

641.52
DIAD.

**ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**Influencia del Area de la Sección Transversal del
cordón soldado sobre las propiedades Mecanicas de
la zona afectada por el calor cuando se utilizan los
procesos de soldadura por fusión en Aceros Aisi 1045**



DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA MECANICA

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

presentada por

Edgardo Díaz Coello

GUAYAQUIL - ECUADOR

1982

AGRADECIMIENTO



BIBLIOTECA OPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

Al Ing. ALBERTO TORRES VALENCIA,
Director de Tesis, por su apoyo
para la elaboración de este tra-
bajo.

DEDICATORIA

A mis Padres, sin cuyo sacrificio
no hubiera sido posible esta rea-
lización.

Alberto Torres Valencia

.....
Ing. Alberto Torres Valencia

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 POLITECNICA DEL LITORAL".

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

Edgardo Díaz Coello
EDGARDO DIAZ COELLO

R E S U M E N

El uso de los aceros AISI 1045 se ha incrementado notablemente en el Ecuador en los últimos años. Dada la composición química de este acero, ciertas precauciones deben tomarse para que las soldaduras hechas en él sean de buena calidad.

En el presente estudio se determinan las variables que influyen en la soldabilidad de este acero. Se parte de dos teorías existentes, determinándose a partir de experimentos rigurosamente controlados, cuál es el más exacto. Estableciéndose que fuera de las propiedades del material a soldarse, existe un factor: la energía neta utilizada en la soldadura, medida por el área transversal del cordón soldado, que determina las velocidades de enfriamiento del metal soldado y por tanto las microestructuras formadas en él.

Es de esperar que los resultados encontrados en este trabajo sean de utilidad para técnicos e ingenieros que utilicen este acero, pues de las conclusiones a las que se llega por estos resultados depende una buena técnica de soldadura y confiables uniones soldadas.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	III
INDICE DE FIGURAS.....	IV
INDICE DE TABLAS.....	VI
NOMENCLATURA.....	VII
I. INTRODUCCION.....	1
II. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	3
2.1 Composición, Estructura y Propiedades de los Aceros	
1045.....	3
2.2 Efecto Metalúrgico del endurecimiento de los Aceros...	5
2.2.1 Endurecimiento por Solute.....	5
2.2.2 Endurecimiento por Precipitación.....	11
2.2.3 Endurecimiento por Deformación Plástica en Frío.	16
2.2.4 Transformación Martensítica.....	19
2.2.5 Tamaño del Grano.....	24
2.3 Influencia de los Elementos Aleantes en las Propieda-	
des de los Aceros.....	30
2.4 Procesos de Soldadura empleados.....	38
2.4.1 MAG.....	39
2.4.2 Electrodo Revestido.....	43
2.4.3 Arco Sumergido.....	52
2.5 Soldabilidad.....	56

2.6 Efecto de las variables de soldadura al arco sobre las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor..	67
2.6.1 Efecto de la técnica de soldadura en los resultados a obtenerse en el cordón de soldadura.....	68
2.6.2 <i>Comparación de la teoría del contenido calorífico suministrado con la teoría del área del cordón soldado, para el control de las propiedades mecánicas de la soldadura.....</i>	76
III. TRABAJO EXPERIMENTAL.....	97
3.1 Objetivo.....	97
3.2 Plan de Investigación.....	97
3.3 Material y equipo a utilizarse.....	100
3.4 Ensayos de Deposición a realizarse.....	104
3.4.1 Variación de los Parámetros de Soldadura en Técnica de un solo Pase.....	104
3.4.2 En Técnica de Pases Múltiples.....	110
3.5 Propiedades mecánicas de la unión soldada.....	114
3.5.1 Dureza.....	114
3.5.2 Impacto.....	116
3.5.3 Doblado.....	118
3.6 Análisis Metalográfico de la Unión Soldada.....	121
IV. ANALISIS DE RESULTADOS.....	129
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	163
VI. BIBLIOGRAFIA.....	165

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
I	Características Técnicas del Fundente y del electrodo usado en el proceso de arco sumergido.....	103
II	Energía entrante y parámetros de soldadura empleados para la deposición de cordones.....	111
III	Energía entrante y parámetros de soldadura empleados para formar uniones mecánicas.....	115
IV	Características de los cordones depositados.....	130
VI	Resultado de la medición de dureza de los cordones depositados.....	146
VII	Resultado de la medición de dureza de las uniones mecánicas formadas.....	151
VIII	Resultado del Ensayo de Impacto.....	154
IX	Resultado del Ensayo de Doblado.....	162



BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

NOMENCLATURA

- c_p = Calor específico, $\frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$
 DI = Difusividad Térmica, $\frac{\text{BTU}}{\text{pulg}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{F}}$
 E = Base de los logaritmos naturales
 I = Intensidad de Corriente, Amperios
 K = Conductividad Térmica, $\frac{\text{BTU}}{\text{pulg} \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{F}}$
 Kg-mts = Kilográmetros
 MAG = Proceso de Soldadura con protección de gas activo
 MIG = Proceso de Soldadura con protección de gas inerte
 m = metros
 min = minutos
 mm = milímetros
 NA = Area transversal del cordón soldado, pulg.
 $pulg$ = pulgadas
 Q = Flujo de calor de la placa a partir de la fuente, BTU/seg,
 KJoule/pg.
 R_t = Tasa de enfriamiento $^\circ\text{F}/\text{seg}$
 S = Velocidad de la fuente de calor, pulg/min.
 seg = segundos
 T = Espesor de la placa, pulg.
 TIG = Proceso de Soldadura con electrodo no consumible de tungsteno
 TMP = Temperatura de fusión del acero, $^\circ\text{F}$

T_0 = Temperatura inicial de la placa, °F

T_r = Temperatura a la cual R_T es medida, °F

V = Voltaje, volts.

W = Razón entre la tasa de enfriamiento real y tasa de enfriamiento de un cuerpo semi-finito.

Y = Densidad, lb/pulg³

Z = Factor de eficiencia para la transferencia

ZAC = Zona afectada por el calor

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1	Microestructura del acero Assab 760.....	6
2	Incremento de la resistencia del porcentaje de soluto en solución sólida.....	10
3	Etapas en la formación de un precipitado en equilibrio.....	13
4	Efecto de la temperatura sobre las curvas de envejecimiento durante el endurecimiento por precipitación.....	13
5	Efecto del envejecimiento en la microestructura de una aleación.....	15
6	Efecto del tiempo de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas.....	15
7	Diagrama de equilibrio hierro-carbono.....	22
8	Influencia del Carbono sobre el intervalo de martensita.....	25
9	Representación del porcentaje de martensita en función de la temperatura.....	25
10	Efecto del Contenido de Carbono en la resistencia al impacto	32
11	Influencia de varios elementos en la dureza del Acero.....	34
12	Procesos de Soldadura.....	40
13	Arco Eléctrico protegido con Dióxido de Carbono.....	42
14	Equipo de Soldadura por gas inerte metálico.....	42
15	Diagrama de la protección que la escoria produce durante la	

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
	deposición.....	46
16	Diagrama de la deposición del metal en el proceso de arco sumergido.....	54
17	Cordón depositado en una placa.....	70
18	Relación del área del metal depositado y la razón corriente/ velocidad de la fuente.....	71
19	Relación máxima entre la velocidad de viaje del electrodo e intensidad de corriente.....	72
20	Rango aceptable de voltajes para varios valores de corriente de soldadura.....	73
21	Efecto de la corriente de soldadura en la tasa de fusión del electrodo.....	74
22	Nomograma que permite determinar la penetración para una técnica de soldadura dada.....	75
23	Razón entre la tasa de enfriamiento de una placa finita y la tasa de enfriamiento de una placa infinita.....	80
24	Curvas experimentales obtenidas con osciloscopio.....	83
25	Tasa de enfriamiento en función del área del cordón soldado.	86
26	Carta que permite determinar área del cordón en función de los parámetros de soldadura.....	88
27	Correlación entre el área del cordón determinada por una ecuación teórica y el área del cordón determinada por una ecuación empírica.....	89
28	Efecto de la energía entrante en la dureza máxima de la ZAC.....	90

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
29	Efecto del área del cordón en la dureza máxima de la ZAC.... 91
30	Efecto del precalentamiento y área del cordón en las tasas de enfriamiento..... 94
31	Influencia del área del cordón en la velocidad de enfria- miento..... 95
32	Influencia de la Tasa de enfriamiento en el límite elástico. 96
33	Procedimiento seguido para halla la máxima dureza en la ZAC. 99
34	Equipo de Soldadura Arco Sumergido.....106
35	Máquina de Doblado.....107
36	Máquina de Impacto.....108
37	Dimensiones de las probetas sobre las que se depositaron cordones.....109
38	Soldadura de las Uniones Mecánicas.....113
39	Dimensión y localización de los especímenes de impacto.....117
40	Instrumentos usados en el ensayo de doblado.....119
41	Dimensiones de probetas para las pruebas de doblado.....120
42	Fotografía del metal de aporte, línea de fusión y ZAC de 1 cordón depositado.....123
43	Fotografía de la ZAC de 1 cordón depositado, por medio del proceso de arco sumergido.....123
44	Fotografía de la Martensita y Bainita en la ZAC de probeta Nº 2. Cordón depositado por medio del proceso de electrodo revestido.....124
45	Zona intermedia entre la ZAC y el metal base, probeta Nº 2, cordón depositado, por medio del proceso de electrodo reves-

tido.....	124
46 Fotografía de metal de aporte y ZAC, probeta Nº 7 varios pases, electrodo revestido.....	125
47 Fotografía de la ZAC, probeta Nº 7, varios pases, electrodo revestido.....	125
48 Fotografía del metal base de la probeta Nº 2, un solo pase, electrodo revestido.....	127
49 Fotografía de metal de aporte y ZAC de probeta Nº 6, un solo pase, electrodo revestido.....	127
50 Fotografía de ZAC y metal base, probeta Nº 7, varios pases, electrodo revestido.....	128
51 Relación área cordón soldado-velocidad fuente.....	134
52 Relación área cordón soldado-corriente de soldadura.....	134
53 Relación ancho de la ZAC-velocidad fuente.....	136
54 Relación ancho de la ZAC-corriente de soldadura.....	136
55 Razón M/N en función velocidad fuente.....	137
56 Razón M/N en función de corriente de soldadura.....	137
57 Relación entre la dilución del metal base y velocidad fuente	140
58 Relación entre la dilución del metal base y corriente de soldadura.....	140
59 Relación entre la penetración y la velocidad fuente.....	142
60 Relación entre la penetración y la corriente de soldadura....	142
61 Relación entre altura del cordón-velocidad fuente.....	143
62 Relación entre altura del cordón-corriente de soldadura.....	143
63 Relación entre ancho de cordón-velocidad fuente.....	144

64	Relación entre nacho del cordón-corriente de soldadura.....	144
65	Máxima dureza de la ZAC en función de la energía entrante....	147
66	Máxima dureza en la ZAC en función del área del cordón soldado.....	148
67	Dureza KNOOP en la ZAC de un solo cordón depositado.....	149
68	Dureza KNOOP de la ZAC de múltiples cordones.....	149
69	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, probeta 1.....	152
70	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, Probeta 3.....	152
71	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, Probeta 4.....	155
72	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, Probeta 5.....	155
73	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, Probeta 6.....	156
74	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, Probeta 7.....	156
75	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, Probeta 8.....	157
76	Energía Absorbida, Ensayo de Impacto, Probeta 2.....	157
77	Relación entre área cordón soldado y energía absorbida T = 30°C.....	158
78	Relación entre área de cordón soldado y energía absorbida T = 20°C.....	158
79	Relación entre área de cordón soldado y energía absorbida T = 10°C.....	159
80	Relación entre área cordón soldado y energía absorbida T = -5°C.....	159
81	Relación entre área cordón soldado y energía absorbida -10°C.	160
82	Relación entre área cordón soldado y energía absorbida -20°C.	160

CAPITULO I

INTRODUCCION

La velocidad de enfriamiento de la zona del material base adyacente al cordón soldado es decisiva en las características mecánicas de esa zona. Enfriamientos rápidos producirán estructuras frágiles en la zona cuya temperatura alcanzó el rango de temperaturas críticas y enfriamientos lentos producirán estructuras blandas y dúctiles.

Existe un factor que influye decisivamente en la velocidad de enfriamiento, ese factor es la cantidad de energía que interviene en la soldadura. Respecto a este factor existen dos teorías: la primera establece que es la energía liberada por la fuente al formar el arco (energía total) la que influye en la velocidad de enfriamiento; la segunda establece que es la energía neta utilizada en fundir el material la que influye en la velocidad de enfriamiento, y que dicha energía se puede medir por el área de la sección transversal del cordón soldado.

El presente trabajo tiene por objeto establecer cual de las dos teorías es verdadera, y establecer el efecto de los parámetros de soldadura, (corriente, velocidad de la fuente) en las características de los cordones soldados.

Con tal fin, la parte experimental se dividió en dos partes: deposición de cordones sobre placas y ensambles mecánicos por soldadura.

La deposición de cordones tuvo a su vez dos partes: mantener la energía producida por el arco constante para observar el efecto de la variación de los parámetros en las propiedades de la zona afectada por el calor y en las características del cordón. La segunda parte tiene por objeto variar la energía liberada por el arco en cada deposición y realizar las mismas pruebas que en la sección anterior. Comparando los resultados se establecería cual de las dos teorías es más exacta.

La utilización de construcción de ensambles mecánicos tuvo por objeto estudiar zonas afectadas por el calor sujetas a repetidos ciclos de calentamiento producidos por la deposición de la técnica de multipases. Con este objeto se realizaron ensayos de doblado, impacto, dureza.

El material utilizado fue acero ASSAB 760, con especificaciones próximas a la AISI 1045, o sea un acero de medio contenido de carbono. El espesor de las placas utilizadas es 7/8" (22mm); se escogió este espesor para todas las probetas para obtener información del enfriamiento posterior al efectuar la soldadura o volumen constante.

C A P I T U L O I I

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 COMPOSICION, ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS ACEROS 1045

Los aceros 1045 son aceros que se catalogan como aceros ordinarios de medio contenido de carbono, su especificación nos indica parte de la composición química del acero y de la forma como ha sido producido.

Las 2 primeras cifras y la letra C (cuando se lo designa según la especificación de la AISI) precisan que el acero ha sido producido en un horno Martín-Siemens básico, el cual se basa para su funcionamiento en el principio de la recuperación del calor del combustible. El aire de combustión se precalienta antes de mezclarse con el gas en unas cámaras recuperadoras que contienen una serie de conductos hechos con ladrillo refractario. El tipo de refractario más común es MgO, y se producen por lo general 150 Ton. de acero en 5 ó 6 horas. (13).

Los aceros 1045 se utilizan principalmente en la construcción de bielas, barras de conexión, mecanismos de dirección y ejes. Como se puede apreciar este tipo de aceros se usa principalmente en la construcción de mecanismos y maquinarias. Además de su

buena resistencia mecánica, caracteriza a este tipo de acero su buena resistencia al desgaste.

El tipo de acero comercial que se utilizó en las pruebas realizadas durante este estudio es el acero ASSAB 760, acero fácil de maquinar que se utiliza en nuestro medio como guías, espaciadores, bastidores, portapunzones, portadados, placas de guías, placas de respaldo, componentes estructurales simples. Este acero además de su buena maquinabilidad tiene buena resistencia a la abrasión y buena resistencia mecánica.

La composición química típica de este acero es:

C	0.50 %
Si	0.3 %
Mn	0.6 %
S	0.04 %

Las propiedades mecánicas de este acero son:

Dureza	200 HB = Rc/RB)
Resistencia a la tracción	640 N/mm ²
Punto de cedencia	340 N/mm ²
Reducción de Area	40%
Elongación	20%

La estructura de este acero en estado de recocido completo está

compuesta principalmente por granos gruesos de perlita y ferrita, figura N^o 1.

2.2 EL EFECTO METALURGICO DEL ENDURECIMIENTO EN LOS ACEROS

2.2.1 Endurecimiento por Solutos

Si en la estructura cristalina de un metal se introducen átomos de otro elemento, la aleación que se forma será invariablemente, más resistente que el metal puro. Cualquier solución está constituida por dos partes: un soluto y un solvente. El soluto es la menor parte de la solución, o sea el material disuelto, en tanto que el solvente constituye la mayor porción de la solución. Una solución sólida es una simplemente en estado sólido y consta de dos clases de átomos combinados en un tipo de red espacial. Hay 2 tipos de soluciones sólidas: sustitucionales e intersticiales.

En la solución sólida sustitucional, los átomos del soluto sustituyen a los del solvente en la estructura reticular del solvente.

Las soluciones sólidas intersticiales se forman cuando átomos de pequeños radios atómicos se acomodan en los espacios o intersticios de la estructura reticular de los átomos solventes más grandes. Como los espacios de la estructura reticular están restringidos en tamaño, sólo los átomos con



Nital 2%

200 x

FIGURA N° 1

Microestructura del acero ASSAB 760,
Granos grandes de ferrita (blanca) y
perlita (oscura).

radios atómicos menores que un amstrong tendrán posibilidades de formar soluciones sólidas intersticiales.

Este tipo de solución difiere de los compuestos químicos intersticiales en que la cantidad de átomos más pequeños necesarios para formar el compuesto es siempre mayor que aquella que puede disolverse intersticialmente. Cuando se agrega al solvente una pequeña cantidad de soluto y la diferencia de radios atómicos es lo suficientemente grande, se formará una solución sólida intersticial.

En esta condición los átomos de soluto tienen considerable movilidad y se pueden mover en los espacios intersticiales de la estructura reticular. Al sobrepasar la cantidad de átomos de soluto el límite que produce la saturación a esa temperatura, se restringe severamente la movilidad de esos átomos en una área específica y se comienza a formar el compuesto intersticial de composición fija. La estructura reticular siempre muestra una expansión cuando se forma este tipo de solución.

Se conocen varios factores que controlan el intervalo de solubilidad en los sistemas de aleación, gracias a la investigación realizada por Hume-Rothery (6).

El factor de la estructura del cristal establece que la solubilidad completa de dos elementos jamás se logra, a me-

nos que los elementos tengan el mismo tipo de estructura reticular cristalina.

El factor de tamaño relativo es favorable para formar una solución sólida cuando la diferencia en radios atómicos es menor que el 15%. Si el factor de tamaño relativo es mayor del 8% pero menor de 15%, la solubilidad generalmente mostrará un mínimo; si el factor de tamaño relativo es mayor del 15%, la solubilidad estará usualmente restringida a menos del 1%.

El factor de afinidad química establece que cuanto mayor sea la afinidad química entre dos metales más restringida será su solubilidad sólida y mayor la tendencia a formar compuestos. Generalmente, cuanto más separados entre sí estén los elementos en la tabla periódica, mayor será su afinidad química.

La solubilidad de los metales con valencia mayor en solventes cuya valencia es menor, es más extensa que el caso opuesto, este es el factor de valencia relativa.

Se han realizado estudios sistemáticos relativos al efecto producido por la adición de aleantes, en solución sólida sobre las curvas de fluencia en tracción del hierro. En el caso del hierro el endurecimiento por solución sólida es una función potencial de la adición de aleantes. La figura

Nº 2 muestra un aumento de la resistencia a la tracción debido a la adición de aleantes en el hierro.

Usualmente, la distribución de átomos de solutos en una red solvente no es totalmente aleatoria. Cada vez existen más pruebas de que los átomos solutos se agrupan preferentemente en dislocaciones, defectos de apilamiento, límites de grano. Sin embargo, incluso en redes perfectas, la distribución atómica no es totalmente aleatoria.

Siguiendo las ideas de Cottrell (3), se admite que el endurecimiento a partir de átomos solutos se produce por la interacción de estos átomos, en forma de "atmósferas", con las dislocaciones. Puesto que los átomos de la zona superior de una dislocación de borde están comprimidos y los que se encuentran en la parte inferior al plano de deslizamiento, dilatados, la energía de deformación en la distorsión se puede reducir por recolección de los átomos grandes en la zona dilatada y de átomos pequeños en la zona comprimida. Los átomos intersticiales se reúnen en la zona dilatada, por debajo del plano de deslizamiento de una dislocación de borde. Por lo tanto, para hacer que la dislocación se desplace, se requiere una tensión mayor que la que se precisaría si no existiera ninguna interacción entre la dislocación y los átomos solutos. Si la tensión es lo suficientemente grande se puede arrancar la dislocación de la

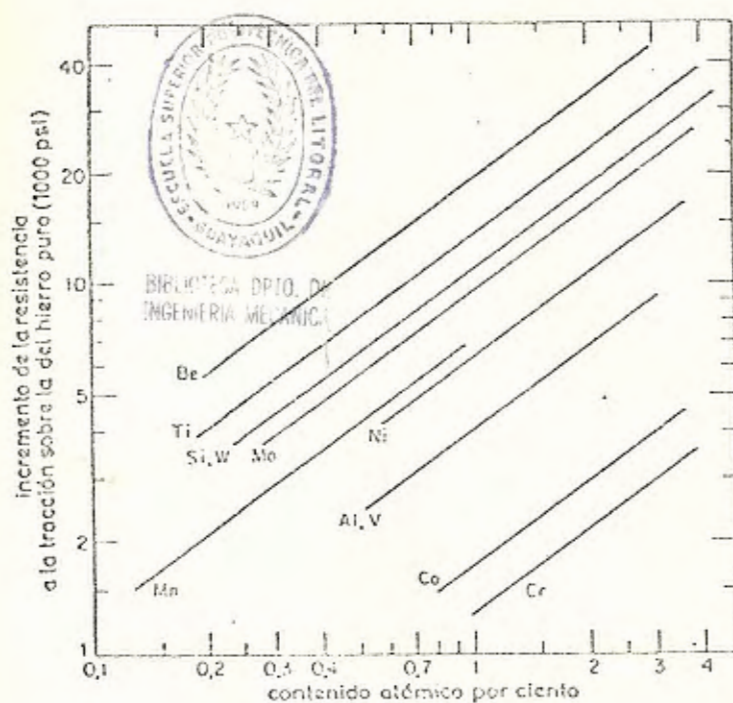


FIGURA Nº 2

Incremento de la resistencia a la tracción del hierro por adiciones en solución sólida, en función del contenido por ciento.

atmósfera que la rodea. Cuando esto sucede, la dislocación puede desplazarse con tensiones menores.

Además de la interacción elástica, ya mencionada, existen otros tipos de interacciones de menor influencia que la interacción elástica. En vista de los efectos de valencia observados hay que considerar también la interacción eléctrica, sin embargo, la interacción eléctrica es sólo de un tercio a un séptimo de la interacción elástica.

Suzuki (3) ha demostrado la existencia de un tercer tipo de interacción: la interacción química. Aún cuando en la mayoría de las aleaciones esta interacción química es más débil que la fuerza de interacción debida al anclaje de Cottrell, la fuerza debida a la interacción química no disminuye tanto con el aumento de la temperatura como en el caso del anclaje de Cottrell.

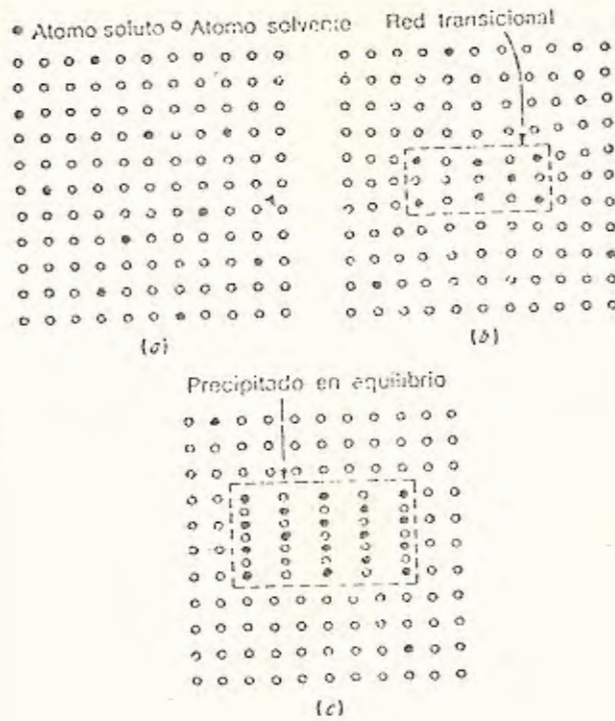
2.2.2 Endurecimiento por Precipitación

Para que se produzca endurecimiento por precipitación, el diagrama de equilibrio debe mostrar solubilidad de una fase en otra a temperatura elevada, pero debe mostrar una disminución de la solubilidad al descender la temperatura. Si este descenso de la temperatura es rápido, la aleación es una solución sobresaturada sólida y se encuentra en un estado inestable. El exceso de soluble tenderá a salir de la so -

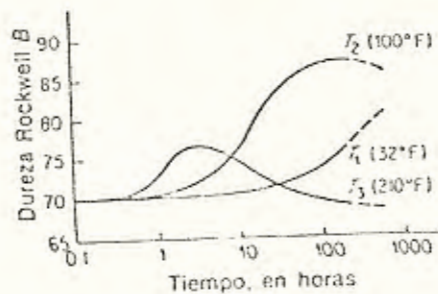
lución, y la velocidad con que ocurre la precipitación varía con la temperatura, como se observa en la figura N° 3. Aquellas aleaciones en que la precipitación tiene lugar a temperatura ambiente se conocen como aleaciones de envejecimiento natural, en tanto que las que necesitan recalentamiento a elevadas temperaturas para alcanzar su máxima resistencia, se conocen como aleaciones de envejecimiento artificial.

La primera teoría del proceso de envejecimiento establecía que la fase en exceso sale de la solución como finas partículas submicroscópicas, muchas de las cuales se ubican en los planos de deslizamiento. (Fig. N° 3). Se consideró que estas partículas tenían una acción clave, interfiriendo así con el movimiento a lo largo de los planos de fácil deslizamiento y aumentando de este modo la resistencia y la dureza.

Estudios posteriores han permitido comprender en forma más completa el proceso de endurecido por envejecimiento. El fortalecimiento de una aleación que se puede tratar térmicamente se debe no sólo a la presencia de un precipitado, sino también a la distribución uniforme de un precipitado submicroscópico finalmente dispersado y a la distorsión de la estructura reticular por aquellas partículas antes de que alcancen un tamaño visible.

FIGURA N^o 3

- Etapas en la formación de un precipitado en equilibrio
- Solución sobresaturada sólida
 - Red transicional coherente con la solución sólida
 - Precipitado en equilibrio esencialmente independiente de la solución sólida.

FIGURA N^o 4

Efecto de la temperatura sobre las curvas de envejecimiento durante el endurecimiento por precipitación.

Las curvas son para un acero al 0.06% de carbono

La teoría más útil para explicar la causa del endurecimiento por precipitación es la coherente reticular. Después del tratamiento de solución y el templado, la aleación está en condición de sobresaturación, con los átomos del soluto distribuido al azar dentro de la estructura reticular (figura 5-a)

Durante un período de inoculación, los átomos de soluto excedentes tienden a emigrar a ciertos cristalográficos, formando racimos o embriones del precipitado. Estos racimos forman una estructura intermedia cristalina o red transicional manteniendo coherencia con la estructura reticular de la matriz. La fase en exceso tendrá diferentes parámetros reticulares que los del solvente y, como resultado del apareamiento o coherencia de los átomos, habrá una considerable distorsión de la matriz, (figura 5-b). La distorsión de la matriz se extiende sobre un volumen mayor de lo que sería el caso si la fase en exceso fuera una partícula discreta. Esta distorsión interfiere con el movimiento de las dislocaciones y causa un rápido incremento en la dureza y en la resistencia durante el proceso de envejecimiento (figura 6). Eventualmente, el equilibrio de la fase en exceso se forma con su propia estructura reticular (figura 5-c), lo cual da lugar a una pérdida de coherencia con la matriz y a menor distorsión. La dureza y la resistencia disminu-

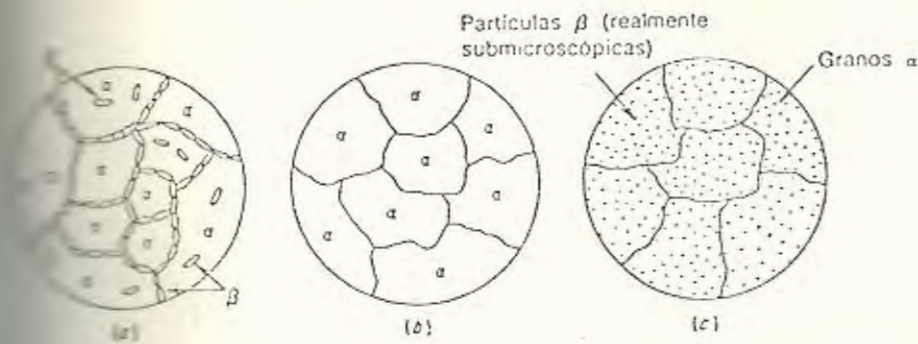


FIGURA N° 5

Microestructura de una aleación 85A-15B

- a) después de enfriar lentamente;
- b) después de recalentar y enfriar rápidamente a temperatura ambiente;
- c) después de envejecer

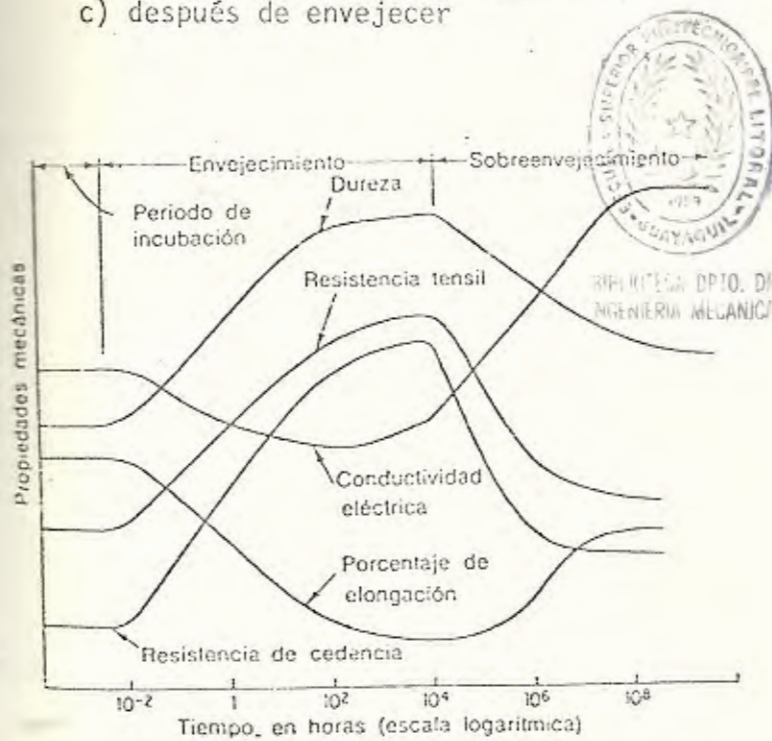


FIGURA N° 6

Efecto del tiempo de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas.

rán, y la aleación estará "sobrenvejecida". Ahora habrá una frontera entre la fase en exceso y la matriz, de modo que la partícula precipitada será visible bajo el microscopio. La figura 6 muestra el efecto del tiempo de envejecido sobre algunas propiedades.

El proceso de precipitación no tiene el mismo efecto sobre las propiedades de todas las aleaciones. En algunas aleaciones, el cambio de dureza y resistencia puede ser pequeño; en otras, los cambios pueden ser grandes. Esto se debe no a la cantidad disuelta en exceso del límite de saturación, sino al efecto del precipitado en la distorsión reticular. Esto se debe a la ausencia de una red de transición y a muy poca distorsión localizada durante la precipitación. Por otra parte, si la precipitación implica extensos cambios en la red, se presenta una gran cantidad de distorsión con amplios cambios en las propiedades. En este caso, cuanto mayor sea la cantidad de metal disuelto en exceso del límite de saturación, mayor serán tanto la distorsión producida como el efecto en la dureza y en la resistencia.

2.2.3 Endurecimiento por Deformación Plástica en Frío

Una de las características principales de la deformación plástica de los metales es que la tensión cizallante requerida para producir deslizamiento aumenta continuamente con

la deformación de cizallamiento. El aumento de la tensión requerida para producir deslizamiento debido a una deformación plástica anterior se conoce como endurecimiento por deformación.

La comprensión del proceso de endurecimiento por deformación plástica ha sido posible gracias a los experimentos de Bauschinger (4), quien descubrió que existe un descenso del límite elástico cuando a la deformación en una dirección sigue otra deformación en dirección opuesta, a este descenso se denomina efecto Bauschinger.

Este efecto se puede explicar por la hipótesis de que las dislocaciones se apilan sobre los planos de deslizamiento frente a barreras del cristal. Dichas barreras pueden ser dislocaciones que se encuentran en planos de deslizamiento que se intersecan con el plano de deslizamiento activo de manera que se forman dislocaciones adicionales, al igual que otros defectos e impurezas de la red. Estas dislocaciones reaccionan entre sí produciendo nuevas dislocaciones, que no se encuentran en la dirección de deslizamiento, y de poca movilidad. Por lo tanto, las dislocaciones se multiplican y son más lentas. Como la facilidad con que una dislocación se mueve de un lado a otro del plano de deslizamiento es indicación de la ductilidad del material, al ejercerse tensión en el material la dureza de

este aumenta.

