



01173 2-A  
2ej  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

SOLDADURA POR DIFUSION EN  
ALEACIONES DE BASE CINC

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS QUE SUSTENTA  
ROGELIO GONZALEZ OROPEZA  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA

Méx. 1992



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

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

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

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

## PROLOGO

Aprovechando la oportunidad de expresar algunas ideas en este espacio, quiero referirme a las profesionales que dedican su tiempo y esfuerzo a la docencia o a la investigación.

En cada caso existe un compromiso tácito de cooperación con la comunidad, con la sociedad o con el país en general.

La docencia, desde el nivel preescolar hasta la licenciatura, tiene una tarea específica y una problemática particular; el sistema educativo nacional adolece de fallas imputables no sólo al profesor, pero que sin embargo, es el más indicado para remediarlas.

Mencionaré, a manera de ejemplos, algunas de las acciones que se verifican en los diferentes niveles antes mencionados.

En las escuelas primarias así como en los jardines de niños, los maestros son enviados muy frecuentemente a curso de "actualización", suspendiendo para ellos sus labores. También, en los 2 niveles, existen objetivos específicos señalando que debe fomentarse las costumbres y tradiciones de la comunidad; al mismo tiempo, la Secretaría de Educación Pública se opone a que los maestros organicen festivales y exposiciones de índole diversa como anteriormente se hacía.

En la primaria algunos profesores no utilizan correctamente los libros de texto gratuitos, y piden a sus alumnos algún texto diferente.

En la secundaria (educación media básica), los contenidos están organizados, en algunas escuelas, por áreas y en otras, por asignaturas, además, estos contenidos no son congruentes con el siguiente nivel; cada profesor pide a sus alumnos un texto (algunos de ellos plagados de errores) que a su parecer, es el adecuado. Es en este nivel donde existe una discontinuidad mayor en el pro

ceso educativo, no obstante, las mismas instituciones educativas (SEP, UNAM, IPN, PARTICULARES, etc.) propician con los exámenes de admisión, el comercio de la regularización de los alumnos.

En el nivel medio superior, las instituciones particulares (algunas de ellas) anteponen el interés económico al educativo y se caracterizan por ofrecer mejores niveles académicos que las instituciones oficiales; parece ser que la diferencia estriba en el nivel de exigencia que tienen dichas instituciones con el profesor y éste, a su vez con sus alumnos.

Finalmente, en el nivel de licenciatura, muchas de las carreras, planes de estudio y programas de asignatura no obedecen a las necesidades nacionales. Los planes de estudio dibujan un perfil de profesionista que no encaja en ningún lado, y cuando éste empieza a trabajar, entonces empieza a capacitarse.

Respecto a los programas de asignatura, muchos de ellos se diseñaron conforme al contenido de un texto (muchas veces importado) o fueron copiados de alguna institución extranjera.

En estas condiciones, existe un abismo entre las necesidades de nuestra Patria y el sistema educativo nacional; si esperamos que las instituciones, a través de los funcionarios que las dirigen, reestructuren y mejoren estas situaciones, el proceso será muy lento, así como el de esperar un cambio social por el saneamiento y reestructuración de la política nacional.

La solución, en la medida de nuestras limitaciones, la tiene cada individuo que desee cambiar y mejorar este estado de cosas.

Por otra parte, mencionaré que la investigación científica y tecnológica en nuestro país debe tener (supuestamente) objetivos generales y concretos; entre otros, disminuir la dependencia tecnológica y formar o constituir una infraestructura nacional, técnica y científica que permita a nuestros conciudadanos elevar su nivel de vida en todos los aspectos.

Me parece que sólo unos cuantos investigadores del país hacen caso de los lineamientos antes mencionados.

Se argumenta que la acción o la actividad de descubrir algo nuevo no puede tener un camino concreto o definido, es hasta cierto punto un sendero aleatorio; sin embargo, existen investigadores que a pesar de ello, persisten en su empeño por lograr algo para el país.

La comunidad científica en las instituciones de educación superior goza de un alto prestigio y consideración, en comparación con los docentes; tienen opciones para estar mejor remunerados por la ayuda que les ofrecen otras instituciones (Sistema Nacional de Investigadores, por ejemplo) y tienen más y mejores oportunidades de intervenir en la creación de postgrados, planes de estudio y programas de asignatura.

Cuando se solicitan promociones en ambos sectores, se les evalúa casi con los mismos criterios: publicaciones, estudios de postgrado, dirección de tesis, etc.; sin embargo, es claro que sus funciones tienen diferentes propósitos.

Los investigadores también imparten clases y dictan conferencias, si bien es cierto que su preparación puede ser mejor o más específica, también lo es que no tienen la formación didáctica que el docente, al desempeñar su trabajo, siente la necesidad de adquirir y desarrolla en el curso de este último.

Para finalizar, mencionaré una de las necesidades que he tenido como alumno de postgrado, ésta es la de crear opciones sólidas en postgrado, con planes de estudios acordes con los lineamientos de la investigación nacional y, al mismo tiempo, que formen profesionales altamente calificados para satisfacer la demanda de nuestro país.

## I N T R O D U C C I O N

El contenido del presente trabajo contempla básicamente dos aspectos: el primero, es una recopilación de datos y características de los principales métodos de soldadura en metales no ferrosos, ofrece un resumen de la bibliografía consultada y constituye por tanto, una guía para quien desee conocer generalidades del tema (si se desea profundizar más en alguno de los métodos, habrá que consultar algunas de las referencias u otras fuentes más especializadas).

El segundo aspecto se refiere a la investigación experimental propiamente dicha, se indica la secuencia de todas y cada una de las actividades que se llevaron a efecto, el equipo y dispositivos que se utilizaron, las opciones que tuvieron que tomarse debido a que no se obtuvieron resultados satisfactorios en unas y finalmente, la interpretación de los ensayos mecánicos y metalográficos.

Los resultados parecen ser congruentes conforme a la potencia aplicada al soldar, la microestructura del material y el tiempo de permanencia entre los electrodos de la punteadora.

Al último, se presenta un listado de conclusiones que resumen los resultados y las interpretaciones de la investigación, se propone incluso, el diseño de una máquina punteadora portátil para que este método de soldadura, en las aleaciones de base cinc, sea una opción más versátil y más práctica que las que actualmente se conocen.

## C O N T E N I D O

### I. PROCESOS DE SOLDADURA EN MATERIALES NO FERROSOS

- . Clasificación de los procesos de soldadura
- . Notas históricas
- . Soldadura de arco con electrodo metálico y gas inerte (MIG)
- . Soldadura de arco con electrodo de tungsteno y gas inerte (TIG)
- . Soldadura de arco con plasma
- . Soldadura por resistencia
- . Soldadura con haz electrónico
- . Soldadura fuerte y blanda
- . Soldadura oxiacetilénica

### II. DESCRIPCION DE LA PARTE EXPERIMENTAL

- . Soldabilidad del cinc y sus aleaciones
- . Aspecto metalúrgico de la soldadura por resistencia
- . Secuencia de actividades y descripción de los ensayos
  - De soldadura
  - Mecánicos
  - Metalográficos

### III. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES GENERALES

- . Observaciones metalográficas de:
  - Material recocido
  - Material laminado
  - Material templado
- . Observaciones del comportamiento mecánico y condiciones de soldabilidad de acuerdo a:
  - Estructura de recocido
  - Estructura de laminación
  - Estructura de templado
- . Conclusiones
- . Referencias

CAPITULO I

PROCESOS DE SOLDADURA EN  
MATERIALES NO FERROSOS

## PROCESOS DE SOLDADURA EN MATERIALES NO FERROSOS

Como un panorama más amplio o más general del tema, se ha intentado hacer una recopilación de los distintos métodos de soldadura que se aplican en la actualidad a los materiales NO FERROSOS. Existe mayor información (del tema) de los metales ferrosos especialmente en los aceros, esto, al parecer es debido a la gran versatilidad de usos que tienen, sin embargo, novedosas investigaciones en materiales están permitiendo hacer uso más frecuente y variado de los materiales no ferrosos.

Bien, para entrar en materia se antoja observar un panorama o clasificación general de los procedimientos de soldadura que se emplean en la industria metalmeccánica, atendiendo al concepto que sobre soldadura se tiene:

Soldadura.- Unión entre sólidos mediante la cual, se consigue la continuidad del material entre las partes unidas. Si no se indica lo contrario, el término soldadura designa, la que se realiza entre metales.

Soldadura	Autógena	}	- Por fusión de los bordes y posterior cristalización.
			- Por presión, acompañada de un nivel de energía térmica suficientemente alto para permitir la cristalización de las superficies encaradas y comprimidas una contra la otra.
	De aleación	}	- Por material de aportación.

**Autógena.**- La unión se autogenera a partir del material base cuando los bordes a unir, adquieren un nivel de energía que permite una movilidad atómica para constituir un único retículo cristalino en la zona de unión.

**De aleación.**- Es de tipo heterogéneo, se obtiene mediante metal fundido entre los bordes del metal de base. El metal líquido de aportación penetra debido al fenómeno de capilaridad superficial y al solidificarse, une las piezas.

Soldadura Autógena por fusión	Por arco eléctrico	}	- Electrodo fusible revestido.
			- Arco sumergido
	Por llama	}	- En gas inerte (argón)
			- En gas protector (CO <sub>2</sub> )
	Aluminotérmica		- Oxiacetilénica
	Por haz electrónico		- Oxídrica
Soldadura Autógena por presión	Por resistencia eléctrica	}	- Por chispa
			- Por rodillo
	Por inducción eléctrica	}	- Por relieves
			- Por puntos
	Por fricción		

Soldadura  
de  
Aleación

Por llama  
Por resistencia eléctrica  
Por inducción eléctrica  
En horno  
Por inmersión

## NOTAS HISTÓRICAS

Es difícil precisar a todos los investigadores que aportaron alguna innovación al proceso de soldabilidad de los materiales, sin embargo, se pueden mencionar a los más relevantes y las aportaciones que al respecto hicieron.

A continuación se enlistan los nombres, nacionalidad, sus aportaciones tecnológicas y el año en que se dieron a conocer:

Año	Nombre	Aportación
1801	Sir H. Davy (inglés)	Descubrió que se podía crear y sostener un arco entre 2 terminales.
1835	E. Devey (inglés)	Descubrió el gas acetileno pero, su fabricación resultó muy costosa.
1837	Desbassyns De Richemont (francés)	Descubre la llama aerohídrica
1850	H. Sainte-Claire-Deville (francés)	Estudia la llama oxhídrica
1856	Joule (inglés)	Logra la soldadura a base de 2 hilos de acero con una corriente de alta intensidad.
1877	E. Thomson (inglés)	Realiza la soldadura por presión
1881	A. De Meritens (francés)	Utiliza el arco de carbón para soldar los bornes de plomo de las baterías de los acumuladores.
1885	N. de Bernardos y S. Olczewsky (rusos)	Utilizan el arco de carbón para la fusión local del acero.

Año	Nombre	Aportación
1886	Zerener (alemán)	Dirige, mediante una bobina sopiante, el arco creado entre 2 electrodos de carbón.
1887	T. Fletcher (alemán)	Primeros ensayos de perforación de acero con chorro de oxígeno.
1888	N. Slavianoff (ruso)	Fue el primero en usar un electrodo de metal desnudo para la soldadura de arco.
1889	H. Zerener (alemán)	Fue el primero en usar el proceso de doble arco de carbón.
1892	H. Moissan (francés)	Fabrica el carburo de calcio en horno eléctrico.
1892	C.L. Coffin (estadounidense)	Se le atribuye también el uso del primer electrodo de metal desnudo y el primer proceso de soldadura por puntos.
1892	T.L. Willson (canadiense)	Descubrió un método poco costoso para obtener gas acetileno.
1895	H. Le Chatelier (francés)	Estudia científicamente la llama oxiacetilénica y prevee todas sus posibilidades industriales.
1898	Linde (alemán)	Obtención industrial del oxígeno
1901	E. Fouche y Ch. Picard (franceses)	Construyeron el primer soplete industrial oxiacetilénico.
1901	Sociedad Köln Musener (alemana)	Primera patente sobre la combinación de una llama de calefacción y de un chorro de oxígeno.
1902	G. Claude (francés)	Obtención industrial del oxígeno por doble rectificación.

Año	Nombre	Aportación
1904	Ch. Picard (francés)	Construcción de un soplete especial para el oxicorte.
1906	R. Gianjon y P. Rosenberg (franceses)	Crean en París la "Office Central de l' Acétylene" para las aplicaciones de este gas al alumbrado que se orientará después hacia la soldadura.
1907	O. Kjellberg (sueco)	Desarrolló el primer electrodo recubierto para soldadura de arco.
1908	N. Bernardos (ruso)	Desarrolló un proceso de electroescoria.
1910 1912	A. Le Chatellier (francés)	Primeras construcciones industriales por soldadura de arco.
1913	J.E. Languépin (francés)	Producción industrial de máquinas para soldar por resistencia.
1914	A.P. Strohmenger (inglés)	Desarrolló el primer electrodo envuelto en asbesto.
1924	J. Bethenod (francés)	Preconiza el empleo de la corriente de alta frecuencia para estabilizar el arco.
1924	Irwing Langmuir (estadounidense)	Estudia la disociación del hidrógeno y propone la soldadura con hidrógeno atómico.
1926	Alexander (estadounidense)	Realiza soldaduras en un medio reductor.
1930	H.M. Hobar y P.K. Devers (estadounidenses)	Desarrollan el proceso de soldadura con gas inerte.
1935	H.E. Kennedy, L.T. Jones y M.A. Rodermund (estadounidenses)	Desarrollan el proceso de soldadura de arco sumergido.

Año	Nombre	Aportación
1938	"General Electric Co." y "Westinghouse" (estadounidense).	Proponen el control electrónico en las soldaduras por resistencia.
1942	R. Meredith (estadounidense)	Desarrolló el primer soplete para la soldadura de arco con tungsteno y gas inerte (TIG).
1948	Diversos	Se desarrolló el proceso de soldadura de arco metálico y gas inerte (MIG).

La soldadura considerada como procedimiento de fabricación no se desarrolló como debiera sino hasta el siglo XX, hacia 1900 hicieron su aparición los electrodos y la soldadura oxiacetilénica.

La segunda guerra mundial favoreció el desarrollo de los métodos de soldadura. De entonces a la fecha, la soldadura a crecido a velocidad prodigiosa, hasta el punto que no existe otra técnica que haya progresado tan rápidamente, ni siquiera la electrónica (que debe su privilegiada posición al desarrollo de la soldadura).

Así pues, como se dijo anteriormente, a manera de introducción se describen los principales métodos de soldadura que se utilizan en los materiales no ferrosos:

#### SOLDADURA DE ARCO CON ELECTRODO METALICO Y GAS INERTE

(Gas Metal - Arc Welding = MIG)

Hay varios procesos que recaen en la clasificación de soldadura MIG. En algunos se utiliza un electrodo desnudo protegido con gas inerte, en otros se utiliza un electrodo revestido con fundente, similar al electrodo normal para soldadura de arco, en otros más se emplea un electrodo hueco con núcleo de fundente.

También se utilizan diferentes métodos para transferir el metal fundido a través del arco ya que, se puede utilizar un generador o un rectificador para tener CC y al contrario de una máquina normal para soldadura de arco, el voltaje permanece constante.

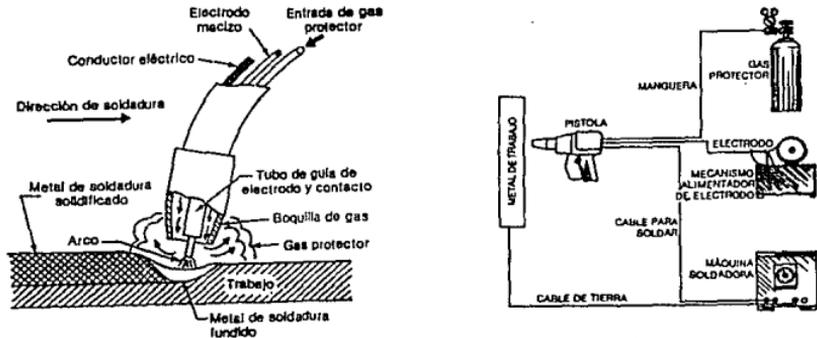


Fig. I.1 Detalle del proceso y equipo básico de soldadura de arco metálico y gas inerte.

La fusión del material se produce con el calor del arco entre el electrodo metálico consumible y la pieza a soldar, el proceso se encuentra protegido por una atmósfera de argón, helio, mezcla de argón y helio, adición de oxígeno a estos gases o nitrógeno.

Estos gases presentan la ventaja de ser:

- neutros respecto al metal que se funde.
- mantienen la estabilidad del arco.

La corriente de alimentación del arco, puede ser continua o alterna.

En corriente continua se usa polaridad directa<sup>1</sup> para metales o aleaciones de baja oxidación y con una elevada temperatura de fusión tales como los aceros, cobre, níquel, etc.

Por el contrario, se usa polaridad inversa en el caso de los me-

tales y aleaciones muy oxidables como el aluminio, magnesio y sus aleaciones.

En corriente alterna, el potencial de cebado<sup>2</sup> debe ser muy elevado para que se produzca el arco y se estabilice.

Esta dificultad se elimina superponiendo al arco alternativo de bajo potencial, una corriente de alta frecuencia.

El arco alterno con superposición de corriente de alta frecuencia se prefiere para las soldaduras de los metales no ferrosos y sus aleaciones:

- Aluminio y aleaciones de aluminio.
- Cobre y aleaciones de cobre.
- Berilio - cobre de alta conductividad.
- Latones y plata - níquel o plata alemana.
- Bronce fosforados.
- Bronces aluminizados.
- Bronces silfco
- Aleaciones níquel - cobre
- Aleaciones de magnesio
- Titanio y aleaciones de titanio.

- 
1. Cuando se emplea polaridad directa, el electrodo es la terminal negativa mientras que, en la polaridad inversa el electrodo es la terminal positiva.
  2. Diferencia de potencial con el que se inicia el arco, tocando o no el metal de base.

A manera de ejemplo, veamos ciertos detalles de la soldadura en Titanio y aleaciones de titanio.

La soldadura de arco metálico y gas inerte es normalmente usado para soldar titanio y aleaciones de titanio de 3 mm de espesor en adelante.

Cuando existen salpicaduras se puede producir una soldadura de baja calidad e inestabilidad en el arco.

Existen electrodos tanto de titanio no aleado como de aleaciones de titanio para igualar el material de base.

