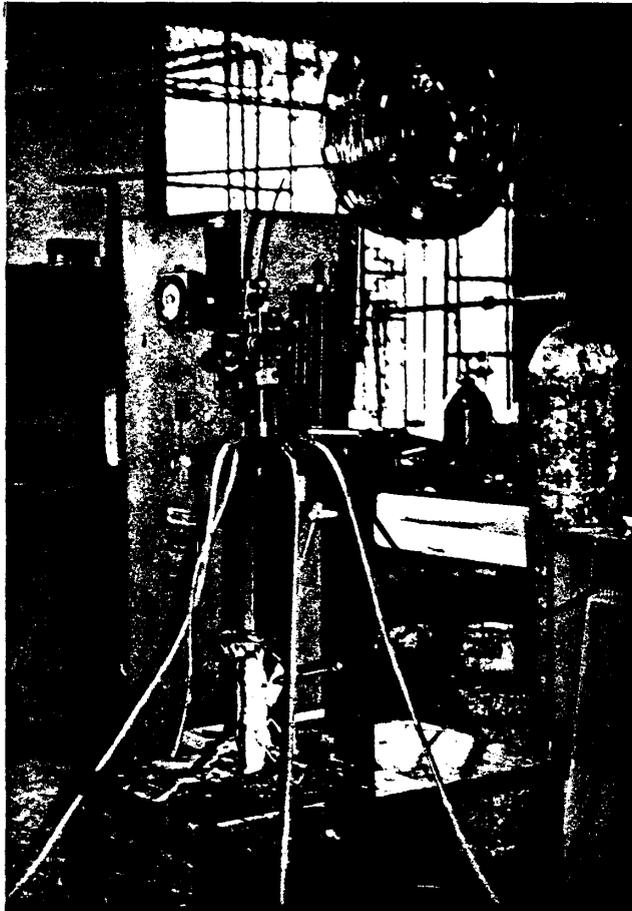


FIGURA 15.- EQUIPO UTILIZADO EN EL SOLDEO AUTOMATICO POR EL METODO DE ELECTROESCORIA.

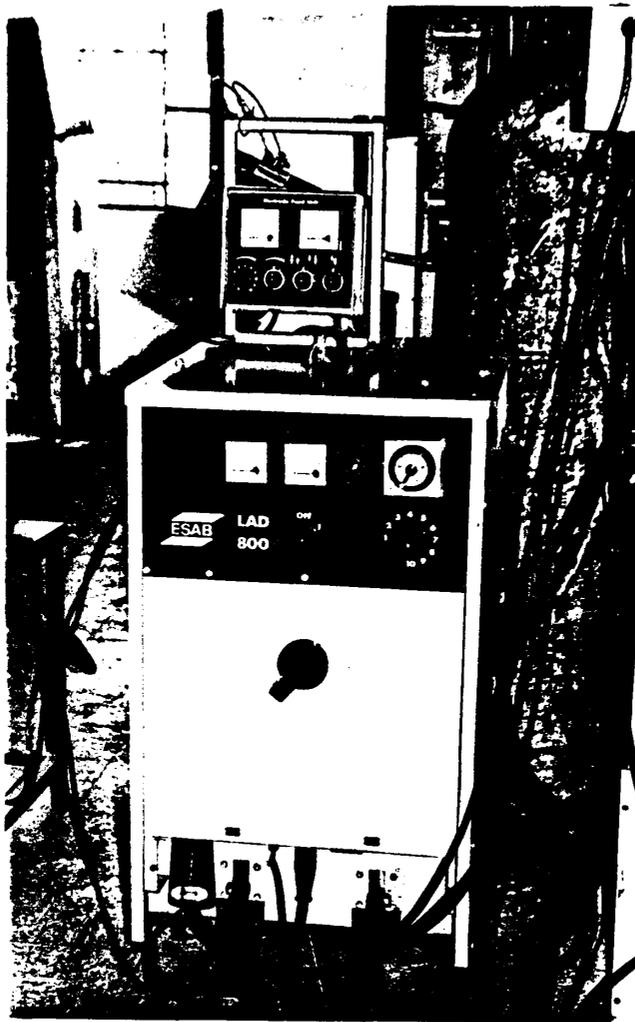


FIGURA 16.- FUENTE DE PODER LAD-800 Y CAJA CONTROL PEF.

ción: En la posición I la tensión de vacío es del orden de 30.5 voltios, mientras que en la posición II es de 54 voltios. Al igual que la caja-control también consta de un voltímetro y un amperímetro, los cuales permiten controlar la magnitud del voltaje y la intensidad de corriente suministrados durante la soldadura.

Sobre el panel frontal tienen un conmutador que permite diez posiciones dentro de cada escala de regulación del voltaje. La figura AI del Apéndice I muestra las características estáticas de esta fuente de poder.

La caja-control PEF es parte del equipo utilizado y consta, además del voltímetro y amperímetro, de un sistema de arranque mediante el cual se inicia el proceso y de un sistema de regulación del alambre-electrodo que permite alimentarlo o retrocederlo para fijarlo en la posición de arranque al inicio del proceso.

La fuente de poder, la caja-control y el cabezal de soldadura están conectados en la forma como lo esquematiza la figura 17 y que permite realizar la soldadura con corriente continua polaridad inversa, puesto que el electrodo está conectado a positivo mientras que el negativo está fijado a la placa de arranque de la

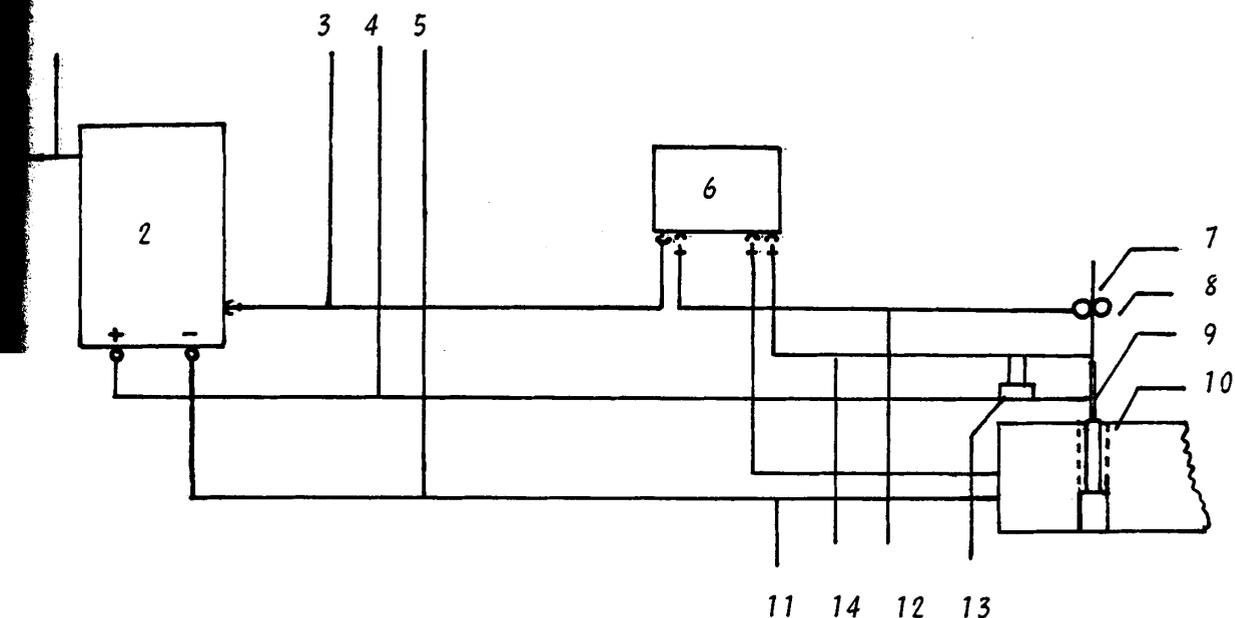


FIGURA 17.- CONEXION ELECTRICA DE LA FUENTE DE PODER, CAJA, CONTROL Y CABEZAL DE SOLDADURA. (REF. 11).

- 1- Toma de corriente de la fuente de poder
- 2- Fuente de poder LAD-800
- 3- Cable de control
- 4- Cable positivo de la fuente de poder al electrodo
- 5- Cable negativo de la fuente de poder a la placa base
- 6- Caja control PEF
- 7- Alambre-electrodo
- 8- Mecanismo de arrastre del alambre
- 9- Tubo-guía consumible
- 10- Pieza de trabajo
- 11- Cable de referencia del voltaje
- 12- Conexión del cable del motor de la alimentación
- 13- Shunt (corriente directa)

pieza a soldar.

3.3 DISEÑO DE LA UNIÓN

En el proceso por electroescoria la configuración básica que se forma para unir dos piezas metálicas es una cavidad de forma rectangular o cuadrada, según sea el espesor de las placas a unir. Dicha cavidad está formada por el espesor de las placas y por la parte interior de las zapatas de cobre refrigeradas por agua. En este proceso, la preparación de los bordes para efectuar el proceso es mínimo.

Desde el punto de vista económico es deseable tener una abertura lo más pequeña posible para utilizar la mínima cantidad de metal aportado, pero un factor que limita dicha abertura es el tamaño del tubo-guía consumible y de los aisladoras que son requeridos para evitar posibles arcos. Por otra parte, la abertura (g) debe ser lo suficientemente ancha como para proporcionar un suficiente volumen y tamaño de baño metálico para asegurar condiciones de operación estables de soldadura. Esto es uno de los factores limitantes para realizar soldaduras de aberturas pequeñas.

La Tabla III muestra la abertura que deben tener las uniones a soldarse por el proceso de elctroescoria en función del espesor del material base. Por otra parte, la casa ESAB recomienda que para uniones de chapas de espesor de 15 a 40 mm., la separación de dichos bordes debe estar en el orden de 25 a 32 mm, abertura que es suficiente para evitar el contacto de la guía consumible con los bordes de las placas. Si el espesor de las placas es de 20 mm. o menos la separación de los bordes debe ser de 18 a 24 mm.

Como se mencionó en la sección correspondiente, en la presente tesis se soldaron secciones de palanquillas procedentes de Fundiciones Nacionales S.A. (FUNASA). Las secciones obtenidas a partir de estas muestras fueron de 47 x 32 x 250 milímetros. Posterior al corte de las placas éstas fueron rectificadas para evitar cualquier fuga de la soldadura líquida durante el proceso, el mismo que pudo ocurrir por irregularidad de las caras de las placas en caso que no hubiera una adhesión completa con las zapatas de cobre refrigeradas por agua. La placa metálica para el arranque del proceso fue maquinada de acuerdo a las dimensiones que se muestran en la figura 18.

TABLA III

SEPARACIONES DE LAS PLACAS DE LAS SOLDADURAS
 POR ELECTROESCORIA EN FUNCION DEL ESPESOR (REF.8)

Espesor (t)	Abertura (g)	Oscilación
0.75-5 Plg (1.9-12.7 cms.)	1 Plg (2.54 cms.)	No
2.0 - 12 Plg (5.0-30.5 cms.)	1.25 Plg (3.17 cms.)	Si
12 Plg. o más (30.5 cms. o más)	1.5 Plg (3.8 cms.)	Si

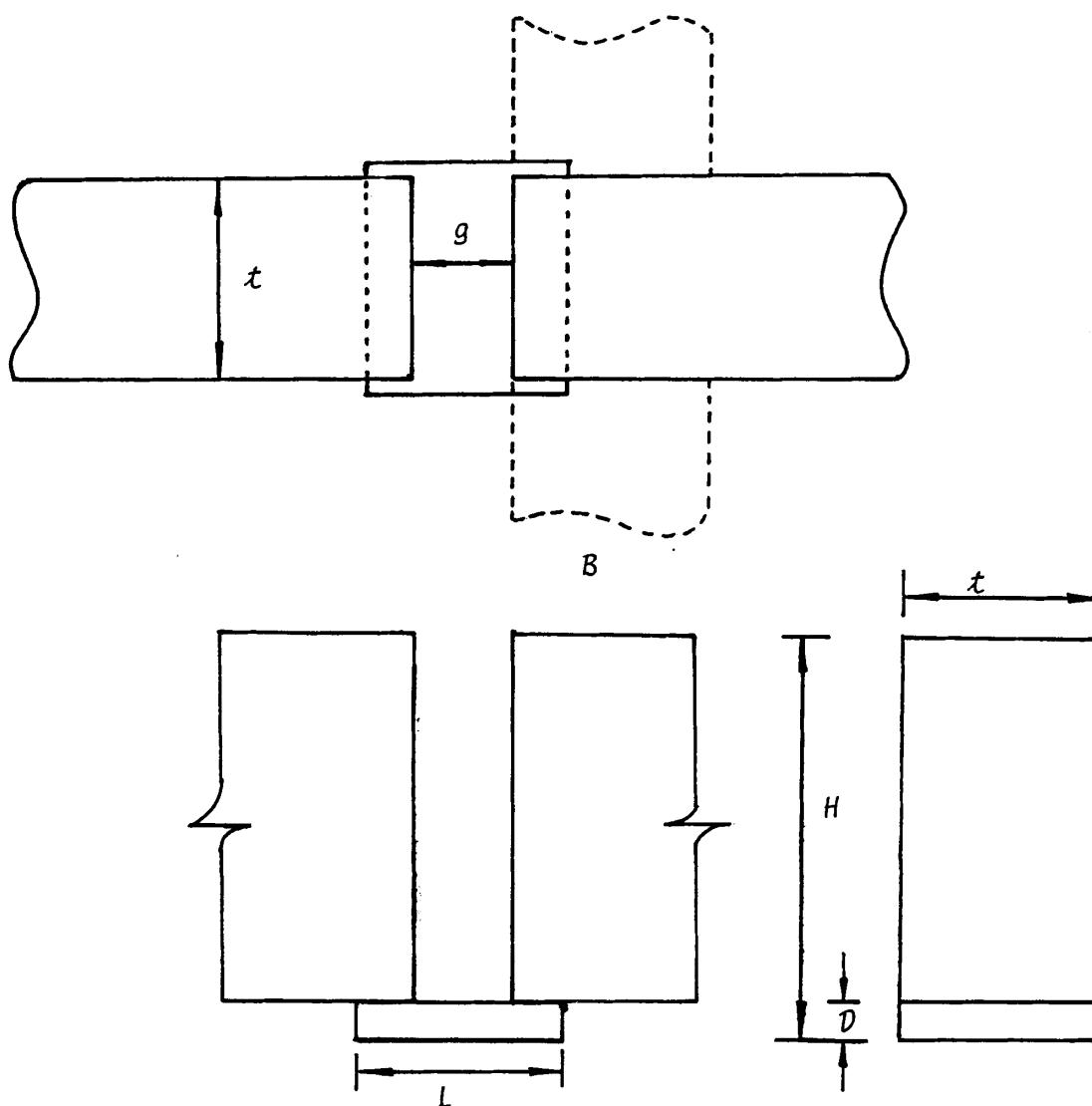


FIGURA 18.- ESQUEMA DE LA GEOMETRIA RECTANGULAR A SOLDAR MOSTRANDO LAS DIMENSIONES.

H	=	Altura de las placas a soldar	=	250 mm
B	=	Ancho de las placas a soldar	=	47 mm
t	=	Espesor de las placas	=	32 mm
g	=	Abertura de las placas	=	25 mm
L	=	Ancho del bloque de inicio	=	98 mm
D	=	Espesor del bloque de inicio	=	20 mm

En la figura 19 se observa el arreglo de la geometría rectangular a soldarse por el proceso de electroescoria. Las placas utilizadas en la conformación de la cavidad es soldada con la placa de arranque mediante soldadura eléctrica dejando una separación entre placas de 1 pulg. (25.4mm) según recomendaciones mostradas en la Tabla III, obteniéndose así la muestra para ser soldada por el proceso de electroescoria.