El aumento en la cantidad de las dislocaciones es notable, un metal recocido contiene unas 10^6 a 10^8 dislocaciones por centímetro cuadrado, mientras que un metal deformado plásticamente en frío contiene 10^{12} aproximadamente.

La mayor parte de la energía consumida en deformar en frío un metal se convierte en calor. Sin embargo, aproximadamente el 10% de la energía consumida se almacena en la red, aumentando la energía interna. La mayor parte de la energía almacenada se debe a la generación e interacción de dislocaciones durante la deformación en frío. La magnitud de la energía almacenada aumenta con el punto de fusión del metal y con la adición de soluto. Para un metal dado, la cantidad de energía almacenada depende del tipo de proceso de deformación, aumenta con la deformación hasta un valor límite que corresponde a la saturación, y aumenta con el descenso de la temperatura de deformación.

Esta dependencia de la temperatura y de la velocidad de deformación se produce cuando las dislocaciones que se mueven en el plano de deslizamiento cortan a otras que intersecan el plano de deslizamiento activo. Las dislocaciones transversales al plano de deslizamiento activo forman lo que se llama frecuentemente nube de dislocaciones, este

proceso proviene de fuerzas de corto alcance que actúan sobre distancias menores que 5 a 10 distancias interatómicas..

Todas las características de los metales que dependen de su estructura cristalina son afectadas por la deformación plástica en frío. Así, la resistencia a la tracción, el límite de elasticidad práctico y la dureza aumentan, mientras que la ductilidad, expresada por el porcentaje de alargamiento disminuye. La ley de variación de estas propiedades no es la misma para todas ellas. Así por ejemplo, el crecimiento del límite de elasticidad práctico es mayor que el de la resistencia a la tracción, por lo que, conforme aumenta la deformación, disminuye la diferencia entre los valores de estas dos propiedades. Esto reviste gran importancia en algunas operaciones de conformado, en las que se requieren grandes deformaciones.

2.2.4 Transformación Martensítica

La transformación martensítica, aunque no es exclusiva en los aceros, es en éstos donde sobresale por su importancia, al producir cambios radicales en sus propiedades. Son estos cambios los que permiten la variada utilización del acero como material de ingeniería.

La austenita, que tiene una estructura f.c.c. con cuatro átomos por celda unitaria, representa un empaquetamiento



de átomos mucho más denso que la ferrita, que es b.c.c. con 2 átomos por celda unitaria. Esto se muestra por la expansión que tiene lugar cuando la austenita cambia a ferrita en enfriamiento lento. Los cálculos demuestran que el porcentaje de espacio sin llenar en la red f.c.c. es del 25% y en la red b.c.c. es del 32%. Tanto en la austenita como en la ferrita, los átomos de carbono se disuelven intersticialmente, o sea, en los espacios sin llenar de la estructura reticular. Resulta extraño por lo tanto la mayor solubilidad del carbono en la austenita que en la ferrita. Dicho comportamiento se puede explicar el tamaño del orificio que cada estructura deja en su celda unitaria. La mayor esfera intersticial que entraría en el orificio que queda en la celda unitaria de la ferrita tiene un radio de 0.36×10^{-8} cm, mientras que en el orificio correspondiente en la celda unitaria de la austenita cabe una esfera de 0.52×10^{-8} cm de radio.

Como los átomos de carbono tienen un radio de unos 0.70×10^{-8} cm la distorsión en la red ferrítica por el átomo de carbono es mucho más grande que en el caso de la austenita; por lo tanto, la solubilidad de carbono en ferrita es mucho más restringida.

Cuando un acero hipoeutectoide se enfría en forma lenta desde una temperatura inferior a los 2554°F , nada ocurre

hasta que corta la línea crítica superior A_3 (figura 7), pero a partir de este punto comienza a formarse ferrita en las fronteras de grano de la austenita. Como la ferrita puede disolver tan poco carbono, en aquellas áreas que cambian a ferrita, el carbono debe salir de la solución antes que los átomos se rearreglen por sí mismos a estructura b.c.c. El carbono que sale de solución es disuelto en la austenita restante, así que, conforme el enfriamiento avanza y la cantidad de ferrita aumenta, la austenita restante se hace más rica en carbono.

Cuando el acero alcanza la temperatura la línea crítica inferior A_1 (figura 7), está formado por 2 fases: ferrita y perlita. Esta última es un eutectoide con 0.8% de carbono formada por capas alternas de ferrita y carburo de hierro que es un compuesto intersticial duro que contiene 6.67% de carbono en peso. Como la ferrita y la perlita son estructuras estables, la microestructura permanece en forma sustancial invariables hasta llegar a temperatura ambiente.

Este proceso mencionado se altera al aumentar la velocidad del descenso de temperatura. Ya que con aumento en la velocidad de enfriamiento, no hay tiempo suficiente para que el carbono se difunda de la solución y, aunque tiene lugar algún movimiento de los átomos de hierro, la estruc-

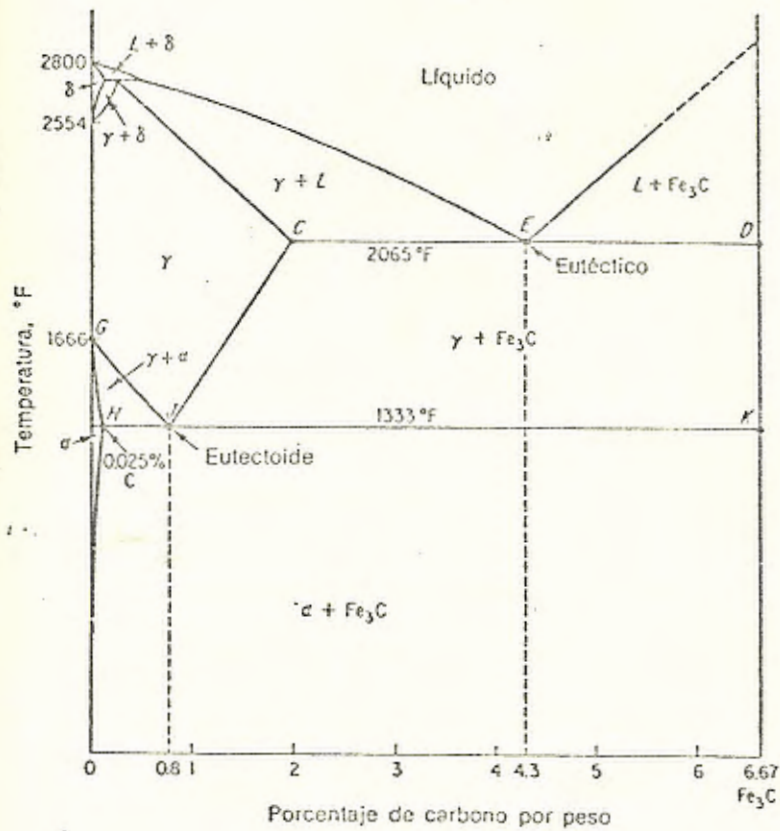


FIGURA N^o 7

Diagrama de equilibrio Hierro-Carburo de Hierro marcado en términos generales.

tura no puede llegar a ser b.c.c., ya que el carbono está atrapado en la solución. La estructura resultante, llamada martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Dos dimensiones de la celda unitaria son iguales, pero la tercera está ligeramente extendida debido al carbono atrapado. Esta estructura reticular altamente distorsionada es la causa principal de la elevada dureza de la martensita.

Hay diversas características importantes en la transformación de martensita.

La transformación es sin difusión y no hay cambio en la composición química.

La transformación se verifica sólo durante el enfriamiento y cesa si éste se interrumpe; por lo tanto, la transformación depende sólo de la disminución de la temperatura y es independiente del tiempo. La temperatura de inicio de la formación de la martensita se conoce como temperatura M_s y la del final de formación de la martensita como temperatura M_f . Si el acero se mantiene a cualquier temperatura por debajo de la M_s , la transformación a martensita se detendrá y no avanzará nuevamente, a menos que la temperatura disminuya. (figura 9).

El intervalo de temperatura de la formación de martensita es característico de una aleación dada y no puede disminuirse al aumentar la rapidez de enfriamiento. La temperatura M_s parece ser sólo una función de la composición química. (Figura 8).

2.2.5 Tamaño del Grano

Los límites entre granos en un agregado policristalino son una zona de red desordenada de sólo algunos diámetros atómicos de anchura. En general, la orientación cristalográfica varía bruscamente al pasar de un grano al siguiente a través del límite de grano. Los límites de grano ordinarios, de ángulo grande, representan una zona de falta aleatoria de encaje entre redes cristalinas adyacentes. Cuando la diferencia de orientación entre los granos a cada lado del límite desciende al estado de ordenación en el límite aumenta. En el caso extremo de límites de ángulo pequeño, en los que la diferencia de orientación a través del límite puede ser inferior a 1° , el límite está formado por una ordenación regular de dislocaciones.

Los límites de grano ordinarios de ángulo grande tienen una energía superficial bastante elevada. Debido a su energía elevada, los límites de grano sirven como lugares preferentes para reacciones en estado sólido, tales como la difusión, las transformaciones de fase y las reacciones

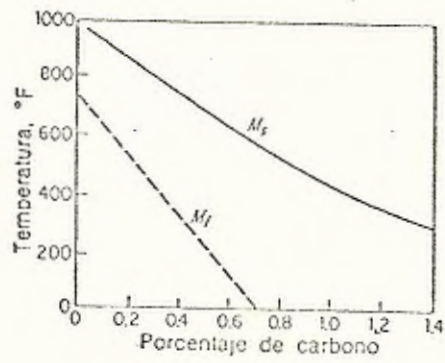


FIGURA N° 8

Influencia del Carbono sobre el Intervalo de Martensita.

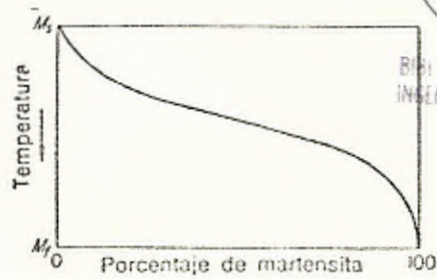


FIGURA N° 9

Representación del porcentaje de martensita en función de temperatura.



BIBLIOTECA DR. DE
INGENIERIA MECANICA

de precipitación. Un punto importante a considerar es que la gran energía de un límite de grano da como resultado, normalmente, una concentración de átomos solutos más elevada en el límite que en el interior del grano. Esto hace difícil separar claramente el efecto puramente mecánico de los límites de grano sobre las propiedades del debido a la segregación de impurezas.

A temperaturas inferiores a la mitad, aproximadamente del punto de fusión absoluto, y con velocidades de deformación relativamente rápidas, los límites de grano aumentan la velocidad del endurecimiento por deformación y la resistencia mecánica. A temperaturas elevadas y velocidades de deformación pequeñas, la deformación está localizada en los límites de grano. Puede producirse desplazamiento de los límites de grano y migración inducida por la tensión, y la fractura se produce eventualmente en los límites de grano.

La diferencia principal entre la deformación a temperatura ambiente de productos monocristalinos y policristalinos es que estos últimos muestran una mayor velocidad de endurecimiento por deformación. Asociado con el aumento del endurecimiento por deformación se encuentra normalmente un incremento del límite elástico y de la resistencia a la tracción. Los efectos de los límites de grano sobre la resistencia mecánica se deben a dos factores principales. El

primero de ellos es que los límites de grano constituyen barreras para el deslizamiento. De mayor importancia es el hecho de que el requisito para la continuidad entre granos durante la deformación introduce formas complejas de deformación en el interior de los granos individuales.

Con técnicas especiales de ataque y los grandes aumentos que proporciona la microscopía electrónica de película delgada, es posible establecer que las dislocaciones se apilan a lo largo de planos de deslizamiento en los límites de grano.

Los apilamientos de dislocaciones producen retrotensiones que se oponen a la creación de nuevas dislocaciones. Con el aumento de la tensión aplicada se apilan cada vez más las dislocaciones en los límites de grano. En la cabeza de los apilamientos de dislocaciones se desarrollan tensiones cizallantes elevadas, lo que es suficiente, eventualmente, para producir desplazamiento de dislocaciones, a través del límite, a los granos vecinos. Esto aminora el apilamiento de dislocaciones y reduce al mínimo el endurecimiento producido por esta causa. Por consiguiente, *el endurecimiento debido al apilamiento de dislocaciones es importante en las primeras etapas de la deformación, pero no si esta es grande.*

El tamaño de grano tiene un efecto apreciable sobre la

mayoría de las propiedades mecánicas. Así por ejemplo, a temperatura ambiente, al disminuir el tamaño de grano aumentan la dureza, el límite elástico y las resistencias a la tracción, a la fatiga y al choque. El efecto del tamaño de grano es mayor sobre las propiedades que están relacionadas con las primeras etapas de deformación, ya que es en estas etapas cuando las barreras de los límites de grano son más eficaces. Por tanto, el límite elástico depende más del tamaño de grano que la resistencia a la tracción. En las últimas etapas de la deformación la resistencia mecánica está controlada principalmente por interacciones complejas de dislocaciones que tienen lugar en el interior de los granos, no siendo el tamaño del grano una variable controladora.

En la mayoría de los metales el límite elástico está relacionado con el tamaño de grano por la ecuación:

$$\sigma_0 = \sigma_1 + K_y D^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

donde:

σ_0 = Límite elástico

σ_1 = Tensión de fricción que se opone al movimiento de las dislocaciones

K_y = Medida de la extensión del apilamiento de dislocaciones frente a las barreras

D = Diámetro de grano

La ecuación 1 fue propuesta por primera vez para el acero bajo en carbono y se ha aplicado mucho en ensayos sobre este material. La pendiente de la representación de σ_0 en función de $D^{-\frac{1}{2}}$ es igual a K_y , esto es la medida de extensión del apilamiento de dislocaciones frente a los límites de grano, que es esencialmente independiente de la temperatura. La ordenada en el origen σ_i representa la medida de la tensión necesaria para arrastrar una dislocación frente a la resistencias de las impurezas, las partículas de precipitados, los límites de subgranos, y a la fuerza de Peierls-Nabarro. Este término depende tanto de la composición como de la temperatura, pero es independiente de la tensión aplicada. Puesto que la fuerza de Peierls-Nabarro depende de la temperatura, y los otros factores que se oponen al movimiento de las dislocaciones son aproximadamente independientes de la temperatura, se puede hacer un cálculo de la resistencia de la red al movimiento de las dislocaciones, partiendo de un análisis relativo a la dependencia existente entre el tamaño de grano y el límite elástico.

El tamaño de grano se mide con un microscopio, bien contando el número de granos de una zona dada o determinando el número de granos que intersecan una longitud dada de

una línea trazada aleatoriamente, o bien por comparación con gráficos normalizados. El diámetro medio de grano D se puede determinar a partir de mediciones a lo largo de las líneas trazadas aleatoriamente por la ecuación

$$D = \frac{L}{N} \quad (2)$$

en la que L es la longitud de la línea y N el número de intersecciones que límite de grano tiene con la línea. Esta ecuación se puede relacionar con razón entre la superficie S del límite de grano y el volumen V de los granos, por medio de la ecuación

$$\frac{S}{V} = \frac{2N}{L} = \frac{4L}{\pi A} \quad (3)$$

En la que L es la longitud total del límite de grano sobre un plano aleatorio de pulido y A es el área total de los granos sobre dicho plano.

2.3 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LAS PROPIEDADES DE LOS ACEROS. Carbono.-

De todos los elementos aleantes, el carbono es aquel que mas influye en las propiedades mecánicas de los aceros.

El carbono es un elemento con peso atómico de 12 y puede existir en tres formas alotrópicas: carbón amorfo, grafito y diamante.

Tiene su punto de fusión alrededor de los 6.000°F. El carbono puede disolverse en el hierro gamma en cantidades apreciables para formar una solución intersticial, pero su solubilidad en hierro alfa es muy restringida. El carbono que no puede entrar en solución con el hierro alfa forma un compuesto llamado carburo de hierro, Fe_3C , un material de gran dureza. El predominio de estas estructuras en un acero al carbono determinado establece el tipo de propiedades mecánicas que este acero tendrá.

La primera de estas 3 estructuras, la austenita es una solución sólida intersticial de carbón disuelto en hierro γ (fcc). La máxima solubilidad es del 2% de carbono a 2065°F. Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión 150.000 lb/plg², elongación 10% en 2 pulg; dureza Rockwell C.

La segunda estructura es la ferrita, solución sólida α . Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en hierro α (bcc). La máxima solubilidad a 1333°F es 0.025% de C, a temperatura ambiente disuelve 0.008% de C. Es la estructura más suave del diagrama hierro-carbono. Al aumentar la cantidad de carbono el límite elástico de la ferrita se incrementa como se muestra en la figura 10. Esto ocurre debido a que el carbón baja la temperatura de transformación austenítica-ferrítica y consecuentemente reduce el tamaño de grano. La resistencia a la tracción es de 40.000 lb/plg² y la dureza menor que 90 R_B.

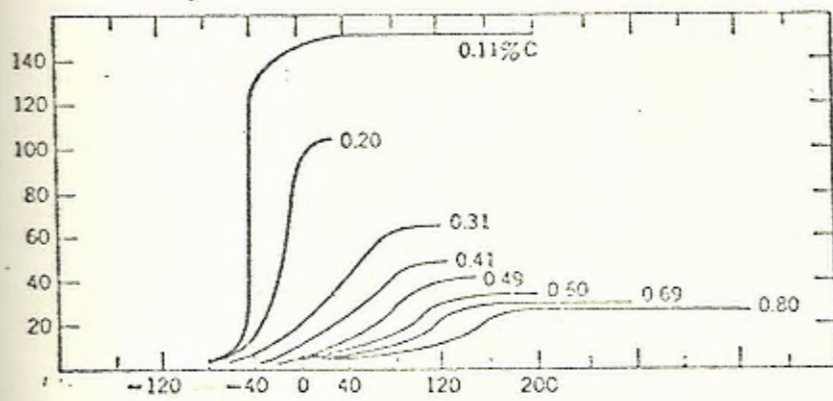


FIGURA N° 10

Efecto del contenido de Carbono en la Resistencia al Impacto, Pruebas Charpy V.

La perlita es una mezcla eutectoide que contiene 0.80% de carbono y se forma a 1333°F a un enfriamiento lento. Es una mezcla muy fina tipo huella dactilar, la base o matriz ferrítica que forma la mayoría de la mezcla eutectoide contiene delgadas placas de cementita. Las propiedades son: resistencia a la tracción 120.000 lb/plg², dureza 10 R_C

El efecto del contenido de carbono en la resistencia al impacto en las pruebas Charpy V se muestra en la figura 10. El incremento en el contenido de carbono de los aceros hipoeutectoides disminuye la pendiente de las curvas de impacto Charpy, aumenta la temperatura de transición y disminuye los máximos valores de energía de cada curva.

Silicio.- Este elemento aparece en todos los aceros, lo mismo que el Mn, porque constituye un desoxidante barato. Únicamente cuando el contenido de silicio es superior al 0.6% se puede considerar dicho acero como aleado. El silicio no es un formador de carburos sino que se disuelve en la ferrita, aumentando la resistencia y la tenacidad. La solubilidad máxima del silicio en la ferrita es de 18,5% (apenas varía con el carbono).

El silicio es un estabilizador de la ferrita. La contribución del silicio a la dureza es menor que la del Mn como se puede notar en la figura 11.

El efecto del silicio en las propiedades mecánicas es generalmente

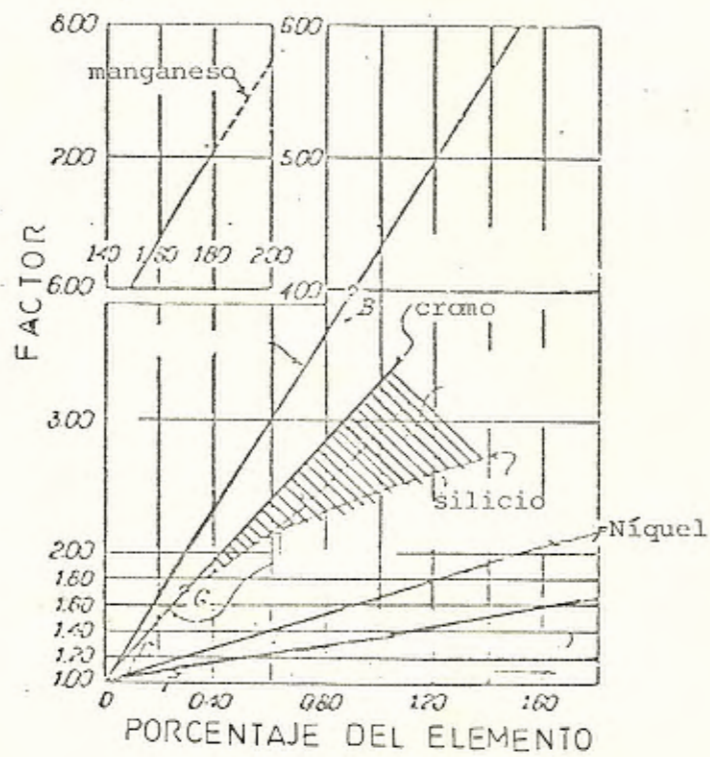


FIGURA Nº 11

Influencia de varios elementos en la dureza del Acero.

aceptado como un incremento de la resistencia en los aceros templados y revenidos.

El silicio incrementa la temperatura de transformación y produce granos de ferrita bastos y disminuye el contenido de perlita.

Manganeso.- Este elemento aleante blanco-grisáceo se asemeja al hierro en muchos aspectos. Tiene un peso atómico de 54.9, y el punto de fusión es a 2.268°F . Como el hierro, existe en diferentes formas cristalinas y alotrópicas dependiendo de la temperatura a la que se encuentra.

Por debajo de una temperatura de 742°C (1368°F) la forma cristalina del manganeso es cúbica simple, la cual es designada como manganeso alfa. Calentándolo por arriba de esta temperatura su estructura cristalina se transforma a una forma cúbica compleja a la que se llama manganeso-beta.

Estas propiedades y características del manganeso lo capacitan para actuar como un importante elemento aleante del hierro. El manganeso, comparado con el hierro, tiene mayor afinidad con el oxígeno, el azufre, y el carbono. Cuando se lo añade al hierro fundido, encontramos que el manganeso reacciona con el oxígeno formando óxido de manganeso.

Esta reacción sin embargo, alcanza un punto de equilibrio y no llega a su culminación. Por lo tanto, manganeso puede ser consi -

derado un desoxidante, aunque no es tan enérgico como el aluminio o el silicio. El manganeso se combinará preferencialmente con cualquier azufre presente para formar sulfuro de manganeso (MnS), compuesto que tiene limitada solubilidad en el hierro en estado fundido y que tiende al salir en la escoria si las condiciones lo permiten. El sulfuro de manganeso es prácticamente insoluble en el metal sólido y aparece en éste como inclusiones.

Cualquier cantidad de manganeso que exceda la cantidad requerida para combinarse con el azufre, se combinará con el carbono en el acero para formar carburo de manganeso, Mn_3C , a medida que el acero se enfría atravesando el punto crítico Ar_1 . Las propiedades de las partículas de carburo de manganeso y su apariencia en la microestructura los hace indistinguibles de las partículas de carburo de hierro.

El manganeso influye en el comportamiento del acero. El manganeso libre es completamente soluble en el hierro en estado fundido, y entra en la estructura cristalina del hierro en estado sólido por medio de una solución del tipo sustitucional. La presencia del manganeso hace descender el rango crítico $Ar_1 - Ar_3$ y que la transformación de la austenita se realice en forma sumamente lenta. El manganeso incrementa la dureza del acero. Una adición elevada de manganeso, alrededor del 12% al 15%, suprime totalmente la transformación de la austenita y el acero permanece austenítico a temperatura ambiente.

Existen 3 propósitos, por lo tanto cuando se adiciona manganeso al acero: que sirva como desoxidante del acero, prevenir la formación de inclusiones de sulfuro de hierro, las cuales pueden causar dificultades como agrietamiento en caliente, (por la formación de compuestos de bajo punto de fusión,) (fragilidad) y aumentar la dureza del acero. En la figura 11 se muestra el efecto de endurecimiento que produce el manganeso semejante al efecto que produce el cromo.

Además, el factor multiplicador mostrado en la figura 12 indica un incremento en la profundidad del endurecimiento. Debe hacerse notar que no todos los análisis químicos sobre el manganeso se han considerado en la figura 12.

Experimentalmente se ha determinado que bajo el 1% de manganeso los aceros tienen estructuras ferríticas-perlíticas para todas las tasas de enfriamiento.

Cuando se considera la influencia del manganeso sobre la estructura cristalina del hierro, se encuentra que el manganeso es un elemento de aleación poco usual. El diagrama de equilibrio hierro-manganeso muestra que cantidades aumentantes de manganeso expanden el campo gamma, por medio principalmente de disminuir el punto de transformación alfa-gamma que normalmente se presenta a 910°C (1670°F).

Los aceros de alto Mn tienen estructuras bainíticas a tasa de en-

friamiento elevadas.

Azufre.- El azufre es una impureza producto del proceso de fabricación del acero. Este elemento muestra una apreciable solubilidad en el acero fundido, pero debido a su bajo punto de ebullición, no puede permanecer en el acero fundido largo tiempo. En el hierro sólido este elemento existe como un compuesto $Fe S$, el cual es prácticamente insoluble, consecuentemente tiende a permanecer en el estado líquido cuando el metal solidifica y se separa finalmente como una película de bajo punto de fusión entre los granos sólidos. Esto resulta en regiones del metal sólido que son relativamente suaves y débiles a altas temperaturas y que tienden a hacerlo quebradizo al metal a altas temperaturas. Esto juega un papel indeseable en la soldadura porque causa rotura en caliente.

Si se halla presente manganeso, debido a su afinidad con el azufre, se formará $Mn S$ (sulfuro de manganeso). Este compuesto es insoluble tanto en acero fundido como en sólido, consecuentemente, cuando el acero solidifica, $Mn S$ presenta en el metal como partículas discontinuas.

2.4 PROCESOS DE SOLDADURA EMPLEADOS

Los procesos de soldadura en general que se pueden emplear para soldar el acero son muy numerosos.

En la tecnología moderna los procesos de soldadura por fusión, fi-

gura 12, la cual implica soldadura oxi-gas y soldadura al arco eléctrico- son los más usuales; sin embargo, debido a consideraciones de calidad de soldadura y efectos económicos, los procesos de soldadura al arco eléctrico son los más usuales.

A continuación se procedería a explicar los procesos más aplicables en nuestro medio por facilidades de referencia industrial y de laboratorios existentes en la Escuela Superior Politécnica del Litoral

2.4.1 Soldadura protegida con Dióxido de Carbono

La "Soldadura con dióxido de carbono" es una variante del proceso por arco metálico con gas inerte, en el cual éste es sustituido por dióxido de carbono. Las disposiciones del carrete de alambre y la pistola son similares. Pueden utilizarse, tanto máquinas de alambre fino como normal (1/16" y 3/32") con CO_2 . Las diferencias se refieren a características de traslado del metal, fuente de alimentación costo y campo de aplicación.

En dióxido de carbono no hay corriente crítica sobre la cual pueda cambiar el traslado del tipo gravitacional al proyectado. En corrientes bajas el traslado de vuelo libre es de tipo de rechazo, de modo que sólo parte de las gotas caen en el depósito de soldadura y se produce una cantidad excesiva de salpicadura. Este defecto, que es más evidente

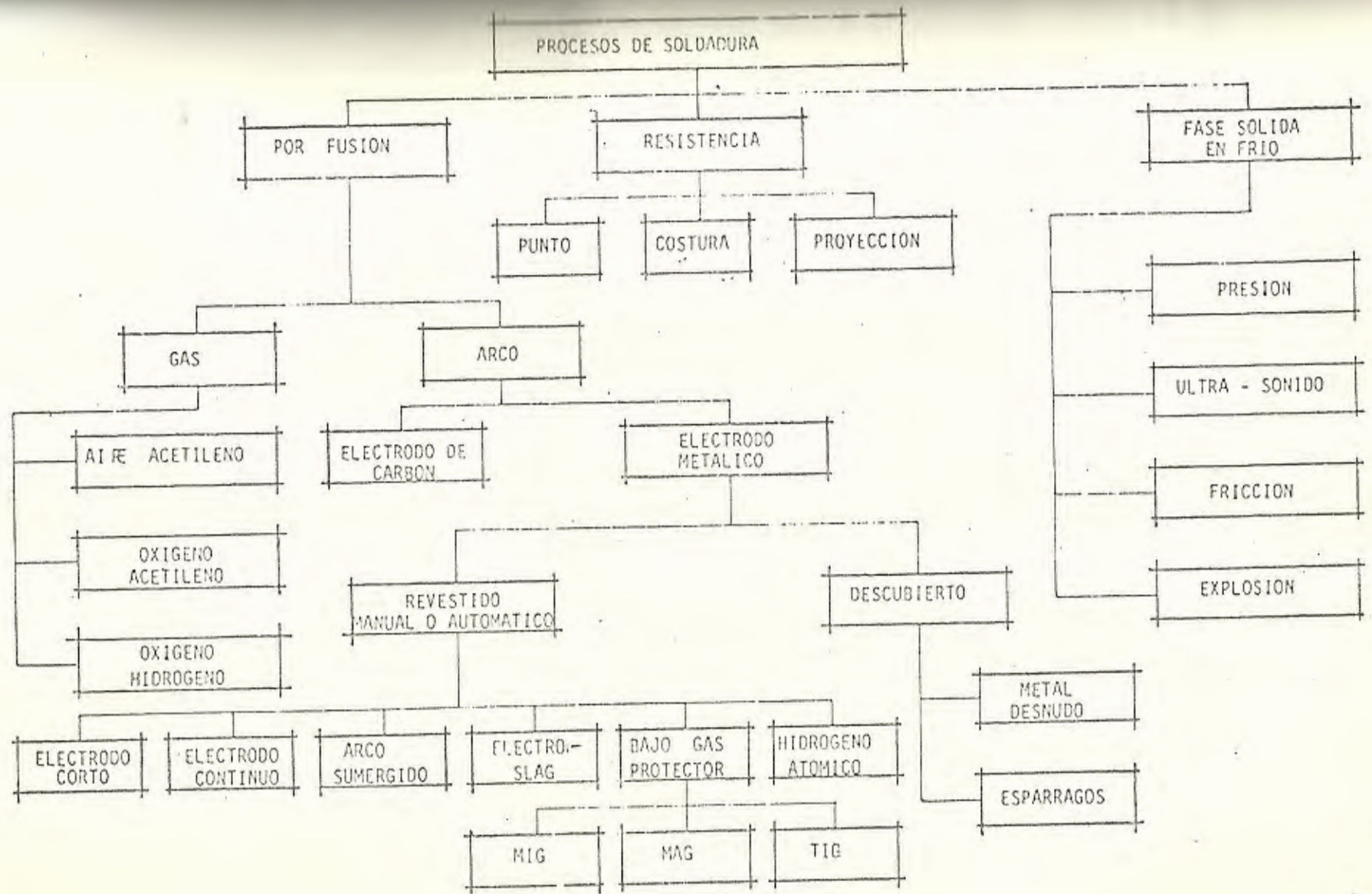


FIGURA Nº 12
 PROCESOS DE SOLDADURA

en la soldadura de alambre fino de baja corriente, es superado mediante el ajuste de las variables del proceso, a fin de obtener un modo de traslado de cortocircuito. La gota es entonces puesta en contacto con el depósito de soldadura y separada del alambre por la tensión de superficie y las fuerzas electromagnéticas antes de que pueda ser proyectada lateralmente. El uso de traslado de cortocircuito también hace posible la utilización del proceso para soldadura posicional. No obstante, puede producirse también salpicadura y traslado irregular, si la corriente que fluye durante el período de cortocircuito es excesiva, debido a que en semejantes circunstancias el desprendimiento de la gota puede producirse con violencia de explosión. Por consiguiente, se modifica la fuente de alimentación, ya sea ajustando la inclinación de una máquina con características de caída, o insertando una reactancia en el circuito (en cuyo caso puede utilizarse un generador de característica plana). Por tales métodos la corriente de cortocircuito puede limitarse a un nivel apropiado. En corrientes altas (superior a 200 amps), utilizando alambres de diámetro de 1/16" y mayores, es suficientemente regular el proceso para que se pueda efectuar la soldadura con traslado de vuelo libre, pero sólo para soldadura en posición plana.

El dióxido de carbono es en muchas circunstancias un gas

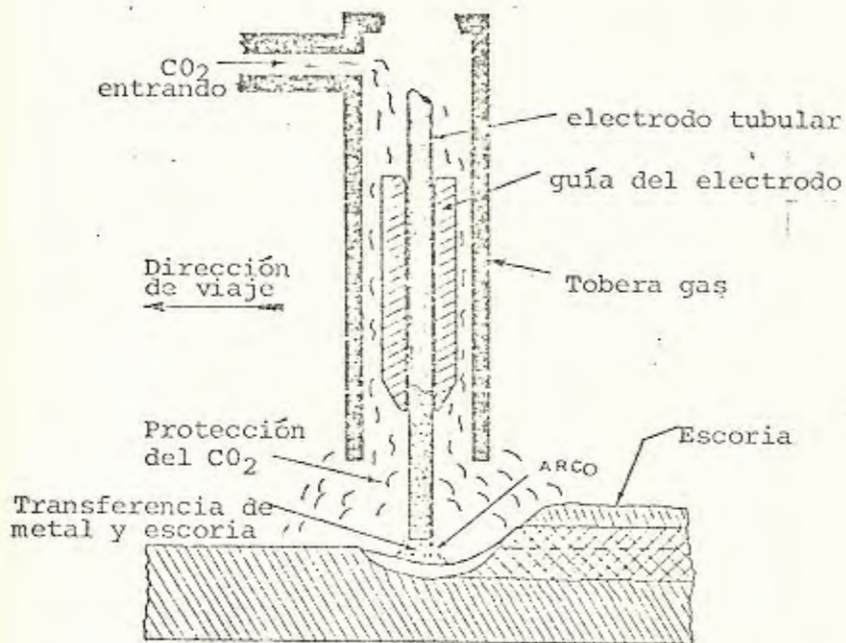


FIGURA N° 13

Arco Eléctrico protegido
con Dióxido de Carbono.

