



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

“RESISTENCIA A LA TENSIÓN, DUREZA Y ESTRUCTURA  
DE LOS SEGUNDOS Y TERCEROS CORDONES EN  
UNA SOLDADURA MULTIPASO.”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**  
P R E S E N T A  
**SERGIO GALLEGOS BAUTISTA**

ASESOR: DR. HÉCTOR ENRIQUE CURIEL REYNA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. MEX.

2008



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

Resistencia a la Tensión, Dureza y Estructura de los Segundos y Terceros  
Cordones en una soldadura multipaso.

que presenta el pasante: Sergio Gallegos Bautista  
con número de cuenta: 402068260 para obtener el título de :  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 23 de abril de 2008.

PRESIDENTE

Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna

VOCAL

M.I. José Juan Contreras Espinosa

SECRETARIO

Ing. Jorge de la Cruz Trejo

PRIMER SUPLENTE

M.I. Sergio de Moraes Benítez

SEGUNDO SUPLENTE

Ing. Humberto Neri Mondragón

## **AGRADECIMIENTO**

A MIS PADRES EL SR. ANDRES GALLEGOS Y LA SRA. SOFÍA BAUTISTA POR ESTAR SIEMPRE A MI LADO Y AYUDARME A REALIZAR ESTE SUEÑO QUE AL IGUAL UN DÍA ANHELAMOS JUNTOS Y HOY LO HACEMOS REALIDAD. PARA MÍ, ESTA ES LA HERENCIA MÁS GRANDE Y VALIOSA QUE ME HAYAN DADO; APARTE DE SUS CONSEJOS, CARIÑOS Y CARISIAS, QUE HOY POR NADA DEL MUNDO CAMBIARÍA.

GRACIAS POR HABERME DADO OTRA OPORTUNIDAD, YA QUE UN DÍA LA DESAPROVECHE.

ANDY, MI HEMANA GRACIAS POR DEJAR COMPARTIR HOY ESTE SUEÑO OJALÁ UN DÍA PUEDES VER REALIZAR A TUS HIJOS. TE QUIERO MUCHO.

A MI BRO ISRAEL POR SER EL PRIMERO DE LA FAMILIA EN DARNOS EL EJEMPLO DE SER UN PROFESIONISTA Y ASI PODER TRATAR DE IMITARTE.

A LA PEQUEÑA DANY OJALÁ ESTO SEA UN EJEMPLO DE SUPERACIÓN Y UN DÍA PUEDES COMPARTIR TU SUEÑO DE SER LIC. CON TODA TU FAMILIA.

A MI ESPOSA Y AMIGA TE DOY LAS GRACIAS POR APOYARME, COMPRENDERME Y PRESTARME UN POCO DE TU TIEMPO PARA PODER REALIZAR MI SUEÑO, Y DARME UN HERMOSO BEBE.

A MI PEQUEÑO **ChEInCiTo** TE DOY LAS GRACIAS POR LLEGAR A MI VIDA, YA QUE TU FUISTE EL MOTOR QUE LE DIO IMPULSO A ESTE PROYECTO PUES TU ME DISTE LA FUERZA NECESARIA PARA CULMINAR HOY MI TRABAJO DE TITULACIÓN. OJALÁ UN DÍA PUEDA VERTE COMO UN PROFESIONISTA.

GRACIAS FAMILIA POR ESTAR AMÍ LADO EN ESTE DÍA.

## **RECONOCIMIENTO**

AL INGENIERO, MAESTRO, DOCTOR Y AMIGO ENRIQUE CURIEL REYNA POR SU VALIOSO TIEMPO Y ATENCIÓN PRESTADA PARA QUE YO PUDIERA REALIZAR ESTE PROYECTO.

AL CDR. TOMÁS RANGEL ORTIZ POR SU COLABORACIÓN EN ESTE PROYECTO

AL FUTURO MAESTRO Y AMIGO EL ING. NOÉ ALBERTO CORTES GUERRERO POR SU PARTICIPACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE ESTA TESIS.

AMI UNIVERSIDAD, PROFESORES Y AMIGOS POR DEJAR COMPARTIR BELLOS MOMENTOS.

GRACIAS A TODOS Y CADA UNO DE USTEDES...

## ÍNDICE

### **CAPÍTULO 1**

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
-----------------------------	---

### **CAPÍTULO 2**

OBJETIVO.	2
2.1 HIPÓTESIS.	3

### **CAPÍTULO 3**

INTRODUCCIÓN.	4
---------------	---

### **CAPÍTULO 4**

#### ACERO Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS.

4.1 OBTENCIÓN DEL ACERO.	5
4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO.	8
4.3 ESTRUCTURA DE LOS ACEROS.	10
4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS.	15
4.4.1 ACEROS DE BAJO CARBONO (0.08% a 0.35% C).	16
4.4.2 ACEROS DE MEDIANO CARBONO (0.35% a 0.60% C).	16
4.4.3 ACEROS DE ALTO CARBONO (0.60% a 1.10% C).	16

### **CAPÍTULO 5**

#### SOLDADURA EN LOS ACEROS DE BAJO CARBONO.

5.1 PROCESO DE LA SOLDADURA.	17
5.1.1 SOLDADURA POR GAS.	17
5.1.2 SOLDADURA POR ARCO.	18
5.1.3 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO.	19
5.1.4 SOLDADURA POR RESISTENCIA.	19

5.2 UNIONES SOLDADAS.	20
5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ELECTRODOS.	24
5.4 EFECTO DE LA SOLDADURA.	26
5.4.1 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LA SOLDADURA.	27
5.4.2 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LA UNIÓN SOLDADA.	30
5.5 SOLDADURA DE LOS ACEROS DE BAJO CARBONO.	31

## **CAPÍTULO 6**

### ENSAYO DE DUREZA.

6.1 DUREZA BRINELL.	33
6.2 DUREZA ROCKWELL.	36
6.3 DUREZA VICKERS.	40

## **CAPÍTULO 7**

### PRUEBAS DE TENSIÓN.

7.1 PRUEBA DE TENSIÓN.	44
------------------------	----

## **CAPÍTULO 8**

### MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

8.1 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE TRANSMISIÓN (TEM).	48
8.2 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM).	51

## **CAPÍTULO 9**

### **PARTER EXPERIMENTAL.**

9.1 OBJETIVO.	<b>57</b>
9.2 PROPIEDADES DEL ACERO A-36 Y ELECTRODO E-7018.	<b>57</b>
9.3 METODOLOGÍA DEL TRABAJO.	<b>60</b>
9.4 PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO.	<b>63</b>
9.5 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.	<b>68</b>
9.5.1 GRÁFICAS.	<b>73</b>
9.5.2 METALOGRAFÍAS.	<b>78</b>
9.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	<b>81</b>
CONCLUSIONES.	<b>82</b>
BIBLIOGRAFÍA.	<b>83</b>

## **1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

En las inspecciones de las uniones soldadas en placas se presupone que la soldadura tiene un comportamiento homogéneo y uniforme, pero se puede pensar que por el efecto de la temperatura y la velocidad de enfriamiento, las propiedades de la soldadura tenderán a ser heterogéneas.



## **2.- OBJETIVO.**

La presente investigación tiene por objetivo:

Conocer el comportamiento de la microestructura y las variaciones de dureza, y tensión a lo ancho de los segundos y terceros cordones en una placa de un acero A-36, después de ser sometido a la aplicación de una soldadura en multipaso.

## **2.1 HIPOTESIS.**

El efecto de la temperatura modifican las propiedades estructurales del acero, por consiguiente las mediciones de las propiedades mecánicas como es la dureza, y la tensión mostraran cambios en ella, por consiguiente no existirá una dureza igual en todos y cada uno de los cordones.

### **3.- INTRODUCCIÓN.**

Dice la tradición que hace aproximadamente 2500 años un herrero griego de nombre GLAUKOS invento la forma de soldar el hierro, el procedimiento consistía en calentar la pieza de hierro en un horno o forja hasta que se ablandaba el metal, valiéndose del martilleo se le fusionaba hasta convertirse en una unidad; la practica de la soldadura por forjado continuo casi sin sufrir cambio hasta los años 80`s.

En la actualidad el uso de diferentes tipos y dimensiones de 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 este material con un material de aporte por medio de soldadura eléctrica debido a fallas o rupturas en su funcionamiento, se ha vuelto una operación cotidiana en la industria nacional.

Sería imposible listar aquí cualquier certificación estándar, porque varían los 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.

La soldadura es un proceso que involucra la unión de dos elementos y el soldar estos elementos requiere de ciertas precauciones; considerando que la resistencia a la corrosión de un cordón de soldadura no debe ser inferior a la del metal base, igualmente la soldadura debe tener buenas características y propiedades mecánicas.

El estudio de las estructuras que se presentan en la masa de una soldadura, así como en la zona afectada por el proceso de aplicación de la misma en el metal base, es de interés particular cuando se trata de un proceso con material de aporte (electrodo).

Poniendo especial atención en la aplicación de la soldadura en multipaso, se investigará las diferencias que ocasionan los fenómenos térmicos en las características mecánicas, de un acero al carbón A-36, en particular en la dureza; también será objeto de estudio las variaciones de la micro estructura, que tendrán lugar en la zona de nuestro interés.

## 4.- ACERO Y SUS PROPIEDADES MECANICAS.

### 4.1 OBTENCION 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 2.11% 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 descarburación. 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.

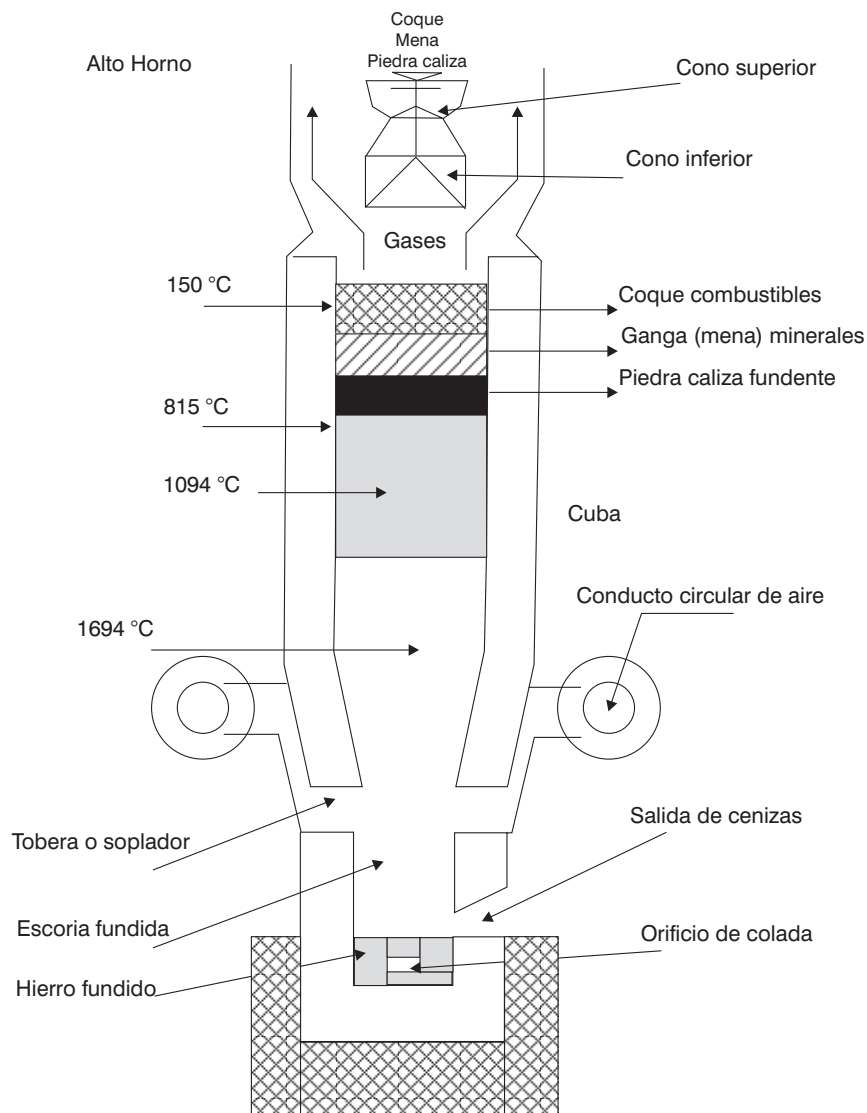
Pero la verdadera revolución de esta industria se debe a Bessemer (1856), que consiguió afinar la fundición al hacerla atravesar por una corriente de aire. Thomas en 1877, trató así las fundiciones fosforosas, Siemens inventó el horno de reverbero cóncavo, calentando con gases procedentes de los recuperadores de calor y logrando afinar la fundición de modo directo, gracias a la elevada temperatura desarrollada en la combustión de los gases. Con este horno, Martín (1864) realizó el afino de la fundición con mineral, o la re fusión de chatarra (procedimiento Martín-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. El cual está constituido por un recipiente en forma de pera, con

revestimiento refractario, capaz de bascularlo alrededor 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 re carburación de la masa, añadiéndole la cantidad adecuada de hierro especular o de ferromanganeso que contiene carbono.

**Proceso Siemens-Martín:** 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 más 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 Eléctrico:** 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 rodeada 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.



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.

**Fig. 4.1.- Diagrama de un alto horno**

## 4.2 PROPIEDADES MECANICAS 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 más importantes que debe poseer el material; tomando 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 de tensión.

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

$l_o$  = 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 más frágiles la resistencia a la tensión ocurre en el punto de falla. (Fig. 4.2)

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

$$\sigma = F / A_o$$

Donde:

$\sigma$  = Resistencia a la tensión.

F = Fuerza máxima aplicada.

$A_o$  = Área de la sección transversal.

**Elasticidad:** Propiedad de un material por la que se deforma bajo una carga inferior al límite elástico y vuelve a su forma original una vez que se elimina la carga.

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

**Tenacidad:** Es la capacidad que tiene un material de soportar cargas aplicadas súbitamente.



**Fatiga:** Es la tendencia de un material a romperse bajo condiciones de esfuerzos de repetición cíclica.

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

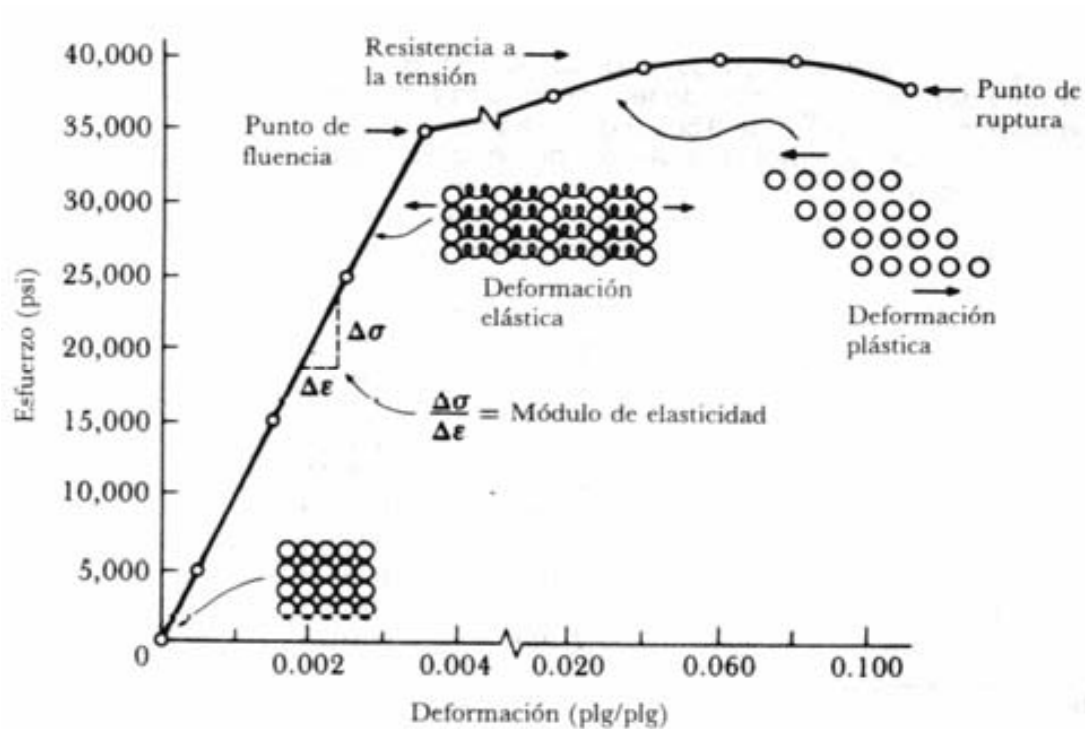


Fig. 4.2.- Curva Esfuerzo – Deformación, para materiales dúctiles.

**Resistencia a la Corrosión:** Es un ataque químico o electroquímico sobre los metales, y consiste en la destrucción por desgaste lento de una pieza o herramienta, aunque no es una propiedad física, representa un factor importante en el proceso de selección de materiales, cuando el medio ambiente o los elementos que estén en contacto con el metal, pueden corroerlo o propicien este ataque.