3.4 TECNICA OPERATIVA

a) Selección de los parámetros de soldadura

Durante el proceso de soldadura por electroescoria del acero SAE-1030, los parámetros de soldadura: Voltaje, corriente y velocidad del electrodo fueron mantenidos constantes. Los valores empleados fueron seleccionados de parámetros recomendados para la unión de placas cuya cavidad es de geometría rectangular (8).

El valor correcto de la intensidad de corriente de soldeo depende del espesor de las placas a soldar, situándose en el rango de 350-600 amperios (8). En este trabajo se utilizaron 360 amperios y puesto que existe una relación lineal entre la intensidad de corriente y

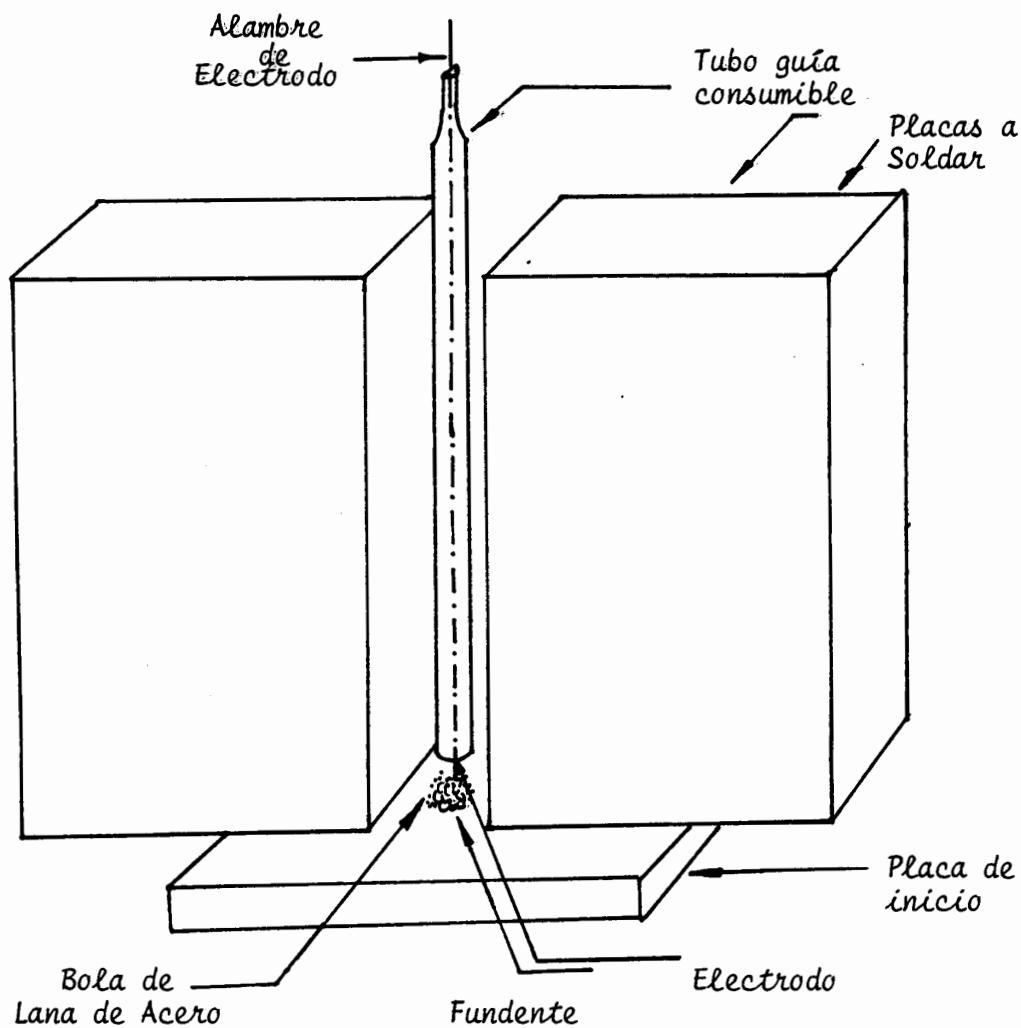


FIGURA 19.- ESQUEMA DEL ARREGLO DE LAS PLACAS PARA LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA DE GEOMETRIA RECTANGULAR.

la velocidad del electrodo se encuentra que el valor de éste es de 53.0 cm/minuto (Apéndice II).

En experimentos realizados con el mismo tipo de acero SAE-1030 (Ref. 7), los mismos equipos, pero de una geometría diferente de sección circular de 28 mm. de diámetro y 15 cms. de largo, se obtuvieron buenas soldaduras utilizando 36 voltios y 350 amperios. En el presente trabajo se utilizaron aproximadamente 39 voltios.

b.- Preparación y ajuste de la soldadura

Antes del proceso, la muestra fue sometida a una limpieza con tetracloruro de carbono y calentada en un horno a 130°C por el tiempo de una hora, con la finalidad de eliminar la humedad. Se utilizó además una bola de lana de acero de un diámetro menor a la abertura nominal, con la finalidad de facilitar el arranque. Esta bola se funde al iniciar el proceso de soldadura. El montaje de la bobina del electrodo y la alimentación del mismo a través de las guías de deslizamiento debe hacerse cuidadosamente de tal forma que éste no se detenga durante el proceso. Se procedió inmediatamente al montaje del tubo guía, de tal manera que

quedó alineado con relación a la cavidad rectangular de 25 x 32 mm. Las zapatas para refrigeración fueron conectadas cada una a sus respectivas bombas, cuyo caudal fue 1 galón por minuto y luego dispuestas a cada lado de la unión a soldar.

c.- Procedimiento de soldadura

La perilla de arranque de la caja-control PEF es accionada hacia la derecha pasando de esta manera corriente a través del alambre, produciéndose inicialmente un arco eléctrico que funde la lana de acero, lo cual inicia el proceso. En forma periódica se adicionó fundente para ayudar a extinguir el arco cuando el proceso se estabilizó. En este momento se pone la perilla de la caja-control en la posición de soldadura, continuando entonces el proceso en forma automática. En esta situación el alambre se funde continuamente a una velocidad constante. La temperatura del agua refrigerante a la entrada de cada zapata fue de 26°C y la de salida de 75°C, aproximadamente.

Algunos problemas pueden ocurrir durante el proceso, los mismos que requieren una acción correctiva inme -

diatamente; así por ejemplo puede presentarse derramamiento de soldadura líquida entre los bordes de las placas y las zapatas de cobre refrigeradas por agua. La adición de fundente húmedo produce un flujo chispeante motivo por el cual partículas saliendo del baño de escoria se adhieren al tubo-guía o a las paredes de la cavidad. Un arco intermitente se produce por la poca profundidad del baño fundido y por la fundición del aislante utilizado o por el arco lateral entre el tubo-guía y el metal base provocando fluctuaciones en la intensidad de corriente. Cuando el flujo de baño fundido estuvo cerca del tope de la cavidad se redujo la corriente gradualmente con la finalidad de reducir la velocidad de alimentación del alambre y de esta manera llenar la cavidad para derramar un poco de escoria. Esto elimina la posibilidad de tener inclusiones no metálicas, puesto que al finalizar el proceso de soldadura hay una solidificación progresiva desde el fondo de la pileta hacia arriba. Posteriormente, la fuente de poder fue puesta en la posición de apagado. Se removieron las zapatas retenedoras una vez que la soldadura solidificó completamente. Una inspección visual fue seguida a continuación, lo cual permite afirmar que la calidad de la superficie fue buena y no se requiere un posterior

acabado de la superficie de las partes laterales de la unión.

En la figura 20 se observa una muestra de soldadura al finalizar el proceso. Se puede apreciar todavía el estado incandescente de las placas soldadas.

3.5 ENSAYO RADIOGRAFICO DE LA SOLDADURA

Antes de seccionar la muestra de soldadura para su análisis, éstas fueron sometidas a un ensayo no destructivo por el método de radiografía industrial, con la finalidad de detectar posibles defectos internos de las piezas soldadas. Esto permitió asegurar la calidad tecnológica del producto soldado.

El equipo utilizado para este propósito fue el MAGNA-FLUX CORPORATION de 150 KV y 7 miliamperios, películas "DUPONT" - CRONEX 55 NDT FILM, penetrámetro de acero ASTM, líquidos para el procesado de la película (revelador, fijador y agua) y un negatoscopio para interpretación de la radiografía resultante. Los resultados del examen radiográfico se presentarán en la sección de Discusión de Resultados.

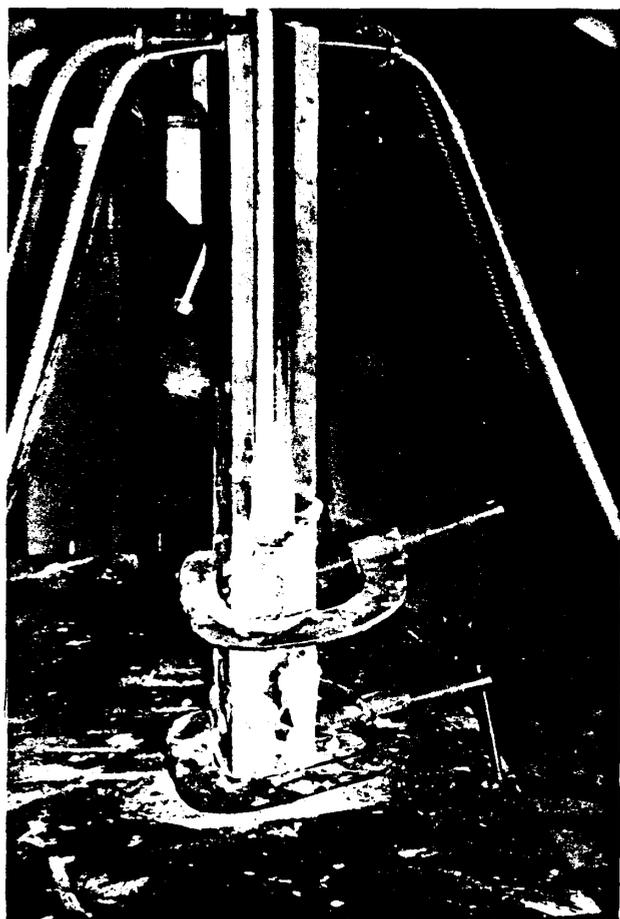


FIGURA 20.- SOLDADURA DEL ACERO SAE-1030 POR EL PROCESO DE ELECTROESCORIA ANTES DE LA REMOCION DE LAS ZAPATAS REFRIGERADAS POR AGUA.

3.6 TRATAMIENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSIONES

La pieza de acero SAE-1030 soldada por el proceso de electroescoria (39V-360A) fue sometida al tratamiento térmico de alivio de tensiones, para mejorar las propiedades mecánicas, tal como se estudió en la sección 2.3.4. El Código ANSI (10) admite un tratamiento térmico de alivio de tensiones para eliminar esfuerzos residuales reduciendo la dureza y restaurando la tenacidad en las soldaduras por electroescoria. La figura 21 muestra una pieza del acero SAE-1030 soldada por electroescoria de dimensiones 15 cm. de altura, 12 cm de ancho y 3.2 cms. de espesor. Esta muestra fue sometida a un tratamiento térmico de alivio de tensiones. La figura 22 muestra la razón de calentamiento y enfriamiento de la pieza durante el tratamiento térmico, Inicialmente la muestra fue calentada hasta 316°C. A partir de esta temperatura el calentamiento se realizó a razón de 93°C/hora, hasta la temperatura recomendada de 690°C. La pieza se mantuvo a esta temperatura justo por debajo de la crítica por el tiempo de 1 hora, 34 minutos siguiendo la recomendación de mantener a la pieza a dicha temperatura especificada por el tiempo de una hora por pulgada de espesor. El enfriamiento se realiza inicialmente en el horno a



FIGURA 21.- MUESTRA DE UNA SOLDADURA DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ELECTROESCORIA SOMETIDA A UN TRATAMIENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.

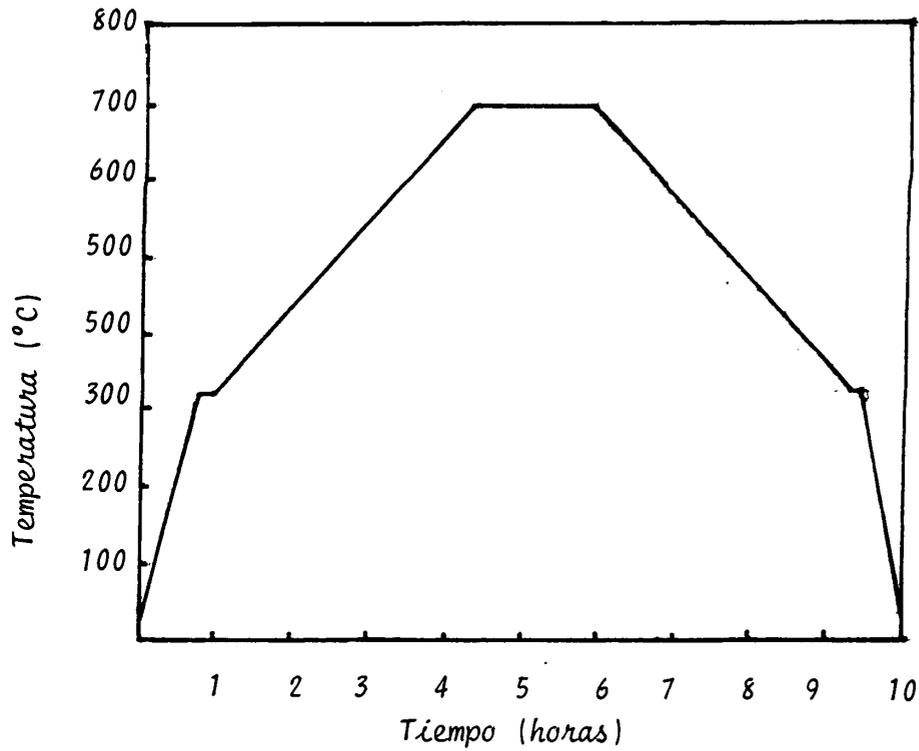


FIGURA 22.- TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO (°C)
DE LA PIEZA VS TIEMPO DE PERMANENCIA (hr.)

la misma razón de 93°C/hora hasta los 316°C y desde esta temperatura el enfriamiento se realiza al aire libre.

3.7 OBTENCION DE MUESTRAS PARA ANALISIS

Las placas soldadas por el proceso de electroescoria del acero SAE-1030 en las dos condiciones: antes de tratamiento térmico de alivio de tensiones y después del mismo fueron seccionadas para ensayos de metalografía, tamaño de grano, tensión, dureza e impacto.

3.7.1 Metalografía

La figura 23 esquematiza las secciones transversales y verticales para ensayos microscópicos y macroscópicos. De cada soldadura se obtuvieron probetas para dichos análisis metalográficos y posteriormente se realizó la preparación de las superficies por técnicas de pulido mecánico utilizando lijas de desbaste y disco abrasivo. El reactivo utilizado para el adecuado macroataque fue nital al 4% por el tiempo de 75 minutos a temperatura ambiente.

Las muestras longitudinales macroatacadas permitieron

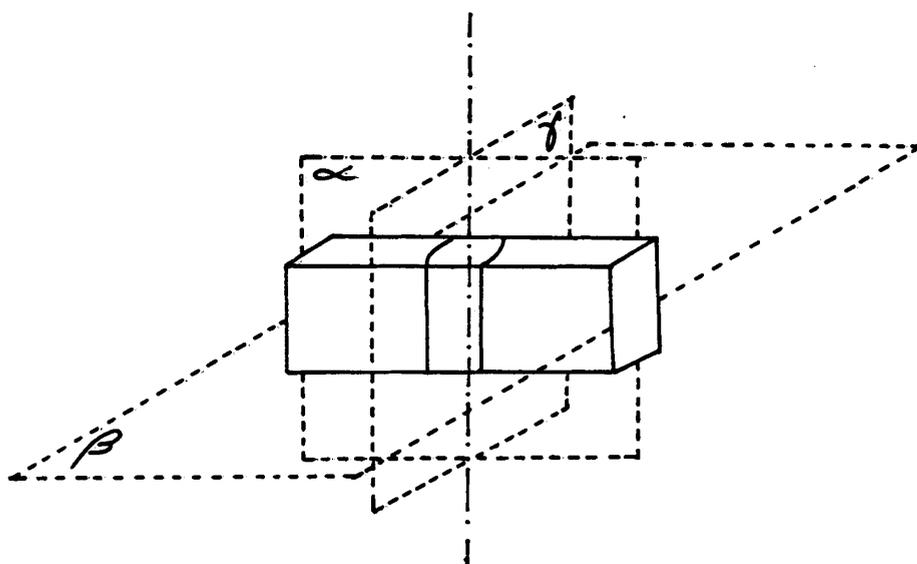


FIGURA 23.- ESQUEMA DE LAS SECCIONES METALOGRAFICAS ANALIZADAS.