Se utiliza una corriente directa de 310 a 360 A con un potencial constante que va de 38 a 45 V según sea el caso y un flujo de argón de aproximadamente 1 m<sup>3</sup>/h ó 1.4 m<sup>3</sup>/h, en ocasiones se utiliza helio como ayuda, a razón de 0.5 m<sup>3</sup>/h.

Para evitar la contaminación y la porosidad en este proceso, es necesario tener una protección anterior y posterior al electrodo y para ello se utiliza un deflector en la boquilla del portaelectrodo.

#### SOLDADURA DE ARCO CON ELECTRODO DE TUNGSTENO Y GAS INERTE.

(Gas Tungsten - Arc Welding = TIG)

En este proceso la soldadura se produce con el calor de un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el material de base. La soldadura se protege con gas inerte que se suministra a través del portaelectrodo, y a su vez éste es enfriado con

agua. El argón es el gas usado más frecuentemente aunque se puede emplear helio o una mezcla de ambos.

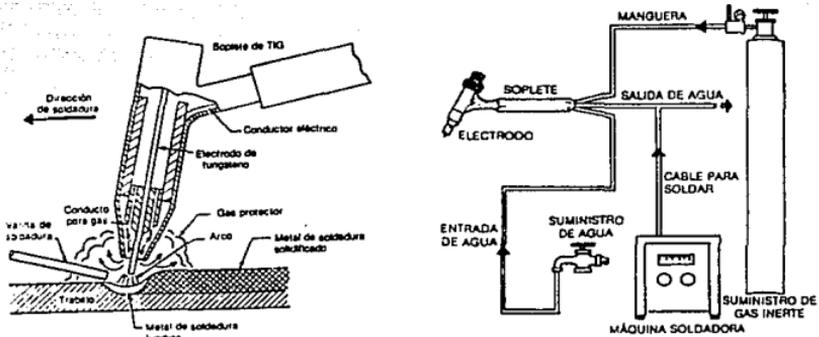


Fig. I.2 Detalle del proceso y equipo básico de soldadura con arco de tungsteno.

El metal que se va a soldar determina la corriente o la polaridad. La corriente continua con polaridad directa no tiene la capacidad para penetrar en la película de óxido que se forma en algunos metales, por ejemplo el aluminio, sin embargo, se utiliza para algunos aceros y aleaciones de cobre. La corriente alterna tiene capacidad para penetrar en la película de óxido pero, como el arco se extingue cada medio ciclo, se considera inadecuada, esto se solucionó al superponer una corriente de alta frecuencia y se utiliza para el aluminio, magnesio y otros numerosos metales.

Debido al costo de los gases inertes para proteger al electrodo, este proceso se usa mejor en partes cuyos espesores son delgados y no compite con los procesos usados para soldar materiales de es pesores gruesos.

En lo que respecta a los electrodos, éstos no tienen código oficial de colores pero, la industria utiliza los siguientes:

Punta	Designación
Verde	Tungsteno
Amarilla	Tungsteno y 1% de torio
Roja	Tungsteno y 2% de torio
Café	Tungsteno y zirconio

Los electrodos de tungsteno y zirconio se utilizan con corriente alterna y los de aleación de torio con corriente continua.

Los metales que se sueldan mediante este proceso, son principalmente los siguientes:

Aleaciones de aluminio  
 Cobre y aleaciones de cobre.  
 Berilio - cobre  
 Aleaciones de cobre - zinc  
 Bronces fosforados  
 Bronces aluminizados  
 Bronces con silicio  
 Niqueles cobrizados  
 Aleaciones de magnesio  
 Aleaciones de níquel

## SOLDADURA DE ARCO CON PLASMA

Es un proceso de soldadura en el cual, el calor es producido por un arco que se establece entre un electrodo (no consumible) de tungsteno y la pieza de trabajo.

Cuando se establece el arco a través de una columna gaseosa que se encuentra entre los 2 electrodos parte del gas es ionizado, esta ionización recibe el nombre de plasma. Consiste en electrones libres, iones positivos y átomos eléctricamente neutros; la sección del plasma por la que se conduce la corriente del arco, se conserva caliente debido al efecto de la resistencia térmica en esa sección.

Ionización térmica, es el término empleado para describir la ionización en una atmósfera de alta temperatura, resultado de las colisiones de moléculas y electrones, y de radiación en el gas.

La soldadura de arco con plasma, está relacionada estrechamente con la soldadura de arco con tungsteno y gas inerte. El plasma está presente en todos los arcos y si una tobera o boquilla está situada alrededor del arco, la cantidad de plasma se incrementa notablemente.

Este método es adaptable a una operación manual o automática y puede usarse para soldaduras continuas o intermitentes, dichas soldaduras pueden efectuarse con o sin material de aporte. Se usa más frecuentemente en forma alternada con la soldadura del arco de tungsteno y gas inerte, algunas veces es competitivo con la soldadura oxiacetilénica, con la soldadura de haz electrónico y ocasionalmente con la soldadura por resistencia.

Este método es apropiado para unir aceros aleados, al carbón - inoxidables, metales refractarios, aleaciones de cobre, aleaciones de níquel y aleaciones de titanio. Con aluminio se tienen buenos resultados, pero no es el método que más se use.

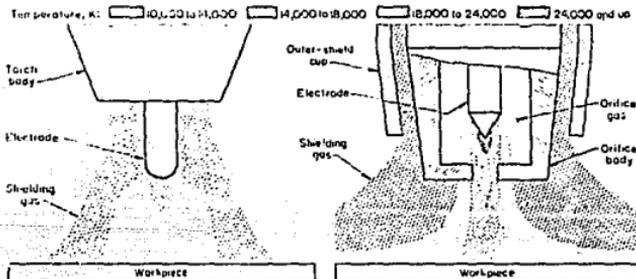
La soldadura con plasma se considera que puede ser usada para

cualquier posición, dependiendo del material de aporte o de otras condiciones.

Este método se usa para soldar secciones delgadas debido a la estabilidad y el control dimensional que da la contracción del arco (0.001 de pulgada, 0.0025 cm).

Se producen soldaduras con corriente más bajas de 1.5A y las ventajas que ofrece por la contracción del arco, en comparación con el arco de tungsteno y gas inerte son las siguientes:

1. La concentración de la energía es grande.
2. Se mejora la estabilidad del arco, particularmente a bajos niveles de corriente.
3. El plasma tiene una velocidad más alta.
4. La contaminación del tungsteno es eliminada.
5. Se requiere menos destreza para soldar manualmente.
6. No se requiere de un apoyo sólido para obtener una buena penetración ya que, se puede usar la técnica de bocallave.



Arco no concentrado (soldadura TIG)

Arco concentrado (soldadura con plasma)

### 1.3. Comparación de los métodos de soldadura.

Las desventajas, comparando estos 2 métodos son:

1. Un costo mayor en el equipo (de 2 a 5 veces o más)
2. Una corta vida del orificio del cuerpo (ver figura)
3. Se necesita un gran conocimiento sobre soldadura, aunque no una gran destreza sobre la parte a soldar.
4. Se consume un gran flujo de gas inerte.

La soldadura con plasma es ejecutada, casi exclusivamente, con polaridad directa suministrando corriente directa, la polaridad inversa causa un excesivo deterioro del electrodo. La corriente directa puede rectificarse de la corriente alterna o suministrada por un motor generador o una máquina que maneje un generador.

En circuito abierto se tiene una diferencia de potencial de 65 a 80V en las unidades básicas. Las unidades que suministran la potencia para la soldadura TIG pueden ser convertidas para soldadura con plasma.

Para iniciar el arco en este proceso, se suministra corriente directa por separado, ésta está conectada al electrodo y al cuerpo con orificio (de cobre).

Por este medio un "arco piloto" se inicia entre el electrodo y el interior del cuerpo con orificio (ver figura I.4).

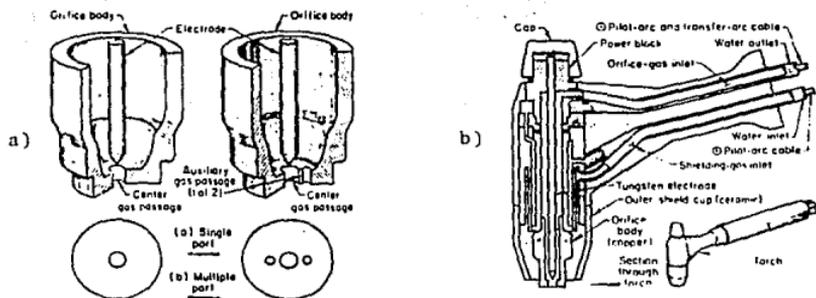


Fig. I.4. Diferencias entre un soplete para TIG (a) y para plasma (b)

Los sopletes para soldadura con plasma son más complejos que los utilizados para TIG porque requiere de conductos separados para la alimentación del gas y el gas protector y porque el cuerpo con orificio debe estar protegido por una camisa de agua de enfriamiento (ver figura I.4.).

Usualmente, el mismo gas es usado para la alimentación y para proteger, ésto evita la variación en la consistencia del arco, lo cual no ocurre si se usan 2 tipos diferentes de gas.

El uso de metales de aporte en la soldadura con plasma depende de si es necesario el metal adicional. El metal de aporte está disponible en alambres y con las composiciones que se necesitan. Para todas excepto para las aplicaciones especiales, los metales de aporte son los mismos que se usan en la soldadura de arco con tungsteno y gas inerte (TIG).

Se usa en las aleaciones de titanio en espesores de 3.2 a 15.2 mm con velocidades de 500 a 170 mm/s respectivamente. La corriente utilizada también varía según el caso de 185 a 250A con voltajes de 21 a 39V. Se utiliza argón o una mezcla de argón y helio en porcentajes diversos (según el caso) a razón de 0.2 m<sup>3</sup>/h hasta 0.85 m<sup>3</sup>/h.

Cuando se utiliza en cobre, los espesores pueden variar desde 2.3 a 6.3mm con una rapidez de 250 a 500 mm/min. La corriente utilizada varía de 180 a 670 A y el voltaje de 28 a 46V, en este caso se utiliza argón o helio puros, si es argón se usará un flujo de 0.23 m<sup>3</sup>/h (en los espesores más delgados) y si es helio podrá ser de 0.14 ó 0.22 m<sup>3</sup>/h.

Finalmente, si es latón, el espesor es de 2 a 3.18 mm, la velocidad de soldeo es de 400 ó 500 mm/min con una corriente 200 ó 140A y con 27 ó 25 V, ambos respectivamente. Se recomienda utilizar sólo argón o razón de 0.3 y 0.22 m<sup>3</sup>/h.

En los 3 casos (aleaciones de titanio, cobre y latón) el gasto volumétrico de gas se refiere al que es utilizado en el orificio del cuerpo y, los gases protectores en todos los casos estarán fluyendo a razón de 1.7 m<sup>3</sup>/h.

## SOLDADURA ELECTRICA POR RESISTENCIA

Los procedimientos de soldadura eléctrica por resistencia difieren de los de unión por fusión, en la forma y naturaleza de las energías puestas en juego: energía debida al efecto Joule y energía mecánica.

- a) La corriente eléctrica de intensidad  $I$ , que proviene del secundario de un transformador, interviene por efecto Joule; es decir - que la energía calorífica desarrollada en un tiempo  $dt$ , es proporcional al cuadrado de la intensidad y a la resistencia óhmica del circuito  $R$ ; viene expresada por la ley clásica de Joule.
- b) La energía mecánica se desarrolla por la presión ejercida sobre los electrodos durante las diferentes fases del ciclo de soldadura. En el comienzo, en el periodo de ajuste, la presión tiene por objeto romper la capa de óxido o de calamina con el fin de asegurar un contacto, tan perfecto como sea posible, entre las chapas a soldar; durante la soldadura, la presión mantiene las chapas en contacto facilitando el paso de la corriente; por último, en el periodo de solidificación, después de la ruptura de la corriente, la presión tiene por objeto: eliminar la bolsa de rechupe que tiende a formarse y laminar el metal sólido para favorecer la recristalización; es el período de forjado.

En un ciclo de soldadura llamado secuencia aparecen diversas fases o períodos:

- Período de ajuste; es decir, el tiempo que transcurre entre la regulación del electrodo móvil y el paso de la corriente; durante esta fase, la presión  $P$ , se eleva rápidamente.
- Período de soldadura que corresponde al paso de la corriente, la presión  $P$ , permanece constante, a menudo disminuye, según los procesos y los metales a unir.
- Período de forjado, después de interrumpir la corriente de soldadura.
- Período de enfriamiento que representa el tiempo muerto en el ciclo de la soldadura.

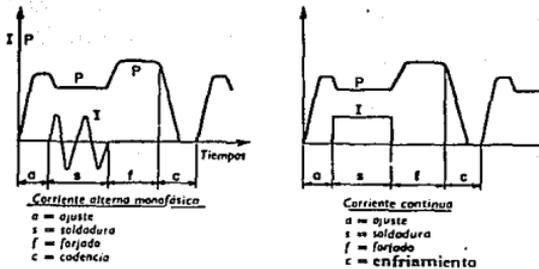
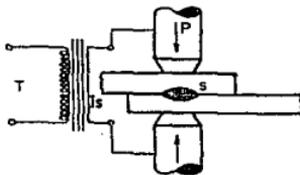


FIG. 1.5. Secuencia de soldadura por puntos.

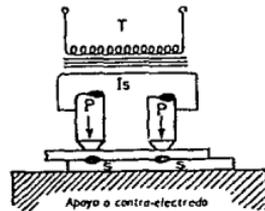
#### DIVERSOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA POR RESISTENCIA

Según cómo se apliquen las energías caloríficas y mecánicas, la soldadura eléctrica por resistencia se llama:

1. Soldadura por puntos, caracterizada por la posición de las chapas, que se solapan, y por la presencia de dos electrodos de forma cilíndrica, de metal duro y muy conductor, para resistir mecánicamente la presión de soldadura y facilitar el paso de la corriente. Este método presenta diversas variantes entre las que se encuentran: la soldadura por puntos múltiples, la soldadura por resalte y la soldadura a la muela.
2. Soldadura a tope por resistencia.
3. Soldadura a tope por chisporroteo.



Soldadura en un solo punto.

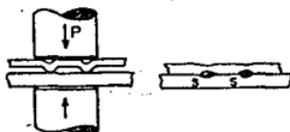


Soldadura por puntos múltiples.

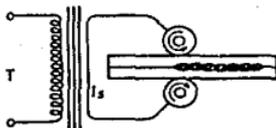
FIG. 1.6.



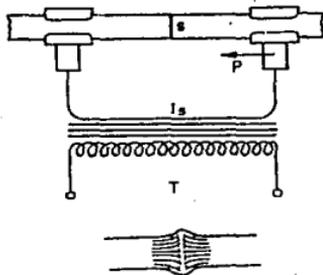
Parámetros de los electrodos.



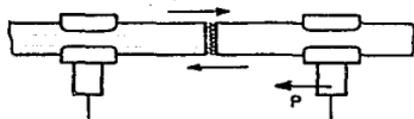
Soldadura por resalte



Soldadura a la muela



Soldadura a tope por resistencia pura.



Soldadura a tope por chisporroteo.

FIG. 1.7. Métodos de soldadura por resistencia eléctrica.

La tendencia actual, con las máquinas de gran potencia y las posibilidades de control electrónico, es hacia los métodos de soldadura rápida con intensidades de corriente y presiones elevadas. Los tiempos de soldadura son del orden de fracciones de segundo, designándolos, muy a menudo, por los períodos de frecuencia de la corriente; este tiempo de soldadura es, en general, del orden de 2 a 10 períodos de frecuencia de la corriente; este tiempo de soldadura es, en general, del orden de 2 a 10 períodos; es decir de 1/25 a 1/5 segundo.

### Resistencia de contacto

Uno de los factores que determinan la calidad del punto soldado es, sin duda alguna la resistencia óhmica de contacto  $R$ , que interviene en la ley de Joule; esta cuestión ha sido objeto de numerosos estudios. La resistencia total de contacto  $R$ , viene dada por la expresión  $R = (r_1 + r_1') + r_2 + (r_3 + r_3')$ , siendo:  $r + r_1'$ , las resistencias de los metales de base;

$r_2$ , la resistencia en el punto de contacto de las dos chapas;  
 $r_3 + r_3'$ , las resistencias del punto de contacto de los electrodos con las chapas.

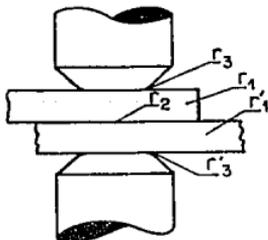


FIG. I.8.

Definición de la resistencia de contacto en una soldadura por puntos.

$r_3$  y  $r_3'$ , dependen únicamente de la naturaleza del metal a unir; en general, esta resistencia es muy pequeña para los metales y aumenta ligeramente en el caso de la soldadura; su influencia es despreciable comparada con las otras resistencias.

$r_1$  y  $r_1'$  corresponden a la resistencia óhmica debida al estado superficial de los metales en contacto con los electrodos.

Los óxidos metálicos, la calamina, actúan como verdaderos dieléctricos hasta convertir la soldadura en imposible. La presión de ajuste sobre los electrodos interviene en parte para romper las capas de óxido; así mismo el aumento de la tensión de la corriente, puede ser un medio eficaz para suprimir parcialmente el efecto de los óxidos; pero esto no es siempre posible.

Se demuestra que  $r_2$  varía inversamente con la presión por tanto es recomendable, sobre todo para ciertas aleaciones, en el momento que finaliza el ciclo de ajuste, reducir la presión en el período de soldadura con el objeto, por una parte, de aumentar  $r_2$  y, por otra, para evitar un hundimiento importante del metal en estado pastoso que marcaría excesivamente el punto; cuando finaliza el ciclo de soldadura se aumenta nuevamente la presión para favorecer el forjado con vistas a facilitar la recristalización y, por consiguiente, la calidad del punto.

#### TECNICA DE SOLDADURA POR PUNTOS

Los puntos de soldadura deben hacerse en relativamente pocos ciclos de corriente por varias razones;

1. No debe permitirse que el calor se difunda fuera del área del punto.
2. El metal se reblandece y el electrodo puede hacer un hoyo en la pieza si el tiempo es excesivo.
3. La resistencia eléctrica cambia constantemente con el calor de la pieza.
4. Los efectos del tratamiento térmico deben ser mínimos.

La densidad de corriente en la pieza se regula por el tamaño de la punta del electrodo; Los diámetros de puntas normalizados son 3/16 de pulgada (4.8 mm), 1/4 de pulgada (6.4mm), 3/8 de pulgada (9.6mm) (19.2 mm) y 7/8 de pulgada (22.4 mm). La densidad de corriente en la punta propiamente dicha, normalmente no es mayor de 70 000 A/pulg<sup>2</sup> (110 A/mm<sup>2</sup>) para evitar el deterioro de la punta.

