

5  
200



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN



V N A M

" RELEVADO DE ESFUERZOS PARA UN ACERO  
A-53 DESPUES DE SOLDADO "

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

MARIA DEL CARMEN CARRILLO HERNANDEZ  
FRANCISCO SANTIAGO DE LOS SANTOS GOMEZ

ASESOR: SERGIO DE MORAES BENITEZ

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

Introducción .....	1
Objetivo .....	3
<b>CAPITULO I Acero y sus propiedades mecánicas</b>	
1.1 Obtención del acero .....	4
1.2 Propiedades mecánicas del acero .....	6
1.3 Clasificación de los aceros .....	9
<b>CAPITULO II Especificación estándar para un Acero ASTM A-53</b>	
2.1 Designación y aplicación .....	11
2.2 Propiedades del material .....	12
2.3 Ensayos .....	14
a) Tensión	
b) Dureza	
2.4 Documentos aplicables .....	17
<b>CAPITULO III Soldadura de aceros al bajo carbono</b>	
3.1 Procesos de soldadura .....	18
3.2 Uniones soldadas .....	21
3.3 Clasificación de electrodos .....	26
3.4 Efectos de la soldadura .....	30

**CAPITULO IV Tratamientos Térmicos de los aceros**

4.1	Generalidades .....	36
	a) Diagrama Hierro-Carburo de Hierro	
	b) Diagrama TTT	
4.2	Microestructuras de los aceros .....	44
4.3	Tratamientos térmicos .....	45
	a) Relevado de esfuerzos	

**CAPITULO V Desarrollo de la Investigación**

5.1	Metodología .....	51
5.2	Resultados .....	67
5.3	Microfotografías y Tablas de Resultados .....	69
5.4	Conclusiones .....	83

<b>Bibliografía</b> .....	<b>84</b>
---------------------------	-----------

## INTRODUCCION

En la actualidad el uso de diferentes tipos y dimensiones de tubo y placas de acero al carbono se ha incrementado en refinerías y plantas industriales; principalmente en plantas petroleras y en la fabricación de recipientes a presión. Así mismo, la necesidad de unir éste material por medio de soldadura eléctrica debido a fallas o rupturas en su funcionamiento, se a vuelto una operación cotidiana en la industria nacional.

La soldadura de tubos es aplicada en soldaduras transversales de transmisión de líneas de tuberías y presiones altas en líneas; estos transportan vapor, aceite, agua y materiales corrosivos; la aprobación y aplicación de estos métodos requiere de ciertos pasos y pruebas certificadas.

Como sería imposible listar aqui cualquier certificación estándar especificada, porque variará para diferentes trabajos de soldadura y frecuentemente son suplementadas o modificadas por especificaciones locales; por lo que nos ubicaremos a las consideraciones de prueba de soldadura y tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Como es sabido la soldadura es un proceso que involucra la unión de dos elementos y, el soldar estos elementos requiere de ciertas precauciones; debiendo considerar que la resistencia a la corrosión de un cordón de soldadura, no debe ser inferior a la del metal base e igualmente la soldadura debe tener buenas características tecnológicas y físicas.

Para mantener la estabilidad del material después de la soldadura, es preciso eliminar todo el resto de cascarilla y oxidaciones por medio de operaciones de cepillado, esmerilado y manipulación mecánica o por un decapado intensivo.

Sin embargo, la soldadura es un proceso que produce esfuerzos residuales ocasionados por la alta temperatura de aplicación del arco eléctrico y, a que el metal de aporte solidifica y se contrae, siendo retenido por el metal base adyacente, creando a su vez diferentes regiones estructurales. Esta región afectada por el calor, puede llegar a fracturarse si no es adecuadamente tratada para eliminar o reducir las tensiones y/o deformaciones creadas.

Hoy en día estas tensiones residuales pueden ser disminuidas por un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, posterior a la aplicación de la soldadura. A pesar de ésto se sigue cuestionando la efectividad de los relevados de esfuerzos de las uniones soldadas de aceros al carbono, aún cuando las normas existentes son muy claras al respecto.

## **OBJETIVO**

Considerando lo antes mencionado surge la necesidad de realizar un análisis del tratamiento térmico posterior a la soldadura y así determinar una temperatura ideal de postcalentamiento, con el fin de lograr:

- 1.- La máxima homogenización de las propiedades mecánicas entre el metal base y la unión soldada.
- 2.- La máxima homogenización de la estructura metalográfica.
- 3.- De ser posible la eliminación de la zona afectada por el calor.

## CAPITULO I

### ACERO Y SUS PROPIEDADES MECANICAS

#### 1.1 Obtención del acero

Acero : aleación de Hierro-Carbono y pequeñas cantidades de otros elementos como ; Silicio, Fósforo, Azufre, Manganeso, etc.

El acero es una aleación que posee entre el 0.5 y 1.5 % de riqueza de carbono y se caracteriza por una gran resistencia mecánica. Para la fabricación del acero, se parte del arrabio obtenido de los altos hornos. Este hierro contiene una proporción elevada de carbono ( 4 al 5 % ), por lo que hay que lograr su descarbonación. El primer acero líquido lo obtuvo Huntsman, en Sherfield, en 1740 por fusión en un crisol calentado en un horno de coque y soplado con aire, partiendo de hierro forjable obtenido en el afino de la fundición.

Pero la verdadera revolución de esta industria se debe a Bessemer ( 1856 ), que consiguió afinar la fundición al hacerla atravesar por una corriente de aire. Thomas en 1877, trató así las fundiciones fosforosas, Siemens inventó el horno de reverbero cóncavo, calentando con gases procedentes de los recuperadores de calor, y logro afinar la fundición de modo directo, gracias a la elevada temperatura desarrollada en la combustión de los gases. Con éste horno, Martin ( 1864 ) realizó el afino de la fundición con mineral, o la refusión de chatarra (procedimiento Martin-Siemens). El horno eléctrico apareció a finales del siglo XIX, y modernamente se ha impuesto el procedimiento Linz-Donav ( L-D ), para la



afinación de la fundición y su transformación en acero.

**PROCESO BESSEMER :** Este método se basa en el principio de que el oxígeno del aire combinándose con el carbono, desarrolla un calor que elevando la temperatura del material fundido, permite obtener un acero lo suficientemente fluido para ser modelado. El proceso tiene lugar dentro de un convertidor Bessemer. Este está construido por un recipiente en forma de pera, con revestimiento refractario, capaz de bascularlo al rededor de un eje medio. El fondo del recipiente va provisto de una serie de orificios (toberas). Ultimada la carga se abre la válvula de entrada de aire y se báscula lentamente el horno hasta que adquiere la posición vertical. El aire al entrar en contacto con el hierro fundido, inicia la combustión u oxidación del carbono, que arde en la boca del convertidor. En unos 10 minutos se logra la eliminación total del carbono y se pone fin al proceso. Posteriormente, y una vez separadas las escorias por decantación debe de procederse a la recarburación de la masa, añadiéndole la cantidad adecuada de hierro especular o de ferromanganeso que contiene carbono.

**PROCESO MARTIN-SIEMENS :** Es el proceso más utilizado en la actualidad. Tiene una ventaja sobre la anterior ; permite la adición a la fundición procedente del alto horno de gran cantidad de trozos de hierro, que de otra forma se desperdiciaban. Para mantener la temperatura de fusión del acero se usa un combustible gaseoso-gas mixto (mezcla de aire y vapor de agua). El horno es de reverbero y va provisto de dos pares de cámaras de material

refractario, que son precalentados por los gases procedentes de la combustión antes de salir al exterior. Así se economiza el combustible y se alcanza una temperatura mucho mas elevada, que mantiene fundido el acero, la descarburación se logra por adición de minerales oxigenados, como magnetita o ematitas. El oxígeno de tales minerales oxida el exceso de carbono y lo elimina en forma de bióxido de carbono.

**PROCESO DE HORNO ELECTRICO :** Los hornos de arco se utilizan en menor escala para obtener aceros de mejor calidad. En los hornos de inducción, la corriente calefactora es generada dentro del metal colocado en un crisol y rodeado de un núcleo de hierro recorrido por un flujo magnético alternante. Sin embargo, han sido superados por los hornos de inducción y alta frecuencia en los cuales la fusión se realiza en un crisol de magnesio rodeado de las espiras del circuito inductor.

## 1.2 Propiedades Mecánicas del Acero

Los materiales se seleccionan según su aplicación, adecuando las propiedades del material a las condiciones de funcionalidad y servicio. Para una selección adecuada deben determinarse las características mas importantes que debe poseer el material; debiendo tomarse en cuenta algunas propiedades fundamentales que deben ser consideradas.

**DUCTILIDAD :** Capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse. Para describir la ductilidad puede realizarse mediante el porcentaje de elongación o reducción de área

en una prueba tensil.

$$\% \text{ Elongación} = ( l_f - l_o / l_o ) \times 100$$

$l_o$  = Distancia original entre marcas

$l_f$  = Distancia entre las marcas después de romperse la probeta

Debe hacerse notar que los materiales dúctiles muestran una curva esfuerzo deformación, que llega a su máximo en el punto de resistencia a la tensión; mientras que en materiales mas frágiles la resistencia a la tensión ocurre en el punto de falla, (ver fig.1.1)

**Resistencia a la tensión :** Es el esfuerzo resultante de la mayor fuerza aplicada al área original de la sección transversal y se define como :

$$\sigma = F / A_o \text{ donde } \sigma = \text{Resistencia a la tensión}$$

$F$  = Fuerza máxima aplicada

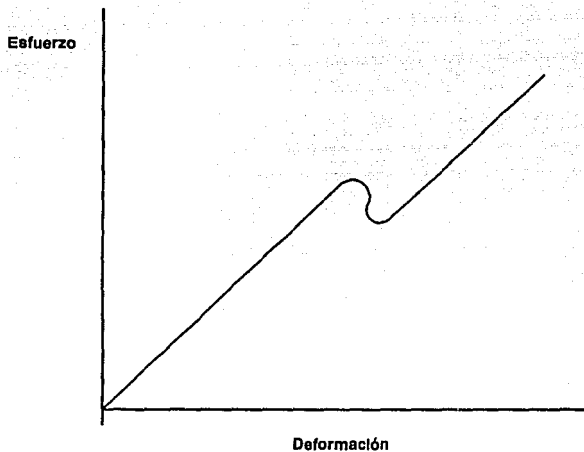
$A_o$  = Area de la sección transversal

**Elasticidad :** Propiedad de un material el cual tiende a recuperar su tamaño y formas originales.

**Deformación Elástica :** Deformación del material que desaparece cuando se anula o retira la carga.

**Deformación Plástica :** Alteración permanente de la longitud del material al aplicar una carga y luego retirarla.

**Dureza :** Resistencia del metal a la indentación, resistencia al rallado, abrasión o corte. En la práctica es una indicación



**fig. 1.1.- Curva Esfuerzo-deformación para materiales dúctiles**

aproximada de la resistencia a la tensión.