- α = Plano que contiene el eje de simetría y corta el metal base
- β = Plano normal al eje y corta a las zapatas refrigeradas por agua
- γ = Plano que contiene al eje cortando a las zapatas refrigeradas.

revelar los tipos de estructuras estudiados en la sección 2.1. Además permitieron medir: ángulo de encuentro, ancho de la soldadura y por lo tanto calcular el factor de forma. Las muestras transversales preparadas utilizando el mismo procedimiento revelan los contrastes de las diferentes zonas de la unión, dirección de los granos columnares característicos de los aceros al carbono soldados por electroescoria y además calcular el porcentaje de la dilución.

El análisis microscópico se hizo en secciones de 10 milímetros de espesor en muestras tomadas a 10 centímetros del fondo de la soldadura. El reactivo utilizado para el correspondiente ataque fue el nital al 2% por el tiempo de 4 minutos a la temperatura ambiente, Esto nos permitió identificar las estructuras y subestructuras microscópicas.

El microscopio utilizado fue el Olympus PME con capacidad de resolución de hasta 1000 aumentos.

3.7.2. Tamaño de Grano

En la medición del tamaño de grano se utilizó el método de Hilliard (Ref. 7), el mismo que está

limitado a sólo la medición de tamaños de grano equiaxiales. Se utilizaron microfotografías compuestas de las soldaduras resultantes para este propósito. Sobre ellas se colocó un papel transparente que contiene un círculo de 10 cms. de circunferencia, el cual permite utilizar el normógrafo de la figura 24. En este normógrafo se cuenta el número de intersecciones de los límites de granos con el círculo asegurando tener un mínimo de seis. Utilizando este valor y la magnificación de la microfotografía se unen los puntos de dicho normógrafo y la intersección de esta recta con el eje que contiene el tamaño de grano ASTM, da la información buscada.

3.7.3 Tensión

Se realizó un ensayo de tensión para determinar la resistencia de la muestra soldada en la orientación transversal, simulando las condiciones de carga a que son expuestas las piezas soldadas por electroescoria como por ejemplo, los recipientes sometidos a presiones internas.

Para las dos condiciones de soldadura: sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico de alivio de tensión

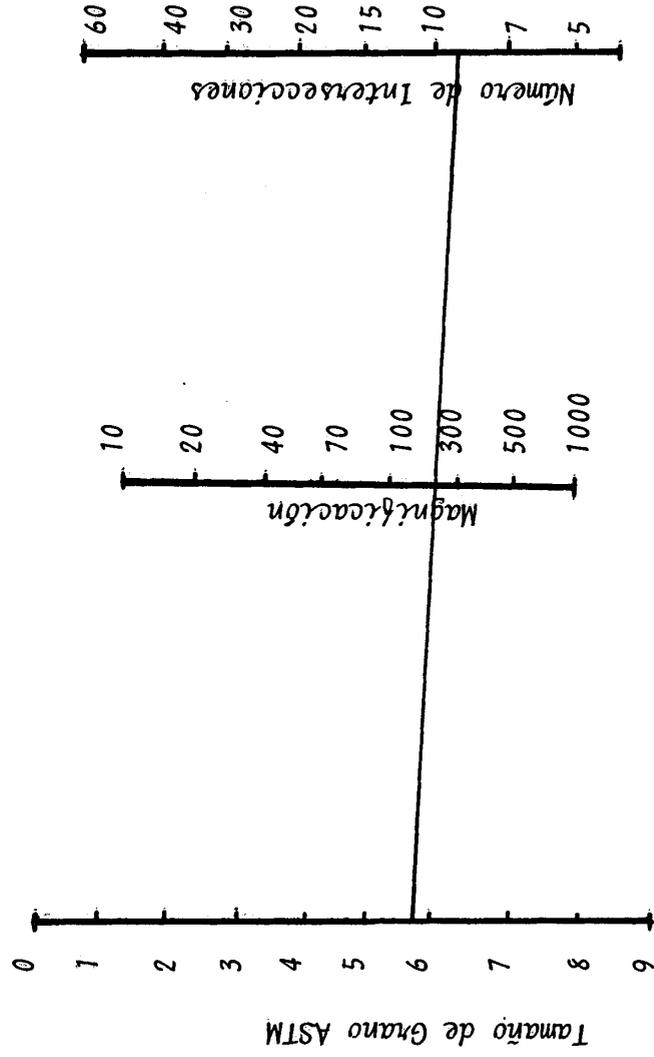
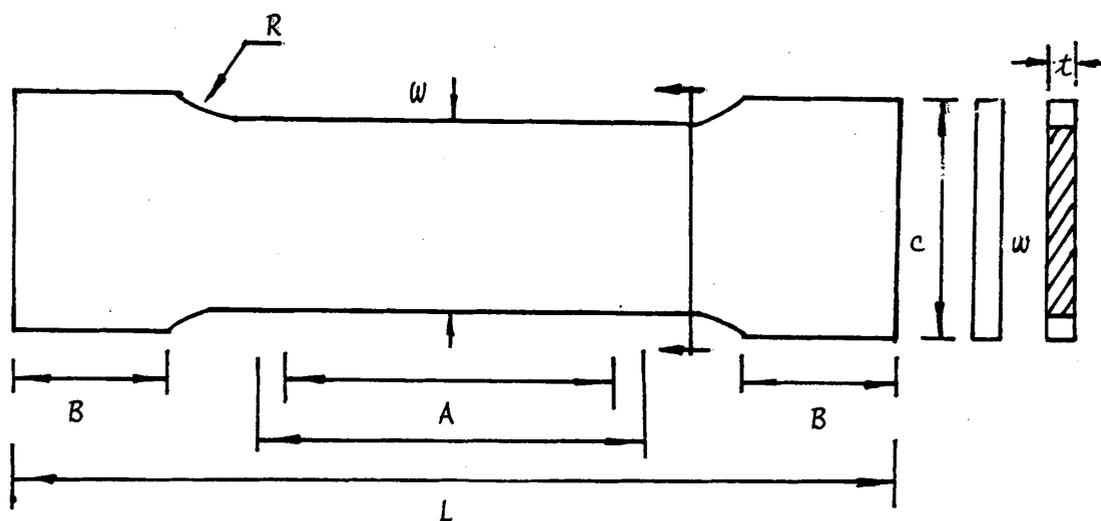


FIGURA 24.- ESQUEMA DEL NORMOGRAFO PARA LA MEDICION DEL TAMAÑO DE GRANO. (REF.7).

nes a 690°C, se seccionaron muestras a 10 cms. con relación al fondo de dichas piezas soldadas. Estas muestras fueron extraídas transversal al eje de la soldadura y posteriormente fueron maquinadas de acuerdo a la norma SA-370 (Ref. 12), adaptada a las dimensiones de la pieza soldada. tal como lo muestra la figura 25 en donde se observa la probeta a ensayarse. Se procedió luego a la rotura de dichas probetas utilizando una máquina INSTRON 1128 con una velocidad de 10 mm/min. Un macroataque permitió identificar la zona o región de rotura, la misma que se ubicó fuera del cordón de soldadura.

3.7.4 Ensayo de Dureza

Un ensayo de dureza fue realizado sobre la sección transversal de una muestra para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico posterior y con tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C. El método utilizado es el Rockwell, escala B. Para ello se hizo penetrar un indentador esférico de 1/16 pulgadas (1.59 mm) aplicando una carga de 100 Kg. Posteriormente se convirtieron estos valores a la escala de dureza Vickers (DHP).



PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCION SECCION RECTANGULAR
DE LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORTIA DEL ACERO SAE-1030

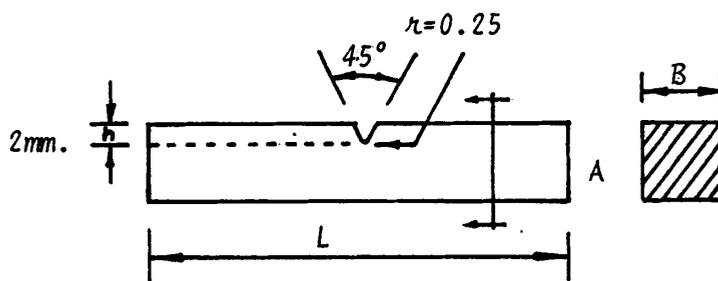
L (mm)	t (mm)	w (mm)	R (mm)	B (mm)	c (mm)
115	3	25	13	20	30

FIGURA 25.- PROBETA ADAPTADA DE LA NORMA SA-370 PARA EL ENSAYO DE TENSION. (REF. 12).

3.7.5 Ensayo de Impacto

Se ensayaron una serie de muestras de impacto a la temperatura ambiente y a diferentes temperaturas para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico posterior y con alivio de tensiones a 690°C. La figura 26 muestra la probeta normalizada, según SA-370 (Ref. 12), para ensayos standard de impacto Charpy. En la figura 27 se esquematiza la forma de extracción de las probetas para las tres zonas de soldadura. Las muestras corresponden a la sección transversal extraídas a partir de 3 cms. desde el inicio de la soldadura hasta 10 cms. de altura de dicha unión. Mediante un ataque con reactivo nital se observó la zona de interés a ensayar, lo cual permitió maquinar con exactitud la entalla en "V" utilizando una fresadora. Para cada condición de la muestra soldada se obtuvieron un total de 42 muestras para el ensayo: Dos muestras para cada una de las tres zonas, para siete diferentes temperaturas de ensayo.

La máquina utilizada en el presente trabajo correspondió a la TINIUS OLSEN de 36,5 Kilogramos-metros de capacidad. Son máquinas o martillos pendulares en las que se verifica la tenacidad de los materiales ensaya-



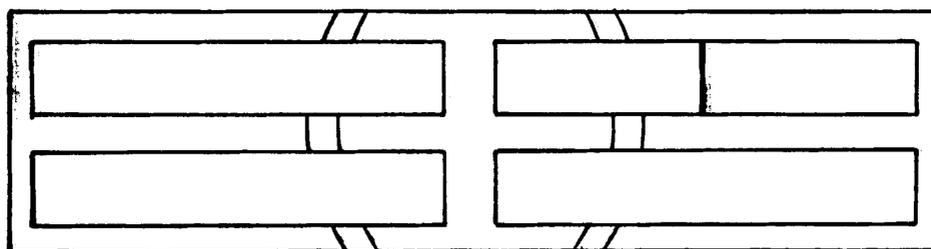
PROBETA PARA ENSAYO CHARPY EN "V"

Muestra sección transversal

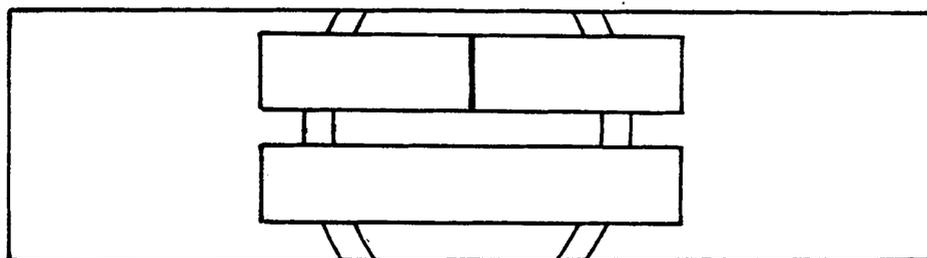
Soldadura por ESW-Acero SAE-1030

(mm)	A (mm)	B (mm)	entalla	h (mm)	r (mm)
55	10	10	45°	2	0.25

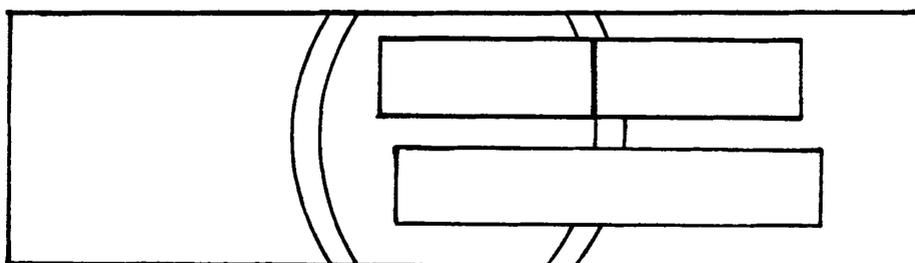
FIGURA 26.- PROBETA DE ENSAYO PARA IMPACTO CHARPY DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ELECTROESCORIA SEGUN NORMA SA-370. (REF.12).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 27.- EXTRACCION DE LAS PROBETAS PARA ENSAYO DE IMPACTO CHARPY DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ELECTROESCORIA, PARA LAS DOS CONDICIONES (a) METAL BASE. (b) ZONA DE FUSION. (c) ZONA AFECTADA POR EL CALOR.

dos. La máquina determina la energía absorbida por el material al producirse la rotura. Posteriormente se determinó el porcentaje de fractura dúctil para cada probeta según especificación ASTM 370A (12). La inspección visual del área brillante característica de la fractura frágil nos permite determinar el porcentaje de fractura dúctil.

CAPITULO IV

DISCUSION DE RESULTADOS

Los parámetros de soldadura, cuyos valores se fijan en 39 voltios y 360 amperios generan uniones sin defectos en el acero SAE-1030 soldado por electroescoria. Estos parámetros se establecieron luego de algunas pruebas preliminares. Se realizó primeramente una muestra soldada con parámetros cuyos valores fueron de 36 voltios y 350 amperios los mismos que produjeron una soldadura defectuosa de poca penetración, lo cual permitió establecer que el voltaje fue inapropiado para el espesor de las placas. La probeta soldada con 39 voltios y 360 amperios permitió obtener una soldadura buena y sin defectos, encontrando que las posteriores soldaduras mostraron que dichos parámetros fueron los correctos. Adicionalmente el examen radiográfico permitió observar una falta de penetración en una de las muestras soldadas, una discontinuidad por reinicio del proceso en otra muestra y finalmente una falta de penetración en uno de los lados del cordón por desalineamiento del tubo-guía. El resto de las muestras soldadas no mostraron defecto alguno en el ensayo radiográfico. La

Tabla IV resume las ocho muestras que se realizaron en la presente tesis.

La Tabla V presenta algunos parámetros de soldadura calculados y además mediciones de la geometría resultante de las soldaduras. Los valores presentados son para la generalidad de las uniones y se observa que los parámetros y mediciones calculados son iguales puesto que se utilizaron los mismos parámetros de soldadura, ésto es, 39 voltios y 360 amperios, La velocidad del electrodo (53.0 cms/minuto) fue calculada por la relación lineal que existe entre este parámetro y la intensidad de corriente, para un diámetro de electrodo de 3,5 mm. Para este cálculo se utilizó la figura AII del Apéndice II, la cual suministra información de velocidad del electrodo para intensidades de corriente mayores de 350 amperios.

