



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Estudio de las Propiedades Mecánicas
de Soldaduras de Acero Inoxidable AISI 304,
para Tanques de Reservorio de Líquidos

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

Presentada por:

GUSTAVO MOLINA JALIL

Guayaquil - Ecuador

1 9 8 1

AGRADECIMIENTO



AL ING. ALBERTO TORRES V.,
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboracion para
la realizacion de este traba
bajo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MI ESPOSA

A MIS HIJOS

Alberto Torres Valencia

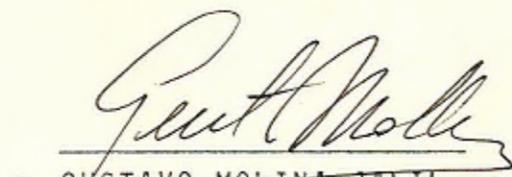
.....
ING. ALBERTO TORRES VALENCIA

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

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

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


GUSTAVO MOLINA JALIL

RESUMEN

En el Ecuador como en todos los demas paises desarrollados o en desarrollo, usan los aceros inoxidables para una gran variedad de industrias, tales como las de aceite, cervezas, colas, lacteos, etc., siendo el acero inoxidable tipo AISI 304 el de mayor uso en nuestro pais; particularmente, se los usa en la fabricacion de reservorios de liquidos, para lo cual seran sometidos al proceso de soldadura que puede ser uno de los mas comunmente usados para estos tipos de aceros, como son el de arco electrico con electrodo revestido, el TIG y el MIG.

En este estudio se habla primeramente de los aceros inoxidables, su clasificacion, sus propiedades fisicas, su composicion, su microestructura, etc., despues hablamos del arco electrico como fuente de calor para el procedimiento de soldadura de los electrodos como material de aporte, ademas de tratar temas como el de la influencia del calor que se desarrolla generalmente en estos procesos, como influyen en las uniones soldadas.

Pasando a la parte experimental, detallamos los procedimientos a seguir en este estudio, asi como de los materiales y equipos utilizados en el mismo.

Terminamos este trabajo detallando los resultados obtenidos en las diferentes pruebas a que fueron sometidas las probetas que se hicieron para el objeto, dando ademas las conclusiones a que se puede llegar.

INDICE

	Pagina
INDICE.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VII
LISTA DE MICROGRAFIAS.....	VIII
LISTA DE FOTOS.....	IX
LISTA DE SIMBOLOS.....	X
CAPITULO I	
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO II	
FUNDAMENTO TEORICO.....	6
2.1. ESTUDIO DEL METAL BASE.....	6
2.1.1. Estudio de los aceros inoxidable.....	6
2.1.2. Clases de aceros inoxidable.....	6
2.1.3. Propiedades físico-mecanicas.....	25
2.1.4. Efectos de los elementos aleantes en los AISI 304	30
2.1.5. Micro estructura de los aceros inoxidable tipo	
304.....	34
2.1.6. Estudio de la corrosión.....	42
2.2. ESTUDIO DEL METAL DE APORTE.....	56
2.2.1. El arco electrico como fuente de calor.....	56
2.2.2. Tipo de electrodos y requerimientos que deben	
cumplir.....	63
2.2.3. Selección de electrodos para diferentes procesos	
de soldadura.....	66

	pagina
2.3. ESTUDIO DE LA UNION SOLDADA.....	79
2.3.1. Preparacion de juntas.....	79
2.3.2. Efecto termico del arco electrico en los aceros inoxidable.....	81
2.3.2a Distorsion y su control.....	81
2.3.2b Tensiones residuales.....	83
2.3.2c Disminucion de la soldabilidad.....	84
2.3.2d Zona afectada por el calor.....	86
2.3.2e Distribucion de la temperatura en la zo- na afectada por el calor.....	91
2.3.2f Calculo de la velocidad de enfriamiento.	96
2.4. DIFERENTES PROCESOS DE SOLDADURA APLICA- BLES.....	100
2.4.1. Proceso manual de electodo revestido....	100
2.4.2. Proceso TIG.....	106
2.4.3. Proceso MIG.....	115
CAPITULO III	
TRABAJO EXPERIMENTAL.....	121
3.1. Planificación del trabajo.....	122
3.2. Materiales y equipos a utilizarse.....	124
3.3. Tecnica operativa.....	144
3.3.1. Preparación de probetas.....	144

	Pagina
3.3.2. Ensayos mecánicos.....	148
3.3.2a Tracción.....	151
3.3.2b Doblado.....	155
3.3.2c Dureza.....	158
3.3.2d Impacto.....	159
3.3.3. Selección de parametros.....	161
3.3.4. Procedimientos de soldadura.....	163
 CAPITULO IV	
RESULTADOS.....	166
4.1. Evaluación de los ensayos metalográficos...	166
4.2. Evaluación de los ensayos de dureza.....	186
4.3. Evaluación de los ensayos de doblado.....	186
4.4. Evaluación de los ensayos de tracción.....	189
4.5. Evaluación de los ensayos de impacto.....	192
 CAPITULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	193
5.1. Conclusiones.....	193
5.2. Recomendaciones.....	195
 APENDICES	
APENDICE I.....	196
APENDICE II.....	197
APENDICE III.....	198
REFERENCIAS.....	199

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PAGINA</u>
1.	Curvas indicando la resistencia tensil de ciertos aceros inoxidable soldados a diferentes temperaturas. (10)	27
2.	Relacion de contenido de entre el carbono y el silicio en los aceos inoxidables austeniticos. (10)	32
3.	Diagrama de Schaeffler para aceros inoxidables soldados. (10)	39
4.	Microestructura de union soldada con electrodo E 310; muestra estructura austenitica simple 500x. (10)	37
5.	Microestructura de union soldada con electrodo E 308, muestra doble estructura, una de matrix austenitica y otra de delta ferrita. (10)	37
6.	Representacion de un limite de grano en acero inoxidable tipo 304 al ser sensitizado. (2)	45
7.	Sección transversal del area mostrada en la figura 6. (2)	45

8.	Micrografia de carburos aislados, tomada de una probeta de acero inoxidable tipo 304 sensitizado.	(2)	48
9.	Corrosion intergranular en la zona de decaimiento de la soldadura, acero inoxidable tipo 304.		48
10.	Esquema de las zonas del cordon soldado y de la sensitizacion en las coordenadas temperatura-distancia normal-distancia longitudinal.	(2)	51
11.	Temperatura durante la soldadura con arco electrico del acero AISI 304	(2),	51
12.	Arco de soldadura electrica	(14)	57
13.	Carta general de los procesos de soldadura.	(14)	59
14.	Sección transversal.	(13)	88a
15.	Soldadura por arco con electrodo <u>revesti-</u> do.	(14)	101
16.	Soldadura al arco con gas protector.	(14)	104
17.	Soldadura al arco en un proceso MIG	(14)	116
18.	Probeta de deposicion libre.	(13)	146
19.	Ensamble mecanico para obetener probetas para las pruebas de traccion, doblado, - impacto y microdureza.	(13)	150

20.	Probeta para prueba de traccion (13)	152
21.	Curva de pruebas tensiles. (13)	154
22.	Guia para la prueba de doblado. (13)	156
23.	Dimensiones de probetas para las - pruebas de doblado (cara y raiz) (13)	156
24.	Probeta para la prueba de impacto. (13)	160a

LISTA DE TABLAS

Titulo

<u>Figura</u> <u>No.</u>	<u>Titulo</u>	<u>Pagina</u>
1.	Designación numerica de los aceros inoxidables AISI (5)	7
2.	Algunas propiedades y aplicaciones de los ace- ros inoxidables martensiticos (4)	9
3.	Algunas propiedades y aplicaciones de los ace- ros inoxidables ferriticos (4)	16
4.	Efecto del laminado en frío en la direccion longitudinal de los aceros inoxidables auste- niticos tipos 301 y 302	19
5.	Algunas propiedades y aplicaciones de los ace- ros inoxidables austeniticos (4)	20
6.	Tipo AISI, numero y composiciones de aceros inoxidables austeniticos forjados. (10)	22
7.	ACI designacion de aceros inoxidables austeni- ticos forjados al cromo - niquel (10)	24
8.	Datos de impacto de aceros inoxidables auste- niticos soldados a diferentes temperaturas (10)	29
9.	Clasificación de los electrodos revestidos para aceros inoxidables (10)	68

10.	Material de aporte recomendado para aceros inoxidables austeniticos al cromo-niquel comunmente usados (10)	76
11.	Rangos de corrientes recomendados para - electrodos austeniticos al cromo-niquel AWS (10)	102
12.	Parametros de soldadura usados en el pro- ceso de electrodo revestido.	162
13.	Datos de los elementos empleados en la soldadura y resultados obtenidos en las pruebas de deposicion libre.	167
14.	Datos de resultados en el ensamble meca- nico.	183a
15.	Dureza Vickers	188
16.	Datos de la prueba de doblado	189
17.	Resultados pruebas de tracción	190
18.	Resultados pruebas de tracción	191

LISTA DE MICROFOTOGRAFIAS

<u>FOTO</u>		<u>PAGINA</u>
1.	Estructura de acero inoxidable austenitico tipo AISI 304, sin ningun tipo de trata--- miento. Muestra su estructura austenitica	36
2.	Probeta calentada a 600 grados centigrados por una hora. Muestra precipitacion de - carburos en los bordes del grano.	43
3.	Probeta 101x. Muestra precipitacion de - carburos de cromo en los bordes del grano.	169
4.	Probeta 103x. Muestra precipitacion de car- buros de cromo en los bordes del grano.	170
5.	Probeta 105x. Muestra precipitacion de carburos de cromo en los bordes del grano.	171
6.	Probeta 101y. Muestra precipitacion de car- buros de cromo en los bordes del grano.	173
7.	Probeta 103y. Muestra precipitacion de car- buros de cromo en los bordes del grano.	174
8.	Probeta 105y. Muestra precipitacion de car- buros de cromo en los bordes del grano.	175
9.	Probeta 101z. Muestra precipitacion de car- buros de cromo en los bordes del grano.	177

10.	Probeta 103z. Muestra precipitacion de carburos de cromo en los bordes del grano.	178
11.	Probeta 105z. Muestra precipitacion de carburos de cromo en los bordes del grano.	179
12.	Probeta de acero inoxidable tipo AISI 304 de 2mm de espesor. No muestra casi ninguna precipitacion. 1000x	180
13.	Probeta de acero inoxidable tipo AISI 304 de 2mm de espesor. No muestra casi ninguna precipitacion. 1000x	180
14.	Probeta de ensamble mecanico. Acero inoxidable tipo AISI 304. Se puede notar cierta precipitacion de los carburos de cromo.	183
15.	Probeta de ensamble mecanico. Acero inoxidable tipo AISI 304. Se puede notar cierta precipitacion de los carburos de cromo.	184
16.	Probeta de ensamble mecanico. Acero inoxidable tipo AISI 304. Se puede notar cierta precipitacion de los carburos de cromo.	185.

LISTA DE FOTOS

<u>FOTO</u>		<u>PAGINA</u>
No.		
1.	Equipo de soldadura ESAV LTD. 200 para proceso de electrodo revestido y TIG	129
2.	Equipo de soldadura ESAB A10 - 250K para proceso MIG	131
3.	LETROPOL, maquina para pulido electrolitico	134
4.	Microscopio optico para observacion metalografica	137
5.	Horno LINDBERG para tratamiento termico del material	137
6.	Microdurimetro, modelo AK6, para medir microdureza Vickers	139
7.	Maquina de ensayos mecanicos INSTRON	141
8.	Maquina VERSATESTER 30M para prueba de doblado	143
9.	Probetas de ensayo de traccion	196
10.	Probetas de ensayos de doblado	197

ACI	= Instituto de Aleaciones y Fundiciones
AISI	= Instituto Americano del Hierro y el Acero
ASTM	=
AWS	= Sociedad Americana de Soldadura
AC	= Corriente Alterna
AW	= Area de la sección transversal del metal base fundido
A	= Sección transversal del electrodo depositado
BTU	= Unidades térmicas Británicas
C	= Densidad del Material a Soldarse g/mm^3
P C	= Calor Específico del metal sólido $\text{j/gr } ^\circ\text{C}$
Cc	= Calor Específico volumétrico $\text{J/mm}^3\text{ } ^\circ\text{C}$
$^\circ\text{C}$	= Grados Centígrados
cm	= Centímetros
cm^2	= Centímetros Cuadrados
cm^3	= Centímetros Cúbicos
Cr	= Cromo
C	= Carbono
Cb	= Columbio
CO_2	= Gas Carbónico
Dc	= Corriente Continua
$^\circ\text{F}$	= Grados Fahrenheit
Fe	= Hierro
H neta	= Energía Neta suministrada por el arco

Hr	=	Hora
H	=	Energía Introducida
Inch	=	Pulgadas
I	=	Intensidad
J	=	Joules
K	=	Conductividad
Kg	=	Kilogramo
Lbs.	=	Libras
Mo	=	Molibdeno
Mn	=	Manganeso
Max	=	Máximo
Min	=	Mínimo
MIG	=	Soldadura al Arco en atmósfera de Gas Inerte con Electrodo Fusible
mm	=	Milímetro
Ni	=	Níquel
P	=	Fósforo
P	=	Potencia Total Introducida desde la fuente de calor en watts
R	=	Velocidad de Enfriamiento°/C/seg.
SMAW	=	Soldadura al arco Eléctrico con Electrodo Revestido
Se	=	Selenio
i	=	Silicio
Ti	=	Titanio

T_p	=	Temperatura Máxima en °C
T_o	=	Temperatura Inicial Uniforme °C
T_f	=	Temperatura de Fusión en °C
t	=	Espesor de la lámina ó plancha /mm
TIG	=	Soldadura al Arco con Electrodo de Tungsteno en Atmósfera de gas Inerte
ZAC	=	Zona Afectada por el Calor
σ_y	=	Punto de Fluencia
σ_{max}	=	Resistencia a la Traccion
ϵ	=	Elongacion en 2 pulgadas
ϕ	=	Estriccion (Reduccion de area)
E	=	Modulo Elastico
Rb	=	Dureza Rockwell

CAPITULO

I

INTRODUCCION

1.1.- Los avances de la civilización están estrechamente vinculados con los adelantos tecnológicos que ha tenido esta en toda una gama muy amplia de campos científicos, tales como la física, química, astro-física, geología, aereo-espacio, biología, y, dentro de todas estas una que nos interesa particularmente que está dentro del estudio a la cual se refiere el presente trabajo de investigación, la cual es la metalúrgica.

Dentro de este campo se ha logrado desarrollar un acero que con un mínimo de un 10% de cromo en su composición, resulta altamente resistente a la corrosión, por lo que se los llama generalmente aceros inoxidables; y, si además se le agrega a estos un mínimo de un 5% de níquel, nos encontraremos con un acero que es resistente no solo

a la corrosión sino también a las altas temperaturas.

Con el desarrollo de estos aceros en - los últimos 30 años, también se ha desarollado una amplia área de usos de los mismos que va desde rascacielos a refi-nerias de petróleo, desde fábricas para productos de la leche y sus derivados a los satélites que tenemos en órbita.

Los aceros inoxidables en general, están divididos en tres grandes grupos, que como sabemos son los aceros inoxidables, - martensíticos, aceros inoxidables ferri-ticos y los aceros inoxidables austeni-cos, los cuales a su vez están subdivi-didos.

La influencia de estos aceros, se la ha dejado sentir ya en nuestro país, en - donde es utilizado para una gran varie-dad de industrias, especialmente alimen-ticias o de productos para consumo huma-no como son las industrias que procesan leche y sus derivados, cervezas, colas, etc. Para estas industrias y para el -

transporte al granel de la leche, cerveza, colas, etc., necesitan de reservorios y tanques que son fabricados generalmente de acero inoxidable tipo AISI 304 que es el más comercialmente encontrado en el co me rcio.

En la fabricación de estos reservorios y tanques se usa la soldadura por arco eléc tr ico, la que genera una fuente de calor que hará cambiar la microestructura del metal, en la zona adyacente al cordón sol da do produciéndose el fenómeno de la sensibilización al desplazarse los carbonos de cromo a los bordes del grano, haciendo posible que esta área sea susceptible a la corrosión intergranular y que afecte a la estructura misma del recipiente así co mo a su contenido.

El presente trabajo está dedicado a anal i ar este problema y las maneras de minimizarlo, encontrando dentro de los procesos de soldadura por arco eléctrico comúnmente empleados (electro revestido T.I.G. y M.I.G.) el más conveniente o el que pre -

sentara el menor grado de sensibilización. Sometimos al metal base a una variedad de pruebas de soldaduras con una variedad de parámetros, se realizaron exámenes metalográficos, así como ensayos mecánicos de los mismos tales como pruebas de doblado, tracción y microdureza, para no solo analizar la sensibilización, sino que además para ver si esta produce efectos dañinos en las propiedades mecánicas del metal base, factor que es de suma importancia en estas clases de recipientes, ya que al estar llenos de líquidos estarán sometidos a tensiones de carga, y si se producen variaciones en sus propiedades mecánicas - muy pronunciadas, podría resultar que se produzcan fisuras y eventualmente orificios en las estructuras.

Por lo expuesto anteriormente se podrá suponer que los resultados obtenidos en este trabajo, serán de mucha ayuda tanto para los fabricantes como para las industrias

que usan estos aceros en la fabricación no solamente de estos recipientes, sino también de todo tipo de estructura que vaya a ser soldada y sometida a medios corrosivos y de esfuerzos de carga.

CAPITULO

II

FUNDAMENTO TEORICO

2.1.- ESTUDIO DEL METAL BASE

El acero inoxidable se lo puede definir como una aleación de hierro y carbono, al cuál se le ha añadido suficiente cromo, lo que permite a la aleación, resistir la corrosión cuando es puesto en medios corrosivos. El contenido mínimo de cromo es de 11% a 12%.

CLASES DE ACEROS INOXIDABLES

Como los aceros inoxidable contienen cantidades relativamente grandes de cromo, las aleaciones de hierro, carbono y cromo, pertenecen a un sistema ternario, estos tienen un sistema de numeración de tres dígitos para identificarlos (1). Los dos últimos números no tienen significado específico, pero el primero indica el grupo al que pertenecen, según el cuadro dado a continuación.

TABLA No 1

DESIGNACION NUMERICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AISI

SERIES	ELEMENTOS ALEANTES	CARACTERISTICAS
2xx	Cromo-Niquel-Manganeso	No endurecibles Austeníticos
3xx	Cromo-Niquel	No endurecibles Austeníticos
4xx	Cromo	(1) Endurecible Martensíticos (2) Endurecible Ferríticos
5xx	Cromo (4 al 6%)	Endurecible al aire Martensíticos

Los aceros inoxidableables debido a su alto contenido de aleaciones tiene importantes propiedades. El cromo, añadido en un buen porcentaje hace al acero más duro a baja y alta temperaturas, dándole además una excelente resistencia a la corrosión y la oxidación. Algo del cromo se combina con el carbón, dándonos como resultado carburos de cromo el cuál le dá una mayor dureza y resistencia al desgaste. El contenido de níquel le da también una excelente resistencia a la corrosión como también mejora sus propiedades de resistencia y tenacidad a bajas y altas temperaturas

Resumiendo lo anterior, podemos decir que los aceros inoxidableables se clasifican en tres grupos de acuerdo a sus diferentes porcentajes de aleaciones y tratamientos a los que se los ha expuesto.

ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS

Estos aceros son principalmente aceros con solo entre 11.5 y 18% de cromo. Algunos ejemplos de este grupo son los tipos 403, 410, 416, 420, 440A, 501 y 502. Algunas de las aplicaciones de los aceros inoxidableables martensíticos aparecen en la tabla #2

403		410	
Grado de calidad para turbina, similar al 410; se utiliza en aletas para turbinas de vapor y otras piezas sometidas a grandes esfuerzos.		Aleación base para este grupo; propósito general, tipo tratable térmicamente; se utiliza para piezas de maquinaria, flechas para bombas.	
414		416	
El mayor contenido de Ni incrementa la templabilidad y la resistencia a la corrosión; utilizado para resortes, láminas revenidas y piezas de maquinaria.		Modificación del maquinado libre del 410 (contiene S); se emplea para cortes pesados.	
431		416Se	
El mayor contenido de cromo mejora la resistencia a la corrosión; tiene altas propiedades mecánicas; se emplea para accesorios de aviones, barras calentadoras, y en tornillos de piezas para maquinaria papelería.		Modificación del maquinado libre del 410 (contiene Se); para cortes ligeros y donde se incluye el trabajado en caliente y el trabajado de cabezas en frío.	
420		440A	
Modificación del alto carbono del 410; tiene mayor dureza y más resistencia al desgaste; se usa para cuchillería, instrumentos quirúrgicos y válvulas.		Ligeramente menos contenido de carbono que el 440B para mayor tenacidad; puede tener mayor dureza que el 420; buena resistencia a la corrosión; se emplea para cuchillería y en piezas para válvulas.	
440C		440B	
Máximo contenido de carbono (0.95 a 1.20%) de los aceros inoxidables; se utiliza para bolas, cojinetes y rodillos.		El ligeramente menor contenido que el 440C mejora la tenacidad; se utiliza para cuchillería fina y en piezas para válvulas.	

Tabla # 2 Algunas propiedades y aplicaciones de los aceros inoxidables martensíticos. (4)

aire. Estos aceros generalmente se endurecen calentándolos por arriba del intervalo de transformación a temperaturas próximas a 1010°C y luego enfriándolos en el aire o aceite. El tiempo a la temperatura de tratamiento se mantiene en el mínimo posible para prevenir la descarburización o el excesivo crecimiento de grano. El revenido de los aceros de este grupo no deben hacerse en el intervalo de 400 a 510°C , debido a la caída de las propiedades al impacto. El revenido generalmente hace por arriba de 594°C . Las mayores temperaturas de revenido darán lugar a alguna precipitación de carburos, con una subsecuente reducción en la resistencia a la corrosión; sin embargo, con bajo contenido de carbono, la reducción de la resistencia a la corrosión no es demasiado severa.

Los aceros inoxidable clasificados este grupo son más difíciles de maquinar que los aceros al carbono. Utilizan una pequeña cantidad de azufre en los del tipo 416 y de Selenio en los del tipo 416Se mejora considerablemente la maquinabilidad.

El uso de Selenio ejerce menor efecto en reducir la resistencia a la corrosión que el azufre. Los aceros inoxidable del tipo 440, con un contenido de

carbono entre 0,60 y 1,20% y de 16 a 18% de cromo, tendrán alta resistencia a la corrosión, resistencia a la tracción y resistencia al desgaste. Estos aceros se utilizan para cuchillería, piezas para válvulas y en cojinetes.

La adición de 2% de níquel a los aceros aleados de bajo carbono del 16 al 18% de cromo (tipo 431) extiende la región de austenita y los hace térmicamente tratables. Por lo general, se enfrían en aire, y el tratamiento térmico requiere de un cuidadoso control de la composición química y de la temperatura de templado, debido a la posible presencia de ferrita delta a la temperatura de austenitación. El tipo 431 se ha utilizado para accesorios de aviones, piezas para maquinaria papelería, en bombas y tornillos.

Los aceros aleados con relativamente bajo cromo, que contienen de 4 a 6% de cromo (tipo 501 y 502), poseen excelente resistencia a la oxidación y mejor resistencia a la corrosión que los aceros comunes. Estos aceros pueden endurecerse por templado en aceite ó, en algunos casos, mediante enfriamiento en aire.

Las propiedades logradas son realmente intermedias

entre los aceros aleados de la serie 5xx y los aceros martensíticos inoxidable del tipo 400. Por tanto; son adecuados para ligeras condiciones de corrosión o a temperaturas inferiores a 540°C. Se han utilizado ampliamente para equipos de refinerías petroleras, como intercambiador de calor, cuerpos para válvulas, anillos para bombas y otros accesorios. (4)

ACEROS FERRITICOS INOXIDABLES

Este grupo de aceros inoxidable con sólo cromo - contienen aproximadamente de 14 a 27% de cromo e - incluye los tipos 405, 430 y 446. Como estos aceros contienen poco carbono pero generalmente más - cromo que los de grado martensíticos, no se pueden endurecer por tratamiento térmico, sino solo moderadamente mediante trabajo en frío.

Son magnéticos y pueden trabajarse en frío o en - caliente, pero alcanzan su máxima suavidad, ducti-- lidad y resistencia a la corrosión en la condición de recocido. En esta condición, la resistencia de - estos aceros es aproximadamente 50% mayor que la - de los aceros al carbono; además, son superiores - en resistencia a la corrosión y maquinabilidad a -

Los acerosmartensíticos inoxidable. Como los aceros ferríticos pueden conformarse fácilmente en frío, se utiliza mucho para profundos estampados de piezas, como recipientes para industrias químicas y alimenticias y para adornos arquitectónicos y automotrices.

El recocido es el único tratamiento térmico aplicado a aceros verdaderamente ferríticos. Este tratamiento sirve sobretodo para eliminar tensiones por soldadura o trabajo en frío.

Una forma importante de fragilidad peculiar a los grados ferríticos puede desarrollarse por exposición prolongada al intervalo de temperatura desde unos 400 a 510°C ó a enfriamiento lento dentro del mismo intervalo. La resistencia medida al impacto por la prueba de Charpy es la más adversamente afectada. Aunque no se ha determinado la causa precisa de la fragilidad, sus efectos aumentan rápidamente con el contenido de cromo, alcanzando un máximo en el tipo 446.

Ciertos tratamientos térmicos, como el de enfriamiento en horno para lograr máxima ductilidad, deben controlarse para evitar la fragilización. Los

aceros ferríticos generalmente se recocen a temperaturas superiores a 455°C fuera del rango de fragilización y a temperaturas inferiores a las que se podría formar la austenita.

Cuando se tratan térmicamente para obtener máxima ductilidad, estos aceros se enfrían con lentitud. No se revienen, debido a la cantidad de martensita formada que es despreciable y a la fragilización en el intervalo de 460°C . La tabla #3 resume las principales aplicaciones de los aceros inoxidable ferríticos. (4)

ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS

Estos son los aceros inoxidable al cromo níquel tipo 3xx y al cromo-níquel-manganeso tipo 2xx, que resultan con matriz austenítica; son esencialmente no magnéticos en la condición de recocido y no endurecen por tratamiento térmico. El contenido total de níquel y cromo es de por lo menos 23%. Se pueden trabajar fácilmente en caliente o en frío cuando se toman precauciones adecuadas para que en forma rápida endurezcan por trabajo. El trabajado en frío les desarrolla una amplia variedad de propiedades mecánicas y, en esta condición, el acero -

<p>430F</p> <p>Modificación del maquinado libre del 430 (contiene S); para cortes pesados y piezas para máquinas destinadas a hacer tornillos.</p>	<p>430</p> <p>Aleación básica para este grupo: tipo de cromo no endurecible; se utiliza para adornos decorativos, tanques para ácido nítrico y en cestas de recocido.</p>	<p>430Se</p> <p>Modificación del maquinado libre del 430 (contiene Se); se emplea para cortes ligeros y donde se pueden incluir el trabajado en caliente e el trabajado de cabezas en frío.</p>
<p>405</p> <p>La adición de Al mejora la soldabilidad de esta otra forma de aleación martensítica, haciéndola no endurecible; se utiliza donde no se desean los tipos endurecibles en aire (410 o 403).</p>	<p>442</p> <p>Alto contenido de cromo para mayor resistencia a la corrosión y a la formación de escamas; se utiliza para piezas de hornos, toberas y en cámaras de combustión.</p>	<p>446</p> <p>El mayor contenido de cromo que el 442 aumenta la resistencia a la corrosión y a la formación de escamas a altas temperaturas; se emplea especialmente en servicio intermitente, a menudo en atmósferas de comportamiento azufroso.</p>

Tabla # 3 Algunas propiedades y aplicaciones de los aceros inoxidables ferriticos (4)

puede llegar a ser ligeramente magnético. Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinar, a menos que contengan azufre y selenio (tipos 303 y 303Se).

Estos aceros tienen una mejor resistencia a altas temperaturas y resistencia a la formación de escamas. Su resistencia a la corrosión suele ser la de los aceros martensíticos o ferríticos.

En los aceros del tipo 302, la aleación básica de los aceros inoxidable austeníticos, se han modificado formando una familia de 22 aleaciones relacionadas entre sí por sus composiciones y propiedades por ejemplo, la disminución del contenido de carbno a un máximo de 0,08% dió lugar al tipo 304 con soldabilidad mejorada y menor tendencia a la precipitación de carburo.

Para evitar la precipitación de carburo durante el soldado se ideó una versión con menor contenido de carbono, tipo 304L, la cuál contiene solo 0,03% de carbono como máximo. Aunque el tipo 304L suprime la precipitación de carburo durante el enfriamiento a través del intervalo de 815° a 424°C después del soldado, potencialmente se encuentran problemas de precipitación más serios al soldar con pasadas múl-

tiples o en servicio en el intervalo de 424 a 815°C. Para satisfacer estos requisitos se recomiendan los grados estabilizados, tipo 321 con Ti agregado, y tipo 347, con Cb ó Ta agregados. En ambas aleaciones, se precipita un carburo diferente del cromo, de manera que el cromo se retiene en solución y la aleación mantiene su resistencia a la corrosión. Un tratamiento térmico de estabilización consiste en mantener los tipos recocidos o soldados de 870 a 900°C por 2 o 4 horas, seguidos de un rápido enfriamiento en aire o en agua. El propósito es precipitar todo el carbono en forma de carburo de titanio o de columbio para prevenir una subsecuente precipitación de carburo de cromo.

Aunque todos los aceros inoxidable se pueden endurecer, hasta cierto punto, por trabajo en frío, el resultado llega a ser significativo en los aceros austeníticos, alcanzando un máximo en los tipos 201 y 301. En la tabla .4 se compara el comportamiento del endurecimiento por trabajo del tipo 301 17 Cr-7Ni con el tipo más estable 302 18 Cr-8Ni.

La figura #5 muestra la interrelación y la amplia variedad de aplicaciones en que se han utilizado los aceros inoxidable.

Se realizaron trabajos para sustituir níquel por manganeso en el acero inoxidable dando lugar a la producción de los tipos 201 y 202, los aceros inoxidables al cromo-níquel-manganeso. El tipo 201, con una composición nominal de 17% de Cr, 4,5% de Ni y 6,5 % de Mn, es un sustituto satisfactorio para el tipo 301 (17% de Cr y 8% de Ni) donde no son esenciales la maquinabilidad y severas características de formado.