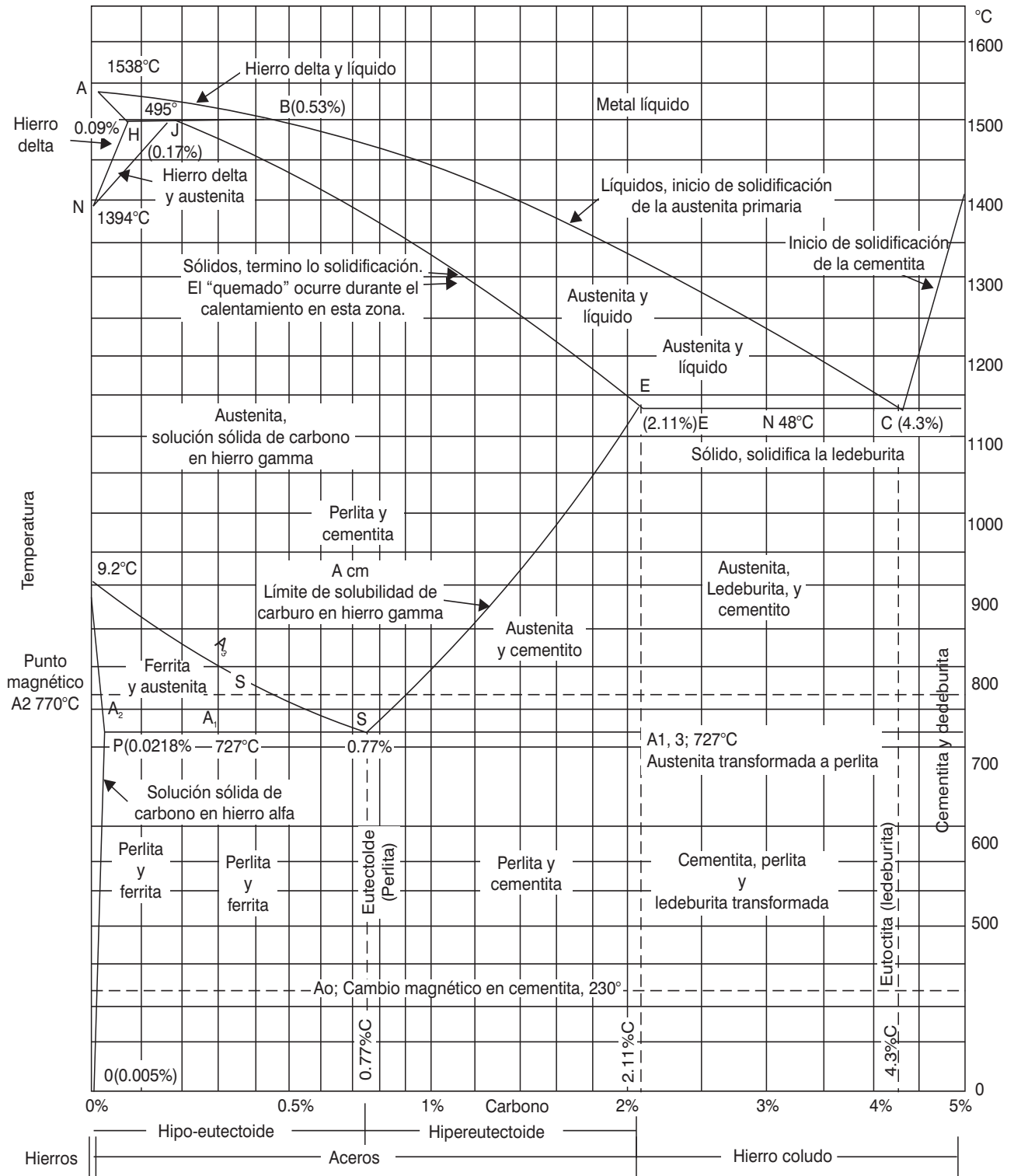
**Conductividad:** Ésta puede ser eléctrica o térmica y se refiere a la propiedad que tiene un material por lo que permite el paso de electricidad y calor.

#### **4.3 ESTRUCTURAS DE LOS ACEROS.**

Los constituyentes metálicos que pueden presentarse en los aceros al carbono son: ferrita, cementita, perlita, Austenita, martensita y bainita; aunque nunca como único constituyente. También pueden estar presentes constituyentes no metálicos como óxidos, silicatos, sulfuros y aluminatos.

El [análisis](#) de las micro estructuras de los aceros al carbono recocidos y fundiciones blancas debe realizarse en base al diagrama metal estable fierro-carburo de hierro.

## Carbono, % de átomos



Las microestructuras que presenta el diagrama de equilibrio para los aceros al carbono son:

### **Ferrita (fierro $\alpha$ ).**

Es una solución sólida de carbono en fierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es del orden de 0.008% de carbono, por esto se considera como fierro puro, la máxima solubilidad de carbono en el fierro alfa es de 0.02% a 727 °C.

La ferrita es la fase más blanda y dúctil de los aceros, cristaliza en la red cúbica centrada en el cuerpo, tiene una dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm<sup>2</sup>, llegando hasta un alargamiento del 40%. La ferrita se observa al microscopio como granos poligonales claros. En los aceros, la ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita, en los aceros de menos de 0.6% C formando una red o malla que limita los granos de perlita, en los aceros de 0.6 a 0.85% C en forma de agujas o bandas circulares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la Austenita como en los aceros en bruto de colada o en aceros que han sido sobrecalentados.

### **Cementita.**

Es el carburo de Fierro de fórmula Fe<sub>3</sub>C, contiene 6.67% de carbono y 93.33% de Fierro, es el micro constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, alcanzando una dureza Brinell de 700 (68 Rc) y cristaliza en la red ortorrómbica.

En las probetas atacadas con ácidos se observa de un blanco brillante y aparece como cementita primaria o proeutéctica en los aceros con más de 0.9% C creando una red que envuelve los granos de perlita, formando parte de la perlita como láminas paralelas separadas por otras láminas de ferrita, se presenta en forma de glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita, cuando los aceros

de alto carbono se han sometido a un recocido de globulización, en los aceros hipoeutectoides que no han sido bien templados.

### **Perlita.**

Es el micro constituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita, compuesta por el 88% de ferrita y 12% de cementita, contiene el 0.8% C. Tiene una dureza de 250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 15%; el nombre de perlita se debe a las irisaciones que adquiere al iluminarla, parecidas a las perlas. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la Austenita y por la transformación isotérmica de la Austenita en el rango de 650 a 727°C.

La micro estructura del acero al carbono, son cristales oscuros de perlita. Si el enfriamiento es rápido (100-200°C/seg.), la estructura es poco definida y se denomina Sorbita, si la perlita laminar se somete a un recocido a temperatura próxima a 727°C, la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, denominándose perlita globular.

### **Austenita.**

Es el constituyente más denso de los aceros y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gama. La cantidad de carbono disuelto, varía de 0.8 al 2% C que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130°C. La Austenita no es estable a la temperatura ambiente pero existen algunos aceros al cromo-níquel denominados austeníticos cuya estructura es Austenita a temperatura ambiente. La Austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 30%, no es magnética.

La Austenita no puede atacarse con nital, se disuelve con agua regia en glicerina apareciendo como granos poligonales frecuentemente marcados, puede aparecer junto con la martensita en los aceros templados.

### **Martensita.**

Es el constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austeníticos a altas temperaturas. El contenido de carbono suele variar desde muy poco hasta el 1% de carbono, sus propiedades físicas varían con su contenido en carbono hasta un máximo de 0.7% C.

La martensita tiene una dureza de 50 a 68 Rc, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60 grados. Los aceros templados suelen quedar demasiado duros y frágiles, inconveniente que se corrige por medio del revenido que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica inferior (727°C), dependiendo de la dureza que se desee obtener, enfriándolo luego al aire o en cualquier medio.

### **Bainita.**

Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la Austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250 a 500°C. Se diferencian dos tipos de estructuras: la bainita superior de aspecto arborescente formada a 500-580°C, compuesta por una matriz ferrítica conteniendo carburos. Bainita inferior, formada a 250 - 4000 °C tiene un aspecto acicular similar a la martensita y constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. La bainita tiene una dureza de 40 a 60 Rc.

## **4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS.**

Los materiales ferrosos su matriz básica es el hierro (Fe, el metal original), que tiene cantidades variables de C, los aceros generalmente son aleaciones de

Fe y C con menos de 2% C; los hierros colados contienen de 2 a 4% C. Dependiendo de las condiciones de enfriamiento y de los elementos aleantes, el carbono puede encontrarse principalmente en la forma combinada de carburo de hierro,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , llamada también cementita.

Si se toma como base el contenido de carbono, es común dividir el diagrama hierro-carburo de hierro. En dos partes. Las aleaciones que contienen menos del 2% C se conocen como aceros y aquellas que contienen más del 2% C se conocen como hierros fundidos o colados. El intervalo de acero se subdivide aún más basándose en el contenido de carbono eutectoide (0.77% C). Los aceros que contienen menos del 0.77% C se llaman aceros hipoeutectoides, en tanto que los que contienen de 0.77 a 2% C se llaman aceros hipereutectoides. El intervalo de hierro fundido también puede subdividirse por el contenido de carbono (4.3% C).

Los hierros fundidos que contienen menos del 4.3% C se conocen como hierros fundidos hipoeutectóicos, en tanto que los que contienen más del 4.3% C se llaman hierros fundidos hipereutectóicos, pero por ahora en el presente trabajo solo se hablara de los aceros que nos importa y dejaremos a un lado los hierros fundidos.

Los aceros al carbono (los que también se conocen como aceros al carbono simple, aceros ordinarios y aceros con contenido de carbono exclusivamente), que están constituidos de carbono, manganeso (1.65% máx.), con la adición de otros elementos generalmente presentes en forma de impurezas, como silicio (0.60% máx.), azufre (0.035% máx.) y fósforo (0.03% máx.).

De acuerdo con las siguientes organizaciones:

A.S.T.M. American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales); A.P.I. American Petroleum Institute (Instituto

Americano del Petróleo); A.S.M.E. American Society of Mechanical Engineer (Sociedad Americana de Ingeniería Mecánica); S.A.E. Society of Automotive Engineer (Sociedad de Ingeniería Automovilística) y la A.I.S.I. American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y del Acero); dichos aceros están clasificados en tres grupos de acuerdo con el porcentaje de contenido de carbono:

#### **4.4.1 ACEROS DE BAJO CARBONO (0.08% a 0.35% C).**

El acero de bajo contenido de carbono es relativamente suave y dúctil, no puede endurecerse en forma apreciable por tratamiento térmico. Representa el tonelaje más grande de todo el acero producido, se usa para hoja de lata, láminas para carrocería de automóviles, alambres de cerca, elementos estructurales ligeros y pesados (bastidores de automóviles, vigas, etc.).

#### **4.4.2 ACEROS DE MEDIANO CARBONO (0.35% a 0.60% C).**

El acero al medio carbono se usa para fundiciones de acero de alta resistencia y para forjas, como eje de ferrocarril, cigüeñales, engranes, ruedas de cangilones para turbina y brazos direccionales. El acero al medio carbón puede endurecerse por tratamiento térmico, pero no puede endurecerse por completo en secciones cuyos espesores sean mayores a media pulgada.

#### **4.4.3 ACEROS DE ALTO CARBONO (0.60% a 1.10% C).**

El acero para alto carbón sirve para forjas con llaves de tuercas y ruedas de ferrocarril y para productos rolados en caliente, como rieles de ferrocarril y barras para refuerzos de concreto. Los productos de alambre de alta resistencia, como alambre de piano y cables de suspensión de puentes se hacen de acero al alto carbono.



## **5.- SOLDADURA EN LOS ACEROS DE BAJO CARBONO.**

### **5.1 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).

#### **5.1.1 SOLDADURA POR GAS.**

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.

#### **5.1.2 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 que 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 deposita en la junta y junto con el metal fundido de los bordes se solidifica para formar una junta sólida (Fig. 5.1).

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.

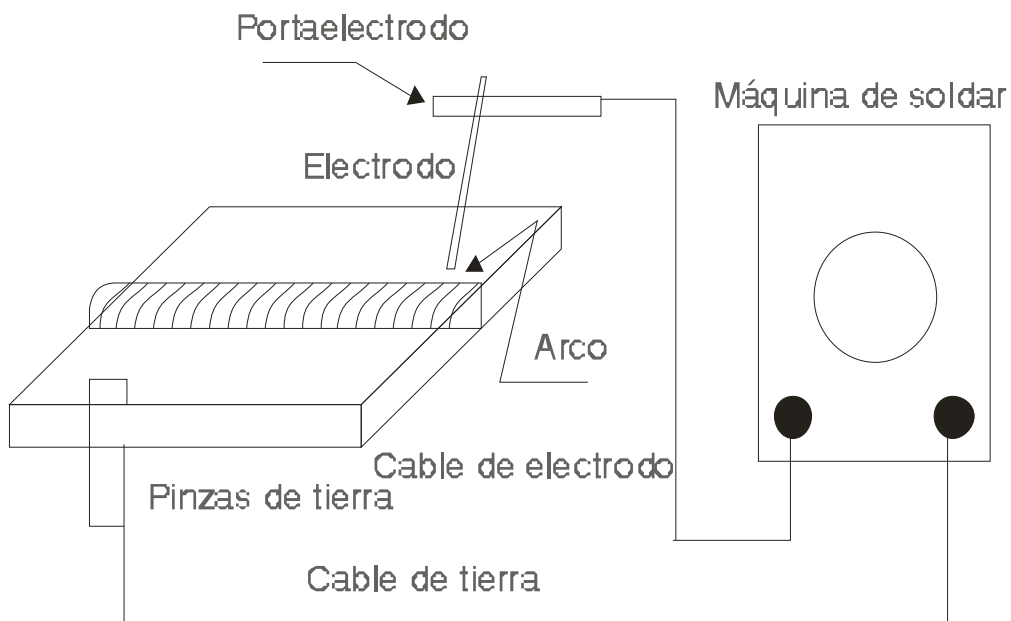


Fig. 5.1.- Soldadura por arco eléctrico.

### 5.1.3 SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO.

La soldadura de arco sumergido es un proceso automático. Este proceso emplea uno o dos electrodos metálicos desnudos, 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.

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 air

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, el cual puede ser manual o automático. El proceso se caracteriza sobre todo por la limpieza de la costura.

#### **5.1.4 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.

#### **5.2 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 provisionalmente por medio de puntos. 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, 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 (Fig. 5.3), 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 (Fig. 5.3) se denominan juntas en I y se emplean para placas de 2 a 4mm. De espesor ( $d$ ) y hasta de 8mm. Cuando se soldan 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 3mm. Y depende de la clase de electrodos.

Para las uniones en V, X, U y doble U (Fig. 5.3), 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 traslapadas 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  $90^\circ$ . Las juntas en T son lo que su nombre indica, pero también pueden ser de un solo bisel, doble bisel, una sola J o de doble J. En la figura 5.4 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

del que generalmente se cree. Los numerosos errores que se cometen en la base de la costura provienen de haber calculado mal la separación.

Se dan ciertos nombres a las partes de la soldadura para poder identificar el lugar de las posibles fallas (Fig. 5.2).

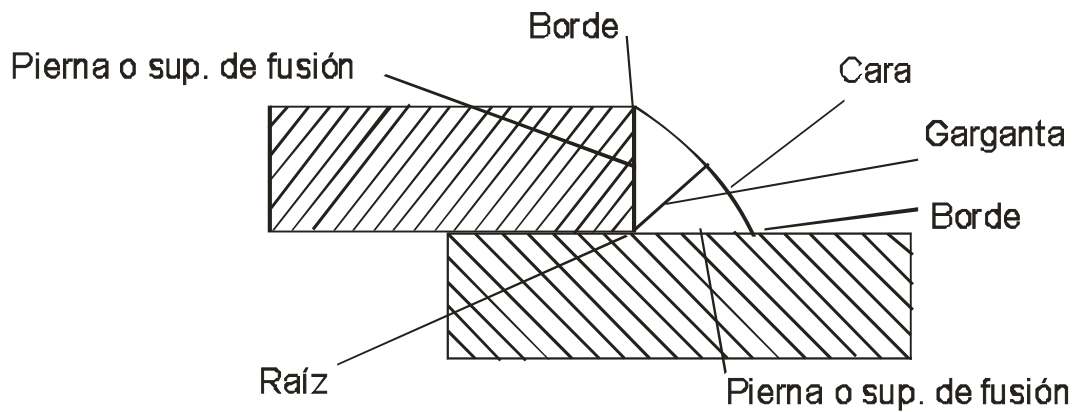


Fig. 5.2.- Diagrama de las partes de la soldadura.

