



T
671.5212
9215
C-2



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica



**" INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE SOLDADURA
CON ELECTRODO TUBULAR SOBRE LAS
CARACTERISTICAS DE UNIONES SOLDADAS "**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

XAVIER ENRIQUE GARCES SANCHEZ



GUAYAQUIL

AÑO
1995

ECUADOR

AGRADECIMIENTO

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

DEDICATORIA

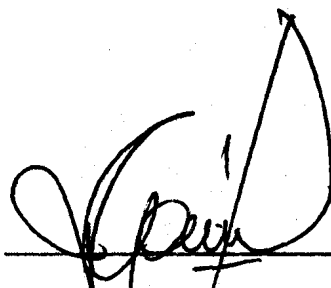
A Dios.

A mis padres.

A mis amigos.

DECLARATORIA EXPRESA

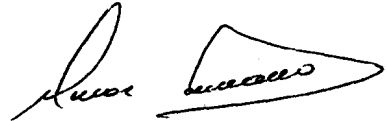
"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLTECNICA DEL LITORAL"



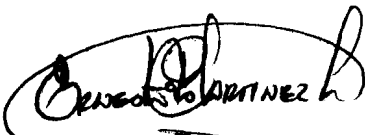
XAVIER ENRIQUE GARCÉS SANCHEZ



Ing. Eduardo Rivadeneira
SUB-DECANO



Ing. Omar Serrano Valarezo
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Ernesto Martínez L.
TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Freddy Cevallos B.
TRIBUNAL DE GRADO

RESUMEN

Durante la ejecución de este trabajo se establece la relación de los parámetros de soldadura como: voltaje, amperaje y velocidad de avance del arco eléctrico con las propiedades de la unión soldada utilizando el proceso de soldadura al arco con electrodo tubular de núcleo de fundente. Este proceso es una técnica nueva en nuestro medio, que seguramente reemplazará en el futuro al proceso de soldadura al arco con electrodo revestido debido a su gran versatilidad y capacidad para lograr elevada deposición de material, siendo aplicable en aceros al carbono y aceros de baja aleación, lográndose regímenes de deposición de hasta 40 libras por hora.

Para establecer como se relacionan los parámetros de soldadura se utiliza una matriz que permita variar el voltaje, amperaje y velocidad de avance del arco eléctrico, produciendo diferentes probetas hasta lograr aquella que tuviera características óptimas, tanto de apariencia, como resultados aceptables en los ensayos radiográficos, metalográficos y mecánicos.

Finalmente, se establecen una serie de curvas que permiten relacionar los parámetros de soldadura con la geometría de las uniones soldadas resultantes.

INDICE GENERAL

	Pags.
RESUMEN.....	5
INDICE GENERAL.....	6
INDICE DE ABREVIATURAS.....	8
INTRODUCCION.....	10
I. PROCESO DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO TUBULAR DE NUCLEO DE FUNDENTE.....	12
1.1. Características del proceso.....	12
1.2. Equipos utilizados en el proceso.....	29
1.3. Materiales de aporte.....	41
1.4. Aplicaciones del proceso.....	55
1.5. Influencia de los parámetros de soldadura al arco en las propiedades de la unión soldada.....	60
II. TRABAJO EXPERIMENTAL.....	69
2.1. Selección del metal base, material de aporte y equipo.....	69
2.2. Selección de los parámetros de soldadura.....	86
2.3. Ejecución de las soldaduras.....	90
2.4. Obtención de muestras para ensayos de control..	95

III.RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION.....	99
3.1. Ensayos radiográficos.....	99
3.2. Ensayos metalográficos.....	101
3.3. Relación de los parámetros de soldadura con la geometría de las uniones soldadas.....	115
3.4. Ensayos mecánicos.....	130
3.4.1. Ensayo de dureza.....	130
3.4.2. Ensayo de doblado.....	134
3.4.3. Ensayo de tracción.....	136
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
BIBLIOGRAFIA.....	140

INDICE DE ABREVIATURAS

Al	Aluminio, elemento.
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Sociedad Americana de ensayos y materiales
Amp	Amperios, unidad de corriente.
C	Carbono, elemento.
CA	Corriente alterna
CC	Corriente constante.
CD	Corriente directa
Cr	Cromo, elemento
°C	Grado centigrado, unidad de temperatura
Ec.	Ecuación
ft-lb	Pie-libra, unidad de resistencia al impacto
Fig.	Figura
Joules/mm	Julios por milímetro, unidad de calor por unidad de longitud
Kg	Kilogramo, unidad de masa
KV	Kilovoltio, unidad de voltaje
lb	Libra, unidad de masa
lb/plg ²	Libra por pulgada cuadrada, unidad de presión
max.	Máximo
min.	Mínimo
MAG	Soldadura al arco con gas activo
MIG	Soldadura al arco con gas inerte
Mo	Molibdeno, elemento

MB	Metal base
mm/s	Milímetros por segundo, unidad de velocidad
mm	Milímetro, unidad de longitud
Mn	Manganeso, elemento
NEMA	Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos
Ni	Niquel, elemento
P	Fósforo, elemento
plg	pulgada, unidad de longitud
psi	unidad de presión
Rb	Rockwell B, unidad de dureza
S	Azufre, elemento
Si	Silicio, elemento
TIG	Soldadura al arco con gas inerte y electrodo de tungsteno
UTS	Resistencia última a la tracción
V	Vanadio, elemento
VA	Voltamperio de corriente
VC	Voltaje constante
Volt	Voltios
ZAC	Zona afectada por el calor

INTRODUCCION

El tema escogido en este estudio sobre la influencia de los parámetros de soldadura con electrodo tubular sobre las características de uniones soldadas, es originado por las inquietudes sobre la aplicación y maniobrabilidad del mismo, el cual aún es nuevo en nuestro medio industrial.

Particularmente se ha escogido como metal base al acero ASTM A283 grado C y como material de aporte el electrodo tubular AWS E71T8-N11 que ha sido diseñado para soldar en toda posición, en aceros de bajo y medio carbono, con resistencia a la tracción de 70000 lb/plg² mínimo.

El estudio actual tiene como finalidad el conocimiento de la técnica, equipos, materiales de aporte y de aquellos parámetros que deberán ser controlados en el proceso de soldadura al arco con electrodo tubular, además de determinar las condiciones óptimas que permitirán obtener uniones soldadas con propiedades mecánicas satisfactorias bajo las condiciones establecidas en el trabajo realizado.

La correcta aplicación de estos parámetros permitirá conocer mas sobre el proceso en sí y su aplicación correcta en la industria, lo que reducirá o eliminará errores y defectos en las uniones soldadas en materiales como los aceros al carbono y de baja aleación.

Este trabajo determina paso a paso las consideraciones que deberán ser tomadas en cuenta para la ejecución del proceso de soldadura al arco con electrodo tubular, y de los controles necesarios para establecer uniones de soldadura con características óptimas, controles visuales, radiográficos, metalográficos y mecánicos que se detallan en la parte experimental. Según la Sociedad Americana de Soldadura a este proceso se le conoce con el nombre de Flux Cored Arc Welding, siendo sus iniciales FCAW.

CAPITULO 1

PROCESO DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO TUBULAR DE NUCLEO DE FUNDENTE

1.1. CARACTERISTICAS DEL PROCESO

El proceso de soldadura con electrodo tubular tiene por objeto como otros procesos al arco eléctrico el unir dos piezas de metal por medio del uso de material de aporte, constituido por el electrodo tubular, mientras el metal base en soldadura se entiende como la pieza misma de trabajo o aquel material que se va unir por el proceso de soldadura, el cual ha de poseer la propiedad de ser soldable, es decir, que permita la ejecución de una unión por medio de la soldadura, de manera que no pierda sus características mecánicas en general (1).

El metal base durante el proceso de soldadura se ve afectado por una determinada cantidad de calor, el cual es capaz de fundir el metal para luego enfriarse. Los ciclos de calentamiento y enfriamiento permitirán controlar aspectos como distorsión, dureza, ductilidad, tenacidad, resistencia tensil y características químicas propias del depósito y de las zonas adyacentes, en especial el tamaño de grano.

En general el proceso de soldadura provoca cambios en las propiedades mecánicas del metal base adyacente al depósito fundido, pero se intenta que la variación no produzca la falla de la unión para así obtener resultados satisfactorios.

El proceso de soldadura con electrodo tubular combina la versatilidad y maniobrabilidad de los electrodos revestidos y las ventajas de alta deposición de un proceso automático. Al principio la idea fue lograr un electrodo con características de autoprotección en forma de rollos o bobinas, para ser alimentado mecánicamente al arco eléctrico de manera tal que se ahorraría tiempo en el cambio del electrodo y se eliminaría la pérdida de material en forma de electrodos revestidos. De esta manera se logró desarrollar un proceso semi-automático y automático para soldar con electrodos tubulares de núcleo de fundente o "alambres" (1). En el interior del electrodo tubular es posible encontrar los ingredientes que sirven de fundentes y que desoxidan el metal fundido, generando gases y vapores protectores, así como escoria.

En esencia, el proceso semiautomático de soldadura con electrodos tubulares de núcleo de fundente es

soldadura al arco con un electrodo de muchos metros de longitud. Durante el proceso el operador activa el mecanismo de alimentación del electrodo tubular, usando una pistola que sustituye al porta-electrodos pero que es similar en peso y maniobrabilidad. Otra diferencia importante es que los electrodos tubulares no se encuentran recubiertos de compuestos químicos como ocurre con los convencionales electrodos revestidos (1).

Una de las razones para incorporar el fundente en el interior del electrodo es hacer mas fácil el producir bobinas de electrodo tubular, pues cuando el fundente se encuentra en el exterior, como en los electrodos revestidos estos son quebradizos y no permitirían la elaboración de las bobinas (2). Además permite resolver el problema de hacer continuos contactos eléctricos en un punto de la pistola cerca del arco eléctrico. Como se sabe, una de las limitaciones de los electrodos revestidos es el largo y la variación de longitud del electrodo entre el punto de contacto eléctrico en el porta electrodo y el final del mismo, esto limita la corriente que puede ser usada debido a la resistencia eléctrica que produce calentamiento en el electrodo. Altas corrientes son capaces de proporcionar altas deposiciones y altas temperaturas

en el electrodo, de manera que cuando se varía la longitud se genera cierta resistencia lo que puede sobrecalentar y dañar al recubrimiento. Pero cuando el contacto eléctrico es hecho cerca del arco, como ocurre con los electrodos tubulares, corrientes relativamente altas pueden ser usadas aún con diámetros pequeños, por esta razón es posible en un proceso semiautomático proporcionar regímenes de deposición mas altos que los electrodos convencionales con revestimiento (2).

En los procesos automáticos con electrodos tubulares los regímenes de deposición son elevados y se elimina el tiempo perdido para cambiar los electrodos, dando como resultado un ahorro significativo en la producción. habiendo estadísticas que sustentan incrementos en los regímenes de deposición tanto como 400%, es así que el futuro proyecta al proceso semiautomático de soldadura al arco con electrodo tubular de núcleo de fundente como el sustituto firme del proceso de soldadura al arco con electrodo revestido. mientras que el proceso automático tenderá a sustituir otros procesos donde el uso de fundentes y/o gases resulta problemático y además es necesario características de rendimiento específicas.

La AWS ha aceptado que el proceso de soldadura con

alambre tubular tome el nombre de soldadura al arco con electrodo de núcleo de fundente autoprotegido que en inglés es "self-shielded flux-cored arc welding" (1). La palabra semiautomático o automático es un distintivo para establecer el grado de mecanización. Es común que muchas casas comerciales usen el nombre de "Innershield" para hacer referencia al proceso semiautomático, mientras "automatic Innershield" se emplea para el proceso automático (4).

En la figura 1-1 es posible observar el principio de operación del proceso de soldadura al arco con electrodo de núcleo de fundente o "Innershield". Tal como se observa el electrodo tiene forma tubular y se encuentra volteado al revés en comparación con un electrodo revestido para soldadura manual por arco eléctrico.

VENTAJAS DEL PROCESO

Es importante recordar que el impacto de un proceso de soldadura maniobrable, mecanizado y capaz de trabajar en toda posición no siempre logra destacar sus méritos en los procesos de fabricación y levantamiento de estructuras de acero. Este tipo de proceso ha sido probado y ha demostrado generar ahorro durante el levantamiento de la obra. Ahorro como la necesidad de usar menor cantidad de equipos

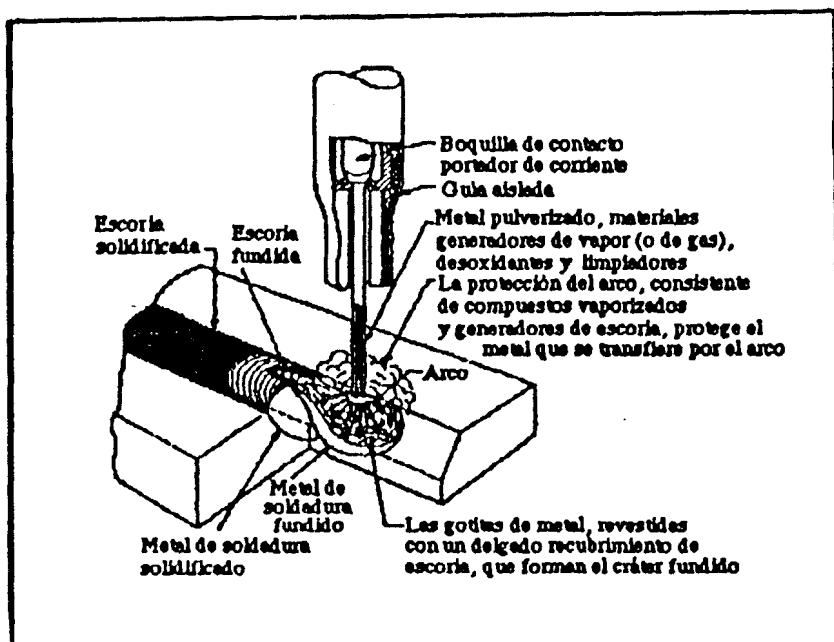


FIG. 1-1

PRINCIPIO DE OPERACION DEL PROCESO
DE SOLDADURA CON ELECTRODO TUBULAR (4).

en el trabajo y soldadores calificados para cada tipo de unión a soldar. Esto permite reducir los equipos de manipuleo, lo que facilita la logística del trabajo (4).

Tal vez uno de los factores mas importantes en este proceso es la capacidad de producir regimenes de deposición elevados, lo cual es útil para los constructores pues sería económicamente impráctico una bajo régimen en aquellos casos con materiales pesados y piezas de forma compleja donde la apariencia o perfección en el detalle no tienen valor en el producto final, de esta manera es posible lograr uniones soldadas con excelentes características donde sería muy difícil o costoso lograrlo. En resumen, las principales ventajas del proceso de soldadura al arco con electrodos tubulares de núcleo de fundente son:

- Cuando es comparado con el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, se logran regimenes de deposición de hasta cuatro veces mas, y usualmente los costos operativos se reducen tanto como 50% hasta 75% (1).

- Se elimina la necesidad de manipular los fundentes y equipo de recuperación de los mismos, como en el

arco sumergido, o el uso y/o almacenamiento de gas, mangueras, equipos medidores de flujo y presión.

- Logra tolerancias para elementos de acero que normalmente causan fractura de la soldadura cuando se suelda con electrodo revestido o con ciertos procesos mecanizados. Produce soldaduras libre de fracturas en aceros de medio carbono, usando técnicas normales de soldadura.

- Bajo condiciones normales, elimina los problemas de absorción de humedad y almacenaje que ocurre con los electrodos de bajo hidrógeno.

- Elimina los tiempos perdidos por parada para descansar y durante el cambio del electrodo revestido que se ha consumido.

- Elimina la necesidad de usar equipos protectores del viento requeridos en soldadura con gas en el campo de trabajo.

- Permite el uso de sistemas de ventilación con un fácil y rápido flujo de aire para mayor comodidad del soldador durante la operación.

- Simplifica la tarea de entrenamiento, calificación.

supervisión, selección del equipo y mantenimiento, labores logísticas de los soldadores, materiales y equipo de trabajo, porque permite usar un solo proceso y hasta un solo tipo de electrodo en diferentes aplicaciones.

- Permite la aplicación del principio de prolongación electrificada para controlar el régimen de deposición, mientras la penetración es controlada por el soldador.

- Además al lograr depositar en un solo pase un régimen mayor de deposición, se ahorra el tiempo de limpieza que debería utilizarse entre pases.

- Provee soldadura mecanizada donde es formalmente imposible, como en la unión de una viga a una columna en la construcción de edificios.

TECNICA DE OPERACION DEL PROCESO

Antes de soldar, se debe tener especial cuidado en el control de las variables del proceso. Además los controladores de cada una de estas variables deberán especificar el rango de operación y podrán ser ajustados de acuerdo a pasadas experiencias, a las recomendaciones del fabricante y de las normas de los organismos pertinentes, como AWS, ASTM, NEMA, entre

otros. Deberá chequearse aspectos como:

- Si la fuente de poder genera la corriente necesaria para soldar con determinado electrodo tubular
- Si la fuente es de corriente alterna o directa, si es de voltaje constante o voltaje variable
- Si el alimentador de electrodo es adecuado para el tipo de trabajo a realizarse, si los rodillos impulsores y los tubos guías son los correctos para el diámetro del electrodo, verificar la presión de los rodillos de acuerdo al diámetro del electrodo y a las recomendaciones del fabricante.
- La pistola, el cable y la boquilla deberán ser los adecuados para el diámetro de electrodo usado, así como la prolongación electrificada recomendada por el fabricante y la experiencia del soldador.

El encendido del arco se produce gracias a la presencia de una pieza de contacto que se encuentra en el interior de la boquilla de la pistola la cual transmite la corriente proveniente de la fuente de poder, sabiendo que la boquilla depende del diámetro del electrodo así como de la prolongación electrificada. Dependiendo del modelo de la pistola hay

piezas de contacto que se encuentran visibles o en el interior, de manera que la boquilla la oculta lo que permite evitar que durante el proceso se quemé la pieza de contacto debido a falta de experiencia o cuidado. Es importante mencionar que el electrodo no debe ser empujado hacia abajo, como ocurre con los electrodos revestidos, porque el alimentador de electrodo mecánicamente lo empuja por medio de rodillos impulsores, y es en la pistola donde se encuentra el gatillo que acciona a los rodillos. Para romper el arco eléctrico el fabricante usualmente recomienda determinados valores de velocidad de alimentación y de voltaje de acuerdo al tipo de electrodo tubular que se vaya a usar (4).

El poder manipular la pobre deposición de material es una de las principales ventajas del proceso de soldadura por arco con electrodo tubular, esto se logra incrementando la prolongación electrificada a una cantidad tanto o mayor que 3 pulgadas. De esta manera cuando la pistola se separa una distancia mayor de la pieza de trabajo, la prolongación visible se incrementa y hace que la corriente se reduzca, así como la penetración, ayudando a evitar el problema de chorreo (1). Esto es de gran importancia en aquellos casos donde se requiere hacer un pase de pobre deposición, para luego continuar con el proceso. Este

método de control de la penetración puede ser usado solo cuando la pieza de contacto es corta.

La remoción de escoria es muy fácil en la mayoría de los electrodos tubulares de núcleo de fundente, de manera que esta se enfría y desprende detrás del depósito fundido, o en ciertas ocasiones lo único que se requiere es de una piqueta y un cepillo para desprenderla.

En la figura 1-2 se describe la técnica requerida para soldar con electrodos de clasificación E70T-G en las posiciones vertical y sobrecabeza (1), requiriéndose que en las juntas preparadas se efectúe un movimiento que consiste en que el electrodo sea desplazado de un extremo al otro de la junta, mientras para uniones a tope o en ángulo se hace necesario un primer pase de amarre usando una onda triangular y en los pases posteriores la técnica anteriormente mencionada.

La posición del electrodo constituye un factor de gran cuidado y que los soldadores acostumbrados al proceso manual con electrodo revestido no prestan la atención necesaria. El ángulo de arrastre es el ángulo entre la línea central del electrodo y la horizontal en la dirección del movimiento.

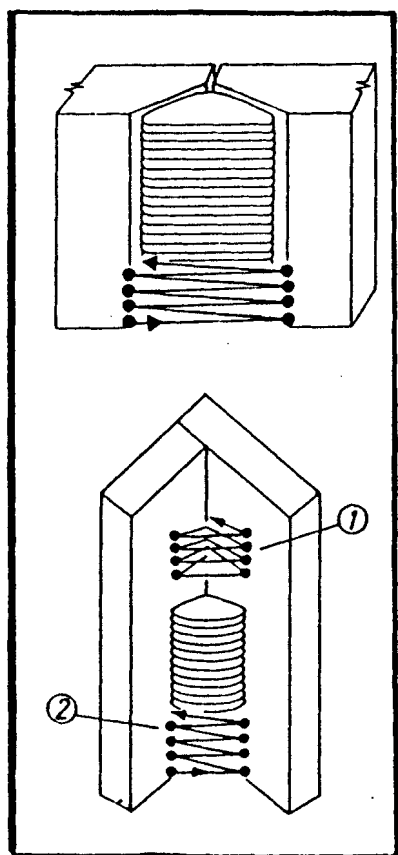


FIG. 1-2

TECNICA PARA SOLDAR CON ELECTRODO E70T-G
EN POSICION VERTICAL Y SOBRECABEZA (1).

Una manera de ver si este ángulo es el adecuado, es observar donde se esta formando la escoria, dado el caso que esta tienda a correr delante del arco sería necesario reducir el ángulo de arrastre. Cuando se sueldan piezas en forma de T, ángulo o similares, otro ángulo de importancia para producir cordones de calidad y con la mejor forma posible aparece, que es aquel formado entre la horizontal y la inclinación de la pistola llamado ángulo del electrodo que no deberá ser mayor a 45 grados en los casos antes mencionados.

De esta manera, siguiendo la técnica antes mencionada el metal fundido también se depositará en el plato vertical, además apuntando el electrodo directamente a la junta y usando un ángulo entre 45 a 55 grados reducirá el problema de porosidad en la raíz, si ello ocurriera, pero puede producirse salpicadura y depósitos convexos. Esta técnica es útil en espesores de aproximadamente 8 mm y mayores, pero cuando se trabaja con espesores de 6 mm y menores, el ángulo del electrodo deberá cambiar, siendo aproximadamente 40 grados (1). Cuando se suelda con electrodos tubulares una velocidad de avance estable se vuelve importante, pues el titubeo puede producir chorreo y porosidad en el depósito. Cuando se suelda fuera de posición con electrodos E70T-G los mejores resultados son obtenidos en la posición vertical descendente,

debido a que la fuerza del arco ayuda a mantener el metal fundido en la unión soldada, posicionando la pistola en la dirección del movimiento.

VARIABLES DE LA OPERACION

Las cuatro variables principales que afectan el rendimiento de la soldadura por arco eléctrico con electrodos tubulares de alma de fundente son el voltaje de arco, la corriente, la velocidad de avance, y la prolongación electrificada. Estas variables son interdependientes, y si una varía o es cambiada otra o todas requerirán un ajuste.

La tabla I-I contiene un resumen de los problemas que se presentan en el proceso de soldadura con electrodo tubular de núcleo de fundente y como deben ser modificadas las variables para obtener una unión soldada satisfactoria.

En este tipo de proceso la velocidad de avance es mas rápida que con los electrodos revestidos, esto hace que el soldador tienda a mover muy lentamente la pistola basado en su experiencia. Como ocurre en otros procesos la velocidad de avance será necesaria para maniobrar el metal fundido, la escoria y producir el tamaño de soldadura deseado, de manera que se mantiene una distancia uniforme entre el

TABLA 14
PROBLEMAS Y SOLUCIONES EN EL PROCESO
DE SOLDADURA CON ELECTRODO TUBULAR (1)

PROBLEMA	SOLUCION				
	CORRIENTE	VOLTAJE	VELOCIDAD	PROLONGACION ELECTRIZADA	ANGULO DE ARRASTRE
POROSIDAD	5 I	1 D	4 D	2 I	3 I
SALPICADURA	4 D	1 I	5 D	3 D	2 D
CONVEXIDAD	4 D	1 I	5 D	2 D	3 I
SOPLO MAGNETICO DEL ARCO	4 D	3 D	5 D	2 I	1 I
PENETRACION INSUFICIENTE	2 I	3 D	4 I	1 D	5 I
FALTA DE CONTINUIDAD	4 I	1 D	5 D	2 I	3 I
CHOQUE DEL ELECTRODO	4 D	1 I		3 D	2 D

I: Incrementar

D: Disminuir

Grado de importancia: 1 mayor , 5 menor

electrodo y la escoria fundida detrás del alambre.

En los procesos totalmente automáticos las variables que se presentan durante el proceso son las mismas que en el proceso semiautomático. De esta manera el ángulo de arrastre también afecta la forma y rendimiento de la soldadura. Un adecuado ángulo de arrastre previene la salpicadura a altas velocidades de avance; mientras mayor es la velocidad de avance, teniendo en cuenta un límite, se deberá usar un ángulo menor. Esto se debe a que mientras se reduce el ángulo de arrastre se origina un pequeño incremento de la fuerza del arco y reduce la penetración, por esta razón cuando se trabaja con elevadas velocidades de avance y se produce salpicadura es necesario aumentar el ángulo de arrastre para contrarrestar este problema. Otro de los factores, ya mencionados anteriormente es la falta de continuidad del depósito por efecto de velocidades de avance muy altas, lo que provoca que el cordón tenga forma irregular, sea delgado y pueda tener la forma de colinas y valles como si hubieren derramado metal fundido en forma dispersa, debido a insuficiente metal fundido o a un ángulo de la junta demasiado pequeño. El ángulo de la junta o también llamado del electrodo, es el formado entre la horizontal y la junta que esta siendo soldada.

A continuación se establecen los equipos requeridos para la ejecución del proceso una vez que se han determinado las características del mismo.