### 1.3 Clasificación de los aceros

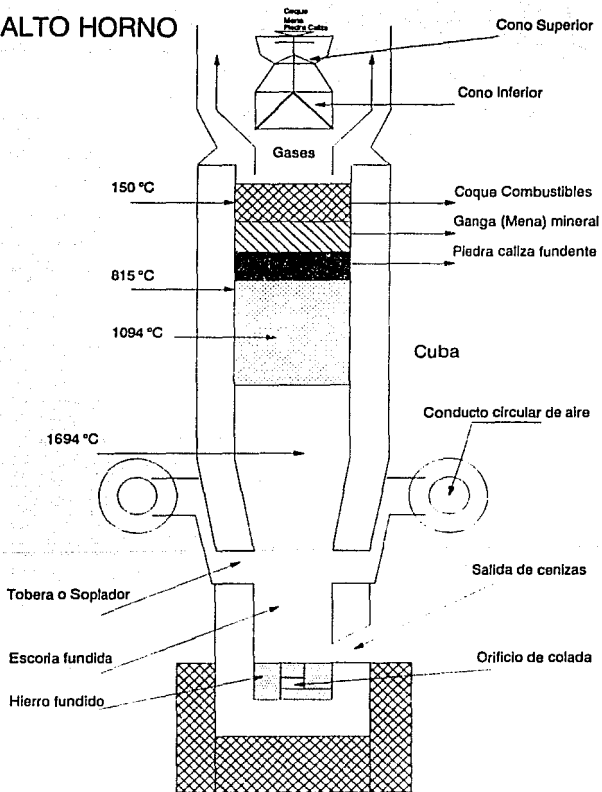
La clasificación de los aceros puede realizarse de acuerdo a su contenido de carbono de la siguiente forma :

$0 < \% C < 0.77$	Aceros Hipoeutectoides
$\% C = 0.77$	Aceros eutectoides
$0.77 < \% C < = 2.11$	Aceros Hipereutectoides

Según su dureza se pueden clasificar de la siguiente forma :

Bajo Carbono	$0.3 \% C$
Medio Carbono	$0.31 - 0.6 \% C$
Alto Carbono	$0.61 - 0.9 \% C$

# ALTO HORNO



El alto horno se carga desde arriba, y el hierro fundido se retira por el orificio de colada que está debajo de la obra, el horno puede funcionar continuamente durante 3 años sin necesidad de reparar.

**CAPITULO II**  
**ESPECIFICACION ESTANDAR PARA UN**  
**ACERO ASTM A-53**

**2.1 Designación y aplicación**

La designación estándar esta bajo la denominación fija de ASTM A-53, cabe hacer mención que dentro de otras instituciones tiene su equivalente.

Esta especificación cubre tubos negros, galvanizados, bañados en caliente, soldados con y sin costura, en tamaños desde 1/8" hasta 26" y, con diversos espesores de pared nominal según Norma.

Los tubos pueden ser suministrados según tipo y grado:

**Tipo F.- Horno-Soldadura a Tope-Soldadura Continua**

**Tipo E.- Soldadura por Resistencia Eléctrica; Grado A y B**

**Tipo S.- Sin costura; Grado A y B**

Para nuestro trabajo se utiliza el tipo E.

**Tipo E. SOLDADURA DE TUBO POR RESISTENCIA ELECTRICA**

El tubo es producido en tramos individuales o en longitudes continuas, donde la fusión es realizada por el calor obtenido de la resistencia del tubo al flujo de la corriente eléctrica, en un circuito en el cual el tubo es una parte y la aplicación de la presión por el metal de aporte es otra.

Los aceros para ambos tipos soldados con y sin costura pueden ser fabricados por los siguientes procesos: Acero Siemens-Martin,

Hogar Abierto, Horno Eléctrico o a Base de Oxígeno, mismos que han sido descritos en el capítulo anterior.

## 2.2 Propiedades del Material

Las propiedades químicas del acero según Norma son las siguientes:

### TIPO E-GRADO B

CARBONO	0.30 %
MANGANESO	1.20 %
POSFORO	0.05 %
AZUFRE	0.06 %

Como observación importante cabe hacer mención de la influencia que tienen los elementos aleantes en el acero y en general para cualquier tipo.

#### CARBONO (C)

- El carbono es un elemento aleante que se encuentra presente en todos los aceros hasta en un 2%, pero generalmente de 0.04 a 0.50%.
- El carbono puede existir en el acero en forma combinada como carburo de hierro.
- Conforme aumenta el contenido de carbono, mejoran las propiedades mecánicas de resistencia y dureza, pero las propiedades de elasticidad, forjabilidad, soldabilidad y corte tienden a desmejorar.
- El contenido de carbono no influye substancialmente en la resistencia a la corrosión en agua, ácidos o gases calientes.



- Los aceros que trabajan a temperaturas altas (850 -1100 °C), la resistencia a la tensión aumenta significativamente.

#### **MANGANESO (Mn)**

- El manganeso se encuentra presente en todos los aceros en cantidades que alcanzan hasta el 2%.
- Es un elemento importante para controlar la escoria en fundiciones.
- Mejora las propiedades de resistencia del acero, dañando ligeramente su elasticidad e influye favorablemente sobre las propiedades de soldabilidad y forja.
- Incrementa la resistencia a la tensión aproximadamente en 10 kg/mm<sup>2</sup> por cada punto porcentual de manganeso agregado dentro de un rango de 1 a 3%.
- Un alto contenido de manganeso en presencia de carbono, incrementa substancialmente la resistencia al desgaste, aumentando el espesor de la capa endurecida.
- El manganeso en cantidades moderadas, tiene poco efecto en las propiedades mecánicas y en la resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas.

#### **FOSFORO (P)**

- Generalmente, el fósforo se ha considerado perjudicial al acero, por lo que siempre se ha procurado conservar su contenido en (con alto grado) un nivel máximo de 0.03 a 0.05%.

#### **AZUFRE (S)**

- El azufre produce fragilidad, haciendo quebradizo el acero cuando se encuentra en cantidades mayores de 0-04%.

-- Para proporcionar mejores condiciones de maquinado en algunos aceros, se agrega hasta 0.30% para que las pequeñas inclusiones de sulfuro distribuidas alteren la cohesión metálica y contribuyan a la formación de virutas cortas.

A continuación se anotan las propiedades mecánicas más importantes de este acero, cuya definición se ha dado en el capítulo anterior:

Resist. Tracción: 60 000 lb/plg<sup>2</sup>

Límite de Cedencia: 35 000 lb/plg<sup>2</sup>

Porcentaje Elongación: 19-22 %

### 2.3 Ensayos

Para la fabricación de cualquier producto soldado, las pruebas realizadas son generalmente empleadas a determinar la inalterabilidad de volumen en las soldaduras. La naturaleza de éstas pruebas esta regida en gran parte por los requisitos de servicio.

Varios tipos de ensayo han sido ideados y son utilizados para un propósito específico. Los principales ensayos practicados según norma son :

#### a) Ensayo de Tensión

Las muestras de prueba para el ensayo pueden ser seleccionadas de acuerdo con la aplicación del producto específico.

El espécimen tipo placa de ensayo estándar es usado para materiales metálicos en forma de placas, estructural y perfiles de tamaño de barra redonda; tomando un espesor de 3/16" (5mm) o

superiores, así como, para el uso de lámina, alambre plano, fleje o tira en espesores nominales desde 0.005" a 3/4" (0.13 a 19mm).

Para nuestro estudio la placa de acero soldada cae dentro de ésta gama, por lo que en la Fig. 2.1 se muestra la probeta estándar para pruebas de tensión.

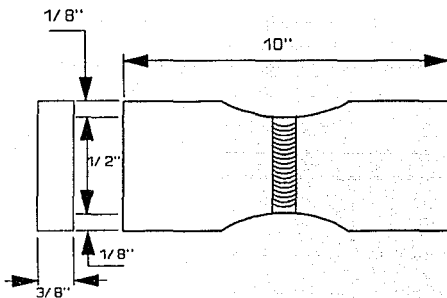


Fig.2.1.- Probeta de tensión

#### b) Dureza

Un ensayo de dureza es un medio para determinar la resistencia a la penetración y es ocasionalmente empleado para obtener una rápida aproximación de la resistencia a la tensión, la cual es una correlación que puede ser usada con precaución en las uniones soldadas debido a la composición heterogénea de la unión.

Los métodos de ensayo rutinario para el ensayo de dureza de

metales están bien establecidos e incluyen el ensayo de dureza Brinell, Vickers y Knoop, los cuales usan el área de indentación bajo la carga (Tabla 2.1).

**TABLA 2.1 ENSAYOS TIPICOS DE DUREZA**

<b>Ensayo</b>	<b>Penetrador</b>	<b>Carga</b>	<b>Aplicación</b>
Brinell	Bola de 10 mm	3 000 kg	Hierro fundido y acero
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de Diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16"	100 KG	Latón, acero baja rest.
Rockwell C	Cono de Diamante	150 kg	Acero de alta resist.
Rockwell D	Bola de 1/8"	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16"	60 kg	Aluminio, mat. suaves
Vickers	Pirámide de diam.	0-50 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diam.	500 kg	Todos los materiales

## **2.4 Documentos Aplicables**

### **Estándar ASTM :**

- A 90** Método de ensayo para pesos de recubrimientos en galvanizados y tubos de acero.
- A 370** Métodos y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero.
- A 530** Especificación de requerimientos generales para tuberías de aceros aleados y al carbono.
- E 59** Métodos de muestreo de hierro y acero para determinar la composición química.

### **Estándar ANSI :**

**B36.10** Tubería de acero soldada con y sin costura

### **Estándar API**

**5 L** Especificación para líneas de tuberías.

**CAPITULO III**  
**SOLDADURA DE ACEROS AL BAJO CARBONO.**

**3.1 Procesos de soldadura**

Existen diferentes procesos de soldadura los cuales pueden ser agrupados de la siguiente forma:

1. Soldadura por gas que incluye oxiacetileno, oxi-hidrógeno y otras fuentes de flama.
2. Soldadura por arco que incluye de arco metálico, arco sumergido y de gas protegido por arco-tungsteno.
3. Soldadura por resistencia, incluye soldadura por punto, con y sin costura, a tope o recalado, a tope con arco y por proyecciones (salientes o de resalte).

**Soldadura por gas:**

La soldadura por gas es la mas comunmente usada como fuente de calentamiento, los gases a utilizar pueden ser acetileno-oxígeno, propano-oxígeno, natural-oxígeno (metanol) e hidrógeno-oxígeno.

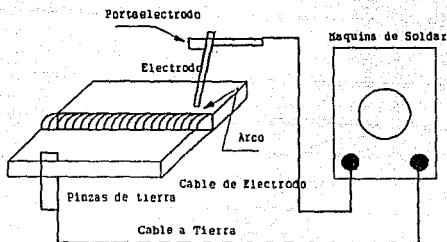
La soldadura oxiacetilénica es el proceso más común de soldadura a gas. El oxígeno y acetileno, combinados en una cámara de mezclado, arden en la boquilla del soplete produciendo la temperatura de llama más elevada (alrededor de 6 000 °F, la cual rebasa el punto de fusión de la mayoría de los metales). La operación de soldar puede hacerse con o sin metal de aporte; las partes pueden fundirse y ponerse en contacto a medida que se va

realizando la operación de fusión con el soplete, al retirar el soplete, las partes metálicas quedan unidas al enfriarse. El calibre de la boquilla del soplete debe ser apropiado al espesor de la placa.

#### **Soldadura por arco:**

En el proceso de soldadura manual por arco, el soldador selecciona un electrodo apropiado; sujeta el cable de tierra (polo negativo) a la pieza de trabajo, el polo positivo lo ha de constituir los electrodos, ajustando la corriente eléctrica para "hacer saltar el arco", es decir, crea una corriente intensa que hace salte entre el electrodo y el metal. Como resultado el metal de base se funde en el punto en el que lo toca el arco, y el electrodo se funde (se convierte en metal de aporte) en el punto en que el arco toca la punta del electrodo. El metal fundido procedente del electrodo o metal de aporte, se depósita en la junta y, junto con el metal fundido de los bordes se solidifica para formar una junta sólida.

La longitud del arco ha de mantenerse lo más cerca posible, para evitar la quemadura de los elementos químicos del electrodo. La intensidad de la corriente y el diámetro de los electrodos tienen que ser apropiados al espesor de la placa.



Soldadura por Arco Electrico

#### Soldadura de arco sumergido:

La soldadura de arco sumergido es un proceso semiautomático o automático. Este proceso emplea uno o dos electrodos metálicos desnudos, y el arco se protege mediante una cubierta, de suministro independiente, de un fundente granular fusible. El arco del electrodo fundido y el pocillo fundido de soldadura están completamente sumergidos en el fundente conductor de alta resistencia.