Donde son esenciales esas características, es más deseable el tipo 202, con una composición nominal de 18% de Cr, 5% de Ni y 8% de Mn, porque el mayor contenido de manganeso reduce la rapidez del endurecimiento por trabajo. Aunque los tipos 201 y 202 tienen menor resistencia a la corrosión química que los 301 y 302, su resistencia a la corrosión atmosférica es completamente comparable. (4)

La mayoría de los aceros inoxidables austeníticos han sido clasificados por el Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI). Estas clasificaciones más unas pocas adicionales las encontraremos en la tabla #6. Una lista similar ha sido preparada por el Instituto de Aleaciones y Forjas (ACI). Ver tabla #7. (10)

Tipo #	Carbon %	Cromo %	Niquel %	Otros Elementos
201	0.15	16.00 -18.00	3.50-5.50	N,0.25; Mn, 5.50-7.50; P, 0.06
202	0.15	17.00 -19.00	4.00-6.00	N,0.25; Mn, 7.50-10.00;P, 0.06
301	0.15	16.00 -18.00	6.00-8.00	
302	0.15	17.00 -19.00	8.00-10.00	
302B	0.15	17.00 -19.00	8.00-10.00	Si,2.00-3.00
303	0.15	17.00 -19.00	8.00-10.00	S, 0.15 min;P, 0.20
303 Se	0.15	17.00 -19.00	8.00-10.00	Se, 0.15 min
304	0.08	18.00 -20.00	8.00-12.00	
304L	0.03	18.00 -20.00	8.00-12.00	
305	0.12	17.00 -19.00	10.00-13.00	
308	0.08	19.00-21.00	10.00-12.00	
309	0.20	22.00 -24.00	12.00-15.00	
309S	0.08	22.00 -24.00	12.00-15.00	
310	0.25	24.00 -26.00	19.00-22.00	Si, 1.50
310S	0.08	24.00 -26.00	19.00-22.00	Si, 1.50
314	0.25	23.00-26.00	19.00-22.00	Si, 1.50 - 3.00
316	0.08	16.00 -18.00	10.00-14.00	Mo, 2.00 - 3.00
316L	0.03	16.00 -18.00	10.00-14.00	Mo, 2.00 - 3.00
317	0.08	18.00 -20.00	11.00-15.00	Mo, 3.00 - 4.00
321	0.08	17.00 -19.00	9.00-12.00	Ti, 5 x C min

17-7PH	0.09	16.00 - 18.00	6.50-7.75	Mn, 1.00; Al, 0.75 - 1.50
17-10P	0.10-0.14	16.50- 17.50	9.75-10.75	Mn, 0.50-1.00; P, 0.25-0.30; Si, 0.60
17-4PH	0.07	15.50 - 17.50	3.00-5.00	Mn, 1.00; Cu, 3.00-5.00; Cb + Ta 0.15-0.45
15-7 Mo	0.09	15.00 -16.00	6.50-7.75	Mn, 1.00; S, 0.04; Al, 0.75 - 1.50
AM-350	0.08-0.12	16.00 -17.00	4.00-5.00	Mn, 0.50-1.25; Si, 0.50, Mo, 2.50-3.25; N, 0.07-0.13
AM-355	0.10-0,15	15.00 -16.00	4.00-5.00	Mn, 0.50-1.25; Si, 0.50; Mo, 2.50-3.25; N, 0.07-0.13
A-286	0.08	13.50 -16.00	24.00-27.00	Mn, 1.00-2.00; Mo, 1.00-1.50; Ti, 1.75 - 2.35; V, 0.10-0.50; Al, 0.35; P, 0.04

Tabla 77 ACI Designaciones y Composiciones de aceros inoxidables austeníticos forjados al cromo-níquel (10)

A C I Designación	Fundición de aleaciones tipo	Carbón %	Cromo %	Níquel %	Otros Elementos
CE-30	.....	0.30	26-30	8-11	.....
CF-3	304L	0.03	17-21	8-11	.....
CF-8	304	0.08	18-21	8-11	.....
CF-20	302	0.20	18-21	8-11	.....
CF-3M	316L	0.03	17-21	9-13	Mo, 2.0-3.0; Si, 1.50
CF-8M	316	0.08	18-21	9-12	Mo, 2.0-3.0; Si, 1.50
CF-12M	316	0.12	18-21	9-12	Mo, 2.0-3.0; Si, 1.50
CF-8C	347	0.08	18-21	9-12	Cb, 8 x C Min; 1.0 Max; Or Cb+ Ta, 10xC Min; 1.35 max.
CF-16F	303	0.16	18-21	9-12	Mo, 1.5; Se, 0.20-0.35; P, 0.17
CH-20	309	0.20	22-26	12-15	.....
CK-20	310	0.20	23-27	19-22	.....
HE	...	0.20-0.50	26-30	8-11	.....
HF	302B	0.20-0.40	19-23	9-12	.....
HH	309	0.20-0.50	24-28	11-14	N, 0.2
HI	...	0.20-0.50	26-30	14-18	.....
HK	310	0.20-0.60	24-28	18-22	.....
HL	...	0.20-0.60	28-32	18-22	.....
HT	330	0.35-0.75	13-17	33-37	Si, 2.50
HMJ	...	0.35-0.75	17-21	37-41	Si, 2.50

2.2.- PROPIEDADES FISICAS MECANICAS

En los estudios que se han realizado en lo referente a las propiedades físicas - mecánicas de aceros inoxidable se ha encontrado que éstos difieren sensiblemente de las de los aceros ordinarios al carbono, siendo su característica más importante su alta resistencia la oxidación y corrosión, y al impacto a bajas temperaturas, lo cuál está dado por su alto contenido de cromo. Comparando las propiedades de los aceros inoxidable con las de los aceros ordinarios tenemos:

Que la conductividad térmica de los aceros inoxidable en general y austeníticos en particular, es - más baja. Siendo alrededor del 50% menor; haciendo estos aceros más susceptibles a recalentarse porque el calor de la soldadura se transmite más lentamente y tiende a localizarse en las proximidades de las juntas de soldadura en una zona más estrecha.

Su coeficiente de dilatación térmica es mucho más - alto, aproximadamente un 50% mayor que la del acero ordinario; por consiguiente pueden producirse - deformaciones o tensiones residuales mucho mayores que con el acero ordinario.

Son más resistentes a ciertos tipos de corrosión -

que aceros ordinarios y además tienen una mejor resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

El punto de fusión es cerca de 100°C menor que la del acero ordinario $1425 - 1475^{\circ}\text{C}$ para los aceros - inoxidables; 1535°C para los aceros ordinarios.

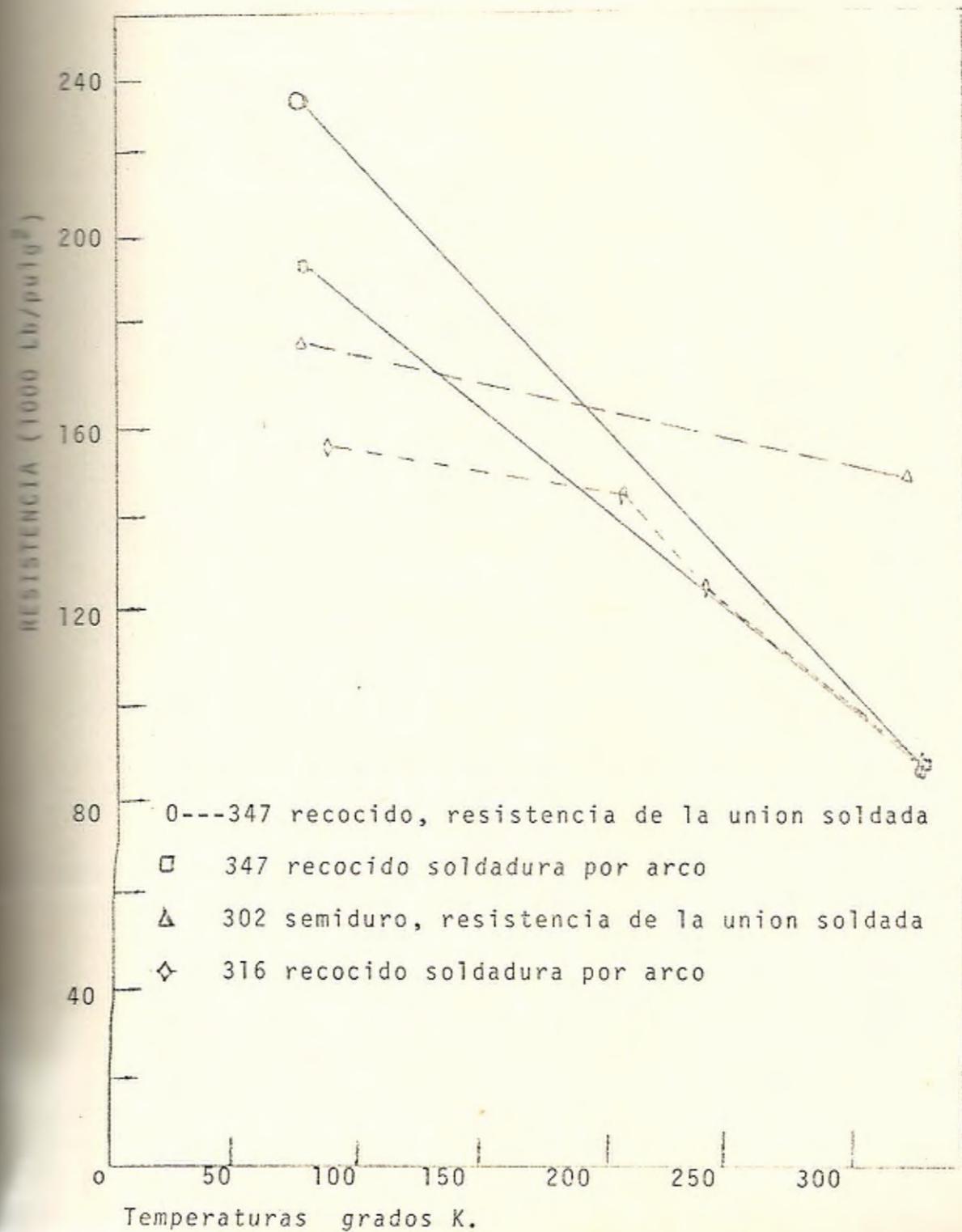
Estos factores hacen que para soldar los aceros -- inoxidables se necesita menos calor y, en los procedimientos de soldadura por resistencia, a igualdad en tiempos de soldadura, menor intensidad de - corriente para soldarlos.

Ciertos tipos, los 25%Cr, 20%Ni, por ejemplo tienen tendencia a la fisuración en caliente en las proximidades de la línea de sólidos lo que hay que tener - lo en cuenta, sobre todo, en el caso de soldadura - con varias pasadas. (4)

Las propiedades de impacto de los metales, son de considerable interés para aquellos equipos que tra-- bajan a temperaturas bajo cero grado. La alta re -- sistencia al impacto y a la fractura por corte de - los aceros inoxidables austeníticos hacen a éstos - esencialmente útil en esta área.

Muchas experiencias concuerdan en manifestar que la resistencia al impacto del acero inoxidable general-

Fig. 1 Curvas indicando la resistencia tensil de ciertos aceros inoxidable soldados a diferentes temperaturas.(10)



mente aumenta como la temperatura disminuye. (Fig #1)

La tabla 2.6 contiene datos sobre impacto para cordones de soldadura para varios grados de electrodos revestidos de acero inoxidable austenítico. En la condición de soldado, al cordón de soldadura contiene usualmente cierta ferrita delta. Si se le dá al metal soldado un tratamiento de alivio de tensiones o estabilización por tratamiento térmico en el rango de los 650 a 920°C, la ferrita delta se puede transformar a la fase sigma. Esta fase usualmente baja la ductilidad y la tenacidad del metal soldado. La tabla # 8 resume datos de impacto en donde se muestra, para el metal soldado tipo 316, dos niveles de ferrita delta que ilustra este efecto.

Datos similares no publicados indican que bajo todas las condiciones de tratamiento térmicos, la mejor resistencia al impacto que puede ser obtenida con aceros inoxidables al 18Cr - 8Ni y 0,03% contenido máximo de carbono (tipo 304L). (10)

TABLA #8 DATOS DE IMPACTO DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS SOLDADOS
A DIFERENTES TEMPERATURAS

Tipo de Material	Tipo de Electrodo	Tratam. Calor ¹	Porctj. Ferrita ² %	Ambiente Kg./ J	-105°F Kg./ J	-320°F Kg./ J
304	308	Soldado	...	31,7	22,8	18,8
		Recocido	...	36,5	29,8	30,3
310	310	Soldado	...	36,0	29,7	23,8
		Recocido	...	31,8	28,0	19,0
316	316	Soldado	0,5*	31,0	26,3	18,0
		Estabiliz.	...	28,3	21,5	12,8
		Recocido	...	33,8	28,8	22,0
316	316	Soldado	8,0*	31,5	28,3	18,5
		Estabiliz.	...	11,6	7,3	2,8
		Recocido	...	36,2	32,7	25,5
317	317	Soldado	2,0	21,5	16,5	10,7
		Recocido	...	20,8	16,3	14,3
321	347	Soldado	3,5	32,0	25,8	20,5
		Recocido	...	30,5	32,0	24,2
347	347	Soldado	3,5	30,0	25,0	19,0
		Estabiliz.	...	20,5	16,5	13,7
		Recocido	...	25,8	24,0	24,0

1 El tratamiento de calor fué como sigue:
En condición de Soldado
Alivio de tensiones a 1200°F, 2 horas
Estabilizado a 1550°F, 2 horas
Recocido a 1950°F, 1/2 hora templado en agua.

2 La ferrita se la determinó usando un medidor de magnetismo ferrítico.

2.3.- EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS DE LA ALEACION

Podemos comenzar diciendo que se llaman aceros aleados todos aquellos cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente al carbono.

Los elementos de aleación se añaden a los aceros - para muchos propósitos, en nuestro estudio las más importantes serían mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas, aumentar la resistencia a la corrosión, a la oxidación, aumentar la resistencia al desgaste. En los aceros inoxidables austeníticos, el cromo es el que tiene mayor influencia en la propiedad fundamental, que es la resistencia a la corrosión y oxidación.

La adición de níquel, un fuerte elemento austenizante da a la aleación de hierro - carbono - cromo - (estructura ferrítica magnética) promueve un cambio de estructura hacia la austenítica a toda temperatura austenita, incrementa la resistencia a las altas temperaturas y la resistencia a la corrosión - en estas aleaciones. (10)

El manganeso es otro elemento de los que se los conoce como estabilizadores, junto al níquel aumenta -

la acción estabilizante de la austenita. En cambio el molibdeno promueve la formación de ferrita delta en la estructura, siendo además, un fuerte formador de carburo, lo mismo que el columbio y titanio. (10)

El silicio es un elemento particularmente importante en las aleaciones trabajadas en frío, grados 310 y 314, y en las aleaciones fundidas HK? HT? y HU.

A medida que el contenido de silicio se incrementa, mejoran la resistencia de estas aleaciones a la oxidación a altas temperaturas, y a la carburización.

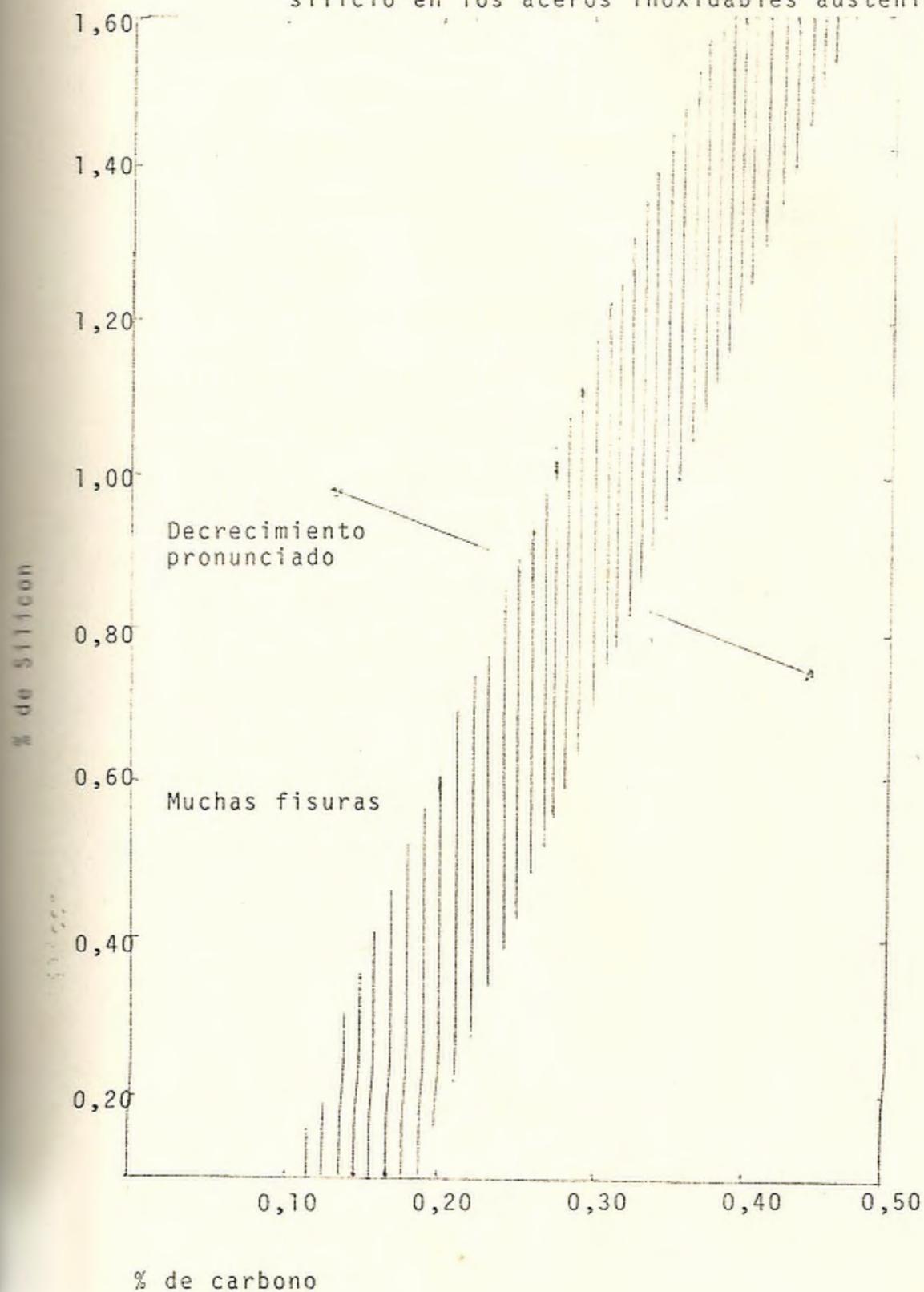
El alto contenido de silicio también mejora la fluidez del metal líquido y por lo tanto mejoran las propiedades de fundición. La relación de mezcla carbón-silicio en la soldadura del metal dá aleaciones completamente austeníticas tales como los de tipo 310, 314 y las aleaciones fundidas HK? HT y NU.

La figura 2.2 muestra que la más alta ductilidad en la soldadura puede ser obtenida cuando la relación carbón - silico es aproximadamente de 1 a 2.

(10)

En los aceros inoxidable los elementos aleantes tienen influencias en sus propiedades físicas y mecánicas, además de la química.

Fig. #2 Relacion de contenido entre el carbono y el silicio en los aceros inoxidables austeniticos (10)



El níquel y el manganeso lo hacen no endurecibles por tratamiento térmico, se los puede trabajar fácilmente en caliente o en frío, teniendo cuidado de que se endurezcan por trabajo en forma rápida.

Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinarse exceptuando los tipos 303 y 303Se que contienen azufre y selenio respectivamente.

Bajando el contenido de carbono en ciertas aleaciones austeníticas como son los tipos 304 y 304L mejoran su soldabilidad y su tendencia a la precipitación de carburos, aunque en otros tipos como el 321 y 347 se mejoran su soldabilidad y precipitación de carburos porque tienen como elementos aleantes al titanio el tipo 321 y columbio y tantalio el tipo 347.

2.4.- MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES

AUSTENITICOS

La microestructura de los aceros inoxidable es generalmente afectada cuando se los trabaja en frío o caliente, se los trata térmicamente, se los expone a elevadas temperaturas y a medios contaminantes o corrosivos.

La sensibilidad de la microestructura a estas variables es un valioso indicador para el control de calidad en los procedimientos y para determinar la causa de las fallas en servicio. (6)

El ataque intergranular de los aceros inoxidable es generalmente atribuido al empobrecimiento o disolución del cromo dentro de los bordes de grano.

El ataque intergranular está directamente relacionado a la precipitación de los carburos de cromo durante la sensibilización por influencia térmica.

Cuando los aceros inoxidable 18Cr - 8Ni no modificados son calentados en el rango de los 400 a 800°C o enfriados lentamente a través de este rango, los carburos ricos en cromo, los cuales son relativamente insolubles en estos rangos, se precipitan.

El grado de sensibilización está directamente rela-

cionando a la temperatura y duración de la exposición.

La precipitación resulta del empobrecimiento del cromo en la región de los bordes del grano. Los efectos de este empobrecimiento dá como resultado que los bordes del grano estén compuestos ahora en forma diferente al resto del grano. Valores altos de corrosión resultan de la interacción de los diferentes factores dados a continuación: 1.- pobre resistencia a la corrosión, de la aleación de bajo cromo formada, 2.- posibles efectos galvánicos entre los bordes del grano y el interior, y 3.- una no favorable relación cátodo-ánodo. (1)

En la fotomicrografía No.1 podemos apreciar la estructura del acero inoxidable austenítico 304, objeto de este estudio, sin ningún tipo de tratamiento.

Las composiciones completamente austeníticas trabajadas en frío, mostrarán a menudo la presencia de pequeñas islas de ferrita delta en la matriz austenítica en la forma fundida fig, 4. ó de metal soldado, fig. 5.

La presencia ó ausencia de ferrita delta en la estructura del metal soldado, dependerá principalmen-



FOTO 1

FOTOGRAFIA DE LA ESTRUCTURA DE ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO TIPO 304, SIN NINGUN TIPO DE TRATAMIENTO. MUESTRA SU ESTRUCTURA AUSTENITICA

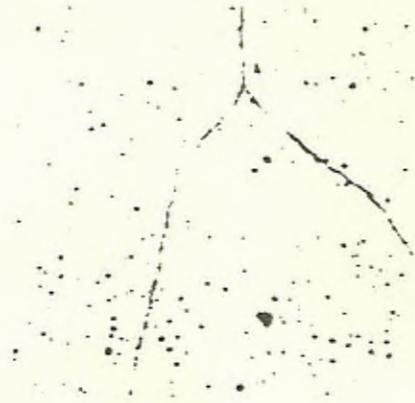


FIGURA # 4 MICROESTRUCTURA DE UNION SOLDADA CON ELECTRODO E 310; MUESTRA ESTRUCTURA AUSTENITA SIMPLE 500x.

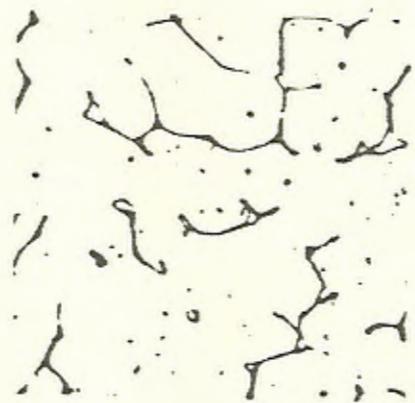


FIGURA # 5 MICROESTRUCTURA DE UNION SOLDADA CON ELECTRODO E 308, MUESTRA DOBE ESTRUCTURA? UNA DE MATRIX AUSTENITICA Y OTRA DE DELTA FERRITA.

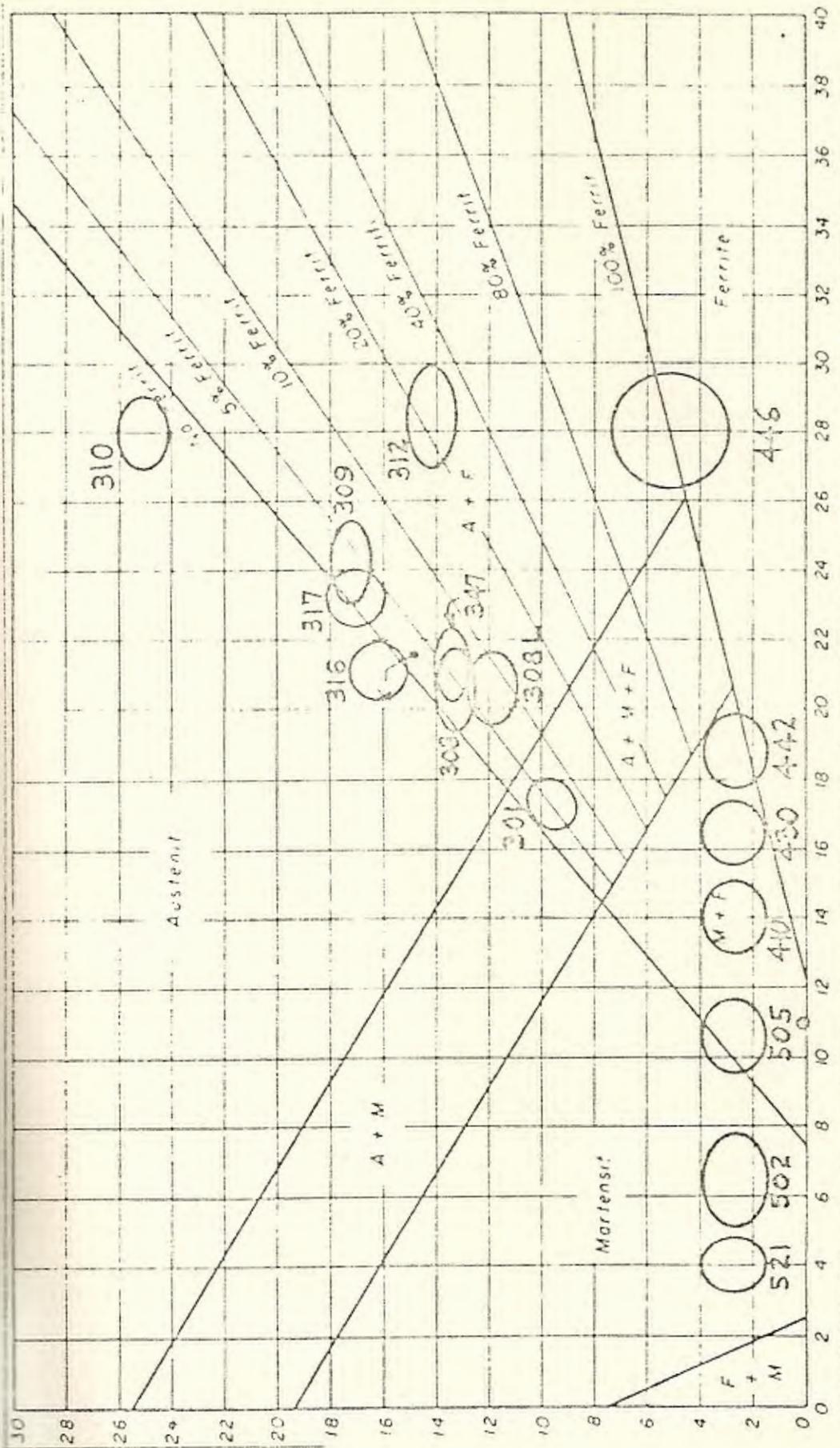
te de su composición, puesto que muchos de los aceros inoxidables resistentes a la corrosión tienen distribución de fase en los bordes del grano, un solo tipo de metal soldado puede ser completamente austenítico o parcialmente ferrítico, dependiendo del balance de su composición.

La constitución de depósitos de metal soldado es indicada en fig. #3 ó diagrama de Schaeffler.

Depósitos de soldadura completamente austeníticos son ocasionalmente susceptibles a rajaduras por el calor. La presencia de ferrita en muchos casos, sin embargo, reduce esta tendencia.

Muchos fabricantes diseñan electrodos de acero inoxidable austenítico de tal manera que al soldarse depositen una pequeña cantidad de ferrita para reducir la susceptibilidad hacia la rajadura por calor. Por lo tanto, el metal soldado para muchos de las clasificaciones de grados austeníticos pueden contener ferrita, aunque el mismo grado de metal base no contenga ferrita.

Dado que la ferrita es magnética, su presencia en un material austenítico puede ser detectada por un imán.



Equivalente cromo = % Cr + %Mo + 1,5 x % Si + 0,5 x % Cb

Equivalente níquel = % Ni + 30 x %C + 0,5 x Mn

FIG. #3 Diagrama de SCHAEFFLER para aceros inoxidable soldados (10)

Los tratamientos térmicos después de soldados pueden bajar o aún eliminar la ferrita en el cordón-soldado. Debido a la presencia de austenita, ferrita y carburos en aceros inoxidable austeníticos, una composición intermetálica de cromo y hierro llamada fase sigma, es ocasionalmente encontrada.

Esta fase es usualmente desde la ferrita manteniendo al acero por un largo tiempo a rangos de temperatura de 650 - 920°C, dependiendo del contenido de la aleación. Esta fase puede desarrollarse también en aleaciones inicialmente austeníticas.

Ninguna fase sigma ha sido observada en las composiciones tales como 18Cr - 8Ni, tipos 30 aún cuando la ferrita ha estado presente. La fase sigma ha sido encontrada en aleaciones altas en titanio, columbio, molibdeno, silicio ó cromo. Pequeñas cantidades de fase sigma han sido encontradas en los tipos 308L del metal soldado después de que ha sido expuesto por un período largo de tiempo a 650°C.

La fase sigma puede causar pérdida de la resistencia a la corrosión, pero generalmente se manifiesta como una pérdida de ductilidad y resistencia al im-

pacto. Aunque prolongadas altas temperaturas son requeridas para formar esta fase, evidencias de fase sigma han sido encontradas ocasionalmente en el metal soldado, cuando se lo ha sometido al proceso de soldadura.

Desde el aparecimiento de la fase sigma es usualmente considerada peligrosa, calentar la aleación por encima de la máxima temperatura de estabilización, dá fase sigma disuelta.

Por tratamientos térmicos las propiedades originales pueden ser completamente restablecidas. La alta ductilidad puede ser restablecida a los aceros fragilizados por la preencia de la fase sigma, calentando por un corto período de tiempo alrededor de 10 minutos a 1030°C.