1.2. EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROCESO

Los equipos principales para la operación durante el proceso de soldadura al arco con electrodo tubular de núcleo de fundente se detallan a continuación.

FUENTE DE PODER

Los procesos de soldadura al arco requieren de fuentes de poder las cuales suministran un determinada corriente y voltaje para la obtención de depósitos de calidad, de manera que el arco se mantenga durante la operación. Esta corriente ha de ser continua o directa y debe ser regulada de manera precisa y cuidadosamente suministrada para obtener las características del arco deseadas, obteniéndose el máximo de rendimiento en la soldadura. Esta corriente que es suministrada por la fuente de poder o soldadora se transporta a través de líneas de poder, que no son otra cosa que cables transportadores de corriente, siendo desarrollada por generadores o alternadores movidos por un motor a diesel o gasolina, siendo su uso muy común en lugares como granjas o haciendas. En el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo de núcleo de

fundente, el rango de voltaje que las fuentes de poder deben ser capaces de entregar es de 13 a 40 voltios y corrientes con amperajes de hasta 700 amperios (4). Para una soldadura eficiente, la soldadora o fuente de poder debe ser capaz de permitir controlar las características del arco necesarias para un trabajo específico. En cierto trabajo será necesario que la fuerza del arco sea lo suficientemente intensa para lograr penetración profunda, mientras en otros trabajos un arco suave, con menos penetración sería necesario para evitar el problema de chorreo. Los electrodos son diseñados para trabajar en determinadas posiciones y con determinados tipos de corriente lo que determina los requerimientos para soldar, como se muestra en la tabla I-II (1).

En forma general las fuentes de poder se clasifican de acuerdo al tipo de corriente, CA o CD, y de acuerdo al voltaje de salida, el cual puede ser variable o constante. Además hay que tomar en consideración si la fuente de poder recibe la corriente directamente de la línea de fuerza o un motor a gasolina o a diesel mueve un generador. Como se ha visto en la tabla I-II el proceso de nuestro estudio requiere de una fuente de poder que suministre corriente CD y voltaje constante.

TABLA I-II
REQUERIMIENTOS DE LA FUENTE DE PODER EN PROCESOS
DE SOLDADURA AL ARCO ELECTRICO (1)

PROCESO	CARACTERISTICAS DE SALIDA	TIPO DE CORRIENTE		POLARIDAD
Electrodo revestido	Voltaje variable		CA o CD	PD, PI
TIG	Voltaje variable			o CA
Arco sumergido	Voltaje variable*			
Electrodo tubular	Voltaje constante		CD	PD, PI
Arco metalico con gas protector	Voltaje constante		CD	PI

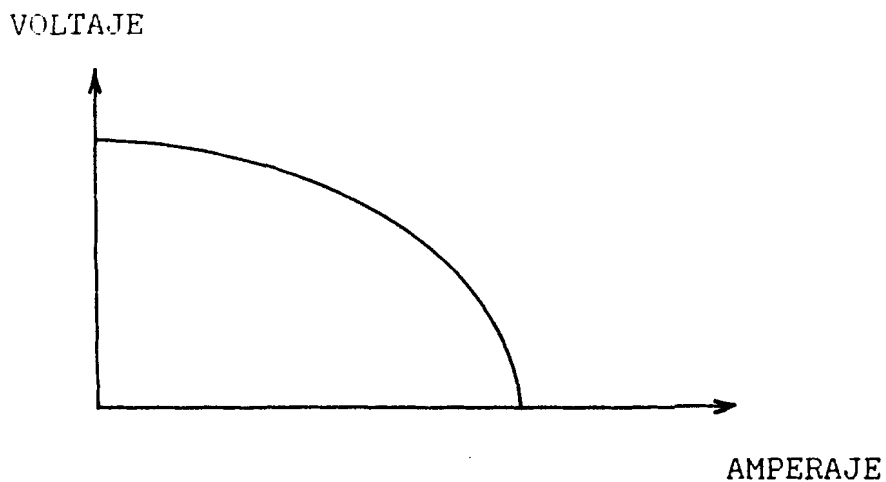
* En algunas aplicaciones, el arco sumergido usa voltaje constante en DC

PD: Polaridad directa

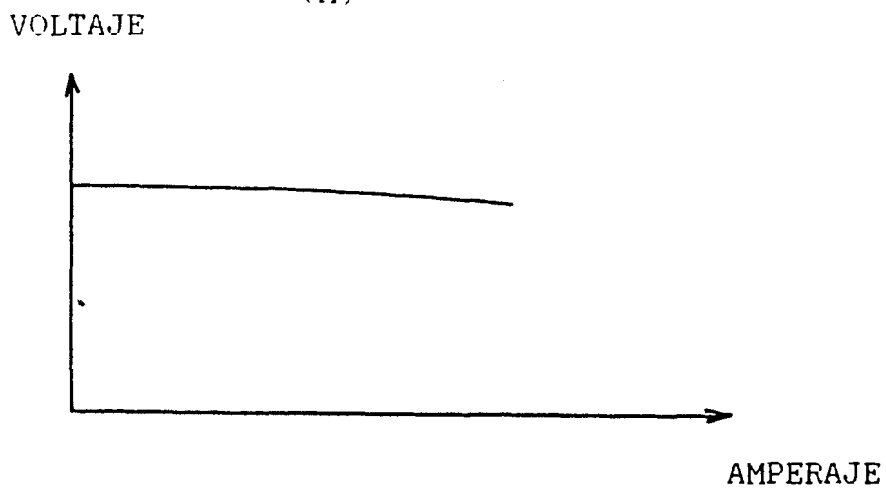
PI : Polaridad inversa

Las fuentes de poder deben cumplir con ciertos estándares establecidos por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, también conocida como NEMA, estándares como el ciclo de trabajo, corriente de salida y rango de voltaje. El ciclo de trabajo es el porcentaje de un período de 10 minutos que un soldador puede operar en un valor determinado de corriente de salida, por ejemplo si la soldadora dice trabajar con 300 amperios en un ciclo de trabajo del 60%, significa que el soldador podrá operar en forma segura con 300 amperios durante 6 minutos de cada 10 que transcurran, pero si reducimos el ciclo de trabajo a 35% nos permitirá operar con 375 amperios, es decir, a medida que se utilizan amperajes menores el ciclo de trabajo aumenta.

Como ya se mencionó anteriormente, las soldadoras se clasifican de acuerdo a su voltaje en fuentes de poder de voltaje variable y de voltaje constante, también llamadas de corriente constante y corriente variable respectivamente. Las máquinas de soldar de voltaje variable son aquellas que entregan corriente que cambia muy ligeramente con los cambios de voltaje, mientras las de voltaje constante son aquellas que entregan un voltaje casi constante a medida que varía el amperaje. Las curvas de estas fuentes de poder se ilustran en la figura 1-3.



(A)



(B)

FIG. 1-3

CURVAS CARACTERISTICAS PARA FUENTES DE PODER
DE CORRIENTE CONSTANTE (A) Y VOLTAJE CONSTANTE (B) (1).

Las fuentes CA/CD se usan en cualquier proceso que requiera de corriente continua o directa, como ocurre con los electrodos tubulares.

CABLE PARA SOLDAR

El cable utilizado en el proceso de soldadura con electrodo tubular es muy similar al utilizado en la soldadura manual con electrodo revestido, el cual se usa para conectar la fuente de poder a la tierra y de la fuente de poder al alimentador de electrodo para la entrada de corriente.

Los constituyentes son un grupo de cables torchados hechos de cobre que conforman el núcleo; una capa de papel aislante que mejora la flexibilidad y facilita la limpieza del aislamiento al hacer las conexiones; un recubrimiento de caucho natural al 60% que cubre y aísla dando flexibilidad aún a bajas temperaturas, resistencia a la humedad, abrasión e impacto; una malla de rayón que contribuye a la resistencia al impacto y ayuda a mantener firme el cable sin perder flexibilidad; y una chaqueta de caucho sintético con o sin aletas, que permiten aumentar la superficie de enfriamiento, mejorando la flexibilidad.

El tamaño del cable usado depende del amperaje que se requiera en el proceso y de la longitud total del

circuito eléctrico. Mientras mas largo es el circuito mayor será la medida de cable requerido para el proceso para evitar la caída de voltaje y la disipación de corriente por la resistencia que provoca calentamiento en el conductor. La tabla I-III indica los tipos de cables que se deben usar durante el proceso de soldadura con electrodo de alambre tubular de alma de fundente autoprotegido.

Para aplicaciones prácticas se utiliza comunmente el cable número 2/0 para la conexión a tierra desde la fuente de poder y para transporte de la corriente de ésta al alimentador de electrodo (2), que satisface la mayoría de las necesidades durante el proceso de soldadura con arco eléctrico que usa electrodo tubular de alma de fundente autoprotegido, permitiendo obtener uniones soldadas de calidad.

PISTOLA Y ALIMENTADOR DE ALAMBRE

Uno de los procesos semiautomáticos mas simples en términos de cantidad de equipo es el proceso de soldadura al arco con electrodo tubular de núcleo de fundente, el esquema que representa el equipo necesario se ilustra en la fig 1-4. El equipo como se aprecia consta de lo siguiente; una fuente de poder CD de voltaje constante, los cables para la conexión a tierra y de entrada de corriente al alimentador, el

TABLA I-III
 TAMAÑOS RECOMENDADOS PARA LOS CABLES
 DE TRABAJO EN EL PROCESO DE SOLDADURA
 CON ELECTRODOS TUBULARES (1).

Amperios	Ciclo de Trabajo (%)	Hasta 50 pies	De 50 a 100 pies
200	60	# 2	# 2
225	20	# 4	# 3
250	30	# 3	# 3
300	60	# 1/0	# 1/0
400	60	# 2/0	# 2/0
500	60	# 2/0	# 2/0
600	60	# 3/0	# 3/0
650	60	# 3/0	# 3/0

El cable # 2/0 fue escogido porque permite trabajar hasta con 500 amperios y una extensión de hasta 100 pies sin provocar consecuencias negativas en el transporte de la corriente.

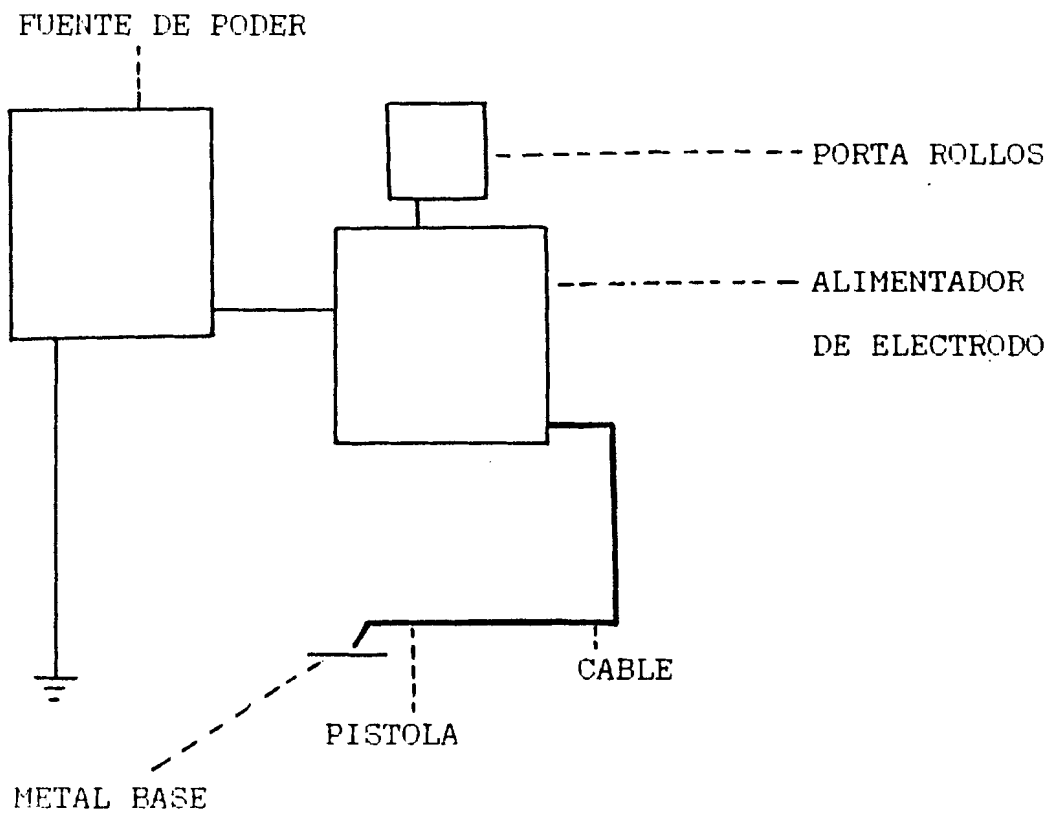


FIG. 1-4

ESQUEMA DEL EQUIPO REQUERIDO PARA SOLDAR CON ELECTRODO TUBULAR DE NUCLEO DE FUNDENTE (1).

porta-rollos que sostiene la bobina de electrodo de electrodo tubular, el alimentador y la pistola.

Los alimentadores de electrodo pueden ser muy sencillos o complejos dependiendo del grado de exactitud con que éste manipule las variables del proceso. Consta de una serie de circuitos eléctricos y algunos cuentan con tarjetas electrónicas que les permiten controlar hasta con décimas de exactitud la corriente suministrada por la fuente de poder y el voltaje. Los alimentadores por su diseño son de gran versatilidad y facilidad de transporte, pesan aproximadamente 30 libras o menos (5), y pueden ser usados en una gran variedad de aplicaciones en obra, además constan normalmente de las siguientes partes principalmente:

- Selector de modo de alimentación voltaje variable o voltaje constante.
- Retroalimentación por tacómetro que controla la velocidad y aceleración de alimentación del alambre
- Interruptor de polaridad de trabajo, positiva o negativa.
- Botón selector para fijar el amperaje de la corriente.
- Botón selector para fijar el voltaje del proceso.
- Selector de pantalla para control visual del

voltaje y amperaje del proceso.

- Selector de dirección para el movimiento del alambre.
- Motor eléctrico para rotación de los rodillos
- Juego de rodillos para arrastre del electrodo tubular
- Guías para entrada y salida del electrodo dentro del alimentador
- Pinza y cable para tierra desde el alimentador, solo en algunos modelos
- Freno dinámico de estado sólido que detiene rápidamente el motor, minimizando el exceso de electrodo.
- Circuitos electrónicos protegen al alimentador contra sobrecarga excesiva del sistema de arrastre o sobre tensión de la fuente de poder.
- El porta-rollos puede usar bobinas de diferentes pesos, habiendo inclusive de 50 libras en procesos semiautomáticos y de 1000 libras en automáticos.
- El contactor interno se encuentra instalado en el interior de la carcasa del alimentador y permite mantener el electrodo desenergizado cuando no se esta soldando, es decir, cuando no se aprieta el gatillo de la pistola.

Los alimentadores de alambre pueden ser usados para otros procesos como el de arco sumergido para lo cual

el fabricante del equipo provee el sistema adaptable de la tolva para el fundente, permitiendo el uso de ambos procesos, arco sumergido y de arco abierto.

Hay que notar que hay dos cables de salida del alimentador hacia la pistola. El mas grueso es el que transporta el electrodo y transporta la corriente para la soldadura, mientras el mas delgado contiene los alambres para el circuito que activa la alimentación de electrodo y también activa el circuito del contactor para que el electrodo se encuentre desenergizado cuando no se suelda. Algunos equipos cuentan con un par de rodillos impulsores, mientras en otros casos se hace uso de dos pares, en cualquier caso estos entran en funcionamiento cuando el gatillo de la pistola es activado por el soldador. En definitiva una alimentación adecuada del electrodo durante el proceso de soldadura depende del diámetro del electrodo, tamaño del motor impulsor del alimentador, la longitud del cable entre el alimentador y la pistola, el tipo de pistola que se utilice, la curvatura de la misma y las condiciones de la superficie del electrodo tubular.

Las pistolas utilizadas en el proceso de soldadura con electrodo tubular de núcleo de fundente se clasifican especialmente por el ángulo de inclinación

de la boquilla aislante aunque no es la única característica que debemos tomar en consideración. Otro aspecto de importancia es la capacidad de trabajo de la pistola, es decir, que amperaje es capaz de soportar para fundir determinados diámetros de electrodo tubular. La curvatura de la pistola puede variar de 45 a 80 grados pero también pueden ser rectas (5). La figura 1-5 (4) permite observar un detalle de la pistola, así como algunos de sus elementos principales, entre los cuales tenemos la pieza de contacto, la boquilla aislada, parte del electrodo, y se indica la prolongación electrificada y la prolongación visible que es parte de la anterior.

1.3. MATERIALES DE APORTE

Estos electrodos originalmente fueron desarrollados para hacer trabajos pesados de relleno de soldaduras y unión de juntas en posición horizontal y plana. Ellos intentaban llenar la necesidad de una operación semiautomática o completamente automática en la cual el depósito podría ser depositado en gran cantidad, y donde el cordón de soldadura requería tener apariencia agradable como por ejemplo en una base de máquina. Los electrodos fueron desarrollados para ser capaces de depositar perfiles planos y cóncavos, y con un mínimo de salpicadura, logrando uniones soldadas satisfactorias.

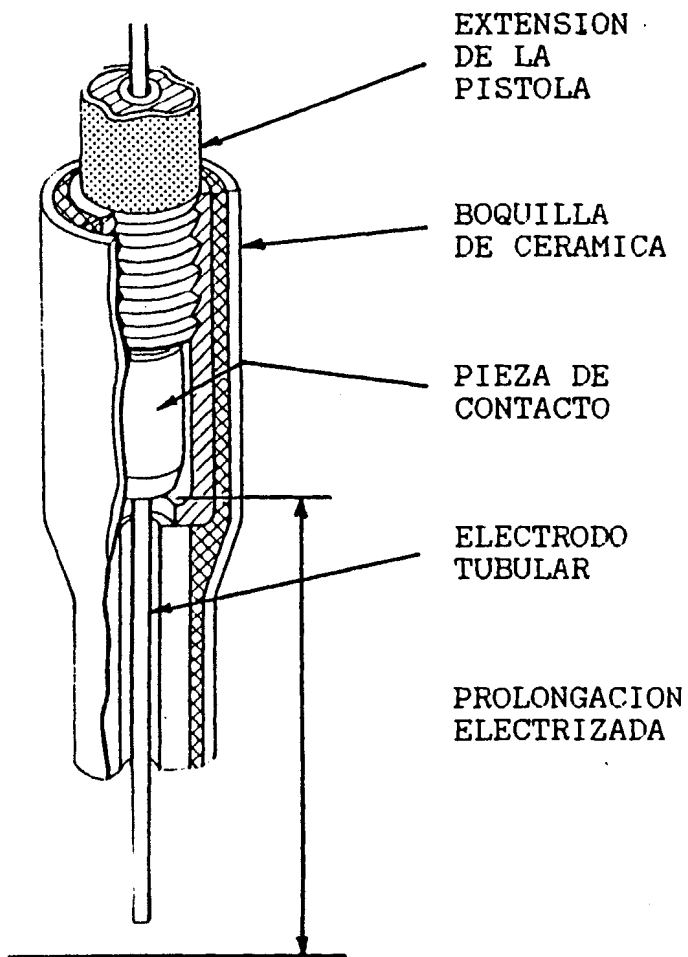


FIG. 1-5

DETALLE DE LA PISTOLA PARA SOLDAR
ELECTRODO TUBULAR (4).

Los electrodos tubulares son del tipo continuos, autoprotegidos, de núcleo de fundente. De hecho, es un electrodo volteado al revés y convertido en forma de electrodo continuo. Todos los materiales que sirven para protección, escoria y desoxidación están en el núcleo o alma del alambre tubular y no requiere de fundentes externos o gases protectores. Los electrodos de tubulares disponibles tienen una variedad de configuraciones de sección transversal que encierran cierta cantidad de materiales pulverizados. El mas comúnmente usado en su fabricación es un tubo de acero simple formado a partir de una tira longitudinal con costura sin soldar. El interior del tubo es relleno con materiales pulverizados justo antes de cerrar la costura. Cuidado considerable es tomado para que el interior del tubo sea completamente y uniformemente llenado con el polvo. La falta de estos materiales en cualquier longitud del electrodo sería ciertamente un marcado efecto adverso en la composición y la calidad del depósito soldado. La mayoría de los electrodos tubulares son enfriados después de haber sido llenados y cerrados para compactar los materiales pulverizados en el núcleo, y obtener diámetros relativamente pequeños requeridos para soldadura con electrodo tubular. Los electrodos tubulares requieren nuevas consideraciones en la formulación de las

mezclas de los fundentes para el núcleo. Debe considerarse que en lo que respecta con la características de rendimiento del electrodo tubular, estas no solo varían de clasificación en clasificación, sino también de fabricante a fabricante (3). Los diámetros normalizados por la AWS para electrodos tubulares de núcleo de fundente son los siguientes: 1.58 mm, 1.98 mm, 2.38 mm, 3.18 mm, 3.96 mm, 4.76 mm, 5.55 mm, 6.35mm, 7.93 mm. El diámetro del electrodo es seleccionado en base al espesor de material base que se desea soldar, por ejemplo para placas de 6 mm se puede usar diámetro de 2.38 mm.

Es importante mencionar que los electrodos tubulares son utilizados exclusivamente para soldar aceros al carbono y de baja aleación, algunos aceros galvanizados y aluminizados, así como en recubrimientos duros, pudiendo soldar en toda posición, con alto régimen de deposición, habiendo electrodos que pueden proporcionar desde 25 hasta 40 libras por hora, soldar planchas delgadas y láminas de incluso calibre 18. La especificación descrita por AWS para los alambres tubulares es la norma AWS A5.20-69 y determina los requerimientos y composiciones de los electrodos para soldar aceros de baja aleación y al carbono (3).

La tabla I-IV provee los requerimientos a las propiedades mecánicas mínimos estipulados por AWS (3), así como otras importantes características de estos electrodos tubulares. La clasificación AWS A5.20-69 sigue prácticamente las mismas reglas que la clasificación para electrodos revestidos, pero establece ciertos cambios que son necesarios. Una designación típica como E60T-7, el prefijo "E" significa electrodo para soldadura al arco como en otros sistemas de clasificación. El número "60" indica la resistencia tensil mínima en psi, que va de 60000 a 69000 psi. La letra "T" indica que es un electrodo de construcción tubular. El sufijo "7" designa al electrodo de un determinado grupo basado en la composición química del metal depositado, tipo de corriente y polaridad de operación.

En las tablas I-V y I-VI podemos observar las composiciones químicas de los electrodos tubulares para soldar aceros al carbono y de baja aleación así como los ensayos requeridos para determinar las propiedades mecánicas de la unión soldada (3).

Para alcanzar el requerimiento de 70 Ksi, muchos fabricantes de electrodos proponen contenidos de carbón en el metal soldado en el rango aproximado de 0.05 a 0.12%, y contenido de manganeso en un rango

TABLA I - IV
PROPIEDADES MECANICAS DE LOS ELECTRODOS
DE ALAMBRE TUBULAR
NORMA AWS A5.20-69 (3)

CLASIFICACION	GAS	CORRIENTE & POLARIDAD	RESISTENCIA TENSIL	RESISTENCIA A LA FLUENCIA	ELONGACION EN 2 plg	IMPACTO V - Notch
AWS	PROTECTOR		min, psi	en 0.2% min, psi	min, %	min lb - pie
E60T-7	Ninguno	DC/polaridad directa	67000	55000	22	No hay req.
E60T-8	Ninguno	DC/polaridad inversa	62000	50000	22	20
E70T-1	Ninguno	DC/polaridad inversa	72000	60000	22	20
E70T-2	Ninguno	DC/polaridad inversa	72000	No hay requerimiento		No hay req.
E70T-3	Ninguno	DC/polaridad inversa	72000	No hay requerimiento		No hay req.
E70T-4	Ninguno	DC/polaridad inversa	72000	60000	22	No hay req.
E70T-5	Ninguno	DC/polaridad inversa	72000	60000	22	20
E70T-6	Ninguno	DC/polaridad inversa	72000	60000	22	20
E70T-G	No especifica	No especifica	72000 (1 pase)	No hay requerimiento		No hay req.
	No especifica	No especifica	72000	60000	22	No hay req.

**TABLA I-V
COMPOSICION QUIMICA
PARA ELECTRODOS TUBULARES
SEGUN AWS (3)**

CLASIFICACION	COMPOSICION QUIMICA (% max)							
AWS	Mn	Si	Ni	Cr *	Mo *	V *	Al	
E60T-7	1.5	0.9	0.5	0.2	0.3	0.08	1.8	
E60T-8	1.5	0.9	0.5	0.2	0.3	0.08	1.0	
E70T-1	1.75	0.9	0.3	0.2	0.3	0.08		
E70T-2			No hay requerimiento químico					
E70T-3			No hay requerimiento químico					
E70T-4	1.5	0.9	0.5	0.2	0.3	0.08	1.8	
E70T-5	1.5	0.9	0.3 *	0.2	0.3	0.08		
E70T-6	1.5	0.9	0.8	0.2	0.3	0.08		
E70T-G			No hay requerimiento químico					
* Estos elementos pueden estar presentes, pero no son intencionalmente añadidos								

**TABLA I-VI
ENSAYOS REQUERIDOS PARA PROPIEDADES MECANICAS
EN ELECTRODOS TUBULARES (3)**

CLASIFICACION AWS	TIPO DE ENSAYO REQUERIDO				
	RADIOGRAFICO	TODA LA SOLDADURA TRACCION	TENSION TRANSVERSAL	DOBLADO	IMPACTO Charpy V-Notch
E60T-7	Si	Si	No	No	No
E60T-8	Si	Si	No	No	Si
E70T-1	Si	Si	No	No	Si
E70T-2	No	No	Si	Si	No
E70T-3	No	No	Si	Si	No
E70T-4	Si	Si	No	No	No
E70T-5	Si	Si	No	No	Si
E70T-6	Si	Si	No	No	Si
E70T-G	No	Nota 1	Nota 1	No	No

Nota 1: Si el electrodo es para un solo pase se requiere del ensayo de tensión transversal
Si el electrodo es para multiples pases se requiere del ensayo de tensión transversal a toda la soldadura

de 0.5 a 1.75%. Silicio es introducido generalmente como desoxidante de 0.2 a 0.9% principalmente por la adición de ferrosilicio pulverizado al material del núcleo (3), ya que no se encuentra en la cantidad adecuada en la tira de acero.