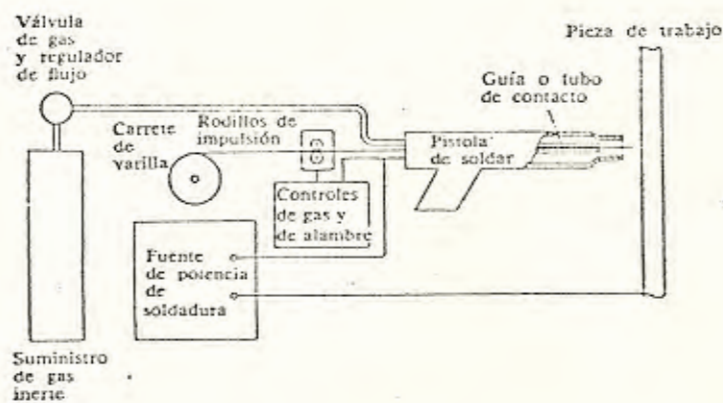


FIGURA N° 14

Equipo de soldadura por gas inerte metálico.

oxidante y en la temperatura del arco la reacción
 $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2$ va hacia la derecha, es decir, el CO_2 está
parcialmente disociado. Es esencial el uso de alambre debi-
damente desoxidado para soldar acero al carbono, ya que pue-
de perder cerca del 40% del contenido de silicio y manganeso.
Los aceros de aleación sufren una ligera pérdida de elemen-
tos de aleación cuando se utilizan para material de relleno,
pero, en general, están debidamente protegidos por desoxi-
dantes que aparecen generalmente en estos materiales.

Este proceso encuentra su principal aplicación en la soldadu-
ra de aceros al carbono y de aleación baja. El costo de los
materiales de soldadura de deposición es también sustancial-
mente mayor, y en la práctica, es ventajosa siempre que haya
volumen suficiente de producción.

2.4.2 Soldadura de Arco con Electrodo Revestidos

La "soldadura de arco" se efectúa formando un arco entre un
electrodo de varilla y la pieza de trabajo, calentando así
simultáneamente la pieza y fundiendo el electrodo, que sumi-
nistra el metal de relleno para la unión. El suministro de
potencia utilizado en la soldadura con electrodos revestidos
consiste en una fuente de alimentación de c.c. o c.a. con ca-
racterísticas caídas.

La soldadura por arco se aplicó primeramente utilizando un

alambre de acero sin revestir, pero las soldaduras efectuadas en esa forma (aunque eran apropiadas para cierto número de aplicaciones) son frágiles debido a los altos contenidos de oxígeno y nitrógeno. En la práctica moderna virtualmente todos los electrodos de soldadura de arco metálico están revestidos con un espesor sustancial de material fundente.

Las funciones del revestimiento son:

- a) Proporcionar una atmósfera gaseosa adecuada para el arco y el depósito de soldadura.
- b) Producir una escoria que dará: I) una protección adicional al depósito de soldadura; II) refinará el metal de soldadura fundido, y III) ayudará a la manipulación del depósito de soldadura durante ésta.
- c) Actuar como transportador de ferro-aleaciones, desoxidantes y polvo de hierro.
- d) Puede producir el arco deseado y las características de traslado de metal que se precise. Los revestimientos consisten en ciertos componentes minerales u orgánicos esencial, desoxidantes y ferro-aleaciones, que se unen a una pasta con arcilla en bolas, mica y silicato de sodio o de potasio y se aplican al alambre del electrodo por extrusión o (para tipos especiales) introduciendo el alam-

bre en la pasta. Son por consiguiente, calcinados cuando la humedad es eliminada y el revestimiento se endurece.

Los revestimientos celulósicos fueron desarrollados originalmente en forma de una envoltura de papel atado con silicato de sodio, pero en su forma actual consisten principalmente en celulosa finamente dividida, rutilo y TiO_2 , desoxidantes mezclados con agentes de unión. Estos electrodos son calcinados a 100-150°C, y el revestimiento retiene una cantidad sustancial de humedad combinada. La descomposición del revestimiento en el arco libera hidrógeno, vapor acuoso y monóxido de carbono a una escala suficiente para evitar contaminación atmosférica del depósito de soldadura. Los electrodos del segundo tipo tienen revestimientos con un contenido sustancial de rutilo, pero pequeño o sin celulosa. La atmósfera del arco y el volumen del gas producido es muy similar a la del tipo celulósico, pero las características de manipulación difieren, en especial, los electrodos con revestimiento de rutilo no penetran tan profundamente para un determinado espesor de revestimiento.

Las varillas con revestimiento de óxido de hierro producen una atmósfera protectora de composición similar a la de los tipos de rutilo y celulósicos, pero aproximadamente la mitad de la escala volumétrica, y esto depende en parte de la escoria que cubra la protección del depósito de soldadura. Estos

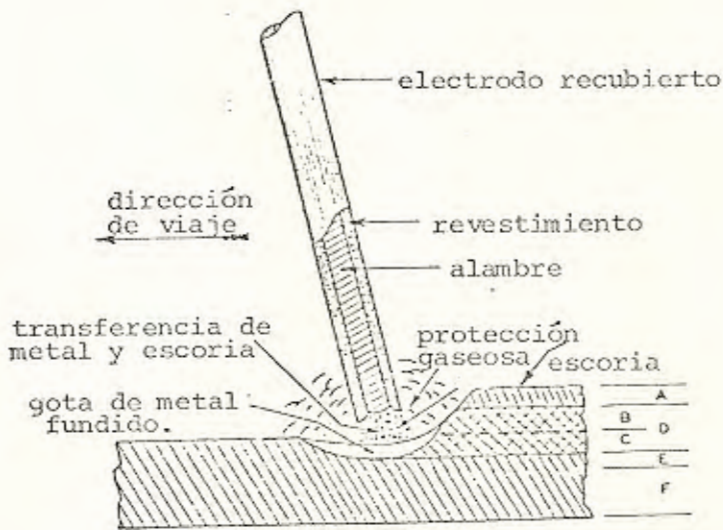


FIGURA Nº 15

Diagrama de la protección que la escoria produce durante la deposición.

- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| A. - Capa de Escoria | D. - Depósito de Soldadura |
| B. - Refuerzo | E. - Zona afectada por el calor |
| C. - Penetración | F. - Metal base sin altera |

electrodos se dividen en dos clases: la primera contiene desoxidantes en el revestimiento y produce un sólido depósito con escoria porosa que se desprende fácilmente. La segunda no está oxidada, y por consiguiente, el carbono es oxidado al monóxido de carbono en un depósito poroso del de soldadura, dando un depósito poroso de bajo contenido de carbono y pequeña resistencia. Los electrodos de clase 4 y 5 se utilizan ahora para una escala limitada solamente.

Los electrodos de revestimiento básico o de bajo contenido de hidrógeno tienen un revestimiento que contiene carbonato de calcio, espato fluor (fluorita), agentes adherentes desoxidantes y son calcinados a temperaturas bastante altas (400-450°C), para eliminar casi toda la humedad combinada. El calor del arco consiste casi por entero en una mezcla de monóxido y dióxido de carbono. La escala de revolución del gas es sustancialmente más baja que la relativa a los tipos celulósicos o de rutilo, y este hecho, relacionado con el menor carácter reductor de la mezcla de CO-CO₂, la hace menos protectora. Es preciso por consiguiente mantener un arco corto al soldar con electrodos básicos para evitar la contaminación de oxígeno y nitrógeno del depósito de soldadura y su consiguiente porosidad.

Las cantidades excesivas de hidrógeno disueltas en el metal de soldadura producen fragilidad de ciertos aceros de alea-

ción de contenido medio o alto de carbono en la soldadura y en la zona afectada por el calor.

La cantidad de hidrógeno de la soldadura depende a su vez de la presión parcial de hidrógeno en la atmósfera del arco. En el caso de electrodos de rutilo y celulósicos, el contenido total de hidrógeno inmediatamente después de la solidificación del depósito de soldadura puede llegar hasta una solubilidad límite para el hierro en el punto de fusión a 30 ml./100 g aproximadamente. La mayor parte de este hidrógeno (denominado hidrógeno difusible) se difunde fuera de la soldadura a la temperatura ambiente durante cierto período de días o semanas, existiendo un contenido pequeño de residuos (hidrógeno residual o no difusible), que sólo puede eliminarse por calentamiento. El contenido de hidrógeno de soldaduras efectuadas con electrodos revestidos de rutilo o celulósicos es en general perjudicial para los materiales sensibles al hidrógeno. Los electrodos de revestimiento básico (con tal que estén secos cuando se utilicen) producen depósitos de soldadura que tienen un contenido de hidrógeno relativamente bajo y son preferidos, por consiguiente, para aceros de aleación y de alta tensión.

En estas condiciones de soldadura las reacciones del metal con la escoria son rápidas y con toda probabilidad pueden alcanzar condiciones de equilibrio en la interarista del me-

tal con la escoria. Sin embargo, el depósito de soldadura es térmicamente heterogéneo y en el que en cualquier momento existe gradiente de temperatura. Además, cada volumen individual de metal está sujeto a un ciclo de calentamiento y enfriamiento. Por consiguiente, hay una diferencia, por ejemplo, en el contenido de manganeso entre la superficie y las partes interiores de un cordón de soldadura, y se produce una gran cantidad de salpicadura en el valor de las constantes de equilibrio derivadas del análisis global de soldadura y escoria. No obstante, la pared de silicio y manganeso entre el metal de soldadura de acero y la escoria y el carbono puede estar relacionada íntimamente con el tipo de basicidad de la escoria, y estas correlaciones pueden ser útiles en la producción de electrodos.

Las características de arco pueden modificarse añadiendo metales fácilmente ionizables al revestimiento. En particular, el uso de silicato de potasio como aglutinante en lugar de silicato de sodio produce la presencia de iones de potasio en la columna de arco, que facilitan la reignición del arco después de una interrupción de corriente. Por consiguiente, se añade silicato de potasio a los revestimientos para soldadura de c.a. y silicatos de sodio para electrodos de c.c. La corriente alterna se utiliza para soldar aceros de baja aleación al carbono y algunos aceros de aleación al-

ta con electrodos revestidos. Los electrodos no férreos precisan generalmente c.c., aunque la corriente alterna puede ser preferible debido a que la fuente de alimentación es menos costosa, o porque facilite una soldadura más fácil, pero para aceros de aleación o trabajos de alta calidad se emplea generalmente la corriente continua.

La naturaleza del revestimiento afecta también al transporte del metal. Los revestimientos básicos y de rutilo y celulósicos producen un transporte por cortocircuito, mientras que el transporte desde electrodos revestidos de óxido de hierro tiende a ser proyectado. En el traslado de cortocircuitos con electrodos revestidos, algunos de los metales pueden también ser proyectados a través del arco en pequeñas gotas.

A medida que aumenta el espesor del revestimiento, el depósito de soldadura resulta más profundo y más estrecho, y se dice que el electrodo tiene características de penetración profunda. Los electrodos con revestimientos muy gruesos se utilizan para el corte de metales.

A veces se añaden cantidades sustanciales de elementos de aleación al revestimiento, de forma que la composición del metal depositado pueda diferir de la del alambre del núcleo. Puede también añadirse polvo de hierro a los revestimientos de electrodo en cantidades que varíen de 10 a 50% del peso

del revestimiento. La escala de deposición de metal obtenida de este tipo de electrodo es superior a la de los grados normales, y es especialmente apropiada para la soldadura ultrarápida en posición plana. El uso de electrodos de polvo de hierro y de revestimiento básico está en aumento; los tipos de óxido de hierro, por otra parte, son producidos en cantidades reducidas.



Es un proceso versátil aplicable a los aceros de la más alta aleación, aleación baja y fundición de hierro, níquel y sus aleaciones y, en cierto modo, a las aleaciones de aluminio, bronce-estaño y bronce alumínico. Los electrodos revestidos no son apropiados para la soldadura de aluminio puro, cobre puro, metales con punto de baja fusión o metales reactivos. En la soldadura manual al contacto eléctrico el alambre de núcleo se obtiene quitando al revestimiento del mismo una corta longitud en el extremo de la varilla, que está sujeta por un portaelectrodos. En la soldadura automática con una bobina continua de electrodo, deben emplearse medios especiales para obtener este contacto. Un método es enrollar alambres finos superpuestos alrededor del núcleo para que se proyecte a través del revestimiento; un segundo método es utilizar un electrodo tubular con el fundente en el núcleo, y un tercer procedimiento es utilizar alambre desnudo y aplicar un flujo magnético después de haber establecido

contacto, a través del cual es suministrada la corriente. El campo magnético inducido alrededor del alambre por la corriente del arco es suficiente para recoger un revestimiento adecuado. Para trabajos de alta calidad, puede suministrarse adicionalmente un revestimiento de dióxido de carbono.

2.4.3 Soldadura por arco sumergido

En este proceso se mantiene un arco entre un electrodo de alambre desnudo que avanza continuamente y la pieza de trabajo que está situada debajo de una masa de flujo granular fundible. El fundente es suministrado sobre la zona de la unión donde se introduce el alambre. El arco que se forma funde una parte del fundente que protege el depósito de soldadura de contaminación atmosférica, mientras que el fundente sin derretir restante actúa como recubrimiento del mismo arco. La fuente de alimentación puede suministrar tanto corriente continua como alterna. Las escalas de deposición más elevadas se obtienen con electrodo negativo, pero el control de la forma del cordón y la penetración son mejores con electrodo positivo. El arranque del arco con c.a. es más inestable, pero no existe desviación de arco, de modo que pueden utilizarse arcos de c.a. en tandem o en paralelo. También se utilizan corrientes de soldadura de 200-2.000amps.

El fundente de soldadura de arco sumergido se compone de una mezcla de minerales (por ejemplo, óxidos de calcio y manganesos con sílice y fluoruro de calcio, que han sido aglomerados, aglutinados o fundidos entre sí con el fin de formar un polvo áspero. A veces se añaden elementos de aleación, a fin de compensar las pérdidas que pudieran de otro modo producirse durante el traslado del metal. Ocasionalmente se efectúa la adición de aleación total a través del fundente, siendo utilizado un alambre de acero al carbono, pero ésta es una práctica poco recomendable ya que puede conducir a irregularidades en la composición del cordón de soldadura.

La Soldadura por Arco Sumergido permite escalas de deposición elevadas y efectuar cordones de soldadura de espesor sustancial, siendo practicables, por ejemplo, soldaduras de simple cordón en placa de 1 ½" con equipo normal. La cantidad de metal que puede depositarse en un simple cordón queda limitada parcialmente por consideraciones prácticas y, en parte, por la necesidad de evitar un tamaño de grano excesivamente grueso. La resistencia al impacto en las soldaduras de acero de aleación baja o acero al carbono de grano grueso, así como en la de condición soldada o libre de esfuerzo, no satisfacen siempre los requisitos de ingeniería para las aplicaciones más severas, tales como las

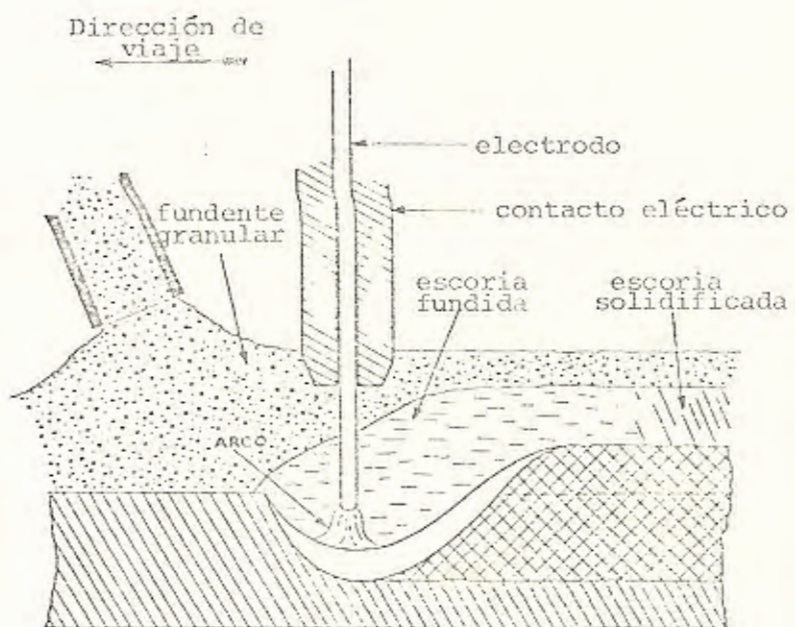


FIGURA Nº 16

Diagrama de la deposición del metal
en el proceso de arco sumergido.

vasijas o recipientes de presión, y en estas circunstancias es necesario normalizar después de la soldadura o limitar el espesor de cada cordón de soldadura hasta una distancia no superior a 3/4". Generalmente se adopta la última solución.

El proceso por arco sumergido es aplicable al acero de aleación alta, de baja y al acero al carbono, así como a ciertas aleaciones a base de cobre (principalmente para tratamiento de superficies). Se utiliza en todos los campos de ingeniería y puede aplicarse manual o automáticamente, generalmente lo último. Puede utilizarse en posiciones horizontales o planas, pero no para la soldadura de techo o vertical. Además de la soldadura por fusión de uniones a tope y en ángulo, la soldadura por arco sumergido es especialmente apropiada para ser aplicada a capas superpuestas soldadas, por ejemplo, de acero austenítico inoxidable sobre placa a base de acero de aleación baja o al carbono. Las soldaduras a tope pueden efectuarse en material de un espesor de 1/16", mientras que no existe límite superior para los espesores a unir. La soldadura por electroescoria puede, sin embargo, ser más económica para secciones gruesas y para soldadura vertical.

El metal depositado por este método de soldadura se encuentra generalmente limpio y libre de porosidad debido a la

excelente protección que da el fundente. Sin embargo, a veces aparecen fisuras, estructura de grano grueso, y segregación como resultado de la relativamente lenta solidificación de grandes masas de metal fundido que en ocasiones puede carecer de una sección transversal favorable para la solidificación.

Los cordones son susceptibles a agrietamiento longitudinal en el centro porque esta área es la última en solidificarse y microcontracciones tienden a desarrollarse aquí si es que el cordón no tiene la forma adecuada.

Ordinariamente, el proceso de arco sumergido es considerado como un proceso de bajo hidrógeno, a menos que se permita que entre humedad al fundente. El vapor de agua que ingresa al fundente introduce hidrógeno en el metal fundido.

2.5 SOLDABILIDAD

Soldabilidad es la capacidad de un metal o combinación de metales a ser soldados bajo ciertas condiciones de fabricación para formar una estructura específica y adecuada que efectúe satisfactoriamente el servicio para el que ha sido diseñada.

Soldabilidad es una propiedad complicada y no fácil de definir. La soldabilidad involucra la compatibilidad metalúrgica del metal con cualquier proceso específico de soldadura, la habilidad del metal

a ser soldado manifestando aceptables propiedades mecánicas y utilidad.

Compatibilidad metalúrgica implica que el metal base y el metal soldado pueden ser combinados dentro del grado de dilución encontrado en un proceso específico sin la producción de constituyentes dañinos o fases dañinas. Las propiedades mecánicas deben satisfacer los requerimientos y normas de soldadura.

La soldabilidad y las combinaciones de metales varían considerablemente con el proceso de soldadura usado. Los efectos del calor y los porcentajes de dilución varían desde cero para soldadura ultrasónica y por explosivos hasta valores altísimos en ciertos tipos de soldadura por arco sumergido.

La condición de la superficie, la química y las propiedades mecánicas del metal base tienen un efecto decisivo en la solidez de la soldadura. Es obvio que el control de los principales elementos aleantes es necesario para alcanzar los requerimientos de servicio. El nivel apropiado de estos elementos aleantes mayoritarios es normalmente garantizado por las especificaciones que identifican a los metales bases. Las proporciones de estos elementos aleantes tienen un profundo efecto en la soldabilidad.

Por ejemplo, las tasas de carbono-silicio, cromo-níquel en los aceros inoxidable austeníticos tienen un profundo efecto en la rotura en caliente de estos metales. Los elementos residuales

que pueden causar extrema dificultad en la soldadura, no siempre son especificados para garantizar una soldadura satisfactoria. Estos elementos con sus niveles de tolerancia, deben ser especificados para cada tipo de aleación.

La condición de la superficie del metal base puede tener un efecto adverso en la producción de una soldadura apropiada.

Suciedad compuesta por material ferroso ubicada en la superficie del metal base puede añadir hidrógeno a la soldadura produciendo porosidad y rayaduras bajo el cordón. Otros contaminantes superficiales como sulfuros pueden producir constituyentes de bajo punto de fusión. Oxidos como la herrumbre no sólo pueden impedir la adecuada fusión, sino también impedir la formación de escoria necesaria. Oxidos refractarios como aquellos de titanio y aluminio se funden a temperaturas muy elevadas y así impiden la fusión adecuada.

Como se sugirió previamente, muchas juntas emplean metal de aporte que no es igual al metal base. En tales circunstancias las consecuencias metalúrgicas de mezclar estos materiales deben ser considerados. Ciertas consideraciones generales, basadas en las relaciones de solubilidad de los metales bajo consideración, son aplicables.

En general, elementos pueden ser mezclados en estado líquido y no causar dificultad en el estado sólido, si en este estado existe o

se forma solución sólida. Cuando el rango de solubilidad es amplio, como es el caso en el sistema cobre-níquel, los elementos pueden ser diluidos sin la formación de fases secundarias indeseadas. Cuando el límite de solubilidad es excedido en gran manera, fragilidad se puede presentar. Supersaturación se puede presentar por la lentitud de las reacción del estado sólido, entonces se presenta la precipitación cuando el material es calentado a una elevada temperatura. Cuando es conocido y bien estudiado este comportamiento puede ser utilizado como una ventaja, pero si esto no sucede se presenta fragilidad en la soldadura.

Además de la solubilidad en estado sólido, la soldabilidad es afectada por la formación de fases eutécticas de bajo punto de fusión y por metales y no metales de bajo punto de fusión. Dado que estos materiales solidifican a temperaturas diferentes a la de la matriz, producen problemas con la rotura en caliente. Un ejemplo extremo es el ejemplo del sulfuro en níquel, produciendo un eutéctico, níquel-sulfuro de níquel el cual no solidifica hasta los 540°C cuando el níquel lo ha hecho a los 1450°C .

Ciertos metales tienen la capacidad de cambiar su estructura cristalográfica con los cambios de temperatura, son materiales alotrópicos. Muchos problemas pueden resultar de estos cambios en la estructura metalográfica, debido a cambios de volumen, cambios drásticos de solubilidad (especialmente de gases), formación de fases frágiles y grandes cambios en las propiedades mecánicas. Por

ejemplo, la transformación de austenita o martensita es responsable de rajaduras bajo el cordón en aceros al carbono y de baja aleación.

Ciertas combinaciones de elementos producen gases. Gases se pueden producir en aceros al carbono, carbono-molibdeno, cromomolibdeno cuando estos aceros se hallan en una atmósfera de hidrógeno a elevada temperatura. Carbono en presencia de oxígeno puede producir monóxido de carbono y dióxido de carbono, lo cual causará porosidad en los metales. Hidrógeno y azufre puede producir sulfuro de hidrógeno.

La solubilidad de los gases en el metal fundido es alta comparada con la solubilidad en el estado sólido.

La solubilidad del oxígeno en aceros al carbono por ejemplo, cambia de 0.16% a mucho menos que el 0.01% a temperatura ambiente. Debido a este descenso en la solubilidad, el oxígeno es expelido del metal solidificado, en muchos casos, sin embargo, nunca llega a la superficie.

Aunque no está presente en grandes cantidades en los metales, puede formar parte del metal fundido al momento de la soldadura. Si no es capaz de escapar a altas temperaturas, el gas formará porosidad en el metal soldado. La porosidad causada por el oxígeno se puede evitar añadiendo elementos que tengan gran afinidad con el oxígeno y que salgan por la vía escoria del metal fundido. Ele-

mentos que tienen esta propiedad son: titanio, aluminio, zirconio, vanadio, silicio.

La combinación de metales con diferentes propiedades físicas y mecánicas puede resultar en problemas de soldadura. Problemas pueden ocurrir cuando metales bases similares son soldados con material de aporte diferente, o cuando metales base diferentes son soldados. Cuando el metal soldado es mucho más fuerte que el metal base, grandes esfuerzos se pueden producir en la zona afectada por el calor. Si no se produce flujo plástico para aliviar estos esfuerzos se producirán rajaduras en la zona afectada por el calor. Cuando las propiedades mecánicas del metal base involucran un límite elástico alto y al mismo tiempo baja ductilidad, el metal base puede también rajarse en la soldadura.

Las propiedades físicas de los componentes de la junta soldada es también importante. Cuando existe una diferencia grande entre los coeficientes de expansión existentes en los metales a ser soldados los gradientes térmicos pueden producir esfuerzos en las interfases, lo cual produce fallas.

Las diferencias en la conductividad térmica entre metales cuando se sueldan deben ser reconocidas cuando se sueldan metales diferentes. El metal con alta conductividad térmica debe ser precalentado, o las técnicas de soldadura se deben modificar para proveer mayor calor a ese metal.

Cuando los puntos de fusión entre el metal de aporte y los metales bases difieren, técnicas que minimizan los esfuerzos deben usarse para producir fallas en el metal base con menor punto de fusión. Si la junta se halla altamente restringida, fallas en caliente se presentan de la solidificación del metal soldado cuando la ZAC del metal de bajo punto de fusión se halla en estado en el cual no pueden soportar esfuerzos de tensión.

Los elementos añadidos intencionalmente o como residuos determinan las características metalúrgicas del metal de soldadura y metal base.

Elementos aleantes son añadidos con el fin de satisfacer cualquiera de los siguientes prospectos:

- 1.- Formar aleaciones intersticiales o incrementar las propiedades mecánicas por distorsión de la red.
- 2.- Formar aleaciones sustitucionales que endurecen el metal.
- 3.- Proveer de oxidación del metal fundido sin perder los elementos de aleación primarios.
- 4.- Incrementar o reducir la dureza de la ZAC.
- 5.- Producir precipitados por envejecimiento.
- 6.- Formar carburos.
- 7.- Proveer núcleos para controlar el tamaño de grano.

8.- Minimizar la segregación.

9.- Controlar la cantidad, distribución y forma de las inclusiones.

Los únicos elementos capaces de formar aleaciones intersticiales son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, boro.

Cuando estos elementos se hallan presentes como elementos aleantes, muy pequeñas cantidades producen grandes cambios en las propiedades mecánicas. Los efectos del carbono y boro en la dureza del acero son buenos ejemplos de este factor. Completo control de las aleaciones intersticiales es necesario para la realización de una buena soldadura, soluciones intersticiales se producen cuando los átomos de soluto son mucho menores que los átomos de solvente.

Soluciones sólidas por sustitución se forman cuando los diámetros atómicos de los solventes y solutos se parecen y se hallan dentro de un $\pm 15\%$. Cuando un elemento es añadido por sustitución, la red original es deformada en relación lineal a la cantidad de elemento aleado añadido.

La dureza es incrementada también en relación lineal.

Cuando la aleación tiene lugar en el metal soldado o en el metal base y permanece dentro de los límites de solución sólida sustitucional, pocos problemas de soldadura resultan. Cuando la solu-

bilidad es excedida, fases secundarias, intermetálicas, o rechazo de unos de los elementos puede ocurrir. Muchas características metalúrgicas especiales dependen del sobrepasar los límites de solubilidad, pero cualquiera sea la reacción que ocurra, usualmente, incrementa la dificultad de ejecutar la soldadura. La resistencia a la corrosión de casi todos los materiales disminuye cuando fases secundarias o intermetálicas se forman. Roturas se pueden producir cuando grandes cantidades de un elemento o varios es rechazada.

Gases en mayor o menor se producen debido a un descenso en la solubilidad del oxígeno, y a la combinación del oxígeno con otros elementos, tal como el carbono. La solubilidad del oxígeno y otros gases en los metales disminuye rápidamente al descender la temperatura, porosidad resulta cuando el gas molecular es atrapado en el metal. Elementos de aleación tales como el titanio, aluminio, zirconio, vanadio, silicio tienen mayor afinidad con el oxígeno que el acero y por tanto pueden actuar como desoxidantes. Otros sistemas de aleación, otros agentes desoxidantes como: aluminio, zinc, silicio, zirconio y fósforo como aleaciones de cobre. Todas las soldaduras por fusión requieren agentes desoxidantes, a menos que la soldadura sea hecha al vacío o bajo una atmósfera especial.

Elementos aleantes pueden ser añadidos para incrementar la dureza del acero. Esto es por una reducción de la tasa de enfriamiento

crítica y la temperatura de transformación austenita-martensita. Los elementos que tienen gran influencia en la dureza de los aceros son: carbono, manganeso, molibdeno, cromo, vanadio, níquel, silicio. El efecto de estos elementos en el control de la tendencia de la ZAC a formar martensita se expresa en muchas fórmulas y es llamada carbono equivalente. Una muy común es:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Cu}{40} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (4)$$

Las posibilidades de rotura bajo el cordón debido al hidrógeno se incrementa con la dureza, y la profundidad a la cual se forma la frágil martensita aumenta. Cuando el CE en la fórmula precedente excede de 40, rotura bajo el cordón puede ocurrir. Las roturas pueden también ser influenciadas por el precalentamiento y otros factores.

Investigadores recientes consideran y evalúan 2 tipos de propiedades en las juntas soldadas:

- 1.- Las propiedades mecánicas de la junta: resistencia a la tracción, ductilidad, dureza, etc.
- 2.- Resistencia de la junta soldada a las rajaduras

La susceptibilidad a las rajaduras de una junta soldada es considerada muy importante ya que fallas que resultan de las rajaduras son muchas veces catastróficas.

De especial interés son aquellas rajaduras que ocurren bajo el cordón en la zona afectada por el calor y que se llaman fisuras o rajaduras bajo el cordón.

Investigadores han tratado de formar guías para la soldabilidad. Cottrell y Buadstee en el año 1955 ofrecieron un método para calcular las temperaturas de precalentamiento que evitan fisuras en la zona afectada por el calor.

Esfuerzos recientes ofrecen guías de soldabilidad basándose en la composición química del metal base, el espesor de la placa, el hidrógeno difusible en el metal de soldadura, y la restricción de la junta.

El hidrógeno es muy soluble en austenita. Durante el desarrollo de la soldadura el metal soldado es calentado hasta llegar al estado líquido y a la estructura austenítica. La austenita es capaz de absorber hidrógeno sin ningún problema. A medida que el metal se enfría, la austenita se transforma en ferrita y otras fases. Hidrógeno es insoluble en esas fases y escapa por difusión a la atmósfera y a la ZAC. El hidrógeno en forma atómica se concentra en lugares vacíos y puntos de concentración de esfuerzos formando moléculas.

En su forma molecular al hidrógeno se le hace muy difícil transportarse por difusión. La acumulación del hidrógeno molecular produce esfuerzos extremadamente altos, lo cual inicia una peque-

ña fisura si la estructura tiene carácter frágil. La fisura se ofrece a su vez como un punto de concentración de tensiones el cual a su vez atrae a más hidrógeno, resultando en un incremento de la presión. Cuando la presión crece lo suficiente, la fisura, dependiendo de su dirección, se propaga en el metal base o en el metal soldado.

Para evitar fisuras bajo el cordón se recomienda:

- 1.- Establecer condiciones de bajo hidrógeno para evitar que éste se disuelva en el metal soldado.
- 2.- Usar metal de aporte austenítico para evitar la difusión del hidrógeno en el metal base.
- 3.- Control de la tasa de enfriamiento para que una estructura dúctil se forma en la ZAC.

2.6 EFFECTO DE LAS VARIABLES DE SOLDADURA AL ARCO SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR.-

El suministro de calor desprendido del arco eléctrico, produce ciclos térmicos con efectos importantes en las propiedades mecánicas del metal base el cual actúa como una masa de absorción del calor. El calor del arco eléctrico está en alguna forma relacionado a los parámetros de soldadura por la ecuación del suministro de calor por unidad de longitud dada por

$$Q = \frac{V \times I}{S} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{mm}} \quad \left[\frac{\text{Kjoules}}{\text{pulg}} \right] \quad (5)$$

2.6.1 Efecto de la técnica de soldadura en los resultados a obtenerse en el cordón de soldadura

Como se indica en la ecuación 5 los principales factores que influyen en los procesos de calentamiento y enfriamiento del metal base son:

- 1.- Corriente de soldadura, I ;
- 2.- Voltaje de Soldadura, V ;
- 3.- Velocidad de viaje S .