Como ejemplo de las condiciones de servicio que el electrodo y su punta deben reunir, consideremos la soldadura con un electrodo con punta de 12.7mm de diámetro, utilizando 10000A y una fuerza de compresión de 300 kg.

Densidad de corriente en la punta:

$$A/mm^2 = \frac{10000}{\pi(12.7)^2(1/4)} = 78.94$$

La presión en la punta:

$$kg/cm^2 = \frac{300}{\pi(12.7)^2(1/4)} = 2.3682$$

Teóricamente, la penetración de una soldadura por puntos sólo necesita ser de unas milésimas de centímetro para asegurar la unión de dos chapas. Sin embargo, los puntos de soldadura hechos con esta penetración mínima no son uniformes en diámetro ni en resistencias, por lo que se requiere normalmente una penetración mínima de un 20% del espesor de la chapa.

Algunas veces, cuando la presión es insuficiente, se producen mordeduras en la pieza, debido a la resistencia más elevada entre pieza y el electrodo.

En la siguiente tabla se dan las condiciones típicas para la práctica de la soldadura por puntos. Es posible una considerable desviación de estos valores, especialmente si las especificaciones no son demasiado rígidas.

TABLE I.1. SOLDADURA POR PUNTOS DE ALEACIONES DE ALUMINIO  
(Aluminum Company of Canada)

Espesor		Diámetro punta		Esfuerzo electrodo		Corriente	Corriente	Ciclos de soldeo			Diámetro zona fusión	
pulg.	mm	pulg.	mm	lb	kg	comienzo soldadura	soldadura	Ascenso	Soldeo	Descan.	pulg.	mm
0.020	0.50	5/8	16.0	350	160	12000	25000	2	3	12	0.12	3.0
0.032	0.82	5/8	16.0	500	225	14000	39000	3	4	15	0.16	4.0
0.040	1.02	5/8	16.0	600	270	14000	40000	4	5	15	0.18	4.5
0.064	1.62	5/8	16.0	750	340	15000	42000	6	6	16	0.25	6.3
0.081	2.00	7/8	22.4	860	390	15000	45000	7	10	20	0.30	7.6
0.102	2.50	7/8	22.4	1050	480	17000	60000	10	14	22	0.36	9.0

1/5

## SOLDADURA POR HAZ ELECTRONICO

Como los haces electrónicos de los equipos de soldadura se utilizan con kilovoltajes correspondientes a los rayos X, emiten radiaciones, debiendo el operario estar protegido de estas radiaciones por medio de un revestimiento de plomo colocado en la máquina. En la soldadora por haces electrónicos, como en los tubos de rayos X, la fuente de calor es un estrecho haz electrónico emitido desde el cátodo caliente de un cañón de electrones. El haz electrónico se enfoca por medio de un arrollamiento electromagnético. La pieza de trabajo constituye el ánodo, ya que el haz electrónico se utiliza para soldadura, perforación o corte. Para efectuar una soldadura continua, existen varias posibilidades: puede moverse la pieza de trabajo y permanecer fijo el haz electrónico, puede moverse el cañón electrónico y permanecer la pieza de trabajo en reposo, o puede desviarse el haz electrónico a fin de que siga el recorrido de soldadura deseado.

Si la soldadura por haz electrónico se realiza en una atmósfera gaseosa, la energía de los electrones del haz puede disiparse por choques con las moléculas gaseosas. Por lo tanto, excepto en algunos casos, todas las soldaduras con haz electrónico deben de realizarse en condiciones de vacío. Debido a que no existe ni protección gaseosa, ni material de aportación, ni electrodo, es virtualmente imposible que la pieza de trabajo resulte contaminada. Sin embargo, se requiere un alto vacío. Las presiones correspondientes a los vacíos utilizados son menores de tres millonésimas de atmósfera equivalentes a  $10^{-4}$  mm de columna de mercurio (1 atm es aproximadamente 760 mm de columna de mercurio). El tamaño de la cámara de vacío está naturalmente determinado por el tamaño de las piezas que deben ser soldadas.

La soldadura por haz electrónico es necesariamente un método de soldadura automático. Para preparar la pieza y la máquina para la soldadura, deberá sujetarse aquélla en una cámara de vacío, cerrarse la puerta de ésta y efectuarse el vacío de la misma hasta la presión deseada. El tiempo que se emplea en el bombeo no se puede utilizar para soldar. Por esta razón, se utilizan bombas de grandes capacidades, siendo los tiempos de bombeo alrededor de 10 min.

Desgraciadamente, un vacío industrial del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  mm de columna de mercurio requiere un sistema de bombeo complicado y caro.

La bomba de vacío se conecta hasta alcanzar un vacío correspondiente a 0.1 mm de columna de mercurio aproximadamente, después por medio de la segunda bomba (una bomba de difusión), se alcanza la presión correspondiente al vacío deseado.

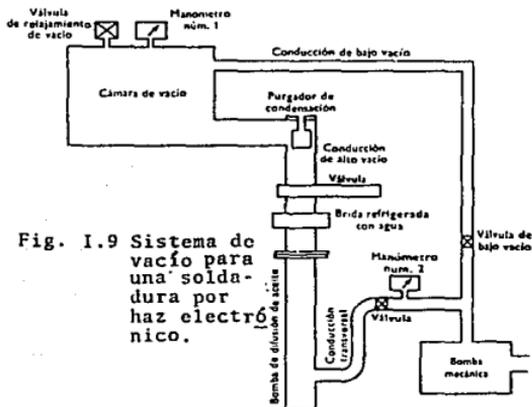


Fig. I.9 Sistema de vacío para una soldadura por haz electrónico.

La figura indica la constitución de una bomba de difusión de aceite. Este tipo de bomba se identifica por el codo de tubería que posee en uno de sus lados. La bomba dispone de una camisa refrigerada con agua y de un calentador en su base a fin de evaporar el aceite.

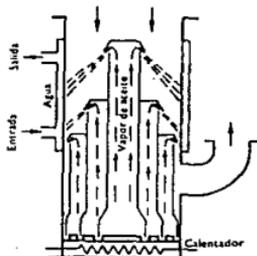


Fig. I.10 Bomba de vacío del tipo de difusión

El aceite evaporado sube por los tubos concéntricos y sale por los surtidores Venturi situados en la parte superior de dichos tubos a alta velocidad, arrastrando los gases de la tubería de vacío y empujándolos hacia el codo de descarga que conduce a la bomba mecánica. Esta última bomba finalmente bombea estos gases a la atmósfera. El aceite evaporado se condensa sobre la pared refrigerada con agua y vuelve a la base, completándose así el ciclo. La bomba de difusión se puede considerar por lo tanto, como un evaporador de aceite. Los chorros de vapor de aceite se pueden considerar como paraguas o diafragmas que separan las presiones más altas que existen debajo de ellos, de las más bajas que están por encima.

### SUJECIÓN DE LA PIEZA Y DESVÍO DEL HAZ ELECTRÓNICO

La pieza normalmente se sujeta a una mesa de trabajo que tiene dos motores de velocidad variables que desplazan la pieza en la dirección del eje X o en la dirección del eje Y. Para un movimiento rotativo, se utiliza una mesa giratoria con motor de velocidad variable.

El haz electrónico puede emplearse de tres modos diferentes que indicamos a continuación:

1. Un haz electrónico fijo para soldaduras continuas.
2. Un haz electrónico en impulsos para corte de cerámicos y corte de metales, utilizando frecuencias de 1 a 15 000 ciclos por segundo.
3. Impulsos aislados para soldadura por puntos o perforación de pequeños agujeros.

Por medio de los controles de desvío el haz electrónico puede efectuar soldaduras en línea recta, alrededor de un rectángulo o un circuito, en zig-zag o siguiendo cualquier otra curva. Algunos equipos de soldadura por haz electrónico utilizados en el trabajo de taller van provistos de pantógrafos y controles trazadores para poder realizar soldaduras y cortes de formas complejas.

### CARACTERÍSTICAS DEL HAZ ELECTRÓNICO

No existe ningún límite en cuanto al espesor del metal a soldar por haz electrónico. Una corriente de 10 mA con 150 000 V es suficiente

para soldar un acero inoxidable de 25mm de espesor con penetración completa.

Un electrón acelerado por 100 000 V alcanza finalmente una velocidad cuya magnitud es la mitad de la luz. El impacto a tales velocidades de los electrones funde y aun hace hervir el metal. La temperatura local es tan alta que permite soldar o cortar inclusive materiales cerámicos.

La corriente electrónica penetra a través de una capa delgada de material del orden de tres micras.

Cuando los electrones penetran más profundamente en el material, resultan dispersados o detenidos por los choques que tienen lugar con los átomos de la estructura cristalina, calentándose un volumen piriforme de la masa metálica. Parte del metal se vaporiza y la presión de vapor así generada rompe la membrana no afectada de la capa superficial.

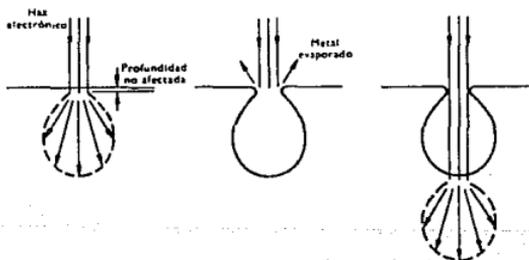


FIG.1.11. Penetración del haz electrónico en la pieza de trabajo.

Todo lo que se necesita para efectuar un corte es aumentar el voltaje. En principio, cualquier metal o material cerámico puede cortarse o perforarse por medio de un haz electrónico, inclusive el diamante.

Los voltajes empleados para producir haces electrónicos están comprendidos en el intervalo de 10 a 150 kv. El tamaño de las zonas puntuales de soldadura puede hacerse tan pequeño como de 0.25mm de diámetro o tan grande como de 2 mm.

En los equipos de soldadura que emplean haces electrónicos, excepto en los que emplean altos potenciales aceleradores, se cumple la siguiente relación:

$$I = KE^{3/2}$$

donde K = una constante y como

$$\text{potencia} = EI, P \text{ (watts)} = KE^{5/2}$$

Como ejemplo de un cálculo de densidad de potencia, consideremos un haz electrónico con 30 kV y 250 mA y una zona puntual de 0.60mm de sección.

$$\text{área puntual} = \frac{\pi}{4} (0.60)^2 = 0.282 \text{ mm}^2$$

$$\text{watts} = 30\,000 \times 0.250 = 7500$$

$$\text{densidad de potencia} = \frac{7500}{0.282} = 26\,595.7 \text{ W/mm}^2$$

Tales niveles de potencia resultan más que suficientes para evaporar metales.

Sciaky Bros Inc. fabricantes de equipo para soldadura por haces electrónicos, indican los siguientes suministros de calor comparativos para una soldadura a tope de aluminio 2219 de 12.7mm de espesor.

TABLA 1.2 Comparación entre TIG y EB

Proceso	Kilojulios/cm	Kilojulios/pulgada
TIG.....	22.50	57.25
EB.....	1.56	3.97

El método de soldadura por haces electrónicos se considera como un método ideal de soldadura. No hay ninguna duda de que es el mejor de todos aunque tiene también sus limitaciones. Se ha hecho referencia a las dificultades que presenta la soldadura de algunos metales volátiles como el cinc, el plomo, el aluminio y el magnesio. Tales metales se desprenden por ebullición de la zona de soldadura. No obstante, el aluminio y el magnesio resultan soldables por el método EB (electron beam) que equivale a haz electrónico.

La mayor desventaja del método EB reside en el costo del equipo: los equipos de soldadura por haz electrónico más pequeños cuestan 75 000 dólares y este precio no incluye una cámara de vacío muy grande.

Las distorsiones y las contracciones son mínimas en el método de soldadura EB. La zona de la soldadura y la zona afectada por el calor son muy pequeñas, de manera que sólo resulta afectada una zona de unas pocas milésimas de centímetro de espesor.

Las ventajas que supone la soldadura por haz electrónico parecen ser las siguientes:

1. Capacidad para soldar y cortar cualquier metal o material cerámico.
2. Ausencia de contaminaciones en la soldadura.
3. No hay metal de aportación.
4. No hay problemas de porosidad.
5. El calor que se desarrolla es bajo.
6. Los efectos de deformación y contracción son pequeños.
7. Notables penetraciones
8. Soldadura en una sola pasada.
9. La preparación del borde es sencilla.
10. Acceso del haz electrónico a zonas difíciles.
11. El método resulta adecuado para soldar secciones gruesas y en microsoldadura.
12. Altas velocidades de soldadura.
13. No son necesarios precalentamientos.

Las desventajas del método de haces electrónicos son éstas:

1. Se requiere un buen acabado.
2. Resulta difícil soldar metales volátiles.
3. No es un método adecuado para uniones que exigen un metal de aportación.
4. Se requieren condiciones de vacío.
5. Posibilidad de que el tiempo para efectuar la preparación y el vacío sea superior al tiempo de soldadura.

La soldadura por haces electrónicos es un método relativamente nuevo que está en pleno desarrollo. Cabe esperar que muchas soldaduras que ahora se hacen por otros métodos se efectuarán en el futuro por haces

electrónicos. La exigencia de soldadura de mejores calidades favorecerá la extensión de este método.

## SOLDADURAS BLANDAS Y FUERTES

Se caracterizan por el hecho de que los bordes del metal a unir, no se llevan al estado líquido. Los metales de aportación utilizados en estos procedimientos deben tener necesariamente una temperatura de fusión bastante inferior a la del metal a unir. Cuando la temperatura de fusión del metal de aportación es inferior a los 400°C (temperatura elegida arbitrariamente), se dice que la operación corresponde a una a una soldadura blanda. Este es el caso de las soldaduras del tipo estaño-plomo, cuya unión puede realizarse mediante el empleo de hierro de soldar, con llamas de baja temperatura. Se dice que la operación corresponde a una soldadura fuerte, cuando el punto de fusión de la aleación utilizada sobrepasa los 400°C, en cuyo caso se hace necesario el empleo de una llama de alta temperatura. Este es el caso de los latones especiales.

### SOLDADURAS BLANDAS

Las soldaduras blandas están constituidas por aleaciones estaño-plomo, para diferentes concentraciones de estos dos metales y, en particular, el eutéctico. Las principales aleaciones que se fabrican industrialmente corresponden a las siguientes composiciones:

TABLA I.3. Composiciones comerciales de la soldadura Sn-Pb

Estaño %	Plomo %	Temperatura de fusión(°C)	Designación
30	70	250	Soldadura de los plomeros
40	60	240	Soldadura de los galvanizadores.
45	55	230	Soldadura de los hojalateros.
63	37	182	Eutéctico
66	34	190	Soldadura blanda corriente
70	30	200	Soldadura alto estaño.

Así pues, la industria pone a disposición de los soldadores toda una serie de aleaciones cuyas temperaturas de fusión se escalonan entre los 180 y 250°C, según los trabajos a efectuar. Para los trabajos gruesos, se elegirá preferentemente entre las aleaciones de alta concentración en plomo (30/70-40/60); para los trabajos delicados deben elegirse aleaciones ricas en estaño (70/30).

A estas aleaciones binarias se añade a veces un 1 a un 3% de antimonio con el fin de aumentar la resistencia mecánica.

#### SOLDADURA BLANDA CON PLATA

Las soldaduras blandas con plata son, teóricamente, aleaciones binarias plata-cobre, la aleación más característica corresponde a la eutéctica, de composición: Ag = 72%, Cu = 28%, que funde a la temperatura de 775°C.

Prácticamente, las aleaciones binarias se utilizan poco, prefiriéndose las ternarias: Ag-Cu-Zn, e incluso a veces, las cuaternarias: Ag-Cu-Zn-Cd.

El cinc interviene para bajar el punto de fusión de la aleación, pero también disminuyen sus características mecánicas y su resistencia química con algunos ácidos. La adición de cadmio en las soldaduras blandas de gran contenido en cinc, aumenta su maleabilidad y ductilidad. Por el contrario, el estaño da lugar a aleaciones frágiles.

A continuación damos la composición de algunas soldaduras blandas, así como sus características de utilización.

Ag	Cu	Zn	Cd	Temperatura de fusión(°C)	Color	Utilización
5	-	-	95	645	blanco	Soldadura
10	52	38	-	800	amarillo	blanda de
20	45	35	-	765	amarillo	latón.
20	45	30	5	765	amarillo	

Ag	Cu	Zn	Cd	Temperatura de fusión (°C)	Color	Utilización
30	38	32		738	amarillo	Soldadura blanda
45	30	25		670	casi blanco	s.b. de cobre
50	15,5	16,5	18	620	--	s.b. de acero
50	34	16	-	687	--	Plata de segundo título
65	20	15	--	685	blanco	s.b. industrial
70	20	10	--	712	blanco	Plata primer título
80	16	4	--	768	blanco	título

TABLA I.4. Soldaduras blandas (binarias, ternarias y cuaternarias).

#### SOLDADURA FUERTE

El metal clásico de soldadura fuerte es un latón de dos fases, de composición próxima al latón de segundo título: Cu=60% Zn=40%, con adición de pequeñas cantidades de silicio.

El metal es amarillo, con una densidad de 8,3 y una temperatura de fusión próxima a los 880°C.

Las aplicaciones de la soldadura fuerte, se van desarrollando cada vez más en todas las modalidades de la construcción y reparación. Sus aplicaciones tienen interés tanto para los metales ferrosos (aceros y fundiciones) como para las aleaciones cuprosas. También se practica la soldadura fuerte del aluminio y sus aleaciones con una aleación aluminio-silicio (5 y 10% de Si).

Cualquiera que sea el metal de base, la fuente de calor utilizada es la llama oxiacetilénica.

#### HOLGURA ENTRE LAS PIEZAS PARA SOLDADURA FUERTE

Para realizar una unión resistente por soldadura fuerte, en la que la acción capilar sea efectiva, la holgura entre las partes a unir debe estar comprendida generalmente entre 0.0125 y 0.2mm.

La resistencia al cizallamiento de una pieza está influenciada por esta dimensión en la relación que muestra la figura siguiente. La máxima resistencia se obtiene con una holgura bastante

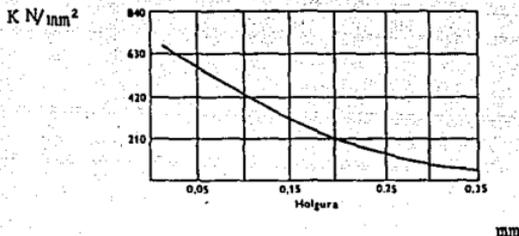


FIG. I.12.