El electrodo usado para el desarrollo del trabajo es uno que se encuentra dentro del grupo de los E70T-G y el grupo F6 del ASME bajo la norma de AWS E71T8 N11. Las agencias encargadas de proporcionar la aprobación de este electrodo y algunas de sus características se detallan a continuación (5):

- Nombre del Electrodo: NR-203 N11%

Diámetros disponibles: 5/64 y 3/32

Agencias certificadoras: AWS, ABS y Lloyd's

- Clasificación del producto según:

AWS A5.29-80, E71T8-N11

ABS 3SA (5/64) 3YSA (3/32)

Lloyd's 3S (5/64) 3YSH (3/32)

- Resistencia a la tracción según:

AWS: 72000 a 89000 lb/plg²

ABS: 71100 a 95000 lb/plg²

Lloyd's: 66700 a 95700 lb/plg²

Lincoln Electric (fabriante): 76000 lb/plg²

- Resistencia a la fluencia según:

AWS: 60000 a 75000 lb/plg²

ABS: 54000 lb/plg² min.

Lloyd's: 54400 lb/plg² min.

Lincoln Electric (fabricante): 71000 lb/plg²

- Elongación:

AWS: 22 a 30%

ABS: 20 min.

Lloyd's: 22 min.

Lincoln Electric (fabricante): 25%

- Dureza:

AWS: No se requiere medirla

ABS: No se requiere medirla

Lloyd's: No se requiere medirla

Lincoln Electric (fabricante): 87 Re

- Resistencia al impacto, Charpy a -20 grados F

AWS: No se requiere medirla

ABS: No se requiere medirla

Lloyd's: No se requiere medirla

Lincoln Electric (fabricante): 68 lb-pie

El electrodo E71T8-N11 contiene una composición química determinada por el fabricante, la AWS también establece rangos máximos y mínimos que se detallan a

continuación. Es importante recordar que el análisis químico se realiza en el depósito y no en el electrodo, debido a la inexistencia de una norma para los fundentes utilizados en el núcleo del electrodo tubular. Los elementos y porcentajes establecidos por AWS y el fabricante son (3):

Elemento	AWS (%)	Resultados Típicos (%)
C	0.12 max	0.081
Mn	1.50 max	1.17
Si	0.80 max	0.27
S	0.03 max	0.003
P	0.03 max	0.006
Al	1.80 max	0.88
V	0.05 max	<0.002
Ni	0.8-1.10	0.96
Cr	0.15 max	0.03
Mo	0.35 max	0.02

La capacidad para soldar en determinadas posiciones es influenciada por el tamaño de la zona a soldar, volumen de escoria, diámetro del electrodo, y la capacidad de corriente. Todos los electrodos tubulares pueden soldar en posición plana. Aquellos con regímenes de deposición elevados usualmente

producen las mas económicas soldaduras de posición plana. Como ocurre con los electrodos revestidos, los electrodos de alambre tubular de menor diámetro se usan para soldadura en posición vertical y sobrecabeza, pero su rendimiento y calidad no cubrirá a aquellos electrodos diseñados para trabajar fuera de posición específicamente.

La escoria se diferencia principalmente en su volumen y densidad dentro de los electrodos tubulares. Un volumen elevado de escoria se asocia a un tipo de operación de posición limitada (5). El tipo de escoria de gran volumen producida es usualmente del tipo densa, este tipo de escoria produce la acción deseada de protección del metal fundido previniendo la contaminación atmosférica cuando el depósito se solidifica y también cuando estando sólido se enfría. El tipo de escoria producida con los electrodos de tubulares de núcleo de fundente es de bajo volumen, especialmente aquellos diseñados para soldar fuera de posición, sea en vertical o sobrecabeza o aquellos para unir rápidamente materiales de pequeños espesores, siendo fácilmente removible y además promueven la acción de goteo y fusión uniforme entre el depósito y el material base a lo largo de la unión.

CARACTERISTICAS DEL FUNDENTE DE LOS ELECTRODOS TUBULARES

Los electrodos tubulares tienen la particularidad de ser poco sensibles a absorber humedad, lo que permite guardarlos bajo condiciones normales de almacenamiento, siendo un punto de especial importancia la facilidad de manejo de los electrodos tubulares de bajo hidrógeno con respecto a los electrodos revestidos del mismo tipo, siendo posible usarlos directamente de la caja de cartón de embarque y además se caracterizan por tener tanto o menos hidrógeno que los electrodos revestidos.

Los constituyentes en el núcleo pulverizado incluye agentes del fundente, ionizadores de arco, metales para desoxidar como ferrosilicio y ferromanganeso, y ciertas aleaciones cuando se requiere. Algo de CO_2 para proteger puede ser generado por los agentes del fundente, como piedra caliza (cal), como fuere, la mayoría de electrodos no producen gases generados por si mismo para la protección del arco. El núcleo de los electrodos contiene una combinación de agentes de fundente solidos, desoxidantes, ingredientes generadores de gas como protectores internos. Este electrodo por lo tanto representa un electrodo cubierto que se le ha dado la vuelta. La cantidad de materiales de fundente que se encuentran en el núcleo

representan usualmente 15 a 20% del total en peso del alambre (5). Porque del uso de electrodos tubulares para deposición rápida de metales pesados, el electrodo debe ser capaz de ser maniobrable con altas corrientes sin deteriorar las propiedades de la operación.

El fundente actúa como estabilizador del arco, formando escoria, como depurador del metal, proporcionando al metal fundido ciertos elementos útiles, etc. Es importante mencionar que las funciones principales del fundente son, funciones eléctricas, metalúrgicas y físicas. Las funciones eléctricas comprenden aspectos como mantención del poder termoiónico, conductibilidad térmica, ionización de los metales, entre las principales. En la función física se incluyen la naturaleza del fundente que determina la densidad y volumen de la escoria, siendo ésta preferentemente fluida para facilitar los cambios entre el metal y la propia escoria, además regula la velocidad de las reacciones durante del proceso de soldadura. La función metalúrgica provoca cambios en las estructuras de los depósitos y de la zona afectada por el calor variando las propiedades mecánicas del depósito tratando de homogeneizar el conjunto. Los tipos de fundentes utilizados en los electrodos de alambre no son

normalizados por AWS y cada fabricante guarda en secreto sus composiciones y no se encuentran disponibles al público (3), cosa que no ocurre con los electrodos manuales con revestimientos de tipo ácido, básico, oxidante, de dióxido de titanio, celulósico, y rutilico.

1.4. APLICACIONES DEL PROCESO

El proceso de soldadura con arco eléctrico que utiliza electrodos tubulares de núcleo de fundente autoprotectidos permite cubrir virtualmente todos los requisitos de soldadura, existiendo aplicaciones como:

Soldadura de reparación, fabricación de maquinarias, soldadura de ensamblaje, construcción de barcos, y lanchones, soldadura para tanques de almacenamiento, instalación de aceros estructurales para edificios y estructuras metálicas, soldadura para tuberías de alta presión, es decir, soldadura de aceros al carbono y de baja aleación (5).

Aceros de baja aleación también pueden ser soldados usando los electrodos tubulares, de esta manera a los aceros al carbono se les agrega una pequeña cantidad de elementos aleantes como níquel, cromo y molibdeno para mejorar la resistencia, dureza o tenacidad del

mismo. En ciertas ocasiones el aumento de estos elementos aleantes puede hacer variar la soldabilidad aumentándola ligeramente o cambiando cualquier otra característica de fabricación, habrá que tener mayor cuidado al soldar aceros de baja aleación que con aceros al carbono. Otras aplicaciones en reparación y montaje se presentan a continuación:

- Tuberías a presión, oleoductos, bombas de agua, intercambiadores de calor, condensadores, cilindros, tanques de almacenamiento, bridas, evaporadores, torres de enfriamiento, chimeneas, etc.
- Construcción de armaduras, techos, pilares, soldadura de vigas, soldadura de planchas, lanchones, etc.

Con la selección adecuada del equipo, el proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo tubular de núcleo de fundente es aplicable a los requerimientos de la industria. Puede ser usado en todo tipo de juntas y permite soldar un amplio rango de espesores de aceros al carbono y de baja aleación tan delgados como calibre 18 hasta muy gruesos y pesados, también es posible desarrollar trabajos donde la deposición de metal es muy elevada, de 25 a 40 libras por hora. También es aplicable como recubrimiento duro y en muy pocos casos se usa para soldar aceros aluminizados y

galvanizados.

La actividad para la limpieza es rápida porque la escoria generada es delgada y quebradiza, y cuando no se requiere característica de alta penetración es posible soldar sin preparar una junta, lo que reduce los costos del proceso.

Las aplicaciones con los electrodos de alambre tubular de alma de fundente autoprotegidos se realizan en consideración a:

- El tipo de material que se va a soldar
- La posición en que se va soldar
- Espesor y dimensiones de la pieza de trabajo
- Aspecto requerido para el cordón
- Tipo de escoria deseada en el depósito
- Propiedades específicas del cordón
- Requisitos de código que debe reunir el electrodo
- Tipo de junta requerida para el proceso

Según algunos fabricantes de electrodos, éstos se los divide de acuerdo a una aplicación que toma como referencia (4):

- Para soldadura de alta deposición
- Para características de resistencia al impacto
- Para soldadura general de fabricación, montaje y reparación.

- Soldadura de plancha fuera de posición.
- Soldadura para tuberías de alta penetración.

El número de pases que deben efectuarse dependen de la aplicación respectiva y es posible encontrar normalizadas juntas establecidas por AWS, pero el sector comercial, en otras palabras los fabricantes, tienen también sus propias recomendaciones respecto a la aplicación de un determinado tipo de electrodo tubular de núcleo de fundente autoprotegido, debido a que la Sociedad Americana de Soldadura no ha establecido aún un patrón estricto a cumplir, como ocurre con los electrodos revestidos.

Según los fabricantes la selección del electrodo tubular como recubrimiento duro se basa en:

- Relleno o reconstrucción dimensional
- Fricción metal-metal
- Impacto severo
- Abrasión e impacto
- Abrasión severa

Las propiedades químicas y mecánicas según el ASTM para un acero con designación ASTM A 283 grado C están resumidas en la tabla I-VII, lo que permite conocer mejor los requerimientos mínimos que el electrodo tubular debe cumplir para nuestro trabajo.

TABLA I-VII
PROPIEDADES MECANICAS Y QUIMICAS
PARA EL ACERO ASTM A 283 grado C (6)

Composición química

Elemento	Análisis según ASTM
Carbono, max (%)	0.25
Manganeso (%)	----
Silicio, max (%)	----
Fósforo, max (%)	0.04
Azufre, max (%)	0.05
Cobre, min (%)	0.20

Propiedades Mecánicas

Esfuerzo a la tracción (lb/plg ²)	55000 - 65000
Esfuerzo a la fluencia (lb/plg ²)	30000
Elongación en 8 plg (%)	22
Elongación en 2 plg (%)	25

1.5. INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE SOLDADURA AL ARCO EN LAS PROPIEDADES DE LA UNION SOLDADA.

Los variables que pueden influir en el proceso de soldadura al arco son muchas, y la mayoría de ellas controlables, tal es el caso del voltaje de arco, amperaje, velocidad de avance, distancia entre la punta del electrodo y el metal fundido, el diámetro del electrodo, la posición de la soldadura, y cuando se usa electrodo tubular interviene también la prolongación electrizada. Otro factor que es una consecuencia de los anteriores es la cantidad de calor generado durante la soldadura, lo que puede llevar a producir distorsión, cambios metalúrgicos, esfuerzos residuales, reacciones químicas, que al final nos proporcionarán una unión soldada satisfactoria o no.

Cuando se produce el arco eléctrico, éste actúa como una fuente de calor en movimiento que se desplaza a un valor conocido como velocidad de avance sobre la superficie de trabajo, de esta manera debido al proceso de calentamiento y enfriamiento en la zona cercana al metal soldado, éste se ve afectado y sufre ciclos térmicos que afectarán el tipo de estructura, en especial el tamaño de grano; además en el cordón de soldadura se presentan otros cambios, como formación de martensita, lo cual depende mucho de la

velocidad de enfriamiento del metal depositado durante el proceso.

Como ya se mencionó anteriormente son algunos los factores que pueden alterar las propiedades de la unión soldada, pero los tres principales son (7):

- Voltaje de la soldadura, V , medida en voltios
- Corriente de la soldadura, I , medida en amperios
- Velocidad de avance, S , medida en milímetros por segundo.

Las propiedades que son afectadas principalmente por estos parámetros son:

- La penetración, entendiéndose como ésta a la distancia desde la superficie del metal base hasta el borde del depósito de material fundido
- El área transversal del cordón, la que afecta directamente a la dilución, que es la relación entre las áreas transversales del metal fundido y el área total del cordón.
- El ancho del cordón, volviéndose el depósito mas plano, cóncavo o convexo.

De hecho cuando los parámetros de soldadura son inadecuados se presentan problemas como porosidad, cordón nudoso y convexo, salpicadura, choque del electrodo con la pieza de trabajo, etc.

Cuando los tres principales parámetros se combinan, existe una ecuación que permite relacionarlos con la penetración (7):

$$P = C(I^4/S.V^2)^{1/3} \quad (\text{Ec. 1-1})$$

Donde:

P. es la penetración

V, el voltaje

S. la velocidad de avance

I, la corriente

C, la constante característica de cada proceso, el cual es un valor empírico obtenido por experimentación.

La ecuación anterior confirma la relación de dependencia de la penetración con los parámetros antes mencionados, lo importante ahora es saber cual de ellos afecta mas fuertemente.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el arco producido actúa como una fuente de calor en movimiento, esta cantidad de calor suministrada depende directamente de las variables, voltaje, corriente y velocidad de avance, de acuerdo a la relación (7):

$$H_{\text{neto}} = (f.V.I)/S \quad (\text{Ec. 1-2})$$

Donde H_{neto} es la cantidad de calor suministrada en el proceso y f es la eficiencia de transferencia de calor característica de cada proceso, que para efectos de rapidez de cálculo se considera igual a uno aunque realmente no toda la energía generada por el arco eléctrico ingresa al metal base, por lo que se hace necesario introducir dicho factor de corrección o eficiencia.

Esta cantidad de calor permite depositar mayor o menor cantidad de material según el tipo y tamaño de la junta, diámetro del electrodo, el número de pases requerido y el proceso de soldadura. La energía o calor suministrado se mide en Joules por milímetro, o en cualquier otra unidad de energía por unidad de longitud, para lo cual es necesario observar las siguientes conversiones:

$$H_{\text{neto}} = (\text{Volt.Amp})/(\text{plg/hr}) =$$

$$\text{Watt.hr/plg} \cdot (3.41 \text{ BTU/watt.hr}) \cdot (1054 \text{ Joules/BTU}) =$$

$$\text{Joules/plg} \cdot (0.03937 \text{ plg/mm}) =$$

Joules/mm

Para poder establecer y predecir los posibles cambios en la estructura metalúrgica de la soldadura es necesario conocer como varía la temperatura (7), especialmente en la zona afectada por el calor, para lo cual es útil saber la relación siguiente:

$$1/(T_p - T_o) = [(4.13fCtY)/H_{meta}] + [1/(T_r - T_o)] \quad (\text{Ec. 1-3})$$

Donde:

T_p = Temperatura máxima, en grados centígrados a una distancia Y (mm) de la línea de fusión. Esta ecuación no es válida en el cordón, sino en su zona adyacente.

T_o = Temperatura inicial uniforme del metal base, en grados centígrados.

T_r = Temperatura de fusión del metal soldado, en grados centígrados.

f = Densidad del material, en gramos por milímetro cúbico.

C = Calor específico del metal sólido, en Joules por gramo-grado centígrado

fC = Calor específico volumétrico, en Joules por milímetro cúbico-grado centígrado

t = Espesor del metal base. en milímetros.

La ecuación antes mencionada nos permite calcular valores de gran importancia, tales como, ancho de la

zona afectada por el calor, temperatura máxima en un punto determinado fuera del cordón de soldadura, mostrar como afectaría el precalentamiento al ancho de la zona afectada por el calor y ver que el ancho de la ZAC varía directamente proporcional con el calor de entrada suministrado en el proceso (7).

Cuando los ciclos térmicos complejos desarrollados en la zona adyacente al cordón y en el depósito mismo de soldadura se llevan a cabo, se producen cambios en la microestructura, lo cual dependería principalmente del régimen de enfriamiento desarrollado en el proceso, lo que puede afectar indudablemente las propiedades mecánicas de la unión soldada. Referirse a un régimen de enfriamiento simple en una soldadura sería inadecuado, porque varía con la posición y el tiempo. El método mas útil es determinar el régimen de enfriamiento en la línea central de la soldadura en el instante en que el metal pasa por una temperatura particular de interés, a la que llamaremos T_0 . A temperaturas por debajo de la de fusión, la razón de enfriamiento en la soldadura y en su inmediata zona afectada por el calor es sustancialmente independiente de la posición. Con los aceros al carbono y de baja aleación, la temperatura de interés es aquella donde se encuentra la nariz perlítica en los diagramas temperatura-tiempo-

transformación, también llamados TTT. La temperatura exacta no es crítica, pero debe ser la misma para todos los cálculos y comparaciones, para lo que se suele ser bastante satisfactorio usar 550 grados centígrados para la mayoría de los aceros.

El principal uso de la ecuación del régimen de enfriamiento es en el cálculo de la temperatura de precalentamiento, que para un solo pase en una unión de dos planchas de igual espesor sería de la siguiente manera:

1) Para planchas gruesas donde se requiere de seis o mas pases la relación para el régimen de enfriamiento viene dada por (7):

$$R = 2\pi k(T_c - T_o)^2 / Hn\sigma \quad (\text{Ec. 1-4})$$

Donde:

R. es el régimen de enfriamiento medido en grados centígrados por segundo en el instante cuando el punto pasa a la temperatura de interés T_c .

π , es el valor adimensional 3.14159

k. es la conductividad térmica del metal, en Joules por milímetro-segundo-grado centígrado

De cualquier manera el régimen de enfriamiento cerca del límite de la fusión es solo un pequeño porcentaje

menor que en la línea central, lo que hace a la ecuación aplicable a toda la soldadura y a la zona afectada por el calor inmediata.

2) Para planchas delgadas donde se requiere de cuatro o menos pases la relación viene dada por (7):

$$R = 2\pi k f C (t/H_{\text{nete}})^2 (T_c - T_o)^3 \quad (\text{Ec. 1-5})$$

El poder definir si el metal base es grueso o delgado es un aspecto relativo que requiere definir un ancho relativo de la plancha, que llamaremos T^* . Si T^* es mayor que 0.9 se usará la ecuación para planchas gruesas, y si es menor que 0.6 la de planchas delgadas. Para valores intermedios la primera ecuación da valores demasiado altos, mientras la segunda proporciona valores demasiado bajos, pero el error no excederá del 15% (7).

$$T^* = t [f C (T_c - T_o) / H_{\text{nete}}]^{1/2} \quad (\text{Ec. 1-6})$$

La manera práctica mas común de controlar el régimen de enfriamiento es regulando la energía desarrollada en el arco eléctrico por unidad de longitud de soldadura depositada, es decir H_{nete} .

Hay que establecer que el área transversal del cordón

soldado depende también de los parámetros de soldadura. de esta forma Jackson estableció una ecuación empírica basada en suficientes datos para los diversos procesos con arco eléctrico que incluye obviamente al proceso de soldadura con electrodo tubular de núcleo de fundente (7):

$$A = 1122 \times 10^{-7} I^{1.55} / S^{0.903} \quad (\text{Ec. 1-7})$$

Donde A es el área transversal del cordón de soldadura en pulgadas cuadradas, I la corriente en amperios y S la velocidad de avance de la fuente de calor en pulgadas por minuto. Existen prácticos nomogramas que nos facilitan el uso de esta relación, de manera que conociendo la velocidad de avance y el amperaje es posible determinar el área transversal del cordón, que es una indicación de la energía suministrada en el proceso, sabiendo que esta última afectaría las propiedades mecánicas del depósito, entre ellas la dureza.

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. SELECCION DEL METAL BASE, MATERIAL DE APORTE Y EQUIPO

En este trabajo se utilizó como material base un acero estructural A36 con designación ASTM A283 grado C, considerado como un acero al carbono de resistencia tensil intermedia en placas de 6 milímetros.

Este tipo de acero se utiliza en diferentes aplicaciones que incluyen, bombas verticales, tuberías a presión, estructuras metálicas, entre otras, razón por la cual es posible obtenerlo en planchas de diferentes espesores.

La resistencia permisible determinada para el acero ASTM A 283 grado C nos permite determinar las mínimas propiedades del material de aporte con lo que se asegura que la unión soldada cuenta con la misma o mayor capacidad para resistir los esfuerzos a los que se vería sometido el metal base durante su operación normal.

El acero ASTM A283 grado C es una solución sólida intersticial formada por una matriz ferrítica, que

aparece en forma de granos equiaxiales, relativamente homogéneos, lo que es característico de los aceros laminados y también hay presente una estructura perlítica, de color oscuro, en los bordes de grano. Sabiendo que para este trabajo se utilizó un acero de bajo carbono, lo cual es importante saber para entender los cambios microestructurales que ocurren durante el proceso de soldadura, además los aceros con porcentajes elevados de carbono, mayores a 0.3%, requieren el uso de electrodos tubulares de bajo hidrógeno y/o calentamiento previo para minimizar la tendencia a la fractura.

El metal de aportación que se usó fue una bobina de electrodo tubular de núcleo de fundente con clasificación AWS E71T8-N11 y se encuentra dentro del grupo F6 del ASME. Tenía 2.38 milímetros de diámetro y su nombre comercial es NR-203 N11%.

El electrodo E71T8-N11 es diseñado para trabajar en toda posición con capacidad para soportar impacto, aún cuando la norma AWS no requiere de dicha prueba. Es también recomendado para ser usado con aceros estructurales como A283, A588 y otros, además donde se requiera de buena tenacidad a baja temperatura. A continuación se detallarán los equipos utilizados durante el proceso de soldadura con electrodo tubular

de núcleo de fundente autoprotegido y aquellos equipos para control y medición de las propiedades de la unión soldada.

1) Máquina de soldar Lincoln Electric. Modelo DC 600 de 600 amperios. 220/440 - trifásica, genera corriente directa CD y puede operar con voltaje constante y voltaje variable. La corriente de entrada debe ser de 110 amperios y 60 Hz de frecuencia. Según NEMA las características de salida son 600 amperios, 44 voltios y ciclo de trabajo del 100%. Algunas características adicionales son, diseñada para procesos de soldadura con electrodo revestido, TIG, electrodo tubular, MIG y arco sumergido, en aplicaciones manuales, semiautomáticas y automáticas. Voltaje de entrada de 208 a 575 voltios de acuerdo a la zona de trabajo, con características excelentes tanto en procesos con VC así como con CC.

2) El alimentador de electrodo Lincoln Electric. Modelo LN-9N de control digital. Es aplicable para procesos con electrodo tubular, MIG y arco sumergido. Capacidad de trabajo con electrodos de diámetro de 1.2 a 3.0 milímetros, con ajuste de presión calibrado de los rodillos impulsores. El rango de control para la velocidad de alimentación del electrodo es de 21 a 250 mm/s lo que representa desde

145 hasta 600 amperios aproximadamente. El rango de control de voltaje es de 12.0 a 60.0 voltios. El poder de entrada es de 110/115 VAC, 50/60 Hz. La temperatura ambiente recomendada durante el trabajo es desde -40 °C hasta 45 °C, y durante el almacenamiento hasta 85 °C, además pesa aproximadamente 13.3 Kg sin la bobina de electrodo.

3) Pistola Lincoln Electric. Modelo K-126 con boquilla a 45 grados. Trabaja bajo régimen de 350 amperios y admite electrodos de 1.6 mm hasta 2.38 mm.

4) Se recomienda usar la guía aislada Lincoln Electric modelo S17217-1 y la pieza de contacto modelo T14050-3/32 que son compatibles a la pistola modelo K-126.

Otros equipos de taller y laboratorio fueron utilizados, tales como:

5) Equipos de máquinas-herramientas como:

- Cortadora automática marca LVD de 200 Toneladas de capacidad, con sistema hidráulico de accionamiento.
- Cepilladora marca Universal, con escuadra para cepillar en un ángulo determinado.
- Limadora portátil marca Sumitomo.

6) Equipo para ensayo de doblado marca Versatester 30 M. de 13600 Kg a 27300 Kg.

7) Equipo para ensayo de tracción de la ESPOL con graficador de curva esfuerzo-deformación.

8) Equipo para Rayos-X de 300 KV, marca ERESKO ES2

9) Negatoscopio S&S marca X Ray Products.