#### Soldadura con arco de tungsteno y gas (GMAW):

Se trata de un procedimiento de soldadura bajo atmósfera protegida, fluyendo la corriente de un electrodo de tungsteno a la pieza laboral. El arco voltaico es rodeado de gas argón (suministrado en forma externa) completamente inerte de manera tal que la soldadura queda protegida contra la oxidación ocasionada por



el aire.

La técnica para soldar, requiere el uso de manipular el soplete con una mano y la otra para alimentar el metal de aporte. Esta técnica es conocida también como TIG, y el proceso puede ser manual, semiautomático o automático. El proceso se caracteriza sobre todo por la limpieza de la costura.

#### **Soldadura por resistencia:**

La soldadura por resistencia se utiliza en la producción masiva de partes que requieren operaciones sencillas. El proceso se realiza por medio de una máquina, en la cual debe regularse la corriente, presión y alineación de electrodos; la soldadura se produce por el calor generado por la resistencia ofrecida de las piezas de trabajo al paso de la electricidad en el punto de unión, y la fusión producida por la presión de los electrodos en contacto. Las soldaduras de punto, de costura y de proyección, son formas diversas de la soldadura por resistencia.

#### **3.2 Uniones Soldadas**

La soldadura es considerada una práctica y técnica efectiva de costo-cortadura-unión en juntas soldadas para sistemas de tuberías, refrigeración, aire acondicionado y en general para usos industriales.

La soldadura de tubos puede ser usada de diversas maneras, desde dos o más secciones puestas en línea, pueden ser soldadas por puntos o provisionalmente.

Los bordes del metal a soldar deben desbastarse con mucho cuidado, con lo cual se persigue obtener una buena soldadura penetrante, que abarque toda la sección, es decir, el espesor del material.

En cuanto al modo de preparar los cantos y disponer los bordes de la pieza de trabajo, distinguimos cinco clases de junta:

- a) Juntas a Tope
- b) Juntas a Traslape
- c) Juntas de Canto
- d) Juntas en T
- e) Juntas en Cruz

Las juntas a tope están comprendidas entre los planos de las superficies de dos partes, éstas pueden ser simples, biseladas en V, biselada en X, de ranuras de una sola J, de ranura de una sola U, o dobles. Para este tipo de uniones el espesor de la placa se considera un factor determinante, por ejemplo: la junta rebordeada I (ver Fig. 3.1), se emplea en placas delgadas de  $d=2\text{mm}$ , cuidando que  $b$  sea siempre lo más pequeña posible para obtener una buena soldadura penetrante; las otras tres clases, II a IV (ver fig.3.1) se denominan juntas en I y se emplean para placas de 2 a 4 mm de espesor ( $d$ ) y hasta de 8 mm cuando se solda por ambas caras, en el supuesto de ser accesibles; para placas delgadas se acostumbra colocar un apoyo o soporte, como se muestra en II y IV (c).

La distancia "a" entre los bordes es de 0.5 a 3 mm y depende de la clase de electrodos.

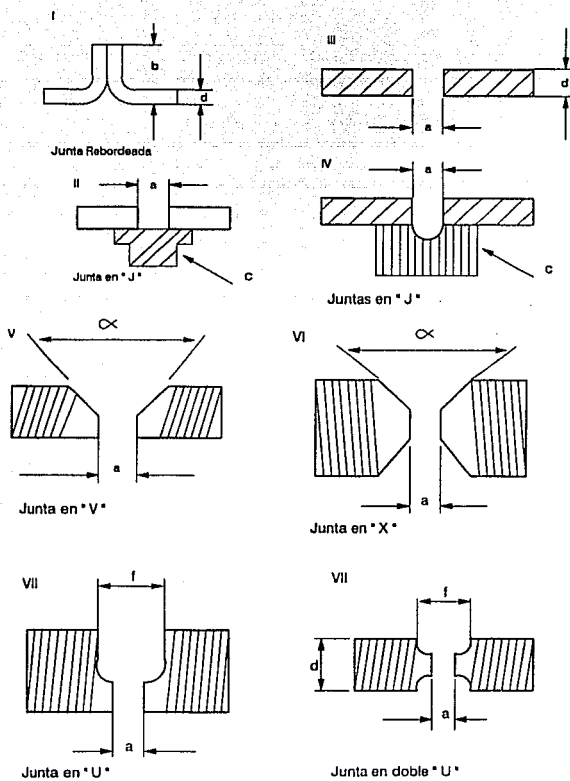


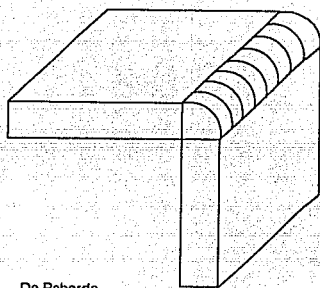
Fig.3.1.- Preparación de los bordes para soldar a tope

Para las uniones en V, en X, en U y doble U (ver figura 3.1), la distancia "a" dependerá de la clase de electrodos y el espesor de la placa, la distancia "f" para las figuras VII y VIII ha de ser de un tercio a un medio del espesor de la placa.

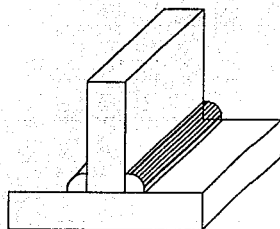
Las juntas a traslape están formadas en esencia por dos piezas de metal solapadas que se unen por fusión, por medio de soldadura de puntos. Las juntas de canto implican soldaduras hechas entre dos partes situadas a un ángulo de 90°. Las juntas en T, son lo que su nombre indica, pero también pueden ser de un solo bisel, de doble bisel, de una sola J o de doble J. En la figura 3.2 podemos apreciar diversos tipos de uniones.

**Separación de Raíz:** Por regla general, en las juntas a tope de cualquier clase que sea, los cantos de la placa no quedan tocándose mutuamente, sino que se deja siempre entre ellos cierto espacio libre llamado "Separación de Raíz". Esta separación o espacio que depende de la situación de la soldadura, del espesor del material y de la clase de electrodo, desempeñan un papel mucho más importante de el que generalmente se cree. Los numerosos errores que se cometen en la base de la costura provienen de haber calculado mal la separación.

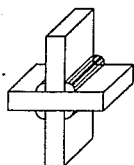
Las relaciones entre el espesor de placa "a" de una costura normal V, la abertura de la junta y los anchos de la separación o espacio "b", se muestran en la figura 3.3.



De Reborde



En T



En Cruz

**Fig.3.2 .- Diversos tipos de uniones**

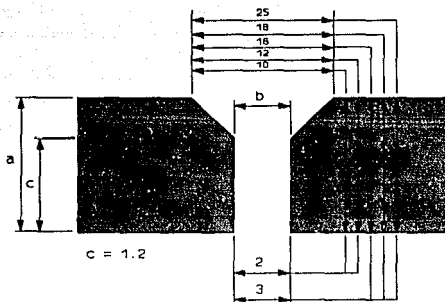


Fig.3.3.- Dimensiones de las costuras en "v" referidos al espesor "a" de la placa

### 3.3 Clasificación de los Electrodo

Los materiales de aporte son diversos según el proceso de soldadura, ya que, para la soldadura de fusión por gas, por ejemplo, se emplean varillas sin revestimiento o en caso de necesidad es posible usar también tiras cortadas del propio material, mientras que para la soldadura eléctrica, se utilizan electrodos revestidos, los cuales debido a su composición química, reducen la quemadura de los componentes de la aleación al mínimo y protegen al mismo tiempo la soldadura de agentes atmosféricos (a este recubrimiento le llaman fundente).

Los materiales de aporte desarrollados para los diversos procedimientos de soldadura cumplen las exigencias en cuanto a estabilidad química, buenas propiedades físicas de igual forma que el material propiamente. Para la selección adecuada del tipo de electrodo a utilizar deben tomarse en cuenta las exigencias antes mencionadas (ver tabla 3.1 y tabla 3.2).

AWS - ASTM Clasificación	COMPOSICION QUIMICA, MAXIMO %				
	Mn	Ni	Cr	Mo	V
E7014, E7015	1.25	0.30	0.20	0.30	0.08
E7016, E7018	"	"	"	"	"
E6010, E6011	No hay requerimientos Químicos				
E6012, E6013	"	"	"	"	"

Tabla 3.1 Requerimientos Químicos

AWS - ASTM Clasificación	Resistencia a la tensión, lb/plg <sup>2</sup>	Punto de Cedencia, lb/plg <sup>2</sup>	Elongación en 2 plg, %
Serie E60 :			
E6010	62,000	50,000	22
E6011	62,000	50,000	22
E6012	67,000	55,000	17
E6013	67,000	55,000	17
E6014	67,000	55,000	17
E6015	67,000	55,000	22
SERIE E70 :			
E7014	72,000	60,000	17
E7015	72,000	60,000	22
E7016	72,000	60,000	22
E7018	72,000	60,000	22
E7024	72,000	60,000	17
E7028	72,000	60,000	22

**Tabla 3.2 Requerimientos mínimos de Ductilidad y  
Resistencia a la tensión**



Como podemos observar el tipo de electrodo a seleccionar tiene un código de números, para indicar las propiedades mecánicas y el tipo de recubrimiento a ser envuelto.

Los electrodos para soldadura de arco, para soldar aceros con contenido bajo y medio de carbono llevan los números de clasificación de la AWS.

Este sistema de numeración consta de 4 o 5 dígitos, que lleva como prefijo la letra " E " ,los cuales indican lo siguiente :

E      X X              X X X

La E indica que se emplea en la soldadura eléctrica. Los números que van a la izquierda de los últimos dígitos, multiplicados por mil, dan la resistencia mínima a la tensión del metal depositado; el dígito situado junto al último número indica la posición de aplicación; el último número indica el suministro de energía, el tipo de escoria, el tipo de arco, la penetración y la presencia de polvo de hierro.

Tomemos por ejemplo el tipo de electrodo siguiente :

1) E6010 .- El cual nos indica

E Soldadura por resistencia eléctrica

60 Una resistencia a la tensión mínima de 60 000 lb/plg<sup>2</sup>

1 Posición de aplicación puede ser en todas la posiciones

0 El tipo de energía es de corriente directa, con polaridad invertida; el tipo de escoria es orgánica; es de penetración profunda, tienen en el recubrimiento de 0 a 10 % de polvo de hierro y sodio con alto contenido de celulosa.

2) E7018 .- El cual nos indica

E Soldadura por resistencia eléctrica

70 Una resistencia a la tensión mínima de 70 000 lb/plg<sup>2</sup>

1 Posición de aplicación puede ser en todas posiciones

8 El tipo de energía puede ser c.a. o c.d. polaridad invertida; el tipo de escoria es bajo en hidrógeno, es de penetración regular, tienen en el recubrimiento de 30 a 50 % de polvo de hierro

### 3.4 Efectos de la Soldadura:

#### Características Térmicas de la soldadura

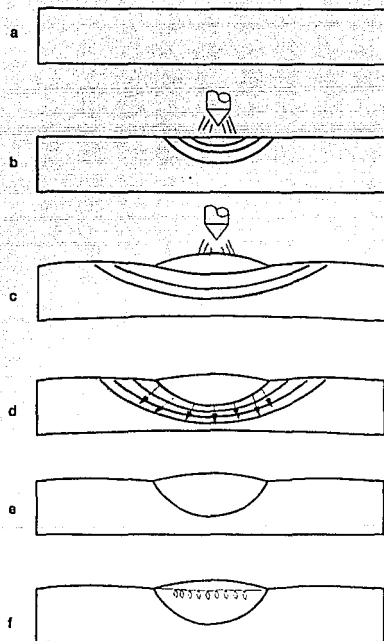
Hay tres formas básicas de cambios dimensionales, que pueden resultar en los metales, debido a calentamientos y enfriamientos en las piezas soldadas. El cambio de dimensión térmica más frecuentemente encontrado es la expansión térmica, el cual está expresado como el coeficiente de dilatación térmica. Este coeficiente de dilatación lineal es la relación entre el cambio de longitud de un material, ocasionado por calentamiento en una unidad de temperatura, y su longitud original. Otra forma de cambio dimensional es el volumen de expansión el cual es dado por el fusiónamiento del metal que expande cuando es calentado o contraído cuando enfría. El cambio de volumen es usualmente desde 3-6% en la mayoría de los metales.