La conversión de fase sigma a fase austenita, sin embargo, generalmente requiere calentarla a temperaturas tan altas como 1220°C. Si temperaturas tan altas son requeridas, el crecimiento del grano y alteración de las propiedades asociadas a éste pueden ser anticipadas en un caso en particular, sin embargo, se puede tomar ventaja de la dureza de la fase sigma. Al 25Cv - 5Ni - 3Mo (tipo no standard 329) puede ser tratado térmicamente para que desarrolle una fase sigma.

ESTUDIO DE LA CORROSION

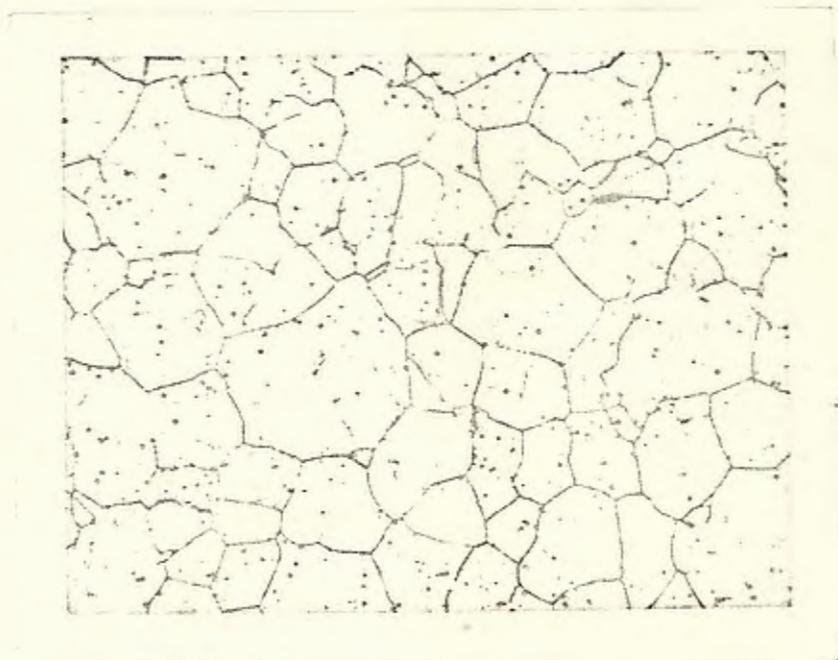
Ahora entraremos al estudio de la corrosión intergranular de los aceros inoxidable austeníticos. Los efectos en los bordes del grano son de pequeña ó ninguna consecuencia en la mayoría de usos ó aplicaciones de estos metales. Si un metal se corroe, un ataque uniforme resulta debido a que los bordes del grano son usualmente apenas más reactivo que la matriz. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, interfases del grano son muy reactivos y dá como resultado una corrosión intergranular. Ataques localizados en y adyacentes a los bordes con relativa poca corrosión de los granos, se los denomina corrosión intergranular. La aleación se desintegra (caída de granos) y ó pierde la resistencia.

La corrosión intergranular puede ser producida: por impurezas en los bordes del grano; empobrecimiento de uno de los elementos aleantes de los bordes del grano. El empobrecimiento del cromo en la región de los bordes del grano dá como resultado una corrosión intergranular de los aceros inoxidable.

Numerosas fallas de los aceros inoxidable 18Cr-8Ni han ocurrido debido a la corrosión intergranular, esto pasa en medios o ambientes donde la aleación

debió haber exhibido una excelente resistencia a la corrosión. Cuando estos aceros son calentados aproximadamente a las temperaturas entre 450°C - 800°C estos pasan a ser sensibilizados ó susceptibles a la corrosión intergranular. Por ejemplo un procedimiento para sensibilizar intencionalmente es calentarlo a 600°C por una hora. La casi universalmente aceptada teoría para la corrosión intergranular es basada en el empobrecimiento ó caída del cromo en las áreas del borde del grano. Microfoto 2

FOTOGRAFIA # 2 Probeta calentada a 600°C por una hora. Muestra precipitación de carburo en los bordes del grano.



El añadir cromo a los aceros ordinarios imparte a éstos resistencia a la corrosión en diferentes y variadas clases de medios. Generalmente más de un 10% del cromo se necesita para hacer un acero inoxidable.

En los rangos de temperaturas indicados, el carburo de cromo (Cr_{23}C_6) es virtualmente insoluble y se precipita fuera de la solución sólida si el contenido del carbón es un 0,02% ó mayor. El cromo es por lo tanto removido de la solución sólida, y el restante es un metal con bajo contenido de cromo en el área adyacente a los bordes del grano.

Los carburos de cromo en los bordes del grano no son atacados. La zona empobrecida del cromo cerca de los bordes del grano es corroída porque ésta no contiene suficiente resistencia a la corrosión para resistir ataques en diferentes medios corrosivos. El acero inoxidable 18Cr - 8Ni tipo 304, objeto de este estudio usualmente contiene 0,06 a 0,08% de carbono, así que el exceso de carbono es disponible para combinarse con el cromo para precipitar los carburos.

Esta situación es mostrada esquemáticamente en fig. #6.

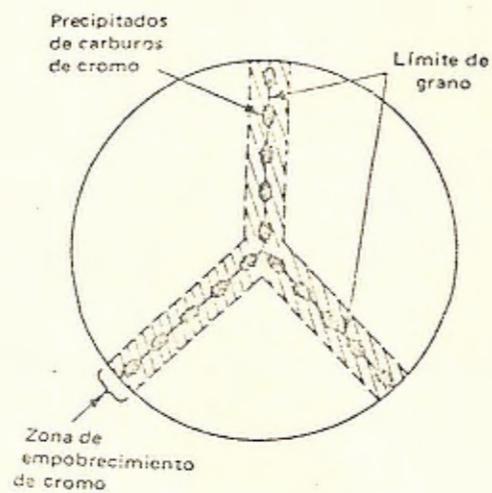


Fig. 6.- REPRESENTACION DE UN LIMITE DE GRANO EN UN ACERO INOXIDABLE TIPO 304 AL SER SENSITIZADO (Ref. 2)

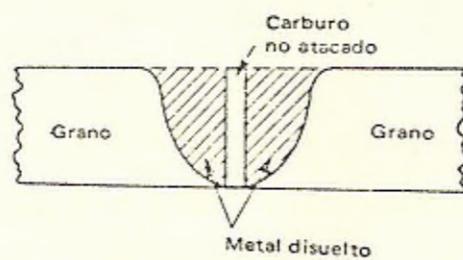


Fig. 7.- SECCION TRANSVERSAL DEL AREA MOSTRADA EN LA Fig. 6. (Ref. 2)

El carbón viaja hacia los bordes del grano fácilmente a temperatura de sensibilizado, pero el cromo es mucho menos movible.

La superficie ya lista en los bordes del grano - facilita la formación de nuevas superficies como la de carburo de cromo. Hay algunas evidencias que indican que el contenido del cromo en los bordes - puede ser reducido a un nivel muy bajo ó cero. Asumamos que el contenido del cromo es reducido a un 2%, la resistencia a la corrosión es minimizada, - dos metales de composición diferente estan en con--tacto, y una gran área desfavorable está presente. - El área empobrecida protege al grano. El efecto - neto es un rápido ataque en el área empobrecida, - con pequeño ó ningún ataque en los granos. Si la - aleación fuera cortada transversalmente y la sección en los bordes del grano fuera observada, ésta se - vería como la fig. #6. El área corroída aparecerá - como un angosto y profundo canal cuando se lo obser-ve a baja amplificación.

La precipitación de carburo de cromo ha sido descri- ta por muchos años como partículas, debido a que - ellas son muy pequeñas para examinárselas detenida-- mente con el microscopio de luz. Mahla y Nielsen - de Dupont Fontana usando el microscopio de electrón

han encontrado que los carburos se forman como una película ó capa, alrededor de los granos en una estructura foliforme.

Na fig. #8 que es parte de este trabajo, (Mahla y Nielsen) muestra el residuo después que las porciones metálicas de la aleación fueron disueltas en un fuerte ácido hidroclicórico.

Esto enfatiza el punto indicado en la fig #7 que los carburos por sí mismos no son atacados, el empocimiento del cromo del metal adyacente, es disuelto. En efecto, este ácido corroe rápidamente todas las aleaciones tipo 18Cr - 8Ni independientemente del tratamiento térmico.

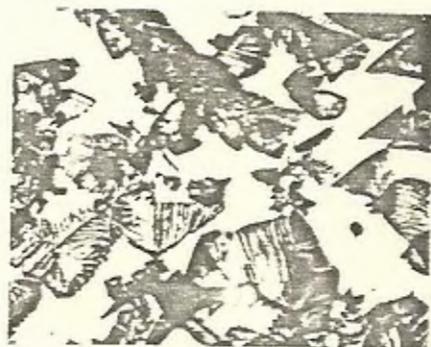


FIG. 8 Microfotografía de carburos aislados, tomada de una probeta de acero inoxidable tipo 304 sensitizado (2)

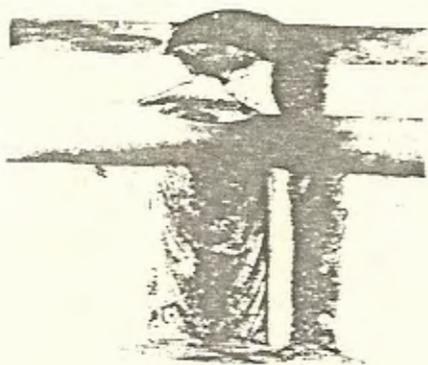


FIG. 9 Corrosion intergranular en la zona de decaimiento de la soldadura, acero inoxidable tipo 304. (2)

Muchas de las fallas en los aceros inoxidable al -
18Cr - 8Ni ocurrieron en los principios del descu -
brimiento de este material, hasta que los mecanismos
de corrosión intergranular fueron entendidos.

Fallas todavía ocurren cuando este efecto no es con
siderado. Estos son asociados con las estructuras
soldadas y el material atacado intergranularmente -
es llamado decaimiento de la soldabilidad. La zona
del decaimiento de la soldadura usualmente es una -
banda en el metal base, a un costado de la soldadura.
Esta zona es mostrada en fig. #9 a la derecha de la
soldadura. La apariencia azucarada es debido a peque
ñas protuberancias en los granos que están por caerse.

Esta probeta (muestra) fué expuesta a una solución -
de ácido nítrico hirviendo después de soldada. -
(La ausencia de decaimiento de la soldadura, a la iz-
quierda de la soldadura es explicada más adelante).

El metal en la zona de decaimiento de la soldadura -
debió haberse calentado en el rango de sensibilidad.
En la fig. #5 se la compara con un mantel de flujo
de calor y temperaturas asociadas con la soldadura.
Visualicemos un bloque semejante al pico de una mon-
taña que está siendo movida sobre una mesa debajo -
de un mantel elástico a rayas.

Este bloque en movimiento representa la soldadura - que se está haciendo a lo largo del material base. La subida y bajada de cada línea representa la subida y bajada de la temperatura en el metal (material) soldado. La línea oscura en el centro, en la fig. #10 es el centro de la soldadura, que es la más caliente (arriba de la temperatura de fusión) Las líneas con la x representan temperaturas en la zona de sensibilización. Estas líneas con x corresponden a la zona de decaimiento de la soldadura en la fig. #10

La figura #11 muestra en diferentes formas, esencialmente la misma figura.

Termocuplas fueron uestas en los puntos A, B, C, y D y temperaturas y tiempos fueron registrados durante la soldadura. El metal en los puntos B y C (y entre estos puntos) está en el rango de temperaturas de sensibilización por algún tiempo.

La relación entre el tiempo y la temperatura varía con el espesor ó grosor del material soldado, el tiempo en hacer la soldadura, y, el tipo de soldadura. Por ejemplo, láminas gruesas pueden necesitar varias pasadas.

Para láminas u hojas de 3,5 mm de espesor ó menor,-

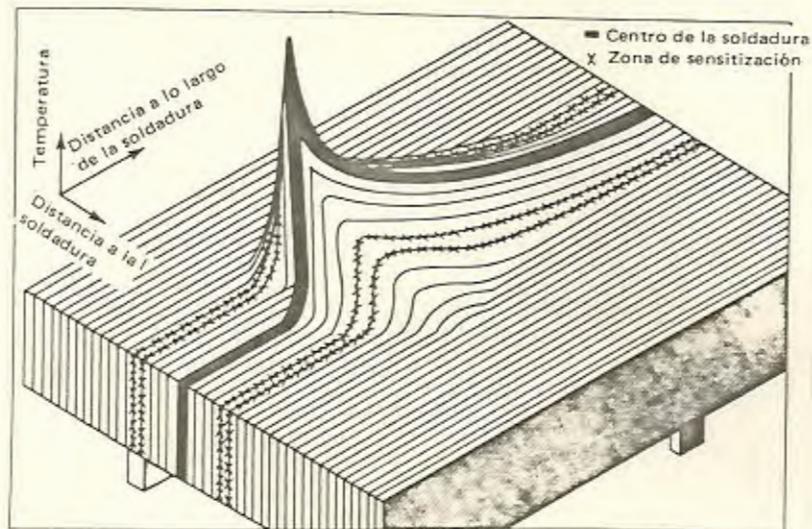


Fig. 10.- Esquema de las zonas del cordón soldado y de la sensitización en las coordenadas temperatura - distancia normal - distancia longitudinal.

(2)

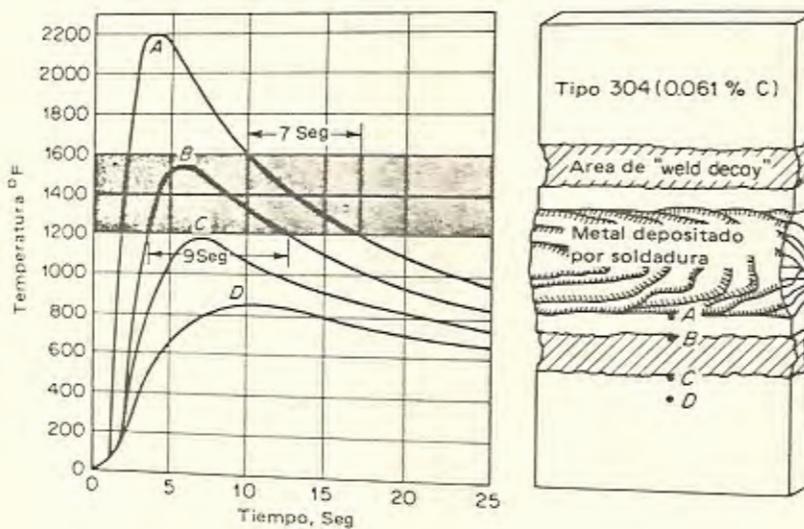


Fig. 11.- Temperaturas durante la soldadura con arco eléctrico del acero AISI 304 (2)

el tiempo en el rango de sensibilizao es lo suficientemente corto como para no causar corrosión intergranular en medios particularmente no selectivos ó agresivos a los aceros inoxidable. Soldaduras transversales doblarán el tiempo en este rango y una apreciable precipitación de carburos puede ocurrir.

Efectos de tiempo y temperatura no proveen de una razón, porque la soldadura por arco eléctrico es más usado que la de gas en aceros inoxidable.

La primera produce calor más alto y más intenso en tiempos más cortos. La segunda mantendrá una zona más ancha del metal en el rango de sensibilización por un tiempo mayor, lo cuál significa una mayor precipitación de carburos. Debe hacerse énfasis en decir que los aceros inoxidable sensibilizados, no fallarán en todos los medios corrosivos, porque éstos son usualmente usados donde la completa resistencia a la corrosión de la aleación no es requerida ó donde la corrosión selectiva no es problema. Ejemplos es éstos, son equipos para comida, adornos de automóviles, fachadas de edificios, lavaderos de cocina.

Sin embargo, es deseable tener a todos los metales en sus mejores condiciones de resistencia a la co--

rrosión, para su aplicación a la corrosión más severa.

Tres métodos son usados para controlar ó minimizar la corrosión de los aceros inoxidable austeníticos.

- 1) Empleando soluciones a altas temperaturas con tratamiento térmico, comunmente llamado templado-recocido, ó templado del material.
- 2) Añadiendo elementos que son fuertes formadores de carburo (llamados estabilizadores) y,
- 3) Bajando el contenido del carbón por debajo 0,03%.

Tratamiento comercial de templado de las soluciones, consiste en calentarla entre 1060 - 1120°C seguido por un templado en agua. El carburo de cromo es disuelto a estas temperaturas, y una aleación más homogénea es obtenida. La mayoría de los aceros inoxidable austeníticos son obtenidos comercialmente en estas condiciones, la mayoría de los aceros inoxidable austeníticos son vendidos en esta forma. Si la soldadura es usada durante la fabricación, los elementos soldados deberán ser templado-recocido para eliminar la susceptibilidad al decaimiento de la soldadura. Esto resulta un costoso problema para equipos grandes y, de hecho, no hay hornos dis-

ponibles para tratamientos térmicos para unidades -
muy grandes. Además soldar es a veces necesario -
hacerlo en las instalaciones industriales de los -
clientes para hacer reparaciones.

El templeado o enfriamiento rápido desde la tempera -
tura de la solución es muy importante. Si el en -
friamiento es despacio, la estructura será suscep -
tible a corrosión intergranular. Los mejores for -
madores de carburos ó elementos estabilizadores, -
tales como el columbio + tantalum y titanio, son -
usados para producir los tipos 347 y 321 de acero -
inoxidable respectivamente. Estos elementos tienen
una mayor afinidad con el carbón, que con el cromo -
y son añadidos en cantidad suficiente para combinar -
se con todo el carbón que hay en el acero.

La fotografía en la fig. #4 nos muestra el decaimien -
to de la soldadura, porque es tipo 321. La misma -
fig. puede ser obtenida para tipo 347.

Disminuyendo el carbón por debajo del 0,03% (tipo -
304F), no permite la formación de suficiente carburo
para causar un ataque intergranular en la mayoría -
de las aplicaciones. Los primeros aceros 18Cr-8Ni -
contenían alrededor de 0,20% de carbono, pero este -
fué rápidamente reducido a 0,08% por las rápidas y -

serias fallas que provocaba el decaimiento de la soldadura. Reducir el contenido de carbón muy por debajo del 0,08% no fué posible hasta que fué descubierto que se podía soplar oxígeno a través del metal fundido para quemar el carbón ya hasta que el ferro-cromo de bajo contenido de carbón fué desarrollado.

Los aceros inoxidableables tienen una alta solubilidad por el carbono cuando están en el estado γ y por lo tanto son muy propensos a recoger carbón.

Unos pocos carburos aislados que pueden aparecer en el tipo 304L no son destructivos para muchas aplicaciones en las cuales una continua red de carburos podría ser catastrófico. De hecho, la susceptibilidad a la corrosión intergranular de los aceros inoxidableables muy severo en frío, produce granos pequeños y muchas líneas resbalosas, lo cuál nos dá una superficie más larga para precipitación de carburo. Esto no es sin embargo, un procedimiento práctico ó recomendable.

2.2.- ESTUDIO DEL METAL DE APORTE

2.2.1. EL ARCO ELECTRICO COMO FUENTE DE CALOR

A los aceros inoxidable austeníticos se los puede soldar con gran variedad de procesos tales como - los procesos de soldadura por presión, por percusión por chispeo, por resaltes, a tope, por resistencia, por haz de electrones, por rayos laser, por soldadura al arco. Fig.12

Los procesos más comunmente usados en la soldadura por arco son por electrodo revestido, electrodo de tungsteno en atmósfera de gas inerte (TIG), en atmósfera de gas inerte con electrodo fusible MIG) y arco sumergido (SAW); siendo los tres procesos primeramente enunciados los que serán objeto de este estudio, en el cual trataremos de analizar las ventajas y desventajas de los unos con los otros para la soldabilidad de los aceros inoxidable tipo AISI 304 tratando de analizar sus influencias en los cordones de soldadura ya que sabemos, el proceso de soldadura produce precipitación de carburos cromo en los bordes del grano haciéndolos susceptibles a la corrosión intergranular, lo que es muy importante debido a que estamos hablando de usar -

Elementos a unir	Procedimientos	Condiciones de ejecución			Resultados	
		Auto-mática	Reliazable en astillero	Sold. normal	Sin fin necesario	A ^o to rendimiento
Chapas muy delgadas (0,5 mm)	TIG	+		+	+	
	Arco concentr.	+		+	+	
	Soplete		+	+		
	Haz de electr.			+	+	+
	Resistenc./Roldan	+		+	+	+
	Resistenc./Punts.	+	(+)		+	
Chapas delgadas (0,5 a 3 mm)	TIG	+		+	+	+
	Arco concentrado	+		+	+	+
	Arco sumergido	+		+		+
	Electrodos revest.		+	+		
	MIG con arco puls.	+		+		
	Soplete		+	+		
	Haz de electrones			+	+	
	Resistencia/Rolda.	+		+	+	+
	Resistencia/Punts	+	(+)		+	+
	Resistencia/reslts	+			+	+
Chapas medias (3 a 7 mm)	MIG MIG con arco pulsado	+	+	+		+
	Electrodo revestd.		+	+		
	Arco sumergido	+		+		+
	Arco concentrdo	+		+	+	+
	Hax de electrones			+	+	

estos procesos en la manufactura de recipientes ó reservorios que contendrán productos alimenticios-
tales como la leche, que podría traer como conse-
cuencia una contaminación del producto.

en la soldadura por arco, éste nos dá la cantidad -
de calor necesaria para fundir el metal base con -
ó sin la aplicación de presión y con ó sin el uso -
del metal de aporte. En todos los casos el arco -
es mantenido entre un electrodo y el metal base, -
ó, entre dos electrodos, los cuales forman los ter-
minales de un circuito eléctrico. Fig.13 El uso -
de corriente directa y corriente alterna puede de-
pender del proceso que vayamos a *utilizar, del ma-*
terial de aporte a usarse, del tipo de protección, -
del metal base u otros factores.

El arco eléctrico, más que una fuente de calor, es
una mezcla compleja de partículas de gas ionizado
(plasma) acelerados a través de un campo eléctrico
forzado por su campo magnético, y ejerciendo un e-
fecto profundo en la transferencia del metal de a-
porte. Por lo tanto el comportamiento del arco de-
pende del metal de aporte, del metal base, tipo de
revestimiento, característica del circuito y otros
factores. (8)

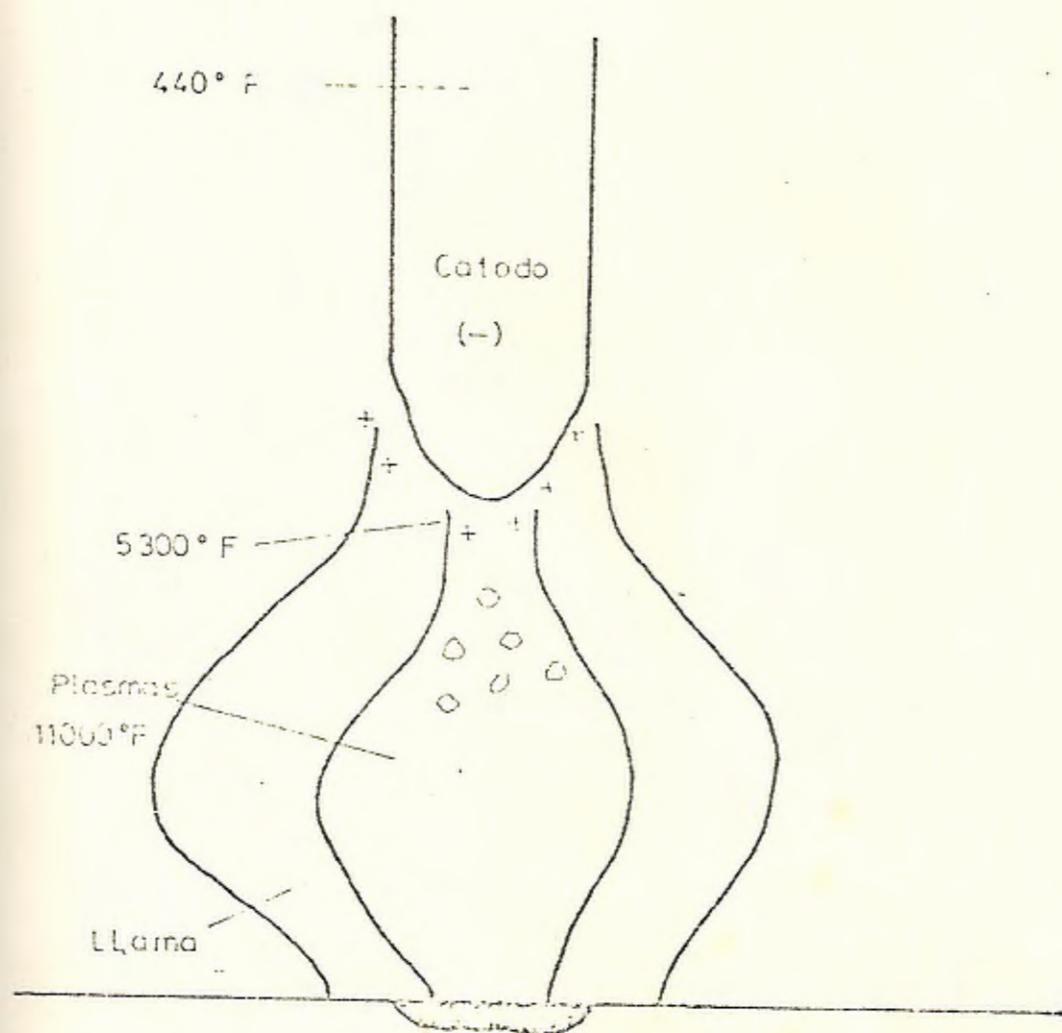


FIG. 13.- ARCO DE SOLDADURA ELECTRICO (14)

- * Electrones libres
- * Iones positivos
- * Atomos neutros excitados electricamente

En la soldadura por arco se pueden usar la corriente continua (DC) la cuál produce una mayor cantidad de calor en el terminal positivo (ánodo) que en el terminal negativo (cátodo); con la corriente alterna tenemos en cambio que la cantidad de calor es más o menos la misma en ambos terminales. La polaridad del electrodo afecta no solamente a la cantidad de calor suministrada, sino también a la penetración, a la fluidez, y a la transferencia del metal. Los revestimientos de fundentes y gases protectores a través de su acción en el arco retardan ó controlan estos efectos. En la soldadura por arco con corriente directa el término de polaridad directa significa que ésta está en el terminal negativo. El otro terminal en cada uno de estos casos se lo hace tierra a través del material en el que se va a hacer la soldadura. (8)

Hay una relación directa entre el largo del arco y el voltaje del arco, mientras más largo es el arco el voltaje será más alto. El arco puede alcanzar una temperatura de hasta 6000°C aunque regularmente es menor que ésta. La intensidad del calor funde el metal base en una área pequeña y también funde al metal de aporte del electrodo cuando es usado.

El arco puede ser con protección ó sin ella. (5)

El metal base es protegido de los óxidos ambientales por el fundente, la escoria ó el gas inerte. La protección debe ser tan buena para que éste retenga las características esenciales de la aleación, excluyendo ó separando a toda partícula extraña que pueda afectar la resistencia a la corrosión ó a la calidad de la unión soldada. También se conoce que el carbón disminuye rápidamente la resistencia a la corrosión, lo cual afecta a las propiedades físicas de los aceros inoxidable, por lo tanto la presencia de un elemento inhibidor de la atmósfera circundante deberá controlársela. (10)

El contenido de humedad en el revestimiento del electrodo y en los fundentes del proceso por arco sumergido, deberá ser mantenido a los niveles más bajos posibles, y en los gases inertes deberán tener un punto bajo de rocío, ya que la humedad causa porosidades en el metal soldado. (10)

La mayoría de los procesos por arco pueden ser automáticos, semiautomáticos ó manuales. En los procesos de soldadura automáticos, el electrodo que es el que suministra el metal de aporte es introducido automáticamente en el arco eléctrico para compensar el metal que ya ha sido usado, lo que permi-

te mantener un correcto largo de arco. El electrodo es sostenido mecánicamente y un portaelectrodo mecanizado ayuda a desplazar automáticamente a lo largo de la unión, ya sea por movimiento mecánico de la pieza a soldarse ó por movimiento del portaelectrodo a lo largo de la unión. En el proceso semiautomático de soldadura, el electrodo es alimentado automáticamente pero el portaelectrodo ó pistola es sostenida manualmente y se la mueve de esta manera a lo largo de la unión. En el proceso de soldadura manual el electrodo es fijado en una posición en el portaelectrodo por la persona que va a efectuar el proceso, que guía a éste a lo largo de la unión tratando de mantener un arco correcto. (5)

2.2.2 TIPOS DE ELECTODOS Y REQUERIMIENTOS QUE DEBEN

CUMPLIR

Como se ha indicado anteriormente, la soldadura por arco ha llegado a ser el proceso más comunmente usado alrededor del planeta. Esto se debe esencialmente a que se han podido encontrar métodos para producir electrodos con revestimientos fundentes capaces de producir uniones soldadas que tengan propiedades físicas iguales ó superiores a las del metal base.

Las funciones primordiales del revestimiento son:

- a) Facilitar y mantener el arco,
- b) Proteger al metal fundido del aire,
- c) Proveer de fundente al metal fundido, especialmente si es un metal no ferroso,
- e) Es una forma de introducir elementos aleantes que no estén contenidos en el alambre de aporte. (8)

El material de revestimiento se quema en el arco, éste produce una atmósfera de gas inerte que protege tanto la parte que se está fundiendo del electrodo así como la del metal base.

Esta atmósfera la protege de gases tales como el -

hidrógeno y el oxígeno que son dañinos a la unión soldada, mientras los residuos del revestimiento - que se está quemando, forma una capa de escoria - protege al cordón depositado. Esta escoria también sirve para excluir el oxígeno y el nitrógeno de la unión soldada hasta que ésta se haya enfriado hasta un punto tal que el oxígeno y nitrógeno ya no se - puedan formar. Además, la escoria reduce el enfriamiento produciendo por lo tanto una soldadura más - dúctil.

Otro de los beneficios que son obtenidos por revestimiento de electrodo son la apariencia de la soldadura mejorada (mejor apariencia de la soldadura) - fácil comienzo del proceso de soldeo, regula la profundidad de la penetración, mejora la calidad del soldado. La escoria que produce el revestimiento - no solamente protege el cordón depositado sino que - lo ayuda a tener una mejor apariencia.