La velocidad de soldadura fue determinada por la expresión (2) arrojando un valor de 2.5 cm/minuto en el presente trabajo. La cantidad de calor suministrado fue calculado mediante la relación (5) dando un valor de 1.83×10^6 Joules/cms. que es constante para todas las pruebas. La Tabla V resume la evaluación de la geometría de las soldaduras mostrando los valores de las variables dependientes: Angulo de encuentro, ancho de la zona de fusión, profundidad de

TABLA IV

OBSERVACIONES DE LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORIAAcero SAE-1030

Soldadura Nº	Tensión (Voltios)	Corriente (Amperios)	Tiempo de Duración	Observaciones
1	36	350	11 min.	Falta de Penetración
2	39	360	10 min.	Soldadura Buena
3	39.5	360	10.5 min.	Soldadura Buena
4	39	360	11 min.	Soldadura interrumpida y reiniciada
5	39	360	11.5 min.	Soldadura defectuosa por guía desalineada.
6	39	360	11.5 min.	Soldadura buena
7	39	360	10 min.	Reiniciada por alambre frenado en las guías.
8	39	360	11 min.	Soldadura buena

TABLA V

RESUMEN DE LOS EXPERIMENTOS DE LAS SOLDADURAS POR ESWAcero SAE 1030

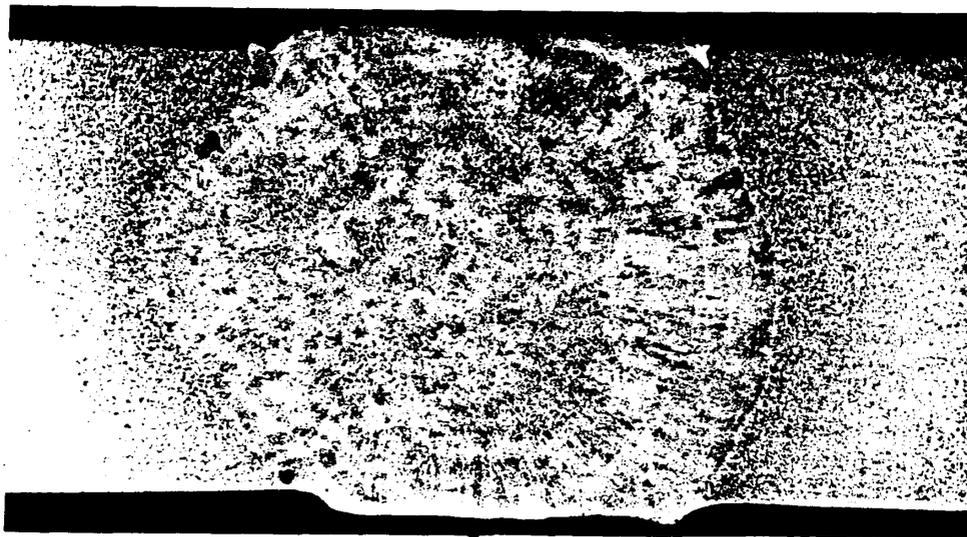
Parámetro o Medición	Sin tratamiento térmico	Con alivio de tensiones (690°C)
Velocidad del electrodo (cm/min.)	53.0	53.0
Velocidad de avance (cm/min.)	2.5	2.5
Calor suministrado (Kjoule/cm)	1831	1831
Angulo de encuentro	58°	60°
Profundidad de la Pileta (cm)	1	1
Ancho de la zona de fusión (cm)	3	3
Factor de forma	3	3
Dilución	38-40%	38-40%

la pileta, factor de forma y dilución.

Los valores medidos arrojan los siguientes valores: 58 grados para el ángulo de encuentro en la muestra sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y 60 grados para la condición con alivio de tensiones a 690°C. El ancho de la zona de fusión fue de 36 milímetros y el ancho de la zona afectada por el calor de 9 mm. La altura de la pileta fue calculada a partir del factor de forma, el mismo que se calculó de una macrosección vertical y del valor del ancho de la zona de fusión o ancho de la soldadura. El valor numérico de este parámetro fue de 10 mm. La dilución se calculó a partir de la expresión (6) dando el valor de 38.0-40% para las dos condiciones, puesto que tal como se mencionó anteriormente los parámetros se mantuvieron constantes durante el proceso de soldadura.

a.- Observación Macroscópica

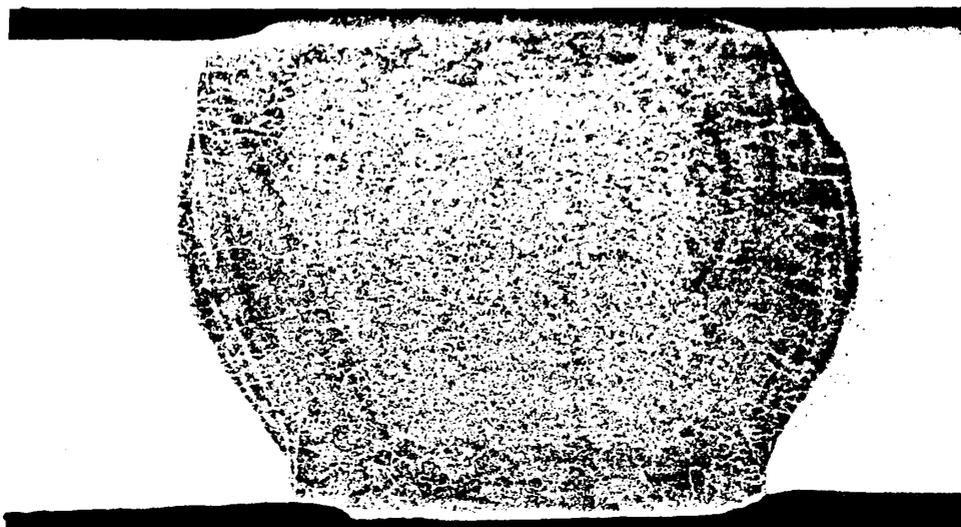
El efecto del ciclo térmico sobre las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030 es mostrado en la figura 28. La muestra corresponde a la macroestructura de una sección transversal. Se observa que



Nital 4%

x 2.0

FIGURA 28.- SECCION TRANSVERSAL MOSTRANDO LA MACROESTRUCTURA DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES.



Nital 4%

x 2.0

FIGURA 29.- SECCION TRANSVERSAL MOSTRANDO LA MACROESTRUCTURA DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. CON TRATAMIENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.

la zona de fusión está caracterizada por granos columnares bastos que crecen radialmente hacia el centro desde las paredes de las zapatas refrigeradas y desde el metal base.

La figura 29 corresponde a la sección transversal de una muestra soldada y sometida a un tratamiento térmico posterior de alivio de tensiones a 690°C. Se puede observar un ligero crecimiento del grano columnar con respecto a la muestra sin tratamiento térmico.

La macroestructura de secciones verticales es mostrada en las figuras 30 y 31. La figura 30 es una muestra seccionada paralela al eje de la soldadura. Se observa que la zona de fusión es similar a aquella estudiada en la sección 2.1 correspondiente al tipo I, la misma que es característica en componentes de pequeña sección y cuando existen pequeñas cantidades de carbono y manganeso en el metal soldado.

Se observa en dicha figura 30 que los granos columnares están orientados desde la línea de fusión hacia el eje de la soldadura. La figura inferior 31 corresponde a una muestra seccionada transversalmente pero sometida a un posterior tratamiento térmico de alivio



Nital 4%

x 1.5

FIGURA 30.- SECCION VERTICAL MOSTRANDO LA MACROESTRUCTURA DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW, SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES.



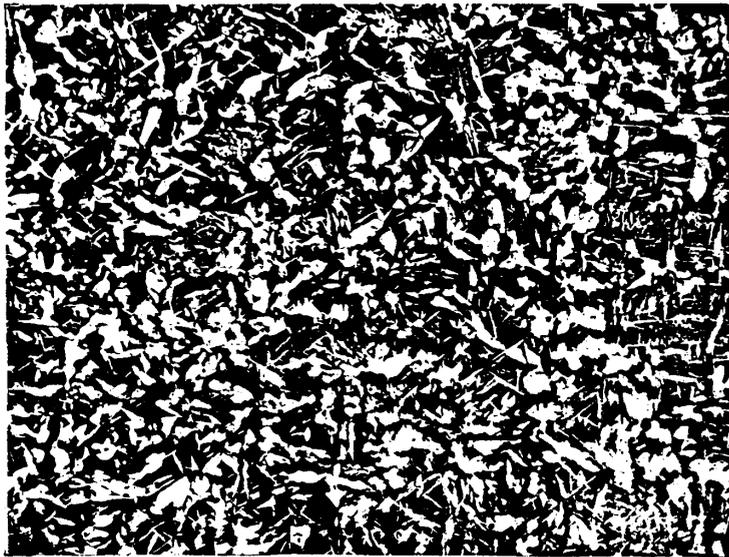
Nital 4%

x 1.5

FIGURA 31.-SECCION VERTICAL MOSTRANDO LA MACROESTRUCTURA DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. CON TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.

de tensiones a 690°C . Se observa que esta estructura es similar al tipo II de estructuras estudiado en la sección 2.1 (Fig. 11), excepto por la zona 3 de granos equiaxiales en el centro de la soldadura. Se puede apreciar, sin embargo, la zona de granos columnares finos en la proximidad del eje de la soldadura y exterior a esta zona se observa una zona de granos columnares bastos que es adyacente a la zona afectada por el calor.

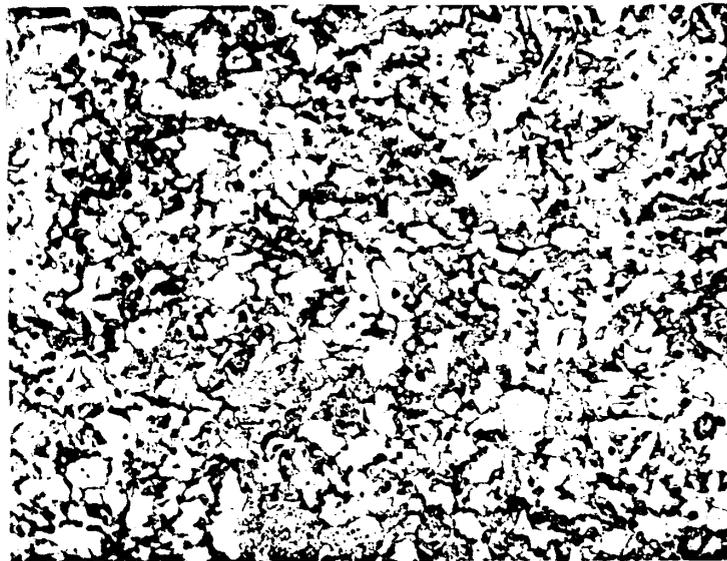
En la figura 32 se muestra la microestructura de una sección transversal del metal base del acero SAE-1030 soldado por electroescoria sin tratamiento térmico de alivio de tensiones. Se puede observar la estructura de matriz perlítica con granos de ferrita alargados formado bajo condiciones de enfriamiento continuo con tendencia a la formación de estructura Widmanns-tatten. Si se compara la microestructura del material base se puede establecer que no existen diferencias apreciables, concluyéndose que el calor suministrado durante el proceso no ha sido suficientemente para cambiar la microestructura del acero SAE-1030 durante el proceso de soldadura. La figura 33 corresponde a una sección transversal del metal base del acero SAE-1030 soldado por el proceso de electroesco-



Nital 2%

x 200

FIGURA 32.-MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL METAL BASE DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES.



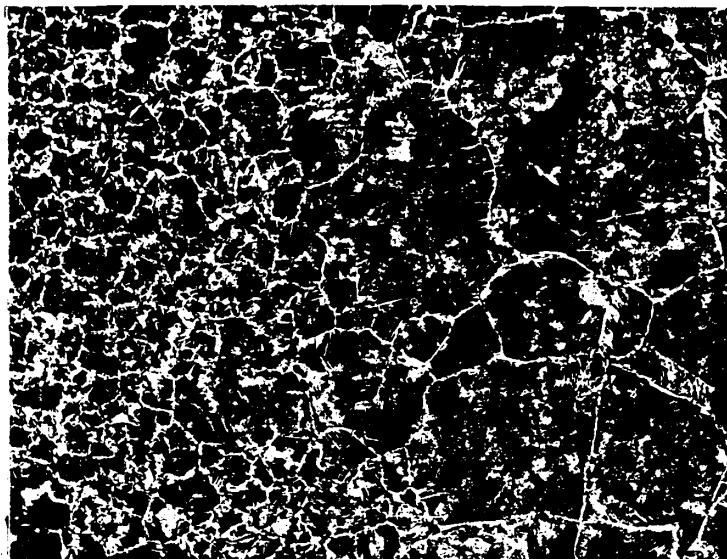
Nital 2%

x 200

FIGURA 33.-MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL METAL BASE DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW SOMETIDA A UN TRATAMIENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.

ria con tratamiento térmico posterior de alivio de tensiones a 690°C. Se observa que la microestructura constan de granos de perlita y ferrita equiaxiales en lugar de la estructura Widmannstätten que correspondió a la muestra sin tratamiento térmico de alivio de tensiones. Es notorio que el tratamiento térmico ha sido el responsable del cambio en la morfología del grano del metal soldado por electroescoria.

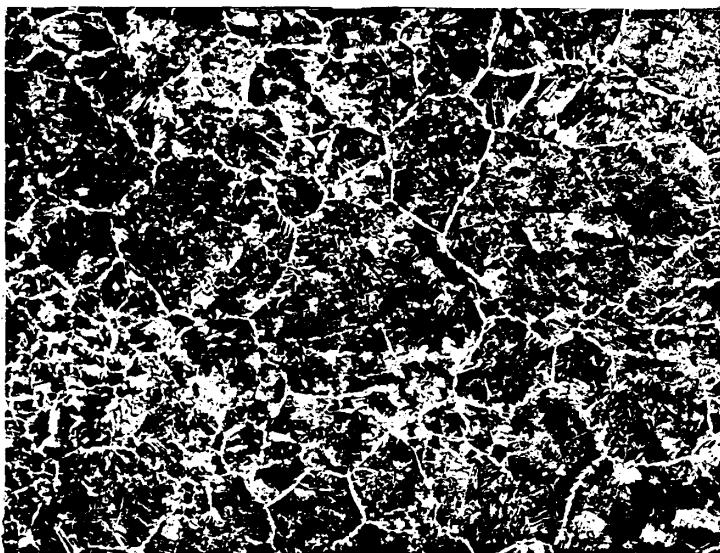
Las figuras 34 y 35 corresponden a las microestructuras de la sección transversal de la zona afectada por el calor del acero SAE-1030, soldado por el proceso de electroescoria en la condición sin tratamiento de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C, respectivamente. En la figura 34 se observa una zona de grano crecido y otra zona de granos más pequeños hacia la zona del metal base. La zona de granos más grandes tiene un tamaño de grano ASTM 5 disminuyendo hasta un ASTM 8 (medidas a 22 y 27 mm respectivamente desde el centro de la soldadura). Se observa además la presencia de ferrita en los límites intergranulares aparte de la matriz perlítica. En la figura 35 se muestra la microestructura de la zona afectada por el calor del mismo acero SAE-1030 pero sometido a un posterior tratamiento tér-



Nital 2%

x 200

FIGURA 34.- MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA ZAC DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. SE OBSERVA UNA TRANSICION DEL TAMAÑO DE GRANO. SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES.



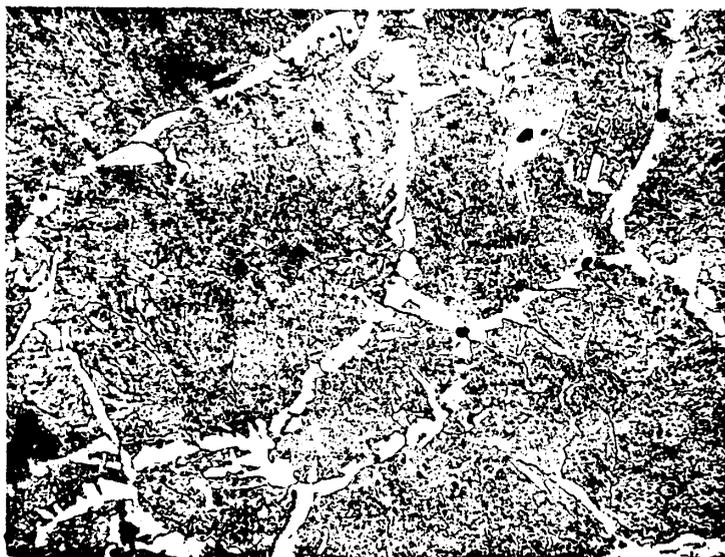
Nital 2%

x 200

FIGURA 35.-MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA ZAC DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. SE OBSERVA UNA TRANSICION DEL TAMAÑO DE GRANO. CON TRATAMIENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.

mico de alivio de tensiones a 690°C. Al igual que la microfotografía anterior, en la condición sin tratamiento térmico, se observa una zona de grano crecido cuyo tamaño es algo mayor al caso de la figura 34 alcanzando un valor ASTM 4 medido a la distancia de 22 mm. desde el centro de la soldadura. La microestructura está constituida por granos equiaxiales de perlita, observándose también ferrita en los límites de granos. En ambas figuras se observa una transición del tamaño de grano y la típica microestructura de la ferrita acicular.