La penetración de un punto de soldadura depositado en la superficie de una placa es generalmente reconocida como la distancia bajo la superficie de la placa hasta la cual el metal fundido avanza.

Debe recordarse que la verdadera penetración es la distancia en la que existe metal fundido por debajo del nivel del metal en el cráter del arco.

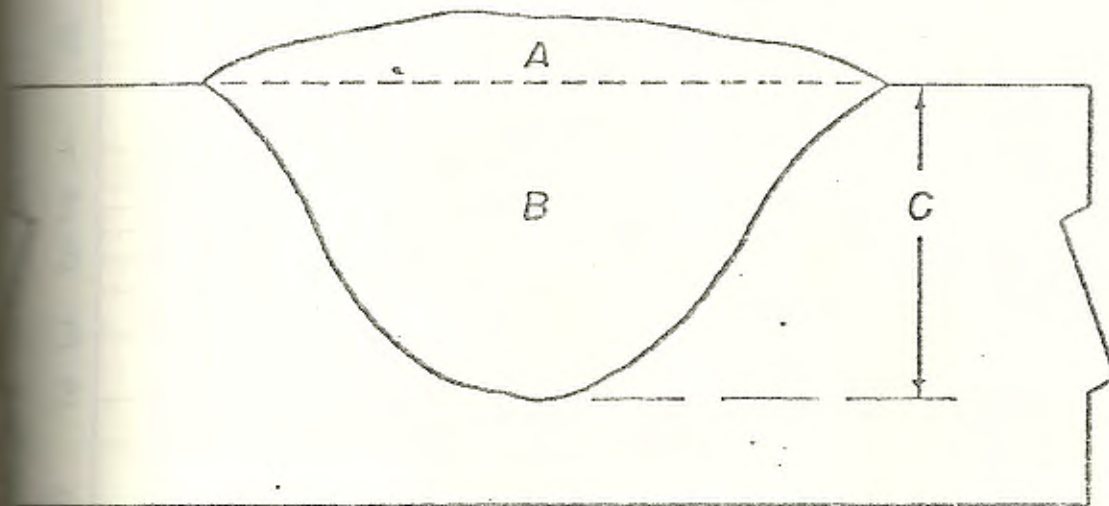
El área del cordón está construida por el metal depositado, representado por A , y el metal base fundido, representado por B (Figura 17). La razón entre el metal base fundido y el área del cordón cada uno expresado como porcentaje, es importante en la soldadura. La razón del metal base fundido al área del cordón es generalmente denominado dilución (7). El ingeniero soldador o el operador que selecciona

una técnica para una aplicación particular, se interesa primero en la selección de la corriente de soldadura. Un incremento de la corriente de soldadura resulta en una mayor penetración, también, la razón de fusión se incrementa, tal como se observa en la figura 17.

El volumen del metal de soldadura depositado depende de la tasa de fusión del electrodo, la cual es controlada a su vez, principalmente por la corriente del arco. (Figura 21). La deposición del metal de soldadura es también controlada por la velocidad de viaje. La figura 18 provee el área del metal de soldadura en función de la relación entre las corrientes y la velocidad de viaje, cuando la tasa de fusión del electrodo es conocida. Para una mayor eficiencia, la corriente y la velocidad de viaje del electrodo deben guardar una determinada relación máxima. En la figura 19 se indica dicho límite para el proceso del arco sumergido, y aunque dichos límites varían pueden ser usados como una guía.

Las figuras 19 y 20 muestran los límites aceptables de corriente-velocidad del viaje y corriente-voltaje para realizar soldaduras apropiadas. Como regla general voltaje creciente produce decremento en la penetración e incrementa el ancho del cordón.

Si las relaciones establecidas para corriente, voltaje, velocidad son reunidas en una ecuación, la penetración puede



- A= Refuerzo
B= Metal Base Fundido
C= Penetración

$$\text{Dilución} = \frac{B}{A+B}$$

FIGURA Nº 17

Cordón depositado en una placa.

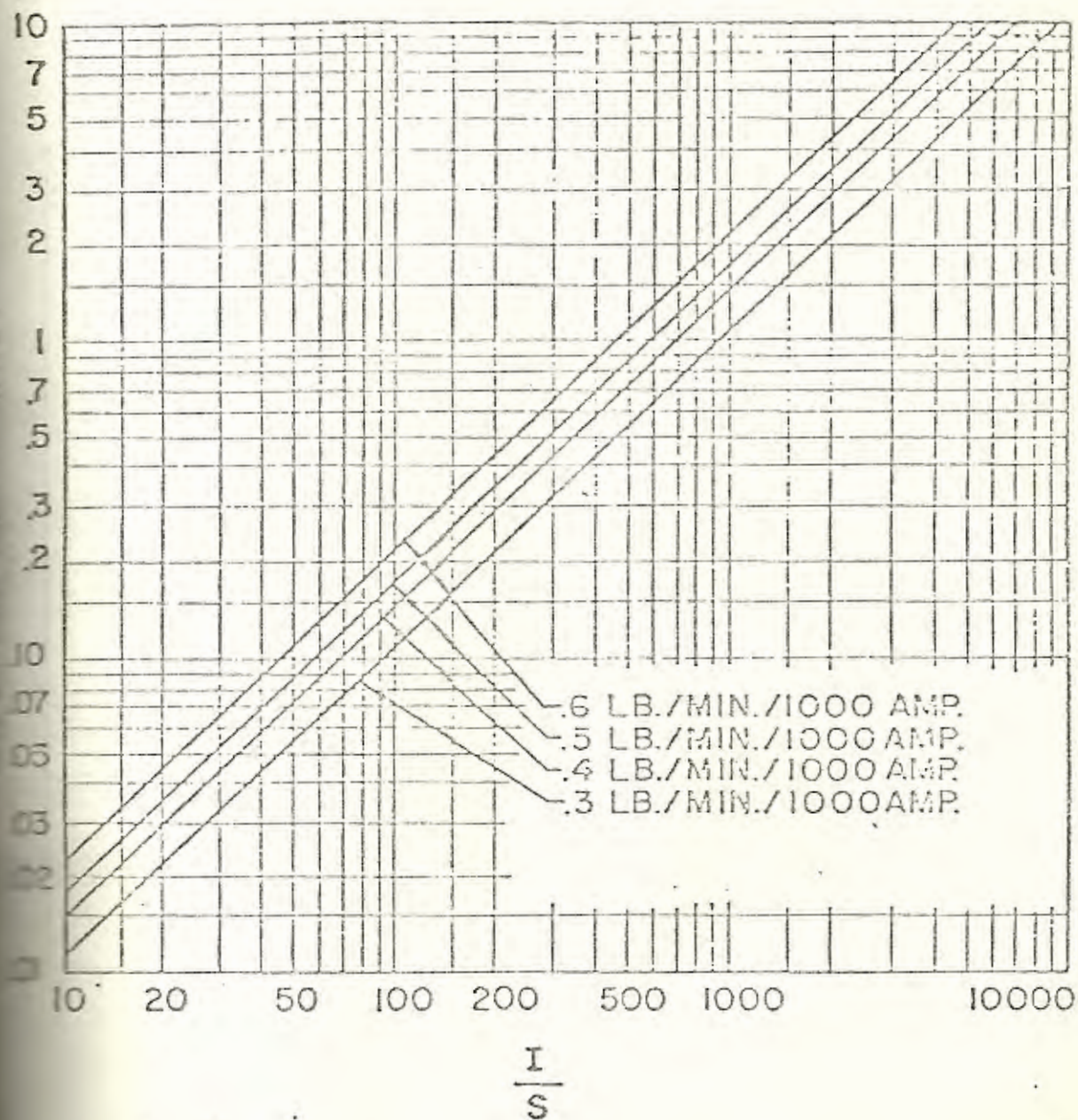


FIGURA Nº 18

Relación del área del metal depositado
y la razón corriente/velocidad de la fuente.

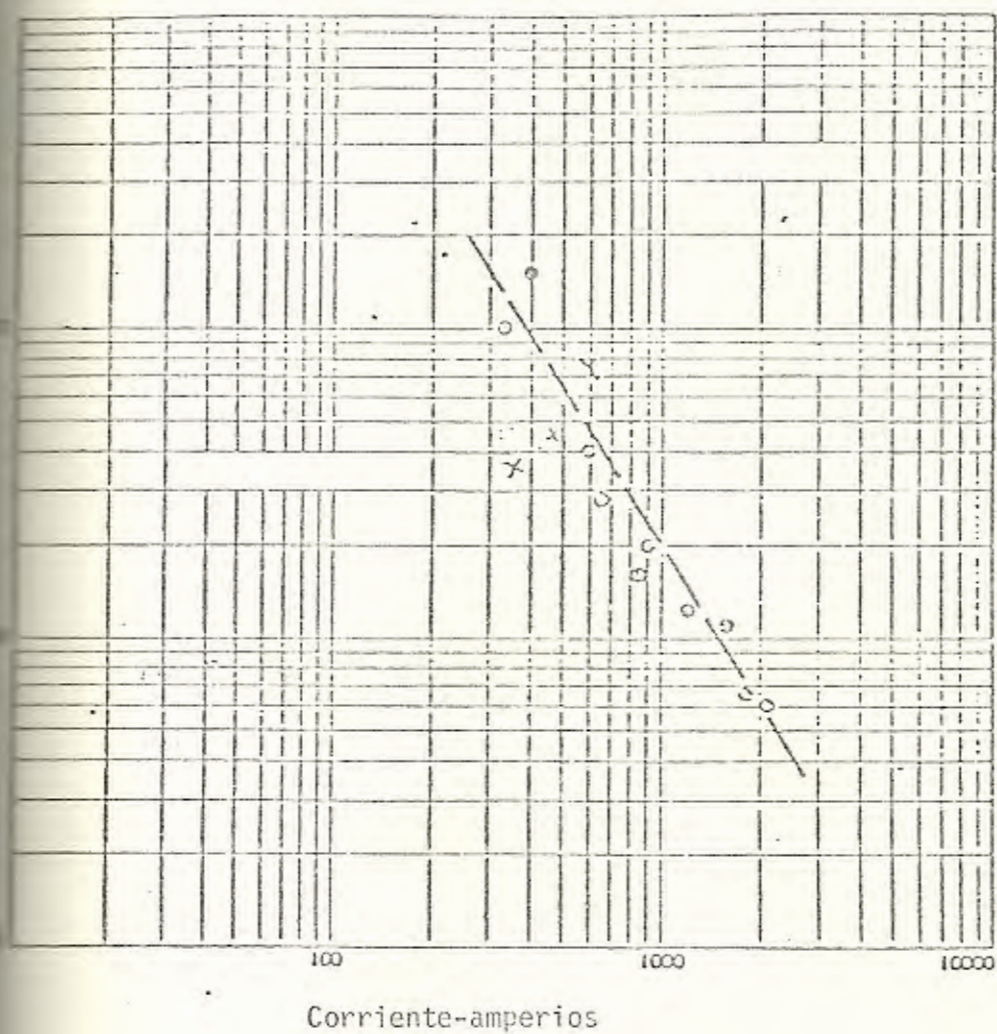


FIGURA Nº 19

Relación máxima entre la velocidad de viaje del electrodo e intensidad de corriente.

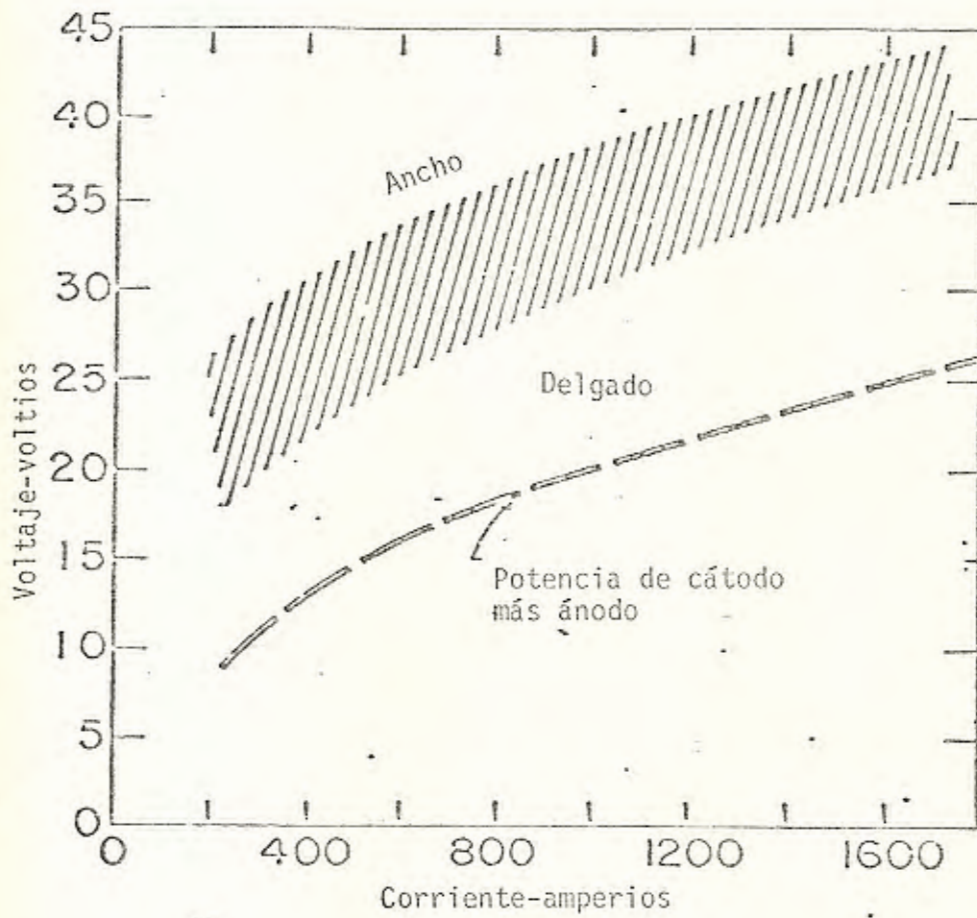


FIGURA Nº 20

Rango aceptable de voltajes para varios
valores de corriente de soldadura

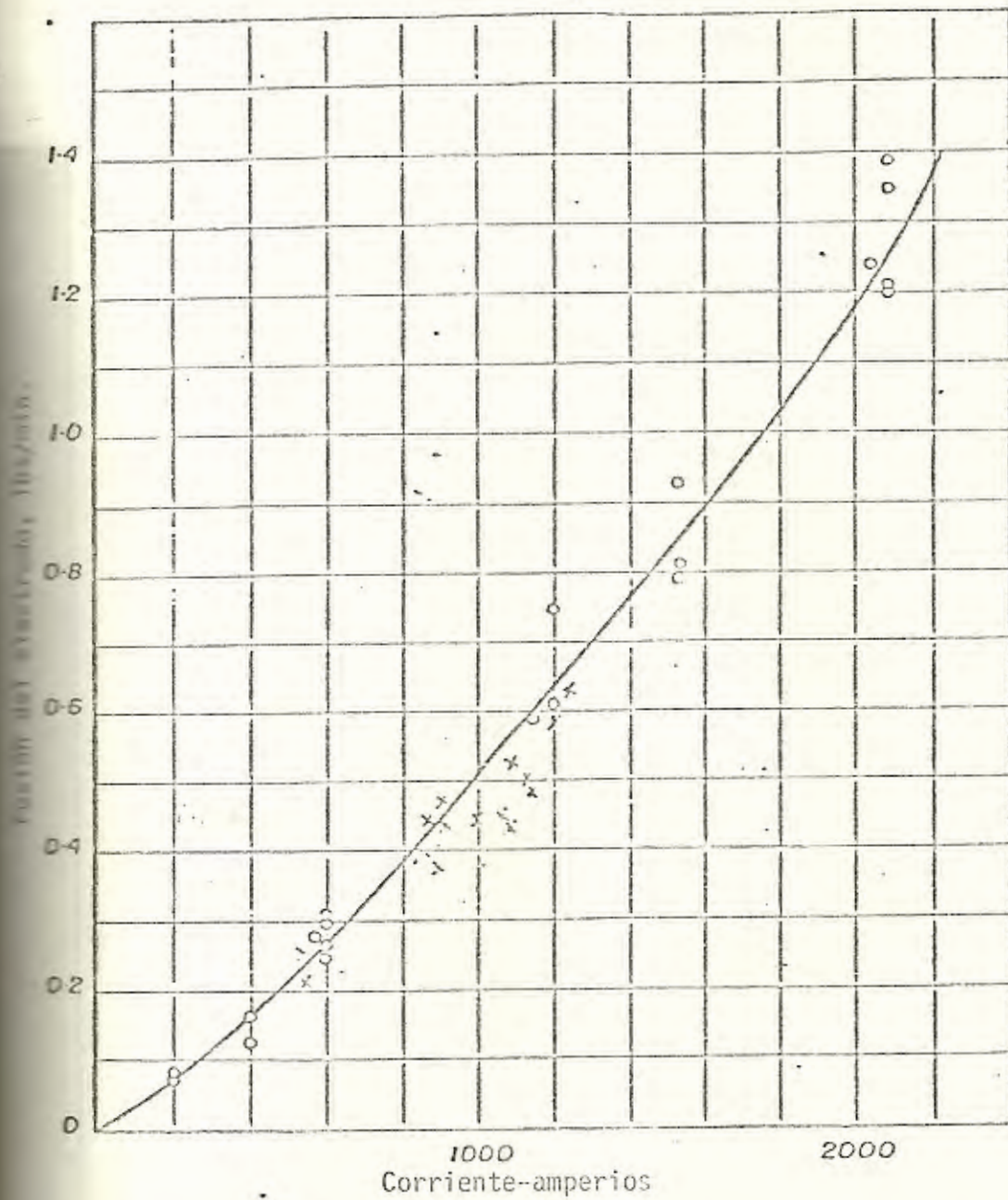


FIGURA Nº 21

Efecto de la corriente de soldadura en la tasa de fusión del electrodo usando fundente de silicato de calcio en proceso de arco sumergido.

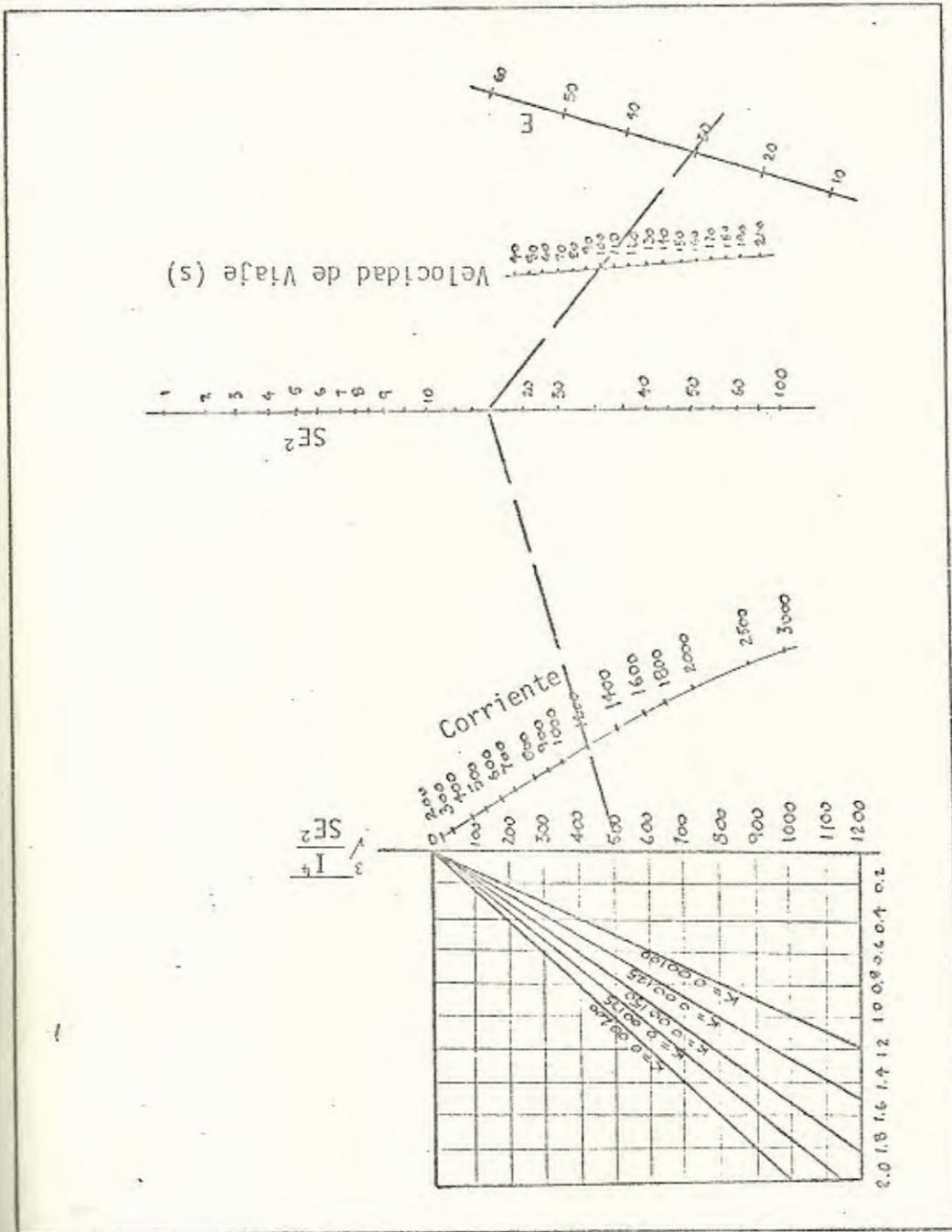


FIGURA Nº 22

Nomograma que permite determinar la penetración para una técnica de soldadura dada

ser expresada por la siguiente fórmula:

$$P = K \sqrt[3]{\frac{A^4}{SE^2}} \quad (6)$$

La figura 22 muestra un monograma hecho en base a la ecuación anterior para calcular la penetración P.

Este vistazo general describe el efecto de las técnicas de soldadura en la configuración del cordón. Las propiedades de la soldadura pueden ser afectadas grandemente por la técnica empleada en la soldadura.

Variaciones en la técnica de soldadura afectarán la dilatación, solidificación, y transformación en el metal soldado.

2.6.2 Comparación de la Teoría del Contenido Calorífico suministrado con el teoría del área del cordón soldado, para el control de las propiedades mecánicas de la soldadura

El arco de soldadura actúa como una fuente de calor que se mueve, produciendo complejos ciclos térmicos en la zona cercana a la soldadura. Los ciclos térmicos producen tasas de enfriamiento que determinan la estructura del metal. Las propiedades mecánicas dependen del tipo de estructura formada.

Estas simples realidades hacen ver la importancia de relacionar las técnicas de soldadura con las tasas de enfriamiento.

to en la zona cercana a la soldadura, de manera que sea posible predecir las propiedades mecánicas a partir de la técnica empleada.

Para resolver el problema, es necesario hacer notar que los siguientes factores afectan los ciclos térmicos y por tanto las tasas de enfriamiento asociadas a la soldadura.

- 1.- La cantidad de calor que la fuente de calor en movimiento provee por unidad de longitud.
- 2.- La forma y tamaño del material base
- 3.- La temperatura inicial del material base
- 4.- La historia térmica del material base



Rosenthal (9) y otros investigadores estudiaron este tópico sobre una base matemática. Rykalin (10) fue el primero en combinar los efectos de calor entrante, temperatura a la cual la tasa de enfriamiento es medida en un coeficiente teórico que determina la respuesta térmica de la soldadura.

Este coeficiente nos permite determinar si la placa se comporta como semifinita, fina o intermedia. La misma técnica fue más tarde discutida por Jhavery (8) en una forma alternativa.

El procedimiento de Rykalin, para calcular la tasa de en -

friamiento en el cordón soldado como se describe a continuación.

El parámetro adimensional W ha sido definido por Rykalin como la razón de la tasa de enfriamiento del caso actual a la tasa de enfriamiento para un cuerpo semifnito, por tanto,

$$W = \frac{R_T \text{ G/S}}{2\pi k(T_V - T_O)^2} \quad (7)$$

donde:

R_T = Tasa de enfriamiento, °F/S

k = conductividad térmica, $\frac{\text{BTU}}{\text{pulg-seg.}^\circ\text{F}}$

T_V = temperatura a la cual R_t es medida, °F

T_O = temperatura inicial de la placa, °F

Q = flujo de calor en la placa a partir de la fuente, BTU/seg

S = Velocidad de la fuente de calor, pulg/min

Usando una solución precisa para un cuerpo de espesor finito y solucionando para la tasa actual de enfriamiento R_t , Rykalin calculó W para varias condiciones.

La relación existente entre W y B es:

$$B = \frac{Q/S}{\pi/2T \text{ CY}(T_R - T_O)^2} \quad (8)$$

donde:

$$(NA)_{\text{Máx}} = \frac{DI}{KE (T_{MP} - T_0)} \quad (Q/V) \quad (13)$$

donde:

DI = Difusidad térmica, $\frac{\text{BTU}}{\text{pulg}^2 \cdot \text{seg} \cdot \text{°F}}$

E = base de los logaritmos naturales

T_{MP} = temperatura de fusión del acero

Combinando esta ecuación (13) con la ecuación Rykalin (7) para los valores (Q/V), una relación matemática entre el área del cordón y la tasa de enfriamiento R_T se puede determinar:

$$R_T = \frac{W 2 \pi DI (T_F - T_0)}{(NA) E (T_{MP} - T_0)} \quad (14)$$

Esta ecuación nos muestra una relación inversa entre la tasa de enfriamiento R_T y el área del cordón NA y sugiere la importancia que tiene el área del cordón en las propiedades de la zona afectada por el calor.

La figura 25 nos muestra la relación entre tasas de enfriamiento calculadas usando la ecuación (14) y tasas de enfriamiento medidas versus el área del cordón.

Jackson (7) propone una ecuación empírica basada en abundantes datos experimentales que nos permite establecer una relación entre el área del cordón y los parámetros de soldadura

$$NA(\text{pulg}^2) = 11.22 \times 10^{-7} \frac{I^{1.55}}{Sppm^{0.903}} \quad (15)$$

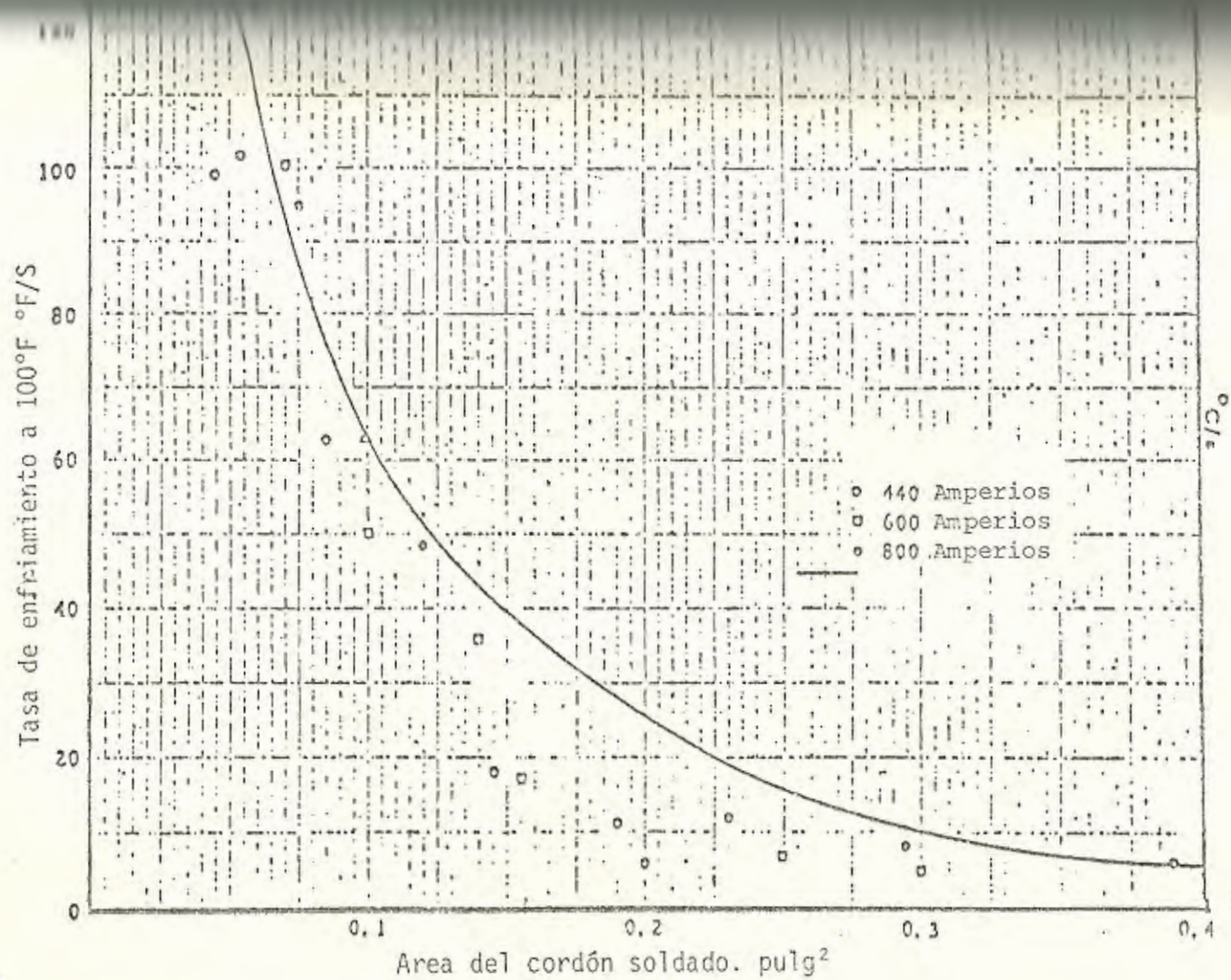


FIGURA N° 25

Tasa de enfriamiento en función del área del cordón soldado

Esta relación ha probado ser válida para los procesos SMAW, GMAW y SAW. La figura 26 muestra el monograma para calcular la solución a esta ecuación.

Collins ha demostrado que la ecuación (11) da similares resultados a la ecuación teórica (9) basada en la ecuación Rosenthal como se muestra en la figura 27. Dado que el área de la sección transversal de la soldadura es una indicación del calor entrante a la placa, debe predecir por lo tanto la tasa de enfriamiento.

La ecuación (10) y figura 25 relacionan la tasa de enfriamiento y el área de la sección transversal de soldadura.

