



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**"PROCESOS DE SOLDADURA"**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A :**

**ROGELIO URIBE RODRIGUEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**I.M.E. ERIC PAREDES VILLANUEVA**

ASESOR:

**ING. JOSE ANTONIO LOPEZ GONZALEZ**



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

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

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

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

# I N D I C E

	Página
<u>Introducción</u> .....	3
<b>CAP. 1 EL PROCESO DE SOLDADURA; ASPECTOS DE DISEÑO Y CALOR</b> .....	<b>4</b>
1.1 Efectos del calor.....	4
1.2 Consideraciones de diseño.....	15
<b>CAP. 2 CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA</b> .....	<b>17</b>
<b>CAP. 3 SOLDADURA EN ESTADO SOLIDO</b> .....	<b>18</b>
3.1 Soldadura por forja.....	18
3.2 Soldadura por forja en costura.....	21
3.3 Soldadura en frío.....	23
3.4 Soldadura por fricción.....	25
3.5 Soldadura ultrasónica.....	55
3.6 Soldadura por explosión.....	60
<b>CAP. 4 SOLDADURAS POR GAS</b> .....	<b>62</b>
4.1 Soldadura por gas.....	62
4.2 Soldadura a presión por gas.....	75
<b>CAP. 5 SOLDADURA POR ARCO</b> .....	<b>78</b>
5.1 Soldadura por arco con electrodo recubierto.....	78
5.2 Soldadura por arco de tungsteno protegida con gas (TIG).....	85
5.3 Punteo por arco de tungsteno protegido con gas.....	88
5.4 Soldadura por arco metálico protegida con gas (MIG).....	90

5.5	Soldadura por arco con electrodo con núcleo de fundente.....	94
5.6	Soldadura por arco sumergido.....	98
5.7	Soldadura de accesorios.....	105
5.8	Ventajas y desventajas de la soldadura por arco.....	107
5.9	Tipos de soldadura por fusión, y tipos de uniones.....	108
<b>CAP. 6</b>	<b>SOLDADURA POR RESISTENCIA.....</b>	<b>111</b>
6.1	Introducción.....	111
6.2	Punteo por resistencia.....	116
6.3	Soldadura de costura por resistencia.....	122
6.4	Soldadura por resistencia con salientes.....	124
6.5	Soldadura electromagnética en estado sólido.....	126
6.6	Ventajas y desventajas de la soldadura por resistencia.....	127
<b>CAP. 7</b>	<b>OTROS PROCESOS DE SOLDADURA.....</b>	<b>128</b>
7.1	Introducción.....	128
7.2	Soldadura aluminotérmica.....	129
7.3	Soldadura por arco con presión.....	134
7.4	Soldadura por rayo de electrones....	173
7.5	Soldadura por rayo laser.....	217
7.6	Soldadura por electroescoria.....	222
	<u>Conclusiones</u> .....	226
	<u>Apéndice 1</u> .....	227
	Aleaciones de Aluminio .....	227
	Clasificación de los Aceros.....	231
	<u>Bibliografía</u> .....	233

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

Debido a que la soldadura se trata en esta tesis desde el punto de vista de unir metales, y tomando en cuenta la diversidad de procesos de soldadura y procesos relacionados, se optó por tomar como punto de partida una clasificación de la AWS (American Welding Society) relativamente simplificada. En la clasificación general se incluyen otros procesos, tales como Corte Térmico (por arco, por oxígeno, por rayo de electrones y por rayo laser), Rociado Térmico (por arco, por flama y por plasma), Soldadura Fuerte (utilizando varillas de aleación no ferrosa, preferentemente aleaciones de cobre y zinc; estos metales de relleno tienen un punto de fusión por arriba de los  $(449^{\circ}\text{C})$  y Soldadura Suave (unión de dos metales sin que se funda ninguno de ellos, es decir, interviene un tercer metal, que se funde a temperaturas menores a los  $(449^{\circ}\text{C})$ ).

Asimismo, dentro de la clasificación tomada como base, se consideró que sería interesante tratar un poco más algunos procesos que no son tan comúnmente utilizados, tales como los de Soldadura en Estado Sólido, especialmente Soldadura por Fricción, y los Procesos Unicos, particularmente Soldadura por Arco con Presión y Soldadura por Rayo Electrónico; esto con el fin de proporcionar más información en español sobre estos procesos, ya que para los que se utilizan más frecuentemente (por ejemplo Soldadura con Gas, Soldadura por Arco y Soldadura por Resistencia) existen más fuentes de información en nuestro idioma.