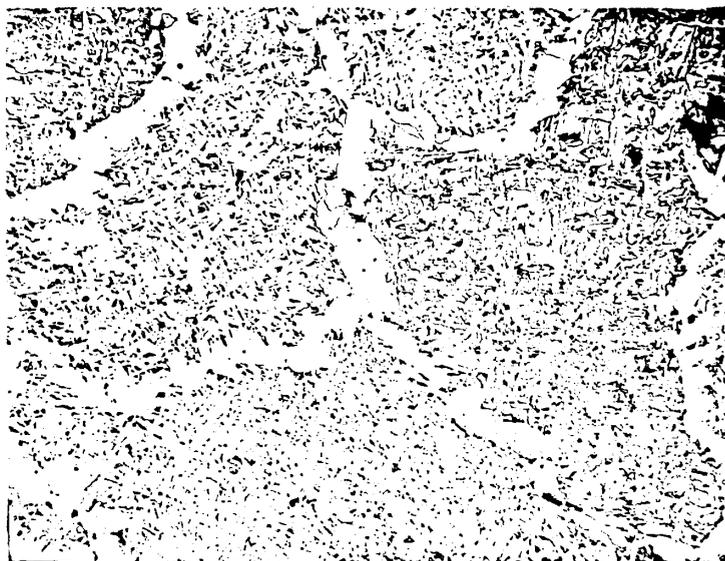
Las figuras 36 y 37 representan la microestructura de la misma zona afectada por el calor del acero SAE-1030 soldado por electroescoria pero a mayor magnificación. En la figura 36 se muestra la microestructura de la sección transversal, cercana a la zona de fusión, en la condición sin tratamiento térmico de alivio de tensiones. Se observan los granos equiaxiales a la que se hizo referencia anteriormente. La microestructura consta de ferrita acicular y perlita fina. En la figura 37 se muestra la microestructura pero en la condición con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C. Se observa granos de per-



Nital 2%

x 1000

FIGURA 36.- MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA ZAC CERCANA A LA ZONA DE FUSION DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES.



Nital 2%

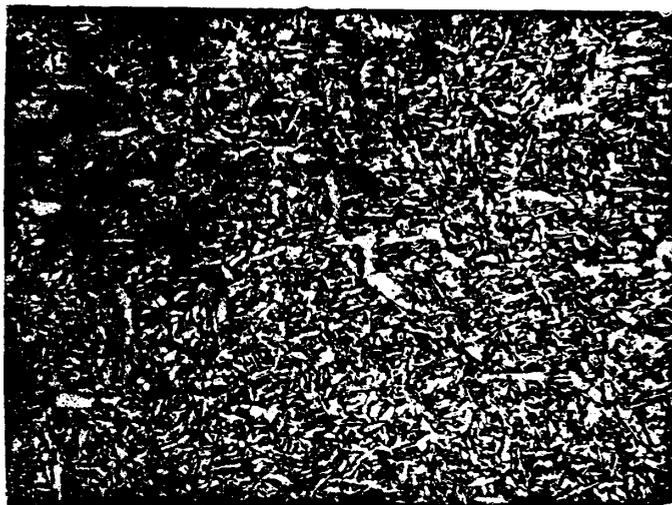
x 1000

FIGURA 37.- MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA ZAC, CERCANA A LA ZONA DE FUSION, DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. CON TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.

lita rodeados de ferrita pero de mayor tamaño que en la condición sin tratamiento térmico posterior. Puede apreciarse además, la presencia de ferrita en forma de agujas dentro de los granos equiaxiales.

Las figuras 38 y 39 corresponden a una sección transversal de una soldadura por electroescoria del acero SAE-1030 y muestra un análisis metalográfico de la zona de fusión para las dos condiciones. La figura 38 corresponde a la microestructura en dicha zona de fusión para la condición sin tratamiento de alivio de tensiones. Se observa ferrita acicular y perlita. En la figura 39 se observa la microestructura de la misma muestra anterior pero sometida a un tratamiento de alivio de tensiones a 690°C. Se puede apreciar además un crecimiento de la ferrita presentándose en forma alargada en una matriz perlítica.

Las figuras 40 y 41 corresponden a microestructuras de secciones longitudinales de la zona de fusión del acero SAE-1030 soldado por electroescoria. La figura 40 representa una muestra en la condición sin tratamiento térmico posterior al proceso, en la que se puede observar la estructura de grano columnar de ferrita y perlita.



Nital 2%

x 200

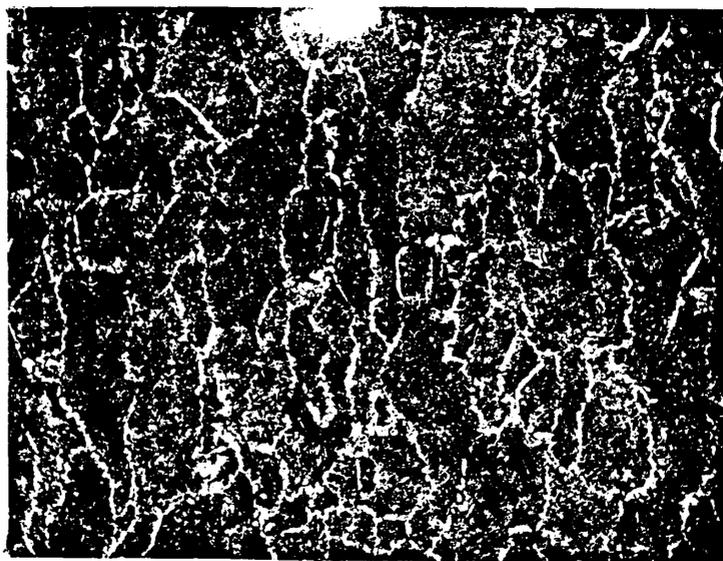
FIGURA 38.-MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA ZONA DE FUSION DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES.



Nital 2%

x 200

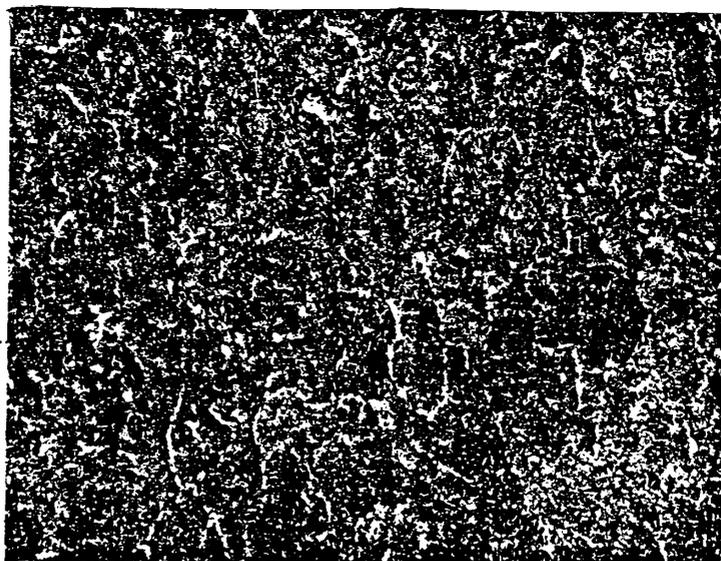
FIGURA 39.- MICROESTRUCTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA ZONA DE FUSION DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. CON TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.



Nital 2%

x 50

FIGURA 40.- MICROESTRUCTURA DE UNA SECCION VERTICAL DE LA ZONA DE FUSION DE ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES.



Nital 2%

x 50

FIGURA 41.- MICROESTRUCTURA DE UNA SECCION VERTICAL DE LA ZONA DE FUSION DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ESW. CON TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C.

La figura 41 corresponde en cambio a la muestra con tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C, en la cual se observa la estructura anterior pero más homogénea como resultado del tratamiento térmico posterior al proceso de soldadura.

c.- Tamaño de Grano

La medición de tamaño de grano de la muestra soldada del acero SAE-1030 por el método de electroescoria correspondió sólo a la zona afectada por el calor puesto que ésta presenta granos equiaxiales. Los valores medidos utilizando las figuras 34 y 35, mediante el método descrito en la sección correspondiente muestran una variación muy pequeña en la zona afectada por el calor ya que el tamaño de grano correspondiente a la muestra sin tratamiento térmico de alivio de tensiones arrojó un valor ASTM 5, variando ligeramente a un valor ASTM 4 en la muestra con tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C.

d.- Prueba de Dureza

El resultado del ensayo de dureza Rockwell, escala B, y convertidos a valores Vickers DPH, se puede obser-

var en la Tabla VI para las muestras del acero SAE-1030 soldadas por electroescoria para las dos condiciones. El gráfico de dichos valores se muestra en la Fig. 42. La curva (1) representa la distribución de la dureza de la muestra en la condición sin tratamiento de alivio de tensiones. Se observa que ésta es distinta a través de las regiones de la soldadura puesto que la razón de enfriamiento es diferente a través de una zona a otra. La dureza para la muestra en esta condición decrece desde 96 R_B en la zona de fusión de 87 R_B en la zona de metal base. La curva (2) representa en cambio la distribución de la dureza para la muestra sometida a un tratamiento posterior de alivio de tensiones a 690°C. Se observa un comportamiento similar a la curva (1). La comparación de las curvas para las dos condiciones de la soldadura permite afirmar que la distribución de la dureza a través de las regiones es distinta, además la curva (2) correspondiente a la condición con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C presente una distribución algo menor de la dureza con relación a la condición sin tratamiento de alivio de tensiones, lo cual está asociado con el crecimiento del tamaño de grano, lo que implica una reducción de esta propiedad.

TABLA VI

VARIACION DE LA DUREZA DE LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA

ACERO SAE-1030

SIN TRATAMIENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSIONES		CON TRATAMIENTO TERMICO DE ALIVIO DE TENSIONES A 690°C	
Distancia mm	Dureza DPH	Distancia mm	Dureza DPH
2	231	2	226
4	226	4	227
6	226	6	228
8	228	8	226
10	227	10	226
12	227	12	223
14	226	14	221
16	222	16	218
18	218	18	216
20	213	20	206
22	208	22	192
24	192	24	191
26	193	26	190
28	190	28	188
30	188	30	184
32	189	32	184
34	188	34	184
36	188	36	184
38	188	38	184
40	188	40	180
42	188	42	184
44	184	44	185
46	188	46	184

Distancia medida desde el centro de la soldadura

e.- Tensión

La Tabla VII resume los resultados de las pruebas de tensión realizadas a la temperatura ambiente para el acero SAE-1030 soldado por el proceso de electroescoria para las dos condiciones de soldadura: Sin tratamiento de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.

Se puede observar un ligero decrecimiento del esfuerzo a la fluencia y del esfuerzo a la tracción y un pequeño aumento de la ductilidad en las muestras provenientes de las soldaduras con un alivio de tensiones a 690°C. Puesto que las pruebas de la dureza arrojaron una reducción de los esfuerzos en las muestras sometidas a un tratamiento térmico de alivio de tensiones, es lógico esperar un decrecimiento en las propiedades mecánicas de la tensión.

f.- Ensayo de Impacto

Los resultados obtenidos en el ensayo de impacto a la temperatura ambiente para las muestras soldadas por el método de electroescoria del acero SAE-1030 para las dos condiciones de soldadura: Sin tratamiento

TABLA VII

PROPIEDADES MECANICAS DE LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORIAENSAYO DE TRACCION ACERO SAE-1030

Condición	Esfuerzo a la Fluencia (Kg/mm ²)	Esfuerzo a la Tracción (Kg/mm ²)	Resistencia a la Rotura (Kg/mm ²)	Elongación (%)
Sin TT	49.51	66.0	51.4	9
Sin TT	49.57	61.9	61.9	8
Sin TT	49.0	63.0	62.0	8.5
Con TT	48.6	56.0	52.0	10.8
Con TT	47.0	55.0	53.0	13.0
Con TT	47.0	56.0	52.0	13.5

térmico posterior y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C , son mostrados en la Tabla VIII. En dicha tabla se presentan también los promedios del porcentaje de fractura dúctil para las distintas regiones. Las figuras 43 y 44 muestran los resultados de la prueba de impacto para las muestras sin tratamiento térmico.

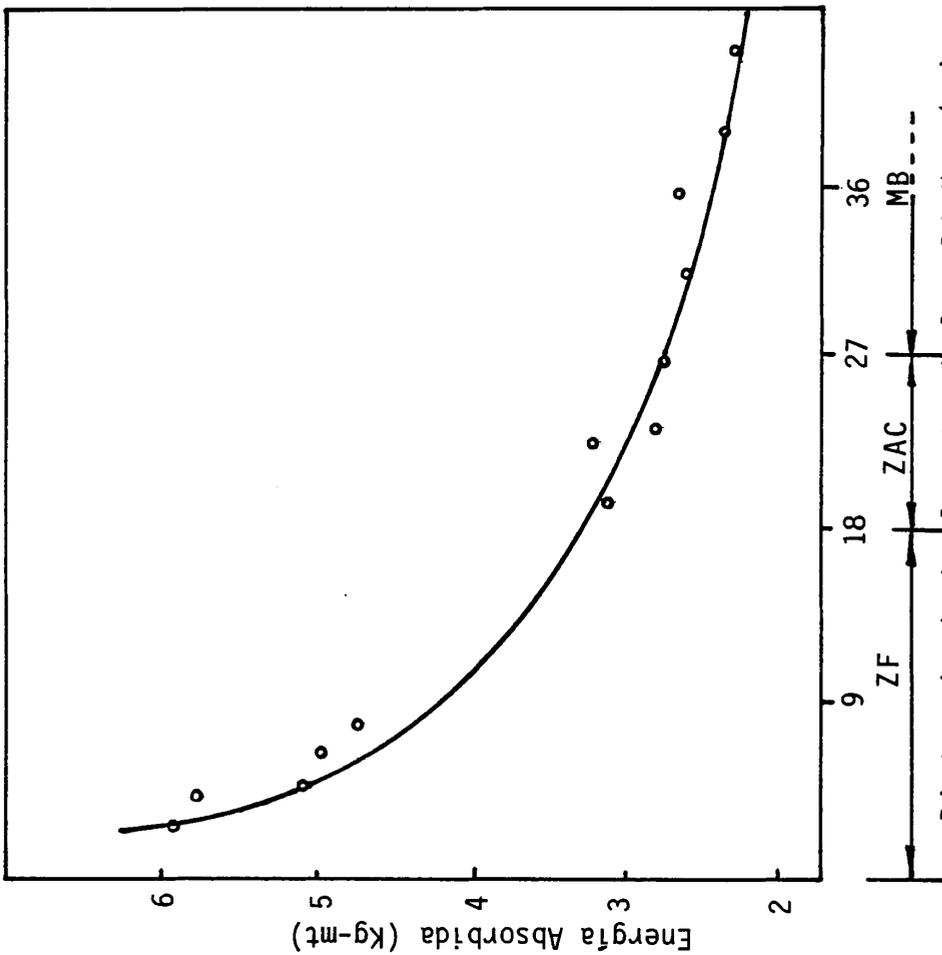
En la figura 43 se observa que la energía absorbida en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor es mayor que aquella correspondiente a la zona metal base. Esto se debe principalmente a las diferencias microestructurales que poseen las diferentes zonas de la soldadura: La microestructura acicular fina de granos columnares que caracteriza a la zona de fusión arrojó un valor promedio de energía absorbida durante el ensayo de aproximadamente 5.6 Kg-mt (39.9 Lb-pie), la zona afectada por el calor 2.8 Kg-mt (19.9 Lb-pie) y finalmente la zona de metal base cuya microestructura es acicular gruesa arrojó un valor promedio de 2.4 Kg-mt (17 Lb-pie). Generalmente en las soldaduras por electroescoria de aceros aleados en la condición sin tratamiento térmico posterior han reportado (10) valores mayores de las propiedades al impacto en la zona de metal base con respecto a las otras dos zonas de la soldadura. Sin embargo, en el presente caso la