El revestimiento sirve además como un aislante para el alambre del electrodo. Este afecta el largo del arco, el voltaje de soldadura y controla la posición de soldado en que el electrodo puede ser soldado.

Además de tener todas estas características correctamente balanceadas, el revestimiento deberá tener -

un punto de fusión más bajo que el del metal de aporte ó del metal base. La escoria resultante deberá tener una densidad más baja de tal manera que pueda ser ráidamente de desalojo del metal soldado-enfriado. Cuando los electrodos van a ser usados para soldadura sobre cabeza ó soldadura vertical, la escoria que se forma debido a la fundición de revestimiento deberá solidificarse rápidamente.

2.2.3 SELECCION DE ELECTRODOS PARA DIFERENTES PROCESOS DE SOLDADURA

a) ELECTRODO REVESTIDO.- Este estudio está dedicado a analizar la soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos en general dentro de estos el tipo AISI 304 en particular, con tres sistemas básicos de soldadura por arco, ya enunciados anteriormente.

Hemos hablado ya del arco y cómo se produce, factores que influyen en éste, etc., después nos toca desarrollar acerca de los electrodos; sus revestimientos y la influencia que tienen éstos en los procesos por arco, ahora hablaremos de las características de los electrodos que se usan en los tres procesos que estamos estudiando y que son los de mayor empleo en la industrias que actualmente se dedican a trabajar con aceros inoxidables, por sus altos rendimientos, su versatilidad, fácil operación, buena deposición del cordón soldado, etc.

Al realizarse la soldadura por arco con electrodo revestido de aceros inoxidables usualmente se requiere que la composición de metal de aporte iguale la -

del metal base.

La Sociedad Americana de Soldadura y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, especifican 18 clases de electrodos para aceros inoxidable que pueden ser utilizados para soldar casi todos los tipos AISI básicos. Estas clasificaciones y sus composiciones nominales y mínimas propiedades mecánicas pueden ser encontrados en la tabla #9

En adición a los límites químicos publicados en el AWS y el ASTM, los fabricantes de electrodos producen otros de composición especiales ó con modificaciones.

La mayoría de estos electrodos especiales establecen un porcentaje de carbono más restringido (como el tipo E309) para mejorar la resistencia a la corrosión, ó porcentajes altos de carbono para mejorar las propiedades de fluencia bajo carga a altas temperaturas.

En los procesos de soldadura por arco con electrodos revestidos los aceros inoxidable, tienen una singular importancia la composición del revestimiento del electrodo, ya ue éste va a influir en sus características finales. Después de tener las condiciones de composición química del metal, deberá

Tabla #9 Clasificación de los electrodos revestidos para aceros inoxidables

Clasificación A W S	Fuerza Tensile Min PSI	Elongación ² 2" Min %	Carbono Max %	Cromo Max %	Níquel %	Molybdeno %	Otros %
E308	80.000	35	.08	18-21	9-11		
E308L	75.000	35	.04	18-21	9-11		
E309	80.000	30	.15	22-25	12-14		
E309Cb	80.000	30	.12	22-25	12-14		.7-1.0Cb
E309MO	80.000	30	.12	22-25	12-14	2-3	
E310	80.000	30	.20	25-28	20-22		
E310Cb	80.000	25	.12	25-28	20-22		7-1.0Cb
E310Mo	80.000	30	.12	25-28	20-22	2-3	
E312	95.000	22	.15	28-32	8-10		
E16-8-2	80.000	35	.10	15-16	8-9	1-2	
E316	75.000	30	.08	17-20	11-14	2-2.5	
E316L	70.000	30	.04	17-20	11-14	2-2.5	
E317	80.000	30	.08	18-21	12-14	3-4	
#318	80.000	25	.08	17-20	11-14	2-2.5	Cb=6xC 3-4Cu
E320	80.000	30	.07	19-21	32-36	2-3	Cb=8xC
E330	75.000	25	.25	14-17	33-37		
E347	80.000	30	.08	18-21	9-11		Cb=8xC

seleccionarse el electrodo que iguale y en ciertos casos supere esas características. En principio - se ha aceptado por la AWS que los tipos de electrodos revestidos para la soldadura de estos aceros son los denominados de bajo hidrógeno ó de tipo - básico de revestimiento. El tipo -15 es usualmente de base de caliza y su uso se limita a corriente - directa - polaridad reversa, (electrodo positivo).

El tipo -16 emplea titanio en su revestimiento y - puede ser utilizado para corriente directa (electrodo negativo) ó corriente alterna. Otras diferencias entre estos dos tipos de revestimiento incluye la gran penetración del tipo -15 y el excelente - acabado de superficie del tipo -16.

El escoger entre estos dos tipos de electrodos no - es muy crítico para muchas aplicaciones aunque el - tipo -15 es usualmente preferido para canales estrechos y tipo -16 para soldaduras sobrepuestas.

Algunos fabricantes de electrodos tienen en el mercado un electrodo con revestimiento de caliza - titanio que son clasificados como tipo -16 y que pueden ser utilizados con ambas corrientes, corriente - directa (electrodo positivo) y corriente alterna, - representando una alternativa entre los dos tipos -

b) ELECTRODOS PARA PROCESOS TIG.- En el proceso de soldadura por arco con electrodo de tungsteno en atmósfera de gas inerte que usa un electrodo no consumible protegido por un gas inerte, que es usualmente el argón ó una mezcla de argón y helio. En este proceso solo tenemos cinco tipos de electrodos disponibles, aceptados por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), los cuales los damos a continuación.

EWP	99,5% min tungsteno	
EWTh - 1	98,5%	tungsteno + 0,8a 0,2% torio
EWTh - 2	97,5%	tungsteno + 1,7a 2,2% torio
EWTh - 3	98,95%	tungsteno + 0,35 a 0,55 "
EWZr	99,2%	tungsteno + 0,15 a 0,40% zirconio

El electrodo EWP (tungsteno solamente) es preferido por algunos soldadores en este proceso, porque la punta del electrodo toma la forma de bola con el uso. En esta forma produce un arco ligero y su punta se la puede distinguir fácilmente.

Los electrodos de tungsteno y torio son usualmente esmerilada la punta en forma cónica. Este tipo de forma dura por un tiempo más largo durante el proceso, antes que se lo procedaa esmerilar de nuevo.

Los electrodos de tungsteno - zirconio son usualmente preferidos cuando se usa en el proceso corriente alterna porque éste facilita ó dá una mejor iniciación del cordón y una mejor estabilidad.

La selección del amperaje correcto y de la composición del gas controlará la penetración de la soldadura. El uso de corriente directa - polaridad reversa es limitada, debido a que el tungsteno se recalienta y su penetración sería muy superficial. - Mejor y más profunda penetración es obtenida con corriente directa - polaridad directa. La corriente alterna produce penetraciones más superficiales que la corriente directa - polaridad directa, reduce la incandescencia del arco, y es muy a menudo preferida para el proceso de soldadura manual y para soldar materiales de fino espesor donde la penetración es adecuada. (10)

El metal de aportación podrá presentarse en forma de varilla o alambre. Pueden utilizarse también recortes del metal base, lo mejor calibrados y bien limpios, pero esto sólo se justifica realmente cuando el metal base de tipo poco corriente, y, siempre que sea posible, deberá utilizarse el alambre o la varilla. (7)

c) ELECTRODOS PARA PROCESO MIG.- En la soldadura en atmósfera de gas inerte con electrodo fusible - que es otro de los sistemas de soldadura por arco, el material de aporte o electrodo están constituidos de diferente manera, debido esencialmente a sus características de alimentación y trabajo.

Los electrodos en este sistema no usan fundente o escoria, por lo que el electrodo deberá contener todos los elementos que se requiera en la unión soldada. Con la protección de un gas inerte como el argón, la pérdida de los elementos aleantes entre el electrodo y el depósito de la soldadura es muy pequeño, si no es ninguno. Aun elementos como el titanio son fácilmente transferidos a través del arco, haciendo la soldabilidad del acero inoxidable tipo 321 posible en este proceso.

Estos electrodos son suministrados en carretes, cuyo peso varía entre 3 y 65 Lbs., dependiendo de su selección. Su diámetro varía entre 0,8 y 3 mm.

Todos los alambres usados para producir estos electrodos deberán tener altos estandares tanto químicos como de procesamiento o producción y de acabado. En la tabla #10 nos dá una lista de los 11 electrodos más usados en este proceso. Para varios -

TABLA #10 MATERIAL DE APORTE RECOMENDADO PARA ACEROS INOXIDABLES
AUSTENITICOS AL CROMO - NIQUEL COMUNMENTE USADOS

AISI METAL BASE TIPO	AWS - ASTM DESIGNACION METAL DE APORTE
201	ER 308
202	ER 308
310, 302, 304, 308	ER 308
304L	ER 308L
309	ER 309
310	ER 310
316	ER 316
316L	ER 316L
317	ER 317
330	ER 330
321	ER 321
347	ER 347
17,7Ph	W 17 -7Ph
PH 15 - 7Mo	WPH 15 - 7 Mo
17 - 4 PH	17 - 4 PH
AM 350	AM 350
AM 355	AM 355
A 286	A 286

grados de aceros inoxidable.

Si usamos protección de gas de argón, corriente directa, y polaridad reversa, la transferencia del metal desde el electrodo al metal base se la hace por el sistema llamado de transferencia por atomización; proviendo que el valor de la corriente alcance el mínimo para cada espesor de alambre. Debajo de este mínimo, la transferencia será en forma de gotas grandes, cual provoca inestabilidad en el arco. Los valores de la corriente por transferencia atomizada estable es alrededor de 300 amp. para un alambre de 1,58 mm (1/16 inch) de diámetro.

La transferencia del metal también puede ser obtenida por cortos circuitos ó arco pulsado como modo de transferencia. Este proceso operará satisfactoriamente a baja corriente, el cual puede extender la aplicación de este proceso para soldar materiales desde 0,25 mm de espesor.

Los gases protectores usados para soldar aceros inoxidable son mezcla de argón y oxígeno, argón y helio y dióxido de carbono.

La mezcla de argón oxígeno nos dá alguna oxidación en el lugar de la deposición del cordón soldado, produciendo una mejor acción de soldado que la que

es obtenida en argón puro y mejora la estabilidad del arco.

La mezcla de argón - helio combinada con una pequeña cantidad de dióxido de carbono se la ha estado usando para soldar acero inoxidable con circuitos cortos en el arco de transferencia. El gas de dióxido de carbono causa grandes pérdidas de silicio y manganeso y un incremento en carbono en los aceros-inoxidables de bajo contenido de carbón. El uso de gas carbónico ha sido restringido del proceso de soldadura de muchos aceros inoxidables debido a que recoge carbono, y la sensibilidad a la corrosión de soldadura no completadas en una sola pasada.

2.3. ESTUDIO DE LA UNION SOLDADA

2.3.1.- PREPARACION DE JUNTAS

Para proceder a unir dos piezas de acero inoxidable por fusión, uno de los elementos esenciales para obtener un buen resultado en la calidad de la soldadura además de la buena velocidad en el proceso que se reflejará en una mayor productividad, es tener una buena preparación de éstas. Por lo tanto, hay que comenzar teniendo cuidado en la precisión del corte para obtener cordones uniformes y eliminar los riesgos de deformación en la soldadura, ya que es indispensable tener un ajuste perfecto para cualquier tipo de borde.

Estos bordes además deberán estar limpios y desprovistos de toda materia extraña. Es preciso eliminar todas las partículas de acero ordinario, zinc, óxido, azufre, etc.

En el caso de bordes que se lleguen a cortar por fusión, será preciso igualarlos y eliminar los óxidos por moleteo, lima ó esmeril, etc.

En el caso que sea necesario puntear las chapas, se deberá limpiar con el cepillo las zonas coloreadas y si es preciso eliminan cuidadosamente la escoria.

Hay que eliminar los aceites y grasas que además de poder carburar el cordoón, originan picaduras.

Todos los elementos que se utilizan y, en la soldadura por arco, los electrodos deberán estar perfectamente limpios. (3)

2.3.2. EFFECTOS TERMICOS DEL ARCO ELECTRICO EN LOS ACEROS INOXIDABLES

Los efectos térmicos en los aceros inoxidable son diferentes a los aceros al carbono debido a sus diferentes propiedades físicas tales como: conductividad térmica mucho menor, resistividad eléctrica más alta, coeficiente de dilatación térmica aproximadamente un 50% mayor. A continuación hablaremos de los diferentes efectos que se pueden producir.

2.3.2a. DISTORSION Y SU CONTROL

Los aceros inoxidable al cromo de los tipos ferríticos y martensíticos tienen un coeficiente de dilatación inferior en un 10% aproximadamente a los de los aceros al carbón, y, sus conductividad térmica es aproximadamente la mitad. Prácticamente la dilatación difiere muy poco de la de los aceros dulces, que la concepción de las obras que deben realizarse por soldaduras con aceros al cromo con bajo carbono (0,08%C) puede seguir las reglas habituales.

Por el contrario la baja conductividad térmica puede provocar ciertas deformaciones en la unión

de chapas delgadas. Se limitarán estas deformaciones utilizando montajes apropiados y teniendo cuidado de proveer convenientemente el trazado de las uniones que se deberán situar en los lugares donde sufran los menores esfuerzos.

Por otra parte hay que recordar, en la realización de uniones en 17% de cromo, la fragilidad que origina el agrandamiento del grano. Como hemos apuntado anteriormente, los aceros al cromo-níquel tienen, respecto al acero ordinario, un coeficiente de dilatación superior en un 50% aproximadamente y una conductividad térmica tres veces menor; aunque, para la soldadura, estas características tienen efectos compensatorios, deberá procurarse limitar la importancia de los fenómenos térmicos.

En general, se cuidará de: (3)

a) En el caso de la soldadura de piezas delgadas mantener correctamente enfrentados los bordes de las piezas a soldar mediante un montaje rígido; - dejar que se realice el enfriamiento con la unión bridada.

Cuando no es posible la utilización de un montaje, puntar, tomando las precauciones usuales para no

comprometer la seguridad ni la penetración del cordón.

b) Favorecer la evacuación del calor disponiendo a cada lado del cordón barras de refrigeración preferentemente de cobre.

c) En el caso de soldadura por arco, evitar las extinciones del arco.

d) Establecer, si es necesario, un programa adecuado de las sucesivas fases de la operación de soldadura, usando los recursos clásicos, tales como la soldadura en salto de carnero o a paso de peregrino. (7)

e) Soldar a la máxima velocidad (traslación) posible.

f) Evitar que se deposite una cantidad excesiva de metal de aportación. Además de que aumente el costo de la soldadura, un exceso de metal de aportación aumenta la cantidad de calor y también la contracción.

2.3.2b TENSIONES RESIDUALES

En la unión de chapas o piezas de aceros inoxidables, por los procesos de soldadura por arco se producirán tensiones residuales en la unión soldada en la que hay el riesgo que se pueda produ-

cir corrosión bajo tensión. Para tratar de eliminarla o disminuirla será indispensable un tratamiento térmico después de la soldadura siempre que sea posible. Estos tratamientos térmicos - sirven también como por ejemplo: en los aceros martensíticos con 0,20% de carbón, evita las - grietas; en los tipos ferríticos (17% de cromo)- para mejorar en cierta medida, la ductilidad de la unión, disolviendo los islotes de martensita - que eventualmente se forman.

En los austeníticos al cromo-níquel con contenido de carbono no muy bajos y no estabilizados, en los que se encuentra el tipo AISI 304, objeto de - nuestro estudio, estos tratamientos sirven a más de eliminar las tensiones residuales, para garantizar en las proximidades del cordón una resistencia a la corrosión intergranular igual a la de metal base, siempre que se prevean riesgos de este tipo de - corrosión. (7)

2.3.2c DISMINUCION DE LA SOLDABILIDAD

Las altas temperaturas que produce el arco eléctrico en el momento de la fusión influye en las propiedades físicas de los aceros inoxidable austeníticos, que como hemos dicho anteriormente di--

fieren de los aceros al carbón.

Estas propiedades son:

- c-1 Resistencia eléctrica alrededor de 6 veces mayor.
- c-2 El punto de fusión es cerca de 100°C más bajo.
- c-3 La conductividad térmica alrededor del 50% menor.

Estos tres puntos combinados hacen necesario unos requerimientos más bajos de soldado ó lo que es lo mismo, una disminución de la soldabilidad con relación a los aceros al carbón.

- c-4 La expansión termica es alrededor del 50% mayor.

Los 18Cr - 8Ni son inherentemente ductiles y pueden soportar contracción de soldado pero, los de alta aleación o tipos completamente austeníticos pueden ser sensitivos a rajarse bajo condiciones de recontricción debido al poco tiempo de calentamiento. La alta característica de expansión debe ser considerada en soldado de ensamblajes desde que los sistemas de fatiga y resistencias externas deberán ser conmesurablemente más altas, - bajo condiciones de ciclo de calentamiento. (8)

2.3.2d ZONA AFECTADA POR EL CALOR

Antes de entrar al estudio de la zona afectada por el calor, es importante previamente hacer un estudio del flujo de calor en la soldadura.

El concepto de "Entrada de Energía" del arco es fundamental para el estudio de flujo de calor en la soldadura, primeramente desde el punto de vista de como la fuente de calor afecta el material a ser soldado.

La "Entrada de Energía del arco" (Heat Input) es la cantidad de energía introducida por unidad de longitud de soldadura desde una fuente de calor en movimiento tal como un arco, expresada en Joules / mm. (Joules/pulg.).

La energía introducida es calculada a partir de la relación:

$$H = \frac{P}{S} \quad \text{Calor total suministrado por la fuente/watts} \quad (1)$$

H = Energía introducida, Joules / mm (Joules/pulg)

P = Potencia total introducida desde la fuente de calor, en watts.

S = Velocidad de movimiento de la F. de C. en mm/seg (pulg/min.)

En el caso de arco eléctrico

$$H = \frac{VI}{S} \quad (2)$$

Si el objetivo es hacer una determinación precisa de los efectos del calor del arco sobre los materiales a ser soldados, se deberá usar la ecuación de la Energía neta Introducida:

$$H \text{ neta} = \frac{f_1 \cdot V \cdot I}{S} \quad (3)$$

En donde f_1 = eficiencia de transferencia de calor, el calor realmente transferido a la pieza, dividido por el calor total generado por la fuente de calor.

Con la mayor parte de los arcos con electrodo consumible, la disminución entre H neta no es de gran importancia práctica ya que la eficiencia de transferencia de calor, f_1 , es generalmente 0,8

La función primaria de la mayoría de las fuentes de calor es derretir el metal. La cantidad de metal del cual deberá ser derretido para producir una determinada longitud de soldadura es dictada por el tamaño y configuración de la junta, el número de pases de soldadura usados, y el proceso de soldadura.

Casi sin excepción, es preferible, por razones metalúrgicas, aproximarse a la fusión necesaria con un mínimo de suministro de energía.

En esta parte es oportuno introducir el concepto de eficiencia de fusión, aquella fracción de energía suministrada, H neta la cual es usada para fundir el metal.

El área de la sección transversal del cordón soldado mostrado en la figura 14, identifica 3 áreas características.

A = Sección transversal del electrodo depositado.

$A \times L$ = volumen de material depositado.

B = Sección transversal del metal base fundido,

$B \times L$ = volumen del metal base fundido por la fuente de calor en movimiento.

Z_1 = Área de la sección transversal de la zona afectada por el calor, en donde se producen cambios microestructurales o de propiedades.

El área de la sección transversal de metal soldado,

A_w es entonces:

$$A_w = B + A$$

Si es que no se adiciona material de aporte,

$$A_w = B$$

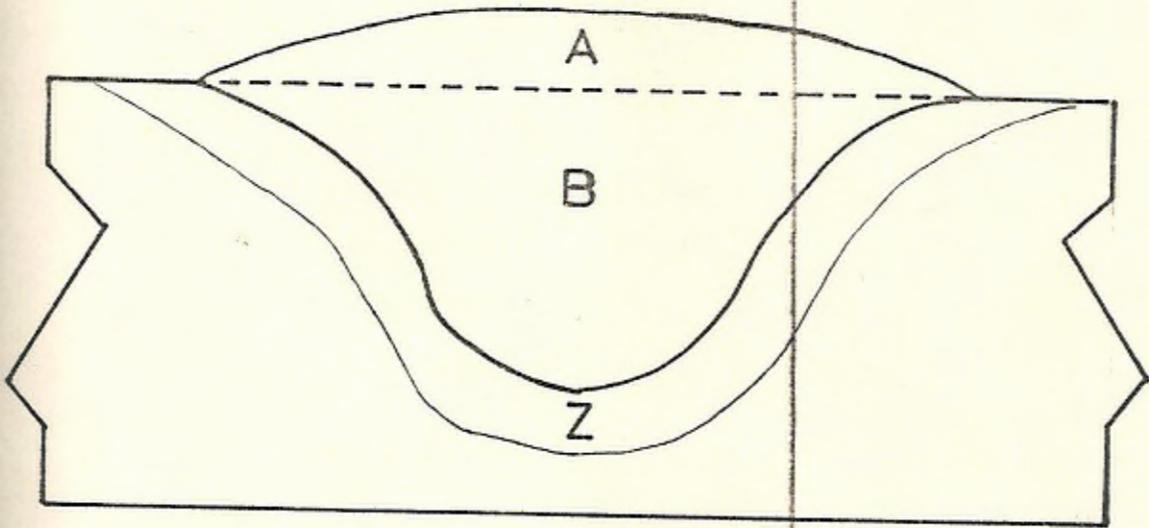


FIG. #14 SECCIÓN TRANSVERSAL (1)

Existe una cantidad teórica específica de calor Q , requerida para fundir un volumen dado de metal - (desde la temp. ambiente), la cantidad Q , es una - propiedad del metal ó aleación, y es obtenida por la suma de:

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

$$Q = Q_1 + Q_2$$

una aproximación razonable de Q es:

$$Q = \frac{(T_f + 273)^2}{300.000} \quad \text{J/mm}^3 \quad (5)$$

donde T_f es la temperatura de fusión en °C.

La eficiencia de fusión, f_2 , caracterizando un pase de soldadura, puede ser determinado calculando el área de la sección transversal y la energía neta introducida.

$$\text{Especifi. } f_2 = \frac{\text{mínimo calor teórico del arco requerido}}{\text{energía neta introducida}}$$

$$f_2 = \frac{Q \cdot Aw}{H \text{ neta}} = \frac{Q \cdot Aw \cdot S}{f \cdot V \cdot I} \quad (6)$$

La eficiencia de fusión depende de dos factores, del proceso y del material a ser soldado; ésta también depende de factores tales como configuración de la junta y espesor de la plancha. Mientras mayor sea la K del metal a ser soldado, menor será la eficiencia de fusión debido a la conducción de calor más rápida desde la región soldada. Los efectos de la K es más pronunciado con fuentes de calor de baja intensidad.

Por otro lado, fuentes de calor de muy alta intensidad, tales como el haz electrónico, se aproxima a la fusión virtualmente con 100% de eficiencia; el calor es entregado tan localmente y tan rápidamente que la fusión se produce antes de que cualquier conducción térmica ocurra, ésta es la razón de que fuentes de calor de alta intensidad (laser, haz electrónico) sean usados para perforaciones y corte de metales.

En el proceso SAW, la fuente de calor de soldadura es sumamente eficiente. Su intensidad y por tanto su eficiencia de fusión son mayores que con cualquier proceso de arco abierto.

Existe una relación simple pero muy importante entre el área de la sección transversal del metal sol

dado y la energía introducida (H).

$$A_w = \frac{f_2 \cdot H \text{ neta}}{Q} = \frac{f_1 f_2 H}{Q} \quad (7)$$

Para cualquier proceso de soldadura en particular, las eficiencias de calor transferido (f_1) y la de fusión (f_2), no varían mayormente con cambios en parámetros de soldadura específica, tales, como voltaje del arco (V), amperage (I) ó velocidad de movimiento del arco (S).

Esto significa que la sección transversal A_w de un solo pase, es aproximadamente proporcional a la energía introducida.

2.3.2e DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR

Para controlar los efectos metalúrgicos en la soldadura, las condiciones térmicas en y cerca del metal soldado, se deberán establecer:

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

ECUACION DE LA TEMPERATURA MAXIMA

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

La distribución de la temperatura máxima en el metal base adyacente a la soldadura está dado por la fórmula:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \rho c t Y}{H \text{ neta}} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (8)$$

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

(La ecuación para T_p no se aplica a puntos dentro del cordón soldado, sino solamente en la zona afectada por el calor adyacente).

T_0 = Temperatura inicial uniforme, °C de la chapa ó plancha.

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

H neto = Energía neta suministrada por el arco.

f_1 = Eficiencia de transferencia de calor.

ρ = Densidad del material a soldarse, g/mm³

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

ρ_c = Calor específico volumétrico, $J/mm^3 \text{ } ^\circ C$

t = Espesor de la chapa ó plancha, mm.

Esta ecuación puede ser usada para varios propósitos incluyendo:

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

2.3.2f CALCULO DEL ANCHO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR

Uno de los usos más interesantes de la ecuación para T_p es el de calcular el ancho de la zona afectada por el calor. Sin embargo, para calcular con seguridad el ancho, el otro extremo de la zona afectada por el calor deberá estar claramente identificado con una temperatura máxima, la cual a su vez está asociada con algunos cambios característicos en su microestructura ó propiedades. Por ejemplo, en la mayoría de los aceros ordinarios al carbono ó de baja aleación, existe un borde distintivo cuando se lo pule y ataca la sección transversal de la soldadura, correspondiente a una temperatura de $730^\circ C$.

Asumiendo que este borde defina el extremo de la zona afectada por el calor, el ancho de la zona afectada por el calor por el ejemplo anterior puede ser calculado, como es de apreciar, aquí el problema es determinar el valor de Y el cuál $T_p = 730 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para dar un ejemplo desmostrativo, diremos que hacemos una soldadura de un solo paso, con penetración completa sobre una plancha de acero usando los siguientes parámetros:

$V = 20$ Voltios	$c = 0,0044 \text{ J/mm}^3\text{ }^\circ\text{C}$
$I = 200$ Amp.	$t = 5 \text{ mm.}$
$S = 5 \text{ mm/seg.}$	$H \text{ neta} = 720 \text{ J/mm.}$
$T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$	
$T_m = 1.510 \text{ }^\circ\text{C}$	

Aplicando la fórmula #8 nos dá un valor de

$$Y = 5,9\text{mm.}$$

Entonces se puede predecir que el borde exterior de la zona afectada por el calor que está a $730\text{ }^\circ\text{C}$, estará localizado a $5,9 \text{ mm}$ de la línea de fusión, o que aquella región de $5,9 \text{ mm}$ de ancho, adyacente a la soldadura, estará estructuralmente cambiada; esto es, que podría estar afectada por el calor de la soldadura.

Si, sin embargo, este hubiese sido un acero templado y revenido, revenido a 430°C , entonces cualquier región calentada a temperatura mayores a 430°C , se la habría sobre-revenido, y puede mostrar propiedades modificadas. Sería entonces razonable considerar la zona modificada como afectada por el calor con su borde exterior localizado donde $T_p = 430^{\circ}\text{C}$.

Empleando otra vez la fórmula 8 tenemos para Y un valor de 14,2 mm.

Los aceros que responden al tratamiento térmico de temple y revenido son frecuentemente precalentados antes de la soldadura. Este tratamiento tiene el efecto de ampliar el ancho de la zona afectada por el calor. Con relación al ejemplo anterior, y suponiendo que $T_0 = 200^{\circ}\text{C}$, tendremos que Y es igual a 28,4 mm.

Entonces el precalentamiento ha duplicado el ancho de la zona afectada por el calor. (16)

Finalmente, una de las conclusiones más simple e importante a ser obtenida a partir de la ecuación de T_p , es que el ancho de la zona afectada por el calor es directamente proporcional a la energía neta introducida. Usando el ejemplo anterior (sin preca--

lentamiento), supongase que la energía neta introducida es incrementada en un 50% a 1,080 J/mm. Desarrollando la fórmula #8 con esta nueva H neta tenemos para Y un valor de 21,3 mm. Por lo que podemos decir que el ancho de la zona afectada por el calor es también incrementada en un 50%.

2.3.2f VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO

Después de que un punto, en ó cerca de la soldadura, ha alcanzado su temperatura máxima; la velocidad a la cual ésta se enfría puede tener un efecto significativo en la estructura metalúrgica, las propiedades mecánicas ó en el buen estado del metal base. Este es principalmente importante cuando se suelda aceros templables en donde la velocidad de enfriamiento es de interés. (16)

ECUACIONES PARA VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO

El cálculo y comparación de velocidades requiere de cuidadosas especificaciones de condiciones. Referirse simplemente a la velocidad de enfriamiento de una soldadura es inadecuado, debido a que la velocidad de enfriamiento varía con la posición y el tiempo.

El método más común es el de determinar la velocidad de enfriamiento de la línea central de la sol--

dadura en el instante en que el metal este pasando a través de una temperatura particular de interés, T_c . A temperaturas debajo del punto de fusión, la velocidad de enfriamiento en la soldadura y en su zona afectada por el calor inmediato es substancialmente independiente de la posición.

El mayor uso práctico de la ecuación de la velocidad de enfriamiento está en el cálculo de requerimientos de precalentamiento.

Por ejemplo se considera un solo pase de soldadura en efectuar una soldadura a tope entre 2 placas de igual espesor. Si es que las placas son relativamente gruesas se requerirá de varios pases (más de 6) para completar la junta soldada, en este caso la velocidad de enfriamiento estará dada por:

$$R = \frac{2\pi K (T_c - T_0)^2}{H \text{ neto}}$$

En donde:

R = Velocidad de enfriamiento en un punto situado en la línea central de la soldadura, °C/seg., - en el momento cuando el punto este enfriando pasada la temperatura de interés, T_c :

K = Conductividad térmica del metal J/mm. S.°C.

Estrictamente hablando, la velocidad de enfriamiento es un máximo en la línea central de la soldadura, y es este máximo el cual es dado por dicha ecuación, sin embargo, la velocidad de enfriamiento cerca de la línea de fusión es solamente un pequeño porcentaje menor que en la línea central.

De acuerdo con lo indicado, la ecuación de la velocidad de enfriamiento se podría aplicar a la soldadura completa y a su zona afectada por el calor.