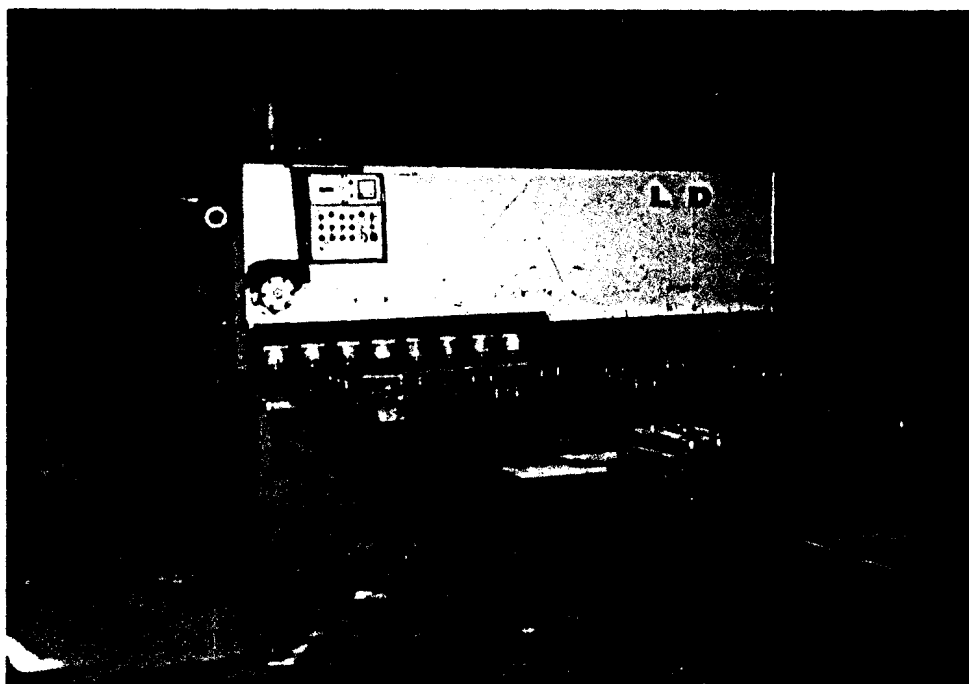
10) Durómetro Rockwell, marca Wilson modelo 1 JR

11) Microscopio metalográfico para microfotografía marca PME OLYMPUS serie 202827.

12) Microscopio metalográfico WILD HEERBRUGG modelo M400 para macrofotografías.

13) Equipo de pulido.

Para el pulido inicial o grueso se efectúa en un banco de pulido de la marca Handimet, comenzando con el papel abrasivo de grano mas grueso, # 200 y se continúa el proceso hasta llegar a granos mas finos, pasando por el # 320, 400 y finalmente el # 600. Para el pulido fino se hace uso de una pulidora de disco marca DAP 8 que cuenta con un paño abrasivo muy fino y además pasta de alúmina APF.



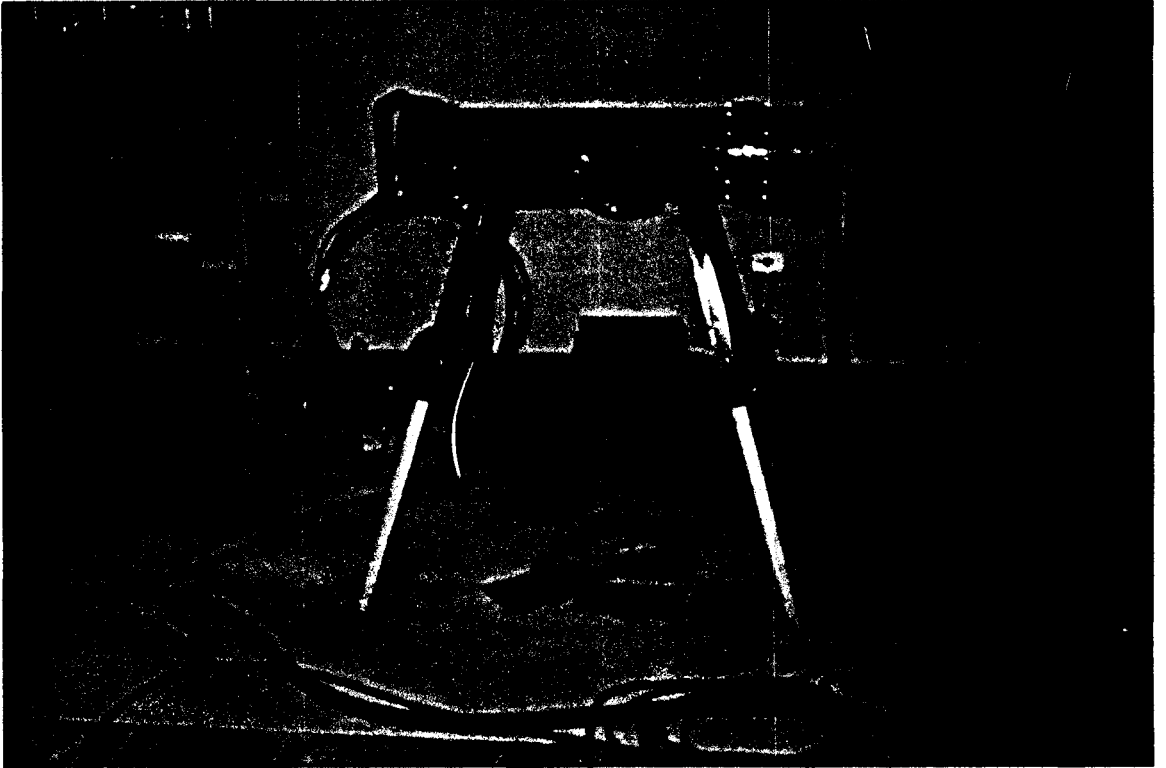
FOTOGRAFIA 2-1
CORTADORA LVD DE 200 TONELADAS
PARA PREPARACION DE LAS PROBETAS



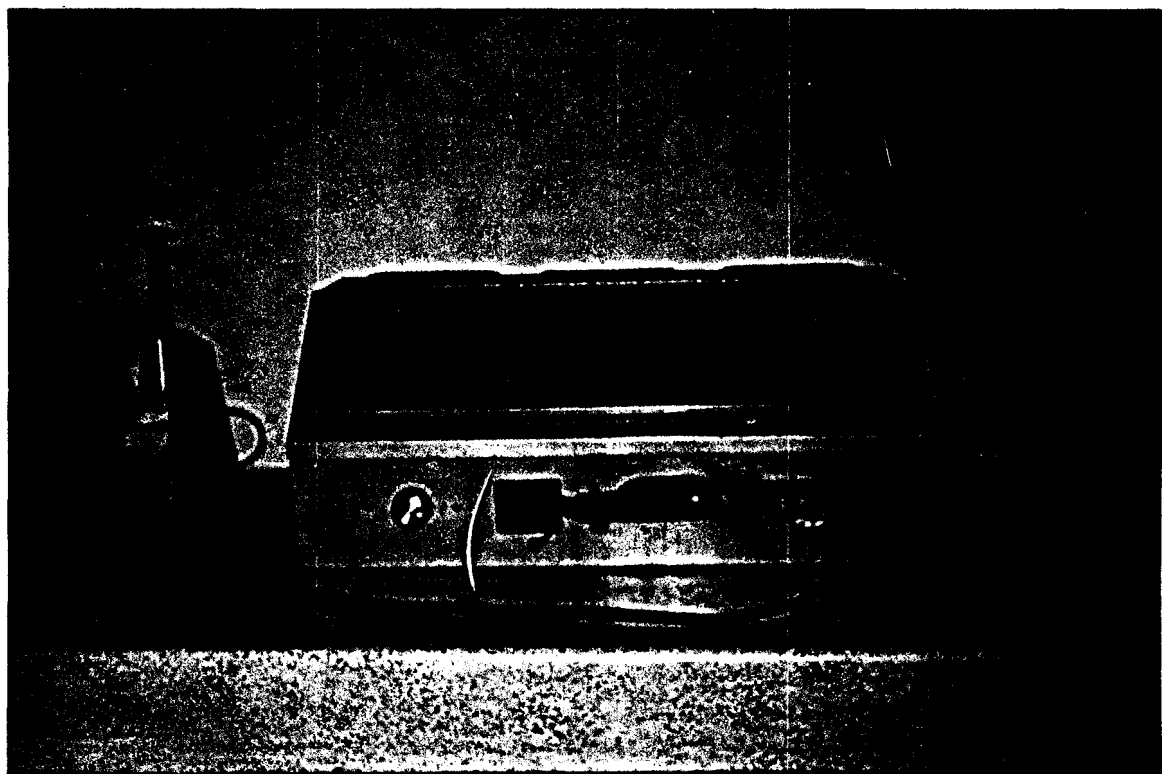
FOTOGRAFIA 2-2

PULIDORA MANUAL MARCA SUMITOMO
PARA LIMPIEZA DE LAS UNIONES SOLDADAS





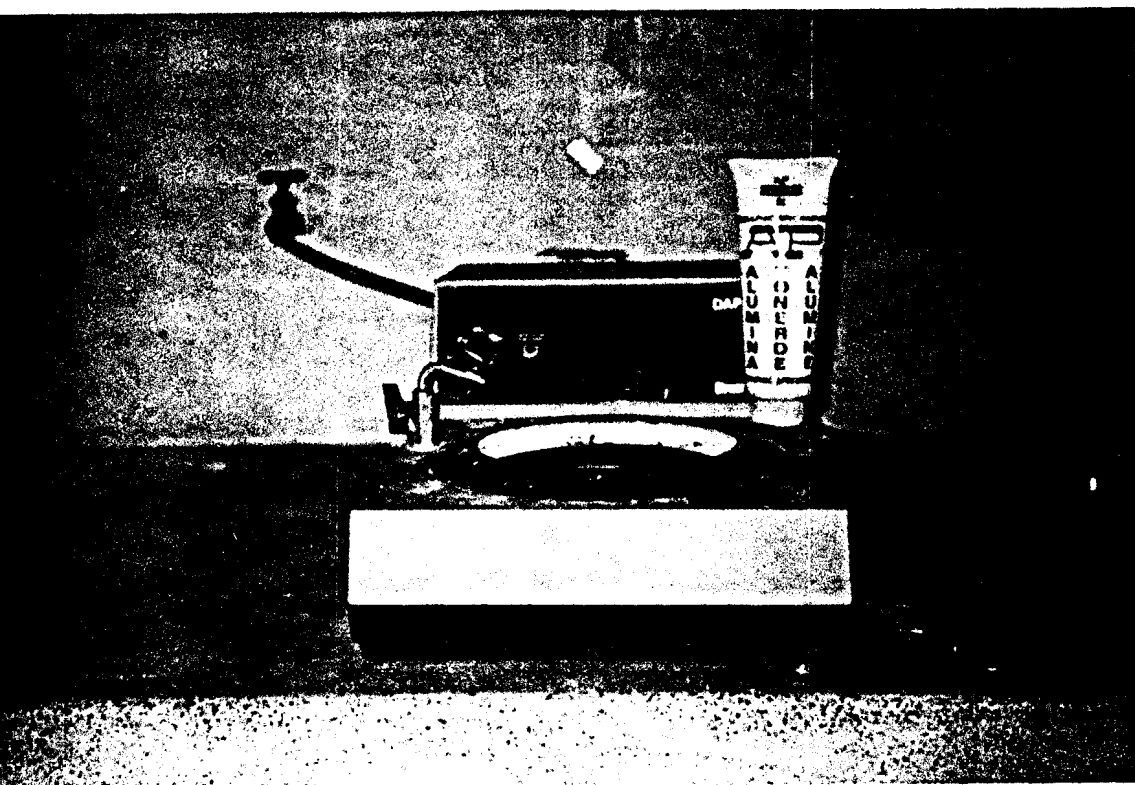
FOTOGRAFIA 2-3
EQUIPO DE RAYOS X
PARA ENSAYOS RADIOGRAFICOS



FOTOGRAFIA 2-4

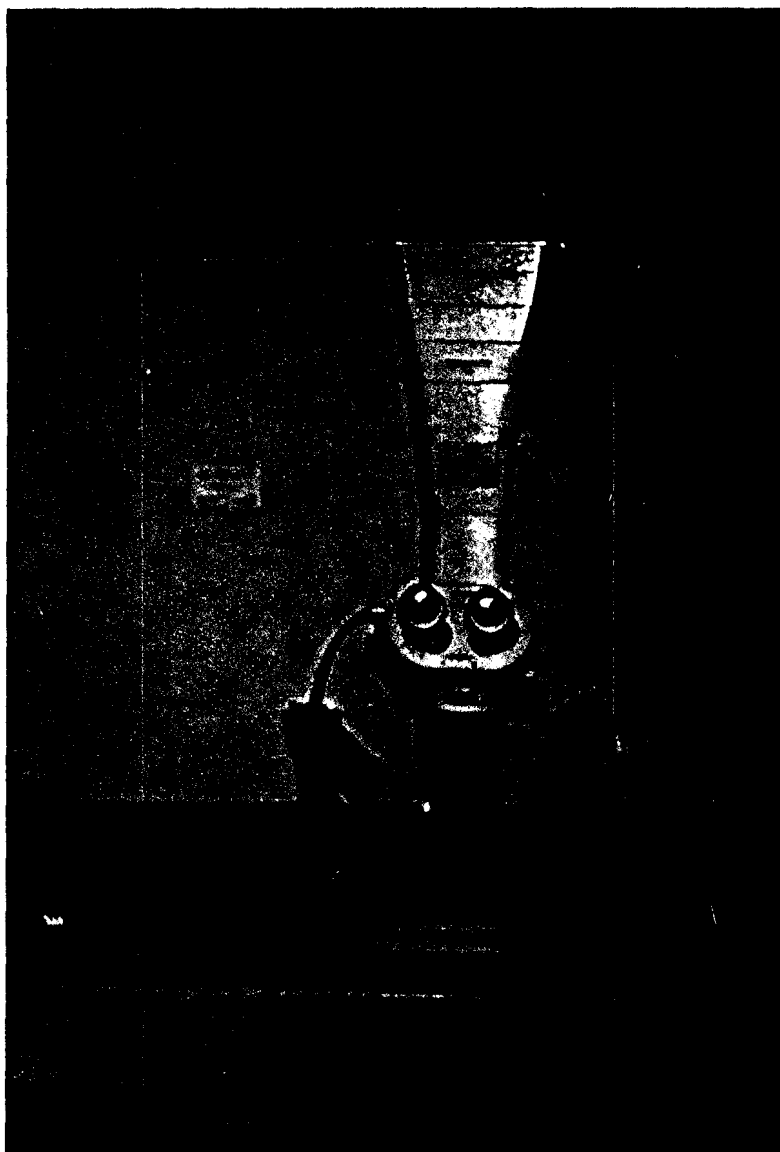
NEGATOSCOPIO

PARA OBSERVACION DE RADIOGRAFIAS

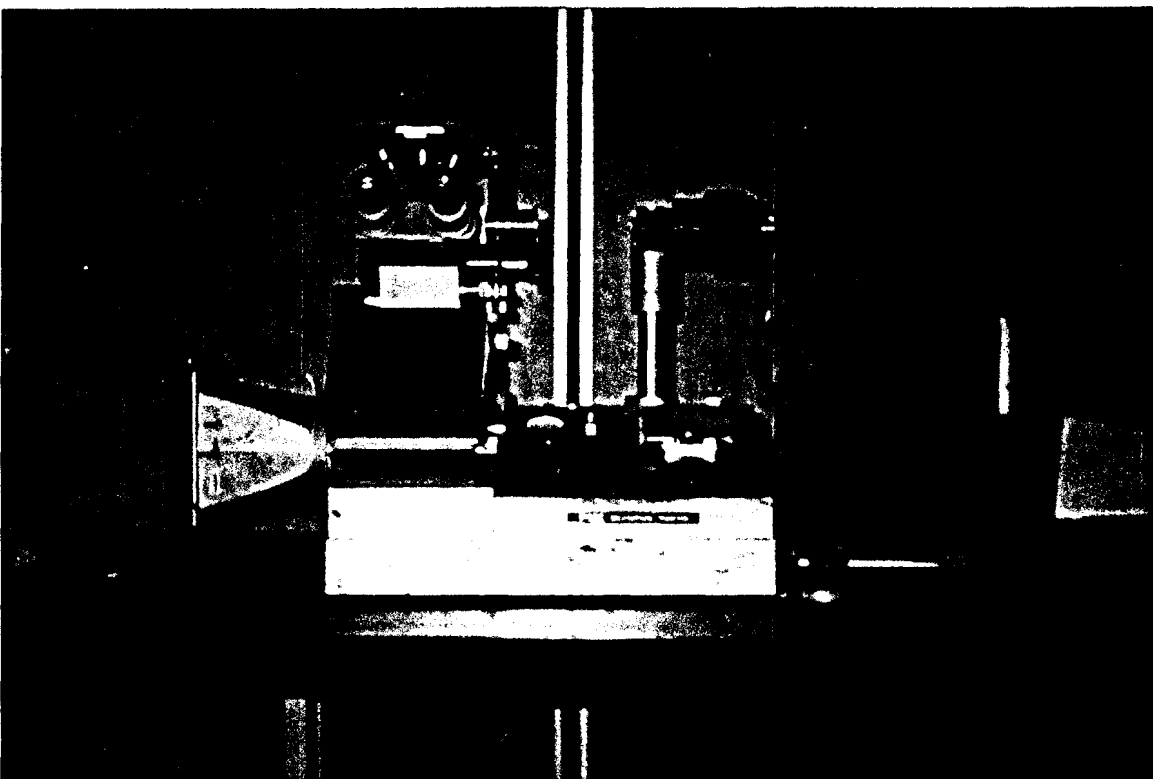


FOTOGRAFIA 2-5

PULIDORA DE DISCO Y PASTA DE ALUMINA
PARA ENSAYO METALOGRAFICO



FOTOGRAFIA 2-6
MICROSCOPIO METALOGRAFICO
PARA MACROFOTOGRAFIA



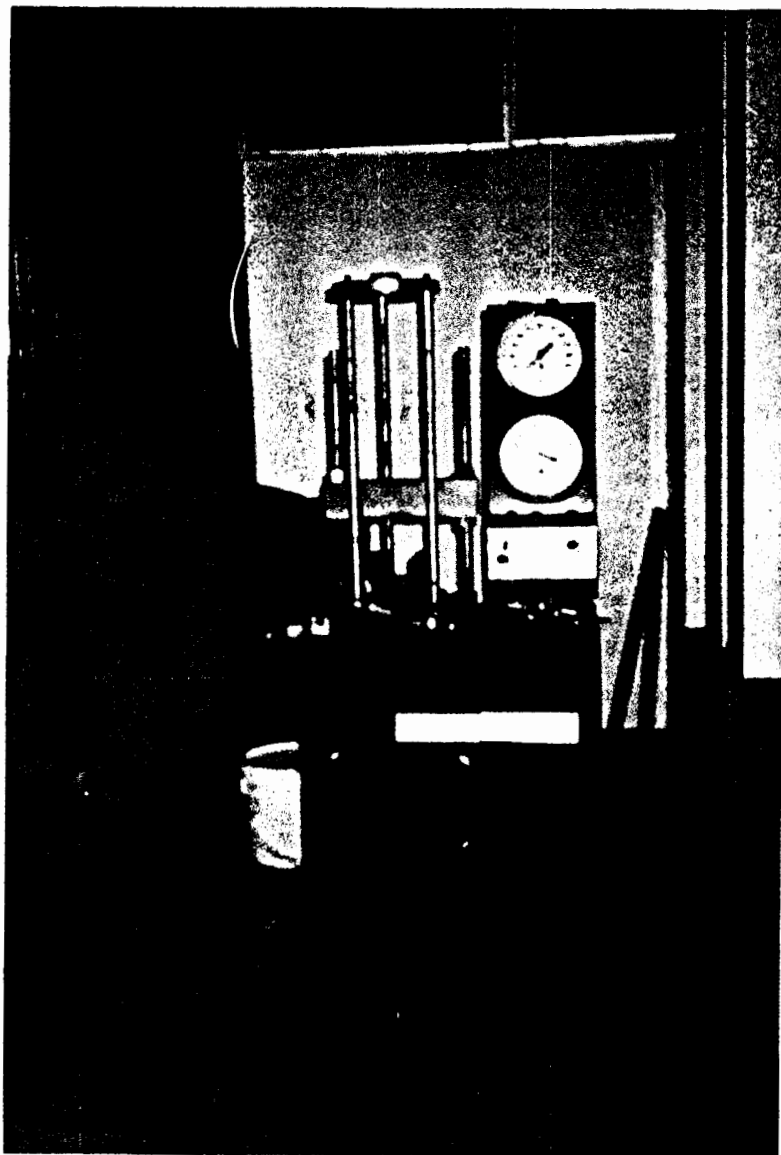
FOTOGRAFIA 2-7
MICROSCOPIO METALOGRAFICO
PARA MICROFOTOGRAFIAS



FOTOGRAFIA 2-8

DUREMETRO

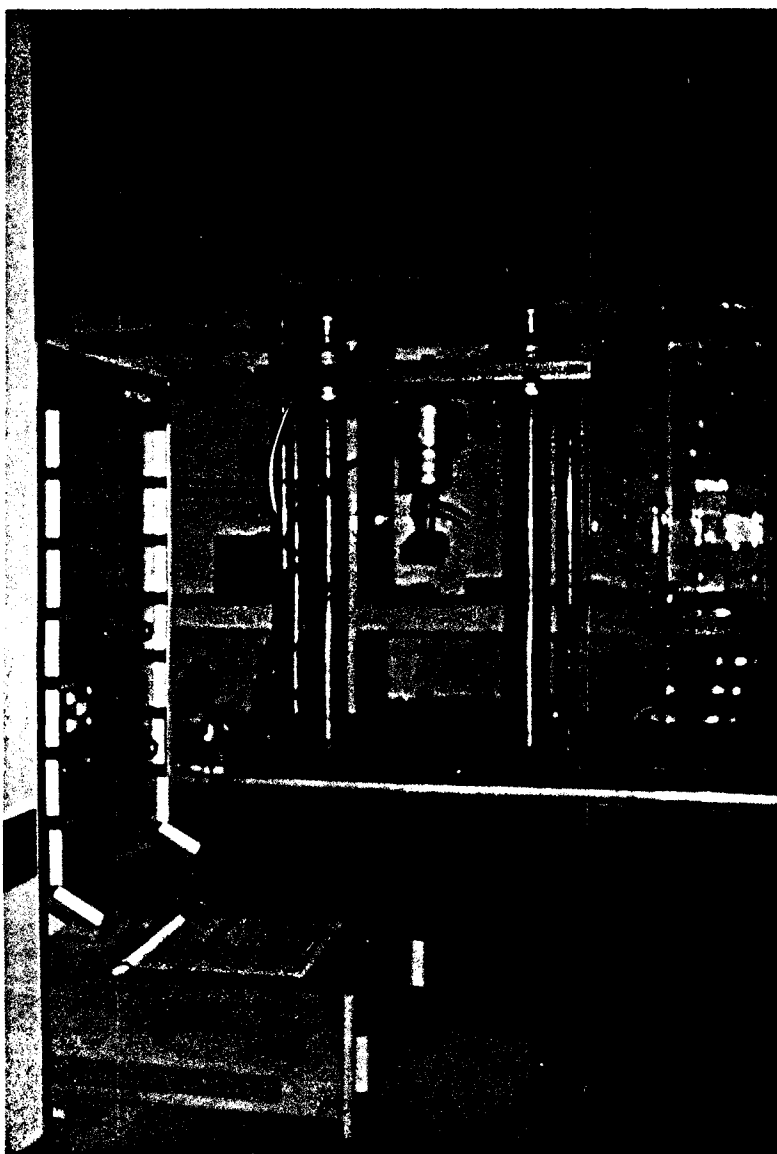
PARA ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL B