Recientes investigaciones han estudiado el efecto de las tasas en la soldadura. Una variedad de procesos fueron utilizados para depositar cordones en el acero. La relación entre la máxima dureza en la ZAC asociada con la velocidad de enfriamiento del metal depositado fue medido. La relación entre la máxima dureza en la ZAC y el calor entrante (joule/unidad longitud) se muestra en la figura 28 y fue errático, aunque los datos indican un patrón de descenso de la dureza a medida que el calor entrante se incrementa. Obviamente, la eficiencia de transferencia de energía para estos datos no fue uniforme. Como se muestra en la figura 29 el área del cordón es una mejor medida del calor efectivo entrante

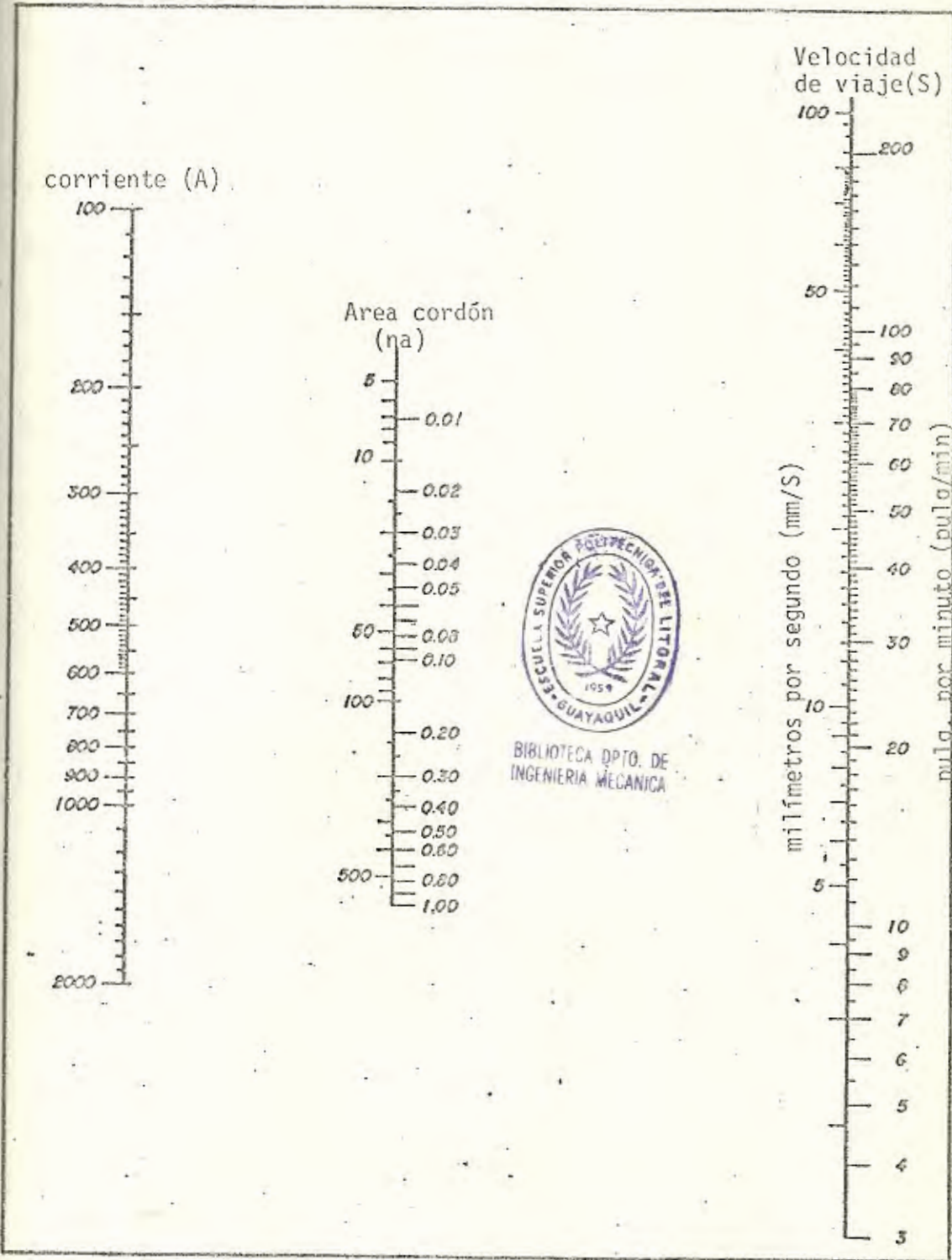


FIGURA Nº 26

Carta que permite determinar área de cordón para valores comunes de los parámetros de soldadura

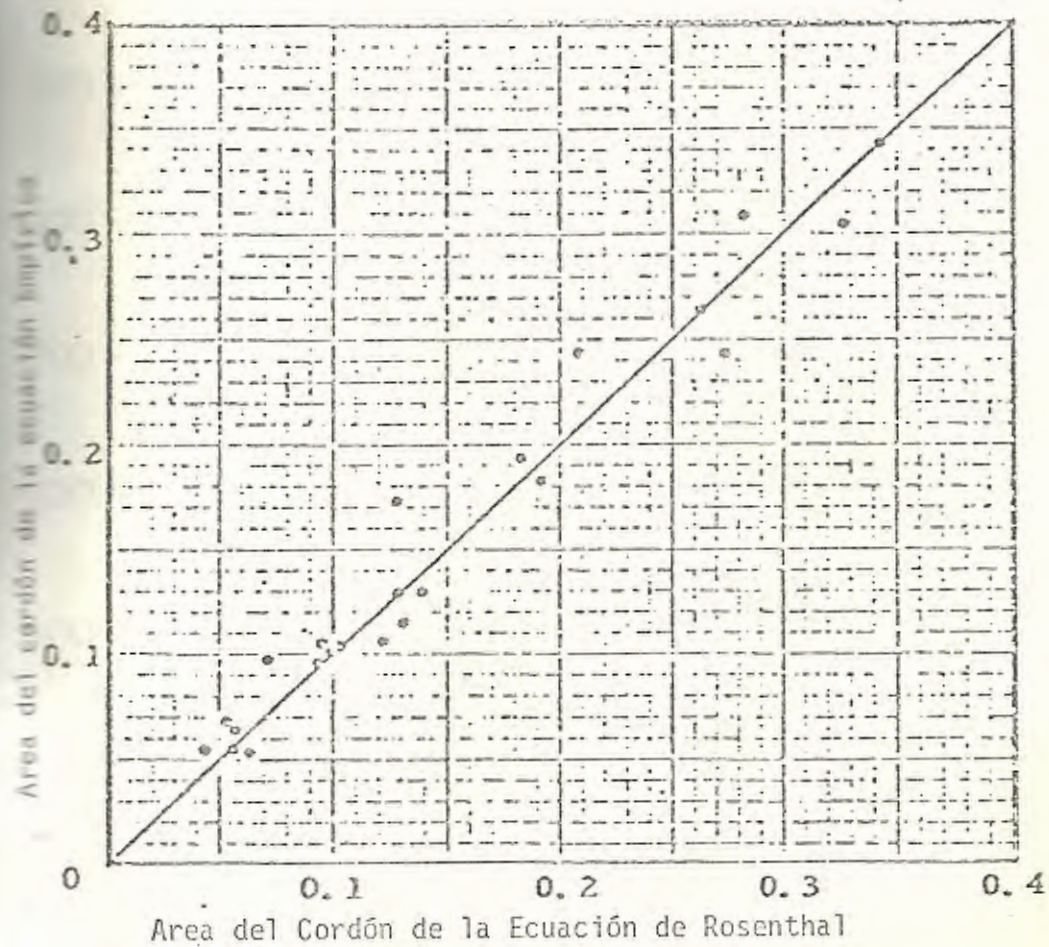


FIGURA Nº 27

Correlación entre el área del cordón determinada por una ecuación teórica y el área del cordón determinada por una ecuación empírica.

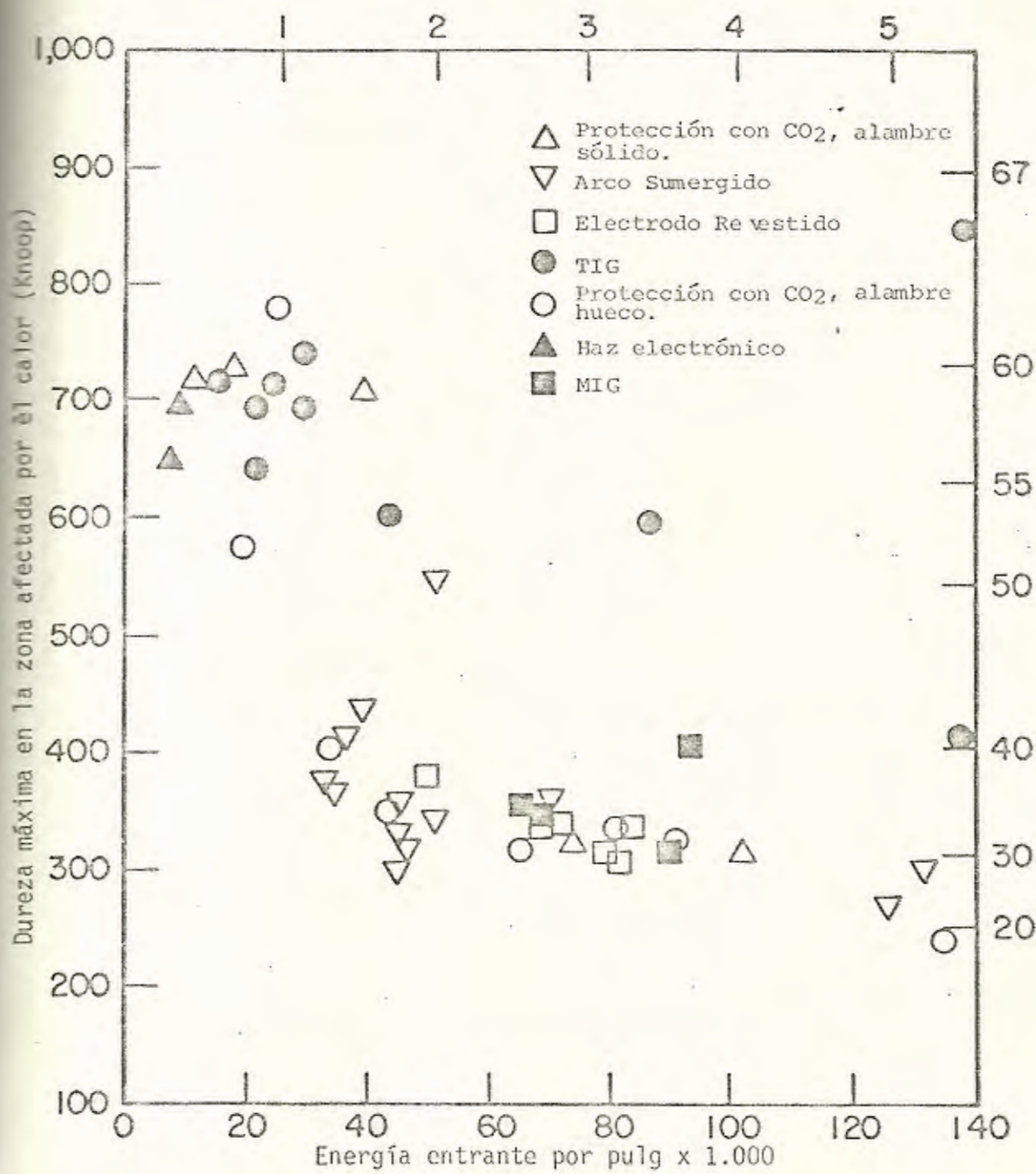


FIGURA N° 28

Efecto de la energía entrante en la dureza máxima de la ZAC.

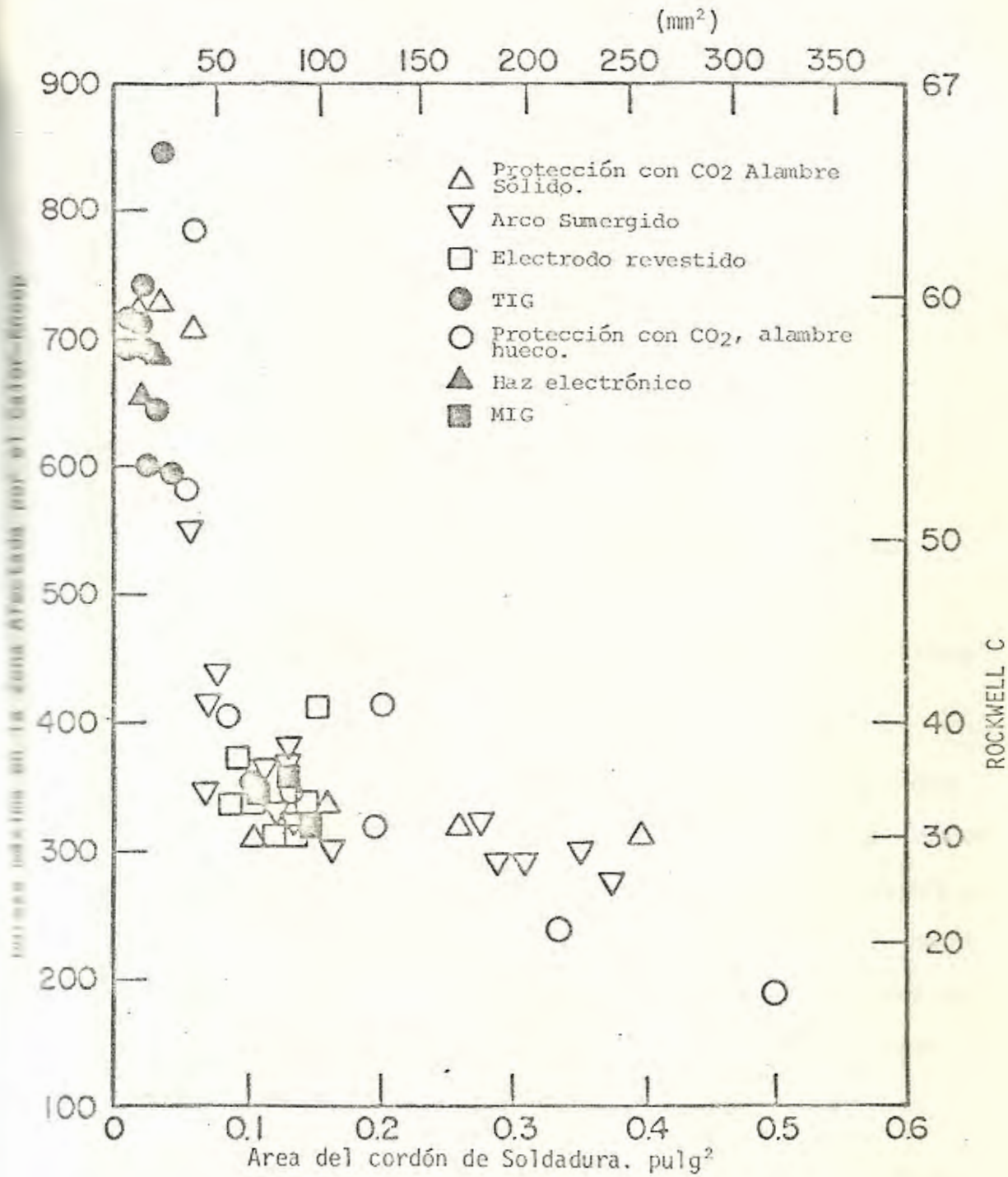


FIGURA N° 29

Efecto del área del cordón en la dureza máxima de la ZAC.

que influencia los efectos térmicos asociados a la ZAC. La máxima dureza en la ZAC versus el área transversal del cordón revelan un patrón preciso. Este es un concepto fundamental que permite controlar las propiedades mecánicas del metal soldado.

En un estudio de la relación de la técnica de soldadura al área del cordón se halló que la tasa de enfriamiento dependía principalmente de tres factores:

- 1.- El calor entrante medido por el área de la sección transversal de soldadura.
- 2.- La temperatura del metal base.
- 3.- El ancho de la sección del metal base y las dimensiones de la junta.

Pre calentamiento y alta energía calorífica entrante promueven bajas tasas de enfriamiento, así como sección de gran espesor producen enfriamiento rápido. La figura 30 muestra el efecto del pre calentamiento y el área de la soldadura en el enfriamiento de la ZAC. Figura 31, en la que se muestra el efecto de los procesos de soldadura y el área del cordón soldado en la tasa de enfriamiento.

Como muestra la figura 32 el límite elástico se incrementa cuando la tasa de enfriamiento se incrementa.

De los conceptos que se han presentado se puede observar la relación existente entre el área del cordón de soldadura y las propiedades mecánicas de la ZAC. Esta relación nos permitirá controlar las propiedades mecánicas de la soldadura, por medio del control adecuado de los parámetros que controlan las características del cordón soldado.

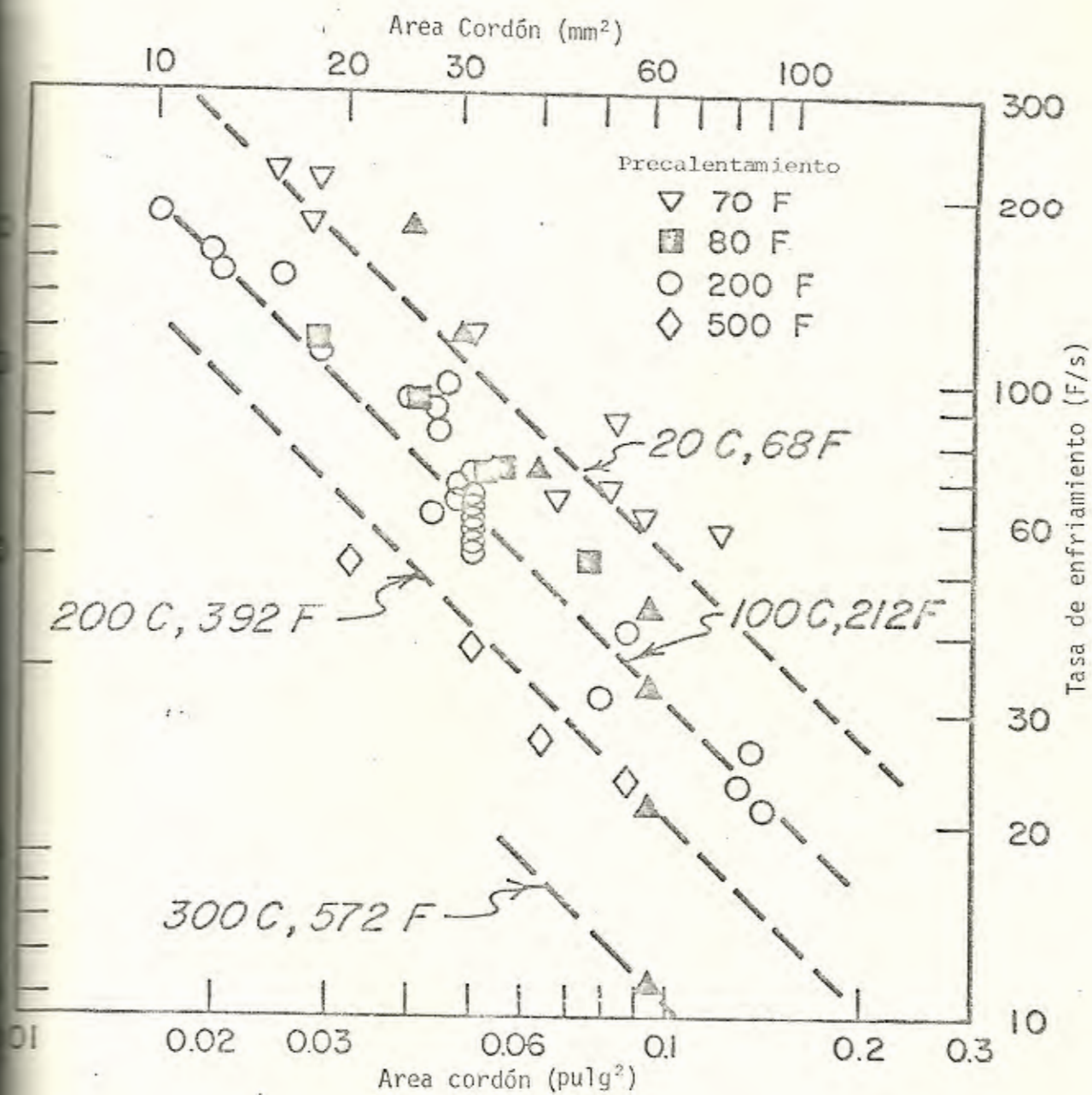


FIGURA Nº 30

Influencia del área del cordón y del precalentamiento en la tasa de enfriamiento

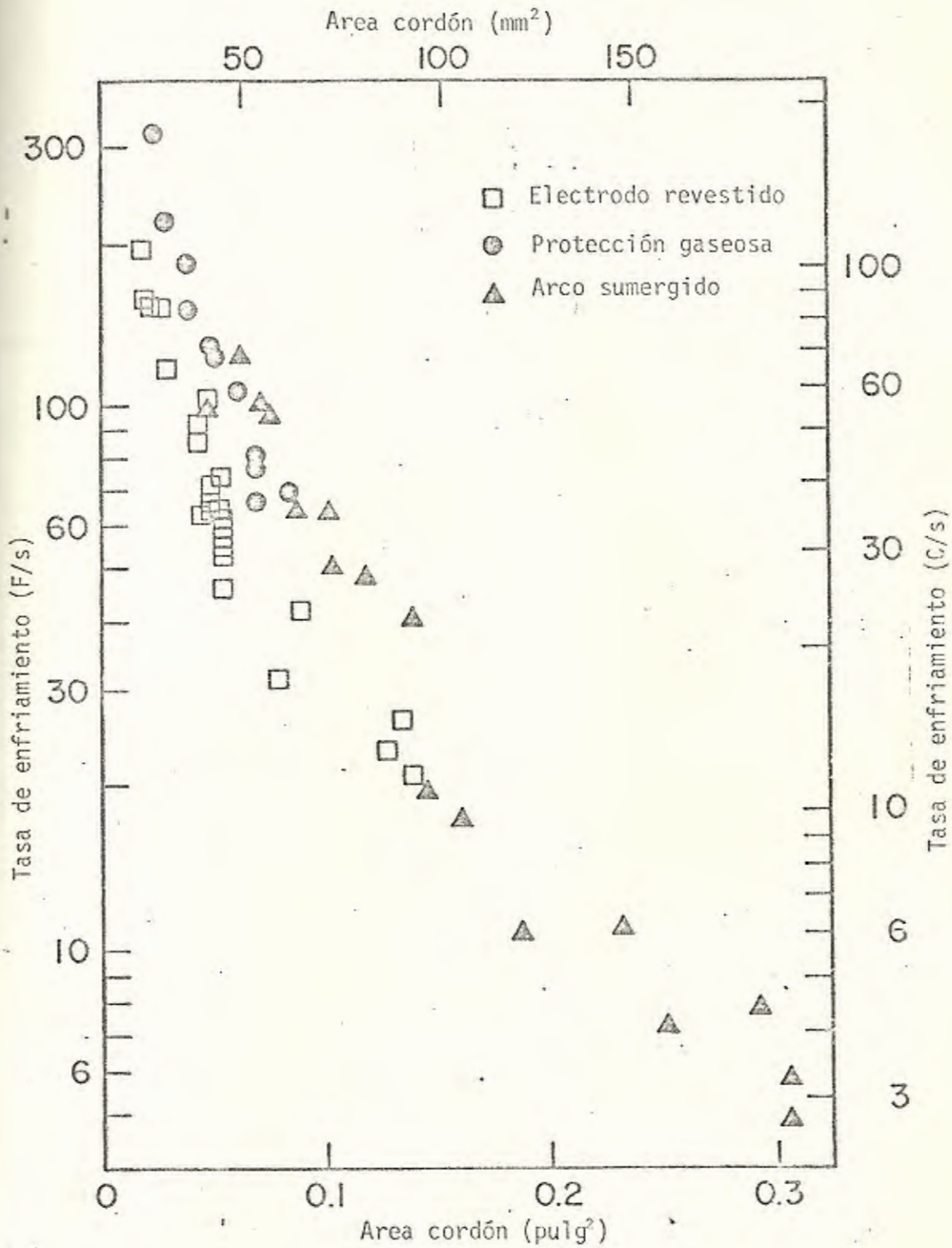


FIGURA N° 31

Influencia del área del cordón
en la velocidad de enfriamiento.

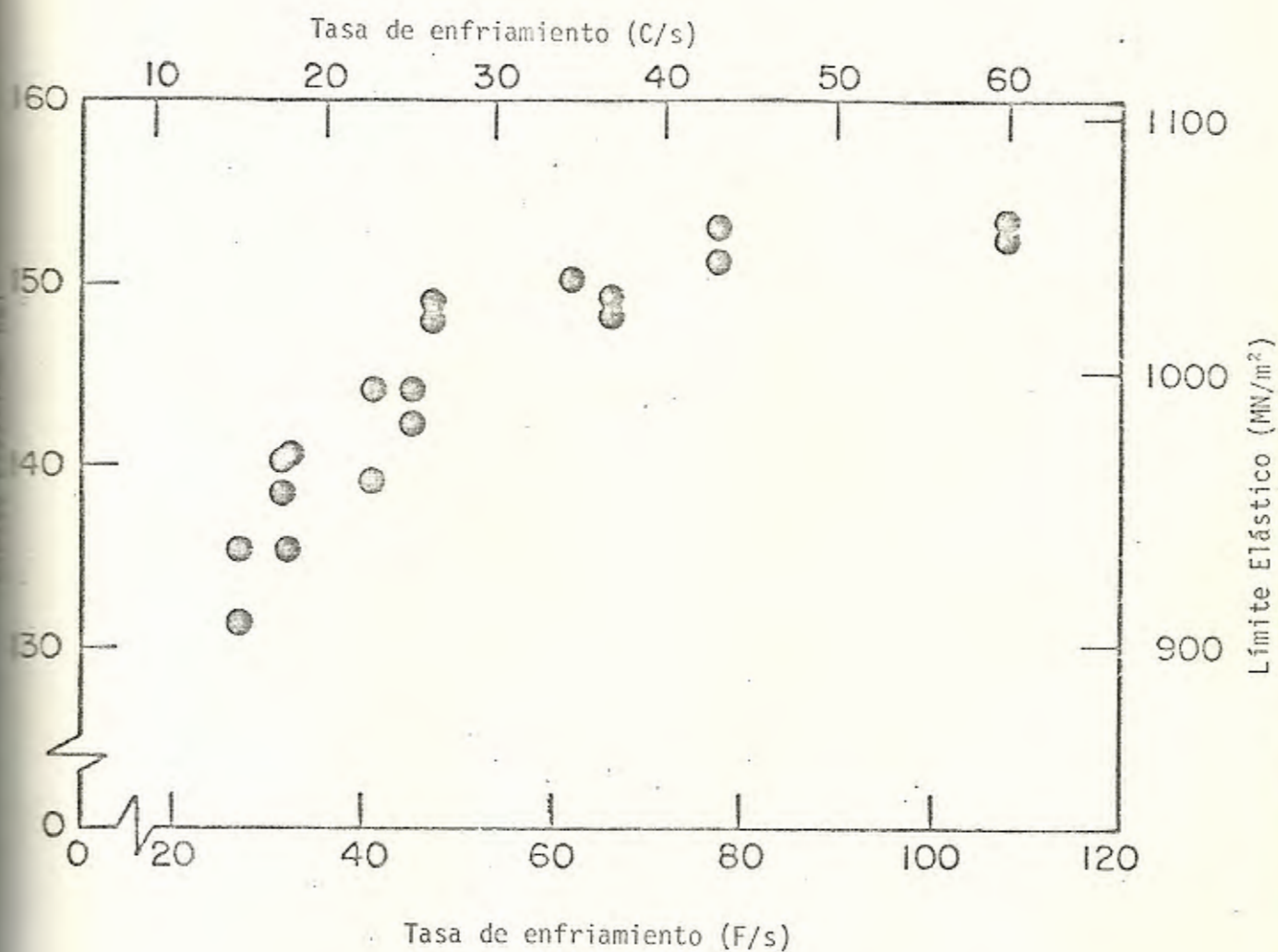


FIGURA Nº 32

Influencia de la tasa de enfriamiento
en el Límite Elástico

C A P I T U L O I I I

TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1 OBJETIVO

El objetivo de la investigación que a continuación se expone es:

- a) estudiar el efecto que produce el contenido calórico por unidad de longitud del área del cordón soldado, en las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor, siendo esta área función de la corriente de soldadura y de la velocidad con que se mueve la fuente del arco eléctrico;
- b) comparar la teoría del contenido calórico suministrado con la teoría del área del cordón soldado, para el control de las propiedades mecánicas de la soldadura.
- c) con el propósito de que el trabajo resultara de carácter general se emplearon diversos procesos de soldadura en las pruebas realizadas en el acero AISI 1045.

3.2 PLAN DE INVESTIGACION

Para poder cumplir con los objetivos de esta investigación se realizaron dos tipos de ensayos: deposiciones de un solo cordón de soldadura sobre platinas del metal seleccionado, y la creación de

uniones soldadas por medio de pases múltiples.

En el primer tipo de ensayo, es decir, cuando se depositaron cordones individuales sobre platinas del metal seleccionado, se siguieron dos líneas generales. Los primeros 7 cordones depositados se hicieron manteniendo constante la cantidad de calor suministrada por la fuente. Los siguientes 6 cordones se depositaron con diferentes valores de energía suministrada por la fuente.

El propósito de mantener constante la cantidad de calor suministrada fue para permitir comparar las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor y establecer si éstas permanecían constantes o se variaban.

Dado que al depositar los siguientes 6 cordones se varió la corriente de soldadura y la velocidad de la fuente, las áreas de los cordones depositados varió, permitiendo así establecer una relación entre las áreas de los cordones y las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor.

En los 13 cordones mencionados la evaluación de las propiedades de la ZAC se realizó por medio de medir los cambios que se presentaban en la dureza de la ZAC realizando indentaciones a lo largo y ancho de esta zona, encontrando la máxima dureza, tal como se muestra en la figura 33.

El estudio se completaba realizando un análisis metalográfico del cordón depositado y de las zonas aledañas.

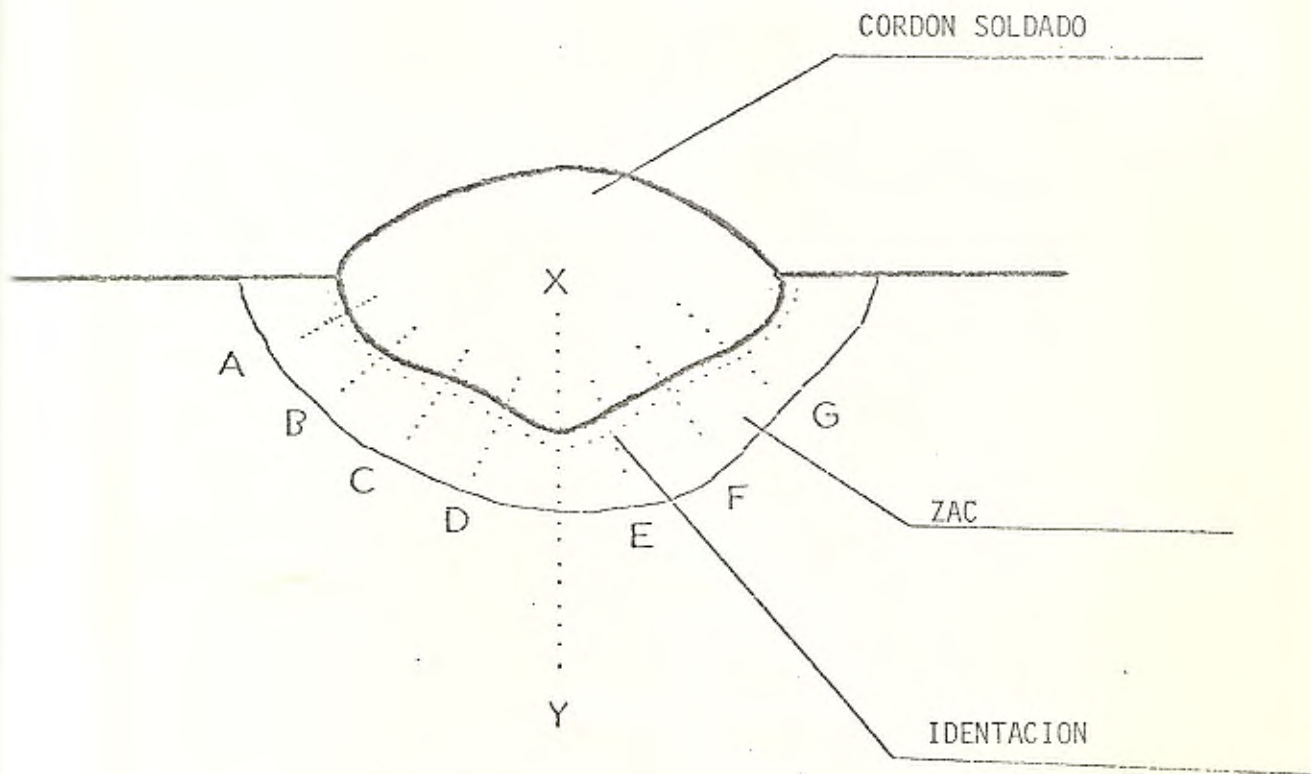


FIGURA Nº 33

Procedimiento seguido para hallar
la máxima dureza en la ZAC.

El segundo tipo de ensayo consistió en la formación de uniones soldadas por medio de pases múltiples, las uniones soldadas fueron 7 hechas con 2 procesos de soldadura: electrodo revestido, arco sumergido. A seis de estas uniones se las precalentó a 350°F, temperatura recomendada por la composición química de este tipo de acero, el propósito de este precalentamiento fue disminuir la velocidad de enfriamiento en la zona afectada por el calor y estudiar las propiedades mecánicas de la ZAC bajo estas condiciones; la séptima unión se realizó sin precalentamiento y con parámetros de soldadura idénticos a una de las uniones precalentadas a fin de poder realizar comparaciones.

A cada una de estas uniones se les tomó radiografías para ver la calidad de las mismas y se hicieron ensayos de tracción de la unión y doblado con las mismas metas.



La zona importante desde el punto de vista de esta investigación, la constituyó la ZAC, y sobre ella se realizaron mediciones de dureza Knoop, dada la variación de dureza en cada punto de la ZAC, estudios metalográficos y ensayos de impacto.

3.3 MATERIAL Y EQUIPO A UTILIZARSE

El material utilizado en este trabajo fue acero ASSAB 760 con composición aproximada a clasificación AISI 1045 C, acero ordinario al carbono, fácilmente maquinable, en estado de recocido, que se caracteriza por tener: excelente maquinabilidad, buena resistencia

a la abrasión, buena resistencia mecánica.

El espesor de las platinas fue de 7/8" (22 mm).

Para los cordones hechos con el proceso de arco sumergido se utilizó como fuente de poder un rectificador de marca ESSAB modelo LAD800, que es un rectificador de tensión constante para soldadura automática bajo escoria. Está compuesto principalmente de un transformador trifásico, un puente-rectificador, una bobina de inductancia y de los órganos de mando suministra corriente continua con una caída de tensión de 1,1 voltios para 100 amps. La regulación se hace en 2 escalas, cada una con 10 posiciones características técnicas

<u>Capacidad</u>	<u>Factor de Marcha</u>	<u>Tensión en Vacío</u>
800 amp, 44 volts.	80%	16 a 54 V.
710 amp, 44 volts.	100%	16 a 54 V.

Esta fuente de poder se utilizó con una máquina automática A-6, máquina con la que se puede establecer la velocidad de movimiento de arco eléctrico, y velocidad de alimentación del electrodo. Tiene además un panel en el cual además de los órganos de mando se encuentran tres tableros donde se puede leer: amperaje, voltaje y velocidad de avance del arco eléctrico.

Como electrodo se usó bobinas de electrodo OK AUTROD 12.10 cuya determinación AWS es EL 12, que es un electrodo encobrado, para

protegerlo de la corrosión, sin alear para la soldadura por arco sumergido.

Como fundente se utilizó OK FLUX 10.40. Características técnicas tanto del fundente como del electrodo se pueden hallar en la Tabla I.