*Relación típica entre la holgura y la resistencia al cizallamiento en  $\text{KN/mm}^2$  de las uniones por soldadura fuerte.*

pequeña. Dicha holgura debe ser tal que a las temperaturas de la soldadura fuerte permita cualquier expansión térmica. Generalmente, las holguras recomendables para aleaciones de aportación de cobre y plata son menores de 0,0125 mm. El cobre comercialmente puro para aportación es muy fluido y, por lo tanto, son posibles holguras muy estrechas con este material.

#### FUNDENTES

La misión normal del fundente es la de deshacer los óxidos superficiales y de formar una película protectora que evite la reoxidación de dicha superficie.

La mayor parte de los fundentes para soldadura fuerte se pueden agrupar en tres tipos: a) bórax y boratos, b) cloratos, c) fluoruros y fluoboratos.

Esta agrupación no comprende ciertos fundentes especiales, tales como el fundente de resina existente en el alma del hilo de estaño, tan comúnmente usado para la soldadura blanda de elementos electrónicos. El bórax es un fundente de uso general para soldaduras fuertes

a mayores temperaturas, pero no elimina los óxidos refractarios. Los boratos de sodio, potasio y litio se utilizan en los fundentes de punto de fusión de 60°C y superiores, y son buenos eliminadores de óxido. Para los óxidos difíciles, se utilizan fluoboratos, pero igual que la mayor parte de los fundentes fuertes son tóxicos y también atacan a los metales si no se eliminan. Generalmente es cierto que cualquier producto que pueda disolver óxidos refractarios, puede también atacar a los metales, si hay humedad. Los fundentes de cloro tales como cloruros de cinc y de amonio y, mejor aún, los fluoruros eliminan muy bien los óxidos refractarios.

TABLA I.5.

Fundentes requeridos para la soldadura fuerte de varios metales

Cobre, aleaciones de cobre (no incluido el bronce aluminio)	Acido bórico, borax, boratos fluoruros y fluoboratos
níquel, acero inoxidable, aceros aleados y al carbono, y fundición de hierro.	
Bronce aluminio	Cloruros, fluoruros
Aluminio, magnesio	Cloruros, fluoruros
Titanio, circonio	Cloruros, fluoruros.

Los fundentes se eliminan con agua caliente y cepillo de acero inoxidable, o bien por inmersión en tanques que contienen agua con fosfato trisódico u otros componente químicos.

La American Welding Society y la American Society for Testing and Materials tienen una designación comienza con una B(de brazing ), seguida de los símbolos de los componentes principales de la aleación. Los porcentajes no se hacen constar. Así, BCuP es un bronce para soldadura fuerte con fósforo, BNiCr es un níquel con cromo y BAg-1 es una de las numerosas aleaciones de plata; el 1 significa simplemente que esta aleación sería la primera de una lista. De las muchas aleaciones existentes para soldadura fuerte, solamente podemos mencionar aquí unas pocas. Algunas composiciones de éstas se indican en la tabla I.6.

TABLA I.6.

Clasificación AWS-ASTM: Metales de aportación para soldadora fuerte.

Símbolo	Porcentajes							Temperatura(°C)		
	Cu	P	Ag	Zn	Cr	Ni	Al	Otros	Sólidos	Líquidos
BCu...	99								1090	1090
BCuP-1	95		5						710	900
BCuP-3	89		5	6					650	815
BCuP-5	80		15	5					645	705
BCuZn-1	60			40.0					905	905
BNiCr-2					7	86		4 Si, 3B	960	1000
BAG-1a.	15.0		45	16.0				24 Cd	610	615
BAG-1b	15.5		50			16.5		18 Cd	625	635
BAG-2	26.0		35		21.0			18 Cd	610	700
BAG-3	15.5		50		15.5	3		16 Cd	630	690
BAG-4	30.0		40	28.0		2			660	780
BA1Si-1	4.0						95	5 Si	590	630
BA1Si-3	4.0						86	10 Si	520	585
BA1Si-4	4.0						88	12 Si	590	600

Los metales de aportación existen en el mercado en barras redondas o cuadradas para soldadura con soplete en bobinas de alambre, anillos, arandelas, panes, tiras, o preformas (formas planas especiales). En pequeñas cantidades, las soldaduras de plata se pueden comprar por gramos. En los EE.UU. se compran por onzas y puesto que la plata es un metal precioso, la onza corresponde al sistema troy, que pesa alrededor de un 10% más que la onza normal o del sistema avoirdupois.

## SOLDADURA OXIACETILENICA

### CUALIDADES DE LAS LLAMAS SOLDANTES.

Las llamas soldantes deben ofrecer un cierto número de cualidades intrínsecas y comparativas que dependen esencialmente del gas combustible utilizado.

Pueden clasificarse en cuatro grupos:

- a) Características térmicas
- b) Características químicas
- c) Características de aplicación industrial
- d) Características económicas

#### a) CARACTERISTICAS TERMICAS.

Las características fundamentales de las llamas destinadas a fundir localmente los metales, con el fin de soldarlos, son las propiedades térmicas.

En primer lugar, podemos enunciar que cuanto más alta es la temperatura de una llama soldante ésta es mejor y, por esta razón conveniente para la soldadura.

En efecto, esta temperatura debe sobrepasar con mucho la del punto de fusión del metal a causa de las pérdidas por conductibilidad, radiación y convección, que se traducen en un descenso considerable de la temperatura de utilización.

#### b) CARACTERISTICAS QUIMICAS DE UNA LLAMA.

En soldadura, es indispensable buscar una llama reductora; una llama oxidante o carburante conduce, salvo en casos particulares, a la realización de soldaduras con malas propiedades mecánicas.

La presencia, incluso de una pequeña cantidad de producto oxidantes  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  u  $\text{O}_2$ , disminuye rápidamente las propiedades reductoras de la llama.

### c) CARACTERISTICAS DE APLICACION INDUSTRIAL DE LA LLAMA.

Estas son las propiedades de rigidez, flexibilidad y regulación de la llama, muy importantes desde el punto de vista práctico pero que se descuidan, en la comparación de las llamas, debido a la dificultad de su evaluación.

La rigidez de la llama está en relación directa con la velocidad de combustión y depende al mismo tiempo y para un mismo gas, de la proporción y de la presión de los gases combustibles y comburentes.

Haciendo intervenir la velocidad de combustión, se ve que la llama oxiacetilénica es más rígida que las otras llamas propuestas para la soldadura.

La flexibilidad de la regulación depende de los límites de inflamabilidad de la mezcla gaseosa. Esta propiedad es particularmente notable para la llama oxiacetilénica porque ella suministra, por la reacción  $C_2H_2 + O_2$ , una llama esencialmente reductora indispensable para la soldadura en general. Por la variación de la concentración en oxígeno se realiza toda una gama de llamas oxidantes o carburantes apropiadas para la soldadura de ciertas aleaciones industriales: latones, aceros especiales, etc.

### d) CARACTERISTICAS ECONOMICAS

Las características económicas de las llamas son función:

- 1) De la velocidad de ejecución de la unión.
  - 2) Del poder de combustión, es decir la cantidad de oxígeno necesaria para su combustión primaria.
- 1) La velocidad de ejecución de las soldaduras es función de la temperatura de la llama. Hemos visto, por experiencias muy simples, que una pequeña variación de la temperatura puede originar una variación notable de la velocidad de avance de la soldadura.

2) El poder de combustión determina el precio de costo de la llama.

Haciendo abstracción del precio del combustible, el precio de la llama depende en particular de la cantidad de oxígeno que interviene en la reacción primaria.

- para la llama oxiacetilénica, el poder de combustión varía prácticamente de 1.1 a 1.3 vol. de oxígeno;
- para la llama oximetánica, de 1.6 a 2 volúmenes;
- para la llama oxipropánica, de 3 a 5 volúmenes;
- para la llama oxibutánica, de 4 a 6.5 volúmenes.

Esta exposición de conjunto de las características de las llamas soldantes nos muestra la importancia de la llama oxiacetilénica, prácticamente la única utilizada en soldadura y que vamos a estudiar con más detalle.

#### LA LLAMA OXIACETILÉNICA

La llama oxiacetilénica se obtiene haciendo llegar a un soplete, que asegura su mezcla íntima, los dos gases oxígeno y acetileno. La llama se produce en el extremo de la boquilla del soplete por la combustión teórica de un volumen de acetileno con un volumen de oxígeno (prácticamente 1.10 a 1.30, según la potencia del soplete), en estas condiciones se dice que la llama es "normal". Un primer examen de la llama "normal" muestra las tres zonas descritas a continuación:

Una zona brillante de forma cónica llamada dardo, bien delimitada cuando la llama está regulada.

Una zona azul, llamada zona reductora, con contornos menos definidos, que constituye la región de concentración de los gases resultantes de la reacción primaria.

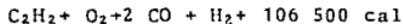
Por último una zona exterior rosada llamada penacho.

Un examen más completo de esta llama muestra que el cono azul o dardo, que constituye la parte útil de la llama, está formada por dos regiones (ver figura).



FIG. I.7 Detalle de la zona de combustión primaria de la llama oxiacetilénica.

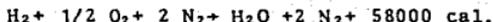
- Una primera región 1 donde llega la mezcla gaseosa  $C_2H_2 + O_2$  en la que la temperatura es inferior a la de inflamación de la mezcla, en esta zona no se origina reacción alguna.
- Una segunda capa 2, muy fina y brillante, envolviendo a la primera y que constituye la zona de combustión estacionaria, la cual es atravesada rapidísimamente por las moléculas gaseosas. Es, en la travesía de esta capa, donde se produce la reacción de la combustión primaria:



con una elevación brusca de la temperatura. La más alta temperatura tiene lugar a 3 ó 5 mm de la punta del dardo. Esta distancia varía un poco con la potencia del soplete. A continuación, la zona reductora, está formada únicamente por los dos productos de la reacción: CO y  $H_2$ .

En el penacho, la combustión de CO y  $H_2$ , se logra al contacto con

el aire exterior, dando lugar a las dos reacciones (combustión secundaria):



La temperatura máxima de la llama se define por la reacción correspondiente a la combustión primaria, que puede medirse o calcularse.

#### a) CARACTERISTICAS TERMICAS

Numerosos autores han hecho determinaciones de la temperatura de la llama oxiacetilénica por método óptico (inversión de rayas). Las últimas medidas, efectuadas con maravillosa precisión por HENNING y TINGWALDT, permiten fijar para la temperatura máxima de la llama el valor de  $3120^\circ\text{C}$ , aproximadamente a 5mm del extremo del dardo (soplete de 500 l/h de acetileno). Los valores de la temperatura, medidos en las diferentes regiones de la llama "normal" por los mismos experimentadores, se señalan en la figura siguiente.

El cálculo termodinámico de la temperatura de esta llama ha dado, para los distintos autores, los siguientes valores:

$2980^\circ\text{C}$  (RIBAUD-SEFERIAN)

$3030^\circ\text{C}$  (MONTAGNE- R. ZAER)

Por tanto se llega, por el cálculo, a una gran aproximación respecto a la temperatura medida.

Según vamos alejándonos del dardo hacia el penacho la temperatura baja rápidamente, como se observa en la figura. El cálculo revela igualmente una variación del mismo orden para las diferentes regiones de la llama.

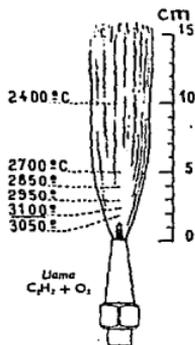


FIG. 1.8 Temperatura de combustión - en las diferentes zonas de la llama oxiacetilénica (según Henning y Tingwaldt).

## b) CARACTERISTICAS QUIMICAS.

La reacción del dardo o reacción primaria produce únicamente gases reductores CO y H<sub>2</sub> pues, a la temperatura de 3000°C, la molécula diatómica de hidrógeno H<sub>2</sub> se disocia en hidrógeno atómico H; es necesario tener en cuenta esta disociación en el cálculo de la temperatura. La presencia de hidrógeno atómico aumenta las propiedades reductoras de la llama.

Las proporciones (en volumen) de los diferentes componentes de la llama, para la temperatura máxima de 3100°C, se establecen de la siguiente forma:

$$\text{CO} = 61\% ; \text{H}_2 = 22\% ; \text{H} = 17\%$$

## c) CARACTERISTICAS DE APLICACION INDUSTRIAL

Siendo muy amplios los límites de inflamabilidad de las mezclas oxiacetilénicas (entre el 3 y el 90%) podemos obtener, haciendo varias las mezclas, llamas con exceso de acetileno o llamas carburantes  $\frac{\text{O}_2}{\text{C}_2\text{H}_2} < 1$ , y llamas con exceso de oxígeno o llamas oxidantes,  $\frac{\text{O}_2}{\text{C}_2\text{H}_2} > 1.30$  hasta 2.5 volúmenes de oxígeno.

Cuando la proporción de acetileno aumenta hay formación de carbono libre y la temperatura baja muy rápidamente.

Así para  $\frac{\text{O}_2}{\text{C}_2\text{H}_2} = 0.75$ , la temperatura es de 2920°C con residuos del 20% de carbono.

Cuando la proporción de oxígeno aumenta la temperatura aumenta primero hasta los 3110°C, para una proporción  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 = 1.50$ , después baja, pero lentamente y para  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 = 2.50$  la temperatura es de 3000°C, pero la concentración en oxígeno libre puede alcanzar el 21% y la proporción de los productos oxidantes CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> alcanza el 50%.

## METODOS DE EJECUCION DE LAS SOLDADURAS

Los distintos métodos de soldadura pueden clasificarse en cuatro grupos, con variantes que tienen aplicación en casos más particulares.

Primer grupo: Soldaduras "a izquierdas". Métodos derivados: soldadura "a izquierdas semi-ascendentes"; soldadura "semi-ascendente en dos pasadas".

Segundo grupo: Soldadura "a derechas"

Tercer grupo: Soldadura en ángulo, interior o exterior.

Cuarto grupo: Soldaduras "ascendente a doble cordón", que agrupan los métodos: Ascendente a doble cordón A; ascendente a doble cordón B y ascendente a doble cordón C.

Por último, clasificamos aparte otros dos métodos, que no pueden agruparse con los anteriores, éstos son: el de soldadura horizontal sobre chapa vertical, llamado corrientemente en cornisa, y la soldadura en techo.

Ventajas e inconvenientes de los métodos de soldadura oxiacetilénica

Métodos	Espesor mm	Ventajas	Inconvenientes
Clásico o a izquierdas	1 a 6	Facilidad de ejecución. Fácil penetración. Cordón de buen aspecto.	Precio de costo elevado. Socavamiento del metal fundido que disminuye la calidad de la unión.
A izquierdas semi-ascendente	3 a 10	Facilidad de ejecución. Evita el socavamiento del metal, excelentes calidades mecánicas.	Limitado a 10 mm. Disminución del buen aspecto al aumentar el espesor.
Semi-ascendente en dos pasadas	> 10	Penetración regular. Obtención de un espesor normal y buen aspecto de las soldaduras con calidad mecánica.	No conviene más que para grandes espesores. Poco económico.
A derechas o hacia atrás	6 a 15	Gran velocidad. Cordón más estrecho. Débil recalentamiento. Gran flexibilidad de ejecución. Menos metal de aportación. Buenas propiedades mecánicas.	No es aplicable más que a partir de los 6 mm de espesor.
Angulo interior		Unión de dos chapas formando diedro.	Falta de penetración. Poco económico.
Angulo exterior		No se necesita preparación de bordes. Gran velocidad de ejecución. Buena penetración y cordón liso.	Piezas que no deban soportar esfuerzos de flexión.
Ascendente A	2 a 10	Doble cordón en el anverso y reverso. Buen aspecto. Gran seguridad. Soldadura de elevadas calidades mecánicas. Construcción accesible sobre una sola cara.	Espesor limitado.
Ascendente B	6 a 12	Dos operarios en movimientos sincronizados. Buen aspecto. Soldadura de calidad y económica.	Accesibilidad por las dos caras. Entrenamiento de los operarios.
Ascendente C	13 a 30	Dos operarios. Soldadura de seguridad. Calidad y economía. Flexibilidad de ejecución.	Accesibilidad por ambas caras. Preparación cuidadosa de los bordes de la chapa. Entrenamiento de los operarios.

Métodos	Espesor mm	Ventajas	Inconvenientes
En cornisa		Potencia débil del soplete.	Dificultades de realización. Soldadu- ra de aspecto medio- cre. Bajas propieda- des mecánicas.
En techo		Soldadura "en posi- ción" en el taller.	Dificultad de rea- lización. Calidad y as- pecto mejores que la soldadura "en cornisa". Poco económica.

CAPITULO II  
DESCRIPCION DE LA PARTE  
EXPERIMENTAL

## SOLDABILIDAD DEL CINC Y SUS ALEACIONES

El cinc y sus aleaciones se caracterizan por su baja temperatura de fusión y por la facilidad de oxidación (temperatura de volatilización del cinc, 905°C). Esta última particularidad es la causa de las dificultades para la soldadura de estas aleaciones.

PROPIEDADES DEL CINC Y SUS ALEACIONES SOLDABLES. Las aleaciones corrientes del cinc soldables, se presentan bajo la forma de aleaciones binarias Zn-Al, Zn-Cu o aleaciones ternarias Zn-Al-Cu. La unión y reparación de las piezas en aleaciones de cinc puede realizarse actualmente por el procedimiento oxiacetilénico o por soldadura heterogénea; la soldadura eléctrica por arco debe excluirse. No obstante, puede soldarse por procedimientos eléctricos como los vistos en el capítulo anterior y particularmente por resistencia.

En la soldadura OXIACETILENICA se observa en el cinc una fuerte tendencia a la oxidación. El óxido de cinc ( $ZnO$ ) que se presenta bajo la forma de vapores blancos, molesta y dificulta la acción del operario, por lo que resulta indispensable el empleo de un flujo que tenga por misión disolver el óxido de cinc y prevenir la vaporización del metal por su elevado poder de mojado. El fundente más conocido está constituido por una mezcla de cloruro de cinc ( $ZnCl_2$ ) y cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) cuyas propiedades varían según la aleación utilizada.

Para las aleaciones que llevan aluminio, el fundente propuesto no resulta lo suficientemente activo y es preferible utilizar fundentes a base de cloruros alcalinos y cloruro de zinc.

La llama oxiacetilénica debe ser perfectamente neutra por lo que se recomienda un ligero exceso de acetileno.