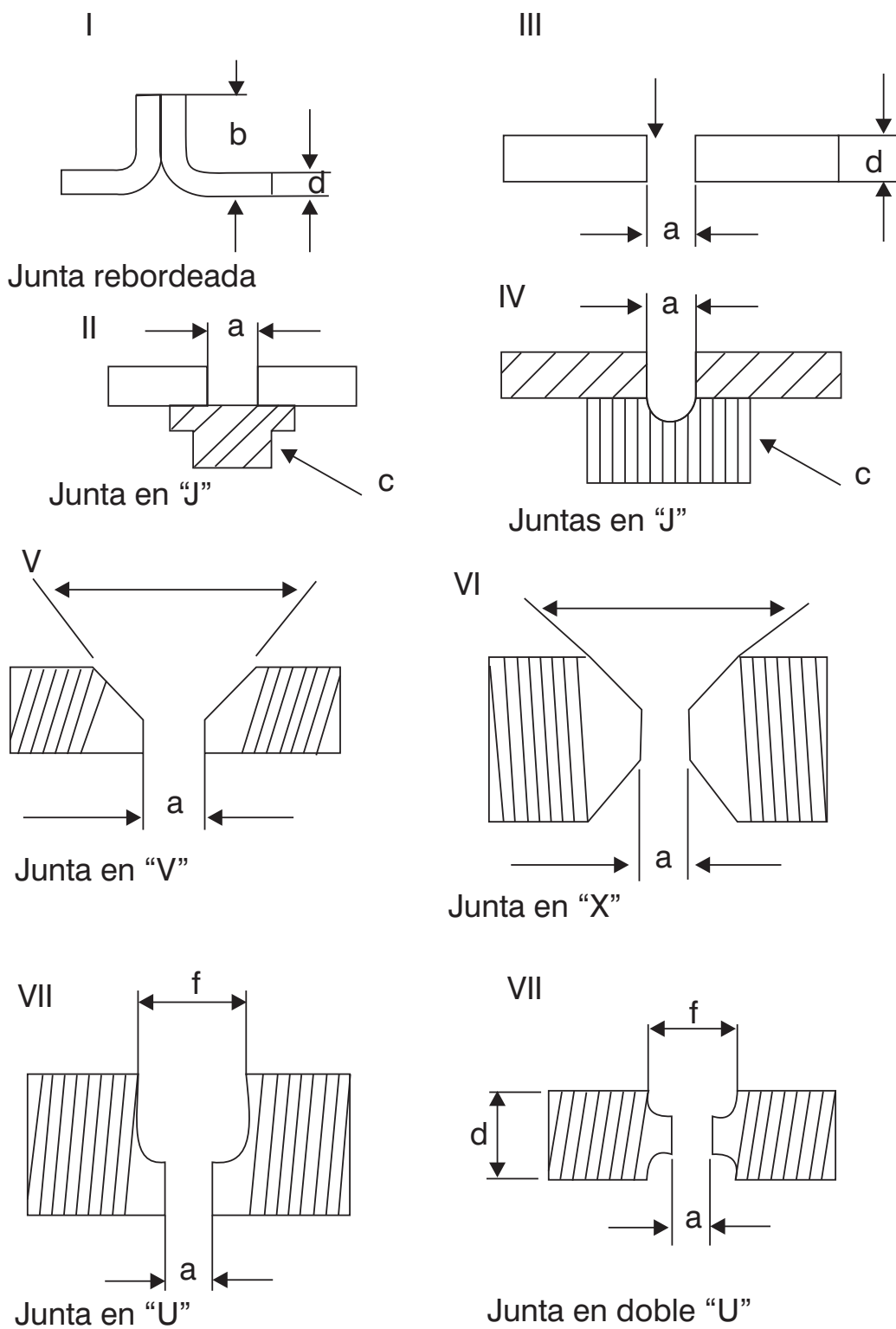
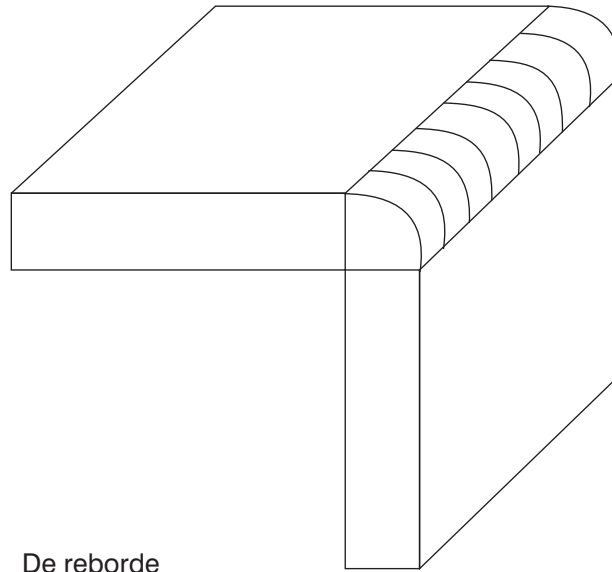
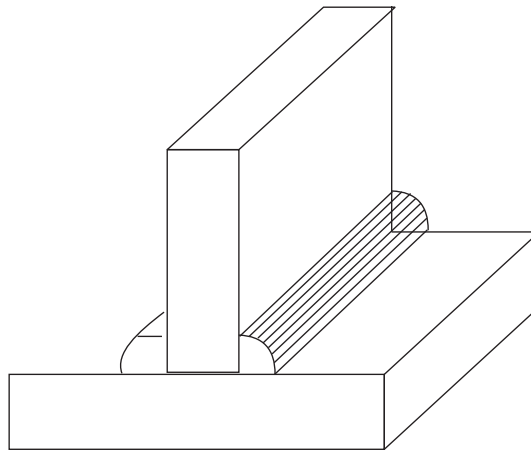


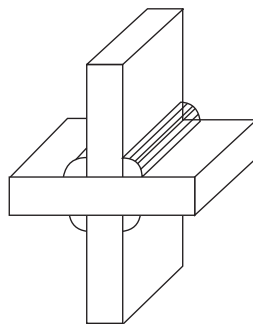
Fig. 5.3.- Preparación de los bordes para soldar a tope.



De reborde



En "T"



En Cruz

**Fig. 5.4.- Diversos tipos de uniones.**



### 5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ELECTRODOS.

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 ser necesario 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.

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. Para la selección adecuada del tipo de electrodo a utilizar deben tomarse en cuenta las exigencias antes mencionadas (Tabla 5.1 y Tabla 5.2).

Tabla 5.1 Requerimientos Químicos.

AWS - ASTM Clasificación	COMPOSICIÓN QUÍMICA, MÁXIMO %				
	Mn	Ni	Cr	Mo	V
E7014, E7015	1.25	0.30	0.20	0.30	0.08
E7016, E7018	1.25	0.30	0.20	0.30	0.08
E6010, E6011	No hay requerimientos Químicos				
E6012, E6013	No hay requerimientos Químicos				

Tabla 5.2 Requerimientos mínimos de Ductilidad y Resistencia a la tensión.

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

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 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

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 dígitos, que lleva como prefijo la letra " E ", los cuales indican lo siguiente:

### E XX XX

La E indica que es un electrodo que se emplea en la soldadura eléctrica. Los segundos números que van a la izquierda de los últimos dígitos multiplicados por mil, dan la resistencia mínima a la tensión del metal depositado; el tercer dígito 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) E-6010.- 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 las 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) E-7018.- 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 las 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.

#### **5.4 EFECTOS DE LA SOLDADURA.**

En la soldadura, el metal fundido se solidifica en cuestión de segundos. La cantidad de metal rara vez excede de una pulgada cúbica. La fuente de calor y el pocillo del metal fundido tiene una temperatura considerablemente más elevada que en los hornos de fundición. Como resultado del enfriamiento rápido del pocillo de soldadura, las reacciones químicas que se inician en el metal fundido y en la escoria no tiene tiempo para completarse.

La solidificación del metal fundido en el pocillo de soldadura se ilustra en forma de diagrama en la figura 5.5. Al avanzar la formación del cordón, la temperatura del pocillo de soldadura desciende debido a la abstracción del calor

hacia el metal base y a la radiación hacia la atmósfera del ambiente, y el metal se solidifica.

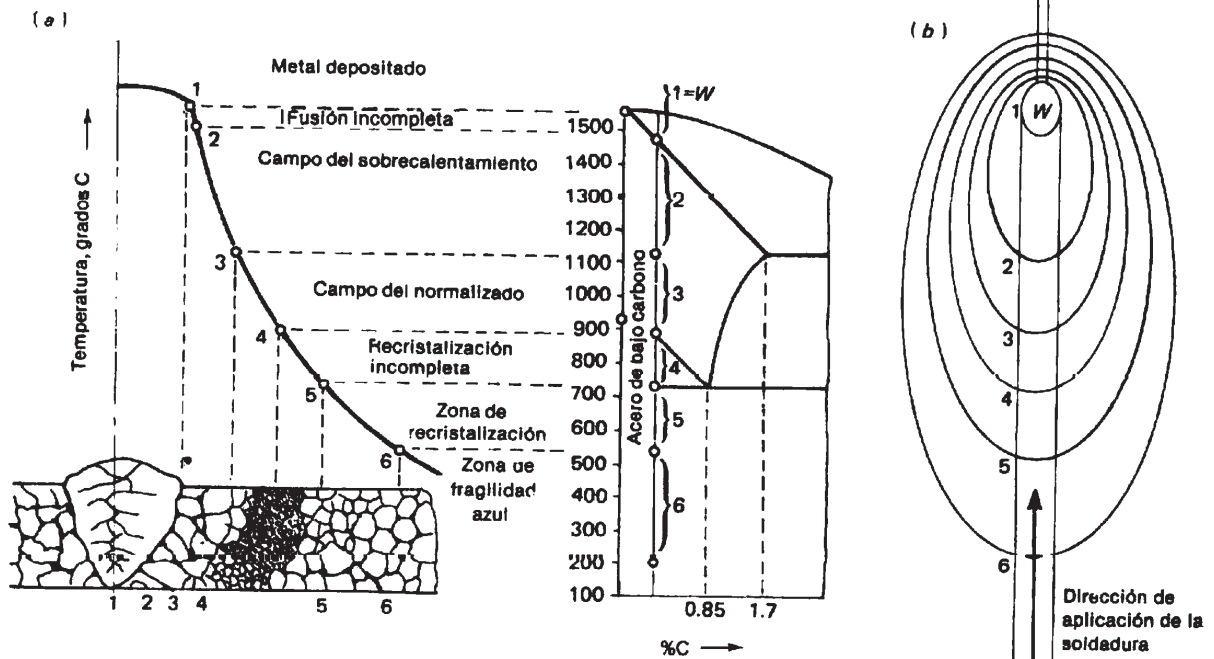


Fig. 5.5.- Solidificación progresiva del metal fundido en un pocillo de soldadura: a) curva de enfriamiento, con expresión de las diferentes estructuras; b) vista isotérmica del pocillo de soldadura (W) y líneas isotermas en torno

#### 5.4.1 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.

Cuando una barra de acero, se calienta en el centro, (Fig. 5.6) 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. 5.6 c y d. Cuando el calentamiento es eliminado, 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 a lo largo de la longitud de la cima de la barra a lo más cortó y a las esquinas de la barra, llevan a una elevación cóncava en la barra como la mostrada en la Fig. 5.6 d y e. Esto implica que algunos residuos del 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); los factores que afectan las tensiones y distorsiones residuales son:

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

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

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

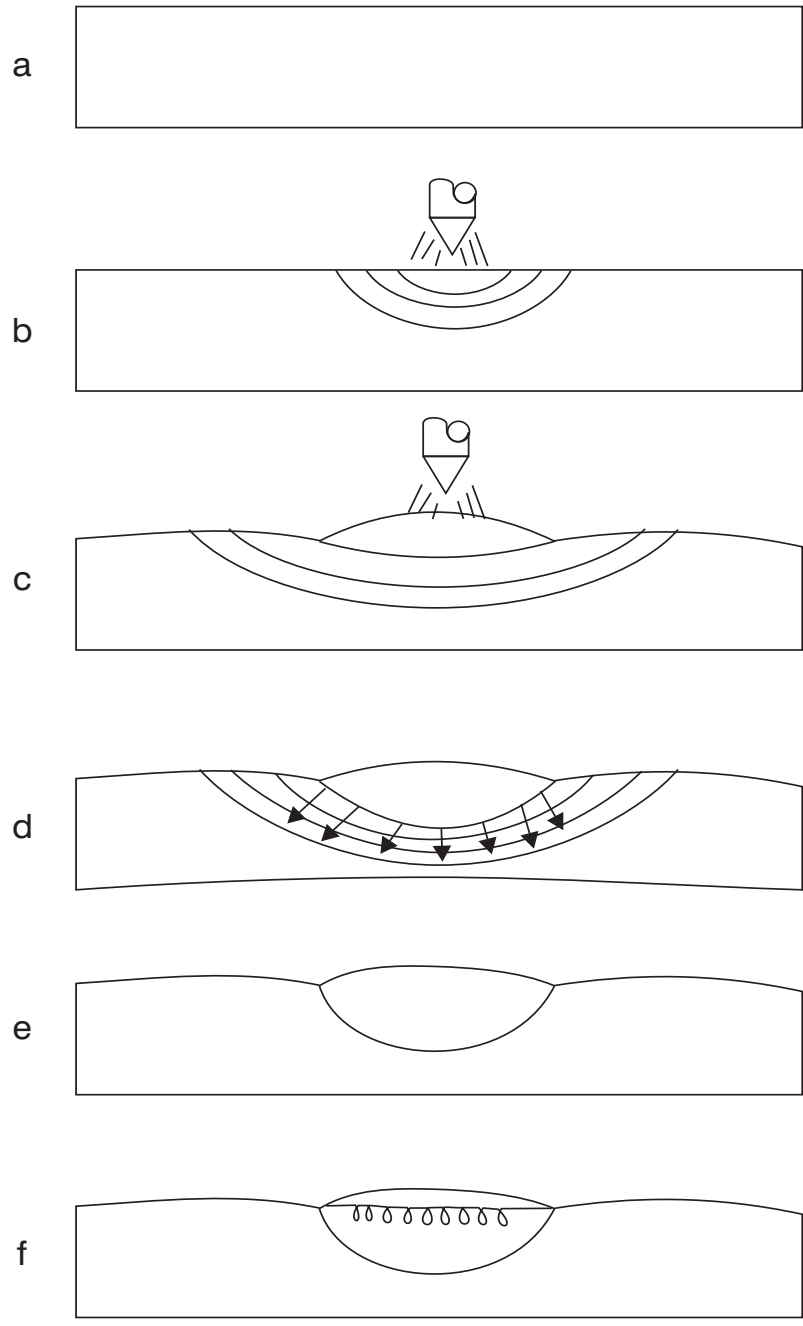


Fig. 5.6.- Barra de acero calentada en el centro.

## 5.4.2 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LA UNIÓN SOLDADA.

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

1. El metal base se funde 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 bastos.
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:

**Metal base.-** Es la estructura original del metal que no ha sido afectada por el calor de la soldadura.

**Metal de Aporte.-** Es aquella parte de una soldadura que ha sido fundida y solidificada durante la operación de soldadura, está compuesta de metal base fundido y de metal de aporte (electrodo).

**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 alta, experimentando algún cambio significativo. En la figura 5.7 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.

## 5.5 SOLDADURA DE LOS ACEROS DE BAJO CARBONO.

Estos aceros generalmente no presentan dificultad en la soldadura. El acero de bajo carbono normalmente no requiere de precalentamiento o poscalentamiento para soldarse.

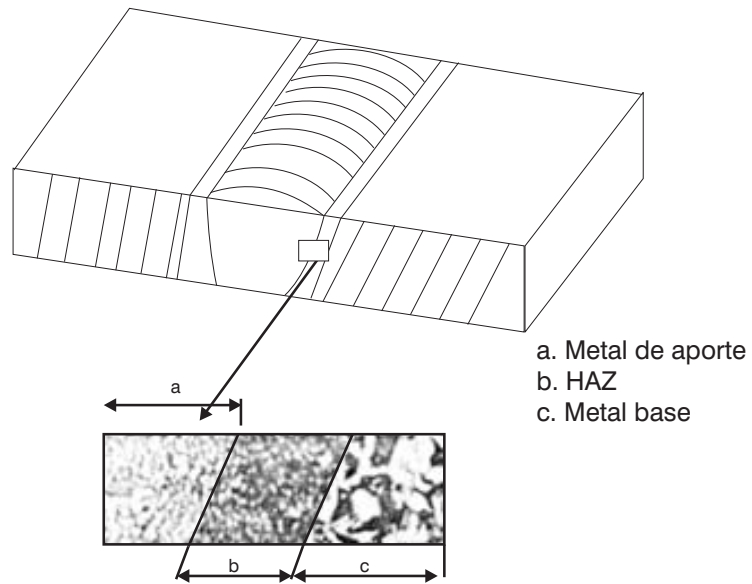
El proceso de enfriamiento después de la soldadura a temperatura ambiente, permite la formación de ferrita que es suficientemente blanda porque evita endurecimientos indebidos; pero se obtiene ductilidad para prevenir altas tensiones que causen agrietamientos.

Sin embargo, en espesores de hasta 5/16 de pulgada inclusive, son fácilmente soldables sin necesidad de precaución alguna. Pero en secciones de mayor espesor y en 0.15 a 0.20% de carbono, en caso de soldarse en ambientes de 0°C o menos con arco tiene un rápido enfriamiento, que puede resultar en excesiva dureza cerca de la zona de soldadura y que surga la posibilidad de agrietamientos; por lo tanto, en tales casos si ocurriera esto deberá recurrirse a una o más de las siguientes técnicas:

1. En la primera pasada haga un cordón tan grande como resulte práctico, usando una velocidad de avance más lenta. Esto aumenta la sección transversal de la soldadura. El uso de una velocidad de avance más lenta incrementa también la aportación de calor correspondiente a una longitud dada de soldadura, lo cual hace que la placa se caliente más, reduciendo con ello el régimen de enfriamiento y endurecimiento de la zona de la soldadura. Aplique la segunda pasada mientras la placa está todavía precalentada por la primera soldadura.
2. Deje un espacio de 1/32 de pulgada entre placas, para permitir su libre movimiento mientras se contrae la soldadura durante el enfriamiento.



3. Aplique la soldadura hacia el extremo no restringido de una junta. Haga algunas soldaduras de puntos que no deformen excesivamente las juntas.



**Fig. 5.7.- Regiones presentes en una unión soldada.**

## 6.- ENSAYO DE DUREZA.

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro. Dureza es un término que no se define con precisión. Dependiendo del contexto, puede representar resistencia al rayado o a la penetración y una medida cualitativa de la resistencia del material.

La dureza de un material es importante para el ingeniero, de muy diversas formas; además es fácilmente medible y a menudo se encuentra relacionada con la resistencia mecánica del material.

### 6.1 DUREZA BRINELL.

Este método lo ideó el ingeniero sueco Brinell en 1900, consiste en comprimir una bola de acero templado de un diámetro determinado sobre el material a ensayar por medio de una carga y durante un tiempo también establecido.

Se mide el diámetro de la huella y se encuentra la dureza del material por la relación entre la carga citada y el área del casquete de la huella, pues evidentemente y dentro de los ciertos límites esta área será tanto mayor cuanto menos duro sea el material. El área se puede sustituir por el diámetro de acuerdo con los siguientes cálculos (Fig. 6.1):

$$HB = \frac{P(Kg)}{S(mm^2)} \quad (1)$$

La superficie del casquete de la huella será:

$$S = \pi Df$$

y como:

$$f = \frac{1}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

y resultará:

$$S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Sustituyendo  $S$  por su valor en la fórmula (1), quedará:

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

De esta fórmula se conoce el peso que se aplica  $P$ , el diámetro de la bola  $D$  y el diámetro de la huella  $d$ , que se mide con una regla graduada o mejor con una lupa o un microscopio provistos de un retículo graduado.

Sin embargo en general no se halla el número de Brinell aplicando la fórmula, sino por medio de tablas en las que conociendo el diámetro de la huella se encuentra la cifra de dureza.

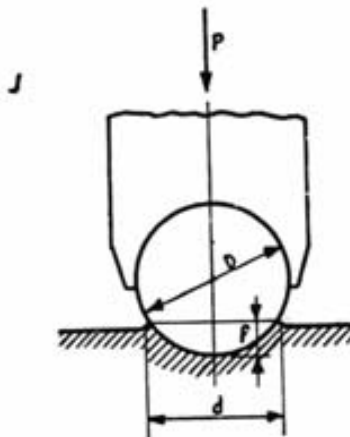


Fig. 6.1.- Esquema del ensayo Brinell.