De los datos técnicos del electrodo y fundente se puede concluir que la combinación de OK AUTROD 12.10 y OK FLUX 10.40 producen metal de soldadura cuya composición es:

<u>Carbono %</u>	<u>Silicio %</u>	<u>Manganeso %</u>
0.1	0.5	0.9

En el proceso con electrodo revestido se utilizó un generador de corriente continua, de marca HOBART, cuya característica es de proporcionar corriente constante. El proceso de soldar fue manual aunque para garantizar una velocidad constante de movimiento se adaptó un apoyo al cabezal de un torno, de manera que al instante de soldar, el soldador apoye su mano en ese artefacto y se garantice una velocidad constante de movimiento del arco, velocidad que se podía establecer con precisión.

Los electrodos que se usaron en este proceso fueron electrodo 7018, mantenidos en un recipiente hermético para evitar que penetre en ellos la humedad y mantenidos en un horno a 60°C antes de usarse.

Dado que la máquina usada en el proceso de electrodo revestido no

T A B L A ICARACTERISTICAS TECNICAS DEL FUNDENTE
Y DEL ELECTRODO USADOS EN EL PROCESO DE ARCO SUMERGIDO

Análisis aproximado del metal depositado para diferentes combinaciones:

OK Autrod 12.10/OK Flux	10.40	10.61	10.70	10.71	10.80	10.81
Carbono %	0,1	0,1	0,07	0,1	0,1	0,1
Silicio %	0,5	0,2	0,3	0,1	0,5	0,5
Manganeso %	0,9	0,6	1,4	0,8	1,2	1,2

Resistencia del metal depositado: valores indicativos para probetas de ensayo:

Combinación OK Autrod 12.10 OK Flux	Límite de tracción N/mm	kp/mm	Límite de rotura N/mm	kp/mm	Resistencia al Impacto J	kpm	Temp. KV
10.40	340	35	470	48	40	4	-20°C
10.61	370	38	490	50	50	5	-20°C
10.70	440	45	540	55	100	10	-20°C
10.71	390	40	490	50	50	5	-20°C
10.80	410	42	530	54	50	5	-20°C
10.81	410	42	530	54	50	5	-20°C

EMBALAJES

Diám. φ mm.	Tipo de Bobina Nº	Peso del Electrodo Kg
2,0	25	15
2,5	7	30
2,5	17	1000
3,0	8	30
3,0	9	15
3,0	12	10
3,0	17	1000
4,0	8	30
4,0	9	15
4,0	12	10
4,0	16	100
4,0	17	1000
5,0	8	20
5,0	9	15
5,0	17	1000
6,0	8	30
6,0	9	15
6,0	16	100

tenía amperímetro ni voltímetros incorporados, fue necesario usar un voltímetro que fue conectado a los bornes de salida de la máquina para evaluar el voltaje de la misma, un shunt puesto en el cable de salida y un milivoltímetro que medía la caída de potencial en el shunt y por medio de la cual se medía el amperaje de la corriente.

Las platinas usadas en las uniones realizadas se precalentaron a 176.6°C (350°F) en un horno.

3.4 ENSAYOS DE DEPOSICION A REALIZARSE

3.4.1 Variación de los Parámetros de Soldadura en Técnica de un solo pase.-

Dado que el propósito de este trabajo es estudiar el efecto del área del cordón soldado en las propiedades de la zona afectada por el calor, el tamaño de las probetas desempeñan un papel vital en los resultados. Especímenes muy pequeños producirán tasas de enfriamiento muy lentas, mientras que especímenes grandes producirán tasas elevadas que alterarán los resultados a obtenerse. Para espesores mayores a media pulgada, Doschoo (4) encontró que un ancho de 4" en las probetas es suficiente para que las tasas de enfriamiento no se afecten por el tamaño de las probetas. También en la guía de soldabilidad de los aceros (5), se menciona que los efectos metalúrgicos debido al arco pueden alcanzar una distan-

cia máxima de 3 pulgadas. Tomando en cuenta esta información se seleccionó el tamaño de las probetas sobre las cuales se depositarán los cordones, las dimensiones se muestran en la figura 37.

Ninguna de las probetas fue precalentada pues el propósito de esta prueba es analizar el efecto de los enfriamientos rápidos en la ZAC y comparar esos efectos con el área del cordón.

Estos cordones depositados se realizaron por dos métodos: siete de ellos con electrodos revestidos y seis de ellos por arco sumergido.

Los primeros 7 cordones fueron depositados con cantidad de energía liberada por el arco constante, aunque se variaron los parámetros: amperaje, voltaje, velocidad de movimiento del arco eléctrico para que el área del cordón variara. El propósito de este paso fue comparar la teoría de la energía calorífica entrante con la teoría del área del cordón soldado.

Los siguientes seis cordones fueron hechos variando la cantidad de energía liberada por el arco y variando los parámetros de soldadura.

Las secciones transversales utilizadas para estudio fueron

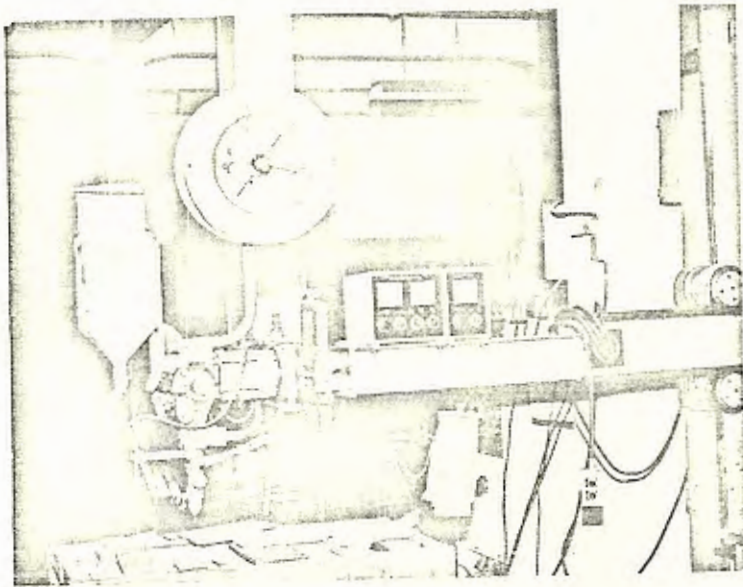


FIGURA Nº 34

Equipo de Soldadura Arco Sumergido

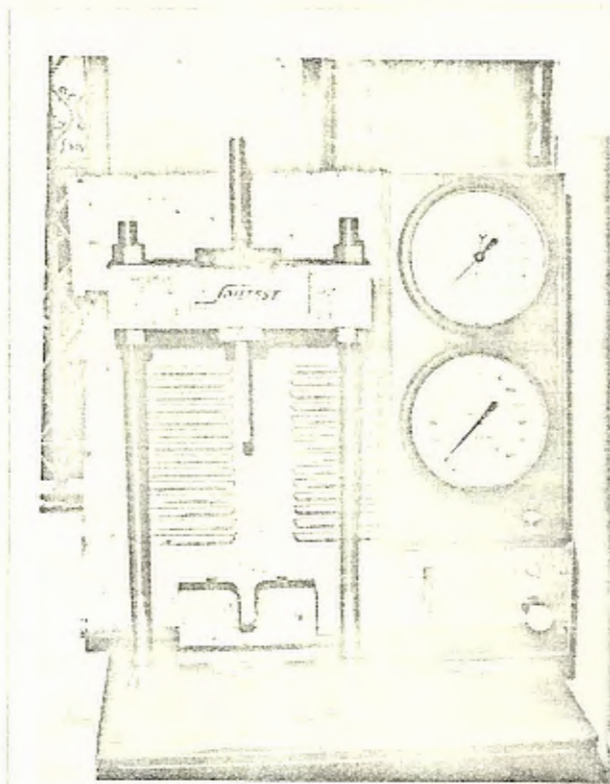


FIGURA Nº 35

Máquina de Doblado

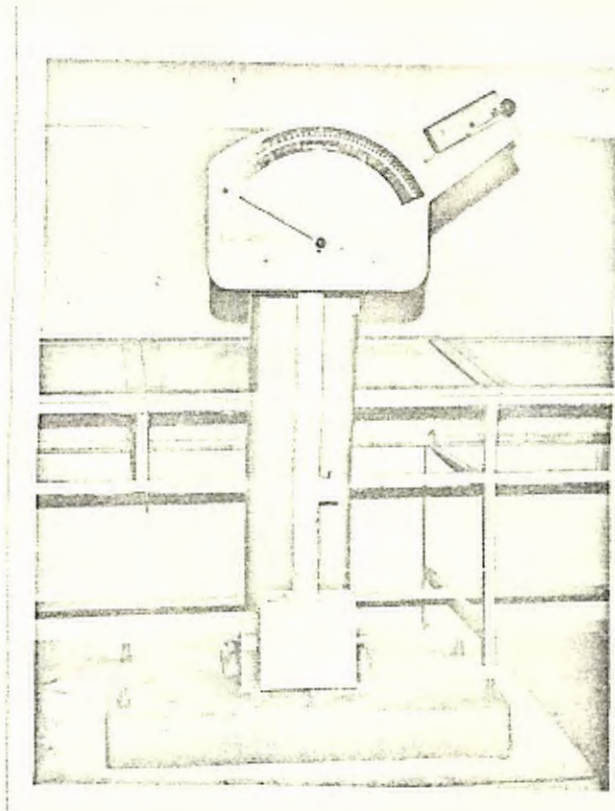


FIGURA Nº 36

Máquina de Impacto

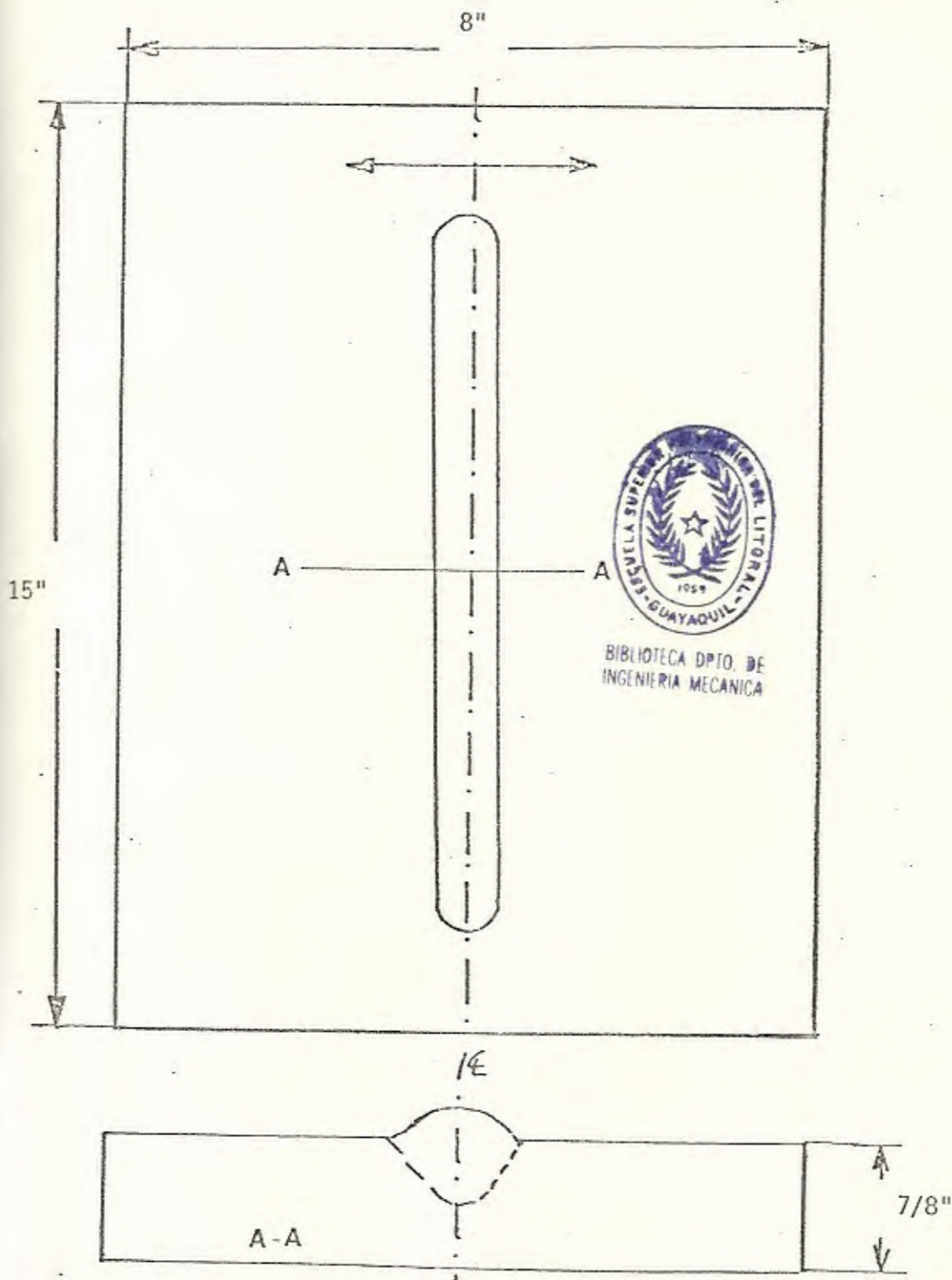


FIGURA N° 37

Dimensiones de las Probetas sobre las que se depositaron los cordones

sacadas de la mitad de las probetas.

En la Tabla II se especifican los valores de energía entrante y de los parámetros de soldadura utilizados para depositar los cordones.

3.4.2 En Técnica de Pases Múltiples

El objetivo de este experimento fue obtener zonas afectadas por el calor uniformes a lo largo del espesor de las platinas de manera que las propiedades de esta zona pudieran ser evaluadas principalmente con ensayos de impacto Charpy y con ensayos de tracción.

Las probetas tuvieron las dimensiones y formas que se ilustran en la figura 38. Cada una de las uniones tuvieron un refuerzo de platina abajo como se hace constar en la figura.

Las uniones mecánicas se hicieron con dos procesos: cuatro con arco sumergido y tres con electrodo revestido.

Procesos de soldadura con protección gaseosa no se pudieron realizar en este paso ni con los cordones depositados por la falta de electrodos adecuados a estos procesos y por la carencia de gas para protección del arco.

A una de las uniones con arco sumergido se la realizó sin precalentamiento y manteniendo los mismos parámetros de otra

T A B L A II

ESPECIMEN	SUMINISTRO DE CALOR (Kg/plg)	CORRIENTE (Amp)	VOLTAJE (Volts)	VELOCIDAD (mm/s)
D 1 AS	44.42	550	35	11.0
D 2 AS	64.16	550	35	7.61
D 3 AS	42.85	500	30	8.88
D 4 AS	163.6	500	30	5.5
D 5 AS	97.46	550	35	11.85
D 6 AS	18.00	300	30	12.69
D 1 ER	24.43	112	24	2.79
D 2 ER	24.70	121	24	2.98
D 3 ER	29.12	126	22	2.45
D 4 ER	29.11	123	20	2.14
D 5 ER	26.98	95	24	2.14
D 6 ER	27.62	125	20	2.30
D 7 Er	27.73	110	20	2.01

DXAS = Arco Sumergido; Deposición de Cordón

DXER = Electrodo Revestido, Deposición de Cordón

ENERGIA ENTRANTE Y PARAMETROS DE SOLDADURA

EMPLEADOS PARA LA DEPOSICION DE CORDONES

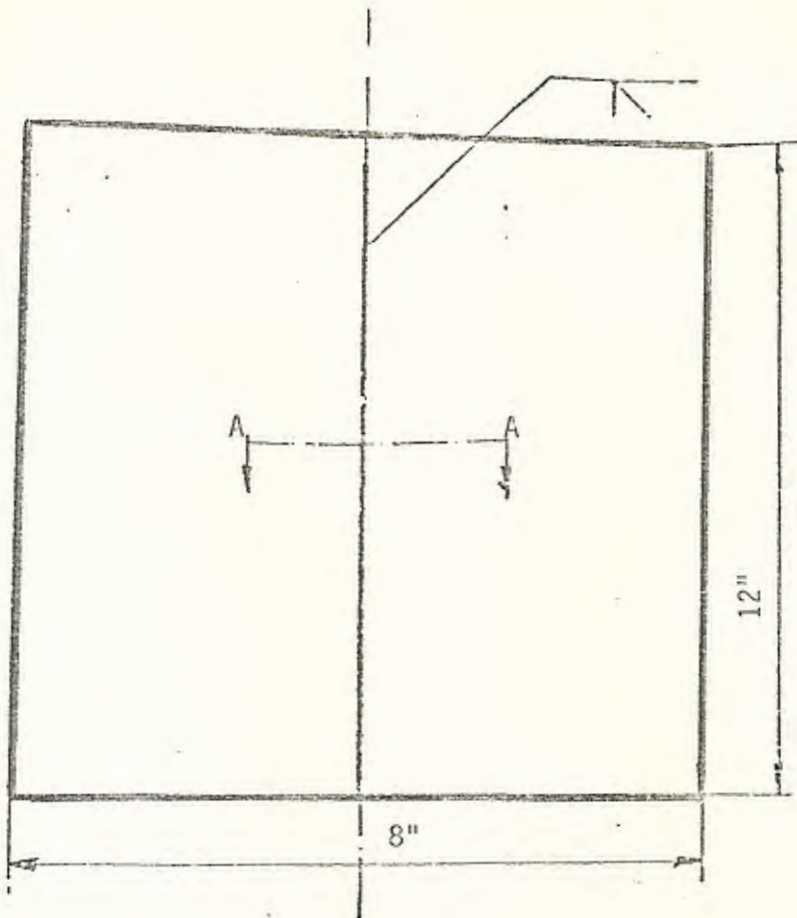
que si fue precalentada para observar el efecto del precalentamiento.

El propósito de hacer uno de los bordes de las probetas a soldarse a 90° fue crear una ZAC uniforme que se preste para las pruebas a realizarse.

En el proceso de electrodo revestido, el soldador puso la mano sobre un apoyo creado en un torno a fin de mantener la velocidad de avance del electrodo constante. Se midió el tiempo que demoraba al depositar cada cordón y conociendo el espacio recorrido se obtenía la velocidad con este mismo proceso los datos como voltaje y amperaje se obtuvieron por los métodos descritos en la sección 3.4.1.

En el proceso de arco sumergido las variables se establecieron con los mandos ubicados en el panel de control de la máquina A-6 y sus valores se pudieron leer en los tableros ubicados en el mismo panel.

Para evitar distorsión excesiva se tomaron precauciones como: sujetar las dos platinas a soldarse a -5° , ángulo con el que se compensa la distorsión que sufrirá la unión. Se fijaron por medio de pernos los lados exteriores de las platinas a soldarse para limitar de esta manera la distorsión que pudiera sufrir el material.



DETALLE A

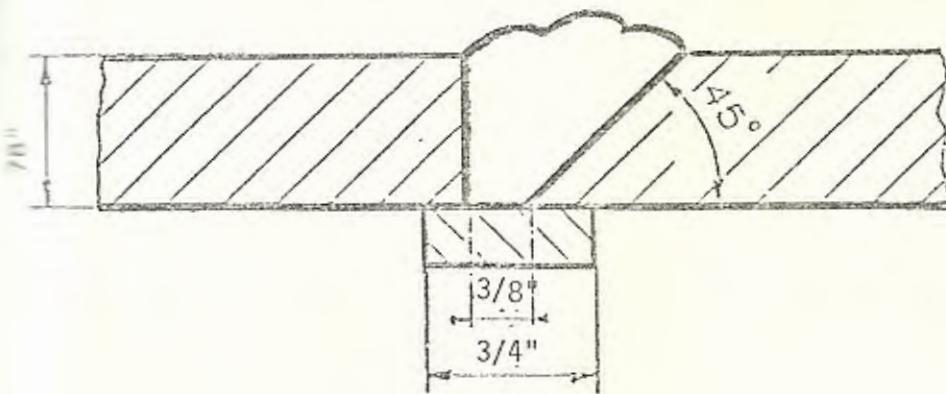


FIGURA N° 38

Soldadura de las Uniones Mecánicas.

Antes de realizar los pases de raíz se limpió la superficie de las probetas a soldarse y soporte a fin de quitar de ellos suciedad tales como óxidos y otros contaminantes, después de cada cordón se limpió cuidadosamente cada superficie a fin de que al depositar el siguiente cordón no quedara escoria incluida.

Dado que en los extremos de las uniones soldadas la transferencia de calor no es uniforme, no se utilizó nunca a fin de hacer probetas de evaluación de propiedades mecánicas, material que se encontraba a menos de 2 pulg de los extremos.

En el proceso por electrodo revestido los electrodos usados fueron E7018 ϕ 5/32" para las probetas de quinta y sexta y E7018 ϕ 1/8" para la probeta de séptima.

Los valores de corriente, voltaje y velocidad de la fuente aparecen en la tabla III.

3.5. PROPIEDADES MECANICAS DE LA UNION SOLDADA

3.5.1 Dureza

A cada una de las 7 uniones mecánicas, se le midió la dureza en cada una de las fases formada por la soldadura. El método empleado para medir fue el de microdureza Knoop, ya que la distancia entre las zonas formadas en la soldadura y sus respectivas fases es pequeña y otros métodos para medir

T A B L A III

ESPECIMEN	CORRIENTE (Amp)	VELOCIDAD (mm/S)	VOLTAJE (Volts)	MEDIDA na mm ²	CALOR (kj/pg)	PASES
EM 1 AS	400	7.19	30	58.16	42.35	9
EM 2 AS	400	11.85	30	39.56	25.71	14
EM 3 AS	400	7.00	30	66.59	43.63	9
EM 4 AS	400	11.70	30	39.60	25.71	14
EM 5 ER	180	3.38	25	33.94	33.75	15
EM 6 ER	180	3.25	25	32.43	33.60	15
EM 7 ER	150	5.29	25	18.16	18.00	25

EMXER = Electrodo revestido; ensamble mecánico

EMXAS = Arco sumergido, ensamble mecánico

ENERGIA ENTRANTE Y PARAMETROS DE SOLDADURA

EMPLEADOS PARA FORMAR UNIONES MECANICAS

dureza hubieran dado resultados inexactos. La carga empleada fue 1000 gr. y el lente empleado 20 x, se hicieron múltiples mediciones desde el cordón soldado hasta el metal base pasando por la zona afectada por el calor. Este proceso se repitió en diversos lugares de la junta mecánica para establecer valores promedios.

Los resultados se hallan en la tabla VI.

3.5.2 Impacto

El ensayo de impacto mide la energía consumida en la rotura de una probeta entallada y de forma normalizada. De cada una de las uniones soldadas se obtuvieron 6 probetas, las cuales fueron rotas a distintas temperaturas: 30, 20, 10, 0, -10, -20°C. En la creación de las probetas se siguieron las normas de la ASTM E-23-72.

Las probetas se hicieron en tal forma que sobre la zona afectada por el calor se hicieron las entallas que van ubicadas en el centro de cada probeta. En esta forma, se hizo posible comparar el efecto del área del cordón soldado en la resiliencia de la zona afectada por el calor.

La figura 39 ilustra la posición de donde se obtuvieron las probetas y las dimensiones de las mismas.

En la tabla VIII se encuentran los resultados de este ensayo.

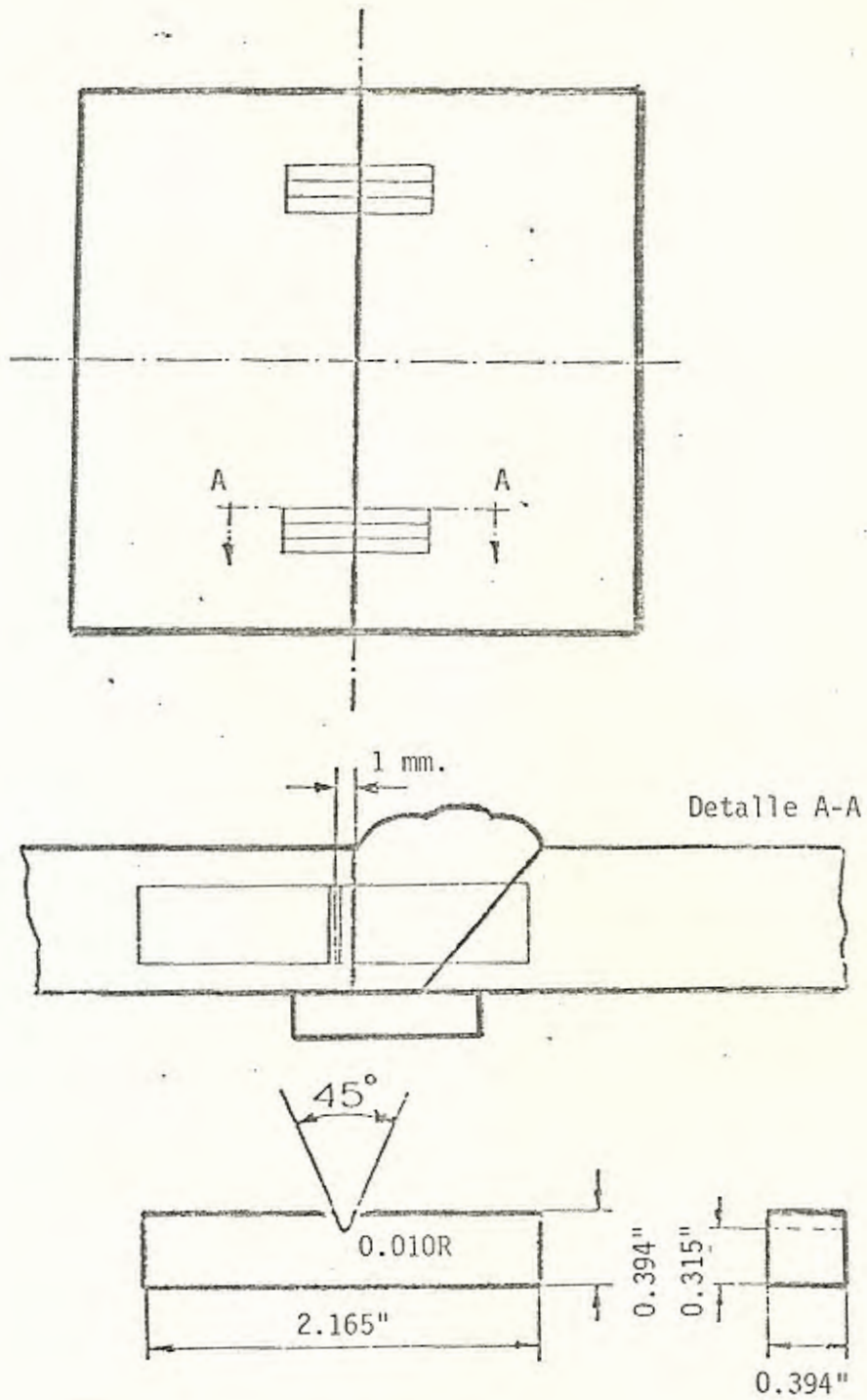


FIGURA N^o 39

Dimensión y Localización
de los Especímenes de Impacto.

Las bajas temperaturas de las probetas se obtuvieron al diluir hielo seco en acetona.

Además de las probetas correspondientes a las uniones se incluyeron 6 probetas correspondientes al material base con fines comparativos.

3.5.3 Doblado

El ensayo de doblado en juntas soldadas tiene por objeto revelar defectos, o proveer una medida de la ductilidad de la junta.

Existen varios tipos de pruebas de doblado. Las pruebas de doblado realizadas durante este trabajo se realizaron empleando probetas hechas en dirección transversal al eje de soldadura. El tipo de ensayo que se realizó se llama ensayo de doblado guiado y de cada unión se sacaron 2 especímenes: de raíz y de cara, respectivamente. La forma como se obtienen estas probetas con sus dimensiones y los artefactos empleados para doblar las probetas se muestra en las figuras 40 y 41, estando estas dimensiones de acuerdo con la norma ASTM E-190.

Los especímenes de cara se colocan en tal forma que la cara o sección ancha de la unión soldada al doblarse queda convexa, es decir sujeta a tensión. Cuando se trata de especíme-

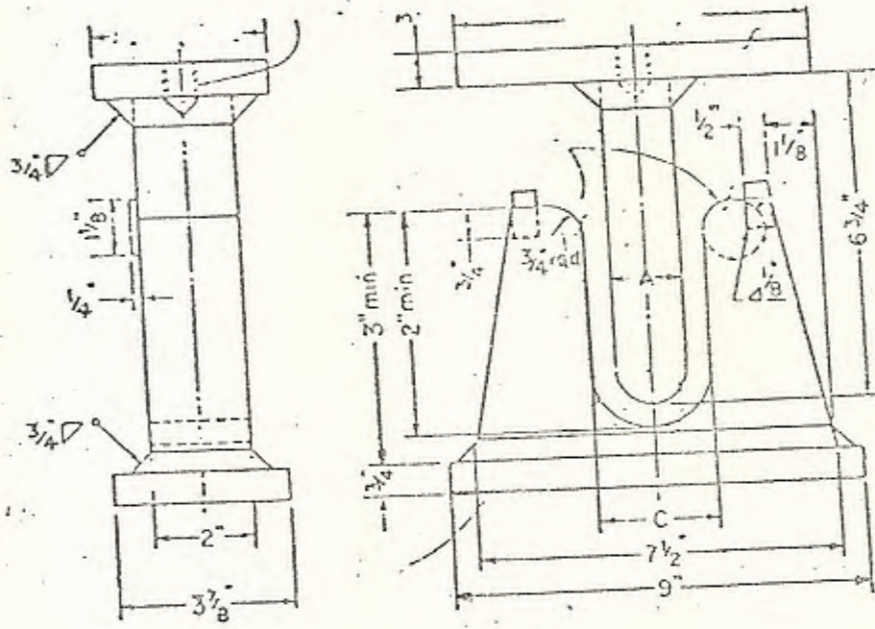


FIGURA N° 40

Instrumentos usados en el Ensayo de Doblado.

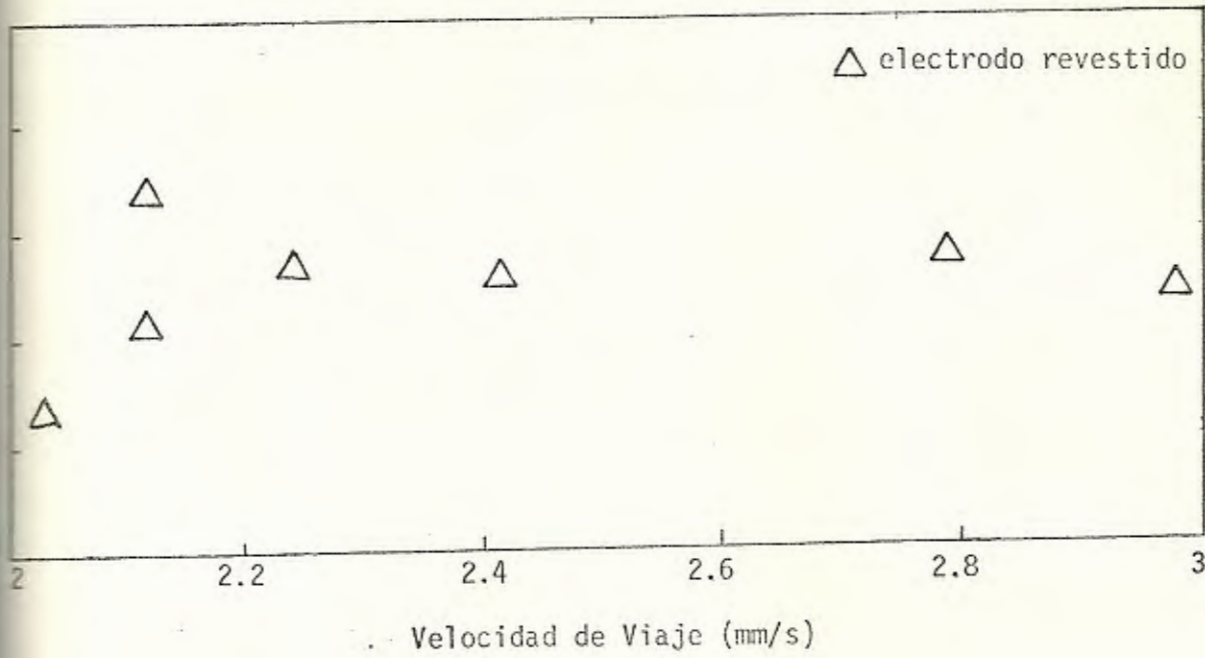


FIGURA N° 51

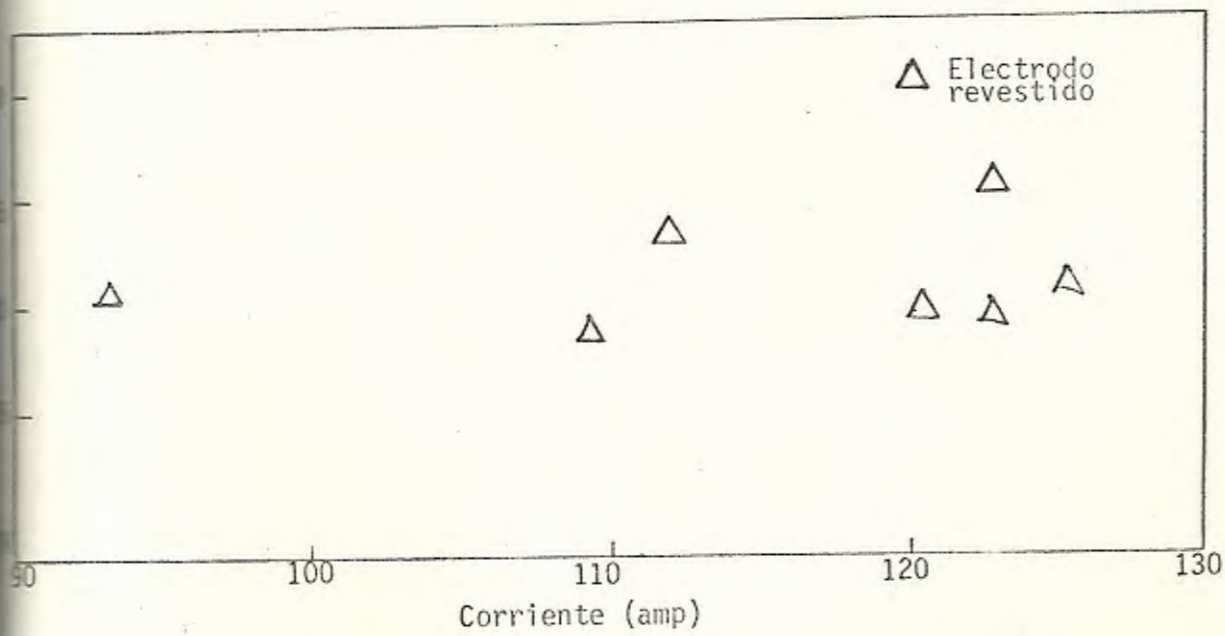


FIGURA N° 52

Relación entre el área del cordón soldado y velocidad, corriente para una energía liberada por el arco de 1 Kj/mm.