La potencia del soplete es de 25 a 30 l de acetileno por milímetro de espesor a soldar. Hay que evitar una llama en exceso potente que favorecía la oxidación y, sobre todo, hay que procurar que no sea demasiado rígida, es decir, obtenida con elevadas presiones de gas.

El metal de aportación empleado debe ser de la misma naturaleza que la aleación y generalmente se extrae de la misma chapa.

## ESTUDIO ESTRUCTURAL

El diagrama de equilibrio de las aleaciones Zn-Al muestra como, después de la soldadura, se conservan en la zona fundida los 2 constituyentes ( $\alpha$  y  $\beta$ ), la fase  $\alpha$  en cristales claros y el fondo formado por el eutéctico (ver figura II.2.a).

Las aleaciones Zn-Cu (AZ 2) con 2% de Cu, son de una sola fase y, en la zona fundida, encontramos la fase única  $\alpha$  (ver figura II.2.b).

Hemos visto pues que, desde el punto de vista de la soldabilidad operatoria, el problema se resuelve fácilmente mediante el empleo de un fundente apropiado, según la naturaleza de la aleación utilizada. El tratamiento después de la soldadura, consiste en un recocido después de precalentar a 150°C. Esta operación afina el grano de la zona fundida y aumenta la resistencia mecánica de la soldadura.

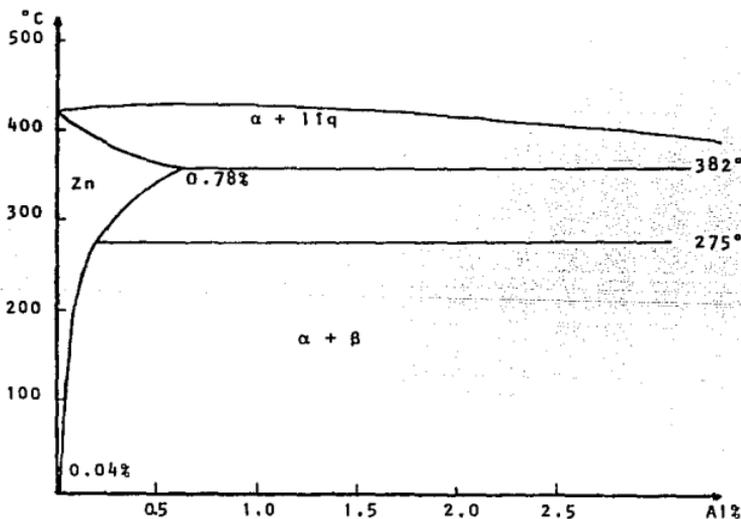
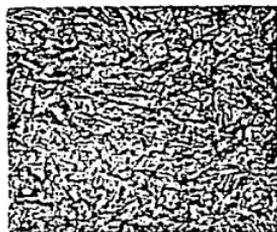


Fig. II.1 Diagrama de equilibrio del sistema Zn-Al en el dominio de baja concentración en Al.

(a)

Fig. II.2

(b)



x150. Aleación Zn-Al (Al=3% Cu=0.5%). Estructura de la zona fundida de una soldadura oxiacetilénica. Fondo del eutéctico y cristales claros  $\alpha$ .

x150. Aleación AZ 2 (Cu=2%, Al=0.1%). Estructura de la zona fundida de la soldadura oxiacetilénica.

Desde el punto de vista de la soldabilidad metalúrgica, para las aleaciones Al-Cu-Zn, hay que contar con una pérdida del 30% en las características mecánicas; pero un tratamiento después de la soldadura, mejora notablemente dichas características. Para las aleaciones Zn-Cu (AZ 2), la soldadura no origina una disminución notable de las propiedades mecánicas.

#### ASPECTO METALÚRGICO DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA

Si bien, en los procedimientos de unión por fusión, algunos factores permanecen sensiblemente constantes para un mismo espesor (potencia de la llama, velocidad de soldadura, intensidad de la corriente para un electrodo de diámetro dado), en la soldadura por resistencia, los parámetros pueden variar dentro de unos límites mucho más amplios.

Por otra parte, las máquinas de soldadura son susceptibles de realizar las secuencias más variadas, con precalentamiento y tratamientos térmicos después de la soldadura. Parece, por tanto, aventurado intentar la extrapolación de los resultados obtenidos para las mismas aleaciones en condiciones de soldadura tan diferentes.

Los cortes macrográficos obtenidos de un punto de soldadura según una sección media perpendicular a las chapas, se caracterizan, en primer lugar, por la forma general del punto que es una elipse más

o menos deformada. En el caso más simple de dos chapas, la lenteja presenta dos ejes de simetría; el eje mayor viene representado por la línea de contacto de las dos chapas; el menor, pasa por el eje de los electrodos perpendicularmente a la superficie de las chapas. Esta forma elíptica resulta de la distribución térmica del procedimiento de soldadura. En el plano de las chapas, las isotermas son círculos por razón de su simetría; en la sección de las chapas, la temperatura de fusión se alcanza en la región central del punto con un enfriamiento muy rápido, en función del espesor de las chapas a soldar.

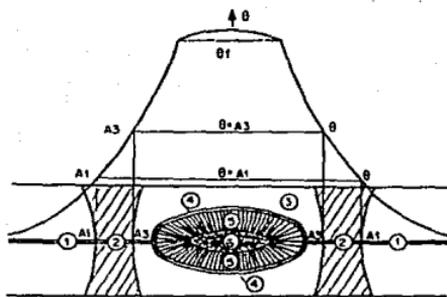


Fig. II.3 Representación esquemática de la distribución térmica y de las zonas de transformación en una soldadura por puntos.

La zona (1) (dentro del material de base) no está afectada por el ciclo térmico, en esta región el metal conserva su estructura inicial.

La zona (2) definida por los límites de temperatura de transformación  $A_1$  y  $A_3$  del material tiene una estructura granular y la perlita tiende a reagruparse.

La zona (3) o zona de recocido corresponde a las temperaturas superiores a  $A_1$  donde, la estructura tiende a afinarse y a recristalizarse.

La zona (4) que es el entorno a la zona de fusión y difusión presenta el aspecto de una banda delgada donde se presentan las reacciones quí

micas en el estado sólido, migración de átomos y segregación de elementos.

Por último, la zona de fusión y difusión comprende una primera capa exterior (5) que puede ser una cristalización orientada y una zona interna (6) en donde existe una cristalización axial.

El enorme gradiente de esta curva explica la forma lenticular del punto de la soldadura. Es evidente que la variación de los parámetros de soldadura influye sobre la forma del punto; una soldadura lenta, que necesita la aplicación de una corriente de soldadura prolongada, ensancha las isoterms y el perfil del punto es más extenso.

En el caso de las aleaciones ligeras así como en los ferrosos, observamos las diferentes zonas de transformación así como la capa muy fina de segregación que rodea al punto soldado; en una macrografía podríamos distinguir claramente las zonas de cristalización orientada y de cristalización axial.

Desde el punto de vista estructural, un tiempo pequeño de recocido del orden de un segundo, origina en la región central de la zona de fusión un bloque de cristalización grosera, bloque que se desarrolla a medida que aumenta dicho tiempo. Cuando este tiempo alcanza aproximadamente los 3 segundos, la región central del bloque experimenta una transformación que se traduce generalmente en una disminución del tamaño de los granos. Cuando el tiempo de recocido alcanza los 4 segundos, esta región se transforma a su vez y da origen a una estructura de metal parcialmente refundido; manteniendo dicho recocido durante 10 segundos, la estructura del metal refundido queda más definida y puede originar, en ciertos casos, la aparición de sopladuras. Para la región situada más allá del punto A<sub>1</sub> (ver figura 11.3) el efecto del recocido se traduce principalmente en una recrystalización que ya es clara para un recocido de un segundo.

Se han publicado numerosos trabajos relacionados con la calidad de los puntos soldados; estos estudios están orientados sobre todo, hacia los métodos de ensayo; la razón está en que en este procedimiento, es la soldabilidad operatoria la que predomina sobre las otras; soldabilidad metalúrgica y soldabilidad global.

## SECUENCIA DE ACTIVIDADES

De acuerdo al programa de trabajo, se investigó la bibliografía especializada que pudiera dar alguna información acerca de la soldadura en aleaciones de zinc. Se hizo una selección de los títulos de acuerdo con el contenido, facilidad para localizarlos, idioma en que están escritos, etc. Posteriormente con la información obtenida se decidió una secuencia experimental.

Se tenían 4 variables a controlar durante la investigación:  
ESTRUCTURA, TEMPERATURA, CARGA Y TIEMPO.

Respecto a la estructura, se obtendrían probetas directamente de fundición (dendritas), de granos ultrafinos y con estructura de material recocido. Se formarían grupos de probetas con dichas estructuras para que, con cada uno se hicieran soldaduras con diferente temperatura, presión y tiempo.

Posteriormente a esta etapa, se harían pruebas mecánicas de tracción controlando carga y velocidad de deformación. Finalmente, con el microscopio electrónico de barrido se analizarían las uniones de las probetas que hubiesen tenido un comportamiento interesante durante los ensayos mecánicos.

De todo lo anterior, se podrían concluir que condiciones de soldabilidad se debían establecer para soldar aleaciones de base zinc por este método.

Para realizar todo esto, se contó con el material y equipo siguientes:

**Para obtener las probetas:**

- Material de fundición (lingote de zinalco)
- Mufla
- Crisol
- Platina, campana y bomba de vacío
- Tubo de vidrio de 12mm de diámetro
- Torno para maquinar las probetas (9mm de diámetro, 35mm de longitud y caras refrentadas).

**Para efectuar las soldaduras:**

- Multímetro digital (1000 VCD, 750 VCA)
- Termocople que sirve como transductor de la señal de voltaje del termopar a la escala °F o °C.
- Termopar de cromel-alumel (-184 °C + 126 °C)
- Transformador variable (variac) de corriente alterna. (0-125 VCA)
- Celda calefactora (tubo de acero al carbón, con resistencia eléctrica de nicromel y recubrimiento de arcilla refractoria).
- Prensa hidráulica con manómetro para medir la carga (0 + 350 kg/cm<sup>2</sup>)
- Cronómetro.

**Para las pruebas mecánicas:**

- Máquina universal de ensayos dinámicos, marca Instron, Modelo 1331.

**Para finalizar las soldaduras:**

- Microscopio electrónico de barrido
- Máquina pulidora
- Máquina y disco de diamante (para cortar las probetas al tamaño que permite el microscopio de barrido).
- Dispositivo de limpieza de las probetas por ultrasonido
- Equipo de limpieza por vacío

A partir del material de fundición, se colaron 634 gramos en tubo de vidrio de 12mm de diámetro utilizando para ello una bomba de vacío, platina y campana. Se absorbió el metal fundido (directamente del crisol) con la bomba de vacío, a través del tubo de vidrio.

La campana de vacío sirvió para regular la presión de succión pudiéndose obtener lingotes de 25 a 35 cm de longitud, con los cuales, se maquinaron 42 probetas con las dimensiones y características antes mencionadas.

Una parte de estas probetas se dejó con estructura de fundición, otra se templó y a la otra se le dió un tratamiento de recocido. Con este material se programaron los ensayos que aparecen en la tabla II.1

Evento	Temperatura (°C)	Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	Estructura
I	100	200	30	de fundición
II	150	200	40	"
III	200	200	50	"
IV	250	200	60	"
V	300	200	60	"
VI	100	200	30	de recocido
VII	150	200	40	"
VIII	200	200	50	"
IX	250	150	60	"
X	300	100	60	"
XI	100	200	30	de temple
XII	150	200	40	"
XIII	200	200	60	"
XIV	250	250	60	"
XV	300	300	60	"

Tabla II.1 Programación de los ensayos de soldadura, utilizando un par de probetas en cada evento.

Dicha programación no terminó de realizarse debido a que los resultados de los primeros eventos indicaron que la forma de efectuarlos no fue adecuada, aunque se variaban los parámetros de temperatura, carga y tiempo en todos los casos el material fluía, bajaba la carga y no se adhería una probeta a la otra. Para aclarar, se menciona el detalle de una probeta que se cargó hasta  $200 \text{ kg/cm}^2$  y gradualmente, ésta bajó hasta  $28 \text{ kg/cm}^2$  manteniendo la temperatura constante en  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , aún más, cuando la temperatura se estableció en  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  la probeta se descargó totalmente.

Nuevamente, con el mismo procedimiento antes descrito, se obtuvieron 22 probetas más, se cambió la forma de experimentación, ahora se pretendía hacer una semiestructuración, esto es, al equipo que ya se ha mencionado se anexó un dado de acero al carbón con un orificio de 8mm de diámetro, por éste se harían pasar las probetas de 9mm de diámetro que se iban a unir, en lugar de evitar el flujo del material se buscaría formar un sólo perfil en el que, entre una probeta y otra se propiciara la difusión. La temperatura se mantendría constante en  $260 \text{ }^\circ\text{C}$  y al mismo tiempo se incrementaría también la carga.

Así pues, la extrucción se hizo con un vástago de acero al carbón para empujar a las probetas. Se esperaba (como se dijo anteriormente) que el material saliera del dado como un sólo perfil, soldada una probeta a la otra pero el resultado fue nuevamente no lo, las probetas no se unieron, ni siquiera se vió indicios de que se empezaran a soldar, esta situación hizo pensar en cambiar radicalmente la forma de efectuar los ensayos.

Se decidió utilizar una máquina punteadora (soldadura por resistencia) de potencia variable y las probetas tendrían una forma distinta. El material no sería un lingote, sino una lámina.

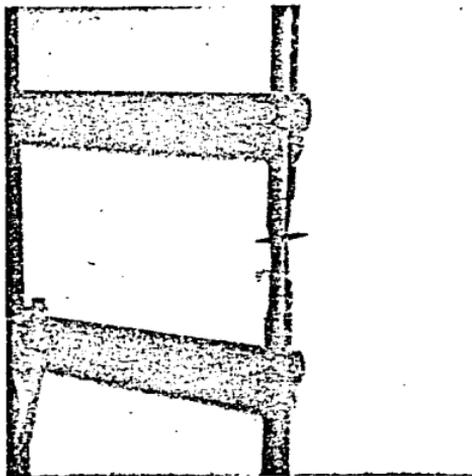


Fig. II.4. Máquina punteadora de potencia variable.

Efectivamente, se trabajó con material laminado directamente de fundición y cuyo espesor era de 2mm. Las proporciones de la aleación eran básicamente las mismas si acaso, algunas impurezas de níquel adquiridas en la laminación.

Se cortaron con una cizalla tiras de 8 cm de largo por 1 de ancho estas tiras se doblaron como se muestra en la figura II.3, se soldaron y posteriormente se sometieron a tracción.

La planeación de estos nuevos ensayos (de acuerdo al tiempo, estructura y potencia de la máquina soldadora) fue como sigue:

- 1) Se formarían 3 lotes de probetas, al 1º se les mantendría en 350°C durante media hora y se les dejaría enfriar lentamente hasta la temperatura ambiente.

Al 2º se le mantendría en 350°C durante media hora y se enfriaría rápidamente en agua.

Al 3º se le dejaría tal cual, con la estructura que haya quedado después de que fue laminado.

- 2) De cada lote se tomaría una muestra para soldarse en un intervalo de tiempo de 2 segundos (3 probetas soldadas en 2 segundos con diferente estructura).

Nuevamente, una muestra de cada lote se soldaría en 4 segundos, después en 6 y finalmente en 8. Para ésto, también se utilizarían diferentes potencias: 3, 6 y 9 kW.

En total: 3 diferentes estructuras por 4 diferentes tiempos por 3 diferentes potencias = 36 probetas soldadas.

- 3) Antes de meter el material a la mufla y de hacer las soldaduras, se cortaría y doblaría como se ve en la figura II.5. Una vez soldadas las probetas, se someterían a tracción.

Puede observarse la figura II.5 e inferir que, en el momento de cerrar las mordazas de la máquina, las laminillas de prueba se deforman y muchas de ellas se desueldan antes de aplicárseles carga.

Por esta causa, nuevamente se modificó el experimento, en realidad lo único que se modificó fue la forma de las probetas, se dejaron únicamente como tiras de material de 5 cm de largo por 1cm de ancho, tras lapándolas para soldarlas (ver figura II.6).

Al igual que con las probetas anteriores, con estas se tuvieron lotes de material recocido y enfriado lentamente, recocido y templado y de laminación. La variante en esta nueva forma de las probetas fue la de limpiar algunas de ellas antes de soldarlas.

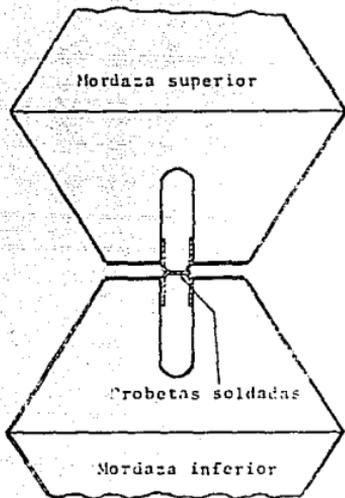


Fig. 11.5 Montaje de las probetas en U para el ensayo de tracción.

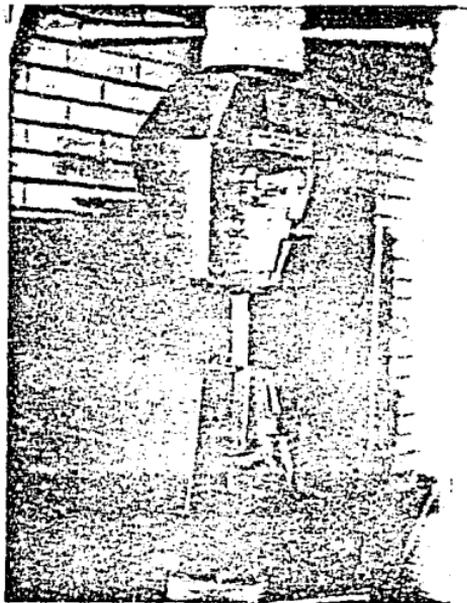


Fig. 11.6 Forma definitiva de las probetas usadas en la investigación y su montaje en la máquina de pruebas dinámicas.

La tabla II.2. muestra la secuencia en que se fueron efectuando las soldaduras (no todas aparecen en el listado porque se perforó la lámina o se despegaban con facilidad).

Tabla II.2. Secuencia experimental de soldaduras, variando estructura, potencia de la máquina y tiempo de permanencia entre electrodos.