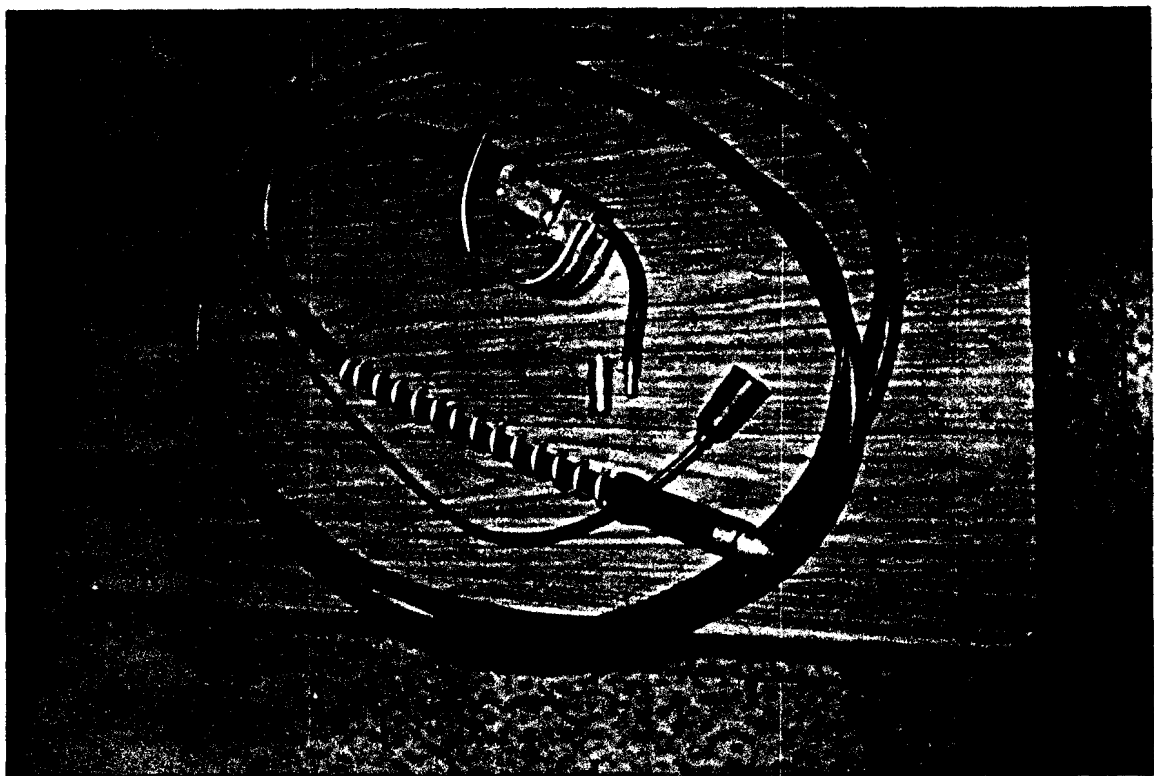
FOTOGRAFIA 2-9

EQUIPO PARA ENSAYO DE DOBLADO

MARCA VERSATESTER

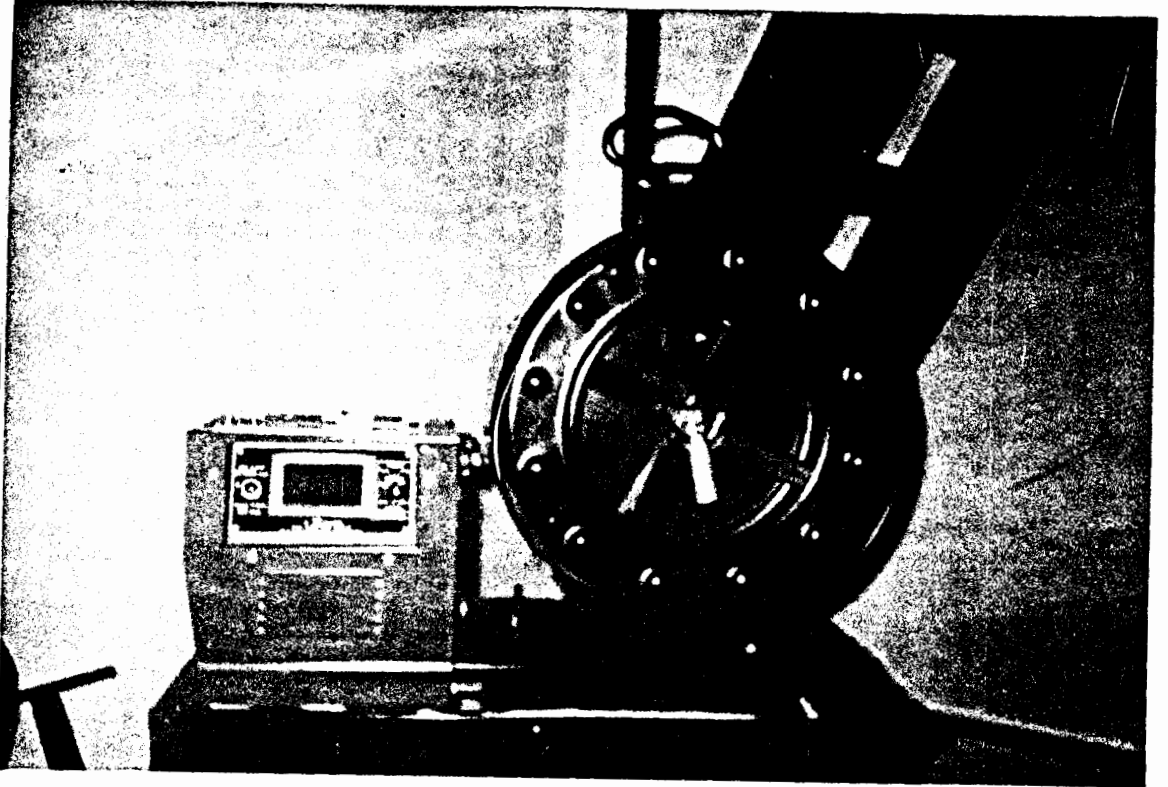


FOTOGRAFIA 2-10
EQUIPO PARA ENSAYO DE TRACCION
Y GRAFICADOR



FOTOGRAFIA 2-11

PISTOLA. PIEZA DE CONTACTO Y BOQUILLA AISLADA
PARA SOLDAR CON ELECTRODO TUBULAR



FOTOGRAFIA 3-12
ALIMENTADOR DE ALAMBRE
PARA SOLDAR CON ELECTRODO TUBULAR

2.2. SELECCION DE LOS PARAMETROS DE SOLDADURA

Debido a la necesidad de controlar estrictamente los parámetros de soldadura, se procedió a establecer una matriz de trabajo donde cada una de las variables principales, voltaje, amperaje y velocidad de avance, se harían variar hasta alcanzar los valores ideales del proceso de acuerdo a las condiciones antes mencionadas. Para el control de la velocidad de avance en el proceso semiautomático se utilizó un mecanismo adaptado al transportador del carro transversal de un torno horizontal, el cual proveía de movimiento controlado a la pieza de trabajo en el sentido de movimiento del mismo. Una vez que se instaló la pieza de trabajo al mecanismo se hicieron variar los valores de voltaje, amperaje y velocidad de avance respectivamente, de acuerdo a lo presentado en la tabla II-I. Estos valores fueron calibrados en el equipo y utilizados para depositar cordones de soldadura sobre la pieza de trabajo, y así elaborar las probetas principales de las dimensiones mencionadas en la figura 2-1 que serían analizadas radiográficamente. De acuerdo a información del fabricante para el electrodo tubular de 2.38 mm de diámetro y del tipo E70T-G, dentro del cual se encuentra el E71T8-N11, que trabaja con una prolongación electrizada 38.1 mm se establece una corriente aproximada de 200 amperios con lo cual es posible

TABLA II-I
SELECCION DE PARAMETROS DE SOLDADURA
CON VELOCIDAD DE AVANCE VARIABLE

PROBETA #	VOLTAJE (Volt)	AMPERAJE (Amp)	VELOCIDAD AVANCE (mm/s)
1	18	200	3.2
2	20	200	3.2
3	22	200	3.2
4	24	200	3.2
5	26	200	3.2
6	22	160	3.2
7	22	215	3.2
8	22	250	3.2
9	22	300	3.2
10	22	200	2.5
11	22	200	3.0
12	22	200	3.5

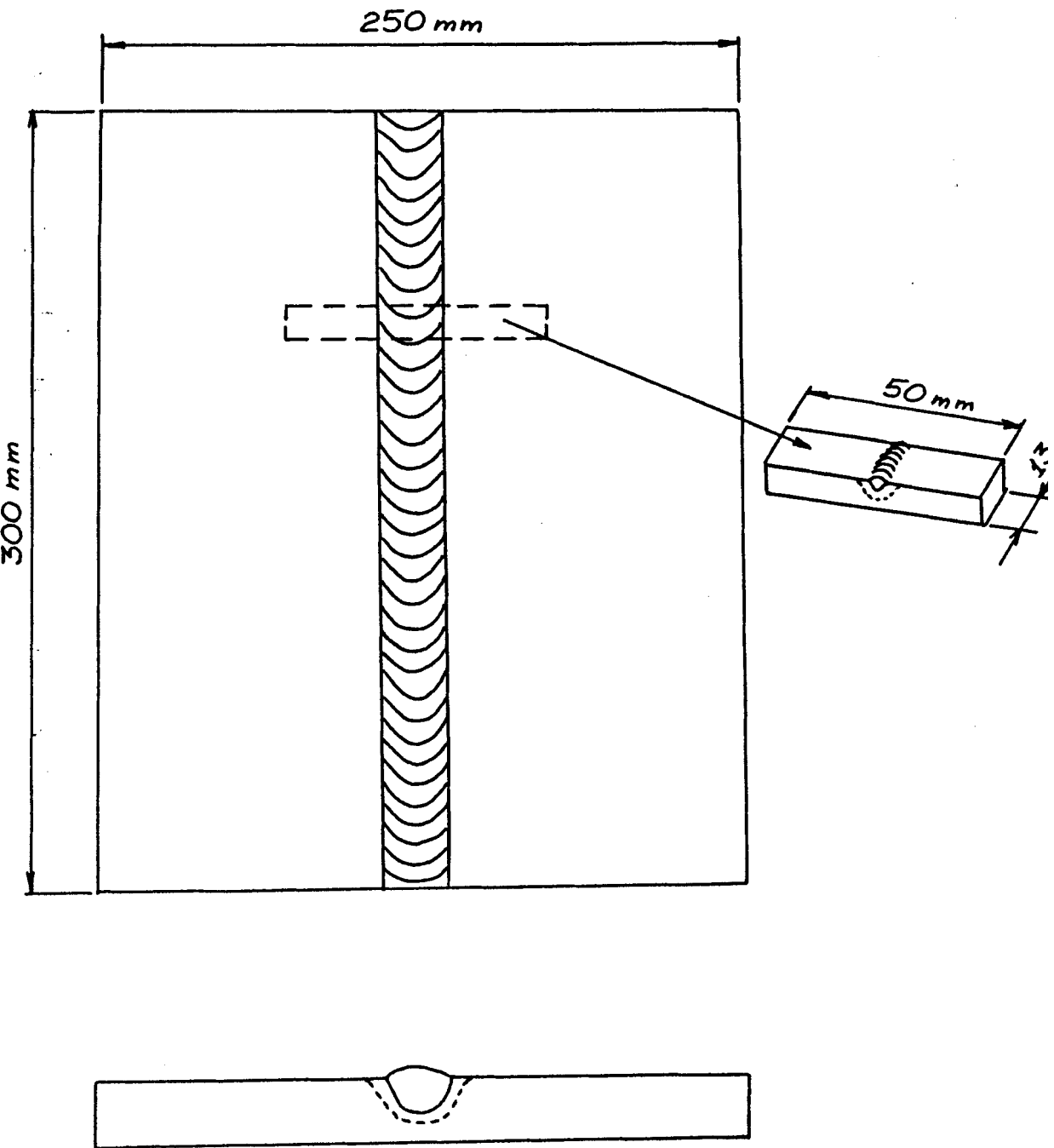


FIG. 2-1

PROBETA PRINCIPAL PARA ENSAYOS DE
DUREZA Y RADIOGRAFICOS

depositar 2.45 Kg por hora de material. De esta manera durante la experiencia los valores de voltaje fueron variados desde 18 voltios hasta 26 voltios manteniendo constante la corriente en 200 amperios, luego aparentemente la probeta con mejor aspecto era la trabajada con 22 voltios, así se mantuvo constante el voltaje en ese valor y el amperaje varió entre 160 hasta 300 amperios, todas las probetas se mantuvieron con velocidad de avance constante de 3.2 mm/s y siempre se presentaba el problema de poca o excesiva penetración en las uniones soldadas de mejor calidad. Se intentó mejorar este problema cambiando los parámetros a 18 voltios y 20 voltios manteniendo una corriente de 215 amperios, pero el acabado fue poco satisfactorio, pues se veía una sobremonta muy pronunciada y de hecho poca penetración. De esta forma se decidió seguir trabajando con los parámetros de 200 amperios y 22 voltios que eran los que produjeron el mejor cordón de soldadura y cuyo único defecto era la falta de penetración para lo cual la velocidad de avance se incrementó y disminuyó hasta encontrar los valores óptimos, con lo que se mejoró el problema de falta de penetración en la unión soldada. De esta manera el cordón de soldadura con características satisfactorias fue aquel que utilizó los parámetros de 200 amperios, 22 voltios y 3.0 mm/s de velocidad de avance.

Luego de que se analizaron radiográficamente las probetas principales se procedió a seleccionar aquella que cumplía con los requisitos básicos de un cordón de soldadura con penetración adecuada, sin porosidad ni salpicadura, fusión completa y acabado satisfactorio. La probeta con características satisfactorias fue sometida a ensayos mecánicos de manera que fue dividida en segmentos de acuerdo a lo que exige AWS para determinar los ensayos de tracción y doblado, tanto de raíz como de cara, de acuerdo a la figura 2-2. Si los ensayos mecánicos hubieren sido aplicados a todas las probetas, los resultados no habrían sido representativos para el electrodo ni para el proceso en sí.

2.3. EJECUCION DE LAS SOLDADURAS

Las probetas principales para ensayo se realizaron en placas de 300 mm de largo, 125 mm de ancho y 6 mm de espesor, de acuerdo a la fig 2-1, cortadas en una prensa LVD de 200 toneladas y además tenían un bisel a 30 grados en cada una de ellas para lo cual fue necesario el uso de una cepilladora marca Universal capaz de variar el ángulo de inclinación de la cuchilla. Este tipo de ensayo tenía como principal objetivo depositar cordones de soldadura usando el proceso con arco eléctrico que usa electrodo tubular de núcleo de fundente y obtener información respecto

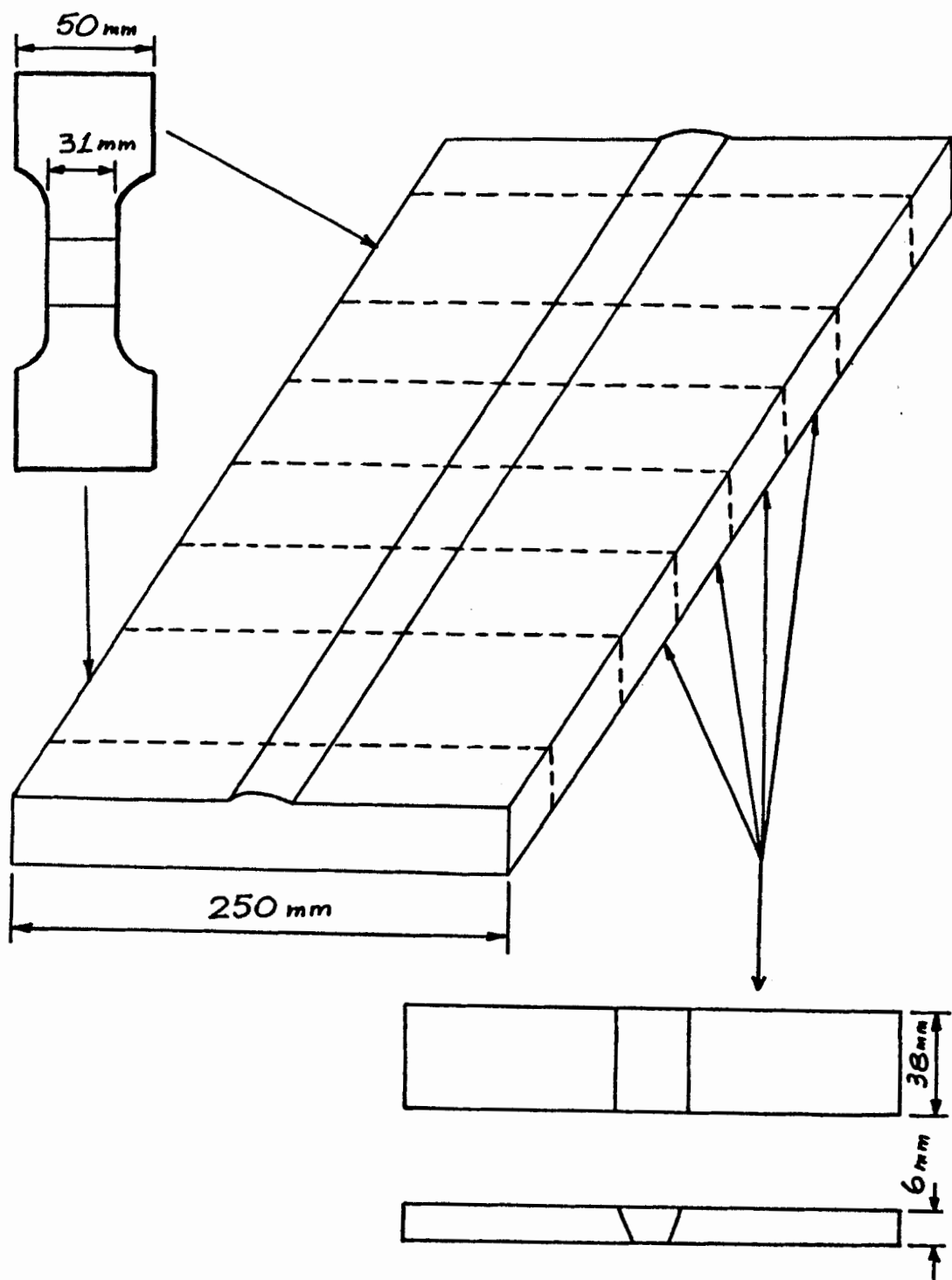


FIG. 2-2

PROBETA PRINCIPAL PARA ENSAYOS DE
TRACCION Y DOBLADO

a como los parámetros de soldadura de este proceso influyen en las características de las uniones soldadas.

Una vez que hemos seleccionado las dimensiones de las probetas y estas se encuentran preparadas y limpias de óxidos, grasa, aceite o cualquier otro tipo de impurezas se procede a controlar los parámetros de soldadura en la en el alimentador de electrodo. El electrodo tubular utilizado era de 2.38 mm de diámetro para lo cual fue necesario usar rodillos impulsores capaces de ejercer la tracción necesaria y que sean acoplables a dicho diámetro, de la misma forma debieron ser seleccionados la pieza de contacto, la boquilla aislada y las guías del electrodo que van en la pistola y en el interior del alimentador respectivamente. Es importante mencionar que se utilizó una prolongación electrificada de 38 mm lo cual requirió el uso de una determinada corriente, que no sabíamos en un principio si sería adecuada, además la prolongación electrificada fue un parámetro de soldadura que se mantuvo constante durante todos los ensayos. Una vez verificados los rodillos y los demás elementos mencionados es necesario cargar el portarollos con la bobina de electrodo tubular, verificando que la conexión eléctrica de corriente de entrada al alimentador sea la correcta y que la

fuerza de poder se encuentre proporcionando corriente directa de voltaje constante, con polaridad negativa, además de la conexión a tierra para lo cual se utilizó cable # 2/0. El alimentador cuenta con un selector para controlar el amperaje y el voltaje con exactitud de décimas lo que facilita el posicionamiento en determinados valores.

Se verificó si el electrodo era alimentado adecuadamente por medio de la presión que los rodillos ejercen sobre el mismo, para lo cual existe una marquilla en el interior del equipo que indica las diferentes medidas para electrodo tubular. El manejo adecuado de la pistola es la otra forma de asegurar la alimentación continua de electrodo tubular, para lo cual es necesario considerar que el cable de la pistola no sea arrastrado ni doblado en esquinas muy cerradas, tratando de mantenerlo relativamente recto, no permitiendo que exista carga sobre el mismo y en especial evitando quemar la boquilla o la guía aislada de cerámica para evitar el taponamiento de la pistola.

El procedimiento de ejecución de las uniones soldadas se basa en un proceso semiautomático donde la prolongación electrificada se mantenía constante, porque en otro caso al aumentar dicho parámetro

hubiera provocado un aumento de la resistencia eléctrica, lo que hubiera originado un aumento de la temperatura en el alambre, y así fundir con mas rapidez el electrodo en el arco acelerando el régimen de aportación.

Una vez que fue ajustada la prolongación electrificada, la pistola fue colocada de manera que el alambre tocó ligeramente a la pieza de trabajo, evitando empujar el electrodo en la junta antes de que se encienda el arco. así al apretar el gatillo de la pistola, el motor eléctrico del alimentador suministró al electrodo y se depositó material, mientras para interrumpir el arco solo era necesario separar la pistola y dejar de apretar el gatillo. El ajuste del voltaje se hace con los controles en el alimentador de electrodo y con el modelo LN-9N es mucho mas exacto, para lo que se verificó el mismo en el voltímetro mientras se estaba soldando. El ajuste de la corriente se realiza también en el alimentador que cuenta con un selector digital, la corriente y la velocidad de alimentación son variables que dependen una de la otra por lo que muchos fabricantes establecen un único control sobre cualquiera de estos parámetros, porque sería redundante estimar ambos valores como independientes en el proceso. La corriente requerida depende del diámetro del

electrodo, tipo de electrodo, el voltaje de arco requerido y la prolongación electrizada que se usó, los valores fueron variando hasta determinar la unión soldada con mejores características. La velocidad de avance debió ser manejada cuidadosamente para asegurar que el arco se mantenga en el borde delantero del cráter de soldadura y que produzca la penetración y tamaño del cordón deseado, además se intentó mantener una distancia uniforme entre el electrodo y la escoria fundida asegurando una velocidad de avance lo mas constante posible. Por último el ángulo de arrastre es para muchos soldadores un verdadero problema mantenerlo debido a su costumbre con electrodos manuales revestidos, de manera que se usó un ángulo de arrastre aproximado de 45 a 50 grados para lograr los depósitos con las mejores características posibles además de buena aportación y penetración.

2.4. OBTENCION DE MUESTRAS PARA ENSAYOS DE CONTROL

Las probetas fueron preparadas utilizando una junta en V con 60 grados de abertura y la raíz a tope con 2 mm aproximadamente, para lo que se usó una cepilladora que permitía determinar el ángulo de corte requerido con lo que se aseguraba una superficie libre de impurezas, y por medio de un esmeril era posible eliminar pequeñas rebabas que

podrían haber quedado después del proceso.

Los cordones de soldadura que se depositaron fueron controlados por medio de placas radiográficas que permitían determinar con seguridad la calidad del depósito y además los parámetros ideales para el proceso bajo las condiciones antes mencionadas. Un segmento de la probeta principal de 50 mm de largo y 13 mm de ancho dejando el cordón depositado en la mitad de la misma fue posteriormente usado para determinar el análisis metalográfico y la dureza del depósito, de acuerdo a la figura 2-1, lo que permitiría obtener mejor información respecto a la microestructura y dureza de las tres zonas de la unión soldada.

Una vez que se determinó cual de las probetas principales presentaba características óptimas se procedió a preparar las probetas individuales de tracción y doblado requeridas para determinar las propiedades mecánicas del depósito, según la fig 2-2.

Cada probeta fue numerada para su identificación y sometida al proceso de rayos X, para lo cual se usó el equipo de la ESPOL de 300 KV de capacidad marca ERESKO modelo ES2 de acuerdo al siguiente procedimiento:

- 1) Prefijar el valor de distancia de la fuente de Rayos X hasta la placa de plomo que se encuentra debajo de la probeta a analizar. En nuestro caso se usó 90 cm de distancia.
- 2) Establecer el período de exposición de la probeta y la intensidad de exposición, que para una plancha de acero de 6 mm de espesor fueron 6 mAmp/min y 160 KV respectivamente.
- 3) Establecer el tipo de película radiográfica a utilizar, en este caso AGFA Structurix D7 tipo Rollpac Pb.
- 4) Proceso de revelado en el que se utilizó sustancias químicas como revelador y fijador KODAK para procesar las películas radiográficas.
- 5) La interpretación de las radiografías una vez que se encontraban listas permitió determinar la existencia o no de defectos en la soldadura, a través del uso de un negatoscopio S&S de la fabrica X Ray Products. En las radiografías el cordón de soldadura es de tonalidad clara y las porosidades son oscuras y redondeadas. así cada defecto tiene una forma y tonalidad definida.

El ensayo metalográfico consiste en pulir la superficie transversal de la probeta que comprendía la cara transversal del cordón de soldadura y el metal base en un banco de lijas. usando la lija de

grano mas grueso #200 hasta la de grano mas fino. pasando por la #320, #400 y finalmente la #600. Una vez que se obtiene una superficie donde no se aprecien significativamente rayaduras se pasa a la pulidora de disco marca DAP-8 usando para el pulido pasta de alúmina APF. El resultado deberá ser una superficie especular que será limpiada con agua y posteriormente atacada con Nital al 10% durante 4 minutos en el caso de las macrofotografías y al 3% en el caso de las microfotografías de barrido.

Para el caso de macrofotografías se usó un microscopio metalográfico WILD HEERBRUGG modelo M400 que usaba película polaroid y aumento de 6.3 X con lo que fue posible determinar a través de un planímetro las áreas de depósito y la zona afectada por el calor, así como otras dimensiones. En el caso de las microfotografías se llevó a cabo un barrido en el que se podía ver como el tamaño del grano fue afectado durante el proceso de soldadura, para ésto se utilizó un microscopio metalográfico PME OLYMPUS, sabiendo que el barrido incluía el metal base, la zona afectada por el calor y el depósito de soldadura.

CAPITULO III

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

3.1. ENSAYOS RADIOGRAFICOS

Dado que durante el proceso de soldadura se usaron diferentes parámetros tratando de lograr uniones soldadas con características óptimas, era necesario comprobar radiográficamente los cordones de soldadura con la finalidad de saber cuales serían los parámetros óptimos bajo las condiciones antes mencionadas.

Cada probeta poseía una característica particular que la diferenciaba de la otra, observandose las siguientes características:

Probeta #1. El cordón era nudoso y cóncavo, con una sobremonta pronunciada; presencia de salpicadura, chisporroteo; falta de penetración; choque del electrodo con la pieza de trabajo.

Probeta #2. La sobremonta era menos pronunciada y el cordón aún era levemente nudoso y cóncavo; se redujo la salpicadura y el chisporroteo; falta de penetración; el choque del electrodo con la pieza de trabajo disminuyó.

Probeta #3. El cordón era mas plano y ancho; no había presencia de salpicadura; penetración incompleta; no hay choque de la pieza de trabajo con el electrodo; no hay porosidad.

Probeta #4. El cordón era plano y ancho, no había salpicadura ni chisporroteo; penetración incompleta; no hay choque del electrodo con la pieza de trabajo; depósito sin porosidad.

Probeta #5. Hay la presencia de porosidad en el depósito; Cordón plano; presencia de soplo magnético; penetración incompleta.

Probeta #6. Cordón plano; presencia de porosidad elevada en el depósito; penetración incompleta.

Probeta #7. Cordón mas plano que los anteriores pero no convexo; muy poca salpicadura; penetración incompleta; no hay choque del electrodo con la pieza de trabajo

Probeta #8. Cordón menos plano y de bordes irregulares que la probeta #7; no hay presencia de porosidad, penetración no uniforme.

Probeta #9. Cordón nudoso muy alto, de excesiva

sobremonta e irregular; penetración excesiva; no hay porosidad.

Probeta #10. Cordón mas plano y ancho; penetración incompleta pero casi total; no hay salpicadura, ni porosidad o choque del electrodo con la pieza de trabajo.

Probeta #11. Cordón plano y ancho; penetración completa; no hay presencia de salpicadura, ni porosidad; no hay choque del electrodo con la pieza de trabajo, presencia de mordeduras porque al soldar se usó en este caso una placa de cobre para evitar la fusión del metal base con la mesa de trabajo.

Probeta #12. Cordón plano, tiende a ser convexo: bordes irregulares; penetración excesiva.

Para finalizar, de acuerdo a lo observado en cada una de las probetas, la #11 cumplía con los requisitos para una soldadura satisfactoria.