TABLA VIII

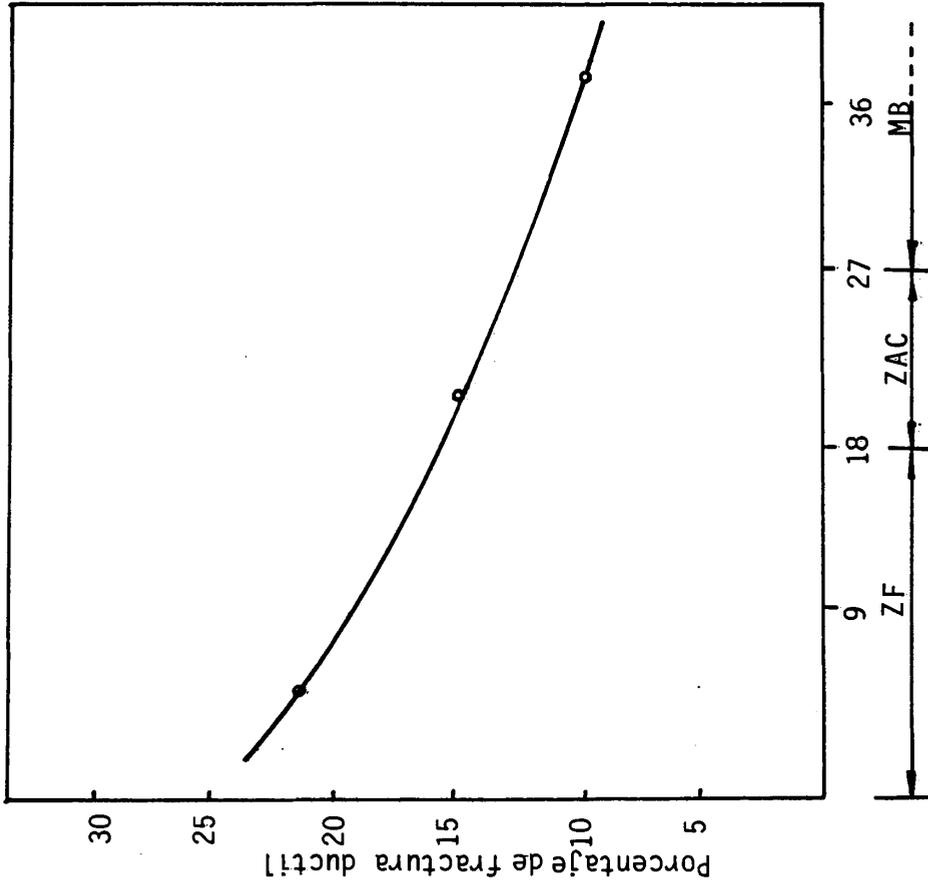
ENSAYO DE IMPACTO A LA TEMPERATURA AMBIENTE DE LASSOLDADURAS POR ELECTROESCORIA DEL ACERO SAE-1030

CONDICION	LOCALIZACION	PROMEDIO DE ENERGIA DE IMPACTO (Kg-mt) -	PROMEDIO PORCENTAJE DE FRACTURA DUCTIL (%)
Sin Tratamiento de alivio de tensiones	ZF	5.6	23
	ZAC	2.8	15
	MB	2.4	11
Con Tratamiento de alivio de tensiones a 690°C	ZF	6.9	45
	ZAC	4.9	20
	MB	3.8	17

SOLDADO POR ELECTROESCORIA. SIN TRATAMIENTO DE ALIVIO DE TENSIONES



Distancia desde el centro de la soldadura (mm)
 Fig. 43.- Energía absorbida (Kg-mt) Vs Distancia (mm) desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado por ESW.



Distancia desde el centro de la soldadura (mm)
 Fig. 44.- Porcentaje de fractura dúctil Vs Distancia (mm) desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado por ESW.

baja tenacidad de la zona del metal base deberá atribuirse a que la morfología de la microestructura es acicular gruesa con relación a la equiaxial característica de la zona afectada por el calor. La figura 44 presenta el porcentaje de fractura dúctil de las probetas ensayadas a la temperatura ambiente del acero SAE-1030 soldado por electroescoria. Se observa que los valores graficados tienen un comportamiento que es correspondiente al de la figura 43, ya que a mayor tenacidad el carácter de la fractura es más dúctil.

Las figuras 45 y 46 muestran el comportamiento al ensayo de impacto de las soldaduras sometidas a un posterior tratamiento de alivio de tensiones a 690°C . Las propiedades al impacto de una zona a otra variaron en el mismo sentido con relación a la muestra en la condición sin tratamiento de alivio de tensiones, es así como se obtienen valores promedios de 6.9; 4.9 y 3.8 Kg-mt para la zona de fusión, zona afectada por el calor y metal base, respectivamente. Es evidente entonces que el tratamiento de alivio de tensiones a 690°C mejora las propiedades al impacto en soldaduras por electroescoria, como consecuencia de haber obtenido una homogenización de la microestructura, lo que influyó indudablemente en la mejora de la tenacidad. El

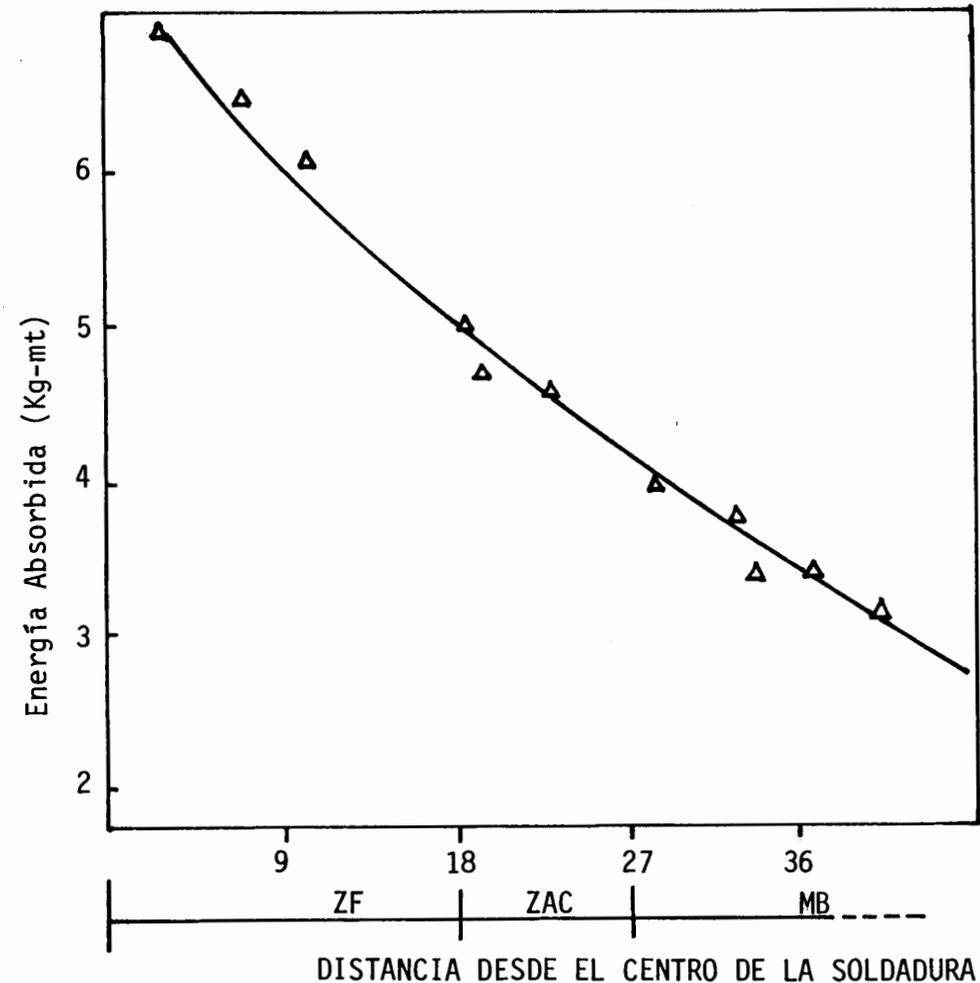


Fig. 45.- Energía Absorbida (Kg-mt) Vs Distancia (mm) desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado por ESW.

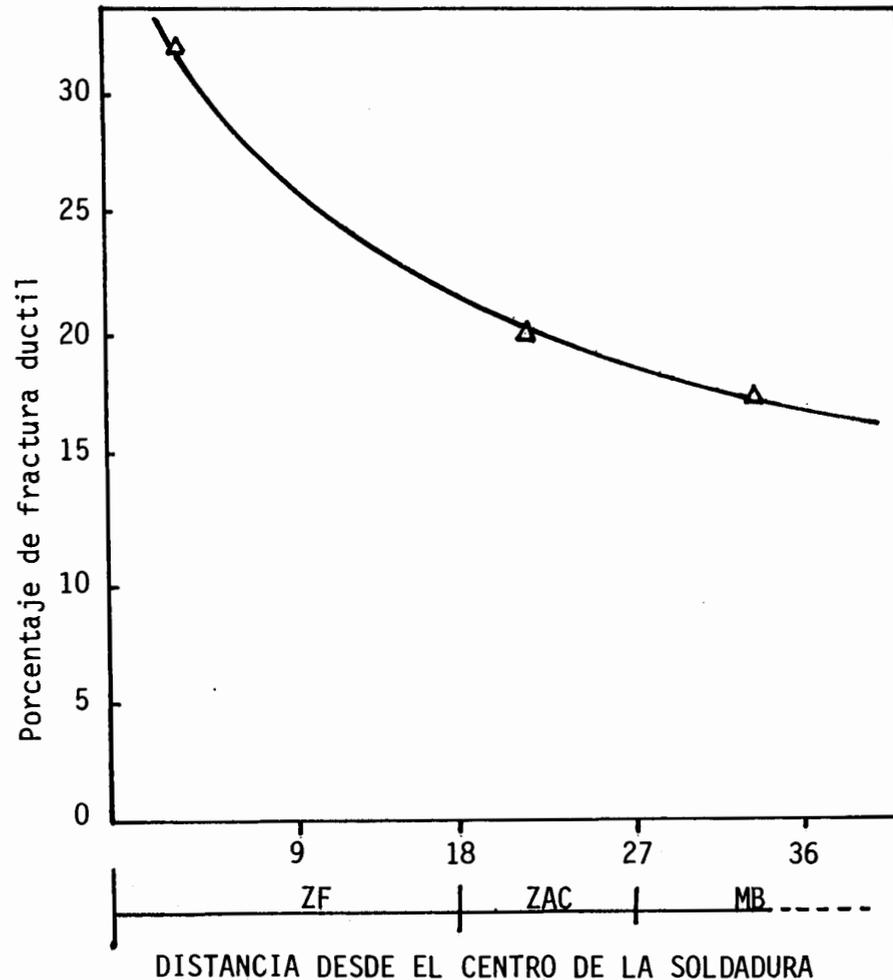


Fig. 46.- Porcentaje de fractura dúctil Vs Distancia (mm) desde el centro de la soldadura del acero SAE-1030 soldado por ESW.

porcentaje de fractura dúctil Vs distancia desde el centro de la soldadura, representado en el figura 46, varía correspondientemente.

Los valores obtenidos en el ensayo de impacto a diferentes temperaturas para el acero SAE-1030 soldado por electroescoria para las dos condiciones de soldadura: Sin tratamiento térmico posterior y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C se presentan en la Tabla IX. El porcentaje de fractura dúctil correspondiente a las probetas ensayadas a diferentes temperaturas son mostradas en la Tabla X. Los valores respectivos son graficados en un sistema de coordenadas: Energía absorbida (kg-mt) Vs Temperatura de ensayo (°C). En efecto la figura 47 muestra el comportamiento de las soldaduras ensayadas en la Zona de Fusión para las dos condiciones. Se observa que las dos curvas resultantes muestran la disminución esperada de la energía absorbida al disminuir la temperatura de ensayo. Además, se puede observar que la muestra ensayada en la condición con alivio de tensiones a 690°C posee mayor tenacidad que la correspondiente en la condición sin tratamiento térmico posterior debido a la mejor homogeneización de la microestructura obtenida por el tratamiento térmico. Como se estableció anteriormente la tenacidad de las

TABLA IX

ENSAYO DE IMPACTO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE LAS
SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA DEL ACERO SAE-1030

PROMEDIO DE LAS ENERGIAS DE IMPACTO (Kg-mt)						
Temperatura de Ensayo (°C)	ZF		ZAC		MB	
	Sin TT	Con TT	Sin TT	Con TT	Sin TT	Con TT
0	3.2	4.5	2.2	3.4	1.4	2.8
14	4.1	4.7	2.3	3.9	1.7	3.1
25	5.6	6.9	2.7	4.9	2.4	3.8
43	7.6	8.5	3.8	5.6	3.0	4.4
75	8.0	12.6	5.1	7.6	3.8	6.3
100	8.6	14.7	6.2	8.7	5.0	7.5
125	10.0	16.8	7.1	10.2	6.1	8.2

TABLA X

DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE FRACTURA DUCTIL CORRESPONDIENTE
A. LAS PROBETAS DE IMPACTO ENSAYADAS A DIFERENTES TEMPERATURAS
DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ELECTROESCORIA

PROMEDIO DE FRACTURA DUCTIL (%)						
Temperatura de Ensayo (°C)	ZF		ZAC		MB	
	Sin TT	Con TT	Sin TT	Con TT	Sin TT	Con TT
0	12	24	6	10	0	6
14	19	33	10	15	6	12
25	23	45	15	20	11	17
43	42	62	40	47	23	36
75	55	72	48	51	36	47
100	62	74	53	59	50	52
125	69	82	57	66	55	62

DE FUSION DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ELECTROESCORIA

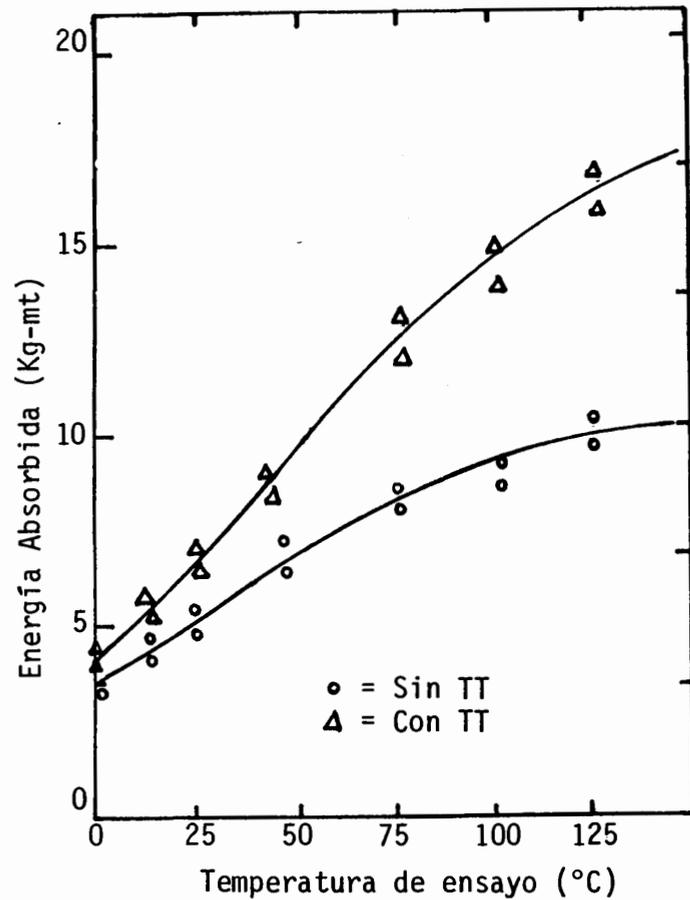


Fig. 47.- Energía Absorbida Vs Temperatura de ensayo de la ZF del acero SAE-1030 soldado por ESW.