Si es que las placas son relativamente delgadas, es decir que requieren menos de 4 pases:

La distinción entre placa gruesa y fina requiere de una explicación. La ecuación de la placa gruesa es usada cuando el flujo de calor es tridimensional, es decir el flujo es hacia abajo y hacia las partes laterales de la soldadura. La ecuación de la placa guesa se aplicaría por ejemplo, a un pequeño cordón depositado sobre un material grueso. La ecuación de la placa fina se aplicaría a cualquier proceso de soldadura de pase único y de penetración completa, no es obvio reconocer si la placa es gruesa o fina debido a que los términos no tienen significado absoluto. (12)

Por ésta razón, una buena medida será definir una -

cantidad denominada el espesor de placa relativo

$$T = t \sqrt{\frac{\rho_c (T_c - T_0)}{H \text{ neto}}}$$

La ecuación de placa gruesa se aplica cuando es mayor que 0,9 y la ecuación de placa fina cuando es menor que 0,6; cuando se encuentra entre 0,6 y 0,9, la ecuación de placa gruesa provee a la velocidad de enfriamiento la cual es muy alta, y la ecuación de placa fina dá un resultado el cuál es muy bajo.

Sin embargo, si una división arbitraria es hecha a un valor $T = 0,75$, valores mayores se toman como gruesos y menores como finas, el error máximo puede no exceder el 15% en un cálculo de velocidad de enfriamiento, y como se podrá apreciar, el error en aplicar las ecuaciones en requerimientos de precalentamiento es menor.

2.4.- DIFERENTES PROCESOS DE SOLDADURAS APLICABLES

Anteriormente se explicó el arco eléctrico como fuente de calor y de los procesos más usuales en la soldabilidad de los aceros inoxidable. Ahora, esta parte del estudio será dedicada a hacer una exposición de los tres métodos que usaremos en nuestras pruebas, comenzando por el más universalmente conocido el cuál es la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido.

2.4.1 SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO

Este procedimiento a más de ser rápido es de empleo muy flexible con todos los tipos de aceros inoxidables. No necesita más que de un material poco costoso, por lo que prácticamente ha desplazado a la soldadura por soplete cuando las láminas son de un espesor superior a un milímetro, porque es más rápido, provoca menores deformaciones y dá un cordón de forma vistosa. Fig.15 Por otra parte, permite una preparación menos rigurosa de juntas que el procedimiento TIG por ejemplo.

Los rangos de corriente recomendados en este proceso están dados en la tabla #11 También se muestran los voltajes que se tiene cuando se produce el arco

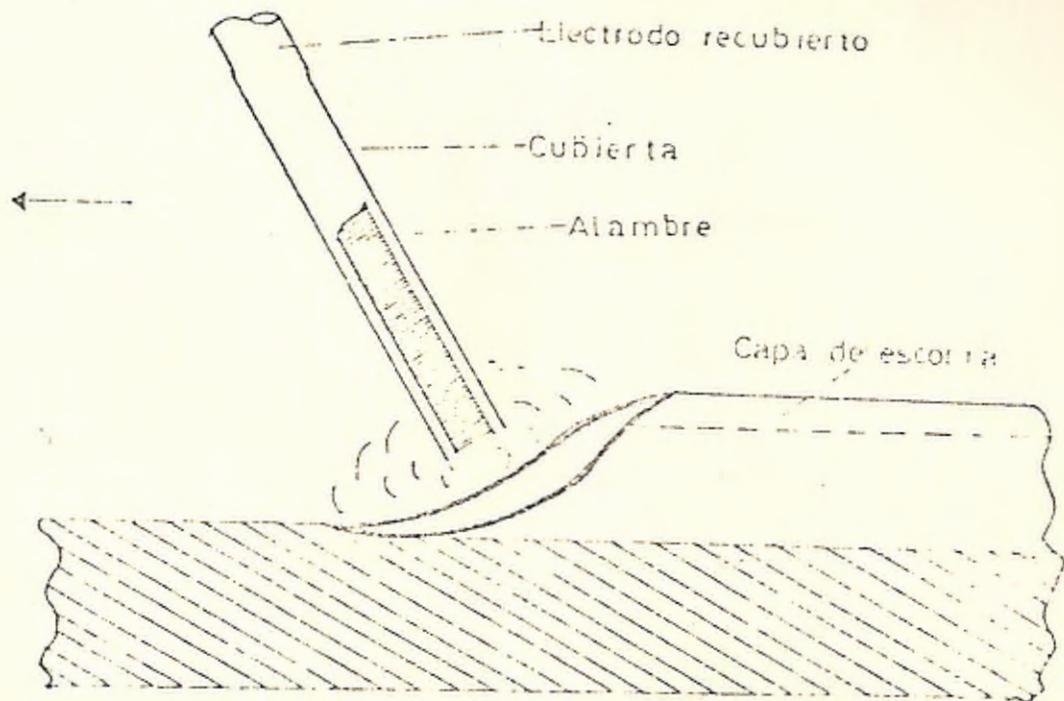


FIG. 15.- SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO REVISTIDO (16)

TABLA #11

RANGO DE CORRIENTES RECOMENDADOS PARA ELECTRODOS AUSTENITICOS AL CROMO - NIQUEL

A - C o D - C CORRIENTE, AMP.

ELECTRODO, TAMAÑO, mm.	PLANO, HORIZONTAL Y SOBRECABEZA	VERTICAL	MAXIMO VOLTAJE DEL ARCO
1,19	15 - 25	15 - 25	23
1,58	20 - 4-	25 - 40	24
1,98	30 - 60	35 - 55	24
2,38	45 - 90	45 - 65	24
3,17	70 - 120	70 - 95	25
3,98	100 - 160	100 - 125	26
4,76	130 - 190	130 - 145	27
6,35	210 - 300	.....	28
7,93	250 - 400	.....	29

lo que nos indica que todos los electrodos revestidos de aceros inoxidables son operados con una corta longitud de arco. El proceso de soldadura en la posición vertical requiere de valores de corriente más altos que las otras posiciones. Los valores de corriente más altos mostrados en la tabla son característicos de la corriente continúa, ya que es posible soldar con corriente alterna que es un 10 a un 20% más alta que con corriente directa.

Los electrodos de aceros inoxidables revestidos tienen una eficiencia de deposición del 75% a voltajes y corrientes normales.

Cuando se sueldan planchas de 6mm. ó menos de espesor la distorsión puede ser un problema muy serio. Esto es debido al alto coeficiente de expansión y la pobre conductividad térmica de los aceros inoxidables a la que nos hemos referido ya anteriormente.

Diseños de uniones típicas usadas para soldar aceros inoxidables son mostradas en los anexos.

Para obtener una buena calidad de depósito, las uniones deberán ser completamente limpias y bien maquinadas. Soldadura de un solo paso en uniones cuadradas tendrán una completa penetración en materiales de espesor no mayor a los 3,5 mm.; materiales de un espe-

sor mayor deberán ser achaflanados para permitir una completa fusión en diferentes pasadas. Durante el proceso de soldeo no es recomendable mover el electrodo hacia atrás y hacia adelante..

Para obtener una máxima calidad, el ancho del cordón soldado no deberá exceder a cuatro veces el diámetro del alambre. Pasadas individuales de metal soldado en chaflanes profundos deberán ser mantenidos a un máximo de 3mm. de espesor para asegurar una buena calidad.

Los revestimientos y escorias empleados en la soldadura de los aceros inoxidables contienen flouride, el cual ayuda a remover los óxidos de cromo y níquel y asegura una fusión completa. En algunos medios estos flourides se convierten en ácido hidro-flourido, y pueden llegar a ser altamente corrosivos a los aceros inoxidables. Por lo tanto, toda la escoria deberá ser cuidadosamente removida de la superficie de los aceros inoxidables incluyendo las partes posteriores de la soldadura. A menos que esto se pueda hacer, en soldadura de un sólo paso deberá usarse solamente electrodos libres de fundentes en los procesos de soldadura con gas inerte en los pases de raíz.

añadiendo de 1 a 5% de oxígeno al gas de protección. Estas dos variantes se prestan muy bien a la soldadura de los aceros inoxidable, con un rendimiento que, comparado con los otros métodos resulta elevado.

Tiene como ventaja común la de no producir escoria y disminuir la pérdida de elementos de aleación por oxidación del arco.

El MIG en fina lluvia permite la soldadura a gran velocidad de chapas medias y gruesas.

El MIG de gota gruesa permite la soldadura de chapas finas con una preparación más somera y un rendimiento mayor que por el procedimiento TIG.

Pero, en ambas variantes, la aplicación del procedimiento está condicionado a la posibilidad de aprovisionamiento del alambre adecuado.

1. En el procedimiento MIG de fina lluvia a causa de la gran densidad de corriente necesaria en el procedimiento para obtener la transferencia por pulverización, y por consiguiente de la gran penetración del arco, su campo de empleo se adapta preferentemente a las chapas cuyos espesores están comprendidos entre 5mm. (puede rebajarse hasta 3 mm.) y 25 mm.

A bajas intensidades, es decir, para los más pequeños espesores las características del arco son mediocres y la fusión se produce en gruesas gotas irregulares, lo que agrava la inestabilidad del arco.

2. El equipo a utilizarse difiere poco del equipo TIG, excepto en lo que se refiere a la pistola ó antorcha de soldadura que va provista de un tuboguía de contacto por el que se desliza el alambre-electro fusible . El resto de los elementos son sensiblemente los mismos. El equipo se completa con tambor, movido por el motor eléctrico, que asegura el aprosionamiento automático del alambre. Será ventajoso utilizar un tambor de gran capacidad (200Kg.) con el fin de disminuir las paradas para el cambio de bobina. La buena conducción del alambre desde el tambor a la pistola es un factor que no hay que descuidar para una buena calidad de la soldadura, es preciso asegurarse:

a) de que no existe rozamiento del alambre con la tubuladora flexible, lo que produciría desprendimiento de metal (se fabrica especialmente tubuladoras reforzadas interiormente con teflón).

b) de que la regulación de las rodanas de enderazado y arrastre a la salida del tambor es correcta, -

es decir, sin deslizamiento ni ajuste excesivo que -
podría rayar el alambre.

Existen dispositivos llamados de alambre tirante - -
(roldanas de arrastre situadas en el interior de la
pistola, movidas por un motor alojado en la culata)
que, aunque implican una pistola de mayor peso, ase-
guran un arrastre muy regular del alambre. Existen
pistolas especiales provistas de una bobina con un -
peso de 0,5 a 1 Kg. que se utilizan con éxito en as-
tilleros.

Se puede también acoplar la pistola de alambre tirante
a un tambor ordinario, cuyo motor se sincroniza -
con el peso de la pistola.

Los gases de protección comunmente usados son el ar-
gón y el helio.

A igualdad de intensidad, el argón produce menos ca-
lor y dá lugara una unión más estrecha. Así pués -
se lo utiliza con preferencia, además se lo puede -
mezclar con oxígeno en una cantidad que va de 1 a un
5%.

Esta adición de oxígeno mejora la estabilidad del -
arco, asegura una mejor penetración y dá lugar a una
forma más adecuada del cordón, evitando las mordedu-

ras a lo largo de la unión. Por otra parte, el 5% de oxígeno es un valor máximo que no debe sobrepasarse para evitar una pérdida excesiva de los elementos de aleación oxidables.

Para los inoxidables, no se aconseja la adición de anhídrido carbónico que puede tener un doble efecto oxidante y carburante, y que, aunque favorezca la penetración, puede dar lugar a fisuras.

Generalmente se usa corriente continua, electrodo positivo, que asegura la mejor y más uniforme transferencia de flujo colorífico en el metal.

Como metal de aportación se elegirá el alambre - electrodo de igual composición para un tipo dado de acero a soldar, que el del alambre de aportación en el procedimiento TIG.

En general, será ligeramente más rico en elementos oxidables que el metal base y con bajo contenido en carbono o estabilizado.

Para los tipos ferríticos o martensíticos, se elegirá preferentemente un alambre austenítico.

Por lo expuesto anteriormente creemos que este estudio podrá ser de ayuda a las industrias que trabajen con el acero, objeto de este trabajo.

3.2. PLANIFICACION DEL TRABAJO

Como se ha indicado anteriormente, cuando se efectúa una unión soldada en los aceros inoxidable AISI 304, se presenta a una determinada distancia de la unión soldada, una zona sensibilizada, en donde los carburos de cromo ($\text{Cr}^{26} \text{C}^6$) precipitan en los límites del grano austenítico, lo cual produce una disminución brusca de cromo en la zona interior del grano adyacente al límite de grano, lo cual obedece al efecto térmico de calentamiento con alguna fuente de calor en el rango de 400 a 800°C, si en estas condiciones se introduce la unión soldada en un medio corrosivo severo, en alguna forma y después de un tiempo determinado se va a presentar el fenómeno de la corrosión intergranular (10) con la consecuente deterioración del recipiente construido por medio de soldadura. Entre las formas ó métodos que se han usado en otras investigaciones similares y que han dado resultados favorables, se tiene el método de deposición libre del cordón soldado (bead on plate -

test) y el de la construcción de probetas en formas de ensambles mecánicos, en donde para ciertas combinación de parámetros se preparan probetas en donde se puede investigar en forma amplia y sencilla los efectos térmicos en los cambios microestructurales y físico mecánicos en la zona sensibilizada, zona afectada por el calor (ZAC), línea de fusión y zona solidificada.

El experimento para investigar la forma de eliminar o al menos minimizar el fenómeno de la sensitización implica la preparación de probetas de espesor y dimensiones constantes, con el objeto de introducir calor a la unión soldada, a volumen constante de la probeta, y luego comparar los resultados para obtener conclusiones de esta investigación.

Para este efecto se construyeron 15 probetas para la prueba de deposición libre del cordón soldado y 3 ensambles mecánicos para inspeccionar los defectos de soldadura y ensayos mecánicos.

Posteriormente, estas probetas cuya forma esta representada en fig. 18 se sometieron a diferentes ensayos metalográficos y mecánicos para detectar los cambios que se investigan.

Finalmente se resumieron los resultados en forma tabular para hacer un análisis comparativo entre las -

probetas soldadas ó influenciadas por los procesos de soldadura al arco: electrodo revestido, TIG, - MIG, y las probetas testigo.

3.3. MATERIALES A UTILIZARSE

El material que se usó en la preparación de las probetas, objeto de nuestro estudio, fué tomado de una plancha de acero inoxidable austenítico tipo AISI - 304, el cual tiene las siguientes características físicas-químicas y mecánicas. (3)

a) COMPOSICION QUIMICA

Tipo	C max	Mn max	K max	S max	Si max	Cr	Ni	Ti min
AISI 304	0,08	2,00	0,045	0,030	1,00	17/19	9/12	5,00

b) PROPIEDADES FISICAS

Propiedades	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad	ρ	0,29	Lbs/pulg ³
Resistencia eléctrica a 18°C	R	72	Microhms, cm
Temperatura de fusión	T _f	1.450	°C
Calor específico	c	0,12	Cal/°C/gr
Conductividad térmica	ρ	0,039	Cal/cm ² /seg/°C/cm

c) PROPIEDADES MECANICAS

Propiedades	Símbolo	Valores	Unidades
Punto de fluencia	σ_y	30/45 mil	Lbs/pulg ²
Resistencia a la tracción	σ_{MAX}	75/95 mil	Lbs/pulg ²
Elongación, % en 2"	ϵ	45/55	%
Estricción	ϕ	55/75	%
Módulo elástico	E	28 millo nes	Lbs/pulg ²
Dureza Rockwell	R _B	75/90	

3.3.1 MATERIAL DE APORTE

a) PARA SOLDADURA CON ELECTRODO REVESTIDO

Tipo de electrodo E 308L, clasificación AWS
Resistencia a la tracción - 75.000 lbs/pulg²

COMPOSICION QUIMICA

Tipo	Carbón max	Cromo	Níquel
E308L AWS	0,08%	18-21%	9 - 11%

b) PROCESO TIG

ELECTRODO DE TUNGSTENO

Tipo EWTh-1 Clasificación AWS

Gas protector Argón 99,5% pureza

Alambre de aporte

Tipo 308L Clasificación AWS

3.4. EQUIPOS UTILIZADOS

En la presente investigación se utilizarón los siguientes equipos y accesorios para los diferentes procesos de soldadura.

Proceso de soldadura de electrodo revestido y TIG:

Fuente de poder: equipo ESAB LTD. 200 con las siguientes características:

Voltage 220/380/440 volts trifásico.

Ciclos 50/60 Hz.

CAPACIDAD DE SOLDEO:

Ciclo de trabajo	%	100	60	35
Intensidad	I	100	200	250 Amp
Voltaje	V	16,4	28	30 Voltios

Campo de regulación continua:

TIG 8 - 250 Amp

Electro revestido 30 - 250 Amp

Tensión en vacío 70 V

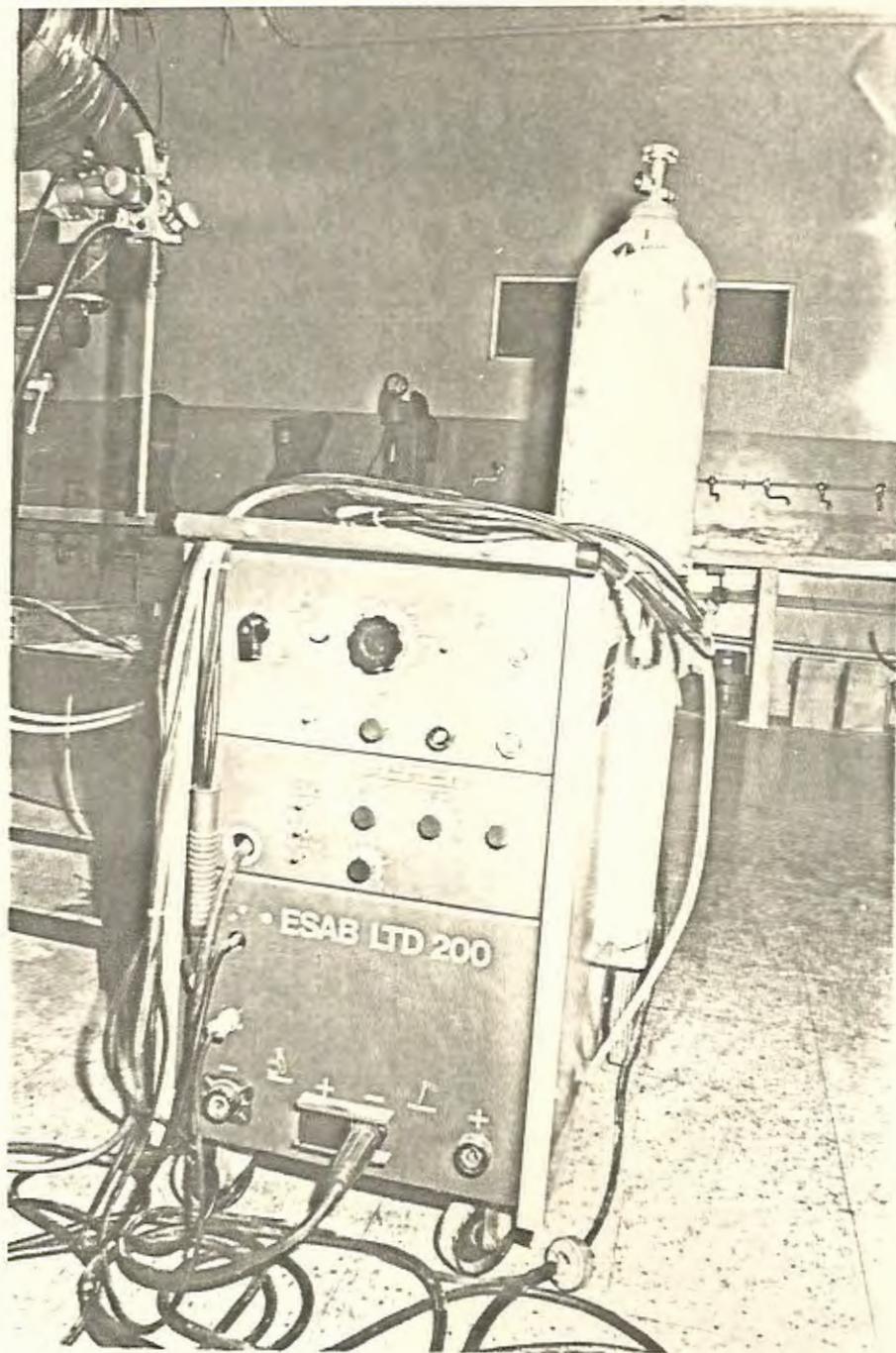


FOTO #1 Equipo de soldadura ESAB LTD 200 para proceso de soldadura de electrodo revestido y TIG.

Consumo en vacío 400 - 500 w
 Clase de aislamiento
 Tipo de protección IP 22 Af

Estabilización de la intensidad de la corriente de soldeo para $\pm 10\%$ de variación de la tensión de red. menos de $\pm 2A$ de variación de la intensidad de la corriente de soldeo.

Para el proceso de soldadura TIG, se usó como fuente de poder: equipo ESAB 10 - 250 con las siguientes características técnicas:

Voltaje 220/380/440 voltios trifásico
 Ciclos 50/60 Hz

CAPACIDAD DE SOLDEO:

Ciclo de trabajo	%	100	80	60
Intensidad	I	200	220	250 Amp
Tensión	V	24	25	26,5 Volts

Tensión en vacío 33 Volts
 Velocidad de alambre 13,5 M/mm.

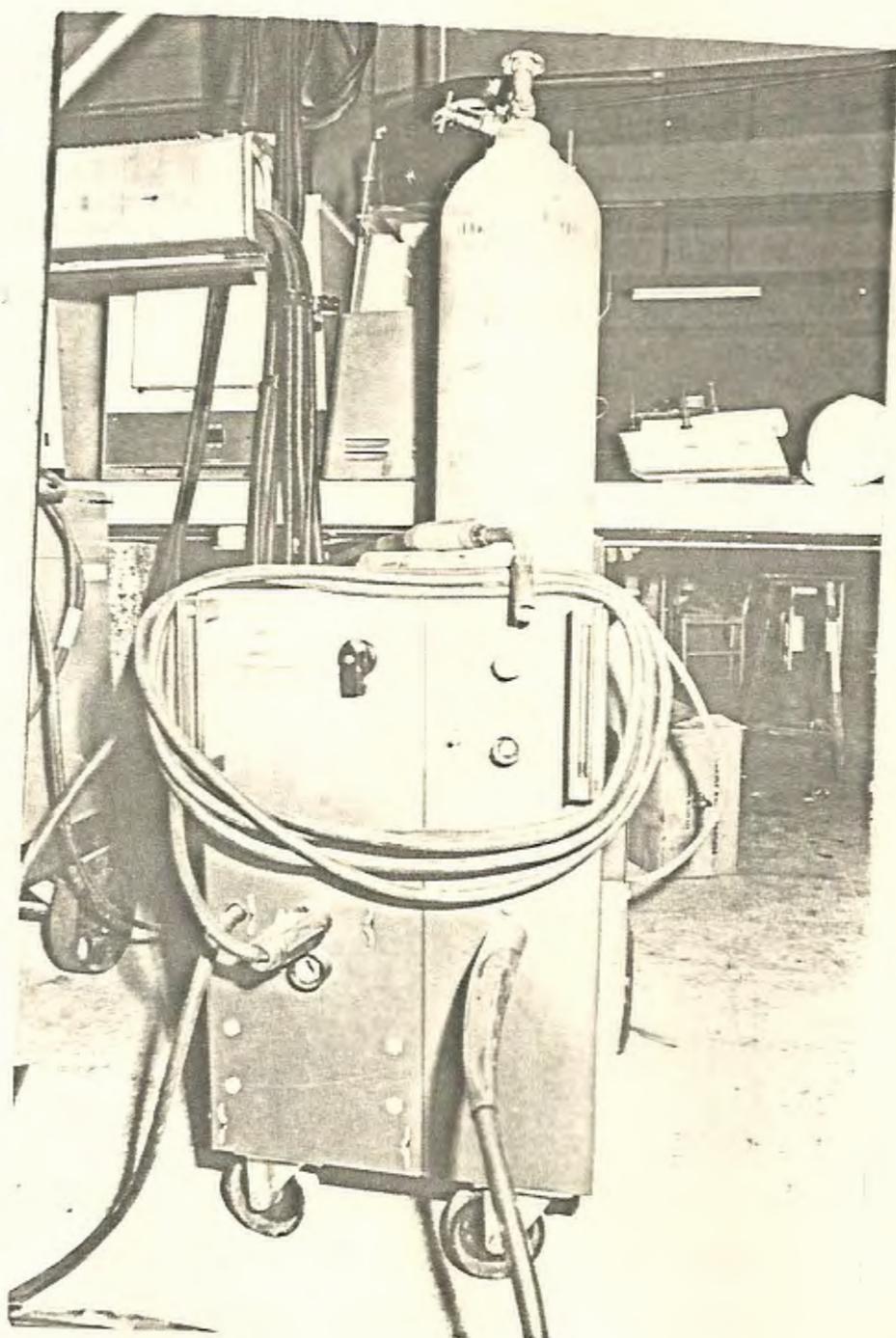


FOTO # 2 Equipo de soldadura ESAB A-10 - 250 K.
para proceso MIG.

CONTROL DE VELOCIDAD DE LA FUENTE DE CALOR

Para tener el control de la velocidad de movimiento de la fuente de calor, se adapta en el carro de un torno marca South - Bend, tipo A, un dispositivo en que se colocará la pieza ó platina en nuestro caso particular; la velocidad se la regula posicionando los engranajes de acuerdo con la tabla que indicamos a continuación:

Posición	Engranaje	Velocidad mm/seg
A	42	5,08
A	36	4,23
A	28	3,38
B	40	2,54
B	32	2,00
C	48	1,69

Por medio de este sistema, fué posible semiautomatizar los procesos manuales de soldadura empleados y consecuentemente tener bajo control el suministro de calor a la unión soldada.

b) PULIDO GRUESO

Este pulido se lo efectúa en mesas de pulido suministradas por la casa Handimet, comenzando con las tiras abrasivas de grano más grueso, el #200 para nuestro caso, y continuando de manera ascendente a la de granos más finos hasta llegar a la #600 - que es la más fina usada en este estudio. En los intermedios se usó tiras abrasivas #320 y 400.

Foto

c) PULIDO FINAL - ELECTROLITICO

El pulido final, se lo practicó por medio del sistema electrolítico, el cuál consiste en convertir el material, a ser pulido, en un ánodo dentro de un electrolito adecuado. Este remueve algo de material desde la muestra escogiendo valores apropiados de corriente, electrolito y tiempo de pulido. El material es removido en la mayoría de los casos de tal forma que la superficie pulida queda como un espejo.

El ataque electrolítico se obtiene operando con corrientes muy bajas, que no atacan a los granos y a los límites de grano con la misma velocidad, y por consiguiente ésto hace posible observar los límites de grano en el microscopio de la misma manera que -

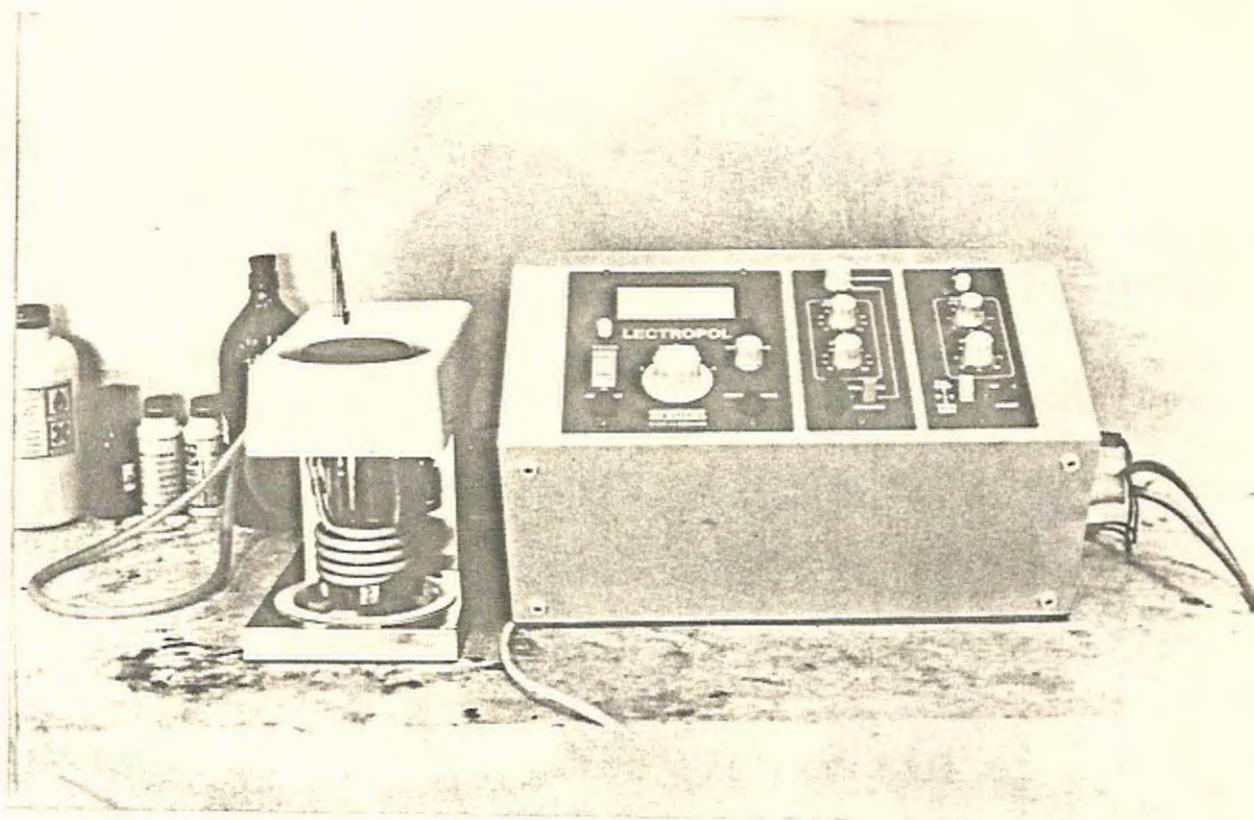


FOTO # 3 LECTROPOL, maquina para pulido electroli
tico.

en el caso del ataque químico normal.

REGLAS PARA EL PULIDO:

Cuando se pule sobre el Elytopol se debe dar especial atención a los siguientes puntos importantes:

- 1) Electrolito
- 2) Velocidad de flujo
- 3) Corriente de pulido
- 4) Tiempo de pulido

Electrolito: es importante usar el electrolito correcto para un material dado.

El electrolito normal para el Elytopol es un A-5 que es usado para aceros, aceros inoxidable, aluminio aleaciones de aluminio, níquel, etc. El electrolito A-2 puede también ser usado para estos materiales, y es el que nosotros usamos en este estudio.