El otro cambio de dimensión ocurre como resultado de una transformación de fase. Hay que recordar que los átomos forman un

arreglo geométrico, que algunas veces, existe un mismo arreglo a diferentes temperaturas. Si la transformación de fase ocurre en un metal o aleación, un cambio de volumen estará asociado con él, porque el empaquetamiento de átomos en diferentes arreglos, generalmente, produce diferentes densidades.

Tomemos como ejemplo una barra de acero (Fig. 3.4), y calentémosla en el centro, el calentamiento actúa empezando a realizar una fase en el metal, de tal manera, que la parte calentada por sí misma, deforma y resulta la sección mostrada en la fig. 3.4 c y d. Cuando el calentamiento es extinguido, la parte caliente empieza a contraerse. Durante el enfriamiento, algo del flujo de calor dentro de la región previamente enfriada es templada y enfriada. Ahora como la proporción caliente expandida existe al enfriar, es contraída reinvertiendo la dirección de las fuerzas de deformación, las cuales, las fuerzas últimas a lo largo de la longitud de la cima de la barra a lo más corto y a las esquinas de la barra, llevan a una elevación cóncava en la barra como la mostrada en la figura 3.4 d-e. Esto implica que algunos residuos de el calentamiento han quedado después de que el enfriamiento se ha dado.

Para hacer énfasis en los esfuerzos creados por la soldadura, debido a un calentamiento y enfriamiento en la misma (los cuales son la causa de distorsión y fracturas en la soldadura); algunos de los factores que afectan las tensiones y distorsiones residuales son:



**fig. 3.4.- Barra de acero calentada en el centro**

1. **Coefficiente de expansión:** Si dos metales son calentados o enfriados sobre el mismo rango de temperatura, el uno con el coeficiente de expansión más grande, tendrá mayores contracciones que el otro con menor coeficiente de expansión.

2. **Punto de Fusión:** El material con coeficiente de fusión más alto, se deformará más, porque el rango de expansión de la temperatura es más grande.

3. **Cambios de Fase:** Si los materiales experimentan transformaciones, volumen y cambios dimensionales, serán consideradas como cambios de distorsión.

Características estructurales en la unión soldada:

Los aspectos metalúrgicos que tienen lugar en la zona de soldadura son los siguientes :

- 1.- La base del metal es derretida parcialmente cerca de la región de soldadura debido a la alta temperatura.
- 2.- El metal se calienta hasta una temperatura elevada y se forman granos gruesos.
- 3.- Al alejarse de la unión soldada disminuye la temperatura y la magnitud de sobrecalentamiento, y por lo tanto también el tamaño de grano.
- 4.- Se crea una zona de recristalización cuyas alteraciones estructurales varían generalmente dependiendo del contenido de carbono y de los elementos aleantes en los aceros.

5.- Por lo tanto, se crean tres regiones estructurales diferentes, las cuales son: el metal base, metal de aporte y la zona afectada por el calor.

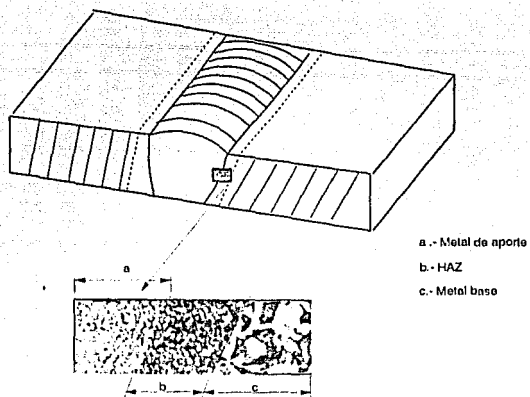
Metal base.- Es la estructura original del metal que no ha sido significativamente afectada por el calor de la soldadura y que una parte de él puede ser afectada.

Metal de Aporte.- Es aquella parte de una soldadura que ha sido fundida y resolidificada durante la operación de soldadura, puede estar compuesta de metal base fundido, metal de aporte, o una combinación de ambos.

Zona Afectada por el Calor.- Es aquella zona de metal base adyacente al metal de aporte, la cual ha sido calentada durante la soldadura a una temperatura bastante alta, experimentando algún cambio físico significativo. Los cambios físicos pueden ser en crecimiento de grano.

En la figura 3.5 se muestran las diferentes regiones mencionadas.

6.- Las condiciones encontradas en la soldadura, están relacionadas a los cambios de temperatura y solidificación, suministrando cambios internos que resultan en esfuerzos y deformaciones.



**Fig. 3.5.- Regiones presentes en una unión soldada**

## CAPITULO IV

### TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO

#### 4.1 Generalidades

El campo de metalurgia es muy extenso y puede dividirse en dos grandes ramas :

La metalurgia de procesamiento extractiva y la metalurgia física.

En este caso nuestra base es la metalurgia física; ciencia que se encarga de las características físicas y mecánicas de los metales y aleaciones.

Como es sabido todo elemento químico esta constituido por átomos, estos átomos tienden a adoptar posiciones relativamente fijas lo cual da lugar a la formación de cristales en estado sólido. La red tridimensional de líneas imaginarias que conecta a los átomos se llama red espacial, y la red mas pequeña que tiene la simetría total del cristal es llamada celda unitaria.

Existen 14 tipos posibles de redes espaciales y pueden clasificarse en 7 sistemas cristalinos, entre los que destacan por su importancia los sistemas cúbicos y hexagonales; donde existen tres tipos de red con mayor aplicación que son: cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC), y la hexagonal compacta (CPH).

Estas estructuras cristalinas tienden a cambiar, debido a la



temperatura a la cual sean expuestas. Si los cambios en la estructura son reversibles este cambio se conoce como alotropía, la cual es una propiedad que presenta el hierro.

La temperatura a que tiene lugar los cambios alotrópicos en el hierro, está influida por elementos de aleación, de los cuales el más importante, es el carbono y de los demás que ya se han mencionado.

Como las propiedades de un material dependen ampliamente del tipo, número, cantidad y forma de las fases presentes y, pueden cambiarse alterando estas cantidades, por lo cual, es esencial conocer:

- a ) Las condiciones bajo las cuales existen estas fases y,
- b ) Las condiciones bajo las cuales ocurrirá un cambio en la fase.

**a ) Diagrama Hierro-Carburo de Hierro (Fe-Fe<sub>3</sub>C)**

El diagrama de fase ha sido llamado como el mapa itinerario del metalurgista, como un diagrama para un sistema de aleación dado, el cual puede encontrarse en cualquier composición dada, cualquier temperatura especificada o identificar que porcentaje de cada elemento están presentes.

Por medio de este diagrama puede determinarse que cambios de fase ocurren en cada uno de los lugares, cambios de composición, temperatura o ambos. Esto es solamente una aproximación de como se comportan las aleaciones, sin embargo, el comportamiento que describe un diagrama de fase, para un sistema de aleaciones bajo condiciones de equilibrio raramente es encontrado. Esto es especialmente verdadero bajo condiciones encontradas en soldadura, debido a los calentamientos y enfriamientos rápidos. Los principales puntos a considerar en un diagrama de fase son los siguientes:

Al calentar Ac1 ----- Temperatura crítica inferior

Ac3 ----- Temperatura crítica superior

Al enfriar Ar1 ----- Tempertura crítica inferior

Ar3 ----- Tempertura crítica superior

El punto Ac1 (723 °C) indica la temperatura de transformación de la perlita en austenita y el comienzo de la transformación de la ferrita en austenita. El punto Ac3 indica la temperatura de transformación final de la ferrita en austenita.

El punto Ar1 indica la temperatura de transformación de la

austenita en perlita. El punto Ar3 indica la temperatura de precipitación inicial de la ferrita a partir de la austenita (Ver Diagrama de Hierro-Carburo de Hierro- Figura 4.1).

Del diagrama hierro carburo de hierro tenemos las siguientes reacciones (Diagrama hierro-carburo de hierro-fig 4.1):

- 1.- Una reacción peritectica que ocurre a los 1495 °C entre las fases  $\delta + L \rightleftharpoons \gamma + \delta'$

Esta reacción se escribe como:  $\delta + L \rightleftharpoons \gamma + \delta'$

Aquí la fase  $\delta'$  tiene una composición de 0.16 % de C, la fase  $\delta$  con 0.10 % de C y el líquido con 0.51 % de C.

- 2.- Una reacción eutectica que ocurre a los 1148 °C entre las fases  $L \rightleftharpoons \gamma + \text{Cm}$  La reacción es :  $L \rightleftharpoons \gamma + \text{Cm}$

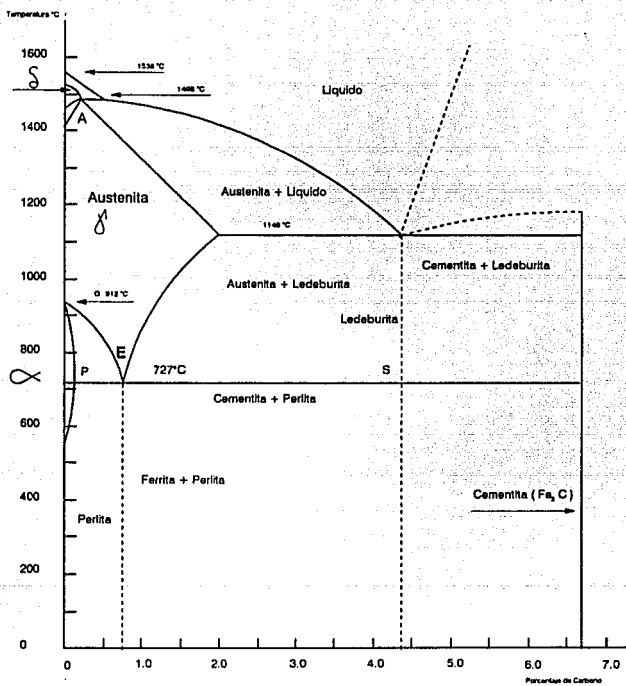
La fase líquida tiene composición de 4.3 % C , la fase  $\gamma$  tiene 2.11 % de C y la cementita 6.69 % de C . La reacción eutectica para las aleaciones Fe-C recibe el nombre de ledeburita.  $\gamma + \text{Cm} = \text{Ledeburita}$

- 3.- Una reacción eutectoide ocurre a una temperatura de 727 °C, entre las fase  $\gamma$  y  $\alpha + \text{Cm}$

La reacción es :  $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{Cm}$

La fase  $\gamma$  tiene una composición de 0.77 % C , la fase  $\alpha$  tiene 0.025 % de C y la cementita con 6.69 % de C. La combinación de fase obtenidas al enfriamiento recibe el nombre de perlita.