También se puede medir la profundidad de la huella o flecha  $f$  del casquete y calcular la dureza por fórmula:

$$HB = \frac{P}{\pi D f}$$

Este método sin embargo no es recomendable por la deformación que sufre el material, que falsea la lectura de la flecha del casquete (Fig. 6.2).

El ensayo Brinell tal como se ha explicado, se practica perfectamente con materiales de perfil grueso de fierro o acero, pues las huellas obtenidas son claras y de contornos limpios.

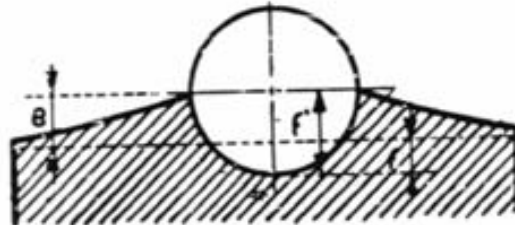


Fig. 6.2.- Deformación del material en el ensayo Brinell.

Respecto a los tiempos que debe durar el ensayo oscila entre treinta segundos para el acero y tres minutos para materiales muy blandos. Todo lo expuesto se resume en la tabla 6.1 de este cuadro son comparables todos los ensayos realizados con cargas que utilicen el mismo coeficiente, aunque las bolas sean de diferente diámetro. Los ensayos con cargas de cada columna vertical y sus bolas correspondientes, en cambio, no darán resultados coincidentes con la misma bola.

**TABLA 6.1**  
**DIÁMETRO DE LAS BOLAS.**

**DIÁMETRO DE LAS BOLAS Y PRESIONES EMPLEADAS EN EL ENSAYO BRINELL**

<i>CONSTANTES DE ENSAYO K</i>						
<i>Espesor de la probeta</i>	<i>Diámetro de la bola en mm.</i>	30	10	5	2,5	1,25
		<i>CARGAS EN Kg.</i>				
		30 D <sup>2</sup>	10 D <sup>2</sup>	5 D <sup>2</sup>	2,5 D <sup>2</sup>	1,25 D <sup>2</sup>
Superior a 6 mm. ...	10	3.000	1.000	500	250	125
De 6 a 3 mm. ...	5	750	250	125	62,5	31,2
Menor de 3 mm. ...	2,5	187,5	62,5	31,2	15,6	7,8
	1,25	46,9	15,6	7,81	3,91	1,99
	0,625	11,7	3,91	1,953	0,977	0,488

En general, no se utilizan los ensayos Brinell para durezas superiores a 500, porque se deforman las bolas. Se ha ensayado la utilización de bolas de carburos metálicos (metal duro), que sufre menos deformaciones que las del acero pero su uso no se ha generalizado.

La denominación de los ensayos se efectúa mediante el siguiente símbolo:

$$HB = (D / P / T)$$

En el que  $D$  es el diámetro de la bola  $P$ , la carga y  $T$  el tiempo de duración del ensayo, por ejemplo,

$$HB (10/3000/30)$$

Que quiere decir ensayo Brinell con la bola de 10mm. Aplicada con carga de 3.000 kilogramos durante 30 segundos.

## 6.2 DUREZA ROCKWELL.

El método Brinell no permite medir la dureza de los aceros templados porque se deforman las bolas; para esto se emplea la máquina Rockwell que apareció en 1924. El método Rockwell se basa también en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados, pero en lugar de determinar la dureza del material en función de la superficie de la huella que deja el cuerpo penetrante se determina en función de la profundidad de esta huella.

Los cuerpos de los penetradores, son un diamante en forma de cono de  $120^\circ \pm 1^\circ$ , con la punta redondeada con un radio de  $0.2 \pm 0.01$  mm, que se denomina también *penetrador Brale* y las bolas  $1/8''$  y  $1/16''$ , se utilizan cargas de 60, 100 y 150 Kg. para materiales gruesos, y de 15, 30 y 45 Kg; para materiales delgados. En total existen veintiuna escalas para veintiuna combinaciones de penetradores y cargas, que se dan según la tabla 6.2

Se construyen dos clases de máquinas: las utilizadas para medir materiales gruesos con las escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S, Y, V, y las construidas para materiales finos, con las escalas 15-N, 30-N, 45-N, 15-T, 30-T y 45-T, ambas máquinas llevan una escala con números negros (la C de la Fig. 6.3) para las mediciones con punta de diamante (penetrador Brale), y otra escala con números rojos (la B de la Fig. 6.3) para las mediciones realizadas con las bolas.

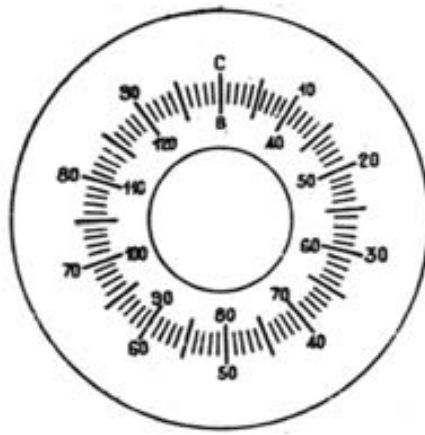


Fig. 6.3.- Escalas Rockwell B y C.

**TABLA 6.2**  
**ESCALA DE DUREZA ROCKWELL.**

Escala Designación	Tipo de prueba	Tipo y tamaño del penetrador	Carga menor en kg.	Carga mayor en kg.	Escala del comparador		APLICACIONES
					Color	Colocación	
A	Normal	Cono de diamante	10	60	Negro	Fuera	Aceros nitrurados, flejes estirados en frío, hojas de aferrar, Carburos metálicos (90 a 98).
B	"	Bola de 1/16"	"	100	Rojo	Dentro	Aceros al carbono recocidos de bajo contenido en C.
C	"	Cono de diamante	"	150	Negro	Fuera	Aceros duros. Con dureza superior a 100 Rockwell B o 20 Rc.
D	"	Cono de diamante	"	100	Negro	Fuera	Aceros cementados.
E	"	Bola de 1/8"	"	100	Rojo	Dentro	Metales blandos, como antifricción y piezas fundidas.
F	"	Bola de 1/16"	"	60	"	"	Bronce recocido.
G	"	Bola de 1/16"	"	150	"	"	Bronce fosforoso y otros metales.
H	"	Bola de 1/8"	"	60	"	"	Metales blandos, con poca homogeneidad, fundición de hierro.
K	"	Bola de 1/8"	"	150	"	"	Metales duros, con poca homogeneidad, fundición de hierro.
L	"	Bola de 1/4"	"	60	"	"	"
M	"	Bola de 1/4"	"	100	"	"	"
P	"	Bola de 1/4"	"	150	"	"	"
R	"	Bola de 1/2"	"	60	"	"	Metales muy blandos.
S	"	Bola de 1/8"	"	100	"	"	"
V	"	Bola de 1/2"	"	150	"	"	"
15-N	Superficial	Cono de diamante	3	15	"	"	Aceros nitrurados, cementados y de herramientas de gran dureza.
30-N	"	Cono de diamante	"	30	"	"	"
45-N	"	Cono de diamante	"	45	"	"	"
15-T	"	Bola de 1/16"	"	15	"	"	Bronce, latón y acero blando.
30-T	"	Bola de 1/16"	"	30	"	"	"
45-T	"	Bola de 1/16"	"	45	"	"	"

El número que mide la dureza no está ligado con la carga, como ocurre con la dureza Brinell, sino que es un número arbitrario, pero naturalmente proporcional a la penetración, se determina deduciendo del número 100, si se ensaya con diamante, y de 130, si se ensaya con bola, las unidades de penetración permanente medidas en 0.002 de milímetros. Esto se hace para que a los materiales más duros correspondan más unidades de dureza que a los blandos y ocurriría lo contrario si la dureza se diese por las unidades de penetración, puesto que la mayor penetración, es decir, a más unidades, el material será más blando.

La denominación de los ensayos de Rockwell se hace por las iniciales HR, seguidos de una letra minúscula que define la escala. Por ejemplo, 60 Rockwell de la escala c se debe anotar 60 HRc.

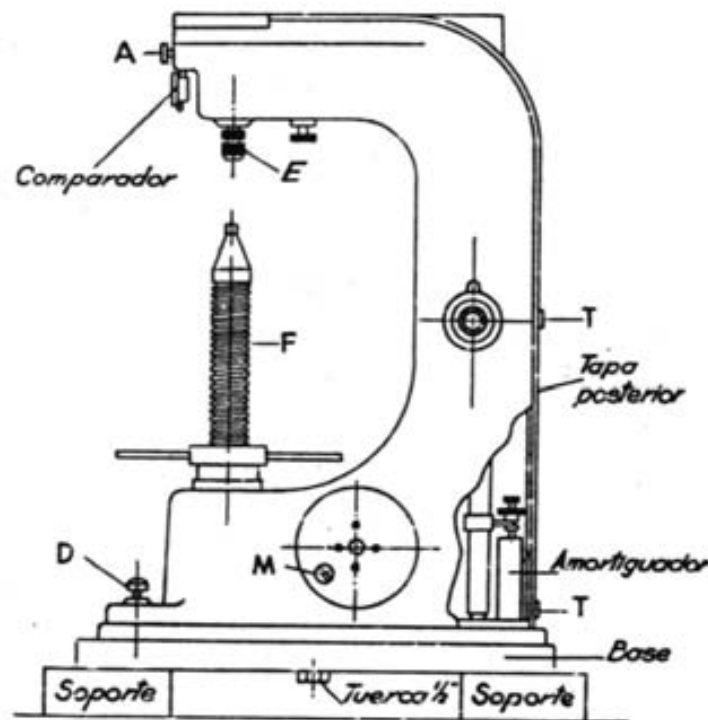


Fig. 6.4.- Máquina delta para ensayos Rockwell.



### 6.3 DUREZA VICKERS.

El ensayo por el método Vickers se deriva directamente del ensayo Brinell y fue introducido en 1925, empleándose actualmente mucho sobre todo en los laboratorios y en particular para piezas delgadas y templadas con espesores mínimos hasta de 0.2mm.

En el método Vickers se utiliza como cuerpo penetrante una punta piramidal de base cuadrada y ángulo en el vértice, entre caras, de  $136^\circ$ , con presión obligada de 20 segundos (Fig. 6.5). Este ángulo se eligió para que la bola de Brinell se quedase circunscrita al cono de borde de las huellas, cuyo diámetro, como se sabe, se procura que sea aproximadamente igual a  $0.375 D$ .

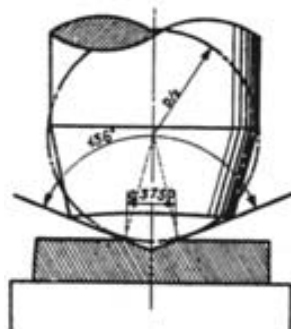


Fig. 6.5.- El ángulo de 136 grados de la punta piramidal Vickers esta elegido para que sea la Huella tangente a la de la bola Brinell.

La dureza Vickers se encuentra por relación entre la carga citada y la superficie de la huella, como en el método Brinell, por lo tanto, se corresponde como este hasta unas 300 unidades de dureza. Para durezas más elevadas, la bola Brinell se deforma y la divergencia entre Brinell y Vickers es cada vez mayor. El ensayo Brinell como ya se ha dicho no debe aplicarse para medir durezas superiores a 500.

La determinación de la dureza Vickers se hace en función de la diagonal de la huella o, más exactamente, a la medida de las dos diagonales medidas con un microscopio en milésimas de centímetro.

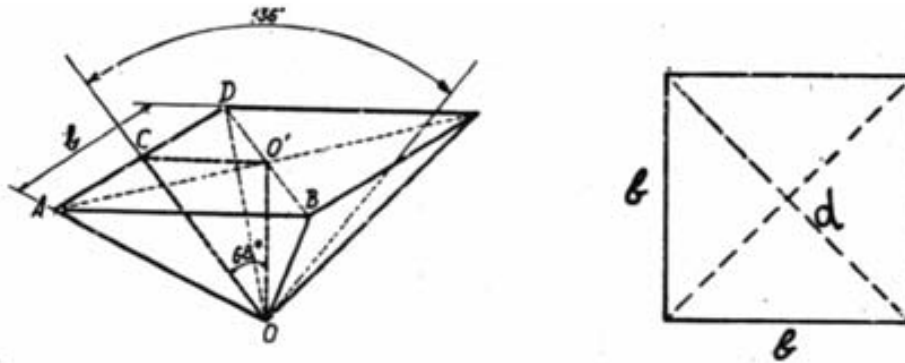


Fig. 6.6.- Representación esquemática de la huella que deja la punta piramidal Vickers.

Si  $P$  es la carga aplicada, y  $S$  la superficie de la huella, la dureza Vickers será:

$$HV = \frac{P}{S}$$

Y la superficie  $S$  será = 4 x área de una cara (Fig. 6.6):

$$S = 4 \times \frac{b}{2} \times OC$$

Pero:

$$OC = \frac{OC}{\text{sen}68^\circ} = \frac{b}{2\text{sen}68^\circ}$$

Por tanto:

$$S = 4 \times \frac{b}{2} \times \frac{b}{2\text{sen}68^\circ} = \frac{b^2}{\text{sen}68^\circ}$$

Como:  $d^2 = b^2 + b^2 = 2b^2$  será  $b^2 = \frac{1}{2} d^2$  (d es la diagonal B D)

Queda:

$$S = \frac{d^2}{2\text{sen}68^\circ} = \frac{b}{1,854}$$

Obteniendo finalmente:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

En general, no se hacen cálculos con la fórmula anterior, sino por medio de gráficos o de tablas en las que entrando con la medida de la longitud y la carga se obtiene directamente la dureza. Respecto a las cargas, son independientes de la dureza obtenida, pues la diagonal resultará proporcional a la carga, y para un mismo material saldrá la misma dureza con cualquier carga. Sin embargo, se puede hacer constar la carga al designar la dureza.

Se utilizan cargas de 1 a 120 Kg. siendo las más frecuentemente empleadas las de 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 Kg. La más utilizada es la de 30 Kg. Respecto al tiempo que se ha de mantener la carga, oscila entre diez y treinta segundos, siendo el más empleado 15 segundos. La dureza se expresa por las letras HV, seguidas de dos cifras, una para la carga y otra para el tiempo. Por ejemplo si la carga ha sido de 30 Kg. Durante 15 segundos, se pone HV 30 / 15. Las máquinas Vickers (Fig. 6.7) son muy similares a las Brinell, hay máquinas que se emplean para medir las durezas por los dos métodos, utilizando el penetrador adecuado.



Fig. 6.7.- Máquina para ensayos de dureza Vickers.

A continuación, se enumeran algunas ventajas del método Vickers:

1ª Las huellas Vickers son comparables entre si, y las cifras de dureza obtenidas de la carga.

2ª Con el mismo penetrador puede medirse una amplia gama de materiales, desde muy blandos hasta muy duros, llegando hasta 1,150 Vickers, que equivaldrían aproximadamente a 780 Brinell, dureza que como se sabe, no puede obtenerse con Brinell directamente sin deformar la bola.

3ª Puede medirse la dureza de piezas muy delgadas empleando cargas pequeñas, hasta espesores del orden de 0.05mm.

4ª Puede medirse dureza superficial, dada la pequeña penetración del diámetro, con cargas pequeñas, lo que permite comprobar, por ejemplo, el endurecimiento superficial de un material después de rectificado con piedra esmeril.

5ª La escala Vickers es más detallada que la Rockwell, y así, por ejemplo, entre HRc 60 y HRc 66, las durezas Vickers que corresponden son 765 y 960, o sea 32 unidades Vickers por cada unidad Rockwell.

## 7.- PRUEBAS DE TENSIÓN

### 7.1 TENSIÓN

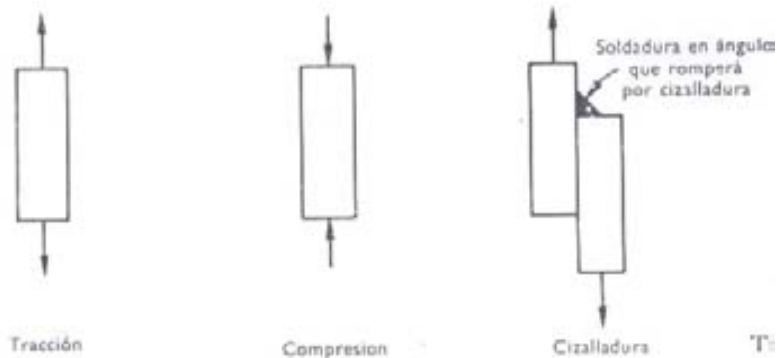
***Esta es una mas de las propiedades mecánicas de los materiales y un método de prueba destructiva, la tensión es un esfuerzo que se mide en  $kp/mm^2$  al igual que las presiones.***

***La tensión es igual ala carga expresada en kilopondios o kilogramo-fuerza dividida por el área de la sección recta que soporta la carga expresada en  $mm^2$ .***

$$\sigma = P/A$$

***Hay tres posibles tipos de tensiones***

- A) compresión (origina un aplastamiento);
- B) tracción (origina un alargamiento);
- C) cizalladura (esfuerzo producido por una tijera al cortar)



Todos los materiales al ser comprimidos o tensados se deforman, acortan o estiran. Estos cambios de dimensión o de forma pueden ser a veces apreciables a simple vista o bien ser casi inapreciables (de una muy pequeña fracción de milímetros).

Generalmente se acepta que cuando un material es sometido a tensión, sufre siempre una deformación; igualmente debemos aceptar, sobretodo pensando en la soldadura, que cuando un material se ve deformado reacciona produciendo una tensión. Básicamente, una deformación es la causa de una tensión. Durante el proceso de la soldadura, el metal se expande a causa de la dilatación producida por el calor del arco eléctrico. Esta expansión es obviamente una deformación, pero esta expansión no es libre ya que los extremos de la soldadura estorban su movimiento. La combinación de las expansiones térmicas y las contracciones que las compensan originan unas tensiones en la soldadura durante el proceso de fabricación que, si no son controladas, pueden originar el agrietamiento o dejar el material fragilizado.