Velocidad de Flujo: la velocidad de flujo del electrolito no deberá ser nunca excesiva, por lo tanto se deberá usar el chorro más delgado posible. El flujo es vaariado por una palanca a la izquierda de la mesa de pulido y este depende de la cantidad de electrolito en el recipiente, el nivel del brazo de pulido y la viscosidad del electrolito.

Con un electrolito inadecuado el pulido resultará -

irregular, la cámara de pulido va a chisporrotear y la aguja del medidor del mA va a oscilar.

La velocidad de flujo empleada en las pruebas realizadas en este trabajo, estuvo normalizada por la palanca que varía éste colocada en la posición marcada con el # 4.

Corriente de Pulido: La corriente de pulido requerida variará entre 80 a 200 mA de acuerdo al tipo de material. Nosotros usamos una corriente de pulido de 100 mA.

Tiempo de Pulido: El tiempo de pulido empleado en estas pruebas fué de 10 segundos.

La fotografía nos muestra la pulidora electrolítica.

d) ANALISIS MICROSCOPICO

El microscopio Metalográfico marca Olympus de las siguientes especificaciones:

Binoculares con inclinación de 30 ° con anillo de ajuste.

Rango del ajuste de la distancia interocular: 55,42

Distancia interocular standard: 62

Montador giratorio: quintuple, rulimán tipo

Total magnificación: 35 x

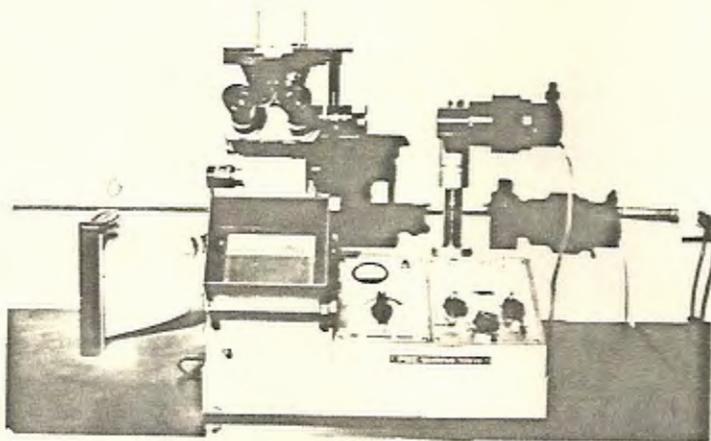


FOTO # 4 Microscopio optico para observacion metalografica

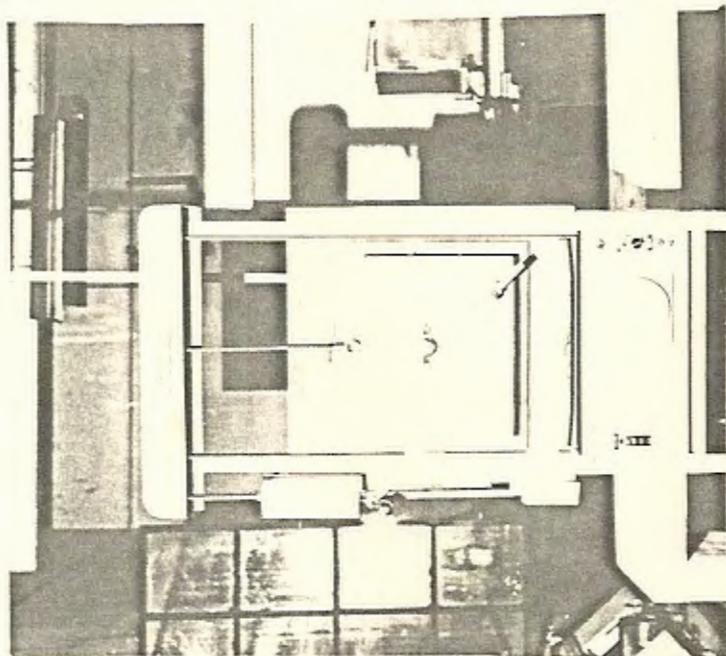


FOTO # 5 Horno LINDBERG para tratamiento termico del material.

Enfocamiento: Por movimiento vertical del plato donde se coloca la pieza a examinarse.

Ajuste: Por medio de tornillo en micras y nivel.

Iluminación: Sistema de iluminación vertical con vidrio reflector protegido ó cubierto, filtro, polarizador y analizador, condensa para baja y alta potencia y foco de 6v 30w.

Transformador: Viene dentro del cuerpo del microscopio, de voltage variable 0 - 8,5v.

e) MEDIOS DE CALENTAMIENTO

Horno Linberg.

Tipo 41 - HC - 10188 - 18AM.

Temperatura máxima 1.850°C

Voltage 230 volts.

Ciclo 60 Hz

Fase Monofásico.

Consumo 8 kilowatts.

f) MICRODUROMETRIA

Microdurómetro, modelo AK6

Determina con precisión la dureza de casi cualquier material, sin importar el grueso ó el fino, lo sua-

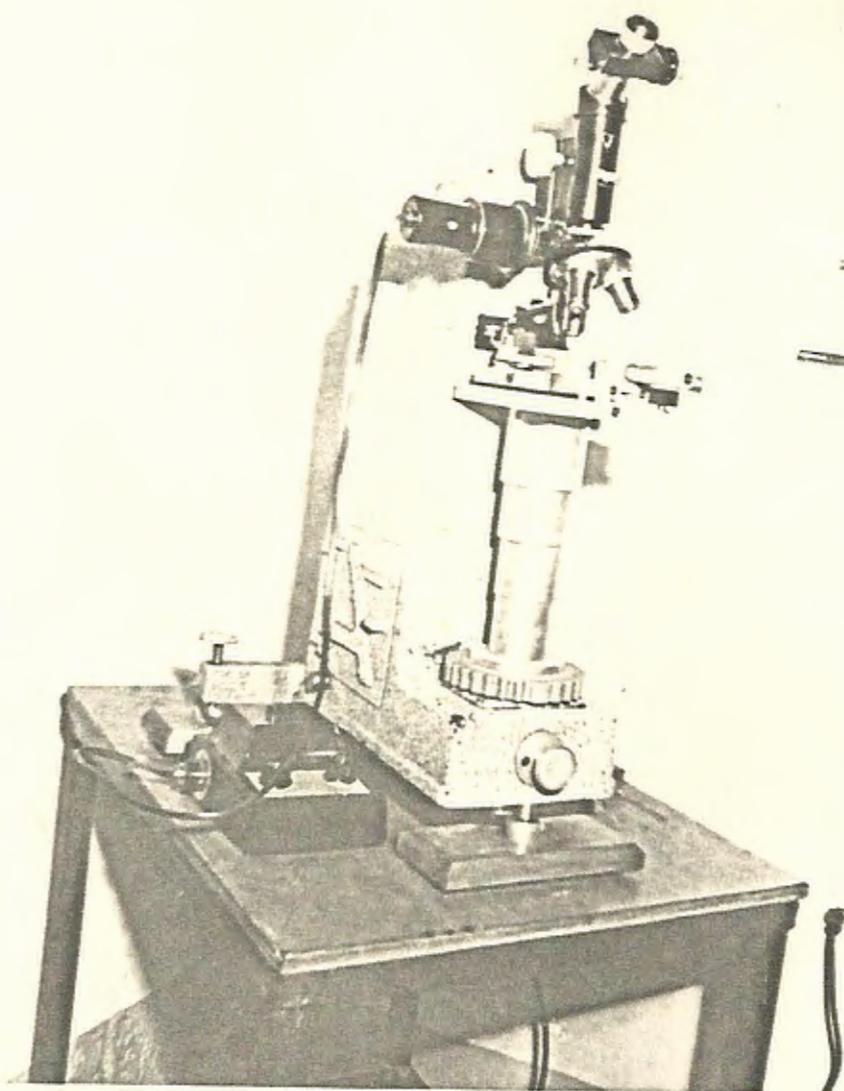


FOTO #6 MICRODURIMETRO modelo A k6 para medir micro
dureza Vickers.

ve ó duro que sea.

Carga aplicable baja 1 gr. Alta 10 kg.

Indentador de diamante Knoop, ó indentador de diamante piramidal 136° Vickers.

Precisión:

El disparador hidráulico de aceite, construído con precisión aplica la carga de "peso muerto", dando control preciso sobre el tiempo necesario para la aplicación de carga completa, así como sobre la retención de la carga.

Microscopio:

Microscopio metalúrgico; de cuerpo tubular, adaptador de ocular inclinado, transformador e iluminador vertical, con tres lentes, ocular graduado y objetivos 10x, 20x, y 50x.

CONTROL DE PROPIEDADES MECANICAS

a) ENSAYO DE TRACCION

Para efectuar el ensayo de traccion se utilizo la maquina Universal de pruebas Marca INSTRON de 50.000 Kg. de capacidad. (foto# 7)

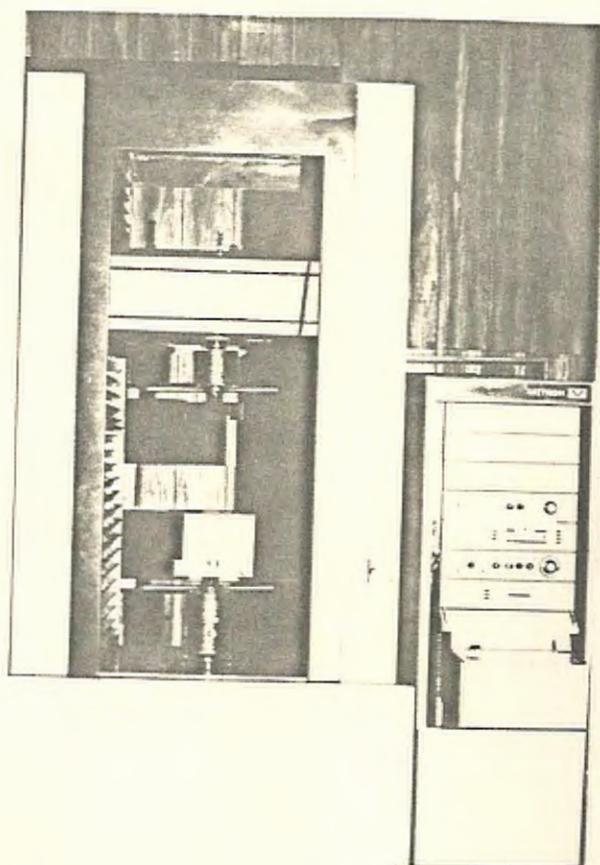


FOTO #7 Maquina de ensayos mecanicos INSTRON

b) ENSAYO DE DOBLADO

Para efectuar el ensayo de doblado se utilizo la maquina Universal de pruebas Marca SOILTEST tipo VERSA TESTER 30 M. de 30.000 Lbs. de capacidad, acoplada a dispositivo de doblado (punzon y matriz), los cuales estan representados en la foto .

Capacidad: Hasta 60.000 lbs. de compresion.

Suminstro de

energia : 120/220 volts.

Ciclos: 50/60 Hz

Motor: 1 Hp / ac

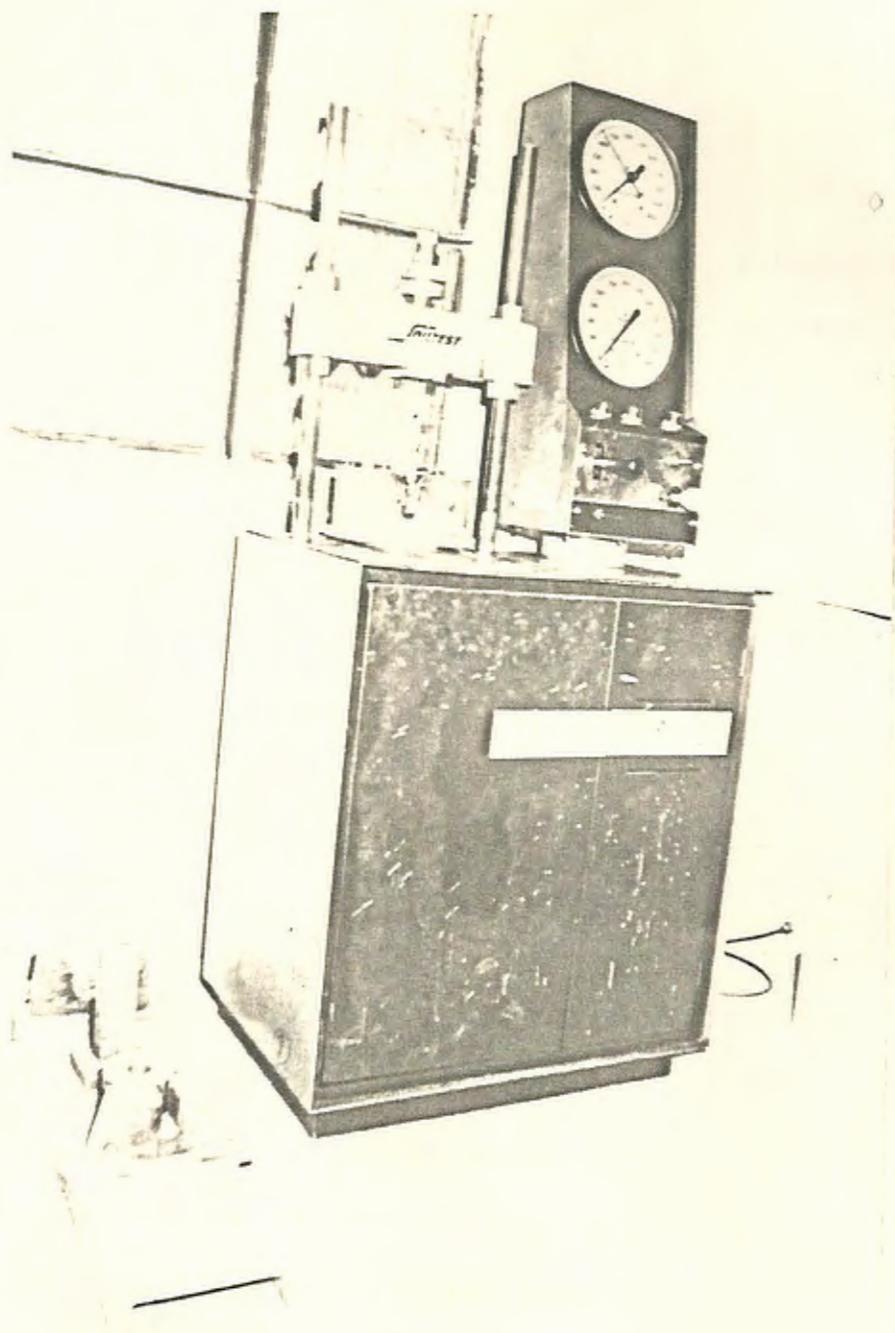


FOTO #8 Maquina VERSA TESTER de 30 M para prueba de doblado.

soldado, el siguiente tipo de información puede ser obtenido: La velocidad de enfriamiento a una temperatura específica en el cordón soldado y en la zona afectada por el calor del metal base; dureza máxima y tamaño del grano en la zona afectada por el calor del metal base influenciada por la velocidad de enfriamiento, tamaños del área de la sección transversal donde se depositó el cordón y de la zona afectada por el calor en el metal base; Penetración, Microestructura del cordón soldado y de la zona afectada por el calor, Velocidad de fusión, Ancho de la ZAC, T_p , Y_z , etc.

Las probetas que se usaron para los ensayos en esta parte de trabajo consisten de la deposición libre de un cordón de soldadura sobre 15 platinas de metal bases de 5,8 x 20 x 0,3 cm. con el objeto de obtener información de los efectos térmicos de la variación de parámetros de soldadura (voltaje, amperaje, velocidad de viaje del arco eléctrico) en la formación de la zona de sensibilización del metal base y sus efectos en las propiedades físico mecánicas cuando se utiliza los procesos de soldadura eléctrica con electrodo revestido, (SMAW), TIG, MIG. Fig. 18

Los parámetros de soldadura fueron preseleccionados-

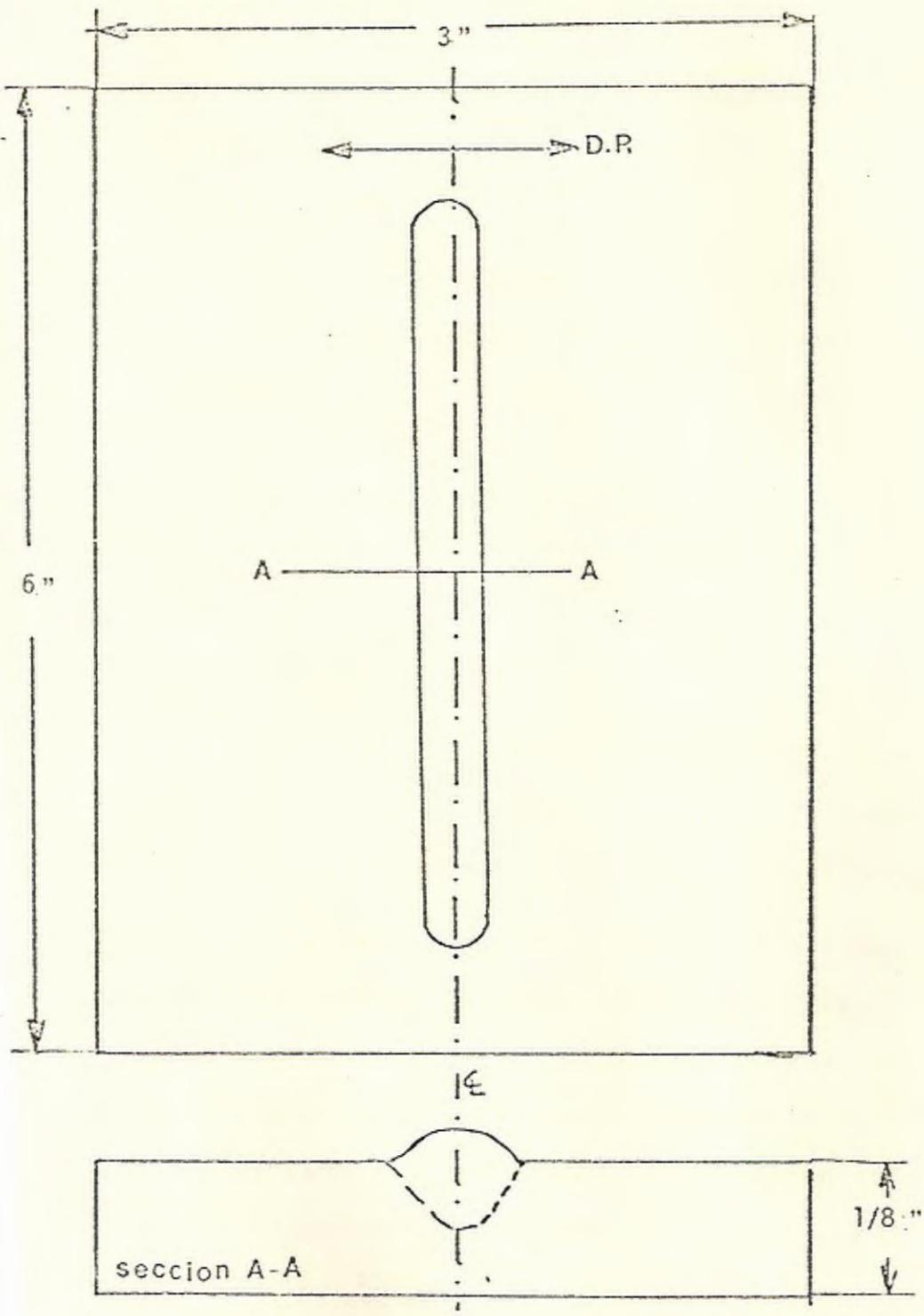


Fig. 18 Probeta de deposicion libre (13)

con el objeto de obtener un suministro de calor cre
ciente para analizar con que calor suministrado se
presenta el fenómeno de sensibilización.

Antes de iniciar la operación de la deposición del
cordón se deberá limpiar cuidadosa y rigurosamente
la superficie sobre la cual se va a depositar el -
cordón, esto es, de: óxido, humedad, grasa, etc.,
después de este primer paso, se procede a hacer las
diferentes deposiciones del cordón tomando en -
cuenta los parámetros preseleccionados como se men-
cionó anteriormente.

Se usó un torno para mantener en movimiento contí-
nuo y uniforme a la probeta y a las diferentes velo
idades de la fuente de calor con que trabajamos.

Se deja enfriar la probeta hasta la temperatura am-
biente para luego hacer un análisis metalográfico
con el procedimiento que a continuación se indica:
cuando se haya enfriado se procede a cortar un pe-
dazo, el cual hay que pulirlo, comenzando esta ope-
ración en la mesa de pulido sobre tiras abrasivas
de grano No. 220 - 320 - 400 y 600; comenzando por
las más gruesas y terminando en las más finas; la
última se la efectúa por medio de pulido electrolí-
tico para lo cual se usa un electrolítico de compo-

sición química: ácido perclórico y alcohol etílico en la proporción de una a ocho partes.

Una vez pulida y atacada con agua regia la probeta, se procedió a efectuar el análisis metalográfico - para detectar los cambios microestructurales, para lo cual observamos a ésta a través de un microscopio el cual nos ayudará a encontrar y diferenciar - los cambios microestructurales que se pueden haber - producido.

3.3.2 VARIACIONES EN PROPIEDADES MECANICAS

ENSAYOS MECANICOS

Debido a que el ensayo anterior si bien nos permite obtener una gama de información sofisticada, tales como la temperatura máxima T_p , ancho de la zona afectada por el calor, un punto en la zona afectada por el calor, etc, desafortunadamente no nos permite hacer ensayos mecánicos macroscópicos para poder obtener información de las variaciones de las propiedades mecánicas.

Es muy importante recalcar, que como análisis complementario estamos interesados en analizar el efecto del fenómeno de la sensibilización sobre las - propiedades mecánicas del material afectado. Para

lograr este objetivo, existe otro experimento complementario que consiste en construir tres ensambles mecánicos utilizando para el efecto el mismo material base, objeto de este estudio, cortando por medio de cizalla tres platinas de 7,62 cm. por 30,48 cm., a las que se les esmerila los bordes para remover las irregularidades producidas en el momento del corte. Se lo limpia perfectamente de cualquier cuerpo extraño tales como grasas, óxidos, etc., se los coloca uno al lado del otro de tal manera que cuando se efectúe el proceso de soldado con los parámetros de soldadura preseleccionados (grupo de amperaje, voltaje y velocidad que producan la menor sensibilización) haya una buena penetración; Fig. #19 Para tratar de evitar o minimizar cualquier deformación que pudiere ocurrir cuando se efectua la soldada, ya que la platina es de solo 3mm. de espesor, se usarán prensas para sostener a éstas contra la mesa. Se procedió después a tomar radiografías, para ver si hubo una buena penetración; constatado ésto, procedimos a seleccionar las probetas para los diferenes ensayos como se indica en la fig. #19

Para la prueba de tracción cortamos dos probetas de cada uno de los ensambles; dándole sus dimensiones fi--

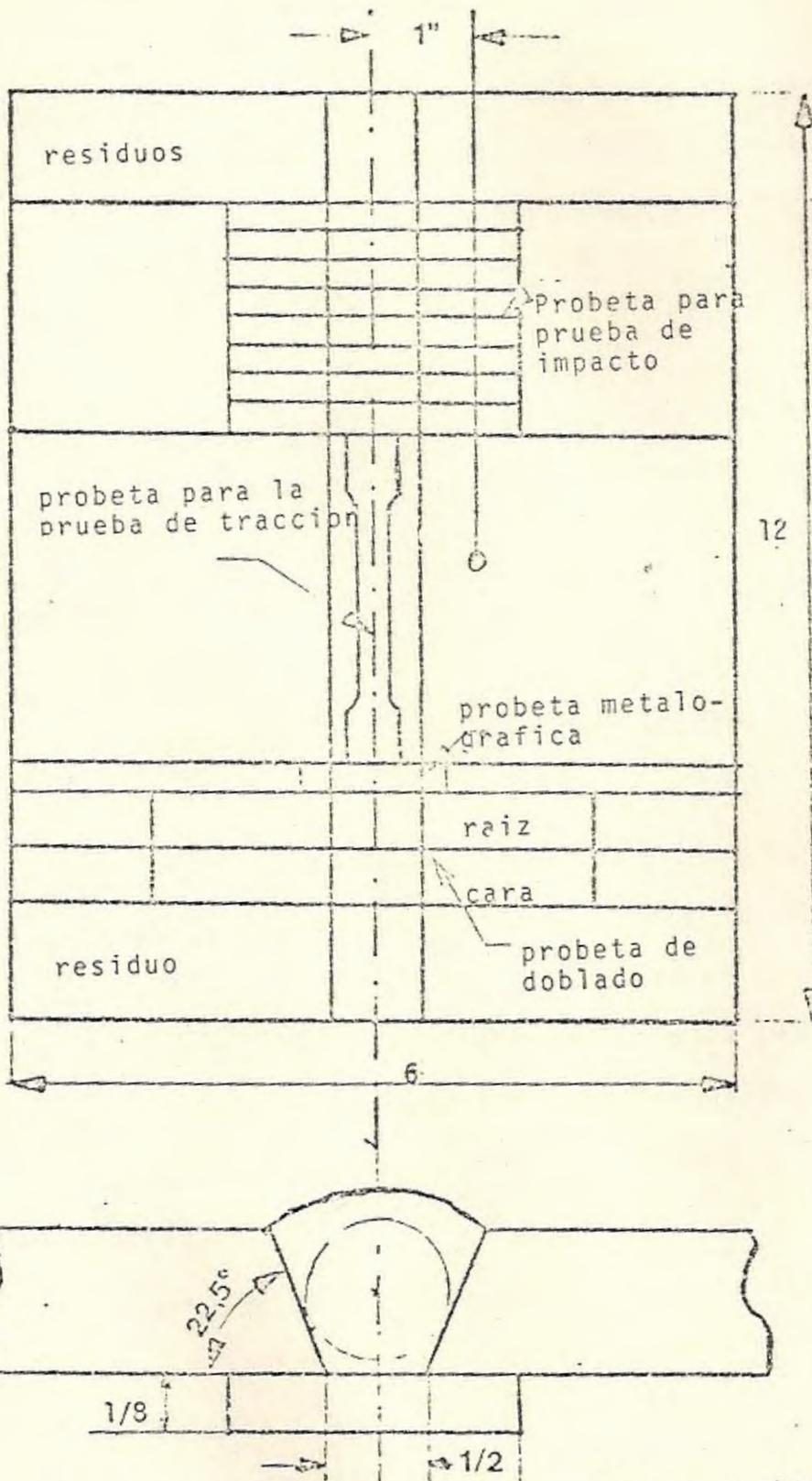


Fig. 19 Ensamble mecánico para obtener probetas para las pruebas de tracción, doblado, impacto y microdureza.

nales por medio de una rectificadora y entregada a el laboratorio de sólidos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral para este tipo de ensayos.

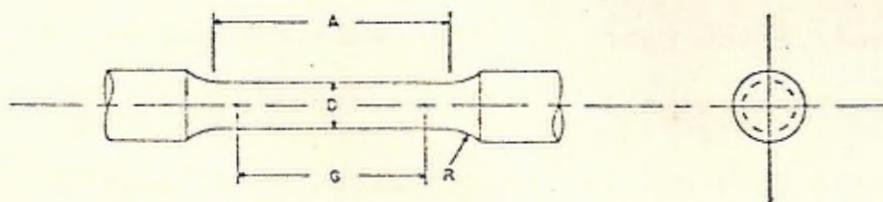
3.3.2a PRUEBA DE TRACCION

Esta prueba es frecuentemente usada para evaluar las propiedades de ductilidad y resistencia del material, y para determinar que el material reuna ciertas especificaciones aplicables requeridas.

La principal técnica de aplicación de la prueba de tensión es la de la relación entre la carga y la extensión ó alargamiento.

Los datos básicos de la resistencia y ductilidad del material son generalmente obtenidos por pruebas a la tensión en la cual la probeta que ha sido convenientemente preparada se la someta a cargas que se van incrementando, mientras simultáneamente se hacen observaciones de la extensión lineal que pueda ocurrir. Fig. 20

Los resultados de estas pruebas sirven para hacer las curvas de tensiones donde la tensión nominal son calculados tomando como índice el área original y el espesor original de la probeta respectivamente. Las curvas reales de fatiga y deformación son obte-



DIMENSIONES

	Probeta Standard		Probetas pequeñas propor. a stand.	
	1/2"	0,350"	0,250"	
G - Largo	2,000 0,005"	1,400 0,005"	1,000 0,005"	
D - Diametro	0,500 0,010"	0,350 0,007"	0,250 0,005"	
R - Radio	3/8" min	1/4" min	3/16"min	
A - Largo de la seccion reducida	2 1/4" min	1 3/4" min	1 1/4" min	

FIG. # 20 PROBETA PARA PRUEBA DE TRACCION (13)

nidos usando los valores instantáneos de deformación, generalmente obtenidos por pruebas a la tensión en la cual la probeta que ha sido convenientemente preparada se la somete a cargas que se van incrementando, mientras simultáneamente se hacen observaciones de la extensión lineal que pueda ocurrir.

Los resultados de estas pruebas sirven para hacer las curvas de fatiga - deformación fig.#21 donde la fatiga nominal y la deformación nominal son calculadas tomando como índice el área original y el espesor original de las probetas respectivamente. Las curvas reales de fatiga y deformación son obtenidos usando los valores instantáneos de deformación y fatiga, y consecuentemente son más difíciles de obtener que la curva de fatiga - deformación.