$\alpha + \text{Cm} = \text{Perlita}$



**Fig.4.1.- Diagrama de equilibrio de fases Fe- $Fe_3C$**

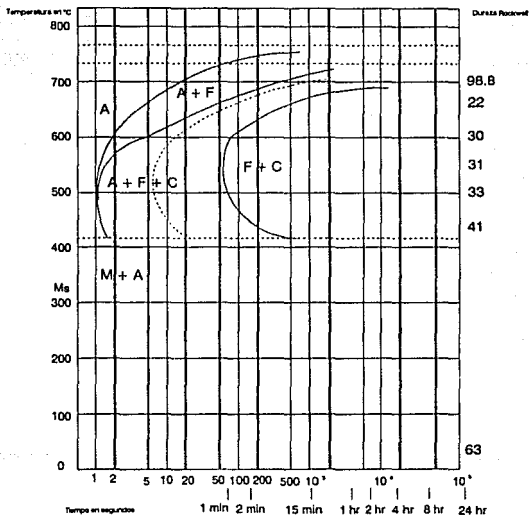
#### b) Diagrama TTT (Transformación-Tiempo-Temperatura).

Como se ha visto el Diagrama Hierro-Carburo de Hierro, nos proporciona información sobre las fases presentes y las transformaciones de las mismas: ferrita a austenita, austenita a perlita; pero como la austenita es inestable por debajo de la temperatura crítica inferior, es necesario saber cuanto tiempo necesitará para empezar a transformarse a una temperatura subcrítica específica, y cuanto tiempo necesitará para ser completamente transformada; en estas condiciones es poco lo que se puede investigar sobre la velocidad de transformación de está austenita metaestable o sobre su desarrollo en función del tiempo.

Es por ello que se lleva a cabo un estudio de las transformaciones, por medio del cual se determinaron la velocidad de transformación de esta austenita metaestable a temperatura constante y además la estructura de los constituyentes que se forman de está manera.

Para representar el grado de transformación, o sea, el porcentaje de austenita transformada, en una gráfica con escala logarítmica, para el tiempo, se obtiene una curva clásica en forma de "S" (ver fig. 4.2). El resultado de todas estas curvas en "S" para diferentes temperaturas, se representa en un solo diagrama llamado "Diagrama TTT", o Diagrama Tiempo-Temperatura-Transformación.

El tiempo se grafica sobre una escala logarítmica, como se acaba de mencionar, y los puntos del comienzo y el fin de todas las



**Fig. 4.2.- Curva TTT o de Transformación Isotérmica de un Acero**

transformaciones isotérmicas determinan las curvas de comienzo (izquierda) y fin (derecha) de la transformación, como se muestra en la figura. El área a la izquierda del principio de transformación consta de austenita inestable; el área a la derecha del fin de la transformación es el producto a lo que se transforma la austenita a temperatura constante; y el área entre el principio y el fin de la transformación marcada por  $A + F + C$ , consta de tres fases, austenita, ferrita y carburos. El punto al principio de la línea de transformación más alejado a la izquierda se conoce como nariz perlítica.

En todos los diagramas excepto para aceros eutectoides se traza a menudo una curva adicional de carburos en la zona perlítica por encima de la región de la nariz, ya que en estos casos la transformación empieza con la formación de ferrita proeutectoide en aceros hipoeutectoides, y en cementita proeutectoide en aceros hipereutectoide, en tanto, que la segunda línea indica la transformación de la austenita a la perlita. El área entre las dos líneas se marca como  $A + F$  (austenita más ferrita proeutectoide), o como  $A + C$  (austenita más cementita proeutectoide); por lo general ambas líneas se unen en la región de la nariz.

#### 4.2 Microestructuras de los Aceros

Las microestructuras que se generan en los aceros, están representadas en el Diagrama Hierro-Carburo de Hierro, su composición e identificación permite establecer las propiedades y comportamiento de los metales. A continuación serán descritas estas estructuras presentes:

**FERRITA:** Esta fase es denotada por la letra griega alfa y consiste en una solución sólida intersticial de carbono-hierro, posee una estructura de tipo cúbica centrada en el cuerpo (BCC), disolviendo como máximo 0.025% de carbono a una temperatura de  $T = 725 \text{ }^\circ\text{C}$ . A temperatura ambiente puede hablarse de hierro puro, ya que, disuelve tan solo 0.008% de carbono y es la fase más blanda de las microestructuras en equilibrio.

**AUSTENITA:** Está fase se denota con la letra griega gama y consiste en una solución sólida intersticial de hierro-carbono, posee una estructura de tipo cúbica de caras centradas (FCC), disolviendo como máximo 2.11% de carbono. Esta fase no es estable a temperatura ambiente sino que lo es por arriba de  $727 \text{ }^\circ\text{C}$  (Temperatura eutectoide).

**CEMENTITA:** Esta fase se puede formar de un compuesto intermetálico con fórmula química de  $\text{Fe}_3\text{C}$ , que corresponde a un porcentaje en peso de 6.69% de carbono. Es la fase más dura que se presenta en condiciones de equilibrio.

**PERLITA:** Fase compuesta, la cual se forma por la nucleación



alternativa de laminillas de ferrita y cementita. La formación de la perlita se lleva a cabo por la reacción eutéctode, para una composición de 0.77% de carbono. Esta microestructura es más dura que la ferrita, pero más blanda que la cementita.

**MARTENSITA:** Esta fase no se obtiene en condiciones de equilibrio, sino que se obtiene por enfriamiento muy rápido (TEMPLE). Posee una estructura cristalina de tipo tetragonal centrada en el cuerpo. Es la fase más dura que se obtiene en condiciones fuera de equilibrio y presenta al microscopio una forma acicular de agujas.

**BAINITA:** Es una microestructura cuya composición es una perlita y se distingue en condiciones fuera de equilibrio, para enfriamientos rápidos pero menores a los requeridos a la formación de martensita.

#### **4.4 Tratamientos térmicos**

El tratamiento térmico es una operación de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados aplicados a un metal o aleación en el estado sólido, en forma tal que produzca las propiedades deseadas.

Por lo que tenemos que los elementos metálicos en el estado sólido cambian de estructura cristalina con la temperatura, es decir forman diferentes fases con la temperatura.

Los tratamientos térmicos más conocidos son: recocido, temple,

y revenido, en la mayoría de estos tratamientos térmicos existen transformación en la estructura cristalina (Ver Figura 4.3).

#### **RECOCIDO:**

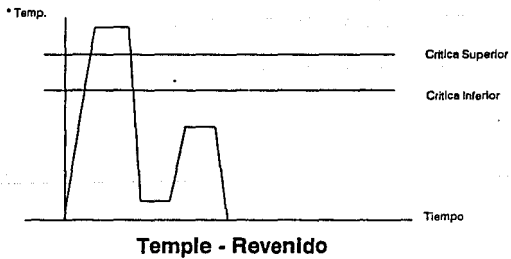
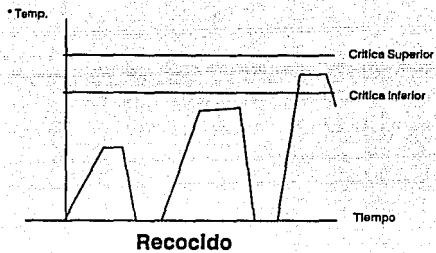
Consiste en el calentamiento del metal hasta una determinada temperatura, permanencia en esta temperatura y posterior enfriamiento lento, con el fin de obtener una estructura equilibrada, eliminación de tensiones y la posible elevación de propiedades mecánicas.

Los campos más usuales son los aceros con bajo contenido de carbono, que son sometidos a operaciones mecánicas progresivas (trefilado, estirado, etc.), como son alambrones y alambres para diversos usos. En este caso a una operación mecánica sigue un recocido, con objeto de eliminar la acritud y mantener dúctil el material. Otro campo de aplicación son las fundiciones que son sometidas a diversos recocidos isotérmicos.

#### **TEMPLE:**

Consiste en calentar el acero por arriba de la temperatura crítica superior y enfriar después por medios mas o menos rápidos en un medio apropiado, el cual puede ser: aire, agua, aceite o sales, dependiendo de su análisis químico, tamaño y forma.

Este tratamiento tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros, fundiciones de hierro y metales no ferrosos. Diremos que el medio de temple está en función del



**Fig.4.3.- Tratamientos térmicos**

porcentaje de carbono y dependiendo de él, será también la dureza que obtengamos. Actualmente cada fabricante de acero da la utilización más adecuada, así como el medio de enfriamiento correcto y la dureza que se obtiene después del temple.

#### **REVENIDO:**

Operación posterior al temple, que consiste en calentar a temperatura por abajo de la crítica inferior. Cuya finalidad es eliminar las tensiones creadas por el templado, además de que permite dejar al material en la dureza especificada.

#### **a) Relevado de Esfuerzos**

Como hemos mencionado, la no uniformidad y los cambios rápidos de temperatura durante la soldadura, son de interés, no solamente metalúrgico, ya que ellos son la causa de las tensiones y distorsiones en soldaduras.

Para poder eliminar estos esfuerzos residuales creados en una unión soldada, en la práctica es utilizado el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos. Este tipo de tratamiento es frecuentemente confundido o se usa intercambiamente como recocido.

El relevado de esfuerzos es una forma de relajación interna, que no significa un cambio en microestructura y que posee muy pequeños cambios en las propiedades del metal, mientras que el recocido provoca considerables cambios en microestructuras y propiedades.

Así el tratamiento térmico a la post-soldadura provee mayor ductilidad en el metal soldado y una dureza disminuida en la zona afectada por el calor (HAZ); mejorando además la resistencia a la corrosión.

Los cambios que acompañan a un relevado de esfuerzos incluyen un ablandamiento y la formación de nuevos arreglos de granos. Para analizar como ocurre estas nuevas formaciones, hay que entender como ocurre un proceso llamado recristalización, cuya formación requiere de un período de incubación muy lento, no así la recuperación que comienza inmediatamente sobre el calentamiento.

Los procedimientos del tratamiento térmico requieren un planteamiento cuidadoso y dependerán de un número de factores: temperatura requerida, tiempo de control del material, espesor del material, tamaños de partes soldadas, contornos o formas y facilidad de calentado.

#### TEMPERATURA Y TIEMPO DE RELEVADO:

La temperatura de relevado se encuentra aproximadamente a 38 °C abajo del límite crítico de transformación. El límite crítico o de transformación es el intervalo de temperatura, dentro del cual se forma la austenita cuando el material está siendo calentado. Este depende de la composición química del material y de la velocidad de cambio de la temperatura, particularmente durante el enfriamiento.

El límite crítico o de transformación se encuentra a más baja temperatura durante el enfriamiento, que en el calentamiento y el tiempo de relevado depende del espesor del material. Por regla general, el tiempo es de una hora por pulgada de espesor, asegurando una distribución uniforme de calor a través del espesor del material y proporcionando un relajamiento completo para aliviar los esfuerzos residuales.

**CONTROL DE VELOCIDAD Y ENFRIAMIENTO:**

El control de velocidad de enfriamiento reduce la acción del temple que tendería a formar partes duras en el material, también contribuye a reducir la dureza. Una velocidad de enfriamiento uniforme evitará la formación de nuevos esfuerzos.

**CAPITULO V**  
**DESARROLLO DE LA INVESTIGACION**

**5.1 Metodología**

Para llevar a cabo la investigación, se utilizó una placa de acero bajo carbono, de 3/4" de espesor, con la siguiente composición química:

CARBONO.....	0.275 %
MANGANESO.....	0.992 %
SILICIO.....	0.186 %
FOSFORO.....	0.039 %
AZUFRE.....	0.031 %

Las propiedades mecánicas que se obtuvieron de este material, se muestran en la tablas 5.1. En base a estos datos y a la composición química obtenida, encontramos que este material cubre la especificación marcada por la Norma ASTM A-53 para tipo E grado B (ref. 1 de la Norma).

Con las propiedades obtenidas del metal original los siguientes pasos a realizar son :

- a ) Preparación de la unión
- b ) Examinación de la soldadura
- c ) Preparación de muestras y elaboración de ensayos

a ) Preparación de la unión

La placa de acero fue cortada y se le maquinó un bisel con una máquina fresadora a un ángulo de 60 grados (ver figura 5.1).