Las pruebas de tensión se efectúan en una maquina universal de uso común fig.18-2

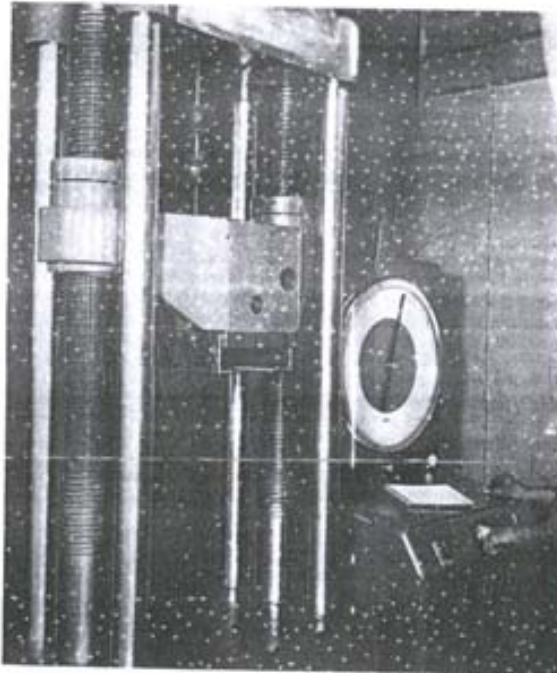


Figura 18-2 Máquina universal de pruebas de uso común, para pruebas de tensión y compresión. (Cortesía de Teleoyme McKay, fabricantes de electrodos y alambres para soldadura.)

Hay ocasiones en las que no se conoce la resistencia del metal a la tensión, por lo que es conveniente probar una pieza real hecha del metal. La resistencia del metal a la tensión ( $\text{lb/pulg.}^2$ ) puede calcularse dividiendo la carga máxima (en libras) entre el área de la sección transversal ( $\text{en pulg.}^2$ ). Esto puede escribirse como fórmula así:

$$\text{Resistencia a la tensión (lb/pulg.}^2\text{)} = \frac{\text{Carga máxima (en libras)}}{\text{Área de la sección transversal (en pulg.}^2\text{)}}$$

La resistencia a la tensión en una placa soldada mostrada en la siguiente fig. 18-4

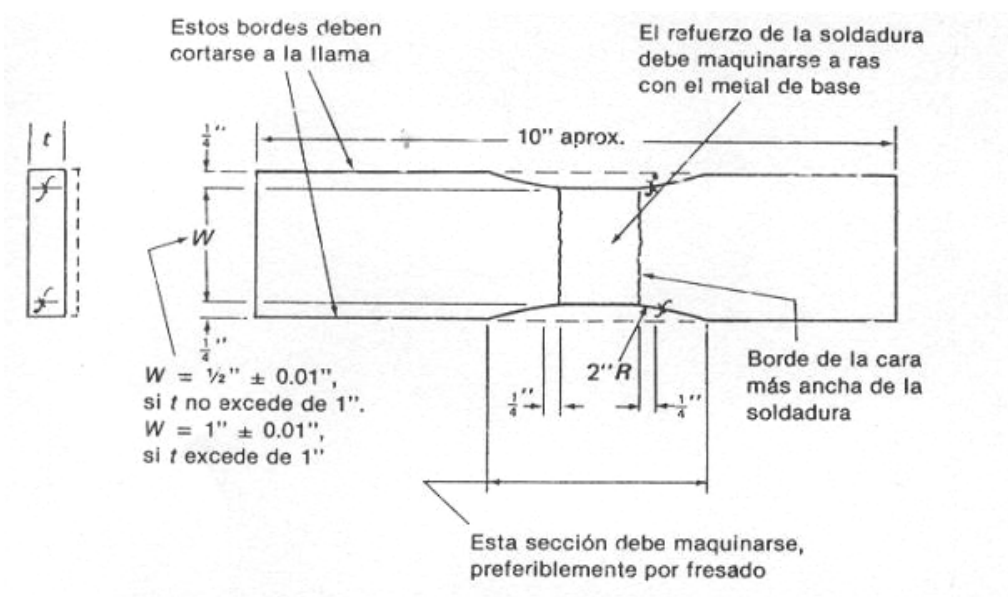
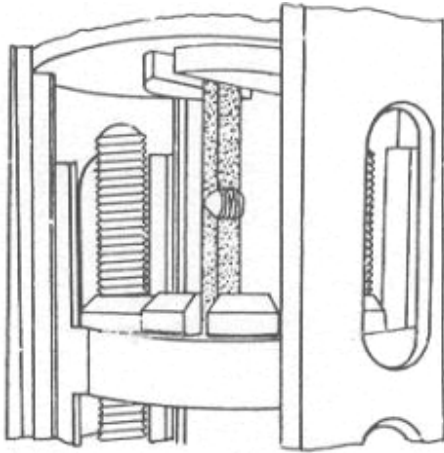
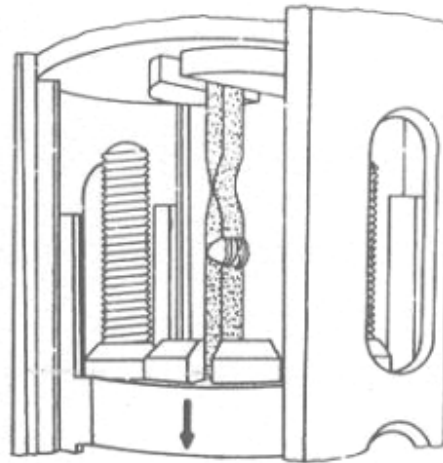


Figura 18-4 Probeta estándar para pruebas de tensión, para probar soldaduras hechas en placas. (Ilustración redibujada con autorización de la James F. Lincoln Arc Welding Foundation, *Metals and How to Weld Them*, 2a. ed., 1954, 1962, p. 17.)





**Figura 18-5** Probeta de placa soldada para prueba de tensión colocada en posición en una máquina universal de pruebas. (Ilustración redibujada con autorización de la Union Carbide Corporation, División Linde, *The Oxy-Acetylene Handbook*, 2a. ed., 1960, p. 105.)



**Figura 18-6** Probeta de placa soldada en la que se aprecian la estricción y la falla. (Ilustración redibujada con autorización de la Union Carbide Corporation, División Linde, *The Oxy-Acetylene Handbook*, 2a. ed., 1960, p. 105.)

## 8.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

El microscopio electrónico se ha convertido, a lo largo de las últimas décadas, en la herramienta estándar para caracterizar los rasgos microestructurales de los materiales. Aún cuando en los laboratorios de materiales se emplean una gran variedad de microscopios electrónicos y de instrumentos afines, limitaremos nuestra descripción a dos tipos principales de microscopios electrónicos: el microscopio electrónico de transmisión (Transmisión Electrón Microscope, TEM) y el microscopio electrónico de barrido (Scanning Electrón Microscope, SEM).

### 8.1 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE TRANSMISIÓN (TEM).

El diseño de un microscopio electrónico de transmisión (TEM) es similar al del microscopio óptico convencional. Esto es posible gracias a la naturaleza ondulatoria del electrón. Para un TEM típico que funciona a un voltaje constante de 100 keV, el haz de electrones tiene una longitud de onda monocromática,  $\lambda$ , de  $3.7 \times 10^{-3} \text{nm}$ , la cual es cinco órdenes de magnitud más pequeña que la longitud de la onda de la luz visible, que va de 400 a 700nm, la cual se utiliza en la microscopia óptica. El resultado es que detalles estructurales significativamente más pequeños pueden ser resueltos con el TEM en comparación con el microscopio óptico, (Fig. 8.1). Amplificaciones prácticas de aproximadamente 2000x son posibles en la microscopia óptica, lo cual corresponden a la *resolución* de dimensiones estructurales del orden de 0.25  $\mu\text{m}$ , mientras que amplificaciones de 100,000x se obtienen rutinariamente con el TEM, correspondiendo a resoluciones de más menos 1nm.



**Fig. 8.1.- Un TEM Comercial.**  
(Cortesía de Hitachi Scientific Instruments.)

En la microscopía por transmisión de electrones, la imagen es el resultado del contraste de difracción. La muestra se orienta de manera que parte del haz sea transmitido y parte difractado. Cualquier variación local de la regularidad cristalina causará que una fracción diferente de la intensidad del haz incidente sea “difractada hacia afuera” provocando una variación en la oscuridad de la imagen proyectada sobre una pantalla de visualización situada en la base del microscopio. Aunque no es posible identificar defectos puntuales solos, el campo de deformaciones que se presenta alrededor de un circuito de dislocaciones, formado por la condensación de defectos puntuales (átomos intersticiales o vacantes) es fácilmente visible (Fig. 8.2). Una aplicación muy frecuente del TEM es para identificar diversas estructuras de dislocación, siendo posible también, obtener imágenes de estructuras de fronteras de grano (Fig8.3).

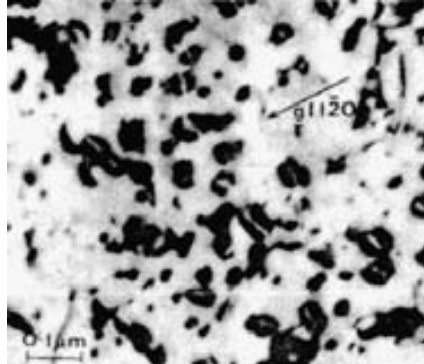


Fig. 8.2.- Imagen TEM de un campo de deformaciones alrededor de pequeños círculos de dislocación en una aleación de circonio.

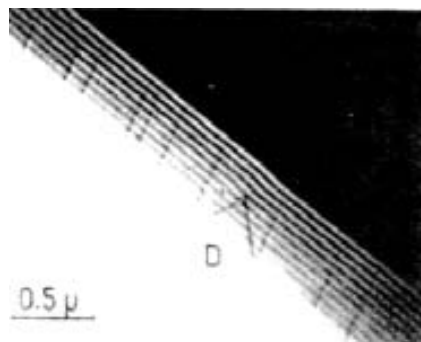


Fig. 8.3.- Imagen TEM de una frontera de grano. Las líneas paralelas identifican la frontera. Una dislocación que intercepta a la frontera está señalada con la "D".

Un TEM es un microscopio que utiliza un haz de electrones para visualizar un objeto debido a que la potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. Debido a que los electrones tienen una longitud de onda mucho menor que la de la luz pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas. Las partes principales de un microscopio electrónico son:

**Cañón de electrones:** Emite los electrones que chocan contra el espécimen, creando una imagen aumentada.

**Lentes magnéticas:** Crea campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones.

**Sistema de vacío:** Es una parte muy importante del microscopio electrónico. Debido a que los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, se debe hacer un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características.

**Placa fotográfica o pantalla fluorescente:** Se coloca detrás del objeto a visualizar para registrar la imagen aumentada.

**Sistema de registro:** Muestra la imagen que producen los electrones, que suele ser una computadora.

El primer microscopio electrónico de transmisión fue desarrollado entre 1931 y 1933 por Ruska y sus colaboradores. La óptica básica de ese primer microscopio electrónico se mantiene hasta nuestros días; los cambios en los microscopios modernos consisten en adicionar más lentes para incrementar el ámbito de aumentos y darle mayor versatilidad. El primer microscopio electrónico de transmisión comercial lo construyó la compañía SIEMENS en 1939.

## **8.2 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM).**

El microscopio electrónico de barrido (SEM) que se muestra en la figura 8.4 obtiene imágenes estructurales con método enteramente diferente al usado por el TEM. En el SEM la superficie de la muestra es explorada repetidamente con un haz de electrones muy angosto, con diámetro de  $\approx 1 \mu\text{m}$ . Las ligeras variaciones en la topografía de la superficie producen marcadas variaciones en la intensidad del haz de *electrones secundarios* expulsados de la superficie de la muestra. La señal del haz de electrones secundarios se despliega en una pantalla de televisión

cuyo patrón de barrido está sincronizado con la exploración de la superficie de la muestra por el haz de electrones.



Fig. 8.4.- Un SEM Comercial.

La amplificación que es posible con SEM está limitada por el diámetro del haz y es considerablemente mayor que la que se puede alcanzar con el microscopio óptico pero menor que la que es posible con el TEM. Este tipo de microscopio es muy útil porque, al contrario que los TEM o los microscopios ópticos, produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto. Por ejemplo, la pequeña pieza de una roca lunar (Fig. 8.5) tiene una forma claramente esférica. El SEM es en especial útil para realizar reconocimientos muy convenientes de estructuras de grano. La figura 8.6 revela una de estas estructuras en la superficie de un metal fracturado. La “profundidad de campo” del SEM permite que esta superficie irregular pueda ser sometida a inspección, en cambio el microscopio óptico necesita superficies planas y pulidas. Además de la conveniencia del pulido de la muestra, la superficie irregular de la fractura puede revelar información acerca del mecanismo de facturación.



Fig. 8.5.- Imagen SEM de una roca lunar de 23 $\mu$ m de un diámetro de la misión de Apolo 11.

Una característica adicional del SEM es que permite monitorear variaciones químicas a escala microestructural. Además de expulsar electrones secundarios, el haz de electrones incidente del SEM genera rayos x con una longitud de onda característica que permite identificar la composición elemental del material bajo estudio.

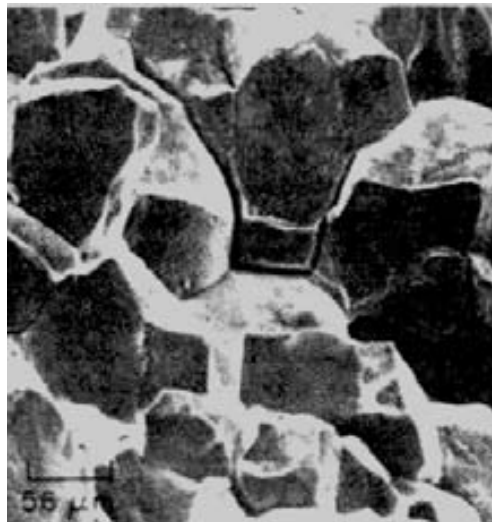


Fig8.6.- Imagen SEM de la superficie de la fractura de un acero inoxidable.

Un microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un SEM, sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. El SEM explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que el TEM, que examina una gran parte de la muestra cada vez. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión.

Los electrones del haz pueden dispersarse de la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones perdidos y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor de televisión. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 100.000 veces o más.

Las partes más importantes de un SEM son:

**Ocular:** El operador mira a través para examinar el espécimen. La potencia del ocular multiplicada por la potencia objetiva iguala la ampliación total (es decir  $10X$  objetivo  $10X$  del ocular  $X = 100X$ . El espécimen se ha agrandado 100 veces).

**Cuerpo:** El microscopio puede venir como un monocular, (un ocular y tubo), o binocular, (dos oculares y tubos). Si es un binocular generalmente uno de los tubos del ocular será ajustable mientras que el otro es fijo.

**Objetivos:** El objetivo es la lente más importante del microscopio para producir una imagen clara de la alta resolución. El objetivo tiene varias funciones



importantes. Debe recolectar la luz que viene de cada uno de las varias partes o puntas del espécimen. Debe tener la capacidad de reconstituir la luz que viene de las varias puntas del espécimen en las varias puntas correspondientes de la imagen.

**Etapas Mecánicas:** Un dispositivo para llevar a cabo diapositivas con seguridad con las perillas con estrías separadas para mover la diapositiva desde frente a la parte posterior a (norte y al sur) o de lado a lado (este y al oeste). Estas perillas pueden estar en los ejes separados o en un eje coaxial.

**Controles del foco de fine/coarse:** En ambas caras del soporte del microscopio hay dos conjuntos de perillas del ajuste. La perilla del ajuste aproximado para movimientos que se enfocan incrementales más grandes y la perilla del ajuste fino para movimientos que se enfocan incrementales más pequeños. Las perillas del ajuste sirven para juntar al objetivo con el espécimen. En la mayoría de los microscopios las perillas del ajuste levantan o bajan la etapa; en algunos microscopios las perillas levantan o bajan el tubo del microscopio o el pedazo de la nariz.

**Iluminador (Estándar):** Esta parte proporciona la iluminación requerida para realizar cualquier función con el microscopio. Es básicamente una fuente de alimentación electrónica que proporciona la electricidad a la fuente de la lámpara. Esta fuente podría ser una lámpara estándar de tungsteno o lámpara de halógeno.

El microscopio electrónico de barrido tiene capacidad para análisis de muestras no conductoras que incluyen, entre otras: cerámicos, plásticos, material biológico, fibras y especímenes con desprendimientos de gases, sin necesidad de preparación previa como en los microscopios convencionales de alto vacío.

El microscopio electrónico de barrido permite la conservación de las condiciones naturales de muestras biológicas y no conductoras, con lo cual se evitan alteraciones de ellas al exponerse a procesos de preparación como secado, fijado, congelado y de recubrimiento iónico de metales, tales como el oro, requeridos para su observación bajo las condiciones usuales de los microscopios de alto y bajo vacío.

Con este equipo se pueden observar en tiempo real fenómenos de transportación de líquidos, reacciones químicas, disoluciones, hidrataciones, cristalizaciones y otros procesos que ocurren a presiones de vapor elevadas, mayores que las permitidas en las cámaras de los microscopios convencionales y de bajo vacío. No requiere de sistemas periféricos para su funcionamiento, como es el recirculador de agua de enfriamiento, además de que permite el registro digital de imágenes con diferentes resoluciones, dando como resultado la posibilidad de entregar los resultados de las sesiones de trabajo a los usuarios del servicio en un CD ROM.

En general, la microscopia electrónica tanto el MET como el SEM se ha vuelto un método de investigación muy usado y aceptado, para analizar propiedades microestructurales a escalas nanométricas.

## 9.- PARTE EXPERIMENTAL.

### 9.1 OBJETIVO.

Identificar los cambios que sufren las propiedades mecánicas de dureza, tensión y las micro estructuras en lo ancho de los segundos y terceros cordones en una placa de acero tipo A-36 en una soldadura multipaso.

### 9.2 PROPIEDADES DEL ACERO A-36 Y ELECTRODO E-7018

El material que se emplea para la investigación de esta tesis es placa de acero estructural, A36 el cual es un material bastante resistente, no es frágil, presenta buena ductilidad a la vez que su resistencia es aceptable. Este acero tiene sus principales usos en la fabricación de estructuras de acero para plantas industriales, almacenes, industria naval, carrocerías, torres de transmisión, etc.