3.2. ENSAYOS METALOGRAFICOS

Una vez que se determinaron los parámetros de soldadura óptimos por medio de los ensayos radiográficos a las uniones soldadas se procedió a establecer los ensayos metalográficos que permitirían

determinar las características del depósito y la zona afectada por el calor.

Las macro y micro fotografías se detallan a continuación, siendo armas de vital importancia en la determinación de la influencia de los parámetros de soldadura en las características de la unión soldada, además la existencia de las zonas ya mencionadas se debe al intenso calor suministrado al metal base durante el proceso de soldadura y al enfriamiento brusco del metal depositado, que producen una serie de cambios en la estructura de la unión soldada, lo que da como consecuencia la formación de tres zonas bien definidas, tal como se muestra en la figura 3-1.

A1: La zona de metal fundido constituida por el metal depositado durante el proceso de soldadura y parte del metal base que se ve afectado durante la fusión.

ZAC: La zona intermedia o de transición, también llamada zona afectada por el calor, donde se producen cambios térmicos complejos.

E: La zona constituida por el metal base, donde la temperatura sufre cambios limitados.

Si observamos como varía la estructura de los granos

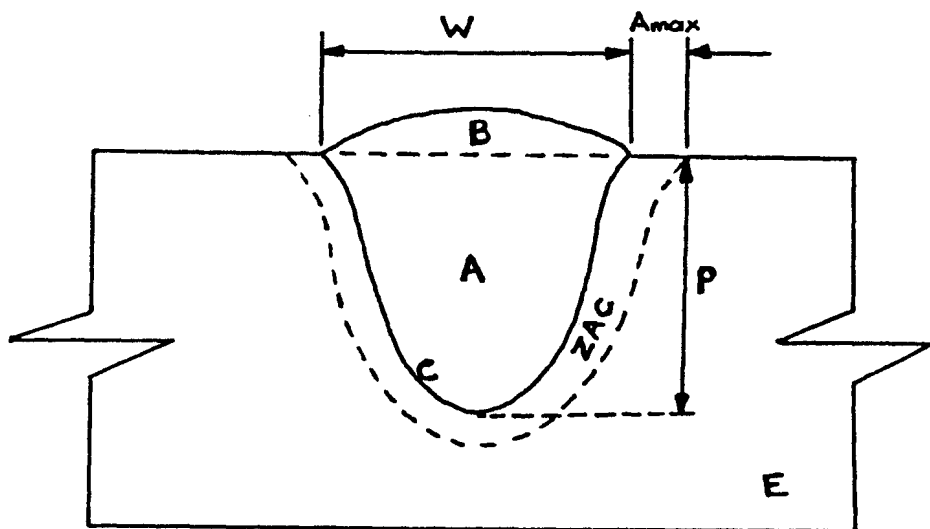


FIG. 3-1

ZONAS REPRESENTATIVAS Y CARACTERISTICAS
DEL CORDON DE SOLDADURA

A Y B, Zona de metal de aporte y metal base fundido

$A_1 = A + B$, Area transversal del cordón

C, Línea de fusión

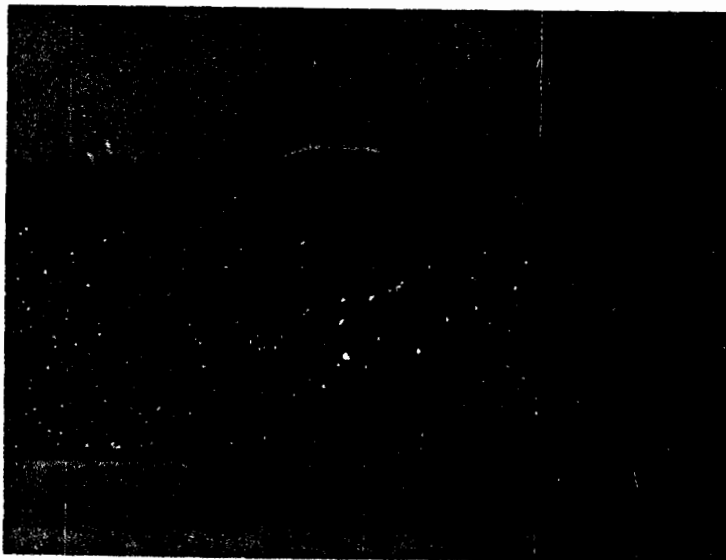
ZAC, Zona afectada por el calor

E, Zona de metal base

P, Penetración

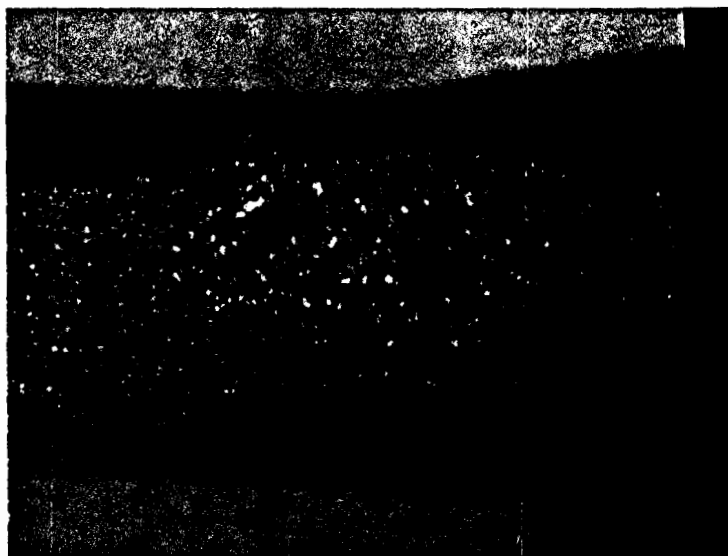
W, ancho del cordón

Amax, Ancho máximo de la ZAC



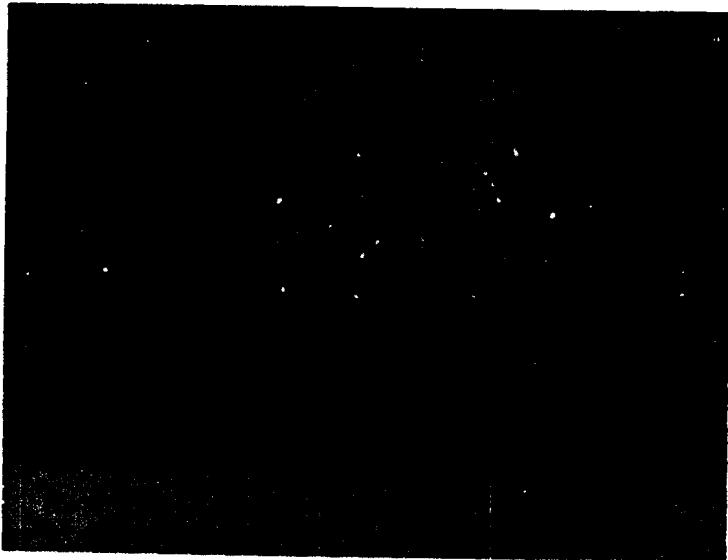
MACROFOTOGRAFIA 3-1

PARAMETROS: 200 Amp, 18 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



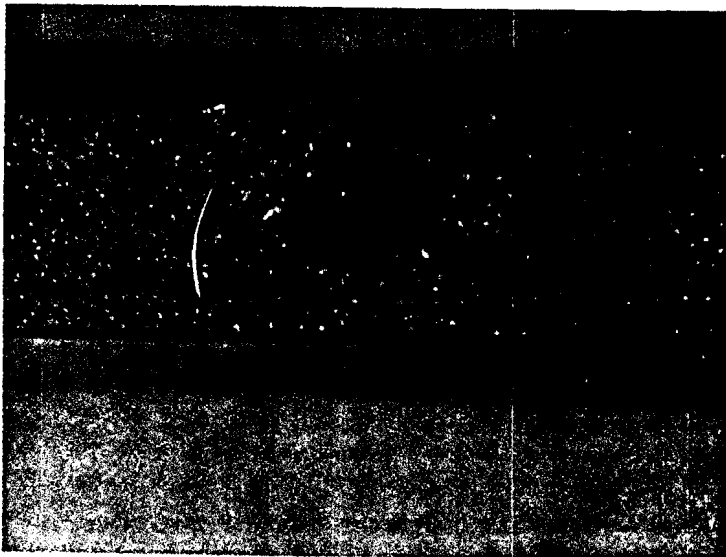
MACROFOTOGRAFIA 3-2

PARAMETROS: 200 Amp, 20 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



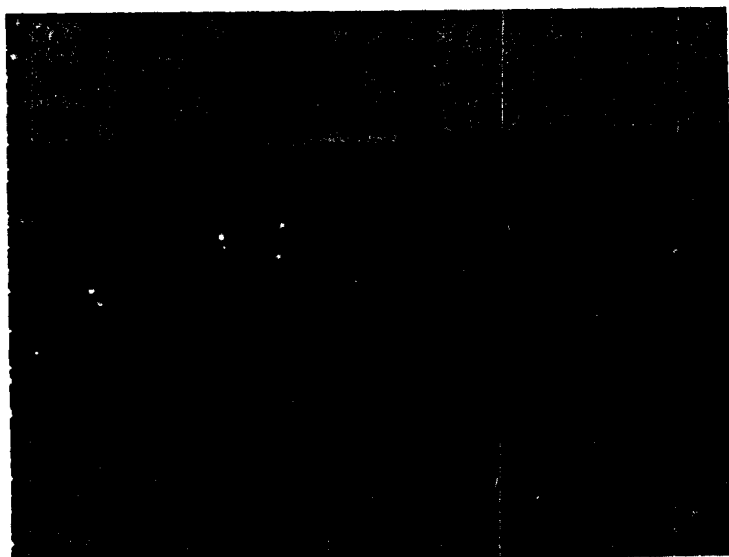
MACROFOTOGRAFIA 3-3

PARAMETROS: 200 Amp, 22 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



MACROFOTOGRAFIA 3-4

PARAMETROS: 200 Amp, 24 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



MACROFOTOGRAFIA 3-5

PARAMETROS: 200 Amp, 26 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



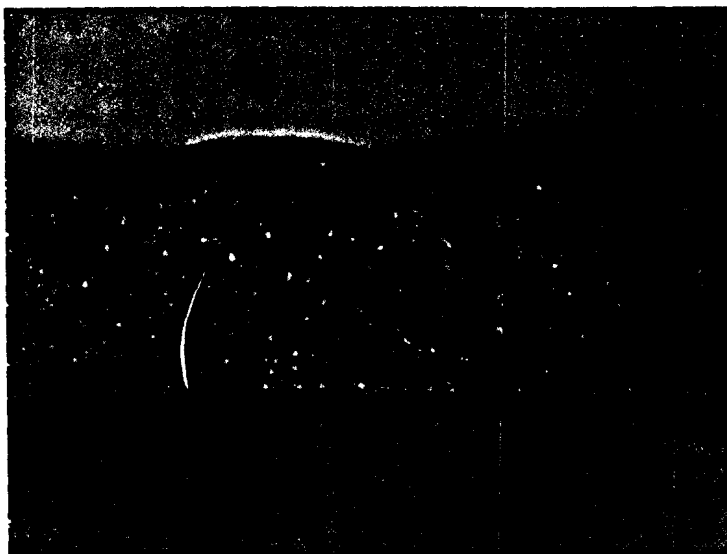
MACROFOTOGRAFIA 3-6

PARAMETROS: 160 Amp, 22 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



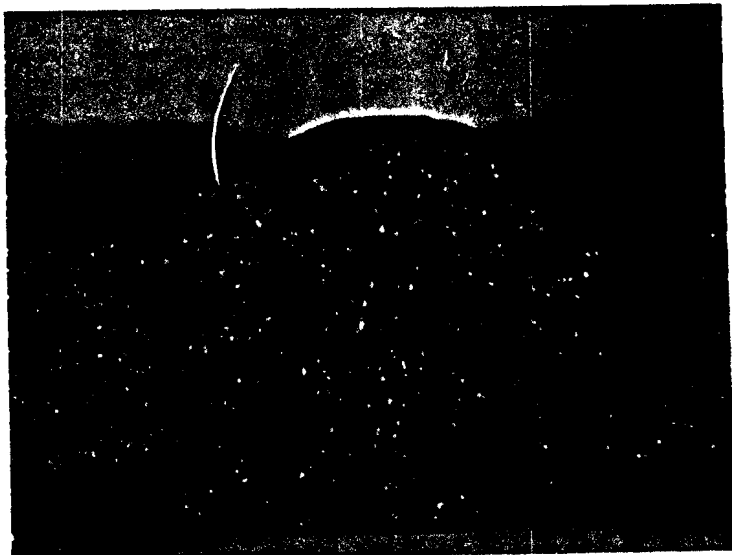
MACROFOTOGRAFIA 3-7

PARAMETROS: 215 Amp, 22 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



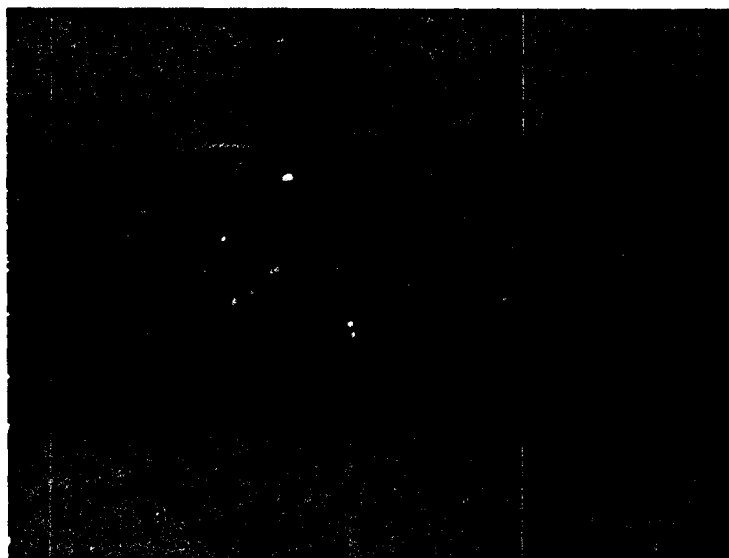
MACROFOTOGRAFIA 3-8

PARAMETROS: 250 Amp, 22 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



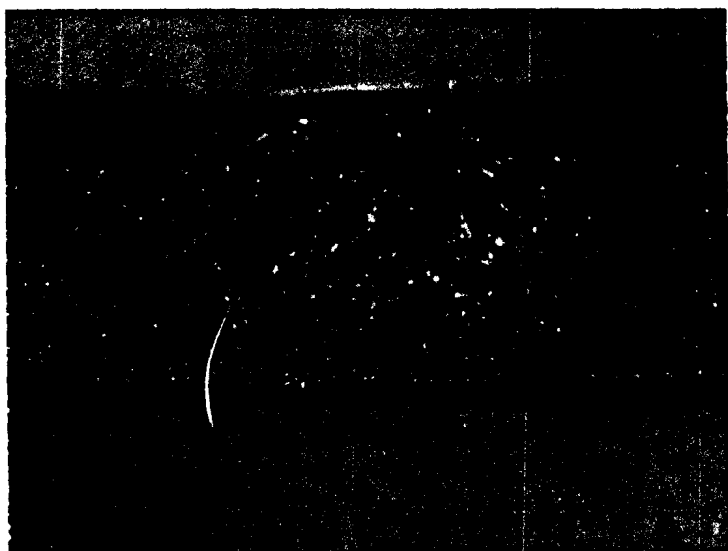
MACROFOTOGRAFIA 3-9

PARAMETROS: 300 Amp, 22 V, 3.2 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



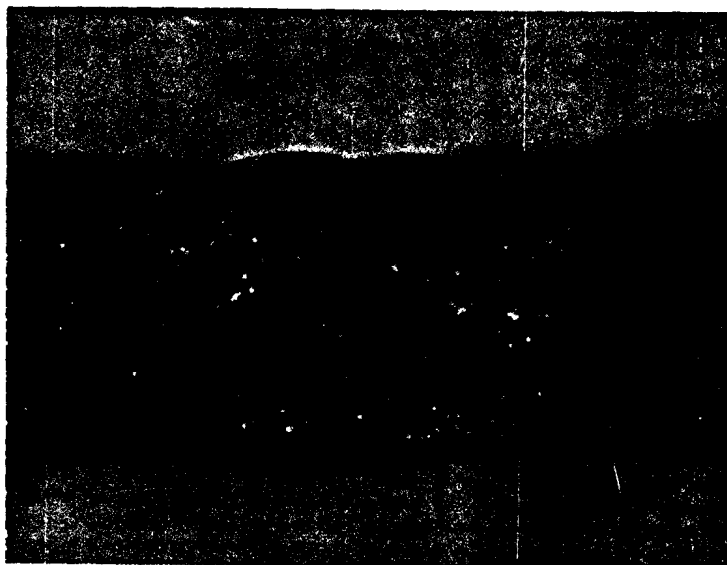
MACROFOTOGRAFIA 3-10

PARAMETROS: 200 Amp, 22 V, 3.5 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



MACROFOTOGRAFIA 3-11

PARAMETROS: 200 Amp, 22 V, 3.0 mm/s, 6.3X, NITAL 10%



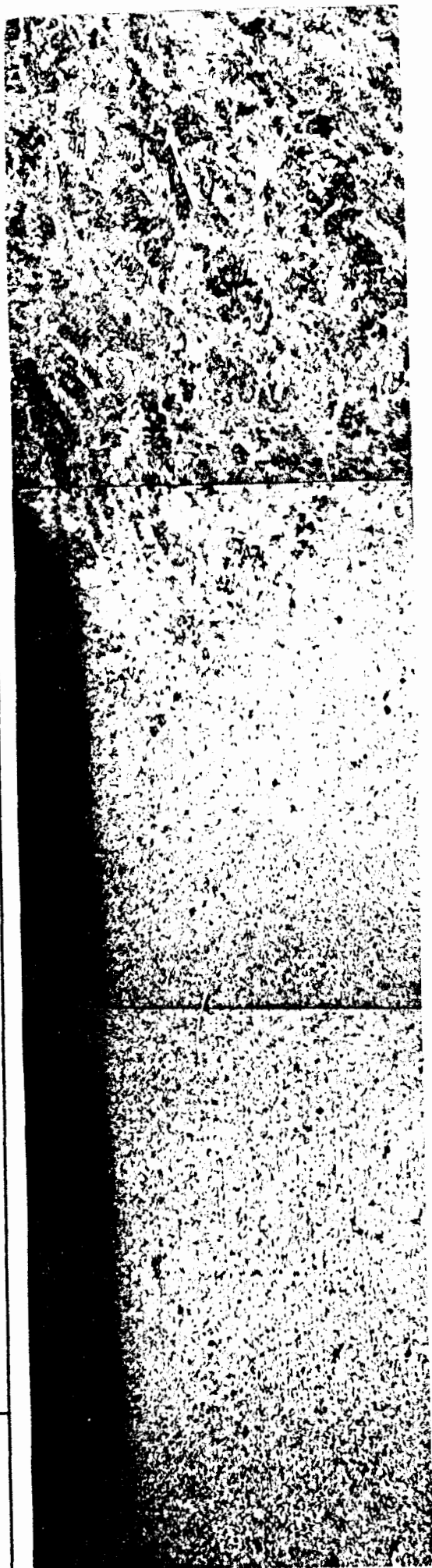
MACROFOTOGRAFIA 3-12

PARAMETROS: 200 Amp, 22 V, 2.5 mm/s, 6.3X, NITAL 10%

FUSION

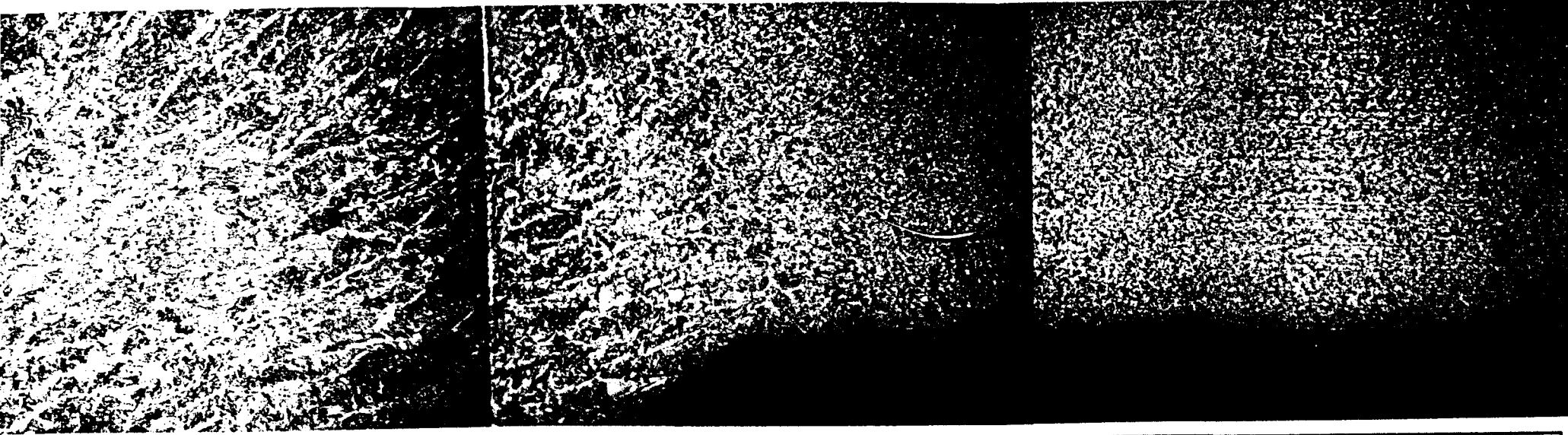
ZAC

MB



MICROFOTOGRAFIA 3-13
PARAMETROS: 200 Amp, 22 V, 3.5 mm/s, 16X, NITAL AL 3%
ZONAS REPRESENTATIVAS DE LA UNION SOLDADA

MICROFOTOGRAFIA 3-14
PARAMETROS: 200 Amp, 22 V, 3.0 mm/s, 16X, NITAL AL 3%
ZONAS REPRESENTATIVAS DE LA UNION SOLDADA

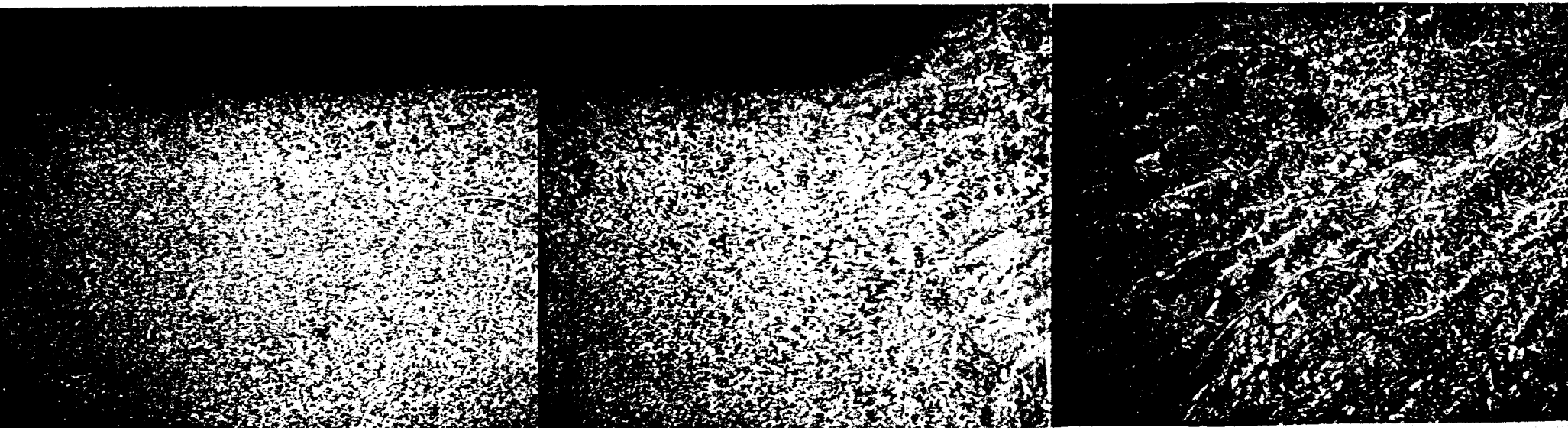


MB	ZAC	FUSION
----	-----	--------

MB

ZAC

FUSION



MICROFOTOGRAFIA 3-15
PARAMETROS: 200 Amp, 22 V, 2.5 mm/s, 16X, NITAL AL 3%
ZONAS REPRESENTATIVAS DE LA UNION SOLDADA

en cada una de las microestructuras antes mencionadas veríamos que en la zona de fusión se encuentran granos columnares, mientras en la zona de transición (en el límite de la zona de fusión y la ZAC) se presenta un grano grueso hasta llegar a volverse fino y esferoidal en el límite de la ZAC y el metal base, mientras que en éste último se aprecia un grano equiaxial.

Como se aprecia la unión soldada esta constituida por estructuras heterogéneas, razón por la cual lo que se trata es de homogeneizar las propiedades físico-mecánicas del conjunto que en teoría es imposible lograrlo en todos sus aspectos, y obtener la continuidad necesaria por medio de la aplicación correcta de los parámetros de soldadura y de tratamientos térmicos posteriores, como el recocido de regeneración o el normalizado.

Las transformaciones en la microestructura de los aceros son producto de los cambios térmicos intensos producidos en el proceso de soldadura, y aún cuando los diagramas de equilibrio no son iguales a los diagramas de aquellos depósitos producidos durante la soldadura, nos sirven como base de nuestra interpretación. Debido a que en el proceso de soldadura se producen cambios térmicos bruscos y

gracias a que la velocidad de enfriamiento aumenta, la temperatura de transformación de hierro gamma-alfa disminuye, lo que produce que la distancia que los átomos de carbono recorren por difusión disminuya, debido a que este es un proceso activado térmicamente, formando así estructuras meta estables con baja migración de átomos de carbono.