MUESTRAS (No.)	TRATAMIENTO	POTENCIA SOLDADURA (kW)	TIEMPO (s)
1	Recocido y templado	9	2
2	"	9	2
3	"	9	4
4	"	9	6
5	"	6	8
6	"	6	6
7	"	6	4
8	"	6	2
9	"	3	8
10	"	3	6
11	"	3	4
12	Recocido y enfria- miento lento	9	2
13	"	9	4
14	"	9	6
15	"	3	8
16	"	3	2
17	"	3	4
18	"	3	6
19	"	3	8
20	"	6	2
21	"	6	4

MUESTRAS (No.)	TRATAMIENTO	POTENCIA SOLDADURA (kW)	TIEMPO (s)
22	Recocido y enfriamiento lento	6	6
23	De Laminación	9	6
24	"	9	4
25	"	9	2
26	"	9	4
27	"	6	2
28	"	6	4
29	"	6	6
30	"	3	2
31	"	3	4

Las probetas que se limpiaron previamente a la soldadura, fueron: 1, 16, 26 y 28. En algunos casos no se unían las probetas cuando éstas se encontraban limpias y había que volver a soldar dejando más tiempo a las láminas entre los electrodos de la punteadora, ésto originaba chisporroteo, cuarteaduras y hasta perforación del material así que, se hicieron ensayos con un tiempo breve de permanencia entre electrodos.

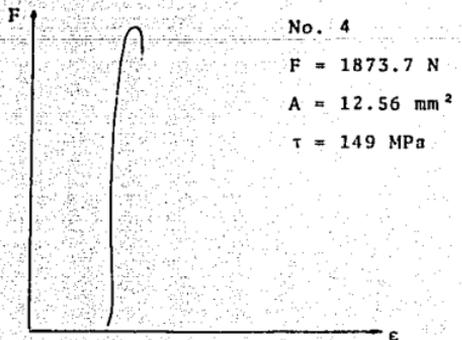
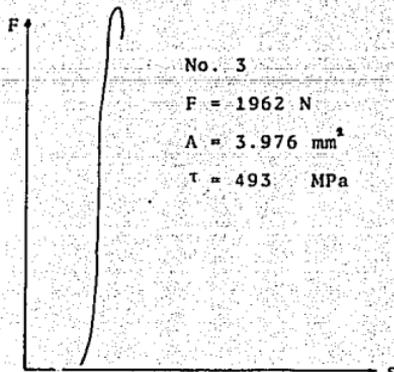
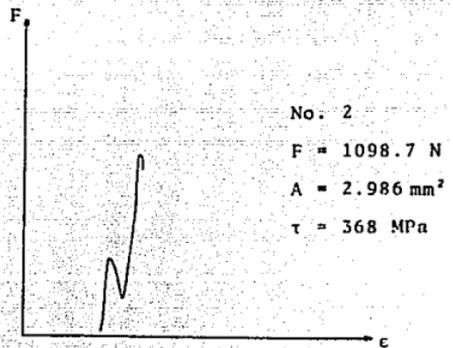
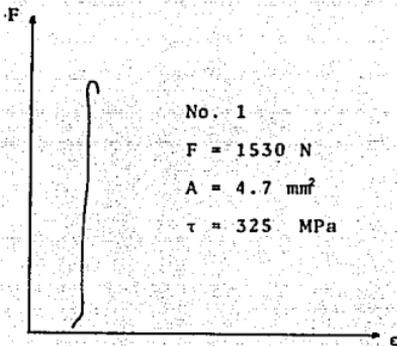
El siguiente paso fueron los ensayos de tracción, se colocaron las laminillas soldadas como se ve en la fig. II. se sujetaron firmemente con las mordazas, se tiró de ellas verticalmente y se cuidó que la velocidad de deformación fuera constante.

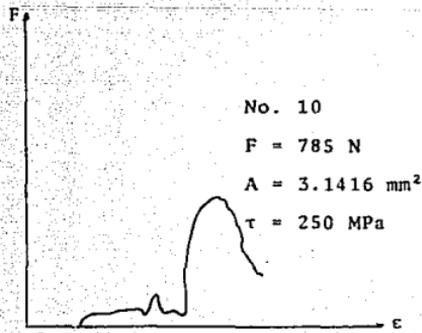
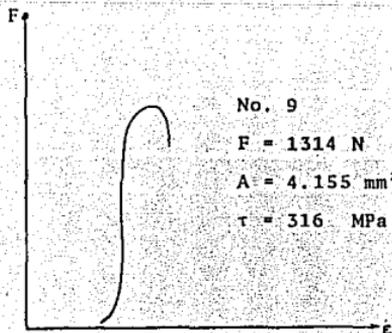
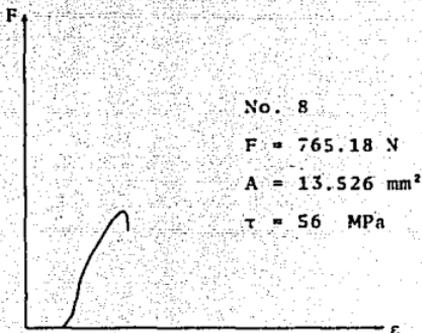
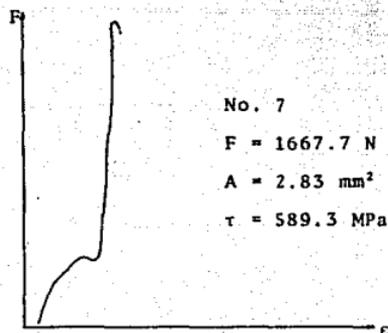
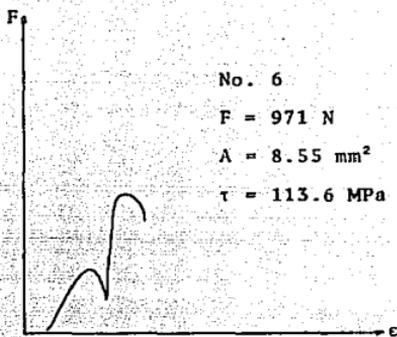
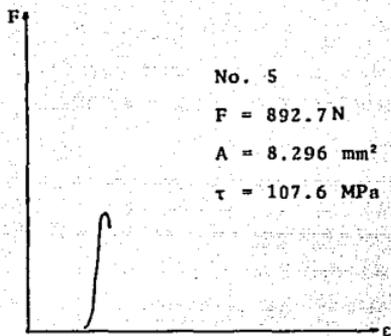
La máquina de ensayos dinámicos no registra directamente el esfuerzo empleado, sólo la magnitud de la fuerza así que, una vez, terminado cada ensayo, se efectuaron varias mediciones (con vernier) del diámetro del punto de soldadura y se obtuvo un promedio. Con éste y la

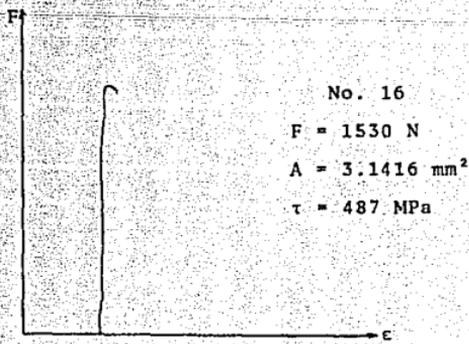
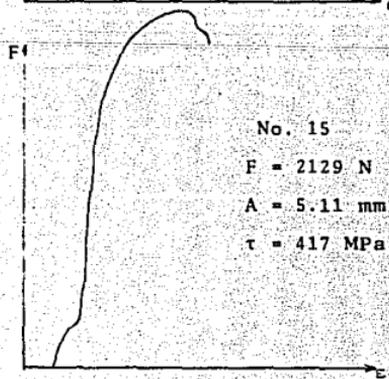
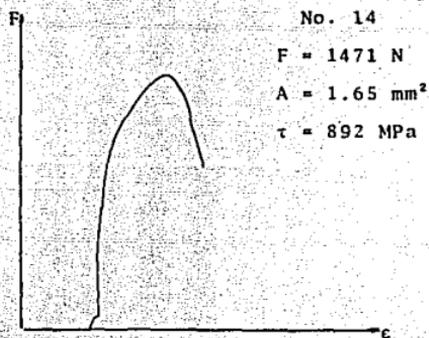
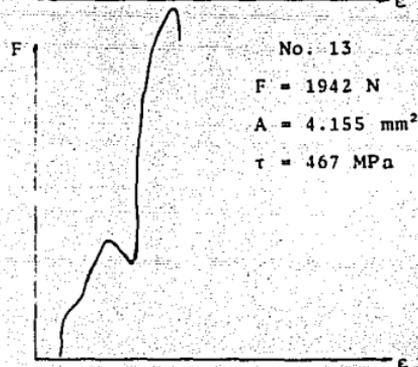
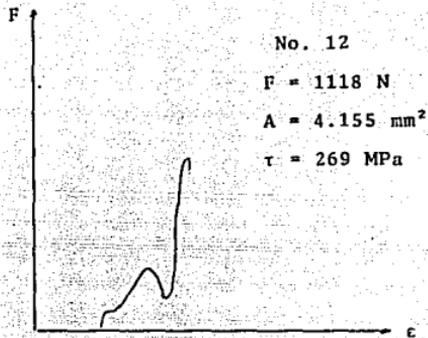
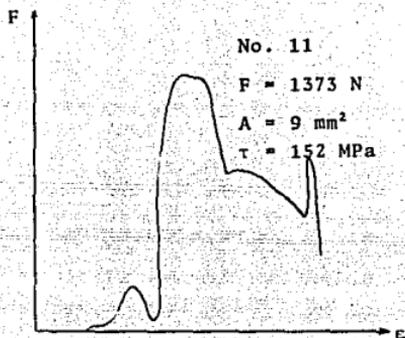
fuerza máxima registrada por la máquina, se calculó el esfuerzo cortante de ruptura en cada una de las muestras.

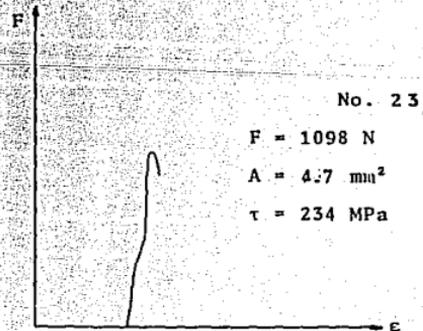
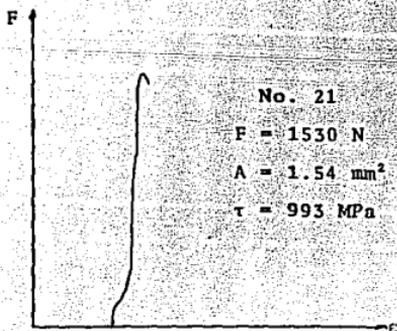
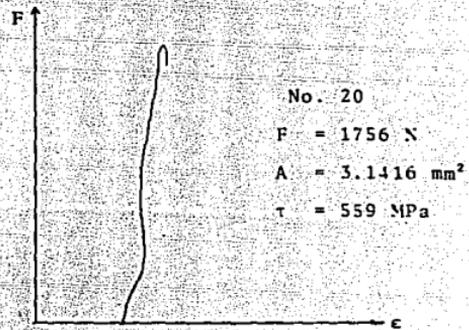
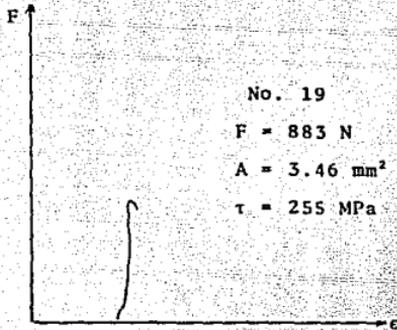
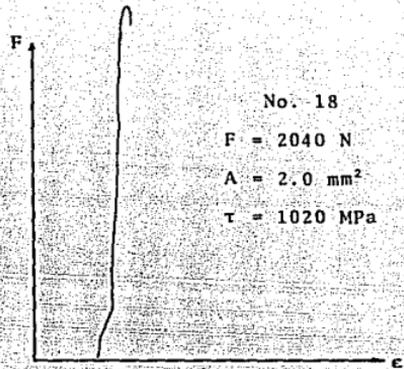
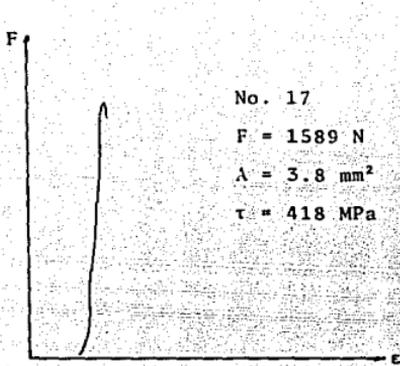
Las siguientes gráficas (obtenidas de la instron) muestran la magnitud de la fuerza de ruptura y la deformación que se originó por la tracción.

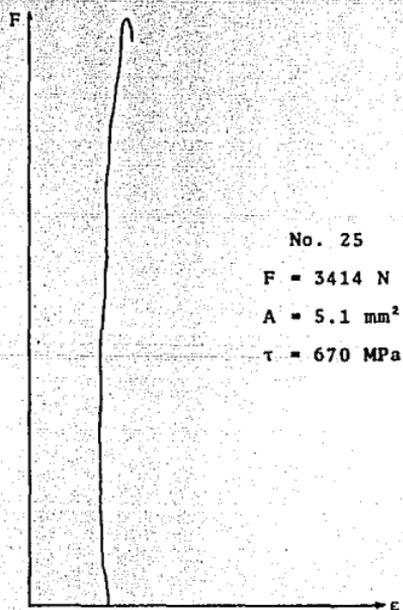
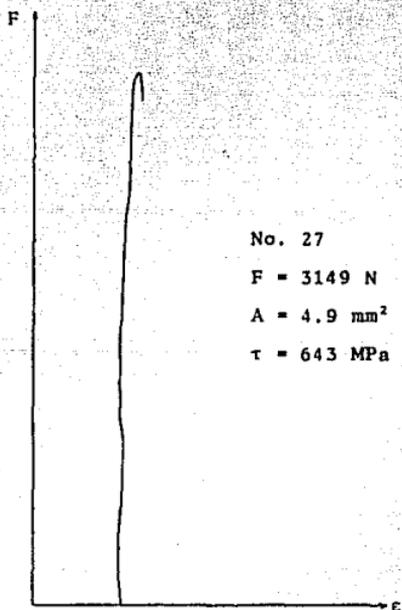
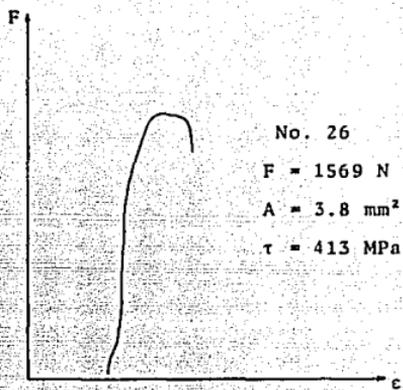
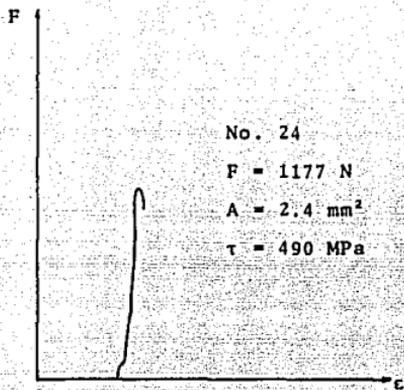
Ahí mismo se da el área y el esfuerzo calculados a partir de las mediciones de los diámetros.











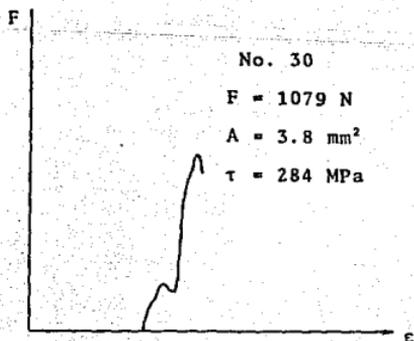
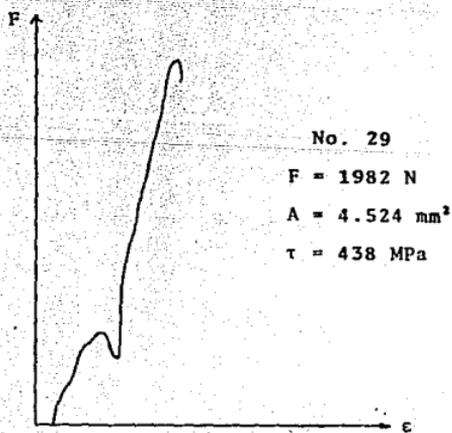
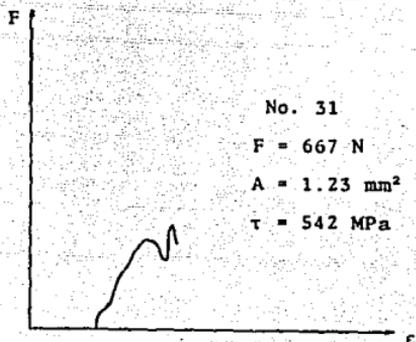
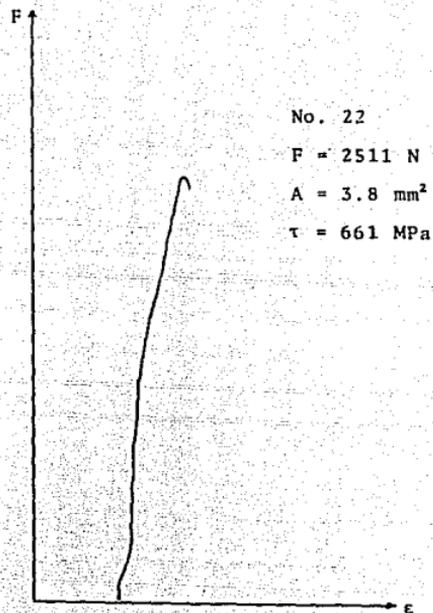
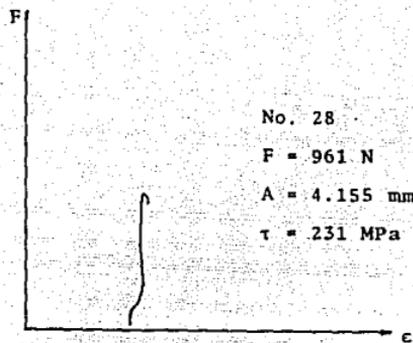


Tabla II.3. Resumen de los ensayos de tracción.