Por estas razones y por ser un material de fácil adquisición y costos relativamente bajos en el mercado se fabrica el acero estructural ASTM A-36, el cual presenta la composición química y propiedades mecánicas registradas en la Tabla 9.2.1

#### COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Elemento	C	Cu	Fe	Mn	P	S
%	0.26	0.2	99	0.55	Máx. 0.04	Máx. 0.05

## PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

PROPIEDADES	Métrico	Ingles	Comentario
Densidad	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>			
Esfuerzo Máximo a la Tensión	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi	
Esfuerzo a la Fluencia.	250 MPa	36300 psi	
Elongación.	23 %	23 %	en 50 mm
Modulo de Elasticidad.	200GPa	29000ksi	

Tabla 9.2.1 Composición química y propiedades mecánicas del acero estructural A36

A continuación se mostrara algunas de las características del material de aporte que se utilizó en esta investigación para el rellenado del bisel.

### **Características del Electrodo AWS E- 7018.**

- ❖ Electrodo para aceros al carbono y de baja aleación.
- ❖ Bajo contenido en hidrogeno.
- ❖ Con hierro en polvo.
- ❖ Toda posición.
- ❖ Corriente continua, electrodo positivo.
- ❖ Excelentes propiedades de impacto a temperaturas bajo cero.
- ❖ Alta resistencia a la tensión (70,000 lb/pulg.<sup>2</sup>), (6076 Kgs/ Cm.<sup>2</sup>)
- ❖ Uso en estructuras sujetas a cargas dinámicas.

### **Aplicaciones Típicas:**

- Aceros Cor-Ten, Mayarí-R, Lukens 45 y 50, y otros aceros estructurales de baja aleación
- Aceros para recipientes a presión A-515, A-516, A-537, A-36.
- Aceros para tanques de almacenamiento.
- Construcción y reparación de buques, equipos de minería, plataformas petroleras
- Petroquímicas
- Cementeras
- Trabajos de palería
- Astilleros

## **CLASIFICACIÓN**

### **A.W.S. E-7018**

Resistencia a la tensión (70,000 lb/pulg.<sup>2</sup>), (6076 Kgs/ Cm.<sup>2</sup>)

Elongación 33%

Diámetro disponible	Amperaje recomendado
3.2mm 1/8"	60 – 70
4.0mm 5/32"	90 -- 110
4.8mm 3/16"	130 -- 150

## **9.3 METODOLOGÍA DEL TRABAJO**

### Preparación de la Unión Soldada.

La Placa de acero A-36 es de 4"x4" de longitud y con 5/8" de espesor, se cortaron dos placas con un equipo de corte y biselador. Haciendo un bisel con un ángulo de 30°, esto es, a cada una de las dos placas se le hizo un bisel de tal forma que cuando se encuentren de frente formen un bisel tipo "V" en el cual será aplicada la soldadura en multipaso (Fig. 9.3.1).

Debe de considerarse que antes de aplicar la soldadura en el área, a esta se la hizo una limpieza mecánica con cepillo de alambre para eliminar cualquier impureza (polvo, grasas y aceite) para evitar una mala adherencia entre el material base y el de aporte. Para que las dos piezas de placa al momento de ser unidas por la soldadura no se tuerzan, (pandeen) se les colocó unos puente por ambas caras para prevenir dicha torcedura o pandeo producido por la temperatura.

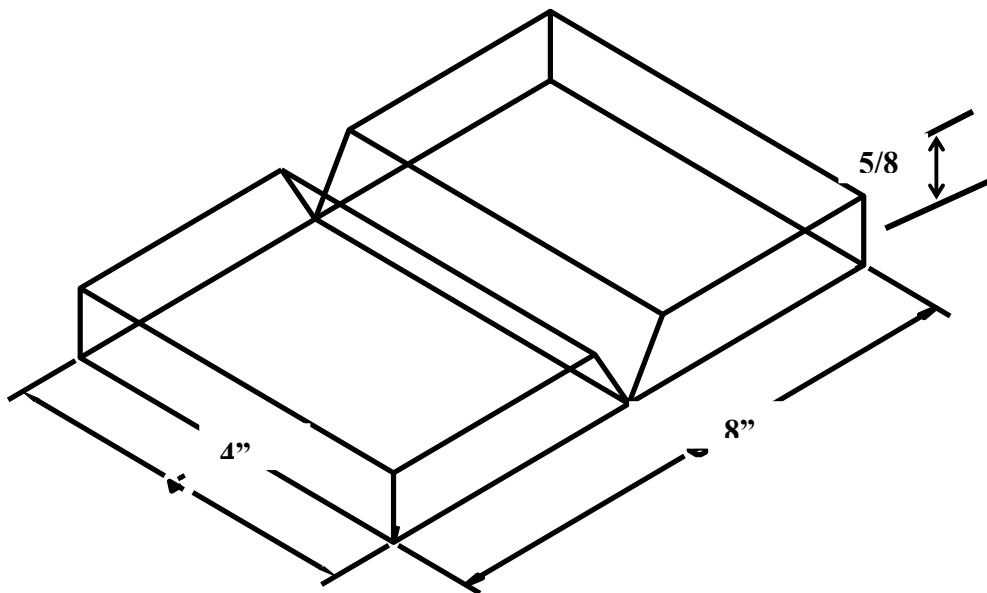


Fig. 9.3.1 Placa de acero A36 después de aplicarle el doble bisel con el equipo de corte y biselador.

El depósito de soldadura se realizó sin precalentamiento, empleándose primeramente un electrodo AWS, E-7018 de 1/8" de diámetro a 70 amperes de corriente, para el cordón de fondeo (cordón de asiento) y para el resto del relleno del bisel un electrodo AWS, E-7018 de 5/32". Con un amperaje de 110. La constitución escalonada o de relleno de bisel, llamada soldadura en multipaso, ejecutada en esta unión, nos sirvió para garantizar la buena penetración de la soldadura, se debe considerar que después de haber aplicado el primer cordón (cordón de asiento), lo que procede, que con un cincel se le hace una limpieza para botar la cascarilla del fundente que se forma por encima de la superficie de la soldadura para que al aplicársele los siguientes cordones no se formen poros. A continuación se le aplica una segunda capa de cordones (2dos. cordones) y así sucesivamente hasta rellenar todo el bisel, lo cual ocurre en tres capa de cordones de relleno.

NOTA:

Cabe mencionar que antes y después de aplicar cada una de las capas de soldadura se removieron las escorias para poder obtener un mejor agarre y la formación de poros entre cordón y cordón, tratando de evitar porosidades, y agrietamientos en la soldadura, se obtendrá un mejor trabajo como se muestra en la figura 9.3.2

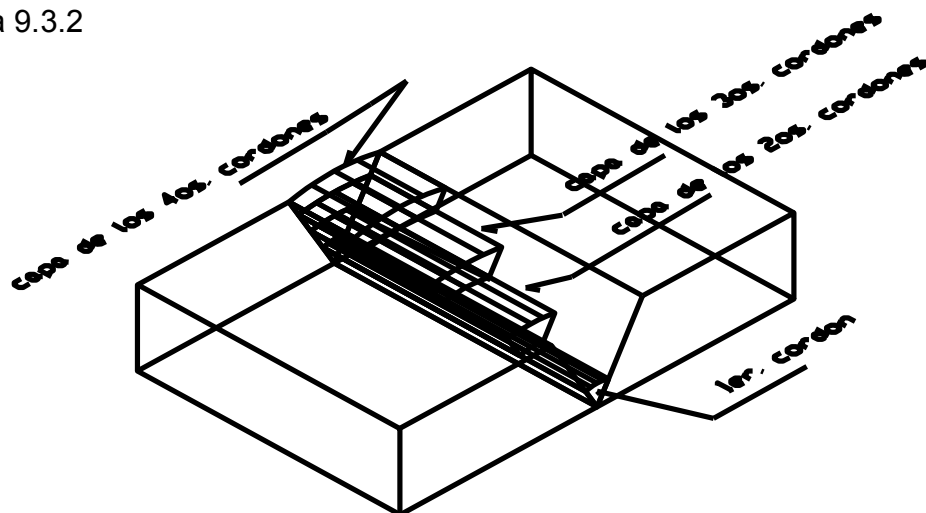


Fig. 9.3.2 Muestra de cómo fue aplicada la soldadura en multipaso.

En la figura 9.3.3 se muestra la forma en la que fueron aplicados los cordones de soldadura, tomando el cordón de asiento como el número 1, en la

segunda capa encontraremos los cordones 2.1 y 2.2 respectivamente, y así sucesivamente hasta llegar al último cordón al cual le corresponde el número 4.4.

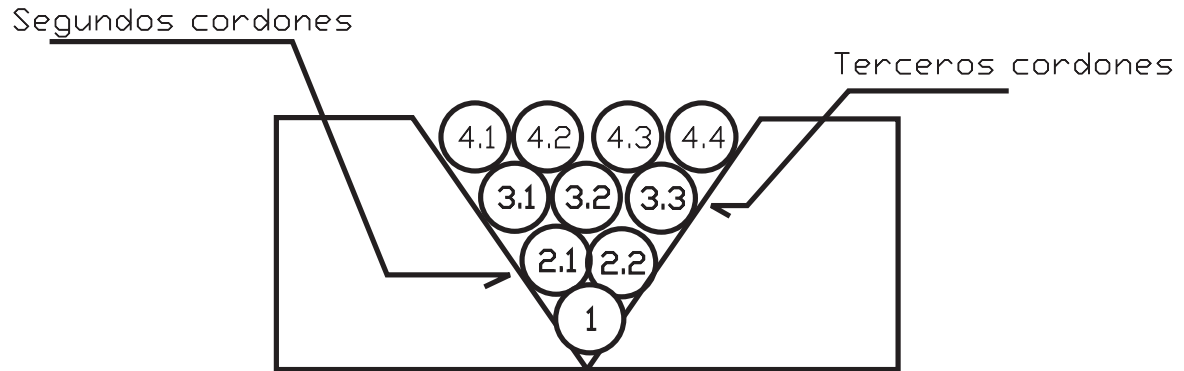


Fig 9.3.3 La forma de cómo fueron aplicados los cordones.

Para llevar a cabo la presente investigación se utilizó el siguiente equipo:

- Placa de acero A-36.
- Máquina de soldar eléctrica.
- Equipo de corte con biseladora.
- Electrodo de la clasificación de 1/8" y 5/32" AWS E-7018.
- Máquina Fresadora.
- Máquina Cortadora de disco.
- Reactivo de ataque para el acero (nital al 4%).
- Elementos para desbaste y pulido.
- Durómetro Vickers.(OTTO WOLPER)
- Disco para cortar metal.
- Vernier (MITUTOYO fraccionario y milésimas de pulgada).
- Segueta.
- Pruebas de Tensión en Maquina universal (INSTRON).
- Microscopio electrónico de barrido SEM (PHILIPS SL-20).
- Cámara fotográfica Nokia 3.7 mega pixeles.

#### 9.4 PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO



### Preparación de la Muestra.

El siguiente paso es la realización de la probetas, para las pruebas metalográficas, dureza y tensión después del proceso de la unión por soldadura se maquina la pieza eliminando la superficie del lado donde quedo el cordón de fondeo y el cuarto cordón solo dejándole área de los segundos y terceros cordones enseguida se elimino 0.750X8.000 (mm pulg.) del lado del 2do. y 3er. Cordón como se muestra en la Fig. 9.4.1

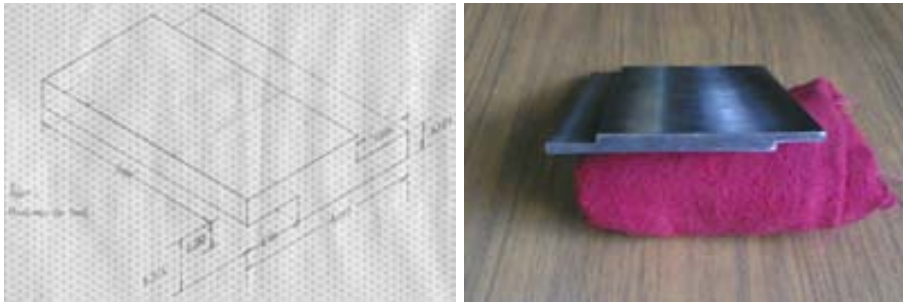


Fig.9.4.1

Después de haber maquinado la pieza, esta se llevo acabo con una máquina fresadora donde se le acondiciono un disco para el desbaste de metal, cabe mencionar que los cortes se realizaron utilizando lubricante para evitar el calentamiento del material y por consiguiente, no alterar su estructura. Al final de este proceso nos queda la muestra con las dimensiones y características que podemos observar en la figura 9.4.2

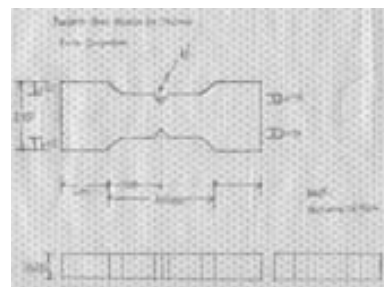
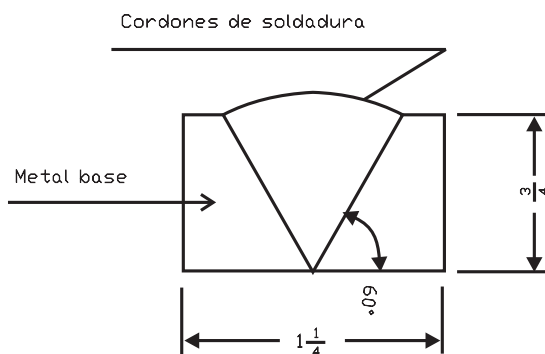


Fig. 9.4.2 Dimensiones finales de las muestras para las pruebas de tensión, Dureza y metalografía (en fracciones de pulgadas y milésimas de pulgada).

### Desbaste.

En este proceso la muestra es lijada sucesivamente con papeles abrasivos de grueso a fino (lijas No. 180, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200 y 1500), usando agua para eliminar deshechos 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 de remover las rayas de la anterior; además al realizar un cambio de lija el siguiente desbaste deberá de realizarse de forma perpendicular a la anterior (girarse 180 grados)

### **Pulido.**

En el pulido se utilizó un abrasivo combinado con un lubricador adecuado a la superficie. El método consiste en sostener la probeta en contra del disco giratorio de la máquina de pulido (el cual tiene un paño abrasivo) y mover la muestra en una trayectoria recta del centro del disco hacia afuera hasta obtener un acabado espejo en ella.

### **Ataque Químico.**

La muestra fue atacada por medio del reactivo de Nital al 4%, cuya superficie fue perfectamente limpiada con alcohol 96 antes del ataque. Después de aplicar el ataque, la probeta se lavo en una corriente de agua a chorro y posteriormente se aplico aire para secar completamente la superficie, quedando lista para su estudio en el microscopio.

### **NOTA:**

En este procedimiento debemos de cuidar de ya no tocar la cara de la probeta que fue atacada con el reactivo químico porque todo el trabajo que se hizo desde el desbaste, pulido ya no sirve y hay que empezar de nuevo.

### **Ensayo de Dureza.**

El ensayo de dureza a utilizar depende primeramente de la resistencia del material, el tamaño de la unión soldada y el tipo de información deseada. El ensayo Vickers realiza indentaciones mucho más pequeñas y convenientes para medidas de dureza de las diferentes regiones de la unión soldada.

Ahora para el desarrollo del análisis metalográfico y mapeo de durezas se efectuaron alrededor de 110 mediciones, de las cuales fueron practicadas a la capa de los segundos cordones y terceros cordones, todas las mediciones fueron con una carga de 2 Kg.

El mapeo de durezas se efectuó desde el metal base, prosiguiendo por la zona afectada por el calor, pasando por todo lo ancho de la capa de los segundos cordones, hasta llegar al metal base del otro extremo de la probeta como se muestra en la figura 9.4.3, cabe mencionar que los resultados obtenidos después fueron comparados en tablas para que de esta manera se sacara el valor real en escala Vickers.

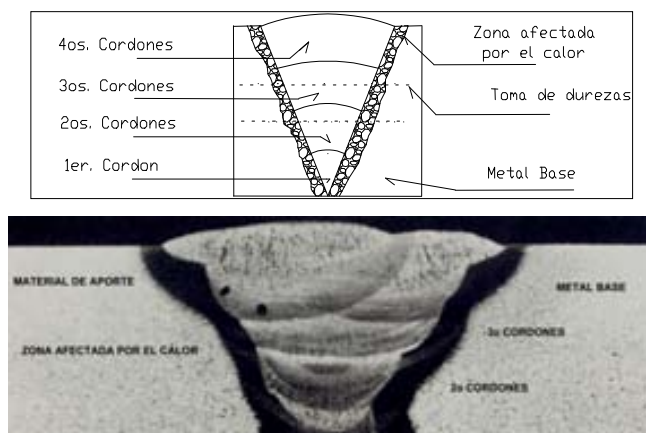


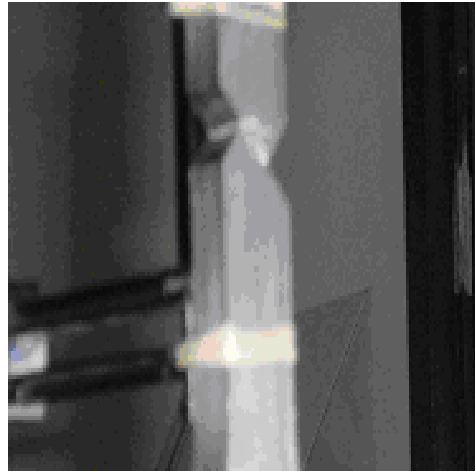
Fig. 9.4.3.- La realización del mapeo de durezas a lo ancho de la muestra.

### **Microscopias.**

Se llevó la muestra al laboratorio del Microscopio Electrónico de Barrido ubicado en Ciudad Universitaria donde se tomaron las microscopias electrónicas correspondientes a cada una de las capas de cordones de nuestro especial interés.