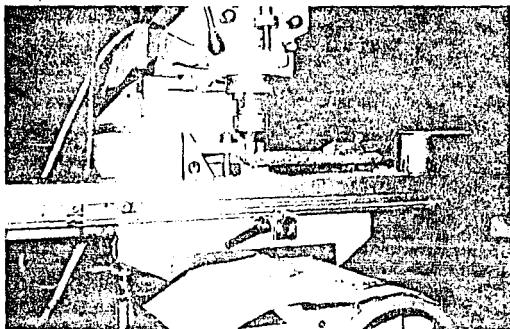


Figura 5.1. Maquinado y desbastado de placa  
en una máquina fresadora

La aplicación de la soldadura, se realiza sobre las dos placas obtenidas; sujetadas estas en forma tal que se encuentren lo más fijas posibles, dejando entre ellas un espacio libre "d" (llamado separación de raíz, ver Capítulo III). Debe considerarse que antes de aplicar la soldadura en el área, esta fue desbastada



previamente y se limpio de cualquier impureza.

El depósito de soldadura se realiza sin precalentamiento, empleándose un electrodo AWS-6010 de 3/16" de diámetro a 90 Amperes de corriente para la aplicación de los cordones de fondeo y paso caliente, rellenándose el bisel con un electrodo AWS-7018 de 5/32" de diámetro a 150 Amperes de corriente.

La constitución escalonada o de relleno de bisel, llamada soldadura de varias capas, ejecutada en esta unión nos sirvió, para garantizar la buena penetración de soldadura, y debe considerarse que la primera capa se realiza empleando un electrodo delgado generalmente de 3.25 mm. Después de bien limpio el cordón de asiento (cordón de fondeo y paso caliente), realizado con electrodo conocido en línea recta, se aplica la segunda capa con un electrodo mas grueso (relleno del bisel), generalmente de 4 mm, conduciéndose este con un movimiento pendular lateral, la tercera capa de soldadura se aplica igualmente con electrodo de 4 mm. Antes y después de aplicar cada una de las capas de soldadura se removieron las escorias para poder obtener una mejor adherencia y evitar porosidades, agrietamientos etc. en la soldadura.

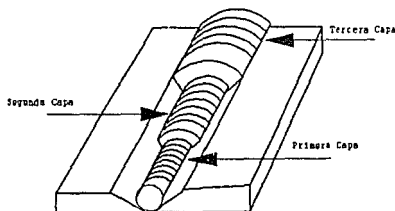


Fig 5 2. Soldadura en V de varias Capas

El uso de estos electrodos depende de sus propiedades mecánicas del mismo, las cuales deben ser semejantes al metal base y se ha dado en capitulos anteriores.

Una vez terminada la aplicación de la soldadura se deja enfriar la placa al aire tranquilo.

#### **b ) Examinación de la soldadura**

La placa es examinada visualmente considerando la apariencia exterior de la soldadura, pero para corroborar que la placa en la zona soldada está libre de grietas, inclusiones de escoria, burbujas o falta de fusión, (lo cual no se puede apreciar visualmente) se procede a la inspección con líquidos penetrantes.

#### **Líquidos penetrantes**

El método de inspección con líquidos penetrantes se emplea en detección de discontinuidades superficiales tales como: grietas, incrustaciones o falta de fusión; el procedimiento a seguir es el siguiente :

#### **PRELIMPEZA**

La inspección con líquidos penetrantes dependerá en su mayor parte en que las superficies y discontinuidades se encuentren perfectamente limpias de contaminantes (polvo, óxido, salpicaduras, grasa, pintura, etc.), lo cual puede intervenir en la penetración del líquido. Las piezas ya secas deberan limpiarse nuevamente con el fin de eliminar cualquier residuo que quede del líquido o secado.

#### **APLICACION DE PENETRANTE Y REMOVEDOR**

La aplicación del penetrante se realizó a la superficie en estudio, de tal manera que quede toda cubierta con penetrante. El método de aplicación se realiza por medio de flujo o atomización por aerosol.

Después de la aplicación, se escurren las piezas y se les da un tiempo de permanencia en el penetrante de 7 a 10 minutos; pasado el tiempo de permanencia, remover el exceso de penetrante a base agua por inmersión a una temperatura de 30 grados centígrados, la duración del lavado dependerá de la remoción vista del penetrante. Las piezas se secan exponiéndolas a la temperatura ambiente.

#### **REVELADO**

El revelador se aplica inmediatamente después del secado de las piezas, por medio de atomización se rocian las piezas, de tal manera que se asegure que esté completamente cubierta con una película delgada y uniforme. El tiempo de revelado utilizado se realiza de 10 a 15 minutos hasta que ésta haya secado.

#### **INSPECCION**

La inspección se realiza después de que el tiempo de revelado haya terminado, inspeccionando las indicaciones del penetrante fluorescente en un área oscura; midiendo la intensidad de la luz negra en la superficie de la pieza que va a ser inspeccionada. Las indicaciones visibles de penetrantes pueden inspeccionarse con luz blanca natural o artificial, asegurándose de que exista una

adecuada iluminación para no tener pérdidas en la sensibilidad de la inspección.

c ) Preparación de muestras y elaboración de ensayos

El siguiente paso es la realización de las probetas requeridas para los ensayos destructivos. Para obtener las probetas, la placa fue dividida a cada  $3/4$  " que es lo requerido para cada una de las probetas, como se muestra en la fig. 5.3, de tal manera que la unión soldada siempre quedo en el centro de la probeta.

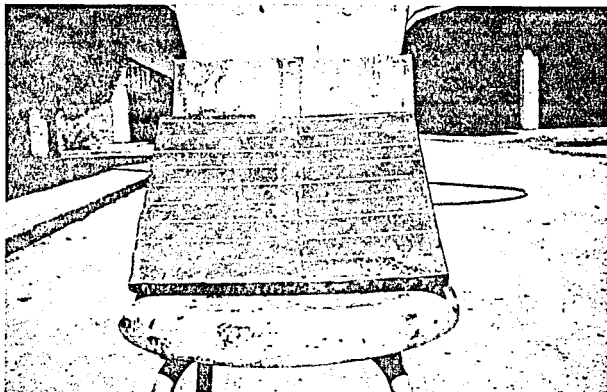


Fig. 5.3 Placa trazada a cada  $3/4$ "

El corte se efectuó por medio de una segueta mecánica, el corte fue lubricado para evitar el calentamiento en la placa, como se muestra en la figura 5.4 y 5.5.

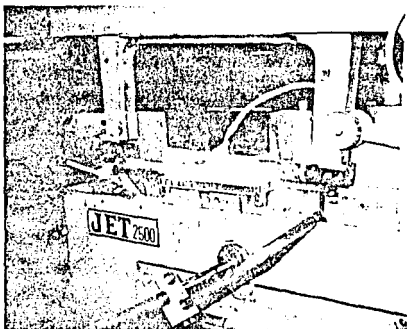


Figura 5.4. Corte de tramos

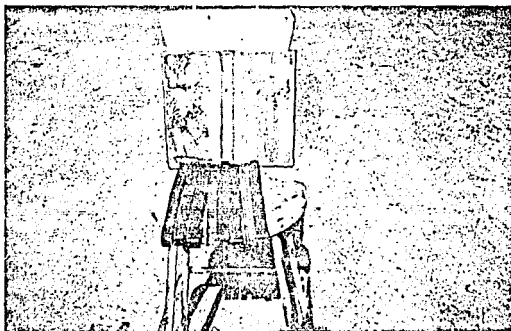


Figura 5.5 Tramo de placa y cortes realizados

Posteriormente los cortes para probetas obtenidos se sometieron a tratamientos térmicos de postsoldadura a diferentes temperaturas con intervalos de 100 °C, siendo la temperatura inicial 550 °C, realizándose posteriores tratamientos a 650 °C, 750 °C y 850 °C. El tiempo de tratamiento térmico para cada una de las temperaturas seleccionadas fue de 45 min, ya que la norma nos recomienda una hora por cada pulgada de espesor del metal base. De esta manera se realizan tratamientos térmicos por arriba y por abajo de los 650 °C que marca la Norma, con el fin de encontrar la temperatura a la cual obtendremos la máxima homogenización de propiedades mecánicas y estructurales.

#### **Ensayo de Tensión:**

Una vez terminados los tratamientos térmicos, las probetas son maquinadas a un espesor de 3/8 ", y posteriormente maquinadas las probetas de tensión de acuerdo a la especificación estandar ya estudiada, el maquinado de la probeta fue hecho con una máquina "Tensil Kut" (ver figura 5.6), incluyendo las probetas sin tratamiento térmico.

Las probetas maquinadas son marcadas a escala con un punzón, dispositivo múltiple o dibujadas con tinta; con la intención de poder determinar posteriormente el porcentaje de elongación.

Los ensayos se realizaron en una máquina de tensión (Figura 5.7), de la cual podemos obtener la resistencia a la tensión y

porcentaje de elongación. La máquina de tensión cubre la colocación de un espécimen soldado, sujeto por mordazas, que por medio de una fuerza aplicada, arrastra las pieza hasta el rompimiento, y la probeta es cortada de un área de metal soldado.

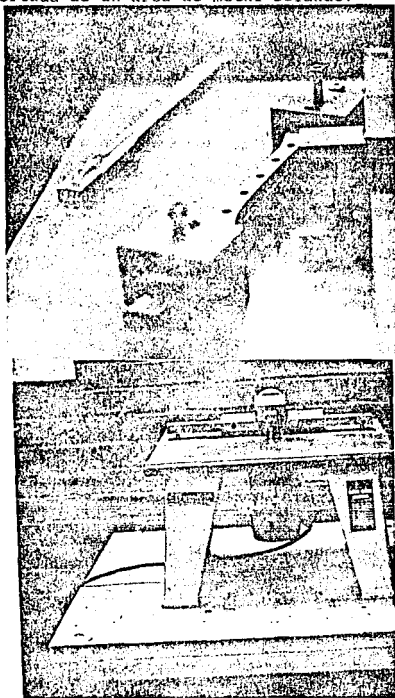


Figura 5.6 Máquina "Tensil Cut"

para maquinado de probetas

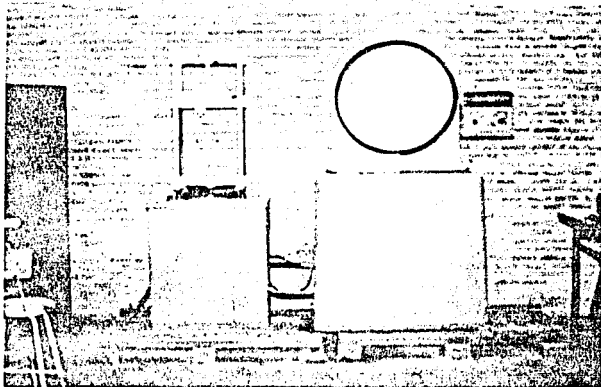


Figura 5.7 Máquina de Tensión

La actual resistencia de tensión es encontrada por dividir la máxima carga necesaria a romper la probeta por el área de la sección transversal de la probeta. El área de la sección transversal de la probeta es determinada multiplicando el ancho de la barra por su espesor. Por ejemplo para nuestra primer lectura tenemos:

Fmáx = 13 120 lb      Ancho = 0.5 plg      Espesor= 0.371 plg

Fuerza Máxima

Resistencia tensión = -----

Area Sección Transversal



Area Sección Transversal =  $0.5 \times 0.371 = 0.1855 \text{ plg}^2$

Resistencia Tensión =  $70\,727 \text{ lb/plg}^2$

El límite de fluencia se debe determinar por la resistencia a la carga de 0.2% de longitud original del espécimen. Las marcas medidas para el porcentaje de elongación después de la fractura deben ser realizadas en la parte plana de la probeta y dentro de la sección paralela a lo largo de la probeta.