En toda unión soldada la prueba de tracción es la que permite varias medidas cuantitativas de la resistencia y ductilidad del metal soldado. Sin embargo, es en la condición de soldado donde se encuentran muchas variables conocidas ó desconocidas, que nos llevan a obtener inconsistentes resultados de tracción aun teniendo electrodos de calidad uniforme o iguales. Además de el alargamiento y reducción en el área, un indicador de ductilidad es to--

CURVA DE LA PRUEBA DE TRACCION

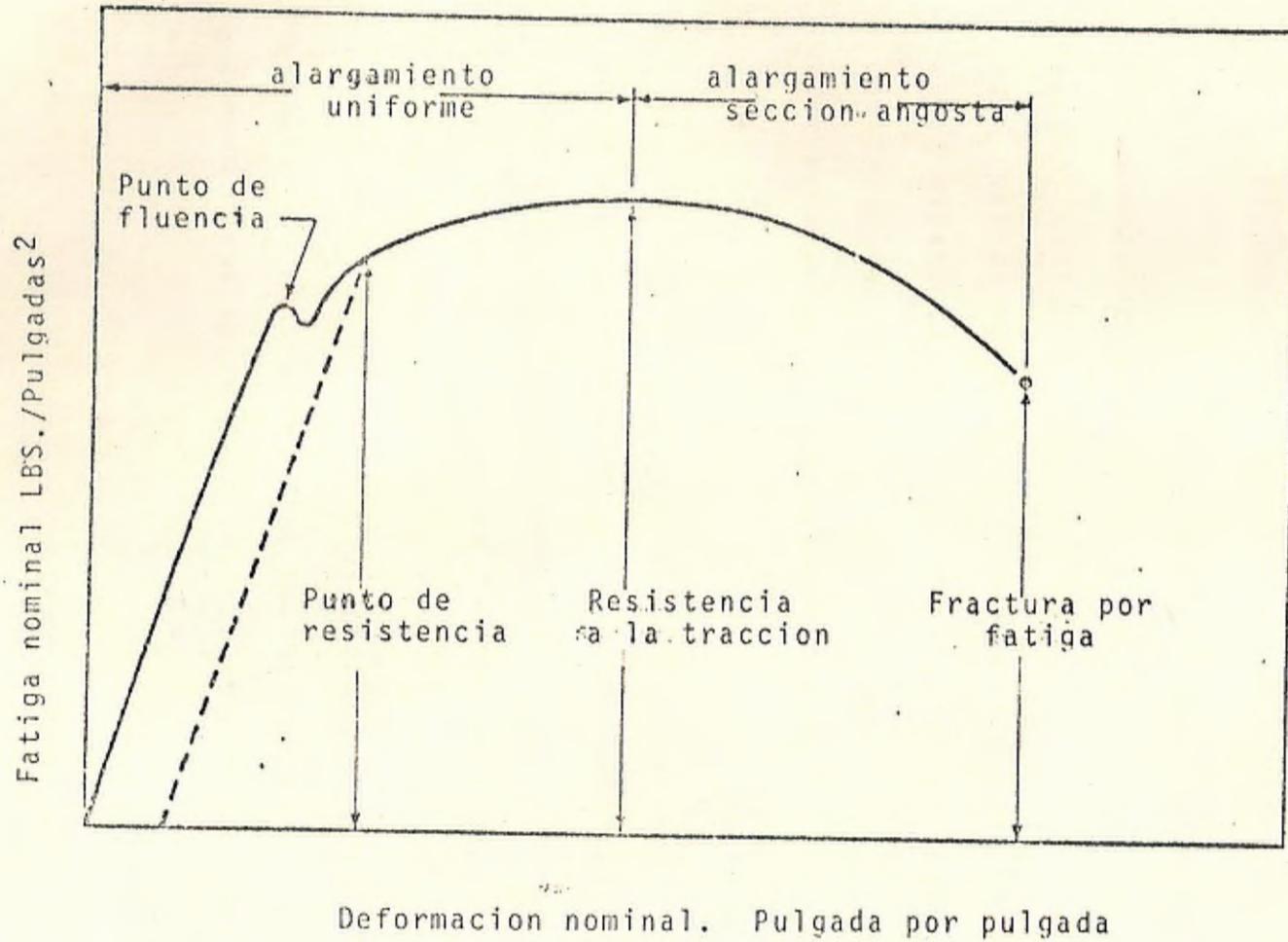


Fig. 21

CURVA DE PRUEBA DE TRACCION

mado algunas veces del producto de la tracción y el alargamiento. (13)

3.3.2b PRUEBA DE DOBLADO

Ordinariamente las pruebas de doblado están encaminadas a mostrar defectos ó proveernos de un sistema para evaluar la ductilidad de la unión soldada. Aunque aparentemente esta puede parecer una prueba muy sencilla, puede ser en cambio difícil de interpretar. Además mucho más dificultades se pueden encontrar para realizar estas pruebas debido a que no hay uniformidad de propiedades mecánicas a lo largo de la unión soldada. (13)

Para evaluar la ductilidad y la calidad de la soldadura en la unión soldada se pueden realizar varios tipos de doblados. Estos se los pueden hacer longitudinal o transversal a la unión soldada y se los puede doblar en tres o cuatro dobleses (doblado libre) o alrededor de un mandril de diámetro conocido (doblado guiado).

En este trabajo usaremos la prueba de doblado guiado para hacer las pruebas de doblado de cara y de raíz de las probetas. El aparato usado en esta prueba es mostrado en la fotografía. # 8

Se denomina generalmente a la parte superior de la

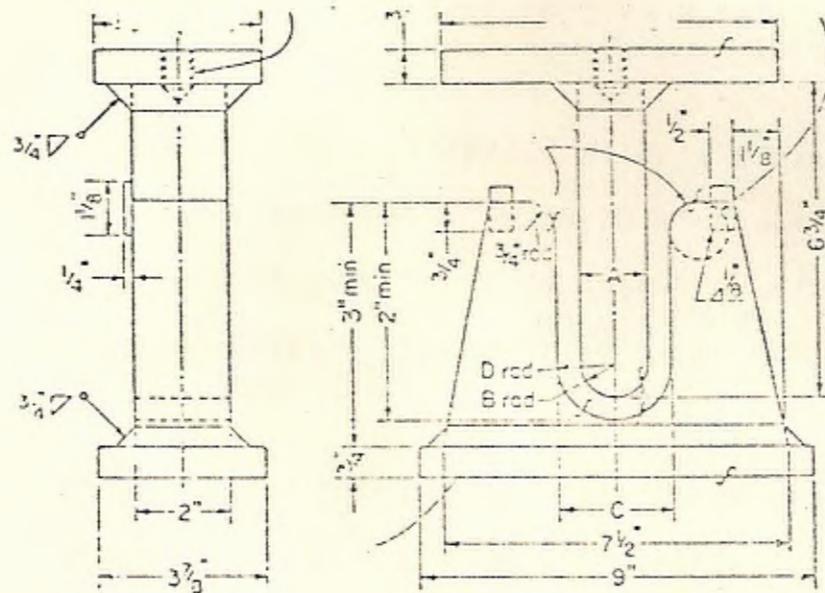
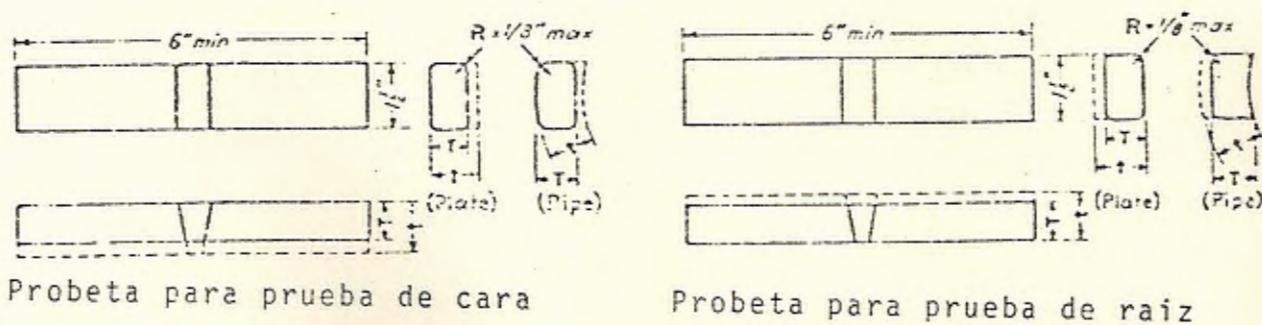


FIG. #22 GUIA PARA LA PRUEBA DE DOBLADO (13)



Probeta para prueba de cara

Probeta para prueba de raiz

FIG. #23 DIMENSIONES DE PROBETAS PARA LAS PRUEBAS DE DOBLADO (CARA Y RAIZ) (13)

unión soldada como la cara y el reverso ó parte de atrás como la raíz.

El doblado de cara tiene el cordón soldado mirando al lado cóncavo de la máquina donde se efectuará la prueba haciéndose algo parecido cuando se efectúa la prueba de raíz, o lo que es lo mismo que la cavidad convexa.

Los resultados de las pruebas de doblado son expresadas en varias formas: porcentaje de alargamiento, radio mínimo antes de haber ruptura, ángulo de doblado antes de ocurrir la falla, etc.

Al alargamiento se lo considera como la fuente de información más confiable y reproducible. El alargamiento producido en las capas exteriores en el radio exterior, es determinada por marcas que se han hecho en las probetas antes de someterlas a las pruebas de doblado, ó también se la puede hacer aproximadamente por la siguiente fórmula:

$$E = \frac{t}{2r + t} \times 100 \quad (11)$$

donde:

E = % de alargamiento

t = espesor inicial de la placa

r = radio de curvatura en la parte inferior del cor-

dón depositado.

Estas pruebas de doblado las cuales forzan deformaciones de todas las porciones de la unión soldada, revelan a menudo la presencia de defectos que no son detectados en las pruebas de tracción.

3.3.2c MICRO DUREZA

Para esta prueba se hicieron cortes transversales en cada uno de los ensambles mecánicos, procediéndose seguidamente a preparársela como si se fuera a hacerseles un exámen metalográfico, para lo cual hay que pulirlas primeramente y después atacarlas con agua regia para que muestren su microestructura, pudiéndose de esta forma diferenciar las tres zonas en las que se van a tomar los datos de microdureza; estas zonas son las del metal base, de la zona afectada por el calor y la zona de fusión. Estas pruebas fueron tomadas en el laboratorio de metalurgia de la Escuela Politécnica Superior del Litoral.

3.3.2d PRUEBA DE IMPACTO

Muchas clases de pruebas de fractura han sido encontradas que permitan predecir el comportamiento de los materiales bajo la influencia de tensiones impuestas por rajaduras o defectos en el material.

Entre estos metodos, la prueba de impacto de Charpy, ha sido usada satisfactoriamente para caracterizar la mayor o menor facilidad para quebrarse de un material, que va a ser utilizado en construccion de equipos principalmente.

Los resultados de las pruebas Charpy son comunmente reportadas en funcion de los valores de temperatura en transacion, loa cuales a su vez pueden ser obtenidos de datos de pruebas de uno o mas de las siguientes mediciones.

1) Mediciones de energia tales como las energias absorbidas a una temperatura particualr, enrgia maxima a 100% de la fractura de las fibras a maxima energia, o temperatura para un nivel particular de energia de impacto.

2) Medicion de las fracturas superficiales, las cuales pueden incluir la temperatura para un particular porcentaje de fibras del material.

3) Cambios dimensionales en la medicion de la probe-

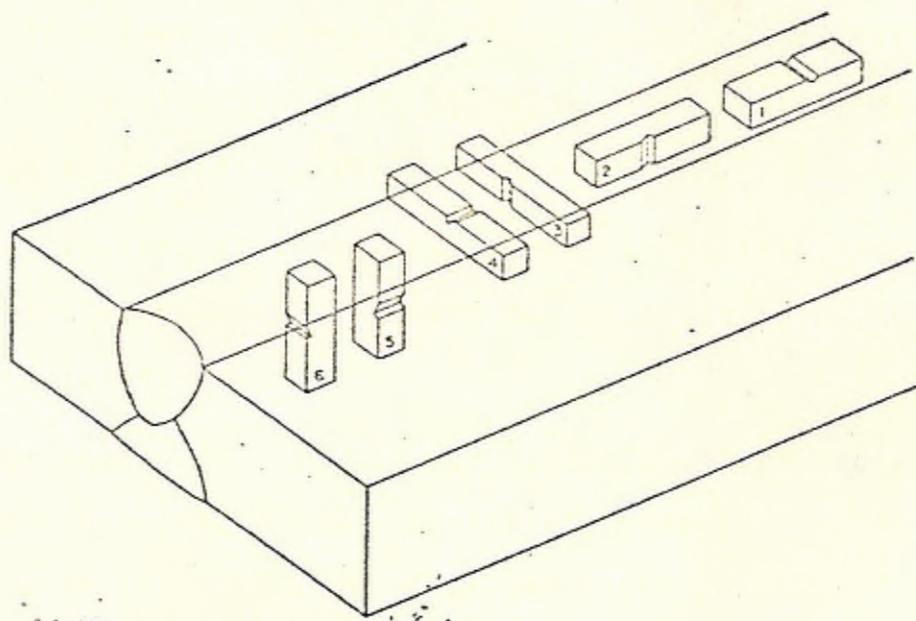


FIG. # 24.

PROBETA PARA PRUEBA DE IMPACTO

(13)

3.3.3. PARAMETROS IMPORTANTES DEL PROCESO

En los tres procedimientos preseleccionados para las pruebas que realizamos, para tratar de obtener el mejor sistema aplicable a la soldadura del acero inoxidable tipo AISI 304, se tomó en cuenta las dos variables más usuales en los procesos de soldadura por arco que son: intensidad de corriente dada en amperios (I), y, velocidad de recorrido dada en milímetros (S).

El voltage tiene relativamente muy limitada importancia, ya que éste varía muy poco con relación a la intensidad.

La intensidad (I), es una variable importante ya que ésta es la que suministra propiamente la fuente de calor al arco. La velocidad de recorrido con que se suelda es también de importancia vital en la soldadura, ya que a menor velocidad se tiene una mayor cantidad de calor suministrada en un menor espacio, en cambio que si aumentamos la velocidad y mantenemos la misma fuente de calor tenemos la misma cantidad de calor en un área mayor.

Todo esto se representa en la Tb 12 donde hay columnas para cada una de estas variables empleadas en el proceso con la correspondiente columna de los -

TABLA # 12 . PARAMETROS DE SOLDADURA USADOS EN EL PROCESO DE ELECTRODO REVESIDO

PROBETA	V VOLTAJE	I AMPERIOS	S VELOCIDAD mm/s	H.I.
101x	20	100	1,69	1.183,4
102x	20	100	2,54	787,4
103x	20	100	3,38	591,7
104x	22	100	4,23	472,0
105x	22	100	5,08	393,7

resultados obtenidos.

3.3.4 PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA

Los aceros inoxidable se sueldan con las mismas técnicas que se utilizan en los aceros ordinarios.

Debido a la influencia del procedimiento de soldadura y condiciones de soldado en los ciclos térmicos, oxidación, presentación de la zona de sensibilización y presencia de defectos mecánicos en el metal soldado, estos pueden tener un dominante efecto en sus propiedades.

En el caso de los aceros inoxidable tipo AISI 304, los ciclos térmicos que serán expuestos durante el proceso de soldadura pueden traer cambios en su composición química en la zona que se la denomina con el nombre de sensibilizada, la que con el tiempo puede afectar a sus propiedades físicas y mecánicas porque se puede producir la corrosión intergranular en la zona sensibilizada.

En principio, son aceptables todos los procedimientos de soldadura por fusión en atmósfera protegida. Así pues disponemos de un amplio campo para elección de un procedimiento y de las condiciones de ejecución, para sacar partido del material disponible y

y obtener el mayor rendimiento.

Sin embargo, unos procedimientos se adaptan mejor que otros para obtener, en cada caso, un conjunto de la mejor calidad. Los factores que determinan esta elección son esencialmente:

- 1- El tipo de unión a realizar: forma de la unión
cualidades en servicio, aspecto del cordón.
- 2- El espesor.
- 3- El tipo de las piezas a soldar.

Todos los procedimientos deberán satisfacer a la triple regla:

- 1.- Disminuir la resistencia a la corrosión, y
- 2.- Alterar las propiedades físicas y mecánicas del metal, debido a la modificación superficial de su estructura metalúrgica.
- 3.- Evitar la inclusión de carbono en la soldadura: este elemento combina a altas temperaturas con el cromo para formar carburo de cromo en los bordes de los granos, empobreciendo localmente el metal en el cromo. (7)

Así pues hay que excluir los electrodos de carbono, los revestimientos con contenido de carbono superior a 0,03%.

En el caso de soldadura con arco sumergido, el fundente no deberá contener más de 0,03% de carbono.

4.- Regular el régimen térmico: es preciso la aportación de calor y favorecer la evacuación de las calorías a medida que se suelda. El empleo de un agente de refrigeración después de la soldadura es totalmente ilusorio, ya que el agrandamiento del grano (caso del 17% Cr) es muy rápido y la precipitación de los carburos se produce durante la misma fusión.

Tomando en cuenta estos procedimientos se procede a preparar las probetas de deposición libre del cordón y las de los ensambles mecánicos con los sistemas de soldaduras preseleccionados que como hemos anotado anteriormente son los de SMAW, TIG y MIG que seguidamente las usamos para hacer los exámenes metalográficos las primeras y ensayos mecánicos las segundas.

RESULTADOS

4.1. DEPOSICION LIBRE DEL CORDON SOLDADO

Una vez depositado el cordón sobre la superficie de la probeta por los diferentes procedimientos de soldadura, se procedió a hacer cortes transversales en cada una de las probetas para efectuar un análisis metalográfico para tener información de:

Análisis metalográfico:

Tamaño del área de la sección transversal

Ancho de la zona afectada por el calor

Microdureza de las diferentes zonas de la unión soldada

Temperatura máxima (T_p)

Calor suministrado

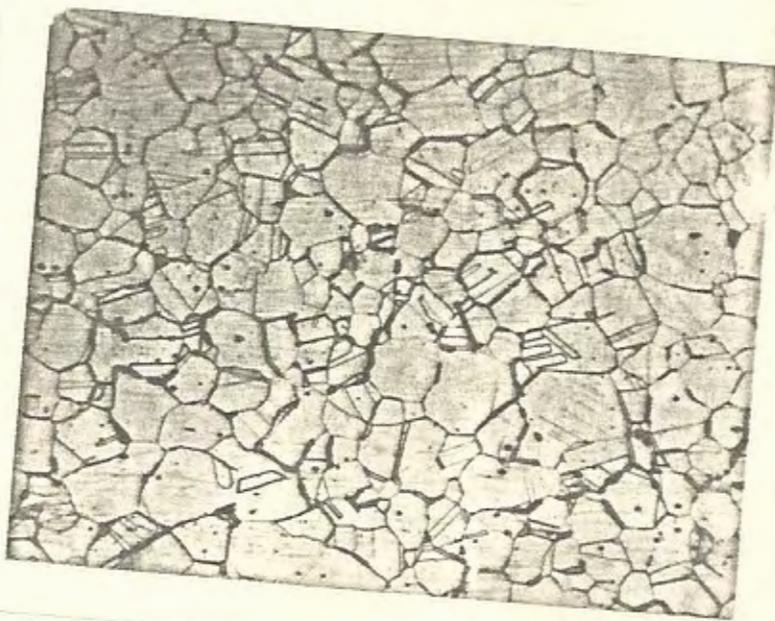
Amperaje, voltaje y velocidad de movimiento del arco

Ancho de la zona afectada por el calor

Etc. Tabla #13

RELACION DEL CALOR SUMINISTRADO CON LA ZONA SENSIBILIZADA.

Tomamos 15 probetas para hacer las pruebas de deposición libre: cinco por cada proceso que estamos



MICROFOTOGRAFIA # 3

PROBETA 105 X

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304.

Parametros de soldadura de electrodo revestido.

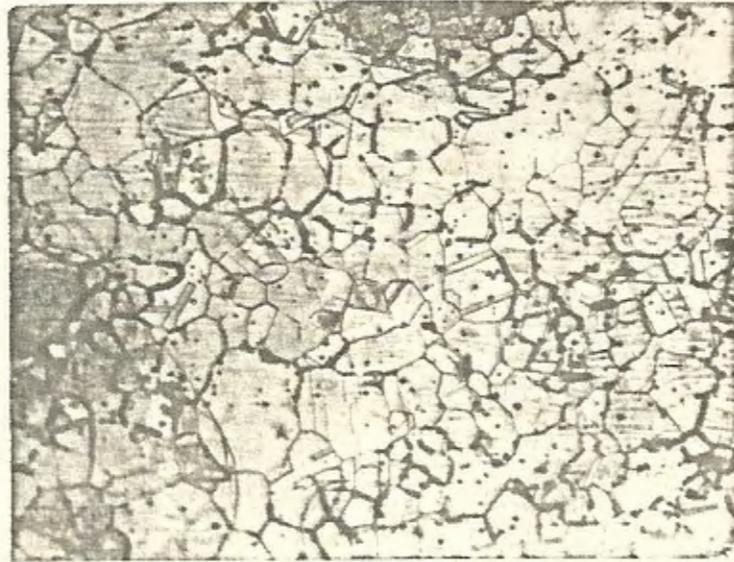
Intensidad: (I) = 100 Amp.

Voltage: (V) = 20 Volt.

Velocidad: (S) = 5,08 mm./seg.

Aumento = 200

Resultado de la observación: Poca precipitación de los carburos de cromo en los bordes del grano.



MICROFOTOGRAFIA # 4

PROBETA 103 X

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304.

Parametros de soldadura de lectrodo revestido

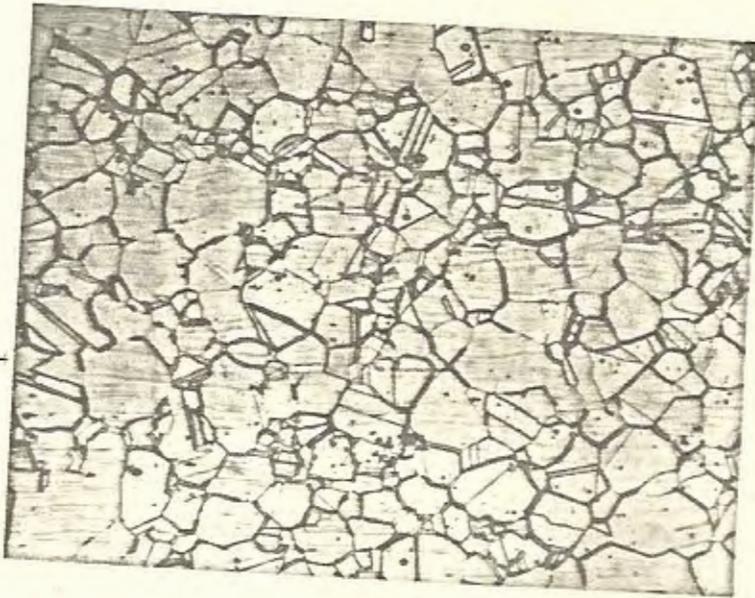
Intensidad (I) = 100 Amp.

Voltage (V) = 20 Volts.

Velocidad (S) = 3,38 mm./seg.

Aumento = 200 X

Resultado de la observación: Se puede notar una mayor precipitación de carburos en los bordes del grano.



MICROFOTOGRAFIA # 5

PROBETA 101 X

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304

Parametros de soldadura electrodo revestido

Intensidad: (I) 100 Amp.

Voltage: (V) 20 Volts.

Velocidad: (S) 1,69 mm/seg.

Aumento: 200 X

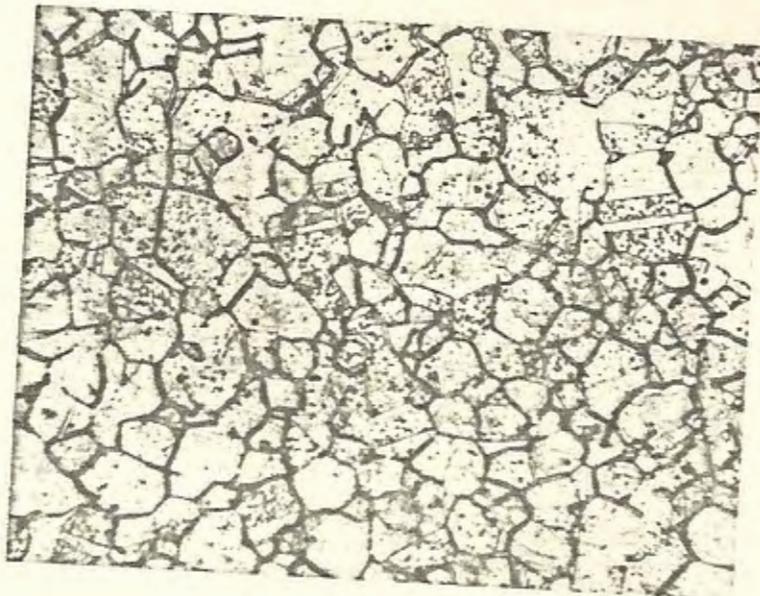
Resultados de la observación: En el proceso de soldadura con electrodo revestido es donde más se nota la precipitación de carburos de cromo en los bordes del grano.

Terminado los análisis del proceso de electrodo re vestido, pasamos a analizar las probetas efectuadas con el proceso TIG, tomando primeramente la probeta 101 para someterla al exámen metalográfico, ésta muestra una notoria precipitación de carburos de cromo en los bordes del grano, como lo demuestra la microfotografía.

Siguiendo con el análisis de las siguientes probetas podemos observar que mientras mayor fué la velocidad de la fuente de calor que se empleó en la deposición libre, menor fué la cantidad de calor suministrado, y, menor la precipitación de carburos.

En las micro - fotografías de las probetas 101x, - 103x y 105x podemos apreciar como disminuye la precipitación de los carburos de cromo a medida que disminuyó la cantidad de calor suministrado.

Pasamos luego a analizar las probetas del proceso TIG. Como en los casos anteriores, tomamos primero la probeta 101z, la cual al someterla al análisis metalográfico nos muestra una precipitación acen-- tuada de carburos de cromo en los bordes del grano, como lo podemos apreciar en la micr-fotografía #6 Siguiendo con el análisis de las siguientes probetas podemos observar que mientras mayor fué la ve-



MICROFOTOGRAFIA # 6

PROBETA 101 Y

Material utilizado: Acero inoxidable Tipo AISI 304.

Parametros de soldadura:TIG

Intensidad: (I) = 110 Amp.

Voltage: (V) = 22 Volt.

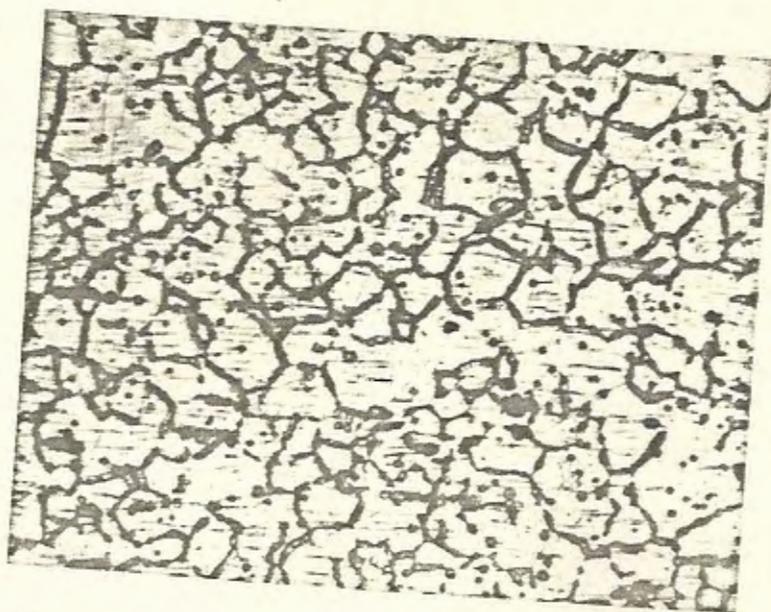
Velocidad: (S) = 1,69 mm./seg.

Resultado de la observación: Se nota una marcada precipitación de carburos en los bordes del grano.

locidad de la fuente de calor que se empleó en la deposición libre, menor fué la cantidad de calor-suministrado, y, menor la precipitación de carburos.

En las micro-fotografías de las probetas 101z, - 103z y 105z podemos apreciar como disminuye la precipitación de los carburos de cromo que hubo a las diferentes cantidades de calor suministrado, de manera descendente.

Para ampliar este estudio de la deposición libre del cordón soldado, hicimos otras probetas en láminas ó platinas de 2mm de espesor y solamente con el proceso de electrodo revestido. En estas probetas nos fué difícil localizar la zona sensibilizada con el lente de 200x de aumento, encontrándolas de una manera no muy clara con el lente de 1000x de aumentos, como lo podemos observar en las fotos 9, 10 y 11 comprobando con ésto lo que vimos en el capítulo de corrosión, que dice que en láminas menores de tres milímetros no hay casi ninguna sensibilización debido a que el tiempo en el rango de sensibilizado es lo suficientemente corto como para no causar corrosión intergranular en medios particularmente no selectivos ó agresivos a los aceros inoxidables. (2)



MICROFOTOGRAFIA # 9

PROBETA 101 Z

Material utilizado: Acero inoxidable Tipo AISI 304.

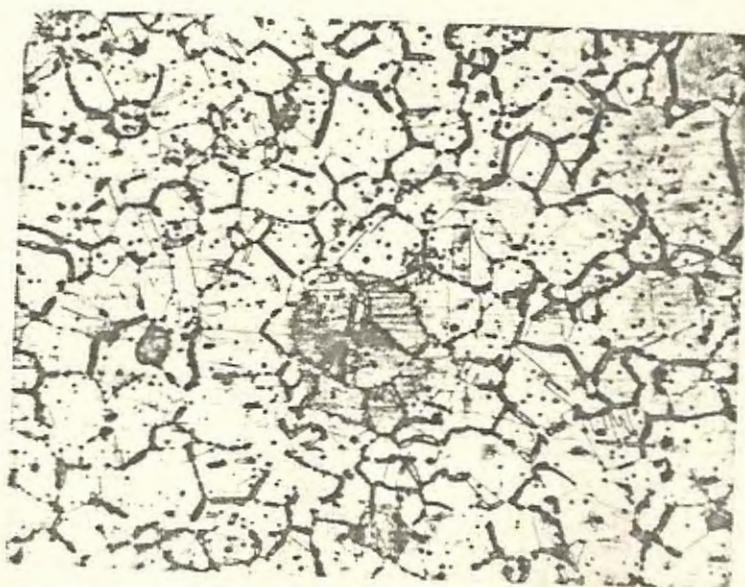
Parametros de soldadura : MIG

Intensidad: (I) = 120 Amp.

Voltage: (V) = 24 Volts.

Velocidad: (S) = 2 mm./seg.

Resultado de la observación: Se nota una gran precipitación de carburos de cromo en los bordes del grano.



MICROFOTOGRAFIA # 10

PROBETA 103 Z

Material utilizado: acero inoxidable Tipo AISI 304.