Muestra No.	diámetro del punto de soldadura (mm)	área del punto de soldadura (mm <sup>2</sup> )	carga aplicada a la muestra (N)	esfuerzo máximo aplicado a la muestra (MPa)
<b>Muestras recocidas y templadas</b>				
1	2.45	4.7	1530	325
2	1.95	2.98	1098	363
3	2.25	3.97	1962	493
4	4.0	12.56	1873	149
5	3.3	8.55	971	113
6	3.25	8.3	892	107
7	1.9	2.83	1667	589
8	4.15	13.52	765	56
9	2.3	4.15	1314	316
10	2.0	3.1416	785	249
11	3.4	9.0	1373	152
<b>Muestras recocidas y enfriadas lentamente</b>				
12	2.3	4.155	1118	269
13	2.3	4.155	1942	467
14	1.45	1.65	1471	892
15	2.55	5.11	2129	417
16	2.0	3.1416	1530	487
17	2.2	3.8	1589	418
18	1.6	2.0	2040	1020
19	2.1	3.46	883	255
20	2.0	3.1416	1756	560
21	1.4	1.54	1530	994
22	2.2	3.8	2511	661

muestra No.	diámetro del punto de soldadura (mm)	área del punto de soldadura (mm <sup>2</sup> )	carga aplicada a la muestra (N)	esfuerzo máximo aplicado a la muestra (MPa)
-------------	--------------------------------------	--	---------------------------------	---

## MUESTRAS LAMINADAS

23	2.45	4.7	1098	234
24	1.75	2.4	1177	490
25	2.55	5.1	3414	670
26	2.2	3.8	1569	413
27	2.5	4.9	3149	643
28	2.3	4.155	961	231
29	2.4	4.524	1982	438
30	2.2	3.8	1079	284
31	1.25	1.23	667	542

Respecto a los ensayos metalográficos, había que observar la microestructura del material en los siguientes casos:

1. Del material laminado (forma o estructura original, sin tratamiento térmico).
2. Del material después de los tratamientos térmicos (antes de la soldadura).
3. De los tres lotes (laminado, templado y recocido) después de la soldadura.
4. De los mismos lotes después de la tracción.
5. De las probetas soldadas, un corte en el punto de unión para observar los cambios de estructuras en las diferentes zonas del material.

En todos los casos se cortaron muestras de 2.5 x 10mm aproximadamente para poder utilizar el microscopio electrónico de barrido, no obstante, algunas muestras tuvieron que ser fotografiadas en el microscopio óptico.

Después de cortar el material con un disco muy delgado y filo de diamante, las muestras se prepararon para observarse al microscopio (desbaste con lijas

de carburo de silicio y acabado a espejo con paño, alúmina y alcohol).

Antes de observar al microscopio óptico, las muestras se atacaron con nital al 5% durante 1 minuto.

En el electrónico de barrido, se utilizó (en una ocasión) un ataque electrofítico con ácido clorhídrico y alcohol al 4% durante 1 minuto, manteniéndose una diferencia de potencial entre electrodos de 5 VCD.

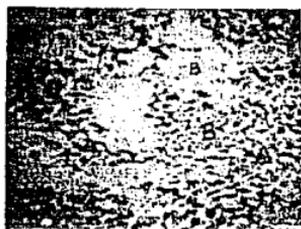
En las demás de las veces no se usó ataque alguno, simplemente se limpiaban con alcohol después de haberse pulido y así se observaban.

En realidad no hubo una diferencia notable (como se puede comparar) entre uno y otro procedimiento. Las fotografías II.10, II.11, II.12, II.13, III.2, III.5 y III.6 fueron tomadas después del ataque electrofítico y, las fotografías II.7. a), II.8 a), II.9.a), y III.7 se tomaron sin ataque químico previo.

Al usar el microscopio óptico, las muestras fueron atacadas con nital en diferentes concentraciones y en distintos intervalos de tiempo. La combinación que dió mejores resultados fue: 5% de ácido nítrico en alcohol metílico (en volumen) y aplicada durante 1 minuto.

A continuación se presentan las microestructuras de los 3 lotes de material antes de someterlo al proceso de soldadura.

En cada caso se presentan las fotografías tomadas con microscopio electrónico de barrido (MEB) y las que se tomaron con microscopio óptico (MO).



(a)



(b)

Fig. II.7. Microestructura del material laminado, se aprecian granos finos (A) y adicionalmente zonas laminares o perlíticas (B).

a) 3500X MEB

b) 1000X MO



(a)

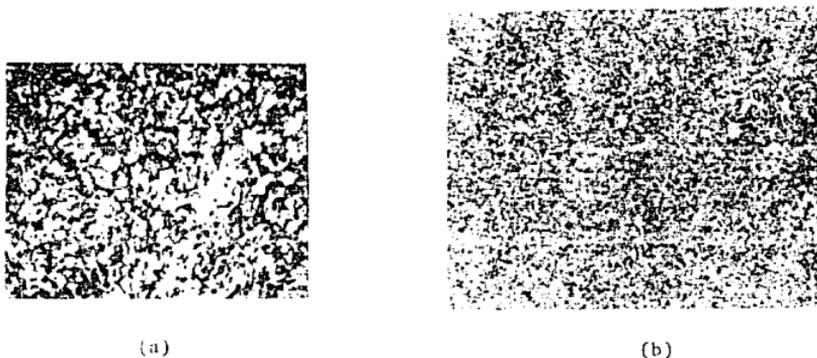


(b)

Fig. II.8. Microestructura del material que ha sido recocido y enfriado lentamente, se puede observar una distribución muy homogénea de la perlita en todo el campo.

a) 3500 X MEB

b) 1000X MO



(a)

(b)

Fig. II.9. Microestructura del material recocido y enfriado rápidamente (templado en agua).

También se aprecia una distribución muy homogénea de granos finos en todo el campo.

a) 2000 X MEB

b) 800 X MEB

Las siguientes fotografías (II.10, II.11, II.12 y II.13) corresponden a probetas soldadas bajo diferentes condiciones que se mencionan al pie de cada una. Estas muestras no fueron sometidas a ensayos de tracción para observar la adherencia entre las superficies de las chapas y comentar en cada caso, el cambio de estructura, la difusión y las porosidades provocadas.

Se han marcado en cada una de las 4 fotografías mencionadas 3 zonas de interés:

- A.-Chapa superior o a la izquierda de la zona de unión.
- B.-Chapa inferior o a la derecha de la zona de unión.
- C.-Zona de unión, donde se juntan las 2 chapas y se espera que exista una difusión y fusión combinadas.

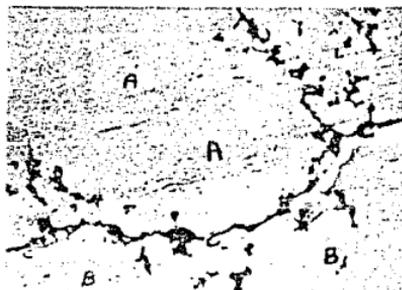


Fig. II.10 Muestra sin tratamiento térmico, soldada con una potencia de 6 kW durante 4 segundos. Se limpió previamente la zona de unión. 450X MEB



Fig. II.11. Muestra recocida y enfriada lentamente, soldada con una potencia de 6 kW durante 6 segundos. No hubo limpieza previa en la zona de unión. 1000X MEB.



Fig. II.12. Muestra recocida y templada, soldada con una potencia de 6 kW durante 6 segundos. No hubo limpieza previa en la zona de unión.

360 X MEB



Fig. II.13. Muestra sin tratamiento térmico, fue soldada con una potencia de 6 kW durante 4 segundos. No hubo limpieza previa en la zona de unión.

360X MEB

Las cuatro fotografías anteriores (II.10, II.11, II.12 y II.13) tienen señaladas 3 zonas de interés y que son motivo de los siguientes comentarios:

- La figura II.10 muestra una separación entre las piezas a unir (A y B), existe un agrietamiento del material que se difunde por los límites de grano y los bordes de la zona de unión (C), muestra una coloración blanquesina diferente al color del resto de la matriz.  
Se puede decir que no se ha logrado la difusión esperada.

- La fig. II.11, muestra diferentes estructuras. Las chapas A y B tienen estructuras diferentes a C, en esta última zona al parecer se ha dado el crecimiento de dendritas mientras que en los bordes de A y B respectivamente aparecen granos gruesos orientados según la presión de los electrodos, también se ve la formación de laminillas que es la estructura del eutectoide o cercana a esa composición.

- En la figura II.12 se distingue cierta simetría a los lados de C, hay puntos y gránulos oscuros que pueden ser hoquedades o bien, una solución rica en aluminio, cinc o cobre, ocasionada por la migración de átomos de cualesquiera de los elementos antes mencionados.

- Por último, la figura II.13 muestra a simple vista una unión formidable, se distingue la zona de unión C pero se puede decir que existe continuidad en todo el campo.

No puede afirmarse, debido a los pocos aumentos, si existió predominantemente la difusión sobre la fusión o viceversa, sin embargo, se puede observar que C casi se confunde con A y B en algunos puntos.

- Aunque corresponde al siguiente capítulo exponer las conclusiones, este espacio es apropiado para distinguir las diferencias entre el material limpio antes de soldarse (fig. II.10) y el material soldado son óxidos y suciedad entre chapas. (fig. II.13).

Como se ha mencionado, en el siguiente capítulo se hacen comentarios un poco más de fondo respecto a las diferentes estructuras del material y se enlazan o relacionan con las condiciones de soldabilidad y con el comportamiento mecánico de las mismas.

Corresponde también a este último capítulo, plantear las conclusiones más relevantes de la investigación y por supuesto, algunas de éstas no deben ser tomadas como aseveraciones tajantes e inflexibles. Se formulan hipótesis de los fenómenos que han ocurrido a nivel microscópico y se hacen especulaciones de los mismos, aunque siempre fundamentados y apoyos en los resultados objetivos de los ensayos experimentales.

**CAPITULO III****OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES GENERALES**

## OBSERVACIONES METALOGRAFICAS

Desde el inicio de este trabajo se ha comentado que el material en estudio es una aleación de base Cinc (o zinc) pero, no se han mencionado más detalles de su composición.

Al observar bajo el microscopio las diferentes muestras, se puede intuir cual es su composición porque presenta una microestructura en forma laminar.

Este material es una aleación formado por cinc, aluminio y cobre y que, por tener tan bajo contenido de cobre el diagrama de equilibrio que se utiliza para su análisis es el siguiente :

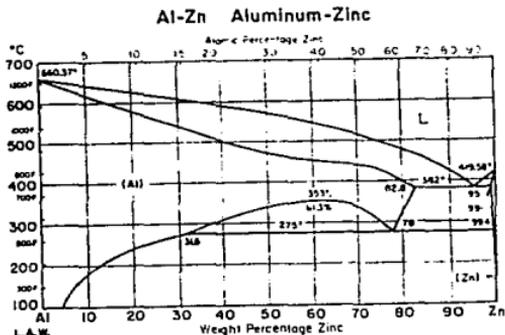
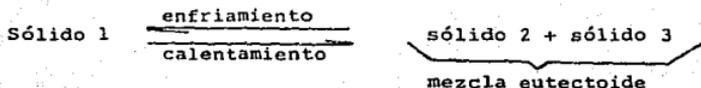


Fig. III.1 Diagrama de la aleación binaria  
Cinc - aluminio ( Zn - Al )

En la figura III.1 se puede apreciar la composición eutéctica de que, será aproximadamente de 78% de cinc y 22% de aluminio en masa (también llamado porcentaje en peso) y de 60% Zn, 40% Al en cantidad de sustancia (porcentaje atómico).

Una aleación de composición eutectoide solidifica en una mezcla muy fina de 2 fases, muy semejante a la reacción eutéctica -- pero no incluye al líquido. Una fase sólida se transforma en 2 - fases sólidas nuevas :



Efectivamente, el material en estudio tiene una composición -- muy cercana a la eutectoide: 78% Zn, 17% Al, 5% Cu en peso.

Es conveniente mencionar que al estudiarse las microestructuras y las propiedades mecánicas de las aleaciones Zn - Al se han encontrado estructuras perlíticas en composiciones que van desde 60.1 hasta 84% de Zn en peso.

En estos casos, la perlita es más fina cuando la aleación es en--friada en aire o en agua con hielo que cuando se enfría lentamente, además de que cuando el descenso de temperatura es rápido, -- adicionalmente a la región laminar, la estructura presenta granos finos similarmente a la estructura de fundición en la composición eutectoide.

En el caso que nos ocupa, se pudo observar en el microscopio y en las fotografías que se presentan a continuación, una trans--formación de fases al soldarse el material que dependían de la es--tructura anterior a la soldadura.

En la fotografía III.2 pueden apreciarse con claridad varias estructuras: la primera (B) cercana a la unión presenta granos -- de una fase proeutectoide (seguramente de una solución sólida rica en Zn) rodeadas de otra fase y de la composición eutectoide. -- La segunda (C) es la típica perlita laminar de la composición -- eutectoide.

También, aunque no muy abundante, se pueden ver nódulos en color -

oscuro (D) que posiblemente sean aluminio. Por último, en la zona - E las laminillas se van haciendo más finas para formar una solución homogénea (en color gris). La zona marcada con la letra (A) es la - de la unión de las probetas.



Fig. III.2 Microestructuras cercanas a la zona soldada  
1000X MEB.

La muestra fue recocida y enfriada lentamente antes de soldarse. Se empleó una potencia de 9 kW durante 6 segundos. Las chapas no fueron limpiadas antes de soldarse.

De acuerdo a la referencia No. 5 y a los resultados de los ensayos de tracción, la estructura laminar tiene una resistencia mecánica superior a la que presenta granos finos (estructura de temple).

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Regresando a la discusión de las estructuras formadas al margen de la zona de unión, se sabe que si existe un recocido en la zona de la unión, se origina un bloque de recristalización gruesa, bloque que se desarrolla a medida que aumenta el tiempo de -- recocido.

En este caso, no se puede hablar de una recristalización porque se observa que existe difusión y los cristales nuevos, no son de la misma composición que los anteriores, así pues, aunque la zona B es de granos gruesos, éstos tienen una composición distinta a la del resto de la aleación.

Respecto a la aparición de la estructura perlítica gruesa -- (zona C), posiblemente se ha originado por la migración del cinc de la zona C a la B y de la D a la C respectivamente. Esto también ha originado que en D haya quedado una fase rica en aluminio y en donde ya no hubo movimiento de átomos como en C, -- debido a que su temperatura fué menor, es decir, no se reunieron -- las características para darse la difusión.

Finalmente, la zona más alejada (E) es aquella que menos ha tenido influencia por los cambios de temperatura, persistiendo entonces una estructura laminar mucho más fina y más homogénea (característica del recocido original).

Las fotografías III.5 y III.6 muestran el material soldado -- desde otro punto de vista, en este caso la probeta fotografiada -- fué sometida al ensayo de tracción y por lo tanto fue separada -- de su pareja.

El plano de la fotografía es paralelo al de la probeta (fig. III.3) mientras que en la fig. III.2 el plano de la fotografía es perpendicular al punto soldado, es decir, es una sección transversal del punto de unión (fig. III.4).

Es esta fotografía (fig. III.5) se ve una estructura nodular (oscura) y una matriz de color blanco que seguramente es cinc. - Si se observa para comprar la fig. II.7, podemos ver que se han transformado los pequeños granos (A) del material laminado, en laminillas muy finas, y las laminillas más gruesas (B) se han -- afinado también.

El material a sufrido una recristalización parcial al haberse -- recocido en un intervalo de tiempo muy breve.

En éstas condiciones, se infiere que de los 2 mecanismos que se han considerado (fusión y difusión) en este tipo de soldadura, el que ha predominado es el de fusión.

Las porosidades que muestran las fotografías III.5 y III.6 indican que se alcanzaron temperaturas suficientemente altas para -- fundir el material; por este motivo la resistencia de la soldadura no fué tan grande como se hubiese deseado.



Fig. III.3 plano paralelo al punto soldado y al de las probetas



Fig. III.4 sección transversal o plano perpendicular al punto soldado.

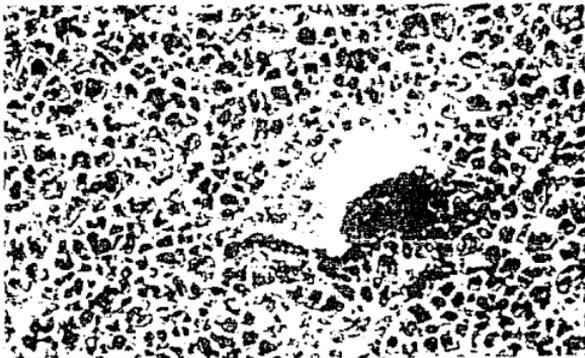


Fig. III.5 Probeta con estructura original de laminación. Soldada con una potencia de 9 kW en un tiempo de 2 segundos. 800X MEB.

La figura III.5 presenta fases diferentes a las mostradas en la figura III.2. En ésta última, aparecen porosidades y una estructura nodular en donde, al juzgar por lo presentado en la fig. III.6, los nódulos son solonias de perlita laminar embebidas en una fase - matricial rica en Zn (color blanco).



Fig. III.6 Es la misma muestra que la de la fig. III.5, sólo que con un mayor número de aumentos. 1000X MEB.

En el tercer grupo de probetas (recocido y enfriamiento rápido, temple) se encontraron granos muy finos antes y después de soldarse, las fotografías III.7 y III.8 son de material soldado, tomadas exactamente en el punto de unión en un plano paralelo a dicho punto (de acuerdo con la fig. III.3).

Al comparar III.7 y III.8 con II.9 a) y b) se puede ver que no ha variado la estructura, quizá algunos granos crecieron después de la soldadura pero básicamente persiste la misma estructura.

En este lote, aunque no aparece en estas fotografías, también hubo prosidades, lo que demuestra que también se llegó a temperaturas superiores a la de fusión y en los 2 casos (material templado y material laminado) el mecanismo de soldabilidad que predominó fue el de fusión.

Como consecuencia de esta situación la resistencia mecánica de ambos lotes fué parecida, no así la estructura laminar donde se vió una clara difusión en los bordes de la zona de unión.



Fig. III.7 Microestructura del material soldado. La estructura original fue también de granos finos (temple) 2000X MEB



Fig. III.8 Estructura del punto de soldadura del material con estructura original de (temple) 800X MO

## COMPORTAMIENTO MECANICO

Se sabe que las características mecánicas de un material son producto de una serie de factores como son : el tipo de enlace, la estructura cristalina, los mecanismos de deformación que se desarrollen en el mismo, etc.