En el gráfico se observa que en el rango comprendido entre 90 y 110 amp. el ancho de la ZAC decrece y que respectivamente alrededor de los 122 amperios este ancho se incrementa para decrecer nuevamente a mayores valores de amperaje.

Una posible razón para este salto brusco se encuentra en el modo de transferencia del material de aporte. El rango de amperaje recomendado para los electrodos de 1/8" de diámetro utilizado es de 110 a 150 amp; con estos amperajes el arco es fácil de manipular y el modo de transferencia del material de aporte es de rocío. A amperajes más bajos el modo de transferencia es globular, por lo que gotas de metal con un diámetro aproximado al diámetro del electrodo y en el extremo del mismo, se forman, y crecen hasta determinado tamaño después de lo cual pasan al material soldado. En transferencia globular hay una pérdida sustancial de calor por el lento paso de la gota a la placa. En transferencia de rocío, pequeñas gotas alcanzan la placa a gran velocidad y por tanto tienen mayor capacidad para transmitir calor.

Las figuras 55 y 56 verifican el resultado de las figuras 53,54, la razón del área del cordón al área de la ZAC se ha graficado versus el amperaje y velocidad de fuente.

Nuevamente alrededor de los 120 amperios se produce un salto brusco, que se puede explicar como un cambio en el modo de transferencia del material de aporte. Por lo tanto, el modo de transfe-

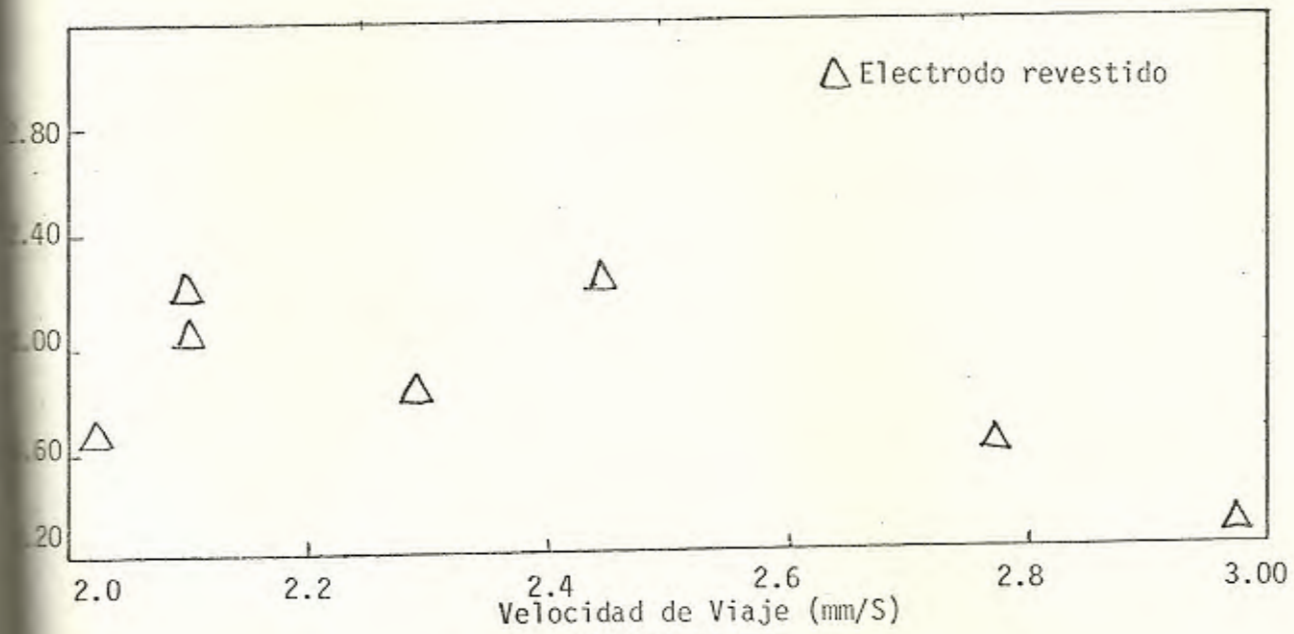


FIGURA Nº 53

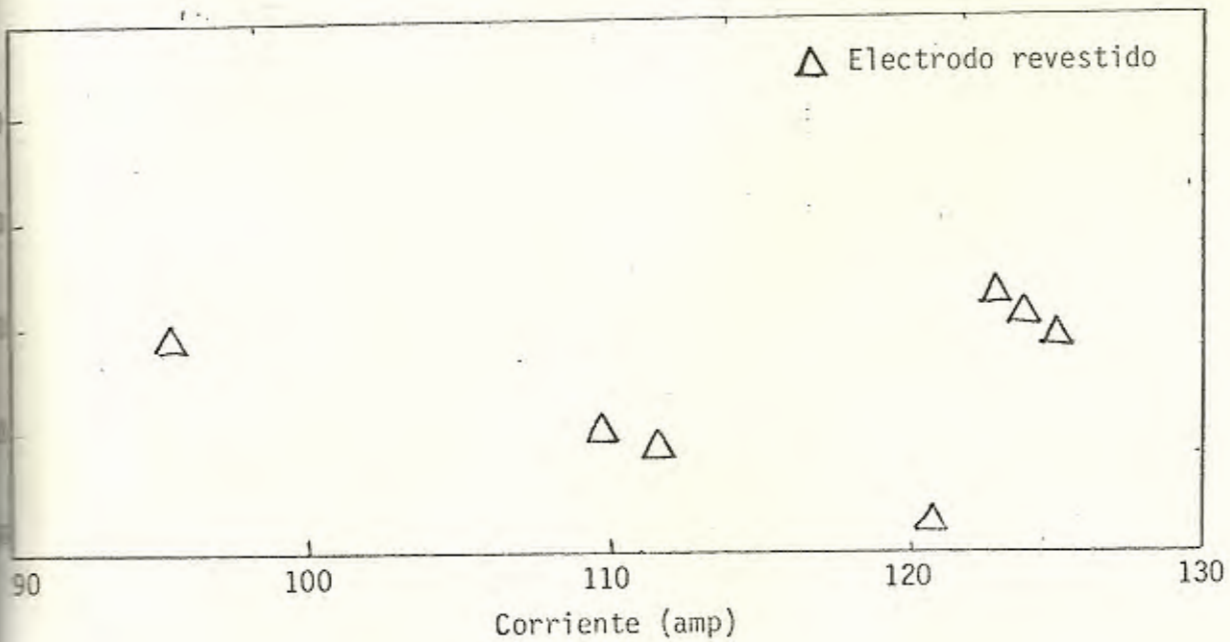


FIGURA Nº 54

Relación ancho de la ZAC y velocidad fuente, corriente de soldadura. Energía entrante 1 Kj/mm.

rencia globular produce ZAC más pequeñas que la transferencia de rocío.

Dilución del metal base.- La dilución del metal base es un importante aspecto de la soldadura. En casos donde la composición del metal de aporte es crítica para las propiedades mecánicas de la soldadura, el control de la dilución juega un papel vital que permite optimizar las propiedades. Se considera dilución a la proporción de metal base fundida durante la soldadura.

Los resultados que se muestran en las figuras 57,58 indican una considerable dependencia de la dilución con respecto a la corriente y velocidad de la fuente. La dilución se incrementa al aumentar la corriente y la velocidad de la fuente.

La razón para este incremento se puede explicar por medio de la ecuación empírica

$$\text{Area cordón} = C_1 \frac{I^{1.55}}{S^{0.903}}$$

$$\text{Area metal depositado: } \frac{I}{S} C_2 \quad \text{Fig 17}$$

La energía liberada por el arco es constante, por tanto:

$$\frac{IV}{S} = C_3$$

$C_1, C_2, C_3 = \text{constantes}$

El voltaje se mantuvo constante, por tanto $\frac{I}{S} = \frac{C_3}{V}$

La dilución del metal base se define como:

$$\text{Dilución} = \frac{\text{Area cordón} - \text{área del metal depositado}}{\text{Area Cordón}}$$

$$\text{Dilución} = \frac{C_1 \left(\frac{I^{1.5}}{S} \right) - \left(\frac{I}{S} \right) C_2}{C_1 \left(\frac{I^{1.5}}{S} \right)} \quad (18)$$

Esta última expresión sin mucho error se puede aceptar

$$C_1 \left(\frac{I^{1.55}}{S^{0.903}} \right) \approx C_1 \left(\frac{I^{1.5}}{S} \right) \quad (19)$$

$$\text{Dilución} = 1 - \frac{1}{C_1} \left(\frac{I^{C_2 - 1.5}}{S^{C_2 - 1}} \right)$$

$$\text{Dilución} = 1 - \frac{1}{C_1} \left(\frac{I^{C_2 - 1}}{S^{C_2 - 1}} \right) \left(\frac{1}{I^{0.5}} \right) = 1 - \frac{1}{C_1} \left(\frac{C_3}{V} \right)^{C_2 - 1} \frac{1}{\sqrt{I}}$$

$$\text{Dilución} = 1 - \frac{1}{C_1} \left(\frac{C_3}{V} \right)^{C_2 - 1} \left(\frac{1}{\sqrt{I}} \right) \quad (20)$$

Esta ecuación muestra que al incrementarse la corriente, la dilución se incrementa también, en una forma parabólica

La ecuación (18) se puede modificar también a

$$\text{Dilución} = 1 - \frac{1}{C_1} \left(\frac{I^{C_2 - 1.5}}{S^{C_2 - 1.5}} \right) \left(\frac{1}{S^{0.5}} \right)$$

$$\text{Dilución} = 1 - \frac{1}{C_1} \left(\frac{C_3}{V} \right)^{C_2 - 1.5} \left(\frac{1}{\sqrt{S}} \right) \quad (21)$$

La ecuación (21) muestra que al incrementarse la velocidad de la fuente, la dilución se incrementa en forma parabólica.

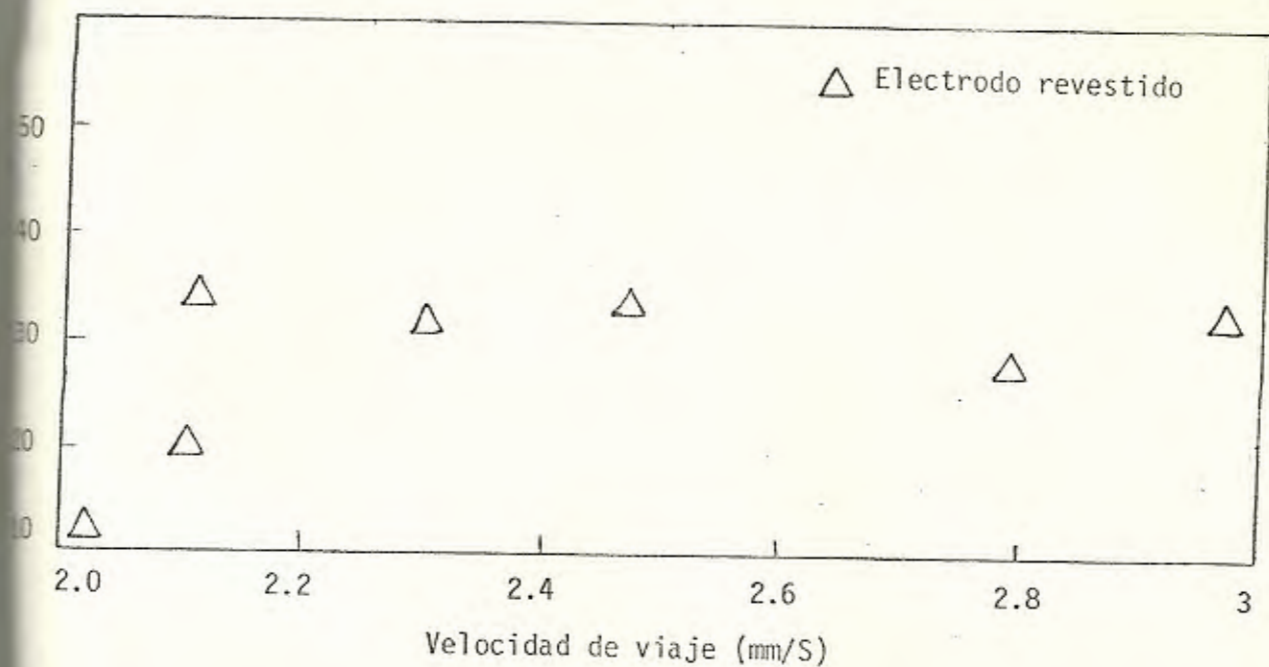


FIGURA Nº 57

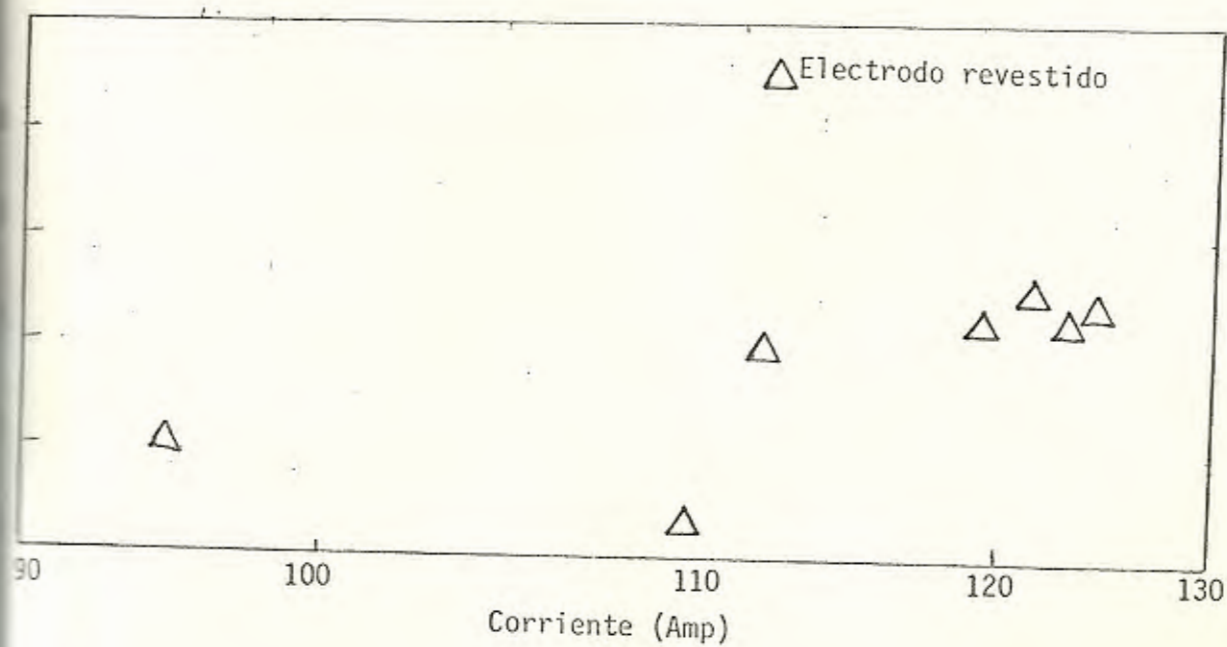


FIGURA Nº 58

Relación entre la dilución y velocidad fuente,
corriente de soldadura. Energía producida 1 Kj/mm.

Una explicación de la influencia de la corriente de soldadura y la velocidad de la fuente en la penetración se basa en la ecuación empírica

$$P = K^3 \frac{I^4}{SV^2} \quad \text{Fig. 21} \quad (22)$$

La energía entrante se mantiene constante

$$\frac{IV}{S} = C_3$$

La ecuación (22) puede ser escrita para energía entrante constante como:

$$P = K^3 \frac{IV}{SV^2} I^3$$

$$P = IK^3 \frac{C_3}{V^2} \quad (23)$$

La ecuación (23) muestra que una relación lineal existe entre la penetración y la corriente de soldadura, lo cual se verifica por los resultados experimentales (Figura 60).

Modificando la ecuación (23) de diferente manera, obtenemos:

$$P = SK^3 \frac{C_3^4}{V^6} \quad (24)$$

La ecuación (24) muestra que para voltaje constante y energía entrante constante una relación lineal existe entre la penetración y la velocidad.

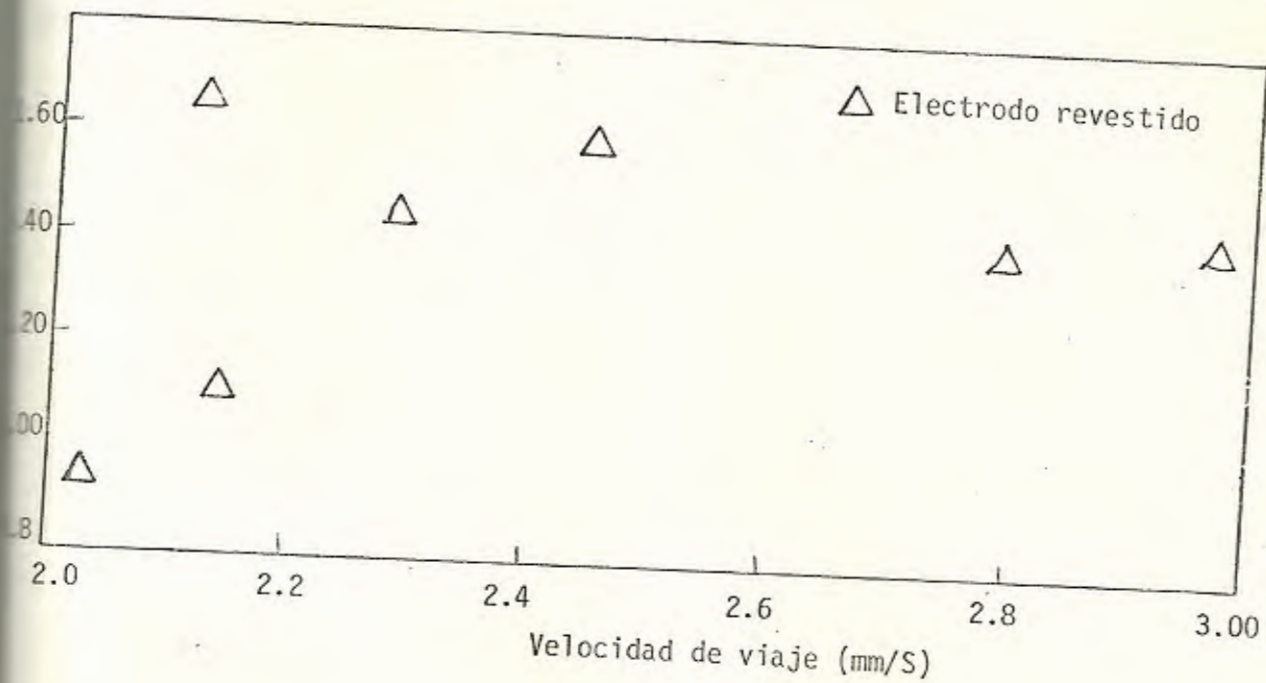


FIGURA Nº 59

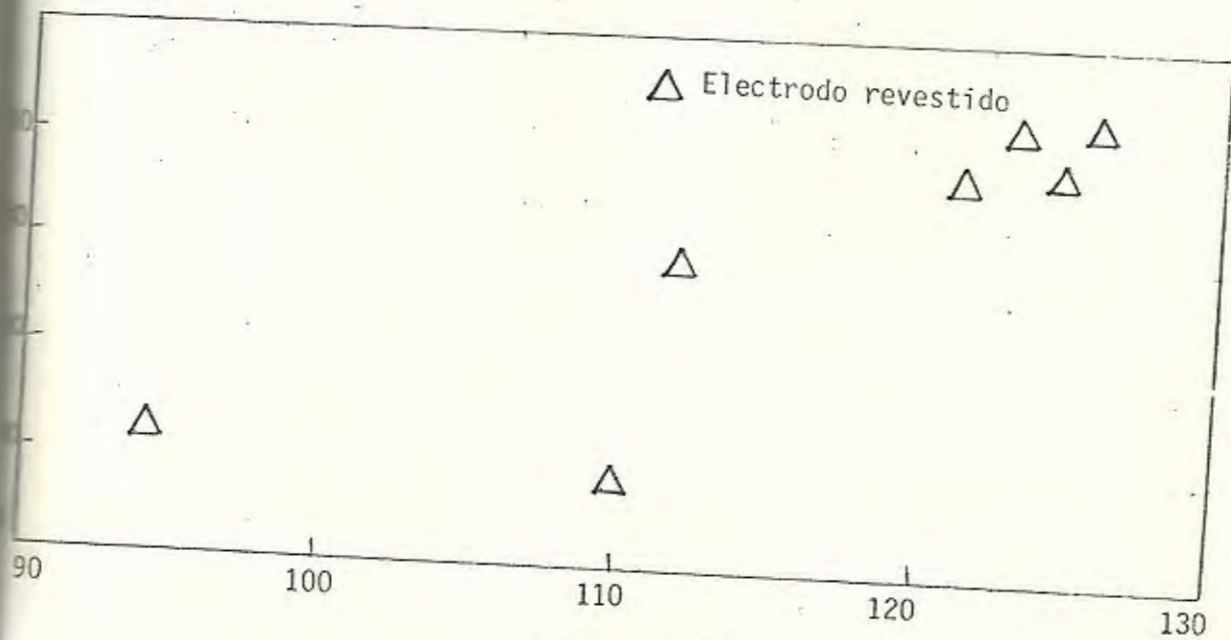


FIGURA Nº 60

Relación entre penetración y velocidad fuente,
corriente de soldadura. Energía producida 1 Kj/mm.

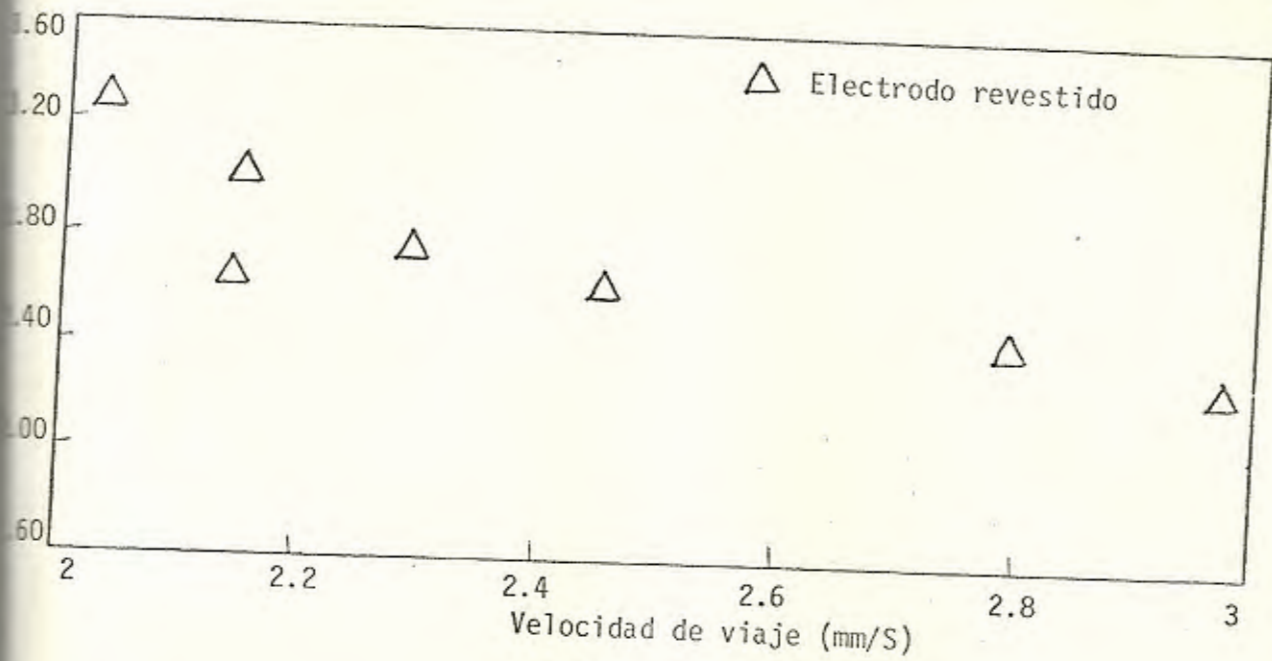


FIGURA Nº 61

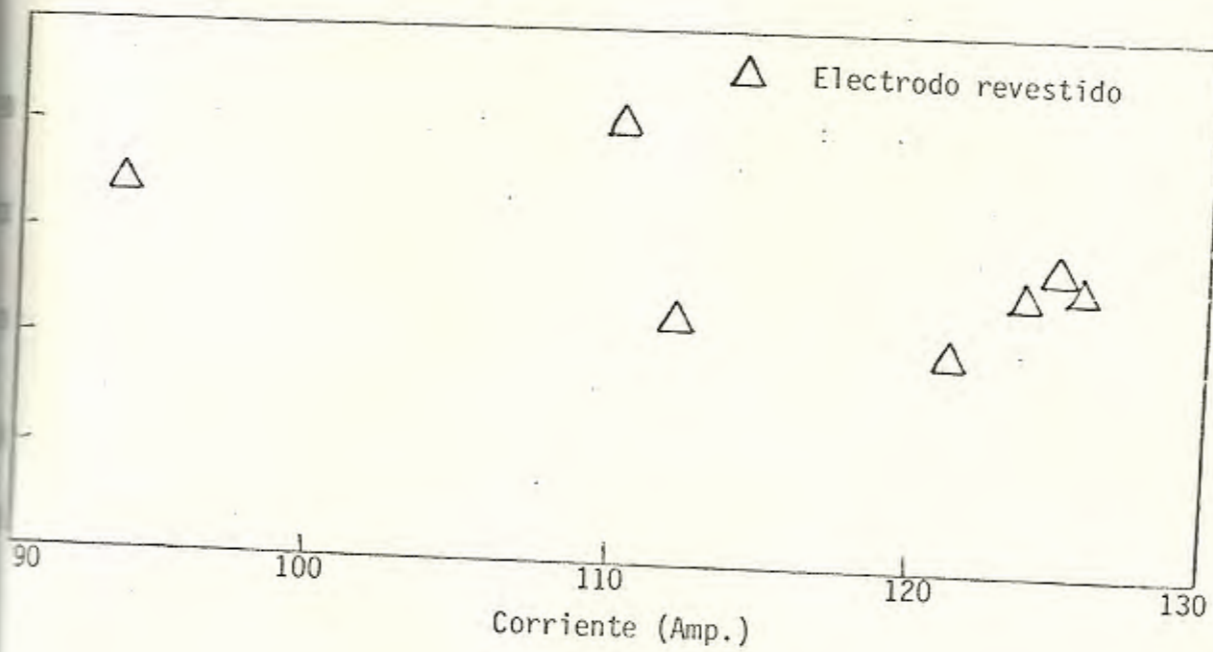


FIGURA Nº 62

Relación entre altura del cordón y velocidad fuente,
corriente de soldadura, energía producida 1 Kj/mm.

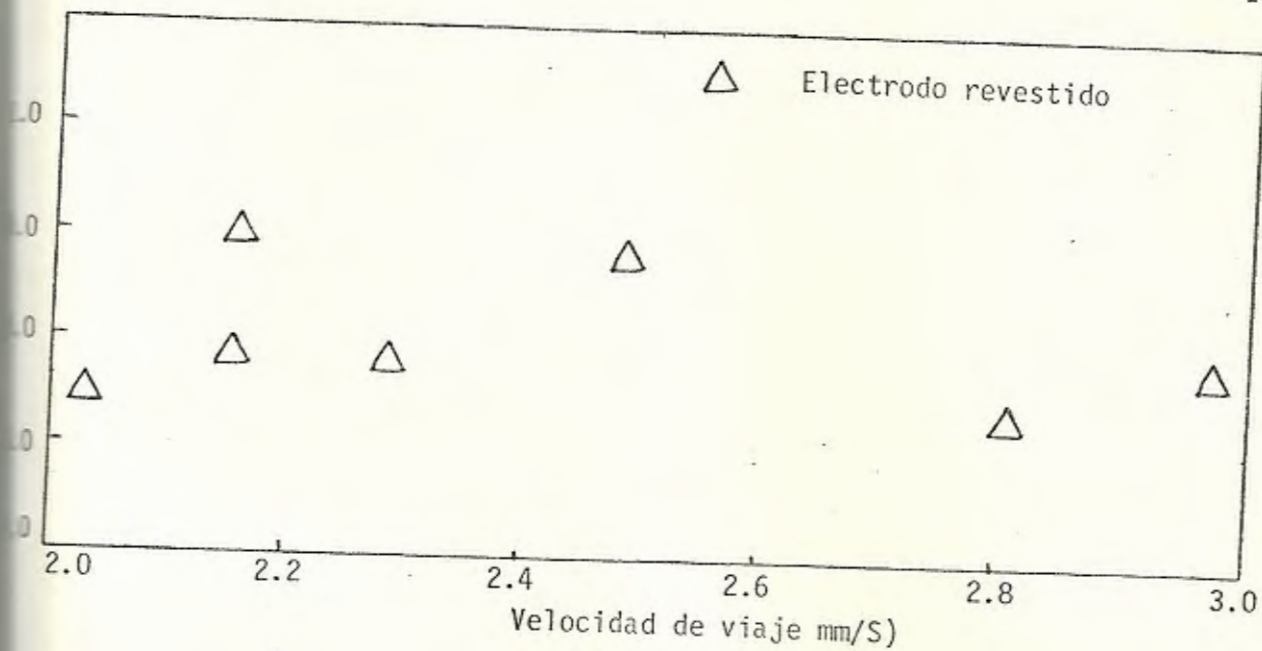


FIGURA Nº 63

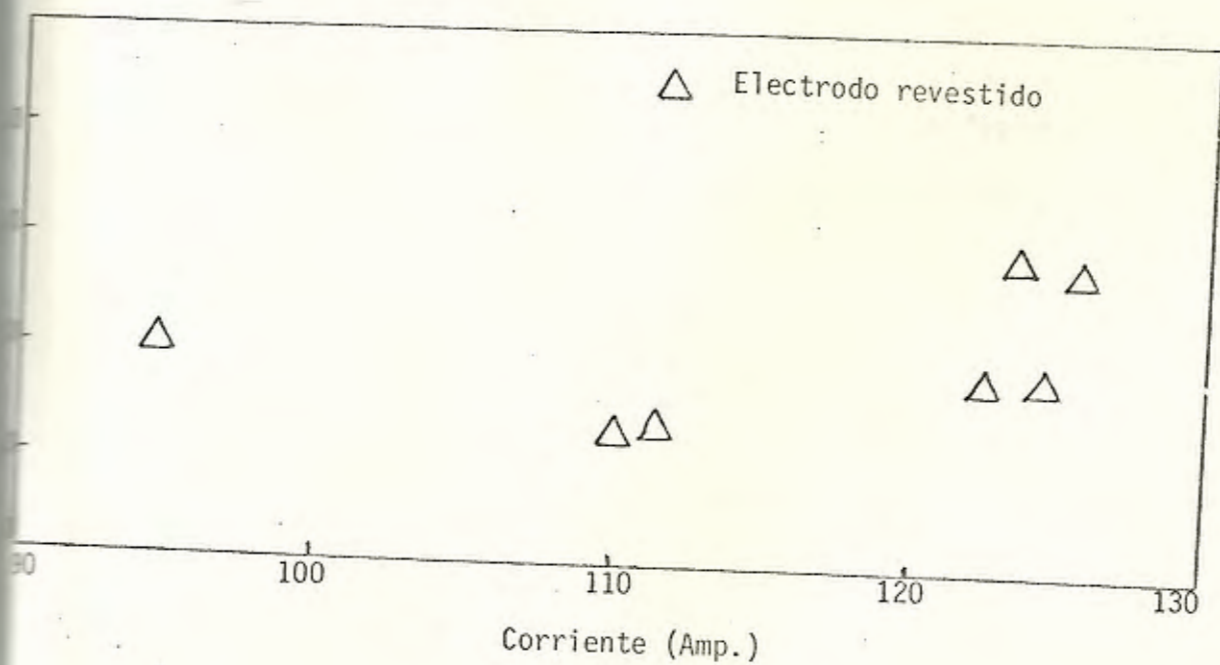


FIGURA Nº 64

Esta relación lineal la confirman los resultados experimentales en la figura 59.