Si la velocidad de enfriamiento es muy alta, como ocurre en los procesos de soldadura al arco con electrodo tubular, aparece un nuevo tipo de estructura conocido como martensita que no permite la difusión de carbono, sino una distorsión en el retículo cristalino, siendo una microestructura muy dura y frágil. Debido justamente a estos procesos de elevado calentamiento y enfriamiento brusco, se generan en la zona afectada por el calor transformaciones metalográficas que pueden comprometer las características físico-mecánicas del material. En esta zona, en la parte mas cercana a la zona de fusión, se alcanzan temperaturas superiores a la de transformación, llevando al metal base a formar solo austenita con un crecimiento de grano de depende de las condiciones de enfriamiento. A medida que nos alejamos de la zona de fusión la temperatura apenas y alcanza la temperatura de transformación y muy poca austenita se formará y no habrá crecimiento de los

granos. Una vez que la pieza se ha enfriado se podrá observar granos equiaxiales de ferrita y carburos precipitados cuyo tamaño será menor a medida que se aleja de la zona de fusión.

3.3. RELACION DE LOS PARAMETROS DE SOLDADURA CON LA GEOMETRIA DE LAS UNIONES SOLDADAS.

Para la aplicación del proceso de soldadura con electrodo tubular de núcleo de fundente se usaron los parámetros determinados en la tabla III-I. La tabla III-II muestra los valores para penetración, ancho del cordón, ancho máximo de la zona afectada por el calor y el calor de entrada para el proceso de soldadura utilizando una plancha de acero ASTM A283 grado C y electrodo tubular AWS E71T8-N11. La tabla III-III muestra las áreas del cordón de soldadura, del depósito y la sobremonta, el porcentaje de dilución y la dureza máxima del depósito.

Una vez determinadas las características de las uniones soldadas es posible determinar como varían y se encuentran relacionadas con los parámetros de soldadura, para lo cual se han establecido una serie de curvas que permiten identificar como la corriente, el voltaje, y la velocidad de avance se relacionan con las características de las uniones soldadas en el proceso de soldadura con electrodo tubular a través

**TABLA III
PARAMETROS DE SOLDADURA
CON ELECTRODO TUBULAR**

PROBETA #	CORRIENTE	VOLTAJE	VELOCIDAD	PROLONGACION	DIAMETRO	NUMERO
	(Amp)	(Volt)	(mm/s)	ELECTRIZADA (mm)	ELECTRODO (mm)	DE PASES
1	200	18	3.2	38.1	2.38	1
2	200	20	3.2	38.1	2.38	1
3	200	22	3.2	38.1	2.38	1
4	200	24	3.2	38.1	2.38	1
5	200	26	3.2	38.1	2.38	1
6	160	22	3.2	38.1	2.38	1
7	215	22	3.2	38.1	2.38	1
8	250	22	3.2	38.1	2.38	1
9	300	22	3.2	38.1	2.38	1
10	200	22	3.5	38.1	2.38	1
11	200	22	3.0	38.1	2.38	1
12	200	22	2.5	38.1	2.38	1

**TABLA III
CARACTERISTICAS DEL DEPOSITO**

PROBETA #	CORRIENTE (Amp)	VOLTAJE (Volt)	VELOCIDAD AVANCE (mm/s)	PENETRACION (mm)	ANCHO DEL CORDON (mm)	ZAC ancho max. (mm)	CALOR DE ENTRADA Joules/mm
1	200	18	3.2	4.1	9.9	1.5	1125
2	200	20	3.2	3.8	10.4	1.9	1250
3	200	22	3.2	4.3	10.9	2.3	1375
4	200	24	3.2	4.9	11.4	2.1	1500
5	200	26	3.2	4.8	11.9	2.3	1625
6	160	22	3.2	4.1	9.8	2.3	1100
7	215	22	3.2	5.1	11.3	2.9	1478
8	250	22	3.2	6.5	12.3	3.6	1719
9	300	22	3.2	8.0	13.7	4.9	2063
10	200	22	3.5	5.8	10.4	2.3	1257
11	200	22	3.0	6.4	11.3	3.1	1467
12	200	22	2.5	7.5	12.4	4.6	1760

**TABLA II-II
CARACTERISTICAS DEL DEPOSITO**

PROBETA #	CORRIENTE (Amp)	VOLTAJE (Volt)	VELOCIDAD AVANCE (mm/s)	AREA METAL APORTE A (mm²)	AREA DEL CORDON A1 (mm²)	DILUCION A/A1 (%)	DUREZA max. Rb
1	200	18	3.2	24.1	37.2	64.80	88
2	200	20	3.2	25.3	37.0	68.37	86
3	200	22	3.2	29.1	42.2	72.40	78
4	200	24	3.2	32.5	45.2	71.92	88
5	200	26	3.2	38.3	51.2	74.94	88
6	160	22	3.2	25.6	33.2	77.12	80
7	215	22	3.2	35.9	50.9	70.65	88
8	250	22	3.2	43.5	57.5	75.58	89
9	300	22	3.2	76.8	116.1	66.19	87
10	200	22	3.5	39.8	52.5	75.92	87
11	200	22	3.0	41.2	52.8	78.10	89
12	200	22	2.5	57.4	71.1	80.77	87

de las figuras:

Figura 3-2. Penetración Vs. Corriente (manteniendo el voltaje constante).

Figura 3-3. Penetración Vs. Voltaje (manteniendo la corriente constante). Figura 3-4. Penetración Vs. Calor de entrada.

Figura 3-5. Dilución Vs. Calor de entrada.

Figura 3-6. Ancho de la zona afectada por el calor Vs. Calor de entrada.

Figura 3-7. Ancho del cordón Vs. Corriente (manteniendo el voltaje constante).

Figura 3-8. Ancho del cordón Vs. Voltaje (manteniendo la corriente constante).

Figura 3-9. Ancho del cordón Vs. Calor de entrada

Una vez que se han analizado las curvas y datos obtenidos se puede establecer que los parámetros de soldadura en el proceso con electrodo tubular varían las características de la unión soldada. observándose que la porosidad es posible reducirla o eliminarla disminuyendo el voltaje, o aumentando la prolongación electrizada. Los cordones nudosos y convexos son evitados manteniendo un voltaje adecuado con la corriente de operación, porque cuando el voltaje se incrementa éste defecto se reduce, también es posible lograr el mismo efecto reduciendo la prolongación electrizada.

FIG. 3-2
VARIACION DE LA PENETRACION Vs. CORRIENTE

PENETRACION
[mm]

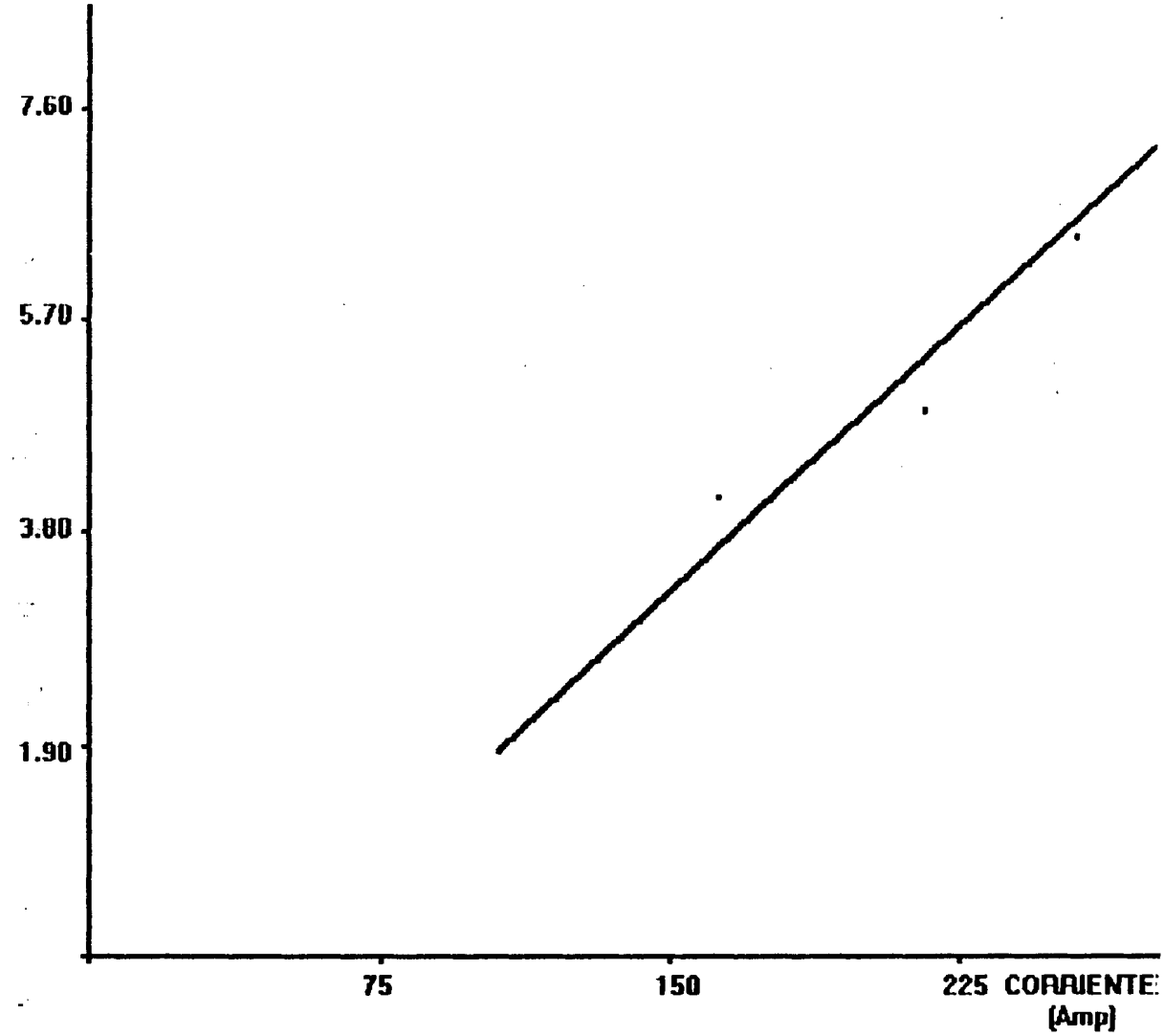


FIG. 3-3
VARIACION DE LA PENETRACION Vs. VOLTAJE

PENETRACION
[mm]

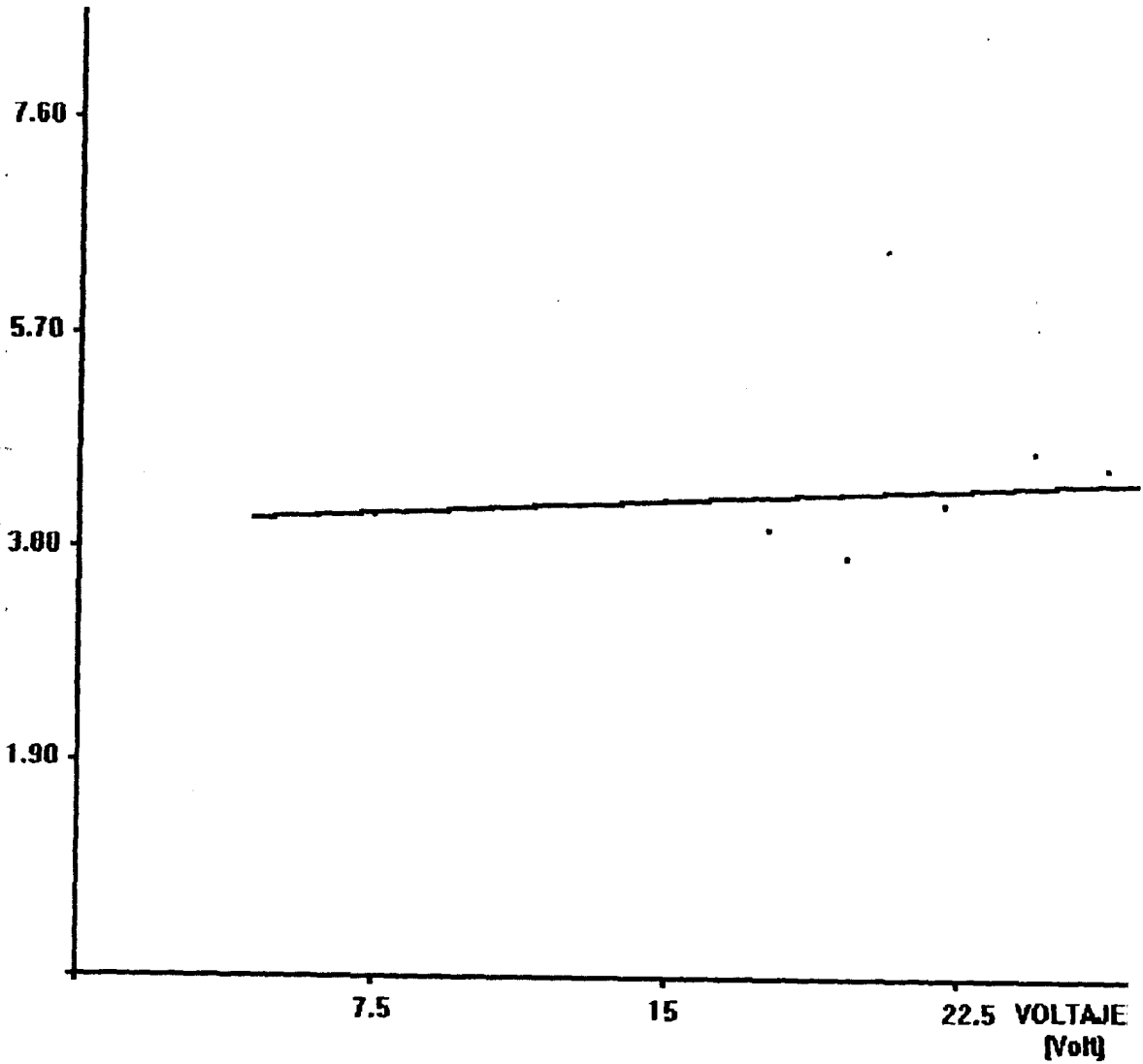


FIG 3-4.
VARIACION DE LA PENETRACION Vs. CALOR DE ENTRADA

PENETRACION
(mm)