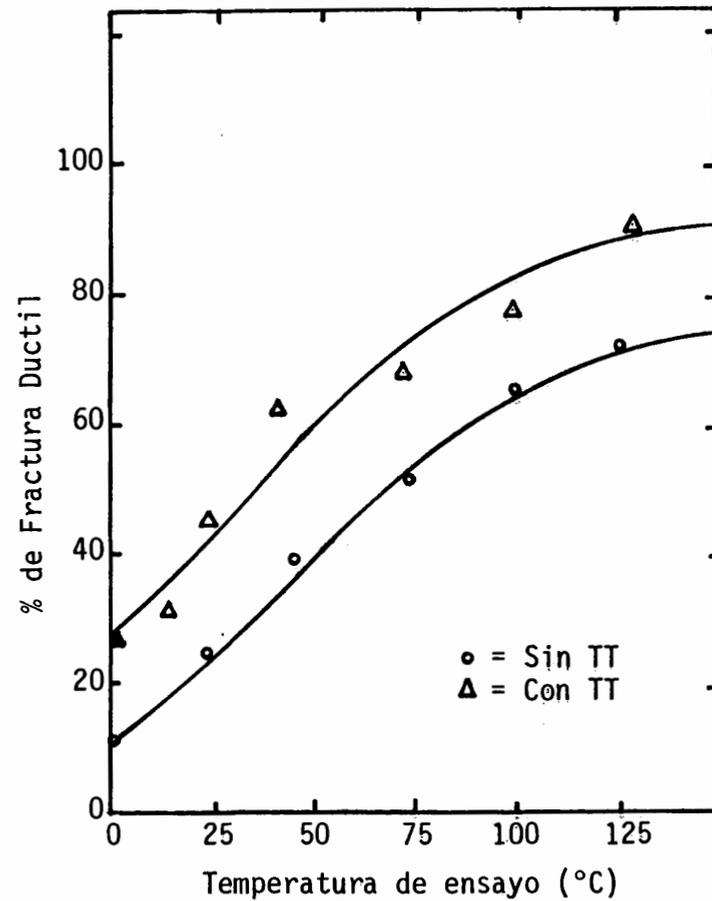


Fig. 48.- Porcentaje de fractura Vs Temperatura de ensayo de la ZF del acero SAE-1030 soldado por ESW.

muestras correspondientes a la zona de fusión es mayor que aquellas de la zona afectada por el calor, y además, mayor que las correspondientes a la zona metal base, lo cual podrá ser apreciado en las figuras posteriores. La figura 48, que representa la variación del porcentaje de fractura dúctil con la temperatura de ensayo, muestra un comportamiento similar al de la figura 47.

La figura 49 muestra el comportamiento de la soldadura ensayada en la zona afectada por el calor del acero SAE-1030 soldado por electroescoria, para las dos condiciones: Sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C , a diferentes temperaturas de ensayo. Se observa un decrecimiento de la energía absorbida en las dos curvas, al disminuir la temperatura de ensayo. La curva de la muestra con tratamiento térmico de alivio de tensiones presenta mejores propiedades al impacto que la correspondiente a la muestra sin tratamiento térmico posterior. La figura 50 muestra el porcentaje de fractura dúctil correspondiente a las probetas ensayadas en la zona afectada por el calor.

La figura 51 representa el comportamiento de la soldadura ensayada en la zona correspondiente al metal base

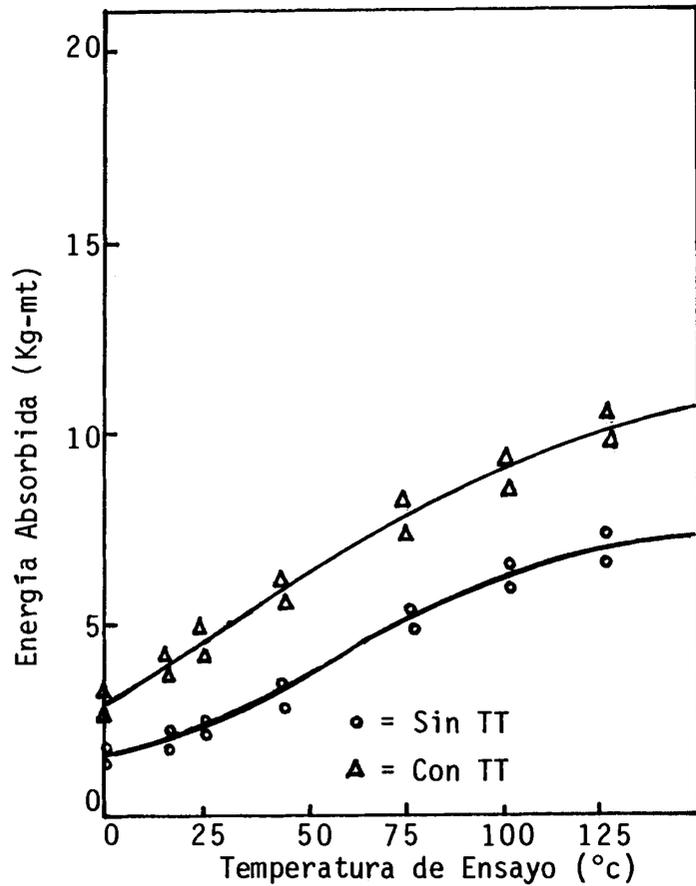


Fig. 49.- Energía absorbida Vs Temperatura de ensayo de la ZAC del acero SAE-1030 soldado por ESW.

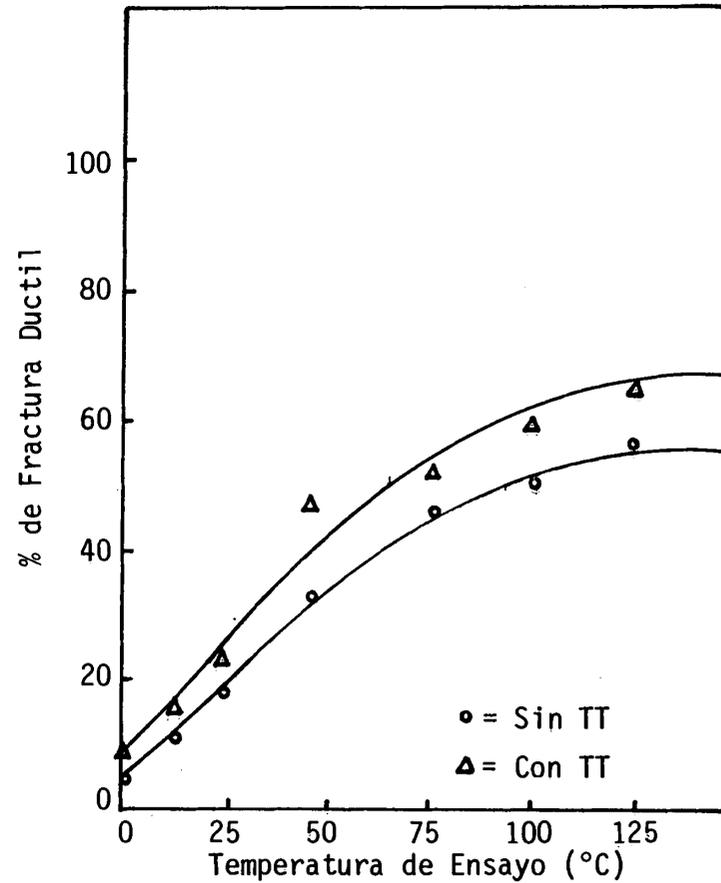


Fig. 50.- Porcentaje de fractura dúctil Vs temperatura de ensayo de la ZAC del acero SAE-1030 soldado por ESW.

DEL METAL BASE DEL ACERO SAE-1030 SOLDADO POR ELECTROESCORIA

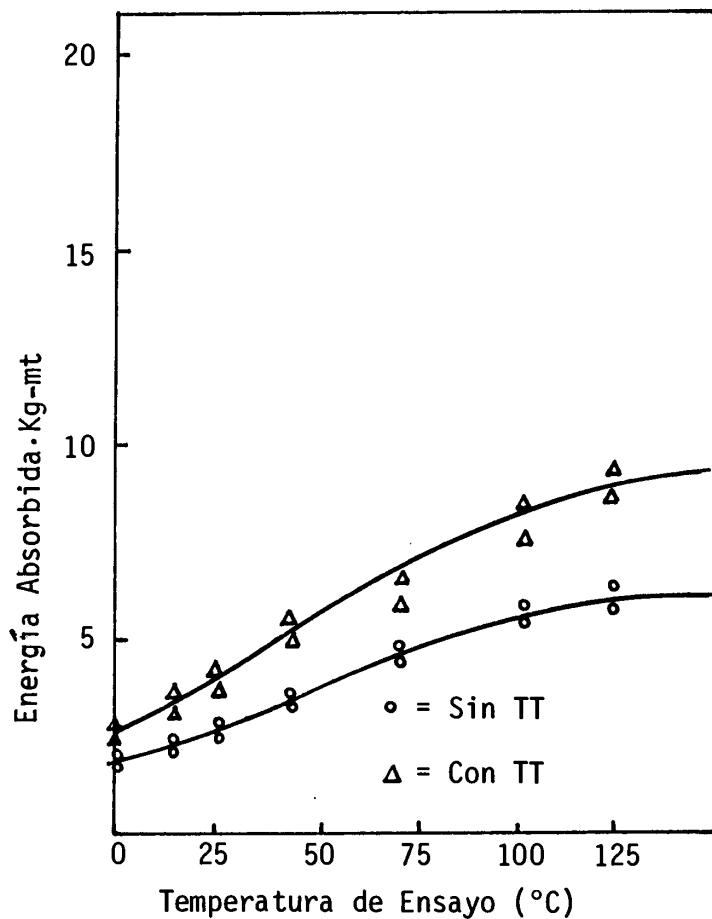


Fig. 51.- Energía Absorbida Vs Temperatura de ensayo (°C) de la zona MB del acero SAE-1030 soldado por ESW.

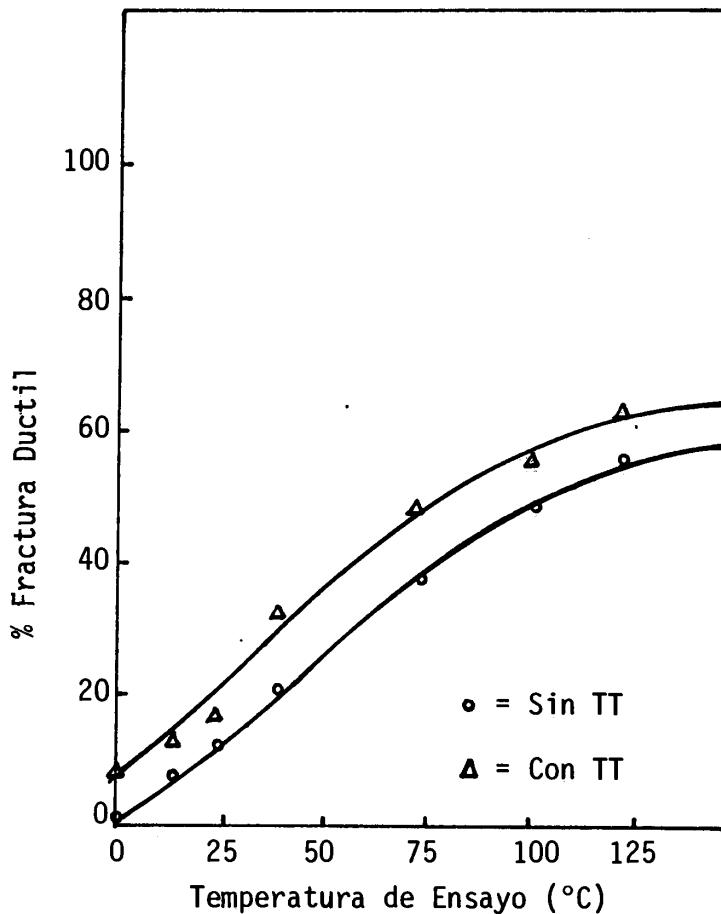


Fig. 52.- Porcentaje de fractura dúctil Vs temperatura de ensayo de la zona MB del acero SAE-1030 soldado por ESW.

del acero SAE-1030 soldado por electroescoria para las dos condiciones. Se observa nuevamente que a mayor temperatura de ensayo hay un incremento de la energía absorbida y que la muestra con tratamiento térmico posee mejores propiedades al impacto que aquella en la condición sin tratamiento térmico. La figura 52 muestra el porcentaje de fractura dúctil correspondiente a las probetas ensayadas en dicha zona. El comportamiento es correspondiente al de la figura 51.

La temperatura de transición en los metales es aquella a la cual el comportamiento de la fractura del metal frente a un ensayo de impacto, varía de dúctil a frágil o viceversa. Esta temperatura es de conocimiento muy útil para el diseño y uso de componentes metálicos que estén sujetos a variaciones pronunciadas de temperatura. Conociendo la temperatura de transición dúctil-frágil se puede utilizar adecuadamente un componente metálico evitando así su falla. La temperatura de transición se calcula mediante algunos criterios. En el presente trabajo se utilizan los criterios de la temperatura correspondiente a una energía de 40 Lb-pie y la temperatura que produce una fractura 50% dúctil. Por ejemplo, en la figura 47, para las muestras correspondientes a la zona de fusión en la condición

sin alivio de tensiones, en el eje de la energía absorbida se marca el valor 40 Lb-pie (5.6 Kg-mt), la intersección con la curva respectiva llevada al eje de temperaturas de ensayo da la temperatura de transición de 46°C. En la figura 48 se aplica el criterio de que la temperatura de transición es aquella en la cual la probeta presenta una fractura dúctil en un 50%. En este caso se obtiene 69°C. Los resultados de estos cálculos son presentados en la Tabla XI. La comparación de estos valores permite afirmar que la temperatura de transición (TT_{40 Lb-pie}), para la zona del metal base (98°C) en la condición sin tratamiento térmico es mayor que la correspondiente a la zona afectada por el calor (81°C) y a la zona de fusión (46°C), lo cual implica menor resistencia al choque, puesto que cuanto mayor es la temperatura de transición menor es la tenacidad. Esto es producido por las diferencias microestructurales, ya explicadas, entre las diferentes zonas. Además, se puede observar en dicha tabla que las muestras sin tratamiento de alivio de tensiones presentan una mayor temperatura de transición que aquellas correspondientes a la condición con tratamiento térmico de alivio de tensiones; por ejemplo la zona de fusión en aquella condición arroja un valor de 46°C contra 25°C en la condición con tratamiento térmico,

TABLA XI

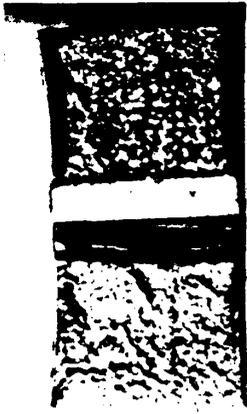
CALCULO DE LA TEMPERATURA DE TRANSICION DE LAS
SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA DEL ACERO SAE-1030

CONDICION	LOCALIZACION	TT _{40Lb-pie} °C	TT _{50% fract.} °C
Sin tratamien- to de alivio de tensiones	ZF	46	69
	ZAC	81	88
	MB	98	110
Con tratamien- to de alivio de tensiones a 690°C.	ZF	25	30
	ZAC	40	69
	MB	50	72

mostrando por lo tanto, esta última una mayor tenacidad resultado de una mejor homogeneización de la microestructura.