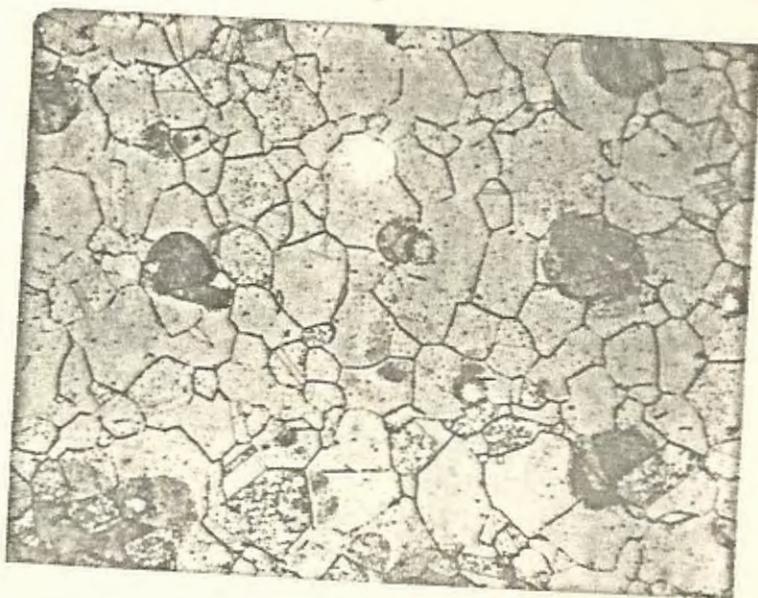
Parametros de soldadura MIG.

Intensidad: (I) = 120 Amp.

Voltage: (V) = 24 Volts.

Velocidad: (S) = 3,38 mm./seg.

Resultado de la observación: Se nota una notoria precipitación de carburos de cromo en los bordes del grano.



MICROFOTOGRAFIA # 11

PROBETA 105 Z

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304.

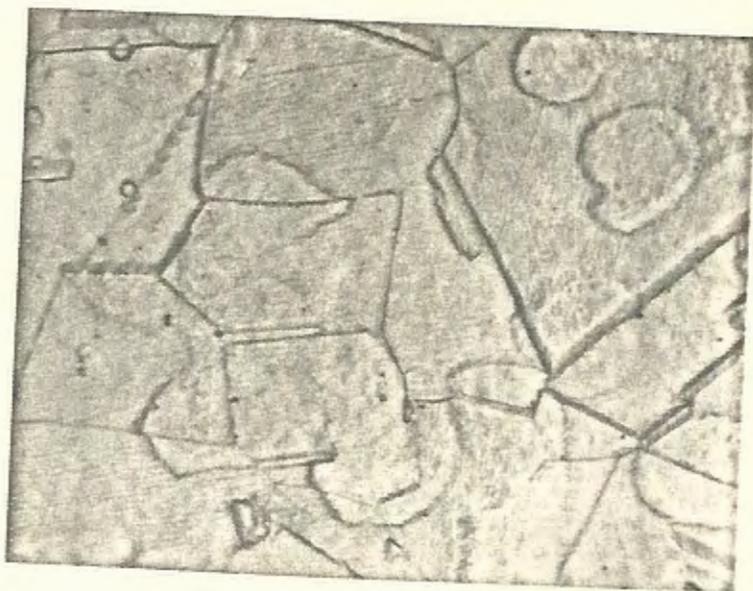
Parametros de soldadura: MIG.

Intensidad: (I) = 120 Amp.

Voltage: (V) = 24 Volts.

Velocidad: (S) = 5,08 mm./seg.

Resultados de la observación: Se nota una poca precipitación de los carburos de cromo en los bordes del grano.



MICROFOTOGRAFIA # 12

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304
de 2 mm. de espesor.

Parametros de soldadura con electrodo revestido.

Intensidad: (I) = 80 Amp.

Voltage: (V) = 20 Volts.

Velocidad: (S) = 3,38 mm./seg.

Aumento: = 1.000 X

Resultados de la observación: Casi ninguna pre -
cipitación de carburos de cromo.



MICROFOTOGRAFIA # 13

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304
de 2 mm. de espesor.

Parametros de soldadura con electrodo revestido.

Intensidad: (I) = 80 Amp.

Voltage: (V) = 20 Volts.

Velocidad: (S) = 5,08 mm./seg.

Aumento = 1.000 X

Resultados de la observación: Una insignificante
precipitación de carburos de cromo.

4.2. PROPIEDADES MECANICAS DE LA UNION SOLDADA

Para determinar las propiedades mecánicas de la unión soldada, se prepararon tres ensambles mecánicos, como lo hemos descrito anteriormente con los parámetros de soldadura que dieron los mejores resultados en las pruebas de deposición libre, de los procesos de electrodo revestido TIG y MIG.

En el proceso TIG no se pudo seguir este delineamiento porque para hacer una buena unión no se pudo ir a la velocidad con la cual se había obtenido la menor precipitación de carburos de cromo, sino, por lo contrario tubo que hacérsela con la menor velocidad empleada en nuestro estudio de la deposición libre para poder obtener una buena unión soldada y que por lo mismo es la que mayor precipitación de carburos nos produce. En la tabla tenemos los datos de los parámetros empleados y los resultados obtenidos en el área de la seccion transversal, temperatura máxima, zona sensibilizada, ancho de la zona afectada por el calor, etc. Tabla # 14

Las radiografías de las uniones soldadas, nos muestran que estas fueron generalmente aceptables en los tres ensambles. En las probetas ya pulidas y atacadas para el exámen metalográfico se comprueba

DATOS DE RESULTADOS EN EL ENSAMBLE MECANICO

TABLA #14

Probeta	I amp	V volts	S mm/s	H I J/mm	NA med./mm ²	NA	Yz mm. ²	T _p C	Ancho ZAC mm.
101 x	100	20	5,08	393,7	9,8	9,6	4,0	780	15,96
101 y	110	22	1,80	1,344.4	2,8	3,0	1,1	1.325	54,50
101 z	120	24	5,08	566,9	15,5	16,7	1,9	1.135	22,9

5

1.



5

2.

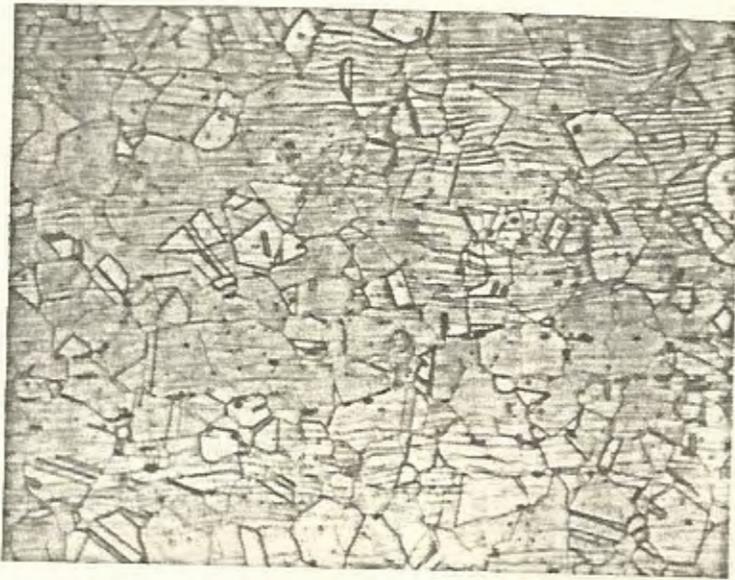


5

3.



RADIOGRAFIAS DEL ENSAMBLE MECANICO. 1. Proceso de electrodo revestido. 2. Proceso TIG. 3. Proceso MIG



MICROFOTOGRAFIA # 14

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304.
de 3 mm. de espesor.

Parametros de soldadura con electrodo revestido.

Intensidad: (I) = 100 Amp.

Voltage: (V) = 20 Volts.

Velocidad: (S) = 5,08 mm./seg.

Aumento: = 200 X

Resultados de la observación: Se puede notar cierta precipitación de los carburos de cromo.



MICROFOTOGRAFIA # 15

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304
de 3 mm. de espesor.

Parametro de Soldadura TIG.

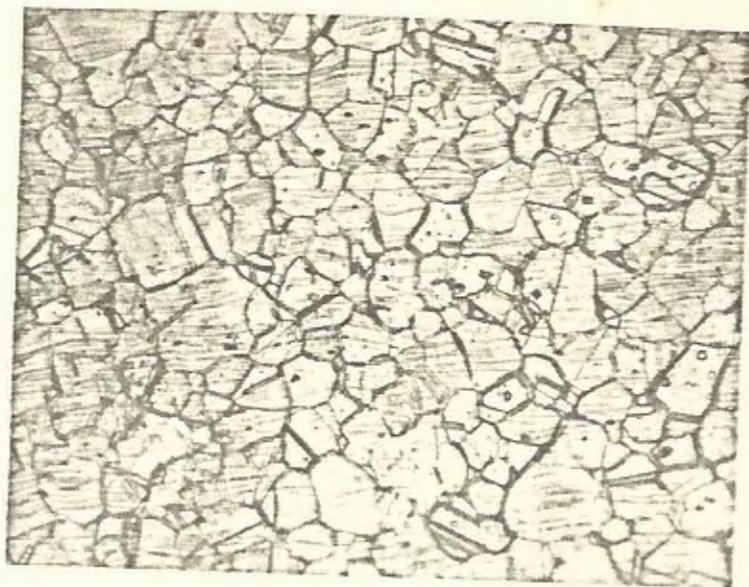
Intensidad: (I) = 110 Amp.

Voltage: (V) = 22 Volt.

Velocidad: (S) = 1,69 mm./seg.

Aumento: = 200 X

Resultados de la observación: Se presenta una muy no
toria precipitación de los carburos de cromo en los
bordes del grano.



MICROFOTOGRAFIA # 16

Material utilizado: Acero inoxidable tipo AISI 304
de 3 mm. de espesor.

Parametros de soldadura: MIG.

Intensidad: (I) = 120 Amp.

Voltage: (V) = 24 Volts.

Velocidad: (S) = 5,08 mm./seg.

Aumento: = 200 X

Resultados de la observación: Se puede notar la pre
cipitación de carburos de cromo.

una vez más que en los procesos de soldadura MIG y TIG hay una mayor precipitación de los carburos de cromo que en el de electrodo revestido como lo podemos apreciar en las fotos 14,15 y 16 que corresponden a cada uno de los ensambles mecánicos con el respectivo proceso empleado.

PRUEBA DE DUREZA

Para estas pruebas usamos las mismas probetas que empleamos para los ensayos metalográficos. Para éstos usamos la máquina de tomar dureza Vickers. Estos resultados los encontramos en la tabla #14

PRUEBA DE DOBLADO

Analizando los resultados de la tabla #15, se puede apreciar que ninguna de las probetas presenta fisuras en las pruebas de cara ó raíz, además se encuentra un factor muy importante y es de que "la zona sensibilizada mantiene su ductilidad" lo que nos indica que la precipitación de carburo de cromo no altera notablemente las propiedades mecánicas del material en estudio, lo cual coincide con resultados obtenidos por otros investigadores que han trabajado con este mismo acero.

(Omar Serrano /Marcelo Moncayo).

TABLA DE DUREZA VICKERS

ENSAMBLES MECANICOS

PROBETA	ZAC	M. BASE	ZONA DE FUSION
101 x	177	155	206
101 y	177	155	190
101 z	184	155	198

TABLA #15

DATOS DE LA PRUEBA DE DOBLADO

PROBETA No.	DIMENSIONES		SIN FISURA	CON FISURA
	LARGO cm.	ANCHO cm.		
101 x	15,24	2,54	X	
102 x	15,24	2.54	X	
101 y	15,24	2,54	X	
102 y	15,24	2.54	X	
101 z	15,24	2.54	X	
102 z	15,24	2,54	X	

PRUEBAS DE TRACCION

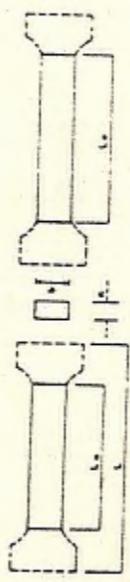
Para esta prueba tomamos de cada ensamble mecánico dos probetas que fueron maquinadas a las dimensiones requeridas para esta clase de ensayos. Fig .

Los resultados los tenemos en la tabla No.17-8 según estos resultados podemos decir "que no hay una variación grande entre los diferentes resultados obtenidos de las probetas soldadas y la testigo", por lo que bien podríamos decir que las características mecánicas del metal base, objeto de este estudio, no tienen variación cuando se la somete al proceso de soldadura, sin importar el proceso empleado, aunque centrando esta conclusión a los tres procesos empleados en este estudio, que como está dicho son el de electrodo revestido, TIG y MIG.



F.S.P.O.L.
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
 Apartado: 5803 - Guayaquil - Ecuador.

ENSAYOS DE TRACCION

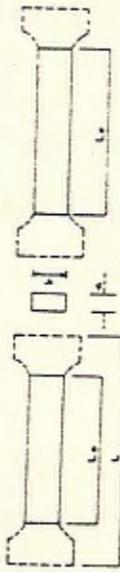


PROBETA	SIN SOLDADURA			SOLDADA		Condición de la probeta	Límite de fluencia kg/mm ²	Resistencia a tracción, kg/mm ²	Resistencia a rotura, kg/mm ²	Elongación o/o
	DIMENSIONES DE PROBETA									
	d (mm)	b (mm)	S ₀ (mm ²)	L (mm)	L ₀ (mm)					
101x	3,00	14,50	43,50	35,00	35,00	Soldada	1.550	2.760	2.550	52,04
102x	3,00	14,50	43,50	35,00	35,00	Soldada	1.520	2.600	2.300	42,00
101y	3,00	14,50	43,50	35,00	35,00	Soldada	1.600	2.760	2.350	52,24
102y	3,00	14,50	43,50	35,00	35,00	Soldada	1.700	2.680	2.500	45,60
101z	3,00	14,50	43,50	35,00	35,00	Soldada	1.500	2.330	2.250	42,56
102z	3,00	14,50	43,50	35,00	35,00	Soldada	1.600	2.800	2.650	50,64
100	3,00	14,50	43,50	35,00	35,00	Testigo	1.600	2.770	2.350	51,75



E S P O L
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
 Apartado: 5863 - Guayaquil - Ecuador.

ENSAYOS DE TRACCION



PROBETA	SIN SOLDADURA		SOLDADA		Condición de la probeta	Límite de fluencia kg/mm ²	Resistencia a tracción, kg/mm ²	Resistencia a rotura, kg/mm	Elongación en %
	DIMENSIONES DE PROBETA								
	a (mm)	b (mm)	S ₀ (mm ²)	L ₀ (mm)					
101x	3,00	14,50	43,50	35,00	Soldada	35,63	63,44	58,62	48,68
102x	3,00	14,50	43,50	35,00	Soldada	36,09	63,44	52,87	35,77
101y	3,00	14,50	43,50	35,00	Soldada	36,78	63,44	54,02	49,17
102y	3,00	14,50	43,50	35,00	Soldada	39,08	61,60	57,47	30,28
101z	3,00	14,50	43,50	35,00	Soldada	34,48	53,56	51,72	31,60
102z	3,00	14,50	43,50	35,00	Soldada	36,78	64,36	60,91	44,40
100	3,00	14,50	43,50	35,00	Testigo	38,91	62,24	57,16	45,92

PRUEBA DE IMPACTO

En esta prueba se espera obtener datos de impactos de las probetas que se preparen, lo cual nos podra dar mayores elementos de juicio para dar una apreciacion mas concreta acerca de si hay o no variaciones en las propiedades finales de la union soldada de los aceros inoxidables tipo AISI 304 en nuestro caso.

Para realizar esta prueba es requisito indispensable tener laminas o platinas con un minimo de 10mm. de espesor, material que fue imposible encontrar en nuestro medio, debido a nuestras propias limitaciones de mercado. Por esta circunstancia no se pudo efectuar este tipo de analisis en este estudio; pero en la tabla # 8 (10) encontramos datos de las propiedades de impacto de algunos aceros inoxidables que han sido sometidos a procesos de soldadura y entre estos tenemos al tipo AISI 304 objeto de este trabajo.

CAPITULO
VCONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES5.1. CONCLUSIONES

Analizando los resultados metalográficos de los diferentes procesos desarrollados en los laboratorios de meturgia y de sólidos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, podemos determinar que el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido es el más adecuado para realizar trabajos empleando el acero inoxidable tipo AISI 304, aunque en principio son aceptables todos los procedimientos de soldadura por fusión en atmósfera protegida. Así pues disponemos de un amplio campo para la elección de un procedimiento y de las condiciones de ejecución, para sacar partido del material disponible y obtener un mayor rendimiento.

Sin embargo, unos procedimientos se adaptan mejor que otros para obtener en cada caso, un conjunto de la mejor calidad.

Los factores que determinan esta elección son esencialmente: el tipo de la unión a realizar, forma de la unión, cualidades en servicio, aspecto -

del cordón, espesor, etc.

Es de gran importancia que el procedimiento seleccionado cumpla tres requisitos básicos como:

- a) Buena protección del baño contra la oxidación, que ayuda a minimizar la pérdida de cromo, para así obtener una mayor protección contra la corrosión y también colabora en la disminución de la alteración de las propiedades físicas y mecánicas del metal, debido a la modificación superficial de su estructura metalúrgica.
- b) Evitar la inclusión de carbono en la soldadura ya que este elemento se combina con el cromo a altas temperaturas formando los carburos de cromo en los bordes del grano.
- c) Regular el régimen térmico ya que es preciso limitar la aportación de calor y favorecer la evacuación del mismo limitando así la precipitación de carburos.

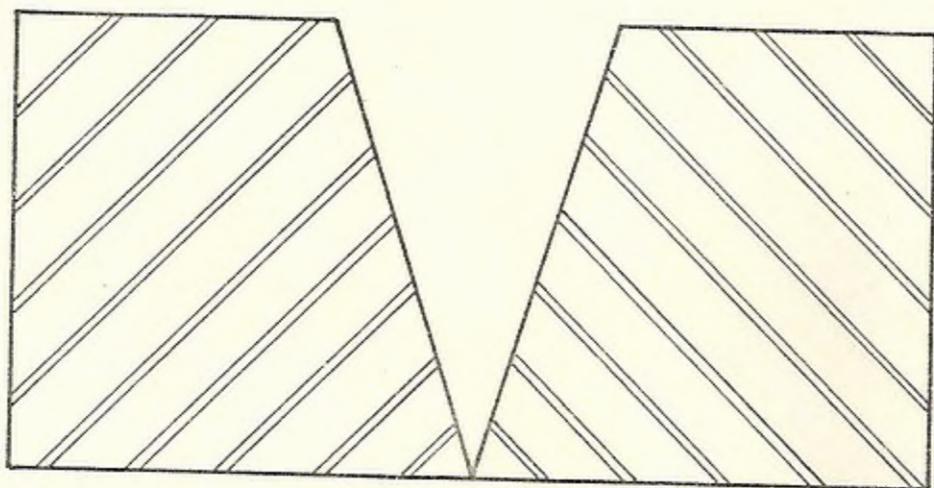
Por lo tanto, analizando las cualidades mencionadas anteriormente, y con los datos de los resultados obtenidos en este trabajo, podemos deducir que la soldadura por arco con electrodo revestidos es la más apropiada por ser también rápida y de empleo muy flexible con todos los tipos de aceros inoxidable.

5.2. RECOMENDACIONES

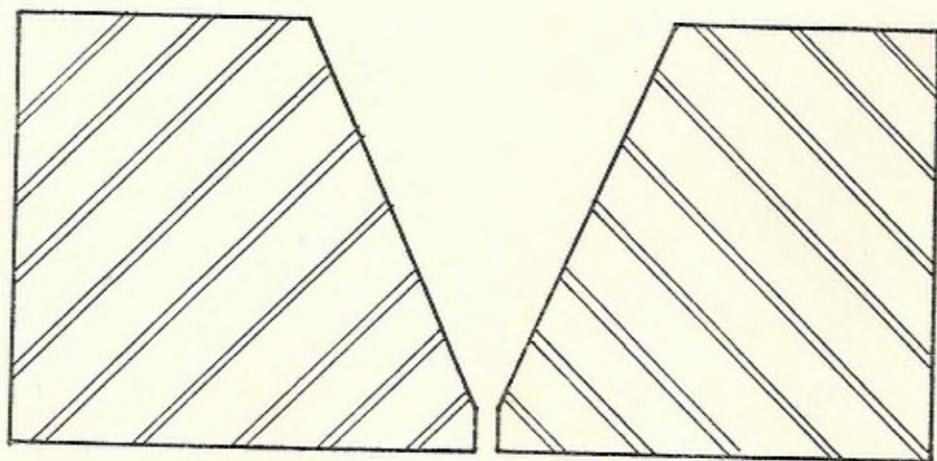
Una vez seleccionado el proceso más adecuado para la aplicación de soldadura en los aceros inoxidable tipo AISI 304, el cual es como se dijo en la sección anterior, el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido, el cual prácticamente ha desplazado a la soldadura por soplete cuando el material es de un espesor superior a un 1 mm., porque es más rápido, provoca menos deformaciones y dá un cordón de forma más vistosa. Por otra parte, permite una preparación menos rigurosa que los procedimientos TIG y MIG. Para obtener resultados más satisfactorios con este proceso debemos comenzar excluyendo los electrodos de carbono, los revestimientos con contenidos de carbono superior a 0,03%, aplicar el menor amperaje necesario para obtener un buen cordón, utilizar la mejor velocidad posible en el avance, hacer la mejor posible preparación de juntas, limpiar ó dejar libre de impurezas el área donde se va a depositar el cordón de soldadura, procurar que el electrodo revestido esté desprovisto de humedad.



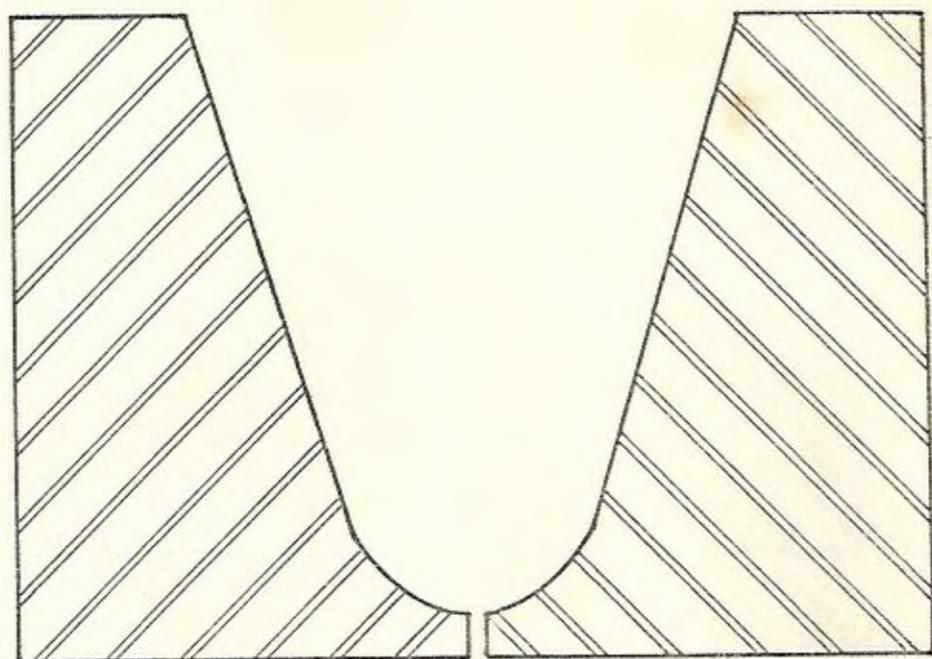
FOTO #9 Probetas de los ensayos de traccion.



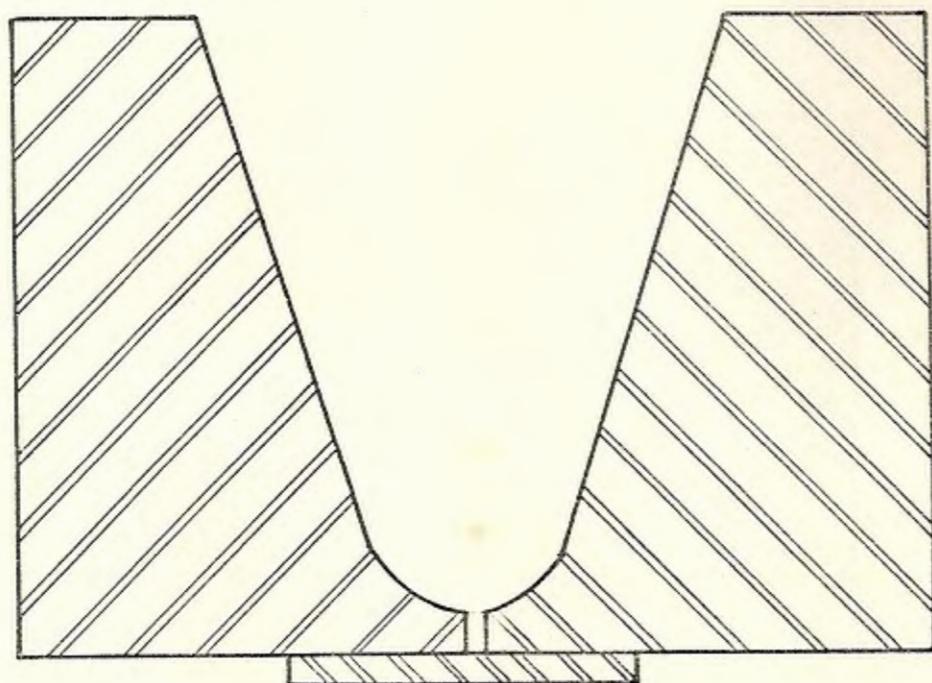
CORTE EN FORMA DE V



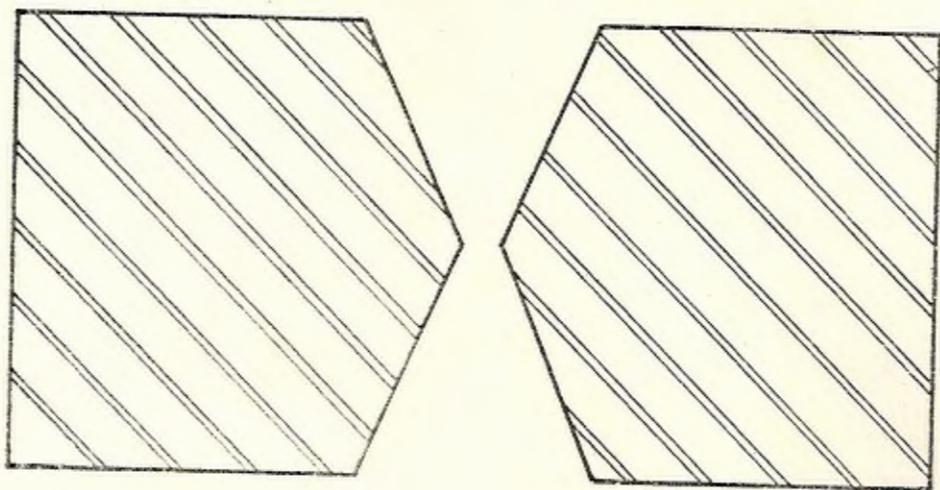
CORTE EN FORMA DE V



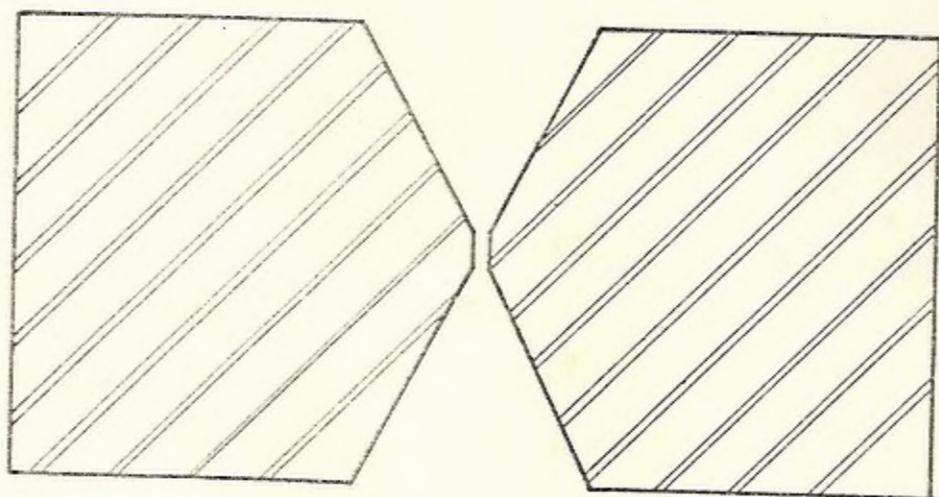
CORTE EN FORMA DE U



CORTE EN FORMA DE U



CORTE EN FORMA DE DOBLE V



CORTE EN FORMA DE DOBLE V

REFERENCIAS

1. V. J. COLANGELO - F. A. HAISER, Analisis of Metallurgical Failures.
2. FONTANA - GREENE, Corrosion Engineering, U.S.A. MacGraw Hill, 1967
3. UNITED STATES STEEL, Fabrication of Uss Steel, 1972
4. AUNER, S. H., Introduccion a la Metalurgia Fisica, España, Madrid, 1966
5. T. B. JEFFERSON, Metals and how to weld them
6. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, Tomo #7 Metalography Estructure eight edition, 1973
7. F. DELATTRE - E. URMO, Soldadura de los aceros Inoxidables, Urmo - España, 1967
8. LIONEL MARKS, Standard Handbook for Mechanical Engineer, U.S.A. MacGraw Hill, 1967
9. AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook tomo #1 1972
10. AMERICAN WELDING SOCIETY, Metals and Their Weldability, Tomo #4, 1972
11. A. C. ADAMS JR., Cooling Rates and Peak Temperatures. U. S. A., MacGraw Hill, 1961
12. P. JHAVERY, W. G. MOFFATT? AND C. M. ADAMS JR. The effects of Plate Thickness and Radiation of Heat Flow in Welding and Cutting.

U.S.A. MacGraw Hill, 1966

13. ALBERTO TORRES, Control of Mechanical Properties of C - Mm Steel Weldment., U.S.A., 1977
 14. FREDDY ALAVA, Estudio del efecto del Cambio de Variables, sobre la Calidad de la Soldadura por Arco, ESPOL - 1981
 15. INTERNATIONAL NICKEL IBERICA, Conformado de los Aceros Inoxidables Austeniticos al Crmo-Niquel, España, 1970
 16. AMERICAN WELDING SOCIETY, American Welding Society, Tomo # 1
- 