Al hablar de las propiedades mecánicas en las aleaciones Zn-Al, la mayoría de las publicaciones concentran sus comentarios en la superplasticidad. No obstante, en este trabajo y en algunos otros se habla de las propiedades mecánicas que son importantes para el diseño, por ejemplo, el esfuerzo de cedencia de compresión, de la dureza vickers y de las relaciones que tienen estas propiedades con la microestructura.

Se ha encontrado que los mejores resultados tanto en la dureza como en la compresión, se obtuvieron de material con 78% de Zn y estructura de granos finos. En cambio, para lograr una buena adherencia en la soldadura por resistencia eléctrica la mejor estructura es la de laminillas paralelas.

Respecto a los mecanismos de deformación de las aleaciones superplásticas, no están aún perfectamente determinados. Bajo condiciones de alta temperatura ( $T=2000^{\circ}\text{C}$ ) se acepta que el principal mecanismo de deformación es el deslizamiento de granos, dicho deslizamiento puede llevarse a cabo por procesos que involucren difusión o simplemente el movimiento de un grano sobre otro. A temperatura ambiente estos mecanismos de deformación han sido poco estudiados, sin embargo, dentro de las investigaciones realizadas con zinalco se ha podido comprobar que las deformaciones se llevan a cabo por deslizamiento de granos o de dominios.

Así pues, se ha propuesto que las deformaciones en estas aleaciones se producen en una forma similar a la deformación de arcillas, en la que un esfuerzo cortante " $\tau$ ", necesario para producir cedencia en el material, consistiría de 2 términos: uno es el esfuerzo cortante " $\tau_0$ " requerido para vencer la fuerza de cohesión entre granos y el otro, un esfuerzo de fricción " $\mu$ " -

el cual es proporcional al esfuerzo normal " $\sigma_n$ " a la superficie de los granos.

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n \quad \text{ec. (III.1)}$$

El esfuerzo de cohesión entre granos " $\tau_0$ " decae muy rápido con la temperatura y el término que involucra la fricción entre granos es proporcional a la velocidad de deformación.

Para el caso de esta aleación se ha observado que la deformación originada por el deslizamiento de dominios de perlita, ocasiona una resistencia mecánica superior a la del material con -- granos finos.

Esta situación se corrobora con los ensayos mecánicos que a continuación se presentarán de manera condensada en 3 gráficas.

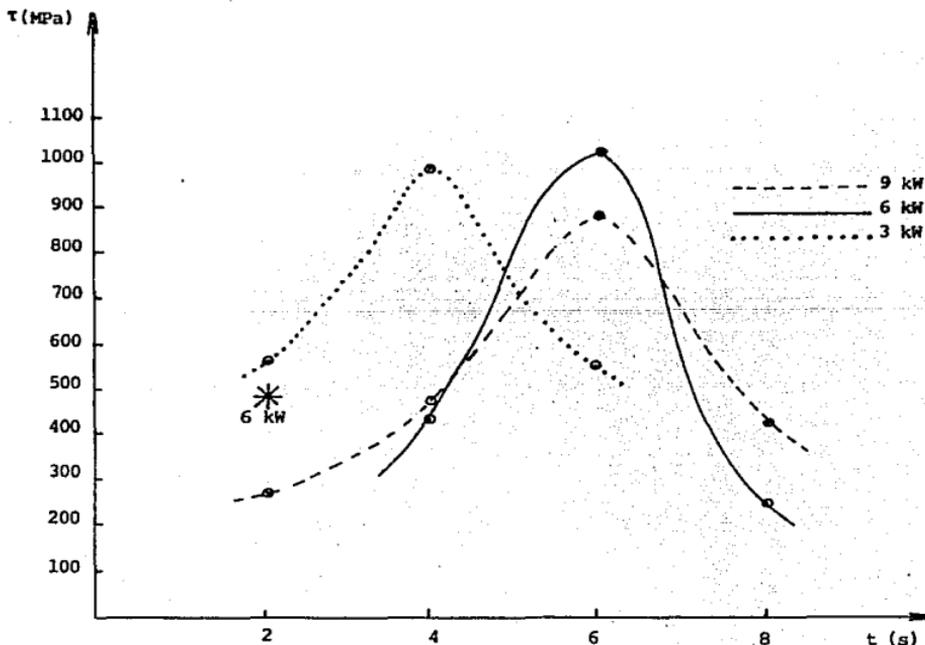


Fig. III.9 Comportamiento mecánico de las probetas recocidas y enfriadas lentamente. El asterisco señala una probeta soldada con limpieza previa.

En este lote (estructura laminar) se presentó el mejor comportamiento a la tracción de todas las probetas ensayadas.

Se han formado 3 curvas tipo campana en las que, la cúspide - representa las mejores condiciones de soldabilidad, en éstas una parte del material se ha fundido y además los átomos de una chapa difunden en la otra.

Un tiempo menor no es suficiente para alcanzar la temperatura apropiada y un tiempo mayor funde en exceso al material, hace que éste fluya y reduce el espesor de la chapa originándose poros y grietas en la lámina.

La potencia aplicada con la que se tienen mejores resultados es la de 6 kW, le sigue la 3 y finalmente de 9 kW. La curva de 3 kW casi iguala a la 6, con la ventaja de que se requiere un tiempo menor para soldarlas (ver fig. III.9).

Para el material laminado sin tratamiento térmico (fig. III.10) una posible interpretación puede ser que, las curvas sean -- parte de las campanas observadas en las figuras III.9 y III.11 - en cuyo caso, deben ensayarse más probetas para completar dichas curvas.

Una segunda interpretación o una interpretación alternativa de - la gráfica en cuestión es que, las líneas sean "rectas" que re-- presenten la rapidez de difusión, decayendo para potencias grandes conforme aumenta el tiempo (pendiente negativa) y aumentando para una potencia menor (pendiente positiva).

Esto puede explicarse debido a que al utilizarse una potencia -- grande, existirá la fusión del material, predominantemente sobre la difusión.

La línea "recta" con pendiente positiva y cuyo valor de pendiente es mayor que la que aparece en la fig. III.11, hace pensar que la estructura del material laminado favorece la difusión de una forma más rápida que la de granos finos exclusivamente (material templado).

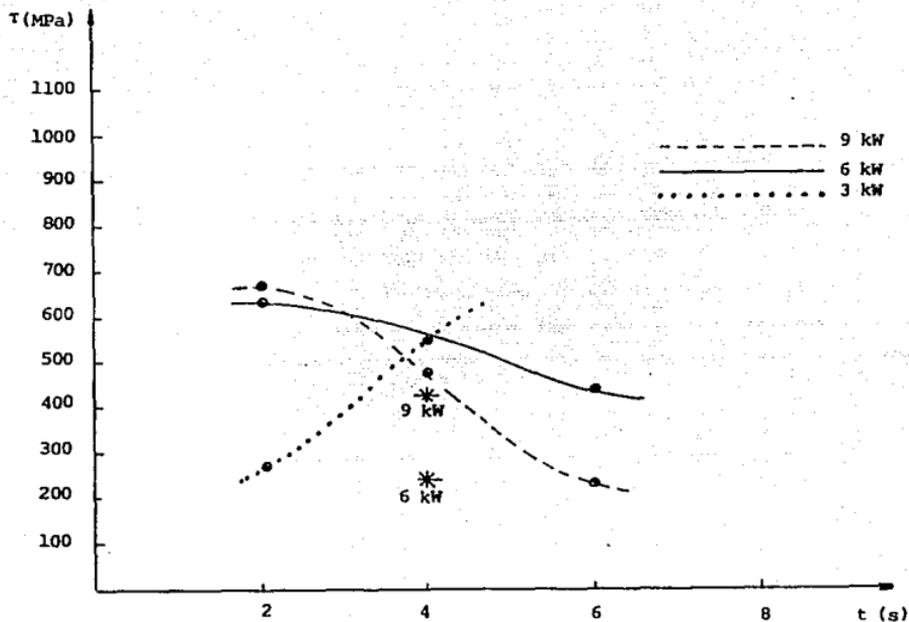


Fig. III.10 Comportamiento mecánico de las probetas sin tratamiento térmico (estructura de laminación). Los asteriscos señalan muestras que se limpiaron previamente a la soldadura.

Por otra parte, tanto la estructura de granos finos como la de laminillas y granos finos ofrece una mayor resistencia al paso de la corriente eléctrica, por tanto, se requiere de tiempos breves al soldarse cuando se aplican potencias de 6 y 9 kW.

$$\text{Pot} = V I = R I^2 = \frac{V^2}{R} \quad \text{ec. (III.2)}$$

$$I = \sqrt{\frac{\text{Pot}}{R}} \quad \text{ec. (III.3)}$$

Para una potencia determinada, una resistencia eléctrica mayor hace que la corriente también disminuya de acuerdo con la -- ec. III.3.

Si la corriente eléctrica no puede establecerse con cierta -- "facilidad", el efecto Joule se acentúa y la energía eléctrica se convierte casi en su totalidad en energía térmica, se eleva la -- temperatura y se ocasiona el chisporroteo en la soldadura, ocasionando fisuras y porosidades que disminuyen el esfuerzo de cedencia a la tracción.

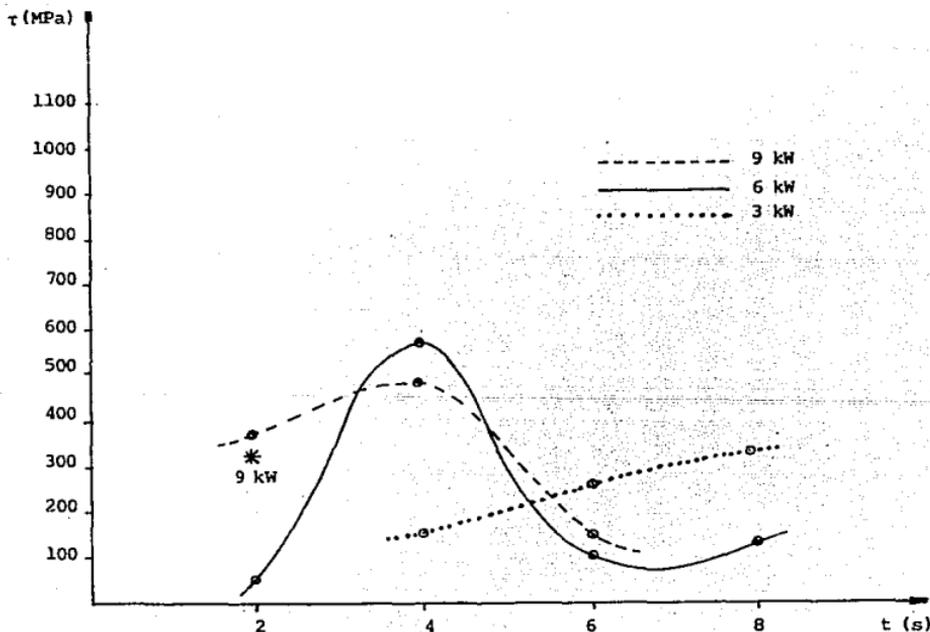


Fig. III.11 Comportamiento mecánico de las probetas templadas. El asterisco muestra una probeta soldada con limpieza previa.

En la figura III.11 nuevamente se presentan las curvas que aparecen en la III.9. En cada caso, es claro que las mejores condiciones de soldabilidad son las que aparecen en la zona central de las campanas y quizá, aunque un poco menor, la parte que se encuentra más arriba de la "recta" que representa la rapidez de difusión.

En el caso de la potencia de 3 kW (fig. III.10 y III.11) se espera que mejore la soldadura al aumentar el tiempo de permanencia entre electrodos.

Bien, aunque se han hecho comentarios y se han dado algunas conclusiones al observar las fotografías y las gráficas, es adecuado presentar un listado de conclusiones donde se podrá evaluar si se cumplió con el objetivo de la investigación.

Las conclusiones siguientes pueden ser redundantes de lo que anteriormente se ha citado, sin embargo, es necesario presentarlas a manera de resumir este trabajo.

C O N C L U S I O N E S

1. Las mejores condiciones para soldar lámina del material en cuestión por el método de resistencia eléctrica son, tener una estructura laminar, usar una potencia entre 3 y 6 kW de la punteadora y dejar entre 4 y 6 segundos al material entre los electrodos.
2. Cuando la superficie del material que se va a soldar está sucia y oxidada, presenta una resistencia eléctrica mayor que cuando se encuentra limpia, por tanto, la generación de calor por efecto Joule se ve concentrada entre las superficies en contacto.  
También existe la posibilidad de que el óxido formado sirva como fundente ya que, un fundente es una sustancia que ayuda a la fusión de un material al reaccionar con algunas impurezas contenidas en él.
3. Las probetas que se sometieron a una limpieza previa a la soldadura (1, 16, 26 y 28) no arrojaron resultados satisfactorios, independientemente de la microestructura del material.
4. Cuando el material se encuentra limpio antes de soldarse, la mayor resistencia que encuentra la corriente eléctrica está en las superficies intergranulares.  
Por esta causa, existen agrietamientos y porosidades que ocasionan una baja resistencia mecánica.
5. El esfuerzo máximo promedio para las muestras templadas fue de 260 MPa, para las de enfriamiento lento de 590 MPa y para las de laminación de 440 MPa, lo cual, es claro indicador de las condiciones más favorables a este tipo de soldadura para el material en cuestión.
6. Cada estructura tiene un comportamiento específico al soldarse, algunas probetas con mayor potencia tienen menos resis-

tencia y viceversa. Esto se debe a que al usar una potencia mayor (9 kW) es fácil de que se perfore el material o se --- provoquen porosidades.

En las figuras III.9, III.10 y III.11 se puede observar que no es la mejor opción usar la potencia de 9 kW o en su defecto, en qué condiciones se debe aplicar para obtener resultados más satisfactorios.

7. En cada lote de muestras se pueden observar las condiciones más favorables de soldabilidad, al mismo tiempo, se puede observar también que el mejor comportamiento mecánico ha sido el del material que fue recocido y enfriado lentamente. De acuerdo con lo anterior, es deseable lograr una estructura " perlítica " en el material antes de soldarlo.
8. Tanto de los resultados metalográficos como mecánicos, se -- puede inferir que la mejor soldadura fue aquella en la que -- existió una acción combinada de fusión y difusión entre chapas.
9. En las mejores condiciones de soldadura, se observan modificaciones a la estructura original del material. A ambos lados de la zona de unión " A " (fig. III.4) existen granos -- gruesos orientados de acuerdo a la presión ejercida por los electrodos de la máquina soldadora. De acuerdo a experiencias anteriores se puede afirmar que éstos granos gruesos -- (región B) de coloración blanca es cinc, además, como su temperatura de fusión ( $419.46^{\circ}\text{C}$ ) es menor que la del aluminio ( $660^{\circ}\text{C}$ ) y que la del cobre ( $1083^{\circ}\text{C}$ ), que su radio atómico ( $1.332\text{ \AA}$ ) es de un valor intermedio entre el Al ( $1.431\text{ \AA}$ ) y el del Cu ( $1.278\text{ \AA}$ ) y que, existe una cantidad mayor en la -- aleación, es posible concluir que esta cristalización grosera sea generada por la difusión del Zn en esa región.
10. El cinc que ha emigrado hacia la región de mayor temperatura, tuvo que salir de las zonas aledañas (C), en éstas, la presión y la temperatura son diferentes que en la primera, aquí no se formaron cristales gruesos sino laminillas igual que -- en el eutectoide; a su vez, esta región tuvo que tomar cinc

de otra parte a una temperatura más baja todavía que las zonas anteriores y no ofrecía posibilidades de restituir al cinc que había difundido. La coloración oscura de los gránulos en la zona D hace pensar entonces que sea una fase rica en aluminio.

El resto del material mantiene su estructura original.

11. Cuando la microestructura del material está formada por granos finos, no existe una difusión adecuada ya que, fundamentalmente se presenta el fenómeno de fusión. Este mecanismo solo no es suficiente para garantizar una buena resistencia mecánica ya que, al fundirse las superficies en contacto no siempre existe continuidad en la red y sí pueden originarse agrietamientos o porosidades.

En algunos ensayos se vió que, el valor del esfuerzo cortante de ruptura dependió fundamentalmente de la fricción más que de la cohesión entre granos, ésto se dedujo por la coloración en la fractura.

12. La potencia requerida para soldar este material no es muy grande así que, abre la posibilidad de diseñar un equipo manual, económico, portátil y quizá con una versatilidad mayor que la de una remachadora, para soldar por ejemplo perfiles de cancelería y ventanería.

## R E F E R E N C I A S

- 1) **Metals Handbook**  
American Society for metals (ASM)  
8th Edition  
Vol. 6 Welding and Brazing  
Vol. 8 Metallography, Structures and Phase Diagrams  
pags. 265 y 345
- 2) Avner H. Sydney, " Introduction to Physical Metallurgy "  
first edition 1964 y segunda edición en español, 1974 Mc.  
Graw-Hill, pag. 120-167 y 162-221 respectivamente.
- 3) Van Vlack Lawrence H. "Materiales para Ingeniería"  
C.E.C.S.A., Méx. 1975  
pags. 384-396 y 510
- 4) VII Conferencia Inter-Americana en Tecnología de Materiales  
México, D.F., 1981  
pag. 357
- 5) La Sustitución de las Aleaciones del Aluminio por las de Zn-Al.  
G. Torres Villaseñor.  
VII Conferencia Inter-Americana en Tecnología de Materiales, México 1981.
- 6) Moffatt G. Pearsall W., Wulff J.  
"Ciencia -I- de los materiales, Estructura"  
Limusa  
México, 1979  
pags. 155-166
- 7) Brophy H. Rose M., Wulff J.  
"Ciencia -II- de los materiales, Propiedades Termodinámicas"  
Limusa  
México 1979  
pags. 79-95
- 8) Hombre, Ciencia y Tecnología. Encycloepedia Britannica de  
México 1986 Vol. IV. pag. 1360, VIII pags. 2807 a 2811.
- 9) Apraiz Barriero J.  
"Tratamientos térmicos de los aceros"  
pags. 75-80  
8a. edición  
Madrid 1974

- 10) Negrete J. Valdés I. and Torres - Villaseñor G.  
Microstructure and Mechanical Properties of Zn-Al Alloys  
at Room Temperature. Metallurgical Transactions A, volume  
14A  
September 1983.
- 11) Metallurgie de la Soudure  
Seferian Daniel  
Dunod  
Paris 1965
- 12) Ciencia de los Materiales Para Ingeniería  
Houbaert Irmen Iván  
Facultad de Ingeniería UNAM 1977
- 13) Comportamiento Mecánico de los Materiales Metálicos  
Houbaert Irmen Iván  
Fac. de Ingeniería UNAM 1978