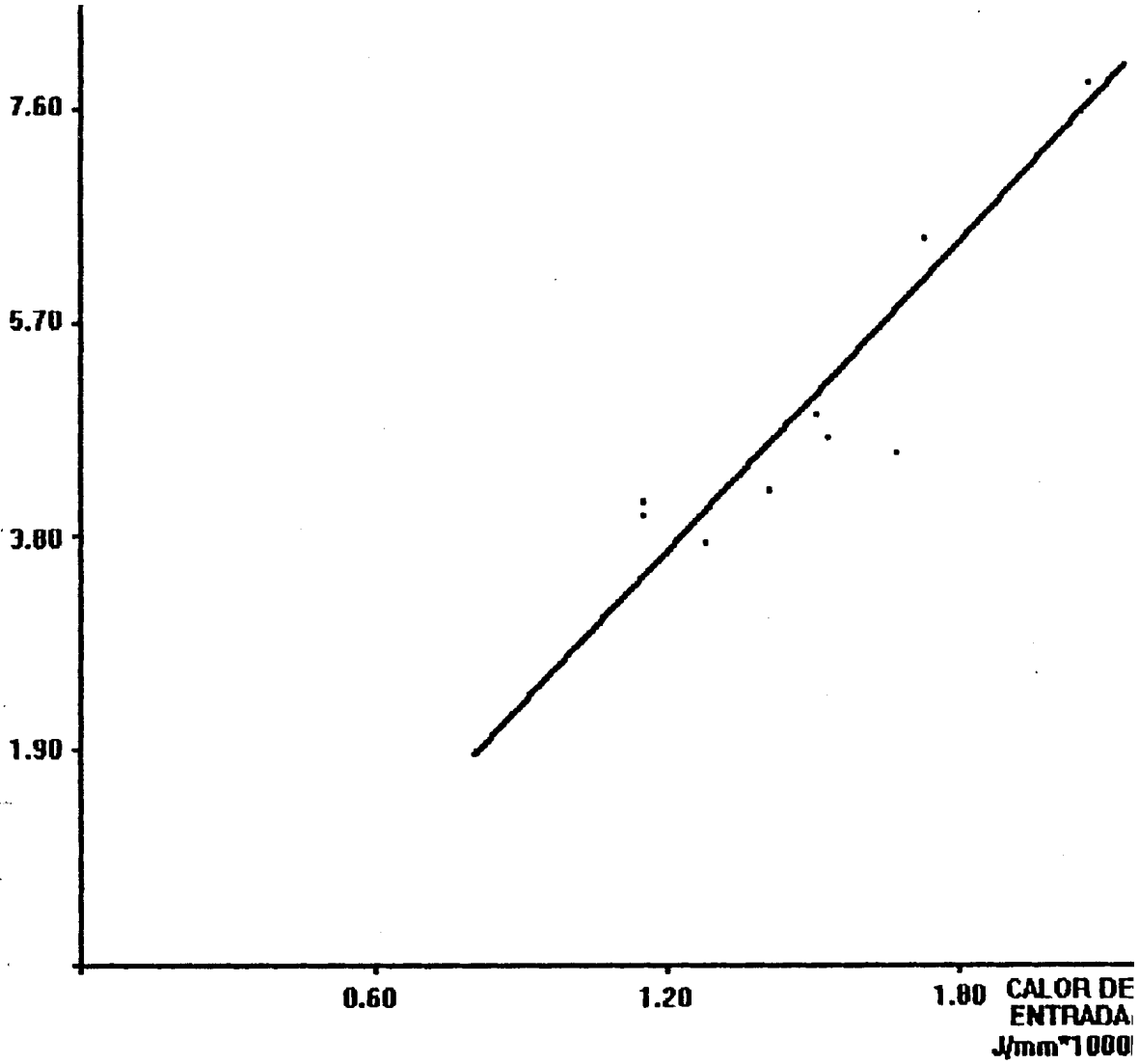


FIG. 3-5
DILUCION Vs. CALOR DE ENTRADA

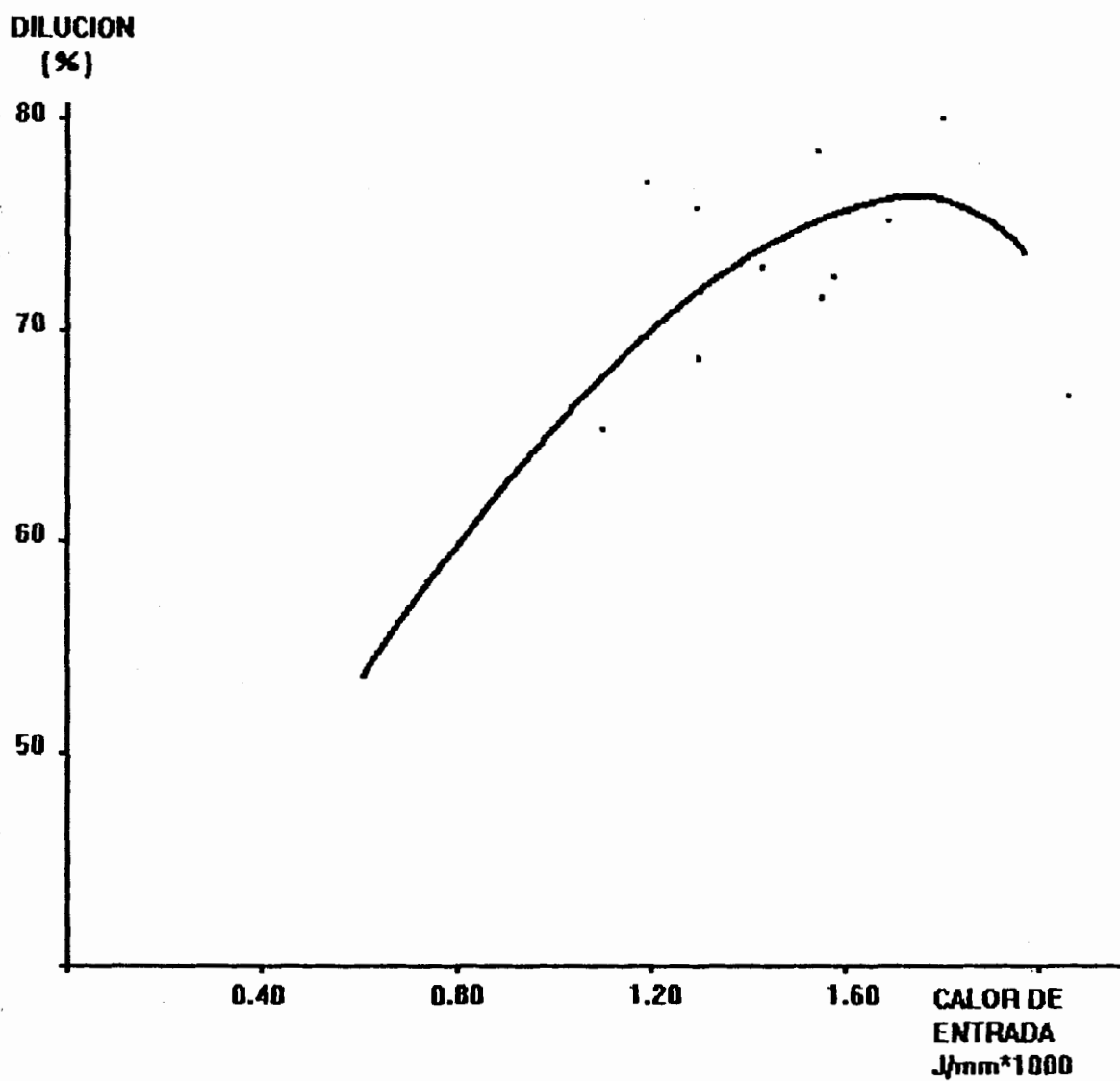


FIG. 3-6
ANCHO MAXIMO DE LA ZAC Vs. CALOR DE ENTRADA

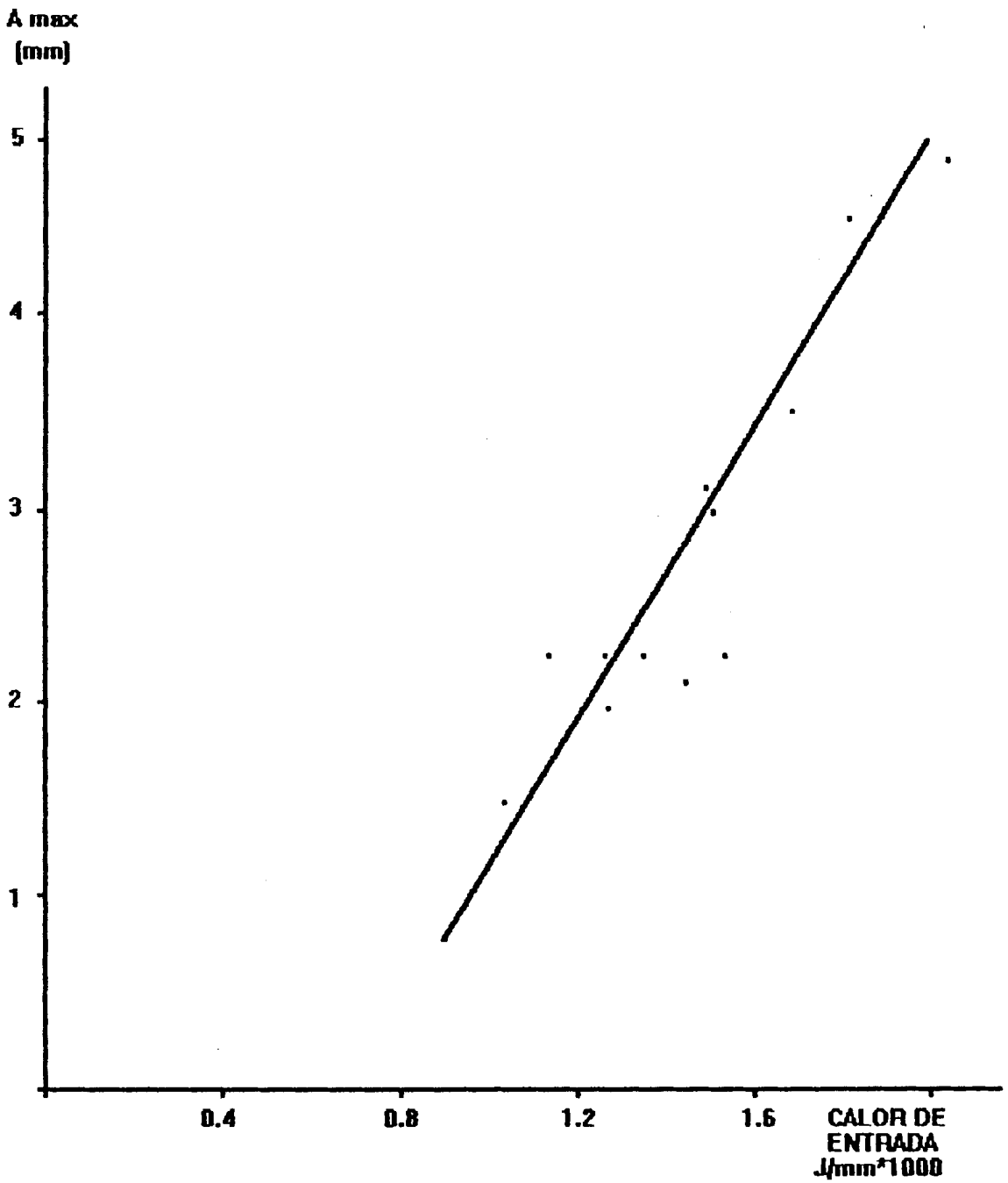


FIG. 3-7
VARIACION DEL ANCHO DEL CORDON Vs. CORRIENTE

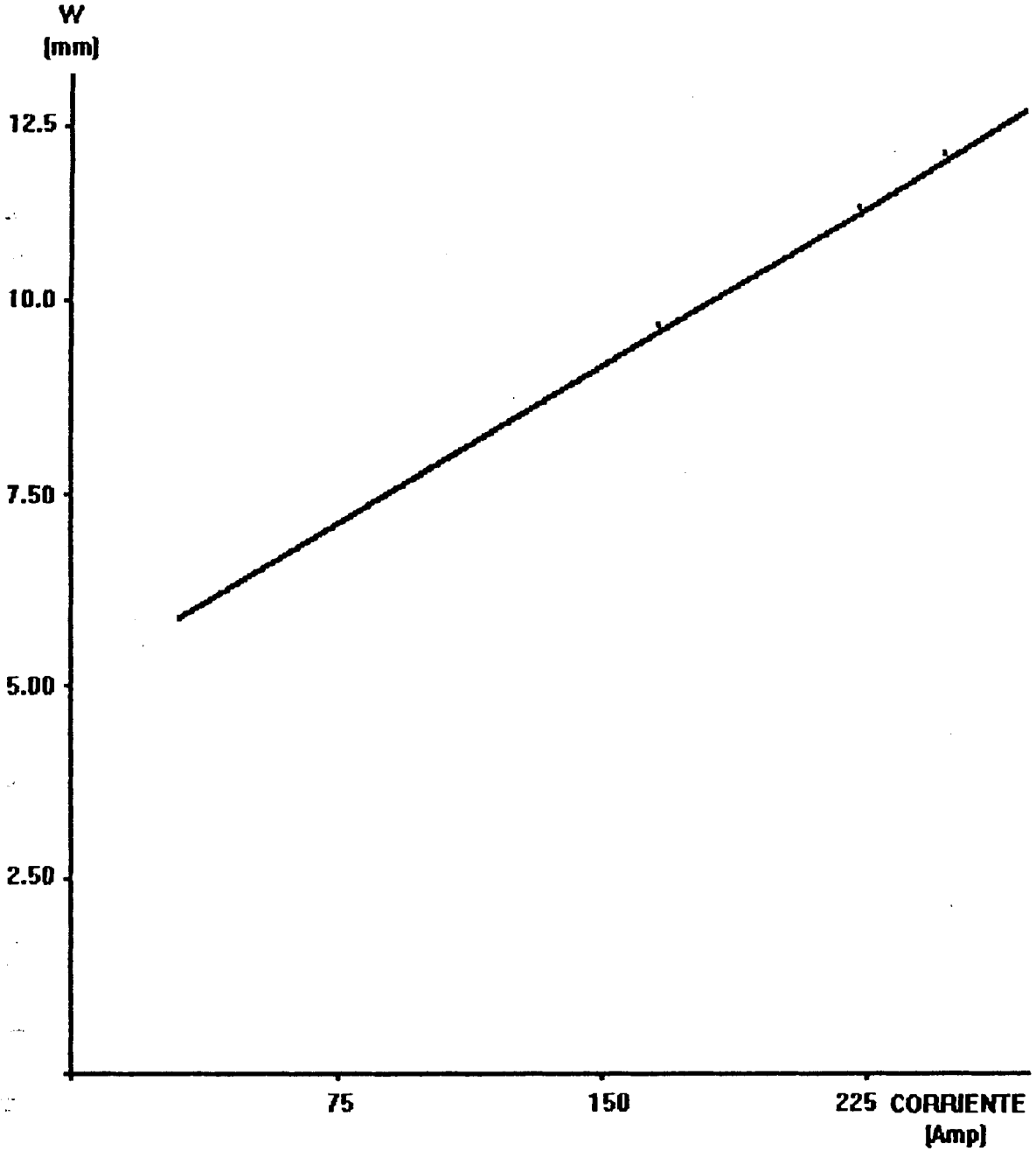


FIG. 3-8
VARIACION DEL ANCHO DEL CORDON Vs. VOLTAJE

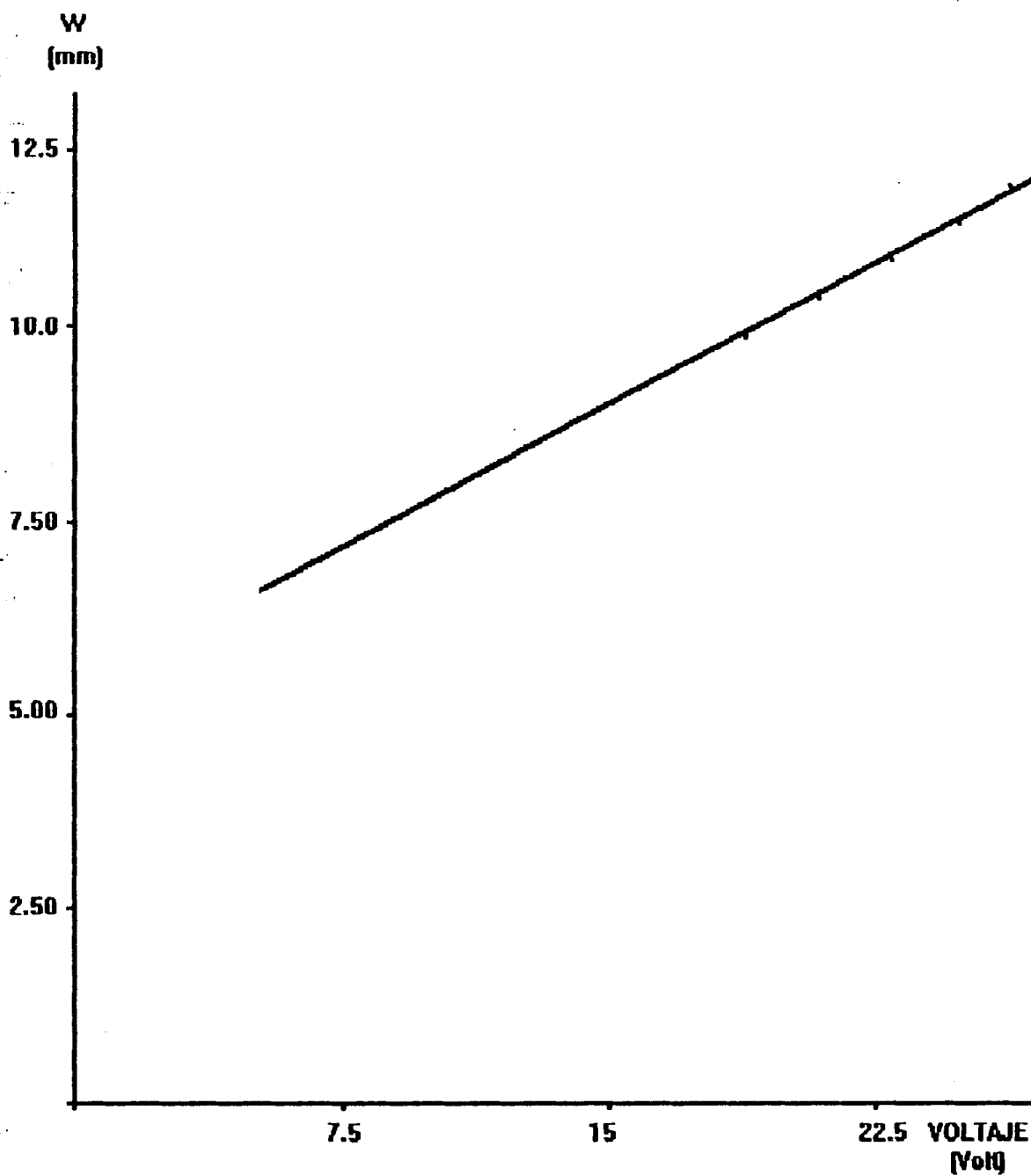
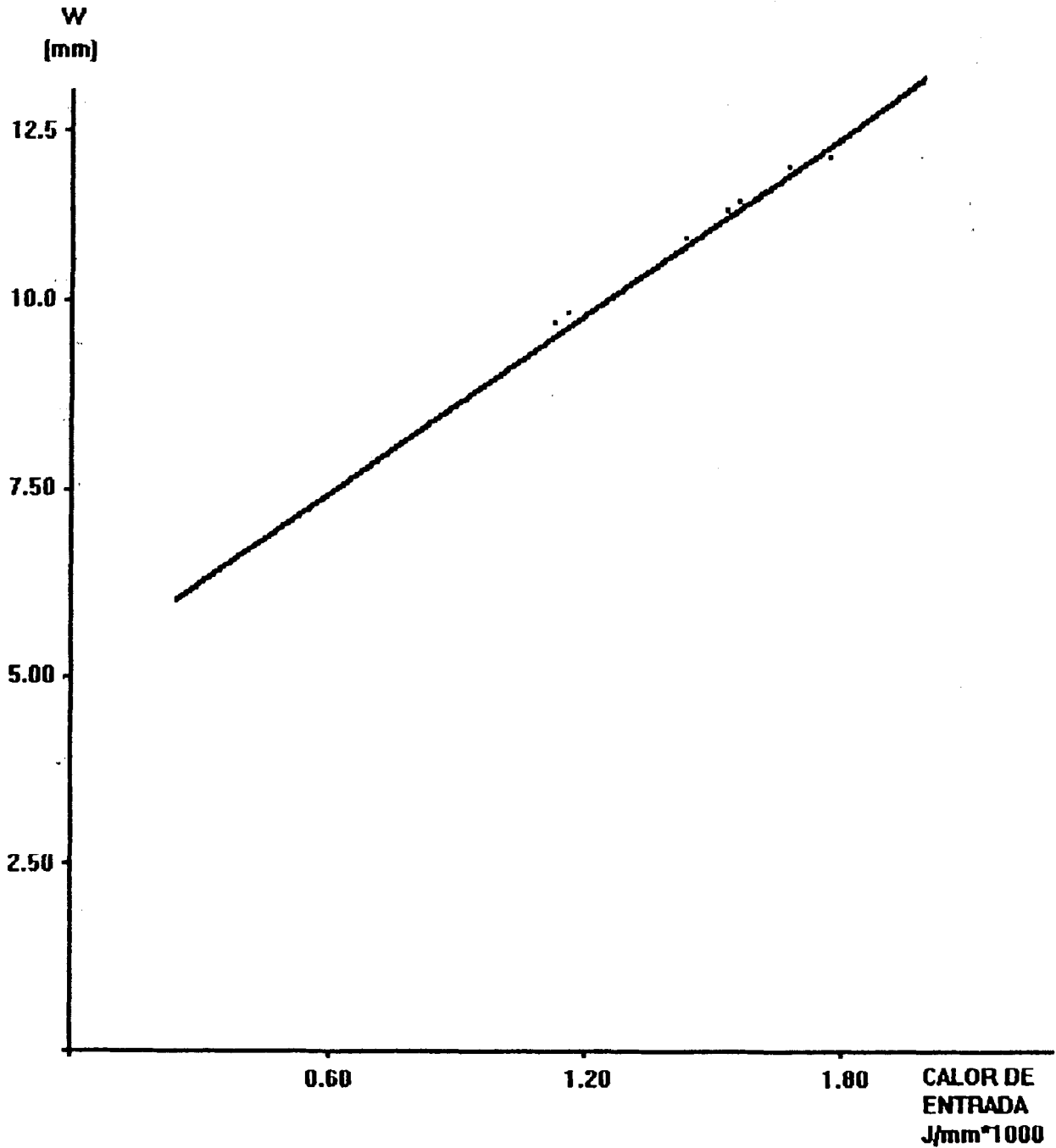


FIG. 3-9
VARIACION DEL ANCHO DEL CORDON Vs. CALOR DE ENTRADA



La salpicadura se reduce al incrementar el voltaje o el ángulo de arrastre, mientras la penetración mala se rectifica con el uso de una corriente eléctrica mayor, mayor prolongación electrizada, reduciendo la velocidad de avance o el voltaje. Por último el choque del electrodo con la pieza de trabajo se produce cuando el voltaje de arco es muy bajo o la prolongación electrizada es muy grande.

Como se ha podido ver en la fig. 3-2, la penetración varía con la corriente aplicada durante el proceso en el arco eléctrico, esta es una dependencia que sabemos existía debido a la ecuación 1-1, de tal forma que a medida que la corriente se incrementa, la penetración también. Si analizamos la variación de la penetración con el voltaje, en la fig 3-3, ésta es prácticamente una constante, es decir, a medida que el voltaje se incrementa la penetración también, pero en forma muy limitada, prácticamente no cambia. Este resultado pudo haber sido previsto gracias a la ecuación 1-1. La fig. 3-4 indica la variación de la penetración con la energía de entrada, donde se observa una curva parecida a la obtenida en la fig. 3-2, lo que también es posible preveer gracias a la ecuación 1-1, dado que la energía de entrada varía de acuerdo al voltaje, corriente y velocidad de avance, y además la corriente infuye fuertemente en la

penetración, se concluye que la energía neta de entrada también debiera influir de igual forma en la penetración.

La figura 3-5 indica la variación de la dilución, medida en porcentajes, con el calor de entrada o también llamada energía de entrada. A medida que el calor de entrada se incrementa la dilución también aumenta hasta un límite donde empieza a producirse el efecto contrario, es como un efecto de saturación, donde aún cuando incrementemos el calor de entrada no se puede seguir aumentando la capacidad del material base para diluir mas material de aporte.

La figura 3-6 permite establecer la variación del ancho máximo de la ZAC con el calor de entrada proporcionado por el arco eléctrico en movimiento. De acuerdo a la ecuación 1-3, esta dependencia era conocida en la teoría, y a medida que el calor de entrada se incrementa, el ancho máximo de la ZAC aumenta, debido a la existencia de temperaturas cada vez mayores que provocan una mayor exposición del metal base al calor del arco eléctrico, de manera que mas material base se vea afectado térmicamente y esto crea una ZAC mas ancha.

Las figuras 3-7, 3-8 y 3-9 nos ayudan a comprender la



BIBLIOTECA
CENTRAL

variación del ancho del cordón con la corriente, el voltaje y la energía de entrada, así a medida que se incrementa cualquiera de estos tres últimos, el ancho del cordón de soldadura también aumenta. Las tres curvas son parecidas y varían en forma semejante porque el calor suministrado por el arco eléctrico en movimiento, conocido como energía de entrada que depende del voltaje y amperaje, de acuerdo a la ecuación 1-2, a medida que es mayor es capaz de fundir mas material de aporte y reducir la transferencia por goteo, lo que genera aportación en forma de lluvia y permite lograr un cordón mas ancho.

3.4. ENSAYOS MECANICOS

Los ensayos mecánicos que se llevaron a cabo fueron los de tracción, doblado y dureza. Debido a que nuestra intención fue obtener una probeta de características satisfactorias, solo se practicó los ensayos de tracción y doblado a la probeta #11 la cual presentó las mejores características en la unión soldada, en otro caso los valores obtenidos hubieran sido poco representativos para un depósito en el que se ha usado electrodo tubular AWS E71T8-Ni1.

3.4.1. ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza permite conocer sobre los cambios metalúrgicos causados por la

soldadura, así el calentamiento y enfriamiento brusco del metal que determina el régimen de enfriamiento del proceso, produce lo que se conoce como la zona afectada por el calor, que es la parte de material base adyacente al depósito que ha sido afectada por el calor del arco eléctrico en movimiento. Además el depósito y la ZAC representan estructuras diferentes y con tamaños de grano distintos. Los valores de dureza máxima obtenidos en las probetas principales se especifican en la tabla III-III y en la figura 3-10 se indica la variación de la dureza a lo largo de la distancia transversal del cordón en la unión soldada de la probeta #11. En las otras probetas se han estimado valores similares de dureza que se encuentran en la tabla III-IV. Puede observarse que la dureza máxima del depósito en todas las probetas se encuentra alrededor de 86 Rb y va disminuyendo a medida que se acerca al metal base.

El perfil de dureza obtenido experimentalmente era predecible, debido a que el régimen de enfriamiento es una función que varía con la posición y el tiempo, además el régimen de enfriamiento en la línea central del cordón es

FIG 3-10
PERFIL DE DUREZA EN EL AREA TRANSVERSAL

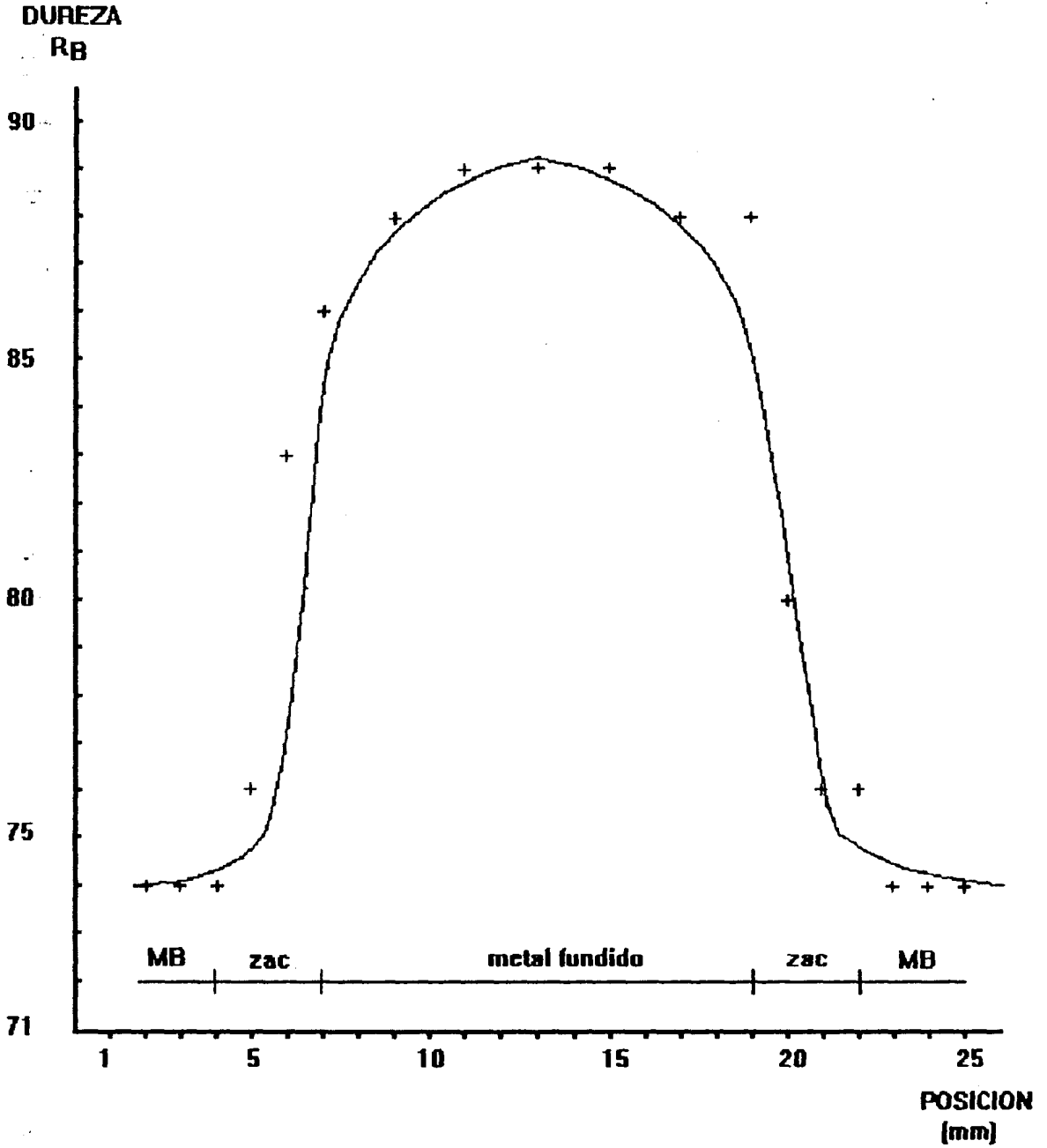


TABLA III-IV
DUREZA EN DIFERENTES
ZONAS REPRESENTATIVAS

PROBETA #	DUREZA R _d				
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5
1	82	88	83	72	72
2	85	86	86	68	66
3	74	78	77	71	69
4	88	88	74	74	74
5	82	88	72	72	70
6	71	80	76	71	69
7	88	88	84	74	72
8	88	89	76	76	74
9	86	88	78	78	76
11	89	89	78	71	67
12	83	87	76	76	73
13	88	87	77	72	70

máximo y por esta razón el mas crítico, y a medida que uno se aleja de la línea central el régimen de enfriamiento es menor, siendo menos brusco el enfriamiento, lo que origina también un crecimiento de grano diferente que da como resultado una disminución en la dureza, hasta alcanzar el mismo valor del metal base que no ha sido afectado por el calor del arco eléctrico.

3.4.2. ENSAYO DE DOBLADO

Para estos ensayos se elaboraron probetas normalizadas por la AWS, Sociedad Americana de Soldadura, obteniéndose dos probetas para el ensayo de doblado de cara y dos de doblado de raíz.

Este ensayo consiste en doblar la probeta de ensayo a 180° en matrices estandares. Durante dicha operación la superficie convexa esta sujeta a esfuerzos de tensión, mientras la concava a esfuerzos de compresión. De los ensayos de doblado tanto de cara como de raíz, se inspeccionó la superficie convexa para detectar si existía inicio de fisura o fisuras producto del ensayo. Como se observa en la tabla III-V ninguna probeta presenta defectos.

**TABLA III-V
RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCION
Y DOBLADO**

PROBETA #	RESISTENCIA A LA TRACCION (psi)
11.a 11.a	76000 75000
PROBETA #	DOBLADO DE CARA
11.b 11.b	ACEPTADO ACEPTADO
PROBETA #	DOBLADO DE RAIZ
11.c 11.c	ACEPTADO ACEPTADO

lo que nos indica que el ensayo de doblado para esta experiencia es satisfactorio.

Este tipo de ensayo no es cuantitativo, sino cualitativo, y lo que se pretende es que las probetas de ensayo no presenten ninguna fisura, producto de lo cual, el proceso aplicado es recomendable para aceros al carbono, y en especial del tipo estructural ASTM A283 grado C, que fue el metal base usado.

3.4.3. ENSAYO DE TRACCION.

Para este ensayo también se elaboraron probetas normalizadas por la AWS. Se obtuvieron dos probetas de ensayo para la muestra #11 y los resultados se encuentran en la tabla III-V. La probeta ensayada debido a la heterogeneidad de la estructura de la junta soldada pudo haber provocado que la zona afectada por el calor se vuelva muy sensible lo que hubiese producido un resultado poco satisfactorio, cosa que no ocurrió ya que la rotura de las probetas se produjo en el cordón de soldadura.

Según los valores obtenidos en la tabla III-V la resistencia a la tracción del depósito se encuentra en un valor aproximado de 76000 lb/plg² que en comparación con lo indicado por la Sociedad Americana de Soldadura para un electrodo E71T8-N11 satisface los requerimientos del proceso y del electrodo mismo, dándonos una resistencia a la tensión mayor a la del metal base, lo que se encuentra dentro del rango previsto por AWS, confirmando una vez mas que el proceso y el electrodo han provisto resultados satisfactorios.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Como resultado de este trabajo se concluye que el proceso de soldadura con electrodo tubular de núcleo de fundente es aplicable en aceros de bajo y medio carbono en planchas de espesores de 6 mm y mayores, para lo cual se ha de controlar adecuadamente los parámetros de soldadura principales como voltaje, amperaje y velocidad de avance.

2. Para eliminar la penetración insuficiente encontrada en este estudio es posible reducir la prolongación electrizada que disminuirá la resistencia eléctrica, provocando un aumento en la intensidad del arco que permitirá fundir más material, logrando mayor penetración. El mismo efecto se logra con una velocidad de avance menor o con el aumento de la corriente.

3. Se concluye además que la porosidad disminuye cuando se reduce el voltaje, para una corriente correspondiente muy alta. Es posible lograr el mismo efecto aumentando la prolongación electrizada, que incrementa la resistencia eléctrica y provocará una disminución en el voltaje de arco que será adecuado para la corriente de operación.

4. Se recomienda el uso de electrodos tubulares en aquellas situaciones de soldadura donde las condiciones de almacenamiento puedan ser poco satisfactorias, debido a que se reduce el problema de absorción de humedad que ocurre con los electrodos revestidos, por ejemplo de bajo hidrógeno.

5. Se recomienda comprobar que el soldador se ajuste a la exigencia de mantener la pistola siempre en el mismo sentido de avance, porque de lo contrario es posible alterar la penetración y ancho del cordón, lo que provoca mal aspecto y características mecánicas diferentes a las deseadas.

6. Finalmente, se recomienda tener cuidado en el manejo del alimentador de electrodo. Durante este estudio se generó una gran cantidad de calor que deshidrató al soldador.

BIBLIOGRAFIA

- 1.-Lincoln Electric Collection, The Procedure Handbook of Arc Welding (décimo segunda edición; Cleveland, Estados Unidos: Lincoln Electric, 1992), pp. 2.1-1 - 15.3-2
- 2.-Lincoln Electric Collection, Metals and How to Weld Them (Cleveland, EE.UU.: Lincoln Electric, 1992), pp. 35 - 89
- 3.-American Welding Society, Welding Metalurgy (tercera edición; New York, Estados Unidos: AWS, 1985) pp. 54 - 73
- 4.-Lincoln Electric Collection, Guía de soldadura semiautomática para fabricación (cuarta edición; Miami, Estados Unidos: Lincoln Electric, 1993), pp. 1-44
- 5.-Lincoln Electric Data Books, Proceso Innershield (tercera edición; Cleveland, Estados Unidos: Lincoln Electric, 1993), pp. 1 - 65
- 6.-American Society for Testing and Materials, American National Standards (tercera edición; New York, Estados Unidos: ASTM, 1993), pp. 32 - 45
- 7.-Beal R.E, Heat Flow in Welding (segunda edición: Illinois, Estados Unidos: Illinois Institute of Technology, 1990), pp. 81 - 92

8.-American Society of Mechanical Engineers, Estándares de calificación para procedimientos de soldadura y operadores de soldadura (Estados Unidos: ASME, 1974), pp. 15 - 97

9.- Avner Sidney, Introducción a la metalurgia física (segunda edición; Estados Unidos, 1978), pp. 42 - 98