#### Ensayo metalográfico

Para la selección de probetas para el ensayo metalográfico, se seleccionan muestras representativas del material las cuales nos muestren nuestra zona en estudio (material base y metal de aporte), dichas muestras son tomadas en el sentido transversal al eje de la probeta maquinada (Ver Figura 5.8).

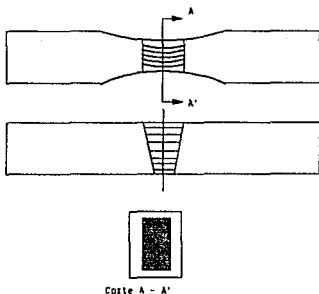


Fig.5.8.- Corte de sección transversal para ensayo metalográfico

El procedimiento para su preparación será el siguiente :

#### **CORTE Y TAMAÑO DE MUESTRAS**

- a) Al efectuar el corte a la probeta este se realizó de manera tal que abarcará las tres zonas en estudio (metal base, zona afectada por el calor y metal de aporte).
- b) El corte se realizó con segueta manual, enfriando el corte con un lubricante, el cual nos proporcionó un corte fácil, rápido y que produce poco calor y el cual es recomendado para materiales con una dureza menor a 35 Rc.
- c) El espesor de la probeta será de 3/4 " o poco menos.
- d) Las muestras se montaron en baquelita.

#### **MONTAJE**

- a) Las probetas son colocadas en molde caliente con la cara a pulir hacia abajo, la baquelita es vaciada dentro del ducto y sobre la muestra, se cierra el molde y se aplica una presión y calor por medio de un termostato (160 °C y 3-4 Kg/cm<sup>2</sup>). Al terminó del endurecimiento de la baquelita, se elimina la presión, se abre el molde y se da un acabado al montaje terminado.

#### **DESBASTE Y PULIDA**

Este desbaste se realiza por medio de lija burda (gruesa) No.180 o más gruesa y su objetivo es el siguiente :

- 1.- Quitar irregularidades o superficies dañadas por el corte.
- 2.- Remover escorias de fierro (cascarillas) y/o remoción de excedentes de baquelita.

### **DESBASTE FINO**

En este desbaste, la probeta es lijada sucesivamente con papeles abrasivos de mediano a fino (lijas No. 240, 320, 400, 600, 1000 y 1200), usando agua para eliminar desechos de la lija y actuar como lubricante a la vez. La probeta debe limpiarse cada que se realiza un cambio de lija; de tal manera que la siguiente lija debe remover las rayas de la anterior; además al realizar un cambio de lija el siguiente desbaste deberá de realizarse en forma perpendicular a la anterior.

### **PULIDO**

En el pulido se utilizó el uso de abrasivo combinado con un lubricador adecuado a la superficie. El método consiste en sostener la probeta en contra del disco giratorio (el cual tiene un paño abrasivo) y mover la probeta en una trayectoria elíptica. El abrasivo utilizado es alumina de 0.05 micras.

### **REACTIVO DE ATAQUE**

Las probetas se atacarán por medio de nital al 2 % , cuyas superficies estaban perfectamente limpias antes del ataque. Después del ataque las probetas se lavaron en una corriente de agua a chorro y posteriormente se aplicó aire para secar completamente la superficie, quedando las probetas listas para su estudio al microscopio.

Las probetas se observaron en un microscopio a diferentes aumentos, y se tomaron fotografías a las estructuras observadas.

La preparación de estas superficies nos sirvieron, para

obtener la siguiente información.

- 1) Variaciones estructurales a través de las zonas en estudio
- 2) Posible inclusión de impurezas ( material ferroso)
- 3) Posibles burbujas o huecos (mala soldadura)

#### **Ensayo de dureza**

El ensayo de dureza a utilizar depende primeramente en la resistencia de el material, el tamaño de la unión soldada y el tipo de información deseada.

El ensayo de dureza Brinell produce una indentación grande típicamente de 2 a 5.6 mm (0.08 a 0.22 in) de diámetro, la cual es conveniente para soldaduras largas como placas pesadas.

El ensayo Rockwell produce una indentación mas pequeña, la cual es mas convenientes para durezas corridas, pero siempre estos ensayos son macroscópicos en escala, en el sentido de que la indentación puede ser mas grande que las áreas precisas de interés.

El ensayo Vickers y Knoop realiza relativamente indentaciones mucho mas pequeñas y convenientes para medidas de dureza de las diferentes regiones de la unión soldada. La prueba de dureza Vickers deben ser efectuadas en áreas preparadas, removiendo el material desde la superficie para eliminar el material descarburizado, superficies irregulares y otras marcas que aparezcan en el lado opuesto causando irregularidades al asentar la probeta y, además debe contener material suficiente.

Así mismo, para el desarrollo del análisis metalográfico y mapeo de dureza, fueron anteriormente seleccionados al azar probetas a las diferentes temperaturas tratadas, con el fin de analizar su comportamiento.

El mapeo de durezas se efectuó desde el metal base hasta el centro del cordón de soldadura, con una separación, de 10 milésimas entre cada huella, la dureza se midió en la escala Vickers, con una carga de 5 Kg. La razón del uso de ésta escala ha sido explicada anteriormente.

En la fig. 5.9 podemos observar una máquina para la toma de lecturas de dureza, la cual consiste en tomar la medida de la huella reflejada en la pantalla superior, ésta pantalla tiene una escala movable que nos permite tomar el tamaño de la huella en cualquier posición.

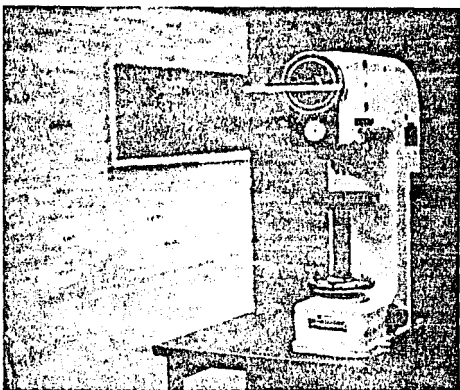


Figura 5.9 Máquina de Ensayo  
de Durezas

## 5.2 RESULTADOS

**Propiedades mecánicas:** Los resultados de los ensayos de tracción se muestran en las tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, y 5.6.

**Mapeo de Dureza:** Los resultados promedio de los mapeos de dureza de metal base , zona afectada por el calor y metal de aporte, se muestran en la tabla 5.7. Para la obtención de estos datos se mapearon cinco diferentes probetas para cada una de las temperaturas en estudio.

**Estudio Metalográfico:** En las fotos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se muestran las estructuras obtenidas para cada tratamiento térmico que se llevó a cabo, así como, la estructura del metal base original.

### Discusión:

Como se observa en las tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, y 5.6 los valores de resistencia a la tracción tienen una ligera tendencia a disminuir conforme se incrementa la temperatura de tratamiento térmico posterior a la soldadura; esto lo podemos observar más claramente en la gráfica 1.

En todos los casos, este valor de resistencia mecánica cumple con los valores de la norma.

En el caso del límite elástico, este se mantiene prácticamente sin cambio hasta 650 °C, y al aumentar la temperatura del tratamiento térmico, el valor tiende a disminuir, esto lo podemos observar más claramente en la gráfica 2.

Para los valores obtenidos de porcentaje de elongación observamos que en su mayoría fluctúan entre 19% a 21%, lo que nos indica una variación mínima y se encuentra dentro de las Normas establecidas.

Ahora analicemos los valores obtenidos de dureza, en los cuales podremos observar que existe cierta diferencia entre nuestras tres zonas en estudio (metal base, zona afectada por el calor y metal de aporte):

- a) En las probetas sin tratamiento térmico la diferencia en dureza entre las zonas en estudio es muy grande.
- b) Para el caso de las probetas tratadas a 550 °C y 650 °C, observamos que en el metal base la dureza se ve ligeramente incrementada; la zona afectada por el calor se incrementa en comparación al metal base, pero se disminuye en comparación con la ZAC sin tratamiento térmico; mientras que el metal de aporte su dureza se observa notablemente disminuída.
- c) A la temperatura de 750 °C la dureza en el metal base y ZAC son muy homogéneas. pero en el metal de aporte está disminuye notablemente.
- d) A la temperatura de 850 °C podemos notar que aunque existe una disminución en las tres zonas en estudio con respecto a la estructura original, esta presenta homogenidad a través de las zonas tratadas.



Finalmente del análisis metalográfico realizado podemos observar lo siguiente:

- 1) Por abajo de 850 °C no hay una homogenización completa en las tres zonas creadas de la unión soldada (metal base-ZAC y metal de aporte).
- 2) A 850 °C se observa una estructura prácticamente homogénea desde el punto de vista morfológico.

### 5.3 MICROFOTOGRAFÍAS Y TABLAS DE RESULTADOS OBTENIDOS:

T A B L A 5.1

Propiedades Mecánicas del Metal Base  
( Valores Promedio de 3 Muestras Ensayadas )

Resistencia a la Tracción .....	75	760 lb/plg <sup>2</sup>
Límite Elástico .....	59	240 lb/plg <sup>2</sup>
Elongación .....		21 %
Dureza .....		92 Rb

**T A B L A 5.2**

**Propiedades Mecánicas Obtenidas en Muestras  
Soldadas sin Tratamiento Térmico**

<b>Muestra</b>	<b>Resistencia a la tracción (psi)</b>	<b>Límite Elástico (psi)</b>	<b>Elongación ( % )</b>
1	70, 727	52, 463	18
2	73, 375	52, 491	19
3	71, 829	52, 501	19
4	72, 197	52, 227	20
5	72, 420	52, 915	19

**T A B L A 5.3**

**Propiedades Mecánicas Obtenidas en Muestras  
Soldadas con Tratamiento Térmico a 550 °C**

<b>Muestra</b>	<b>Resistencia a la tracción (psi)</b>	<b>Límite Elástico (psi)</b>	<b>Elongación ( % )</b>
1	72, 693	53, 672	19
2	73, 401	54, 008	19
3	71, 164	53, 794	19
4	69, 215	53, 814	20
5	70, 911	53, 062	19

**T A B L A 5.4**

**Propiedades Mecánicas Obtenidas en Muestras  
Soldadas con Tratamiento Térmico a 650 °C**

Muestra	Resistencia a la tracción (psi)	Límite Elástico (psi)	Elongación ( % )
1	66, 756	52, 605	20
2	66, 299	52, 025	19
3	67, 359	51, 102	20
4	67, 876	53, 318	20
5	67, 494	53, 572	21

**T A B L A 5.5**

**Propiedades Mecánicas Obtenidas en Muestras  
Soldadas con Tratamiento Térmico a 750 °C**

Muestra	Resistencia a la tracción (psi)	Límite Elástico (psi)	Elongación ( % )
1	69, 004	45, 097	20
2	67, 267	42, 841	20
3	68, 117	45, 933	19
4	67, 768	45, 802	21
5	68, 492	44, 306	20

T A B L A 5.6

Propiedades Mecánicas Obtenidas en Muestras  
Soldadas con Tratamiento Térmico a 850 °C

Muestra	Resistencia a la tracción (psi)	Límite Elástico (psi)	Elongación ( % )
1	66, 757	47, 101	21
2	65, 328	48, 579	21
3	66, 543	48, 285	20
4	67, 113	47, 081	20
5	67, 222	48, 720	20

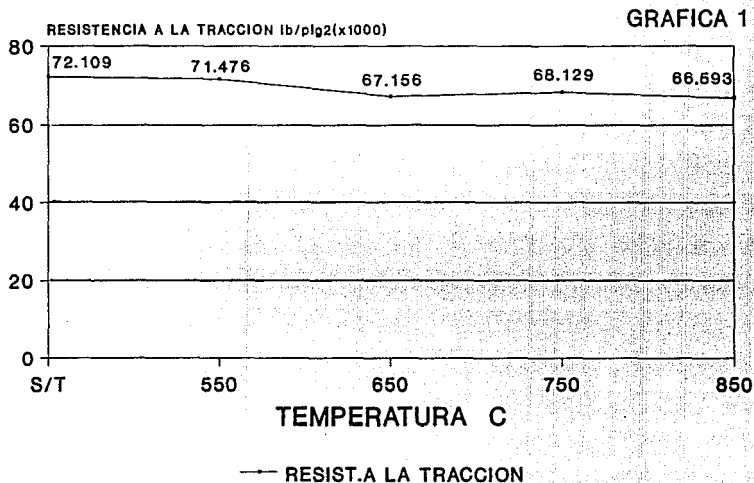
**T A B L A 5.7**

**Resultados Promedio Obtenidos en el Mapeo  
de Dureza por zonas en Muestras Soldadas  
y tratadas térmicamente a Diferentes Temperaturas**  
La escala utilizada es Vickers, con carga de 5 Kgs.