Altura del Cordón.- De las figuras 61,62 se observa que existe un pequeño decremento de la altura del cordón al incrementarse la velocidad de la fuente y la corriente de soldadura.

Ancho del Cordón.- Es un hecho bien conocido que el ancho del cordón depende primordialmente del voltaje para corrientes y velocidades constantes. En este trabajo el voltaje se mantuvo prácticamente constante. El efecto de la corriente de soldadura y la velocidad de la fuente para la misma cantidad de energía entrante se muestra en las figuras 63 y 64; estas figuras muestran anchos de cordón aproximadamente constantes para diversos valores de corriente y velocidad.

Dureza en la Zona Afectada por el Calor.- La figura 65 muestra la relación existente entre la dureza máxima encontrada en la zona afectada por el calor y la energía producida en el arco, energía que se mantuvo constante a 27 Kj/pg. La figura 65 muestra una variación de 300 Knoop en la dureza máxima de las ZAC de los diversos cordones depositados con valores de energía liberada en el arco constante.

Para la construcción de la figura 65 se usó la información disponible en las Tablas IV y V; por lo tanto, en la deposición de los cordones por arco sumergido se usó valores de energía entrante

TABLA VI

DUREZAS KNOOP

ESPECIMEN	MATERIAL DE APORTE		ZONA AFECTADA POR EL CALOR				MATERIAL BASE	
	1	2	3	4	5	6	7	8
1 ER	257.60	248.50	512.72	418.08	347.52	312.00	217.04	208.00
2 ER	255.68	235.20	519.68	486.24	418.08	355.28	270.88	200.96
3 ER	294.00	319.60	667.50	570.00	555.80	492.30	370.40	239.00
4 ER	269.00	273.70	705.70	686.20	592.20	355.70	243.00	227.70
5 ER	201.10	215.40	607.80	562.80	492.40	424.90	220.50	212.10
6 ER	199.60	195.20	632.40	562.80	424.90	341.90	266.70	196.60
7 ER	296.70	276.10	816.60	695.80	632.40	592.20	362.90	276.10
1 AS	262.10	278.60	328.90	328.90	319.60	281.1	213.8	208.9
2 AS	378.10	378.10	355.70	310.70	278.6	259.9	227.7	220.5
3 AS	297.0	253.3	310.70	305.00	273.7	264.4	227.7	218.8
4 AS	245.0	227.7	281.10	271.3	257.70	237.10	239.0	227.7
5 AS	285.60	247.70	430.20	408.25	370.60	280.70	245.50	224.37
6 AS	402.6	411.3	632.4	584.7	498.2	370.4	266.7	217.1

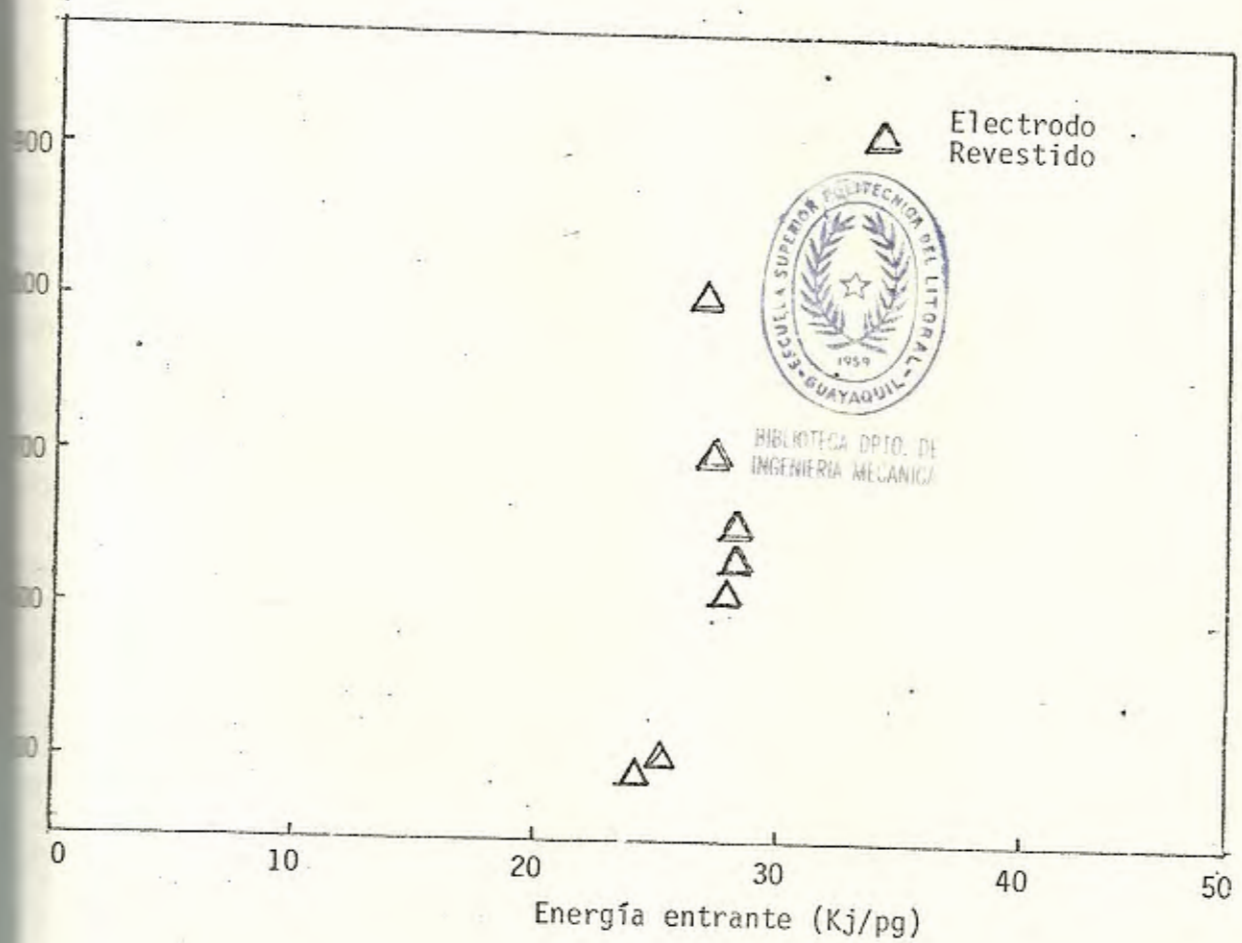


FIGURA Nº 65

Máxima dureza de la ZAC en función de la energía entrante para formar el arco.

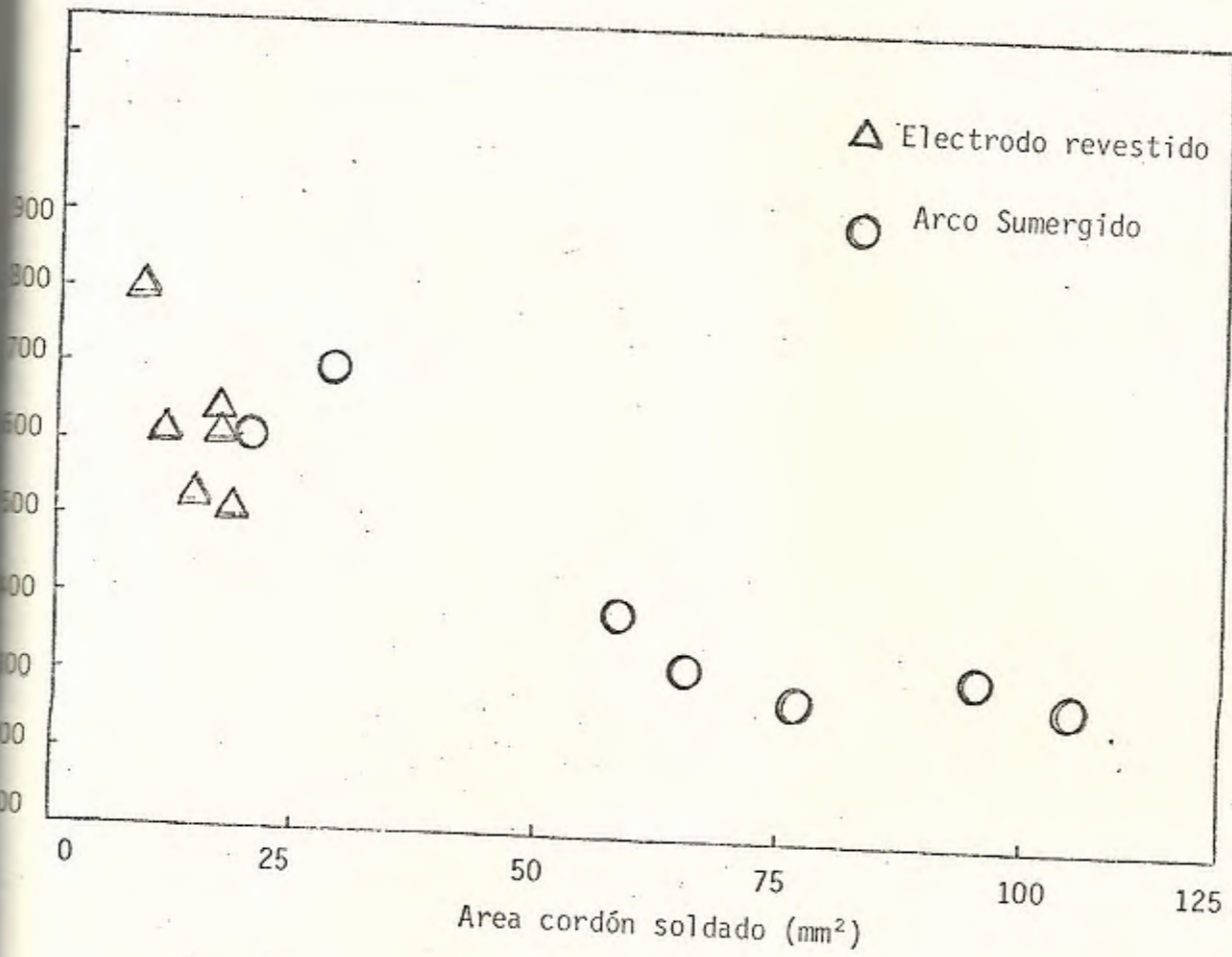


FIGURA N° 66

Máxima dureza en la ZAC
en función del Area del cordón soldado.

variables, para la deposición de los cordones por electrodo revestido se usó valores de energía entrante constante. La figura 66 muestra a la máxima dureza Knoop en la ZAC versus el área del cordón soldado o la energía entrante efectiva. Se observa una disminución de la máxima dureza KNOOP al aumentar el área del cordón soldado.

La Tabla VI muestra que existen grandes diferencias en la dureza de las distintas zonas de la soldadura en las cuales se depositaba un solo cordón. Diferencias causadas por las rápidas velocidades de enfriamiento producidas al depositar el cordón. En la figura 67 se ilustran estas grandes diferencias al graficar las durezas encontradas en las distintas fases de la soldadura. La probeta usada fue la probeta Nº 4, proceso electrodo revestido.

UNIONES SOLDADAS

Dureza.- De la Tabla VII se observa una ligera tendencia de incremento de la dureza al disminuir el área de la sección transversal del cordón soldado. Es de puntualizar también el hecho de que el precalentamiento inicial, y el hecho de realizar varios pases para formar la unión soldada, han causado el efecto de regular la dureza en las diferentes zonas de unión soldada. Así la variación de las durezas disminuye y se tiende en cada una de las uniones a un valor constante. La figura 68 ilustra esta tendencia común de las soldaduras para formar las uniones.

Impacto.- El resultado de los ensayos de impacto se halla en la Tabla VIII y se ilustra en las figuras 69 a 76; las curvas se basan en la energía absorbida por el espécimen durante la fractura.

La parte superior de cada una de estas curvas, indica ductilidad del material, pues es capaz de absorber considerables cantidades de energía antes de romperse, esto lo hace a temperaturas elevadas. Al descender la temperatura, la energía absorbida decae rápidamente hasta una temperatura a la que tiende a estabilizarse a bajos niveles de energía absorbida. Existe por tanto una transición entre ductilidad a altas temperaturas y fragilidad a bajas temperaturas. Una forma de calcular la temperatura de transición es determinando la temperatura que corresponde al punto ubicado en la distancia media entre los mayores valores de energía y los menores valores de energía.

Los gráficos 74 a 82, presentan la energía absorbida versus el área de la sección transversal del cordón soldado. Los gráficos demuestran que el área del cordón soldado influye en la energía absorbida, pues ésta disminuye al aumentar el área del cordón a cada temperatura a la que se hizo el ensayo.

La explicación para este comportamiento es que las rápidas velocidades de enfriamiento de las uniones hechas con cordones pequeños y la de la probeta N° 1 que no fue precalentada a propósito son causa de la existencia de estructuras duras como la martensi-

TABLA VIII

COMPORTAMIENTO DE LA ZAC DE UNIONES CON MULTIPLES PASES
DE ACERO 1045 Y A DISTINTAS TEMPERATURAS

ESPECIMEN	NUMERO DE PASES	AREA DEL CORDON CALCULADA mm ²	30°C	20°C	10°C	-5°C	-10°C	-20°C
1	9	58.16	7.5	6.4	4.4	4.2	3.5	2.0
2*	-	-	1.4	1.3	1.1	1.1	0.8	0.7
3	9	66.59	3.2	2.8	2.3	2.1	2.0	1.7
4	14	39.56	2.7	2.6	2.4	2.1	1.6	1.6
5	14	39.60	3.3	3.2	3.0	2.4	2.4	1.7
6	15	33.94	3.4	3.0	2.9	2.4	1.6	1.6
7	15	32.73	3.7	3.6	3.2	2.8	2.6	1.6
8	25	18.16	5.9	4.1	3.6	3.6	2.3	1.8

* Los especímenes Nº 2 fueron hechos de metal base inalterado

NOTA: Los valores anotados en la Tabla son en Kg-mts.

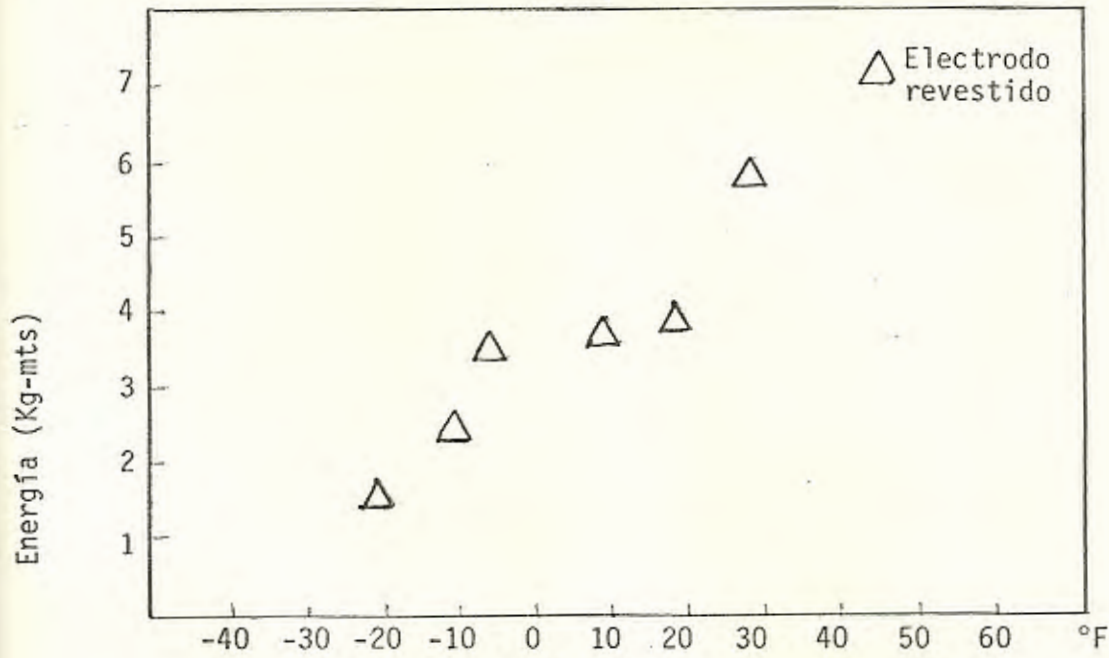


FIGURA N° 75

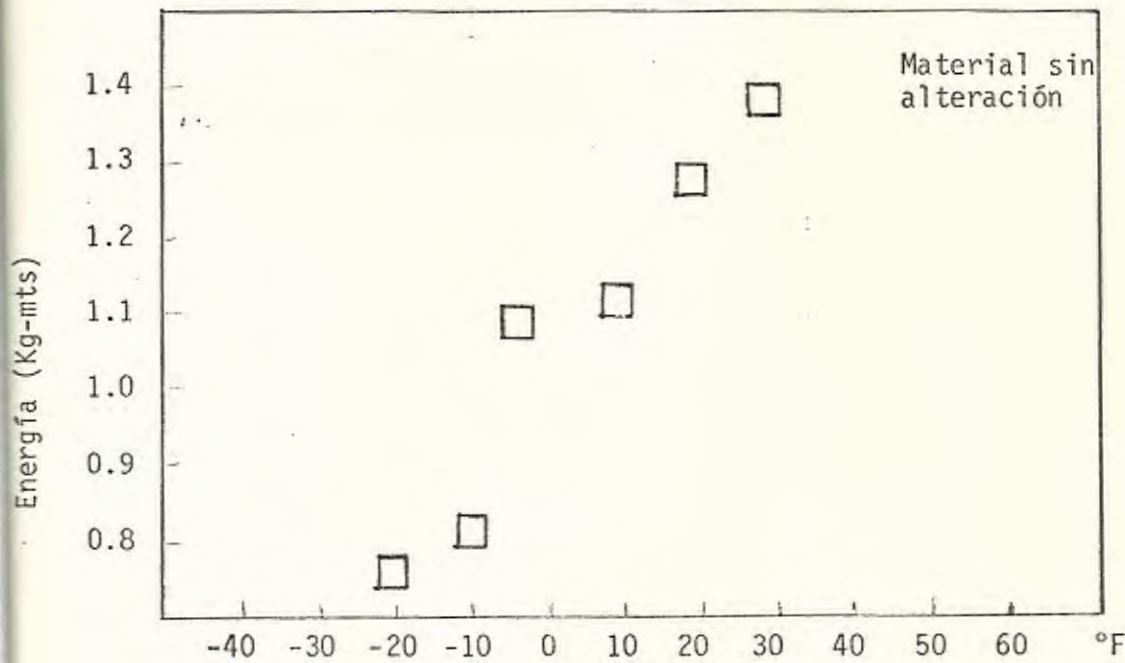


FIGURA N° 76

Comportamiento de probetas Charpy Entalle V
 en la ZAC de acero ASSAB 760 espesor 7/8"
 Especímenes N° 8 y N° 2 respectivamente.

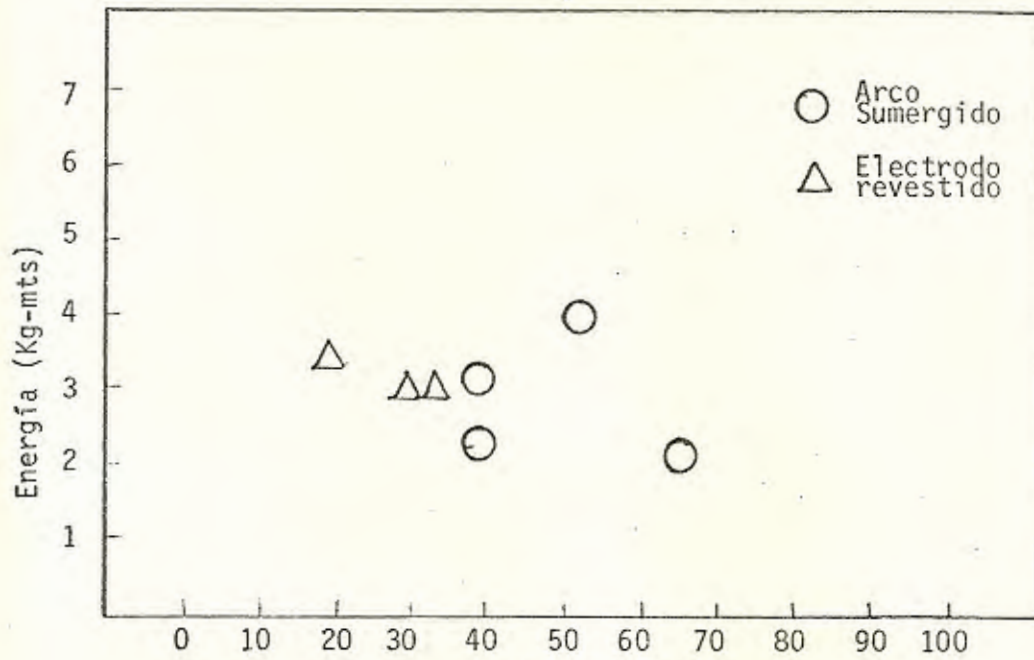


FIGURA Nº 79

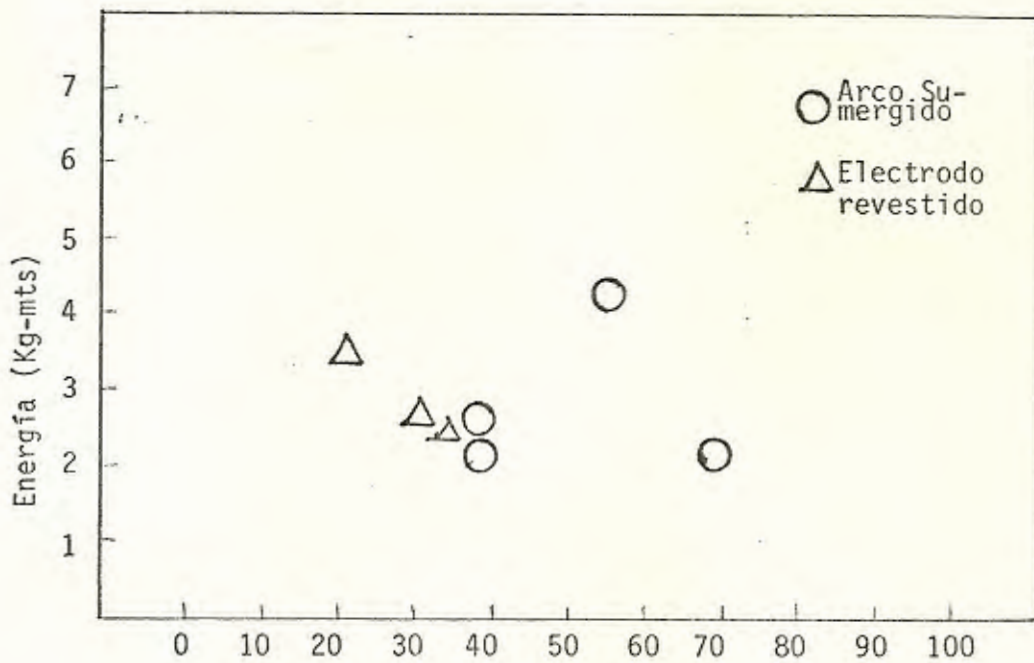


FIGURA Nº 80

Relación entre el área del cordón soldado
y la energía absorbida en probetas Charpy
entalla en V a 10°C y -5° C respectivamente

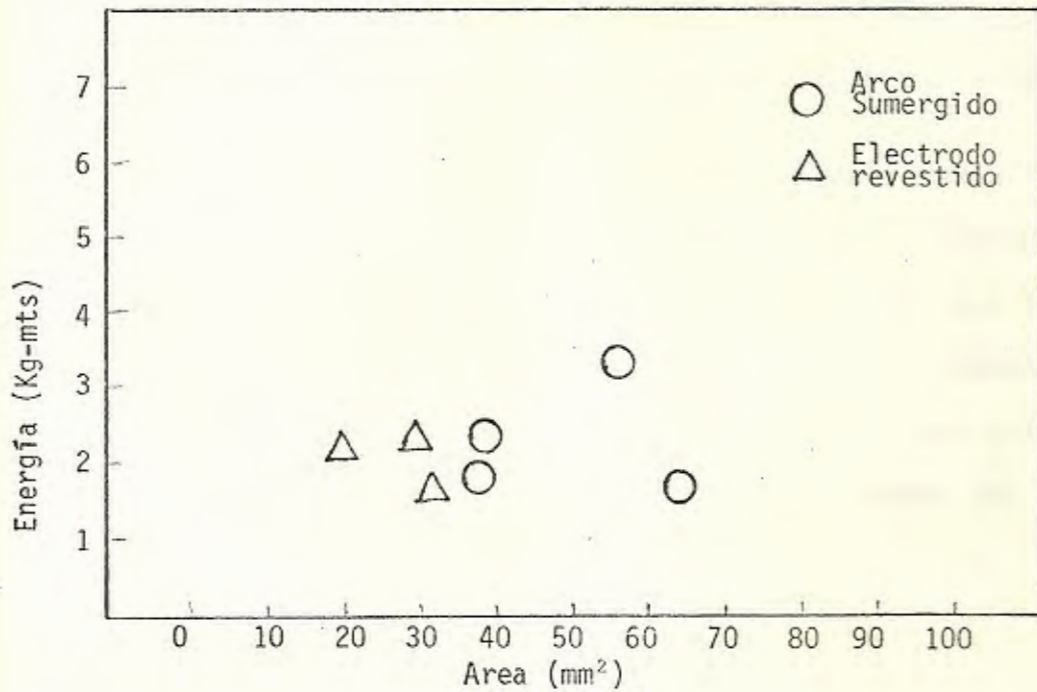


FIGURA N° 81

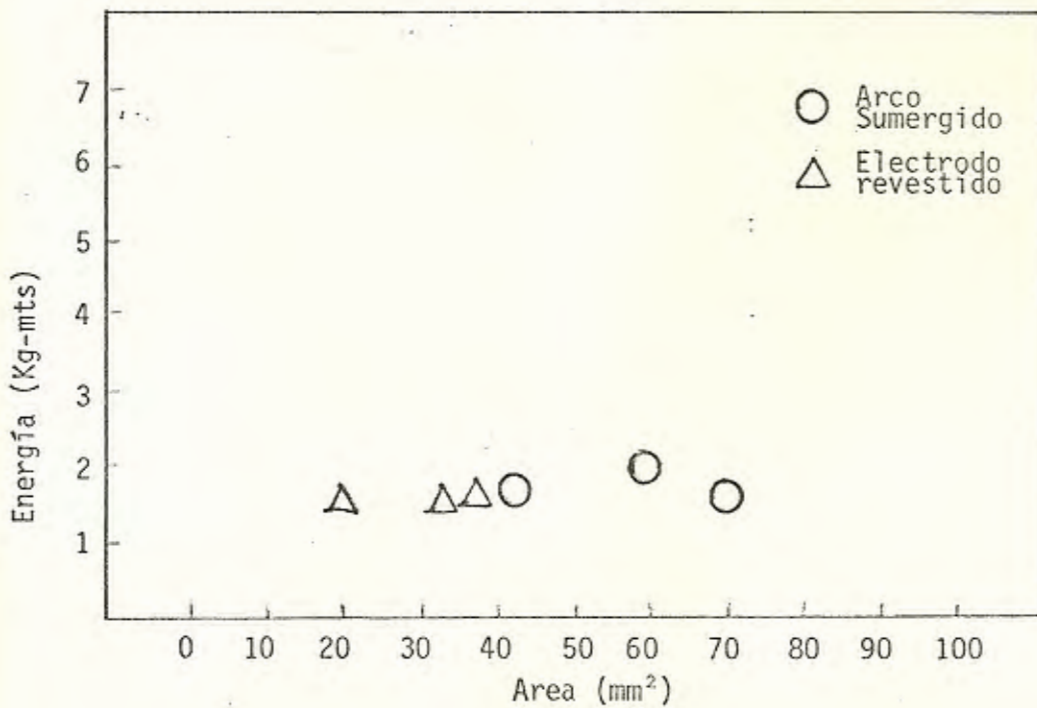


FIGURA N° 82

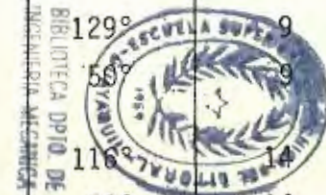
Relación entre el área del cordón soldado y la energía absorbida en probetas Charpy entalla en V a -10°C y -20°C respectivamente

ta, y con los sucesivos cordones estas estructuras resultan revenidas formándose así estructuras duras y al mismo tiempo tenaces.

Doblado.- Aunque el propósito al realizar este ensayo fue encontrar relación entre la elongación y la resistencia máxima con el área del cordón soldado, esto no fue posible debido a la fragilidad del metal base. Con excepción de 3 probetas, todas las demás rompieron en el metal base y en zonas que no habían sufrido alteración por la soldadura realizada. Los resultados del ensayo se hallan en la Tabla IX.

TABLA IX

ESPECIMEN	CARGA APLICADA (Kg)	CONDICION DESPUES DEL TEST	ANGULO	PASES	AREA CORDON (mm ²)
1 raíz	6363	rompió en metal base	126°	9	58.16
1 cara	6363	rompió en metal base	115°	9	58.16
2 raíz	6818	rompió en metal base	122°	14	39.59
2 cara	5681	rompió en soldadura	55°	17	39.59
3 raíz	6818	rompió en metal base	129°	9	66.59
3 cara	3636	rompió en soldadura	56°	9	66.59
4 raíz	6818	rompió en metal base	116°	14	39.60
4 cara	5000	rompió en soldadura	60°	14	39.60
5 raíz	6363	rompió en metal base	128°	15	33.94
5 cara	6000	rompió en metal base	127°	15	33.94
6 raíz	6000	rompió en metal base	126°	15	32.43
6 cara	6363	rompió en metal base	120°	15	32.43
7 raíz	6818	rompió en metal base	127°	25	18.16
7 cara	6818	rompió en metal base	117°	25	18.16



RESULTADO DEL ENSAYO DE DOBLADO

C A P I T U L O V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de los experimentos realizados en la investigación hecha se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1.- Existe una influencia decisiva de la energía efectiva utilizada en la soldadura determinada por el área del cordón soldado en la máxima dureza de la zona afectada por el calor. Al incrementarse el área del cordón soldado la máxima dureza en la zona afectada por el calor disminuye.
- 2.- La influencia de la velocidad del arco eléctrico y la corriente de soldadura es decisiva en las características del cordón soldado para una energía suministrada constante, que en este caso fue 1 Kg/mm. Al incrementarse la velocidad de la fuente y la corriente de soldadura se incrementa el área del cordón soldado, la dilución, penetración, en cambio la altura del cordón disminuye.
- 3.- El área del cordón soldado influye en capacidad de absorber energía del metal de la zona afectada por el calor. Al aumentar el área del cordón soldado la energía absorbida antes de la rotura en el ensayo de impacto Charpy disminuye.
- 4.- El uso de pases múltiples produce uniformidad en el tamaño de

los granos de la zona afectada por el calor, al eliminar la zona de crecimiento de grano.

RECOMENDACIONES

A continuación se enumeran trabajos que pudieran realizarse sobre este campo:

- 1.- Influencia del modo de transferencia del metal en las características del metal soldado.
- 2.- Influencia del área del cordón soldado en las propiedades mecánicas del metal de aporte.
- 3.- Influencia de la posición de soldadura en las propiedades del metal soldado y de la ZAC.



BIBLIOGRAFIA

BIBLIOTECA DPTO. DE
INGENIERIA MECANICA

1. BAUSCHINGER, J. ZIVILINGUR, Vol. 27, págs. 289-347, 1881
2. CHRISTIANSEN N., DAVIES L.G., Jermundsen J., "Distribution of Temperatures in Arc Welding". British Welding Journal, Feb. 1963, págs. 54-75.
3. COTTRELL A.H., "Dislocations and Plastic flow in Crystals", Oxford University Press, Nueva York, 1953.
4. DOSCHOO K.E., "Control of Cooling rates in Steel Weld Metal". Welding Journal. Feb. 1968. págs. 495-625.
5. Guide to Weldability of Steels, Welding Research Council
6. HUME ROTHERY, J.H. FRYE PROC. Roy Soc. Londres. Vol. 181, págs. 1-14
7. JACKSON, C.E. 'Control of Welding Performance by selected Technique Parameteres". International Institute of Welding. Document IX.
8. JHAVERY P., MOFFAT W.G., ADAMS C.M. "The Effect of Plate Thickness and radiation of heat flow in welding and cuttin". Welding Journal. 1952, págs. 125-165.
9. ROSENTHAL D., "Mathematical" Theory of Heat Distribution During Cutting and Welding". Welding Journal 1941. págs. 220-234.
10. RYKALIN N.W., "Calculations of Heat Flow in Welding., Moscow 1951.
11. SCHULTZ B.L., JACKSON C.E. "Influence of the Weld Bead Area on Weld Metal Mechanical Properties". Welding Journal, Jan. 1973. págs. 23-27.

12. SUZUKI H. "Dislocations and Mechanical Properties of Crystals".
Page 361, John Wiley & Sons, Inc. New York.
13. Welding Metallurgy, AWS 1965, New York, págs. 24-25.