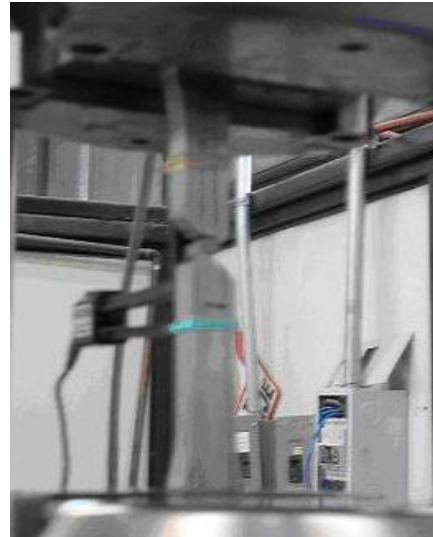
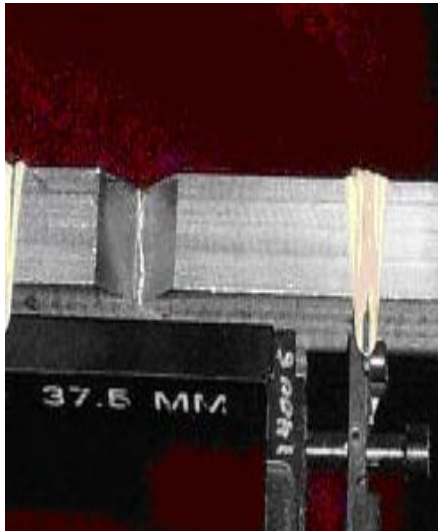
## Prueba de tensión.

Por ultimo se llevaron las pruebas al laboratorio de tensión situado en el centro de investigación de la UNAM campus Juriquilla Querétaro donde se realizaron las pruebas de tensión en una maquina universal.



Maquina universal (INSTRON) izq.





Probeta apunto de llegar ala ruptura con una vista superior (izq.) ala derecha, e imagen sup.  
Probeta montada en la maquina universal para la prueba de tensión.



Vista frontal y lateral de la probeta en la prueba de tensión en la ruptura..

## 9.5 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS.

Las mediciones de dureza realizadas por el durómetro Vickers que fueron aplicadas a lo ancho de los segundos y terceros cordones, están indicas en la siguiente tabla.

NUMERO DE DUREZA	2os. Cordones.	3os. Cordones.
1	250	255
2	250	255
3	250	260
4	250	266
5	252	270
6	245	270
7	250	250
8	250	270
9	245	270
10	250	271
11	245	276
12	270	276
13	290	318
14	270	296
15	260	307
16	276	300
17	258	240
18	276	250
19	276	249
20	268	280
21	260	275
22	260	285
23	296	301
24	290	273
25	265	296
26	250	280
27	245	307
28	255	296
29	253	296
30	258	307
31	238	324
32	250	307
33	245	280

34	260	280
35	245	270
36	270	307
37	245	370
38	270	350
39	285	290
40	258	336
41	230	318
42	266	290
43	280	318
44	271	280
45	253	234
46	276	253
47	280	234
48	258	249
49	266	241
50	250	273
51	249	245
52	266	250
53	270	269
54	266	258
55	275	258
56	270	257
57	266	260
58	250	265
59	270	280
60	276	290
61	275	247
62	280	258
63	280	280
64	276	290
65	280	307
66	290	266
67	296	290
68	307	290
69	296	318
70	296	296
71	280	296
72	271	336
73	280	336

74	266	350
75	280	324
76	271	296
77	271	312
78	258	276
79	258	324
80	260	276
81	265	285
82	270	296
83	271	276
84	258	260
85	249	270
86	237	266
87	240	253
88	245	258
89	271	271
90	260	270
91	270	330
92	296	307
93	266	336
94	296	286
95	266	296
96	270	296
9	280	307
98	245	276
99	258	260
100	245	260
101	258	255
102	258	266
103	245	260
104	250	266
105	245	260
106	245	255
107	250	260
108	255	250
109	250	245
110	250	250

Las mediciones de tensión realizadas por la maquina universal que fueron aplicadas a los segundos y terceros cordones, están indicas en la siguiente tabla.



## ANÁLISIS DE TENSIÓN EN SEGUNDOS CORDONES 2.1

### DATOS INSTRON

Strain/25.4mm	Load/29.66mm
---------------	--------------

Time	Position	Load	Strain	Cycle	Strain Eng	Stress Eng
Seg	mm	KN	mm		mm	Mpa.
4	-51.6867	0.652993	0.0264235	1	0.00104030	0.21575628
5	-51.5127	1.21917	0.0306929	1	0.00120838	0.40282758
6	-51.4975	1.69264	0.0332962	1	0.00131087	0.55926743
7	-51.4844	2.19215	0.0361338	1	0.00142259	0.72431119
8	-51.4692	2.69218	0.0389193	1	0.00153226	0.88952677
9	-51.4561	3.19482	0.0418870	1	0.00164909	1.05560472
10	-51.4431	3.69433	0.0447767	1	0.00176286	1.22064848
11	-51.4300	4.198	0.0476663	1	0.00187663	1.38706676
12	-51.4170	4.6923	0.0506601	1	0.00199449	1.55038908
13	-51.4017	5.20119	0.0537319	1	0.00211543	1.71853210
14	-51.3909	5.6908	0.0568299	1	0.00223740	1.88030479
15	-51.3735	6.1924	0.0598497	1	0.00235629	2.04603911
16	-51.3626	6.70545	0.0627653	1	0.00247107	2.21555664
17	-51.3517	7.20183	0.0655769	1	0.00258177	2.37956622
18	-51.3365	7.69822	0.0685446	1	0.00269861	2.54357910
19	-51.3256	8.2019	0.0715644	1	0.00281750	2.71000067
20	-51.3104	8.70193	0.0745322	1	0.00293434	2.87521625
21	-51.2973	9.19883	0.0776561	1	0.00305733	3.03939764
22	-51.2864	9.69574	0.0807280	1	0.00317827	3.20358233
23	-51.2690	10.2016	0.0837738	1	0.00329818	3.37072421
24	-51.2582	10.7016	0.0870279	1	0.00342630	3.53592987
25	-51.2408	11.1913	0.0905684	1	0.00356569	3.69773230
26	-51.2255	11.6975	0.0939526	1	0.00369892	3.86498651
27	-51.2081	12.2038	0.0969204	1	0.00381576	4.03227377
28	-51.1842	12.6934	0.0993674	1	0.00391210	4.19404316
29	-50.9732	13.033	0.0988988	1	0.00389365	4.30625084
30	-50.1552	13.7414	0.151667	1	0.00597114	4.54031423
31	-49.6679	14.2091	0.339598	1	0.01337000	4.69484761
32	-49.1110	14.7102	0.650756	1	0.02562031	4.86041672
33	-48.5976	15.1863	0.872607	1	0.03435461	5.01772556
34	-48.0406	15.6926	1.11290	1	0.04381496	5.18501281
35	-47.4337	16.1936	1.37604	1	0.05417480	5.35054889
36	-46.7636	16.6937	1.65626	1	0.06520709	5.51578759
37	-46.0262	17.1812	1.96074	1	0.07719449	5.67686312
38	-45.1581	17.6802	2.32400	1	0.09149606	5.84173837
39	-44.0769	18.1625	2.81758	1	0.11092835	6.00109575

## ANÁLISIS DE TENSIÓN DE TERCEROS CORDONES

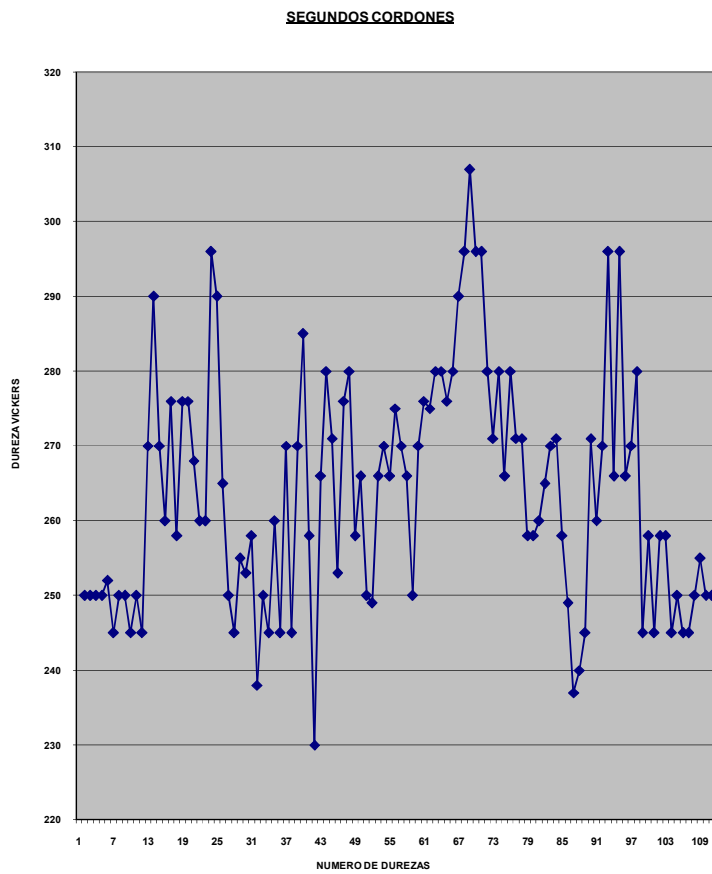
### DATOS INSTRON

Strain/25.4mm	Load/32.37 mm <sup>2</sup>
---------------	----------------------------

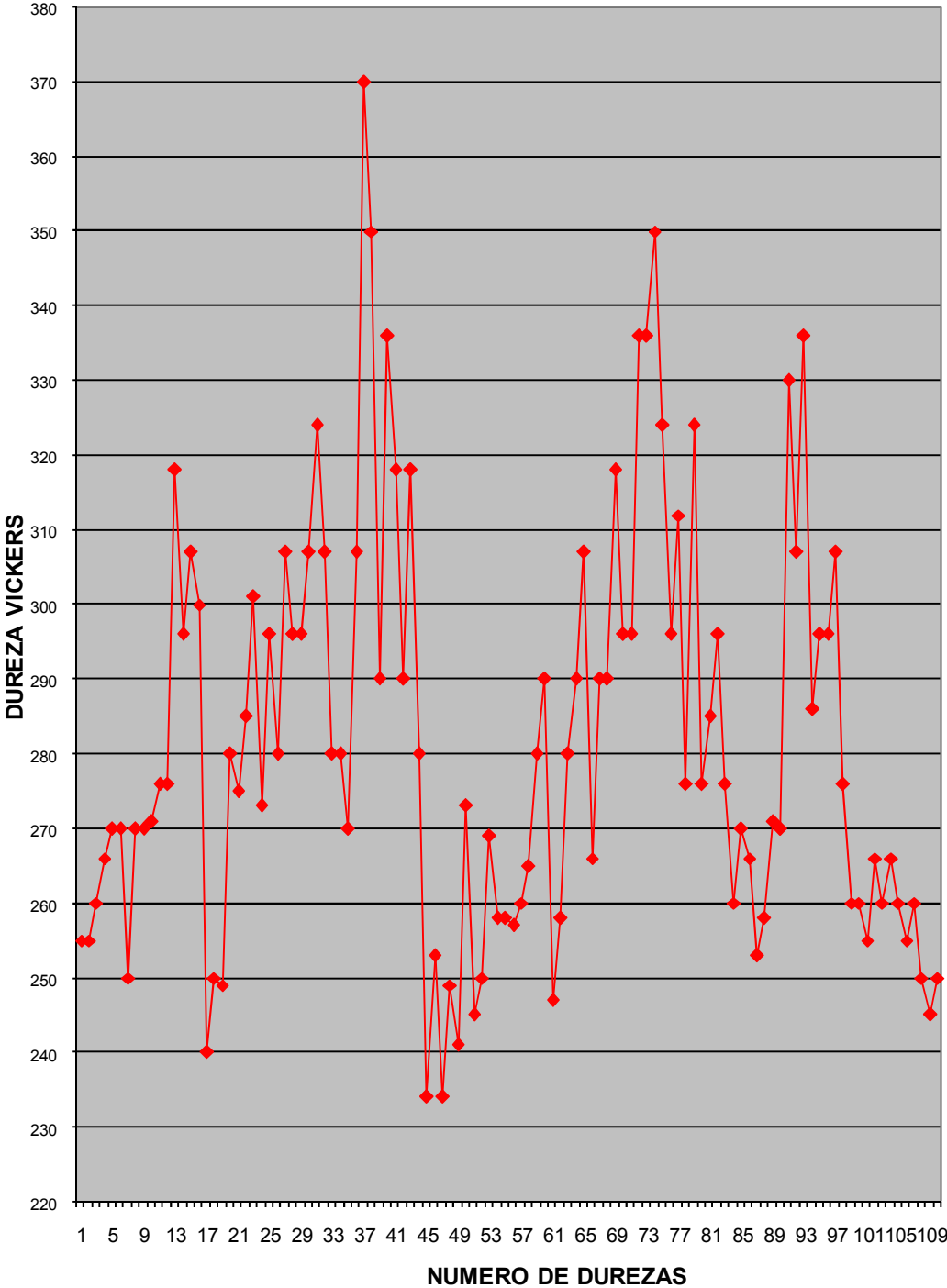
Time	Position	Load	Strain	Cycle	Strain Eng	Stress Eng
Seg	mm	KN	mm		mm	Mpa.
4	-42,23650	0,809253	0,00369245	1	0,00014537	0,24500091
5	-42,13210	1,38377	0,00728746	1	0,00028691	0,41893562
6	-42,11680	1,85359	0,00937153	1	0,00036896	0,56117337
7	-42,10160	2,35101	0,0115077	1	0,00045306	0,71176701
8	-42,07990	2,85469	0,0138002	1	0,00054331	0,86425585
9	-42,06900	3,34743	0,0161447	1	0,00063562	1,01343262
10	-42,05370	3,84382	0,0185414	1	0,00072998	1,16371443
11	-42,03630	4,34280	0,0209381	1	0,00082433	1,31478035
12	-42,02760	4,83971	0,0232306	1	0,00091459	1,46521959
13	-42,01020	5,33818	0,0257315	1	0,00101305	1,61613111
14	-41,99500	5,84133	0,0279197	1	0,00109920	1,76845950
15	-41,98200	6,33824	0,0303164	1	0,00119356	1,91889873
16	-41,96670	6,83202	0,0327131	1	0,00128792	2,06839036
17	-41,95150	7,33778	0,0351098	1	0,00138228	2,22150893
18	-41,93630	7,83833	0,0375064	1	0,00147663	2,37305017
19	-41,92320	8,33263	0,0398510	1	0,00156894	2,52269923
20	-41,90580	8,83891	0,0422998	1	0,00166535	2,67597522
21	-41,89280	9,33895	0,0448007	1	0,00176381	2,82736206
22	-41,87100	9,83221	0,0471192	1	0,00185509	2,97669626
23	-41,86010	10,33700	0,0496201	1	0,00195355	3,12952116
24	-41,84060	10,8371	0,0523033	1	0,00205919	3,28092617
25	-41,82750	11,3308	0,0546218	1	0,00215046	3,43039357
26	-41,80140	11,8298	0,0573051	1	0,00225611	3,58146555
27	-41,78400	12,3361	0,0594673	1	0,00234123	3,73474761
28	-41,74920	12,8289	0,0610564	1	0,00240380	3,88394254
29	-41,67960	13,3258	0,0628800	1	0,00247559	4,03437875
30	-41,55770	13,8185	0,0660582	1	0,00260072	4,18354340
31	-41,38370	14,3331	0,0692364	1	0,00272584	4,33933828
32	-40,84420	14,8227	0,078276	1	0,00308173	4,48756441
33	-40,26770	15,3603	0,190946	1	0,00751756	4,65032252
34	-39,86960	15,8374	0,298223	1	0,01174106	4,79476429
35	-39,39320	16,3416	0,480475	1	0,01891634	4,94741057
36	-38,94280	16,8354	0,590180	1	0,02323543	5,09690825
37	-38,44250	17,3291	0,711785	1	0,02802303	5,24637566
38	-37,83330	17,8083	0,883617	1	0,03478807	5,39145320
39	-37,10240	18,3209	1,11499	1	0,04389724	5,54664257
40	-36,30620	18,8146	1,35007	1	0,05315236	5,69610998
41	-35,39250	19,3001	1,62017	1	0,06378622	5,84309484
42	-34,27640	19,8126	1,91360	1	0,07533858	5,99825394
43	-33,06910	20,3006	2,23859	1	0,08813346	6,14599568
44	-31,59410	20,7819	2,60622	1	0,10260709	6,29170899
45	-29,52300	21,2215	3,04887	1	0,12003425	6,42479765

### 9.5.1 GRAFICAS.

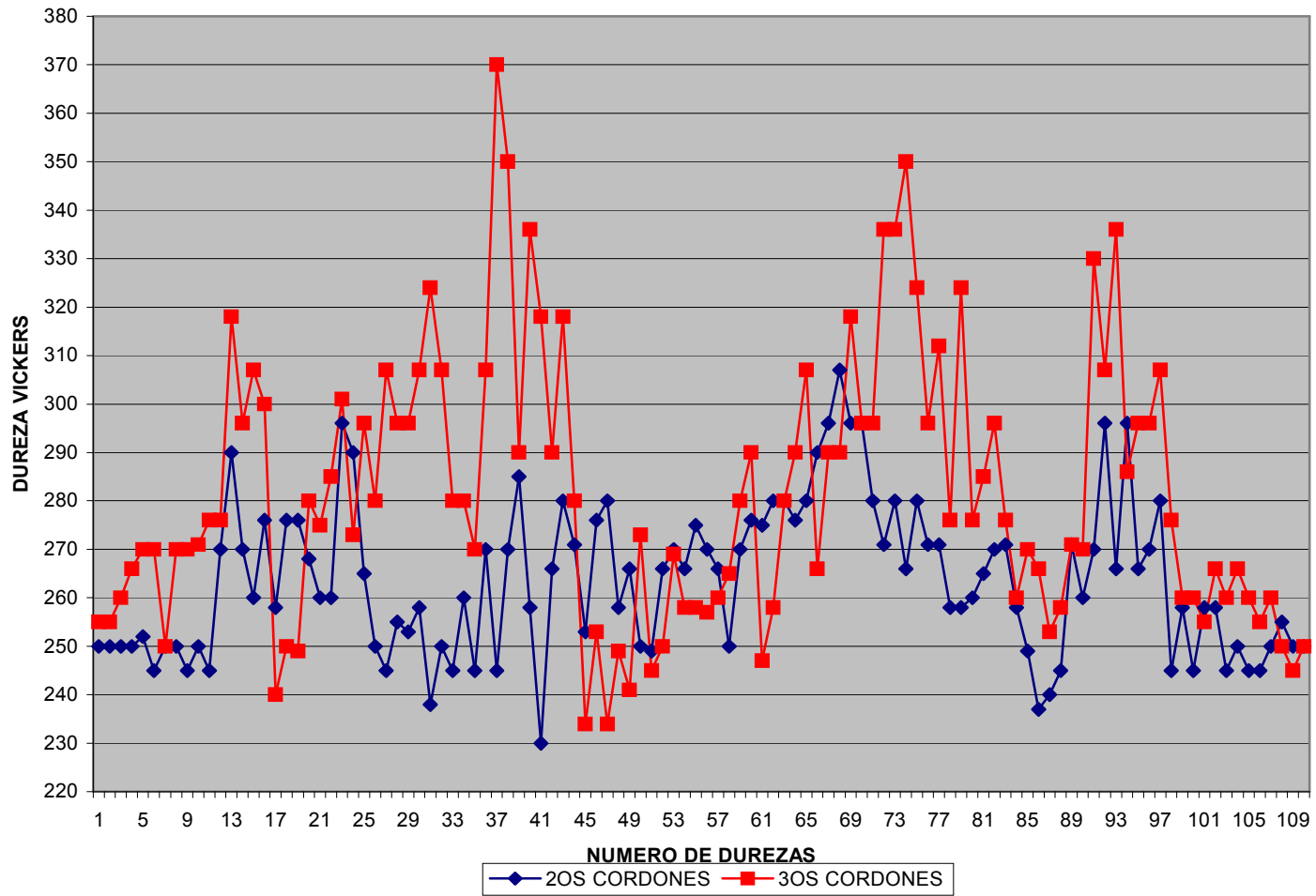
A continuación se mostraran tres gráficas; la primera de ellas son los resultados obtenidos del mapeo de durezas de la capa de los segundos cordones, la segunda gráfica corresponde a los resultados del mapeo de durezas de la capa de los terceros cordones, y por último la tercera gráfica se basa en la comparación de los resultados de las dos gráficas anteriores obtenidos de la medición de la dureza en la probeta.