Temperatura de tratamiento Térmico	Z O N A		
	Metal base	Z.A.C	Metal de Aporte
Sin Tratamiento	194	263	174
Térmico			
550 °C	200	224	159
650 °C	195	210	150
750 °C	204	199	150
850 °C	168	170	166

Z. A. C. .- Zona Afectada por el Calor

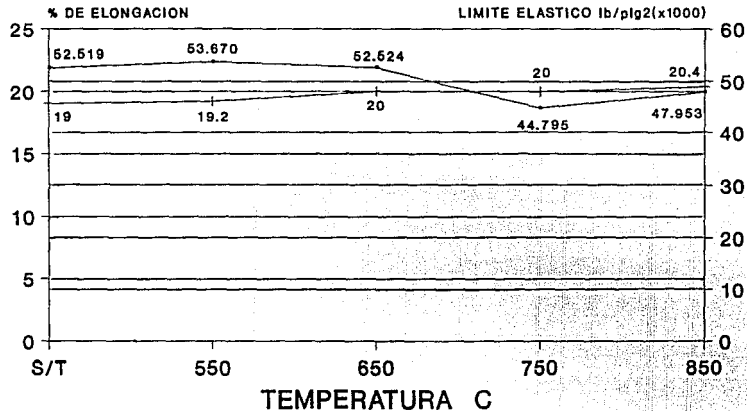
# PROPIEDADES MECANICAS EN MUESTRAS SOLDADAS



S/T SIN TRATAMIENTO TERMICO

# PROPIEDADES MECANICAS EN MUESTRAS SOLDADAS

GRAFICA 2



— LIMITE ELASTICO    + % ELONGACION

S/T SIN TRATAMIENTO TERMICO

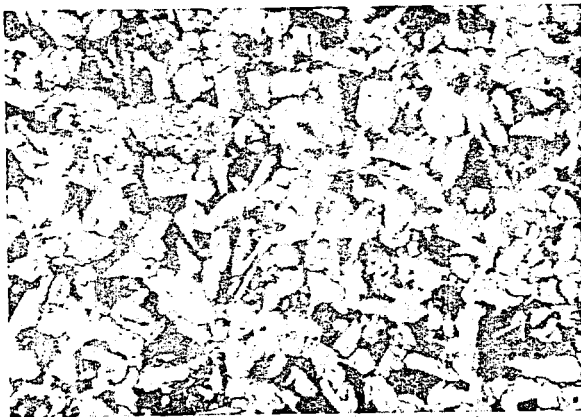


FOTO No. 1.- ESTRUCTURA DE METAL BASE ORIGINAL. CONSISTE DE GRANOS EQUIAXIALES DE FERRITA Y PERLITA, ATACADO CON NITAL AL 2%, 500X.





FOTO No. 2.- ESTRUCTURA QUE MUESTRA METAL DE AFORTE Y ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN LA MUESTRA TRATADA A 650 °C. LA ESTRUCTURA ES FERRITA EN EL METAL DE APORTE Y FERRITA MAS PERLITA DE GRANO FINO EN Z.A.C. ATACADO CON NITAL AL 2%, 200X.

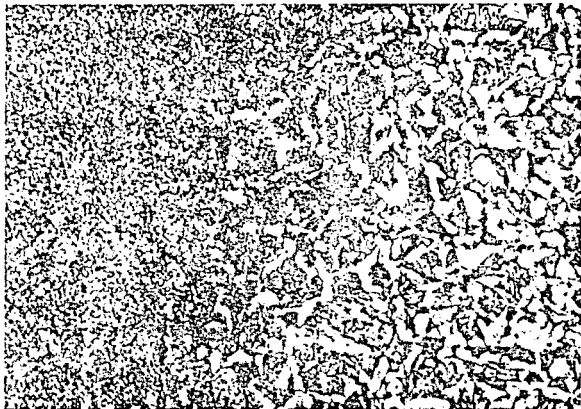


FOTO No. 3.- ESTRUCTURA QUE MUESTRA ZONA AFECTADA POR EL CALOR Y METAL BASE EN LA MUESTRA TRATADA A 650 °C. EN AMBOS CASOS LA ESTRUCTURA - ES FERRITA Y PERLITA DE DIFERENTE TAMAÑO DE GRANO. ATACDO CON NITAL AL 2%, 200X.

ESTÁ TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

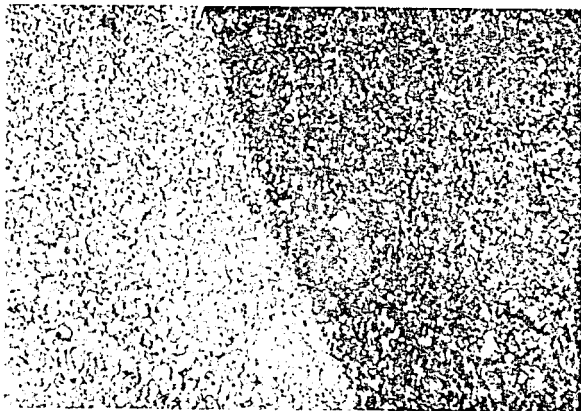


FOTO No. 4.- ESTRUCTURA QUE MUESTRA METAL DE APORTE Y ZONA AFECTADA POR EL CALOR. EN LA MUESTRA TRATADA A 750 °C. LA ESTRUCTURA ES FERRITA EN EL METAL DE APORTE Y FERRITA MAS PERLITA DE GRANO FINO EN Z.A.C. ATACADO CON NITAL AL 2%, 200X.

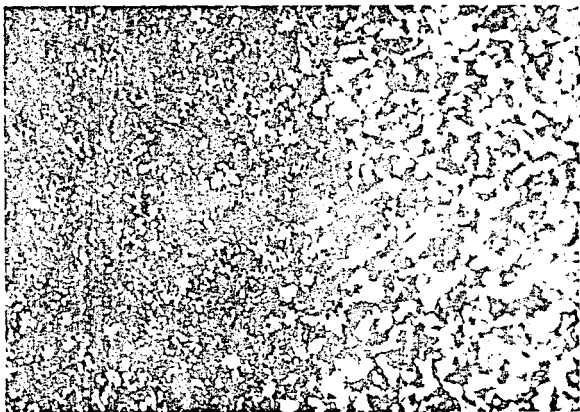


FOTO No. 5.- ESTRUCTURA QUE MUESTRA ZONA AFECTADA POR EL CALOR Y METAL BASE EN LA MUESTRA TRATADA A 750 °C. EN AMBOS CASOS LA ESTRUCTURA - ES FERRITA Y PERLITA DE DIFERENTE TAMAÑO DE GRANO. ATACADA CON NITAL AL 2%, 200X.

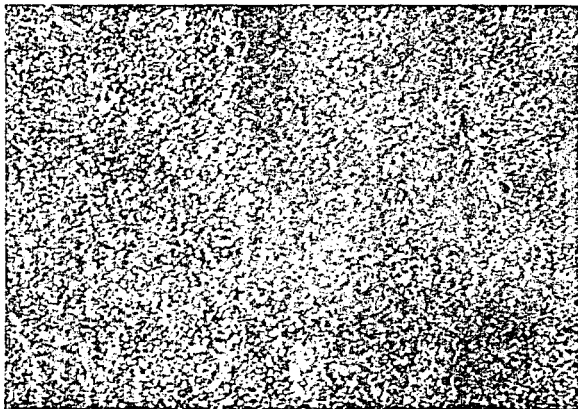


FOTO No. 6.- ESTRUCTURA QUE MUESTRA METAL DE APORTE Y ZONA AFECTADA POR EL - CALOR, EN LA MUESTRA TRATADA A 850 °C. LA ESTRUCTURA ES FERRITA PRINCIPALMENTE EN EL METAL DE APORTE, Y DE FERRITA MAS PERLITA, EN LA Z.A.C., CON UN TAMAÑO DE GRANO MUY HOMOGENEO. ATACADO CON NITAL AL 2%, 200X.

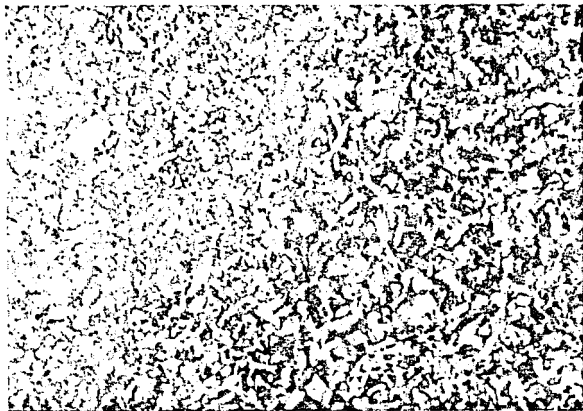


FOTO No. 7.- ESTRUCTURA QUE MUESTRA ZONA AFECTADA POR EL CALOR Y METAL BASE EN LA MUESTRA TRATADA A 850 °C. EN AMBOS CASOS LA ESTRUCTURA - ES DE FERRITA Y PERLITA , CON UN TAMAÑO DE GRANO MUY HOMOGENEO ATACADO CON NITAL AL 2%, 200X.

#### 5.4 CONCLUSIONES

1. La resistencia a la tracción no presenta cambios muy significativos, pero tiende a disminuir conforme aumenta la temperatura del tratamiento térmico posterior a la soldadura.
2. Los valores de límite elástico no presentan cambios significativos hasta 650 °C, pero a partir de 750 °C tiende a disminuir.
3. Los valores de Elongación son muy homogéneos, y en general permanecen dentro de la norma.
4. Los valores de dureza presentan cambios más significativos en función de la variación de la temperatura. A 850 °C es la temperatura a la cual obtenemos una mayor uniformidad de dureza en las tres zonas de la unión soldada.
5. La máxima homogenización estructural se consigue con un tratamiento térmico a 850 °C posterior a la soldadura. Sin embargo, el tamaño de grano final es menor que el del metal base original.
6. Por lo anterior deducimos que el tratamiento de recocido a 850 °C, consigue mayor homogenización, tanto estructural como en propiedades mecánicas.

## BIBLIOGRAFIA

1. Annual Book of ASTM Standars 1985  
Section 1, Vol. 01.01  
Steel, Piping, Tubing, fittings.
2. Clasificación AWS de Metales de Aporte en Soldadura  
Norma No. 4.120.00  
Primera Edición 1978, PEMEX
3. J. G. Hicks M. A.  
Weldep Joint Desing
4. George Krauss  
Principles of Heat Treatment of Steel  
ASM 1978
5. Metals Handbook 8th Edition. Vol. 2  
Heat Treating, Cleaning, Designs. ASM
6. Henry Horwitz  
Soldadura, Aplicaciones y Práctica  
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S>A>



7. Howard B. Cary  
Modern Welding Technology  
Prentice-Hall 1979
8. Richard I. Little  
Welding and Welding Technology  
McGraw - Hill Book Company
9. Introductory Welding Metallurgy AWS