Las figuras 53 y 54 son macrofotografías de las probetas de impacto ensayadas a la temperatura ambiente y a 125°C respectivamente, del acero SAE-1030 soldado por electroescoria para las dos condiciones. La figura 53 representa el aspecto macrográfico de las muestras correspondientes a las tres zonas de la soldadura del acero SAE-1030 por el método de electroescoria ensayada a la temperatura ambiente. Las macrofotografías (a) corresponden a las muestras ensayadas en la condición sin tratamiento posterior de dichas zonas de las soldaduras. Se observa que la apariencia dúctil disminuye desde la zona de fusión a la zona afectada por el calor y al metal base, lo cual está en correspondencia con los valores obtenidos de porcentaje de fractura dúctil de la Tabla X y graficados en las Figuras 48, 50 y 52.

La observación macrográfica de la fractura de la probeta correspondiente a la zona del metal base para esta condición, presenta una apariencia brillante propia de la rotura frágil, granular, sin deformación plásti-



ZF (5.4 kg-mt)



ZAC (2.8 Kg-mt)

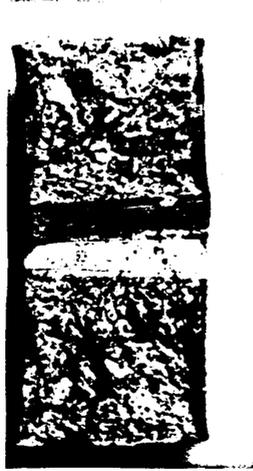


MB (2.0 Kg-mt)

(a)



ZF (6.8 kg-mt)



ZAC (5.0 Kg-mt)



MB (3.8 Kg-mt)

(b)

FIGURA 53.- MACROFOTOGRAFIAS DE LAS PROBETAS DE IMPACTO ENSAYADAS A LA TEMPERATURA AMBIENTE DEL ACERO SAE-1030 SOLDADAS POR PROCESO DE ESW.

(a) Sin tratamiento de alivio de tensiones

(b) Con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.



ZF (10.2 Kg-mt)



ZAC (7.4 Kg-mt)



MB (6.0 Kg-mt)

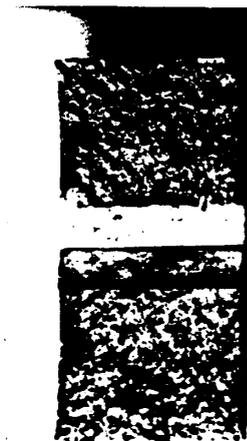
(a)



ZF (16.2 Kg-mt)



ZAC (10.3 Kg-mt)



MB (8.3 Kg-mt)

(b)

FIGURA 54 .- MACROFOTOGRAFIAS DE LAS PROBETAS DE IMPACTO ENSAYADAS A LA TEMPERATURA DE 125°C DEL ACERO SAE-1030 SOLDADAS POR PROCESO DE ESW.

(a) Sin tratamiento de alivio de tensiones

(b) Con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C.

ca y con ausencia de labios de corte. La probeta correspondiente a la zona afectada por el calor en esta misma condición y cuya energía absorbida arrojó un valor de 2.8 Kg-mt, presenta también un carácter de fractura frágil y sin deformación plástica, presentando un ligero labio de corte. Finalmente, se aprecia la macrofotografía de la probeta de impacto correspondiente a la zona de fusión cuyo valor de energía absorbida fue de 5.4 Kg-mt. Se observa que la zona central tiene un aspecto de fractura dúctil con relación a las anteriores, un color gris, grano fino y con deformación plástica. Es apreciable además, una zona oscura correspondiente a los labios de corte. Las macrografías (b) de la figura 53 representan el carácter de la fractura de las probetas de impacto en la condición con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C ensayadas a la temperatura ambiente. En general la apariencia macrográfica de una zona a otra varía de la misma forma que en el caso de la muestra en la condición sin tratamiento térmico. Es así como la macrografía de la zona de fusión presenta una apariencia más dúctil con relación a la macrografía correspondiente a la zona metal base. En aquella puede observarse claramente que la rotura es con deformación plástica, apareciendo además la zona correspondiente a los la -

bios de corte.

La comparación de las macrografías (a) y (b) de la figura 53 permite afirmar que la fractura dúctil es más notoria en las muestras que fueron sometidas al tratamiento de alivio de tensiones. En la figura 54 se muestran las macrografías de las probetas ensayadas correspondientes a las tres zonas de la soldadura del acero SAE-1030. La prueba se realizó a la temperatura de 125° para las dos condiciones: sin tratamiento térmico de alivio de tensiones y con tratamiento de alivio de tensiones a 690°C. Se observa el carácter de fractura más dúctil de la muestra correspondiente a la zona de fusión en la condición con tratamiento térmico (16.2 Kg-mt) con relación a aquella sin tratamiento térmico (10.2 Kg-mt). En general, la comparación de las figuras 53 y 54 permite afirmar que la apariencia de la fractura dúctil se incrementa con la temperatura de ensayo, lo cual reafirma lo mostrado en la Tabla X, en la cual hay una correspondencia entre el porcentaje de fractura dúctil con la temperatura de ensayo.

CONCLUSIONES

- 1.- Parámetros de soldadura de 39 voltios y 360 amperios utilizados para la unión de placas del acero SAE-1030 de 32 mm. de espesor, soldado por el método de electroescoria mediante zapatas refrigeradas por agua, permiten obtener soldaduras libres de defectos.
- 2.- La alta temperatura involucrada durante el proceso produce en el acero SAE-1030 una microestructura compuesta de granos de ferrita acicular y de perlita fina en la zona de fusión. En la zona afectada por el calor se observan adicionalmente, granos grandes equiaxiales de ferrita y perlita como consecuencia de una posible recristalización.
- 3.- El tratamiento térmico de alivio de tensiones a 690°C, aplicado a las soldaduras por electroescoria del acero SAE-1030, en general homogeniza la microestructura aunque produce un pequeño aumento del tamaño de grano. Esta variación en la microestructura se manifiesta en cambios en las

propiedades mecánicas y propiedades al impacto de las soldaduras.

- 4.- Las propiedades mecánicas de las muestras soldadas *por electroescoria del acero SAE-1030, varían ligeramente* como consecuencia del tratamiento térmico. La dureza, resistencia a la tracción y fluencia son reducidas, aumentando en cambio la ductilidad.

- 5.- Los ensayos de impacto Charpy en muestras provenientes de las distintas regiones de las soldaduras muestran que la zona de menor tenacidad corresponde al metal base. Esto se debe a la condición original del acero SAE-1030 utilizado en este trabajo. El tratamiento térmico de alivio de tensiones mejora apreciablemente las propiedades al impacto de las distintas zonas de las soldaduras. La temperatura de transición es mejorada (reducida) correspondientemente.

APENDICE I

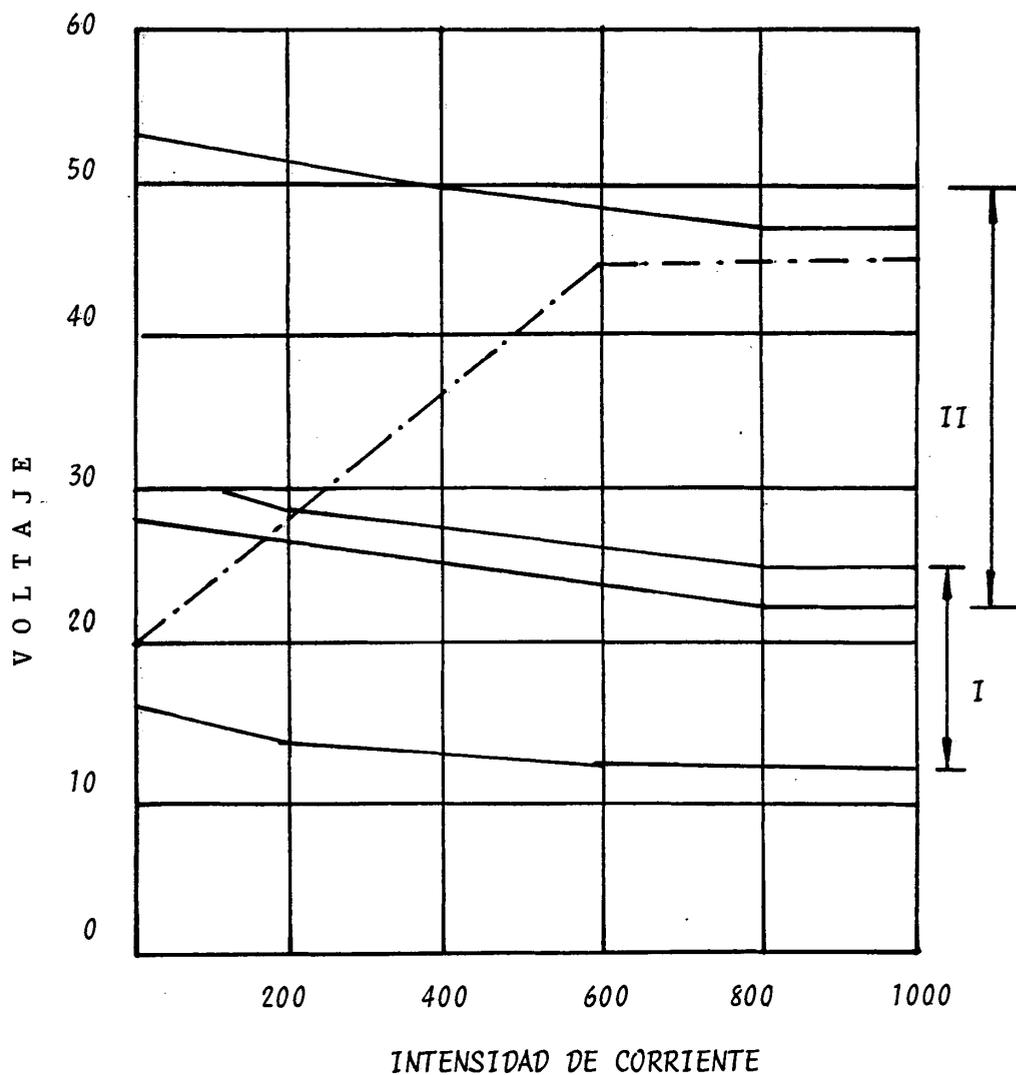


FIGURA A-1.- CARACTERISTICAS ESTATICAS DE LA FUENTE DE PODER UTILIZADA EN LAS SOLDADURAS POR ELECTROESCORIA DEL EXPERIMENTO. (REF.7)

APENDICE II

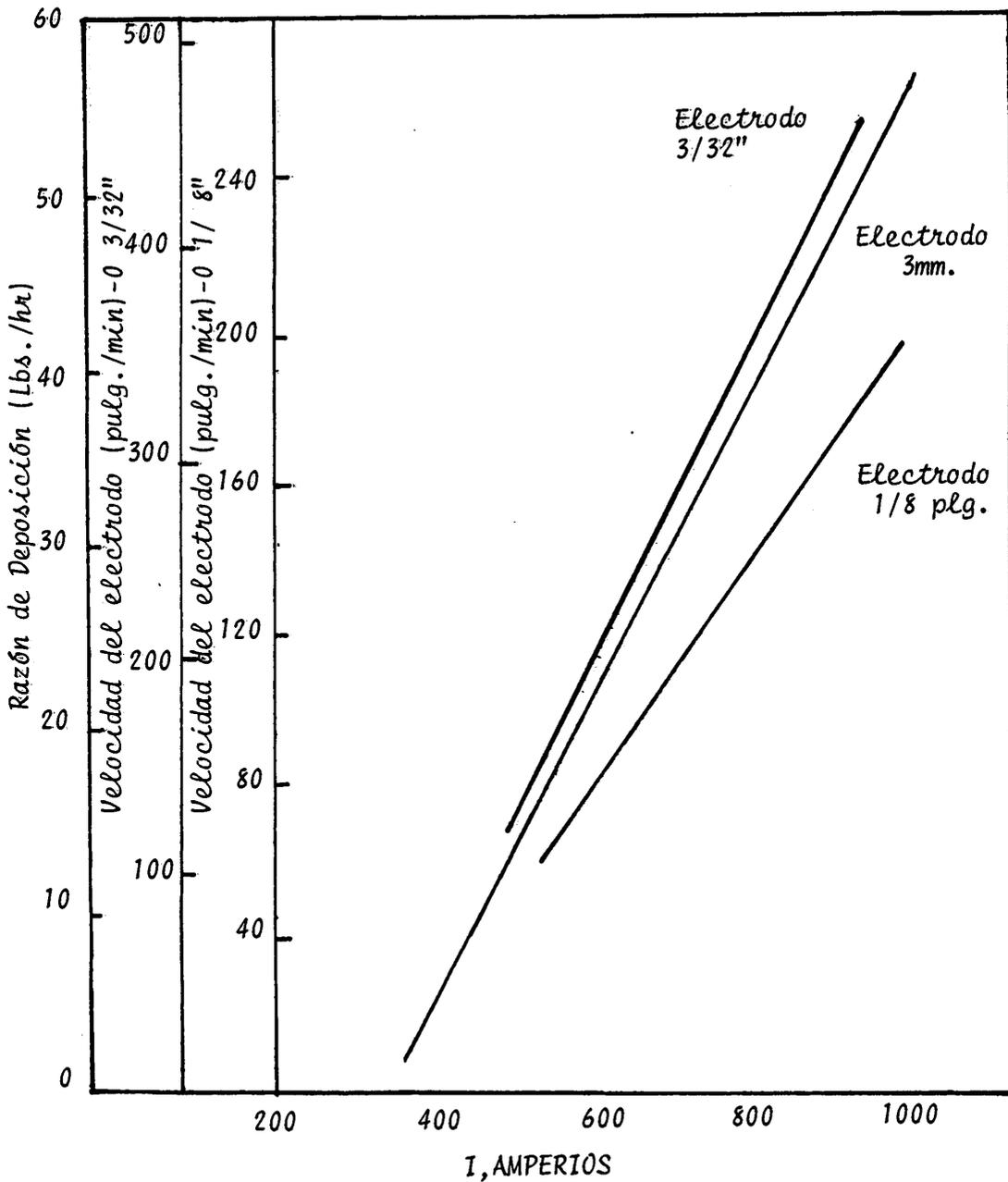


FIGURA A-II.- CARTA DE CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL ELECTRODO EN FUNCION DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE. (REF.7).

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Myron L. Begeman, Procesos de Fabricación, México, 1969
- 2.- IRAM-Tecnología y Gestión 40.1: 1-56 (1976)
- 3.- Paton, B.E Electroslag Welding American. Welding society New York, 1962.
- 4.- Electroslag Weldments: Miroestructure and Properties Colorado School of Mines, Golden, Colorado, Nov. 1979.
- 5.- Manual de Soldadura ESAB. Materiales de Aportación y Equipos de Soldadura para Soldeo Automático y Manual. ESAB 1980.
- 6.- Welding Journal - Welding Research Supplement. Vol. 60 # 12, Dic. 1981.
- 7.- Layana, C.E., Estudio y Control de Soldaduras por Electroescoria del Acero SAE-1030 en grandes espesores. ESPOL, Tesis de Ingeniero Mecánico, 1981.
- 8.- The Porta-Slag Welding Process, Hobart Brothers Technical Center, Ohio 1970.
- 9.- Welding Journal-Welding Research Supplement, Vol. 59 # 9, Septiembre de 1980.
- 10.- Serrano Omar, A Comparation of as-welded and Stress-relieved 2 1/4 Cr-1% Mo Steel. Tesis de Master, 1979.
- 11.- Instruction Book, A2G,G para soldaduras por electroes-

coria ESAB 1980.

12.- Especificaciones para Ensayos Mecánicos de materiales ferrosos. Parte A. ASTM A 370-76.



BIBLIOTECA