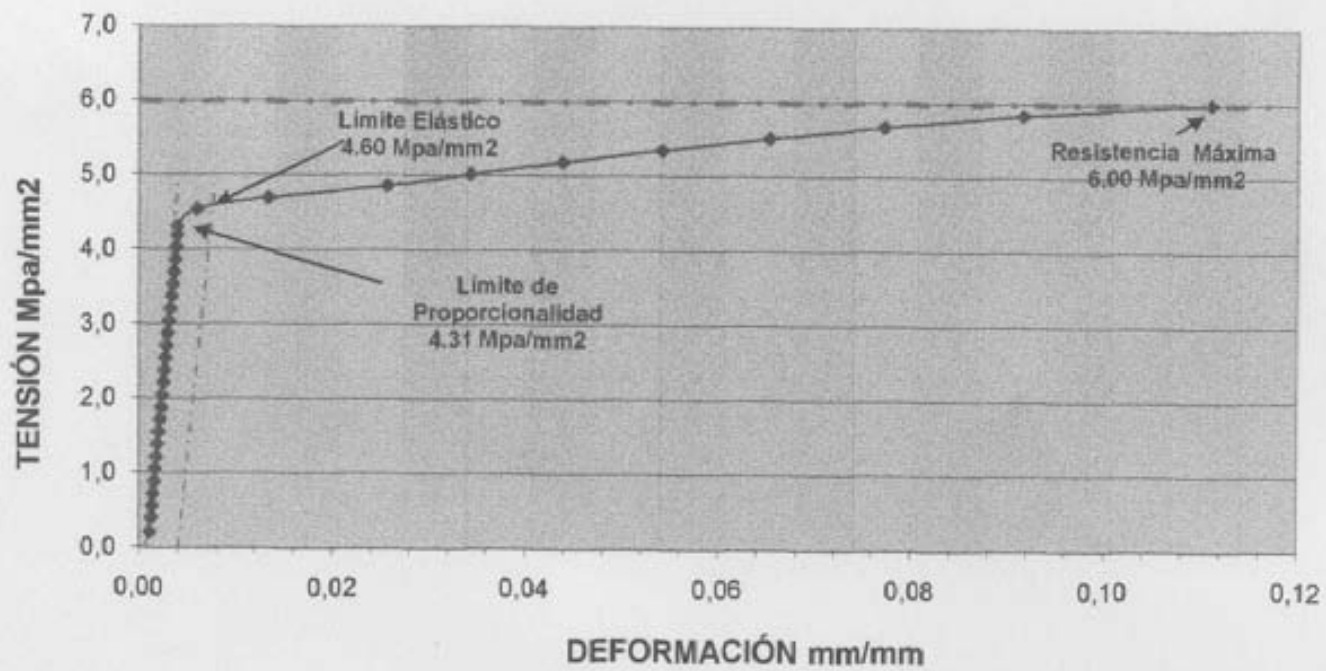
**TERCEROS CORDONES**



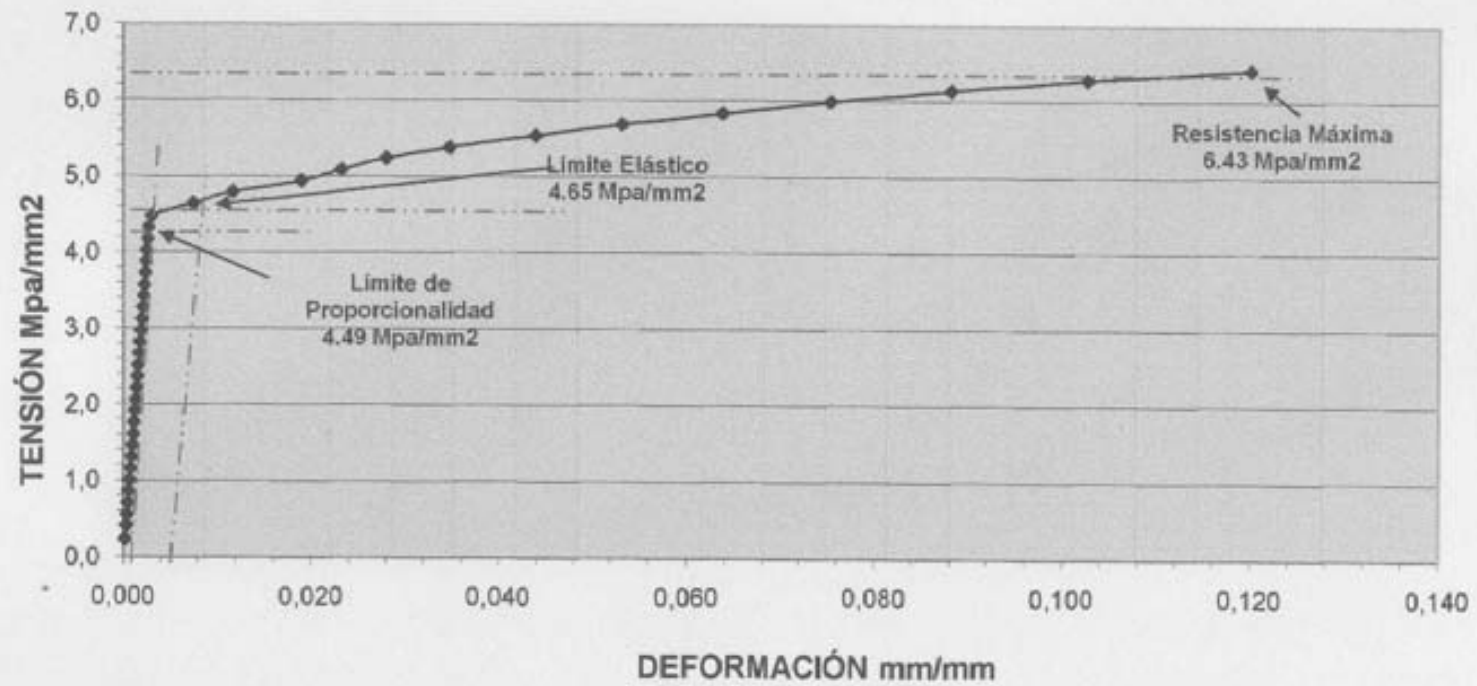
### COMPARACION DE DUREZAS EN 2os. Y 3os. CORDONES



CURVA ESFUERZO vs DEFORMACIÓN DE SEGUNDOS CORDONES.



### CURVA ESFUERZO vs DEFORMACIÓN EN TERCEROS CORDONES

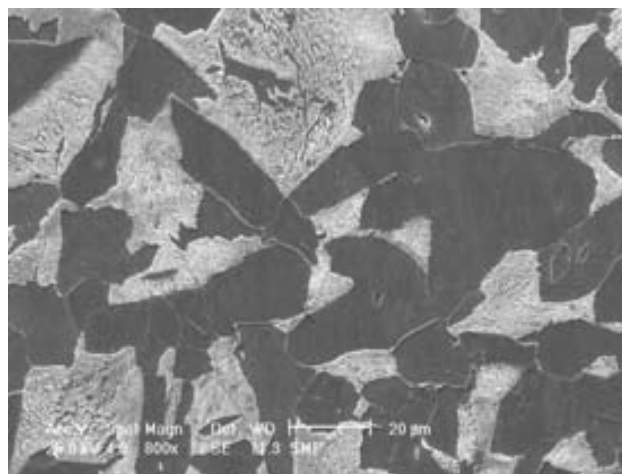


PROBETA	LIMITE DE PROPORCIONALIDAD	LIMITE ELÁSTICO	RESISTENCIA MÁXIMA
SEGUNDO CORDÓN	4.31Mpa/mm. <sup>2</sup>	4.60Mpa./mm. <sup>2</sup>	6.00Mpa/mm. <sup>2</sup>
TERCER CORDÓN	4.49Mpa./mm. <sup>2</sup>	4.65Mpa./mm. <sup>2</sup>	6.43Mpa/mm. <sup>2</sup>

Tabla de resultados mas relevantes del ensayo de resistencia a la o tensión

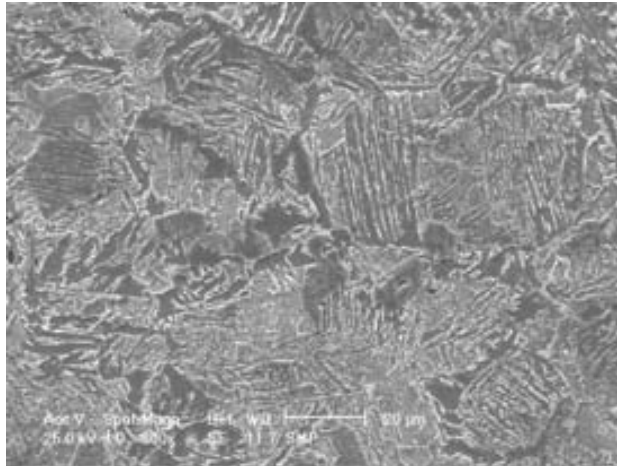
### 9.5.2 METALOGRAFÍAS

En las fotografías que a continuación se mostraran, nos presentan las microestructuras obtenidas de la muestra, que van desde el metal base, la zona afectada por el calor y las estructuras de los cordones de soldadura, que son las zonas de nuestro interés.

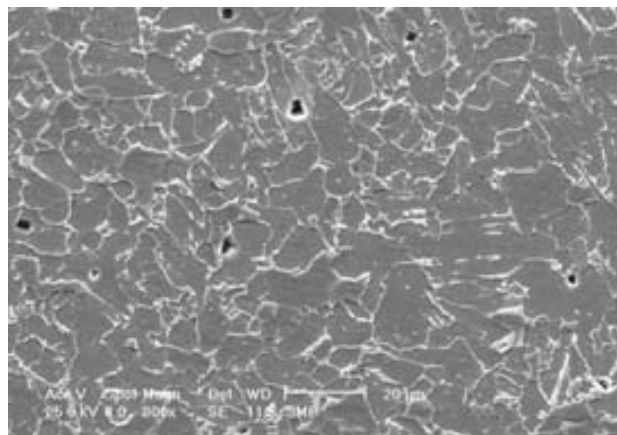


Fotografía 1.- Metalografía de la estructura del metal base de la placa A-36, tomada a 800x. La cual nos presenta su microestructura, esta consiste de granos equiaxiales de ferrita y de perlita (esta última está compuesta de laminillas de ferrita y cementita), en dicha fotografía la fase oscura es ferrita y la fase blanca es perlita.

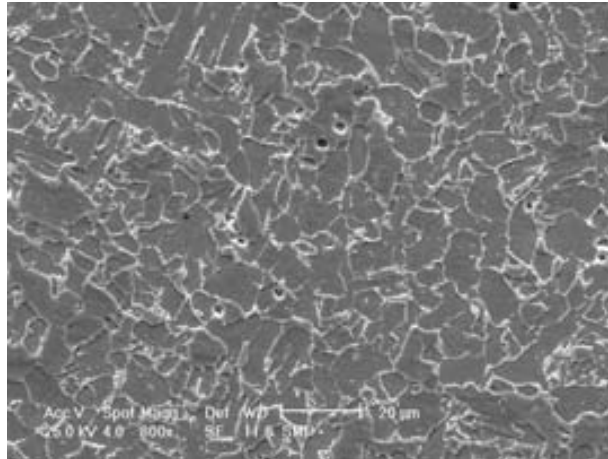




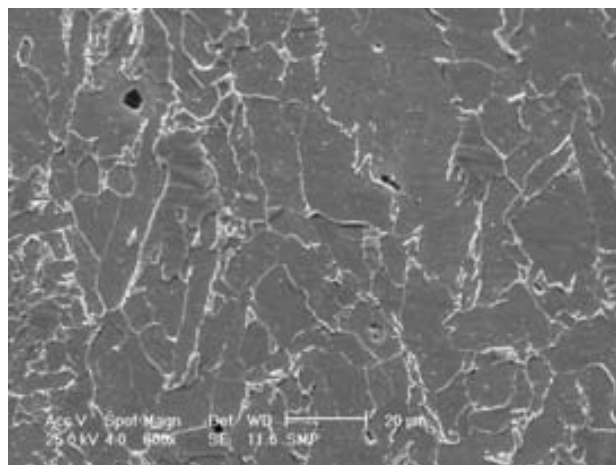
Fotografía 2.- Metalografía de la zona afectada por el calor del metal base, tomada a 800x. Presenta la estructura de la ZAC del acero A-36, la cual está formada por un crecimiento de grano de perlita (ferrita + cementita) y gran cantidad de cristales de perlita.



Fotografía 3.- Metalografía de la zona afectada por el calor de los segundos cordones, tomada a 800x. Nos muestra que dicha zona está constituida de granos equiaxiales de ferrita.



Fotografía 4.- Metalografía de la zona afectada por el calor de los terceros cordones, tomada a 800x. Consta de granos equiaxiales de ferrita, que cuyas diferencias de con los segundos cordones son únicamente el crecimiento de grano.



Fotografía 5.- Esta metalografía nos muestra la estructura dendrítica de la zona de los cordones que no sufren un calentamiento por un fenómeno de la soldadura.

## **9.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

De las fotografías obtenidas se puede pensar que los fenómenos térmicos que se producen por el proceso de soldadura en una aplicación en multipasos, existen cambios significativos desde el metal base original hasta el centro de cada uno de los cordones, por consiguiente, es de esperar que las propiedades mecánicas de cada uno de los cordones sean diferentes, ya que esto se basa en que las propiedades mecánicas de los materiales metálicos están dadas por las estructuras metalográficas.

Esto se corrobora al desarrollar el mapeo de durezas desde el metal base de una de las placas, hasta el material base de la otra placa, pasando a lo ancho de los segundos y terceros cordones; con lo que comprobamos cambios en la dureza (Vickers) de las diferentes zonas en las cuales se tomaron y se observó que existen diferencias significativas de la dureza entre los segundos y terceros cordones. Así como las comparaciones en las pruebas de tensión aplicadas a los segundos y terceros cordones, al graficar y obtener las curvas de Esfuerzo vs. Deformación hay una diferencias muy razonable en las resistencia máxima y el limite de proporcionalidad, pero no podemos decir lo mismo del limite elástico ahí existe una mínima diferencia

## **CONCLUSIONES**

- Sí existen cambios estructurales que modifican las estructuras metalúrgicas en la aplicación de la soldadura en un proceso en multipaso.
- Las pequeñas variaciones de la dureza y tensión en los segundos y terceros cordones en una soldadura multipasos demuestran que las propiedades mecánicas entre ambos cordones son diferentes.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Donald R. Askeland.  
*Ciencia e Ingeniería de los Materiales.*  
Thomson. 2004.
2. Lawrence H. Van Vlack.  
*Tecnología de los Materiales.*  
Fondo Educativo Interamericano. 1984.
3. Richard A. Flinn.  
*Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones.*  
McGraw-Hill. 1989.
4. José María Laceras y Esteban.  
*Tecnología del Acero.*  
Cedel. 1978.
5. James F. Shackelford.  
*Ciencia de Materiales para Ingenieros.*  
Prentice Hall. 1995.
6. José Antonio Pero-Sanz Elorz.  
*Aceros.*  
Dossat. 2004.
7. Robert E. Reed-Hill.  
*Principios de Metalurgia Física.*  
Continental. 1986.
8. José Apraiz Barreiro.  
*Tratamientos térmicos de los Aceros.*  
Dossat. 1985.
9. Henry Horwitz.  
*Soldadura Aplicaciones y Práctica.*  
Alfaomega. 1997.
- 10.- D. Seferian.  
*Las Soldaduras Técnica-Control.*  
Urmo. 1977.