## C A P I T U L O 1

### EL PROCESO DE SOLDADURA; ASPECTOS DE DISEÑO Y CALOR

#### 1.1 EFFECTOS DEL CALOR

El calentamiento y enfriamiento son componentes esenciales e integrales de todos los procesos de soldadura, excepto de la soldadura en frío. En la mayoría de los casos, el metal se somete a temperaturas superiores a aquéllas en las que ocurren las transformaciones de fase o crecimiento de grano. Debido a que la cantidad de metal que se calienta generalmente es pequeña en relación a la masa total de la pieza de trabajo, al menos algunas porciones del metal calentado se pueden enfriar rápidamente. También, el calentamiento concentrado puede resultar en esfuerzos residuales y/o flexión de la pieza. Estos elementos pueden o no afectar adversamente el funcionamiento de servicio de la soldadura. Estos factores deben ser tomados en consideración al diseñar soldaduras y al usar soldadura si se desean obtener los beneficios potenciales del proceso y evitar los dañinos efectos colaterales. Sin embargo, hay demasiados ejemplos en forma de fallas en componentes soldados, que muestran que los diseñadores y otras personas relacionadas con la soldadura fallan en darle la adecuada consideración a estos factores.

El corte por flama y por arco también involucra calentamiento concentrado y enfriamiento subsecuente y, por lo tanto, también puede dar lugar a algunos de los mismos efectos del calor; sin embargo, estos normalmente son menos severos y menos extensivos.

**METALURGIA DE SOLDADURA.**- La soldadura es probablemente el ejemplo sobresaliente de un proceso de manufactura en donde ocurren calentamiento y enfriamiento como pasos esenciales y, por lo tanto, producen efectos metalúrgicos que generalmente no son deseados. Debido a que en la soldadura con fusión se funde algo de metal y se enfría bastante rápidamente, los efectos son más pronunciados en relación con este tipo de soldadura. Sin embargo, también se dan en un grado menor en otros tipos de soldadura en donde el ciclo calentamiento-enfriamiento es menos severo. Si son considerados adecuadamente, estos efectos pueden ser eliminados completamente y se puede obtener un excelente funcionamiento en servicio mediante el uso de soldadura. Si no son considerados adecuadamente, los resultados pueden ser desastrosos -una falla del diseñador o del fabricante-, no una falla de soldadura.

En la soldadura con fusión se crea un charco de metal fundido, ya sea del metal base o del metal base conjuntamente con el electrodo o varilla de relleno. Este charco está contenido en un molde de metal, formado por el metal base. Generalmente el charco fundido es muy pequeño en comparación con el molde de metal más frío. Por lo tanto, el proceso, metalúrgicamente, es uno de vaciar una pequeña cantidad de metal fundido dentro de un molde de metal. Las características metalúrgicas y de resistencia resultantes pueden ser anticipadas y explicadas sobre esta base.



**Fig. 1.1.1** Estructura de grano y zonas en una soldadura con fusión

La figura 1.1.1. muestra una microestructura típica que resulta de una soldadura con fusión. En el centro de la soldadura se encuentra una zona que está compuesta principalmente de metal de soldadura que ha solidificado del estado de fusión. En realidad, es una mezcla de metal base y electrodo o metal de relleno, el radio dependiendo del proceso de soldadura usado, el tipo de unión y la preparación de las orillas. Esta zona es metal vaciado de la composición específica de la mezcla que se ha enfriado; su microestructura refleja la rapidez del enfriamiento en la soldadura. Como es metal vaciado no se puede esperar que esta zona tenga las mismas propiedades que el metal base forjado; puede alcanzar propiedades iguales solamente a través de la adición de metal de relleno, el cual, en la condición de vaciado, tenga propiedades iguales o superiores. Por lo tanto, se deberán usar varillas de relleno o electrodos, los cuales, en la condición de depósito tengan propiedades iguales o superiores a las del metal base. Este requisito es la base para las especificaciones de la AWS, para electrodos y varillas de relleno.

La estructura del grano en la zona de metal de soldadura puede ser fina o gruesa y equiaxial o dendrítica, dependiendo del tipo y volumen del metal de soldadura y la rapidez de enfriamiento. La mayoría de las composiciones de electrodos y de varilla de relleno tienden a producir granos finos equiaxiales, pero el volumen del metal de soldadura y la rapidez de enfriamiento pueden vencer fácilmente estos objetivos.

Adyacente al metal de soldadura está la siempre presente, e indeseable, zona afectada por el calor. En esta región, el metal base no se fundió, pero fue calentado a una temperatura lo suficientemente alta y por un período suficiente de tiempo, de tal manera que ocurrió crecimiento de grano. Generalmente, se puede encontrar una variedad de microestructuras en la zona afectada por el calor. En acero al carbono simple, éstas -

pueden variar desde regiones muy angostas de martensita dura a perlita gruesa. Ha perdido las características deseables - que fueron previamente impartidas al metal base mediante trabajo en caliente, y no tiene las propiedades superiores del metal de soldadura. En consecuencia, la zona afectada por el calor es generalmente el área más débil en una soldadura, en la condición de soldada. Excepto en donde hay defectos obvios en el depósito de la soldadura, la mayoría de las fallas de soldadura se origina en la zona afectada por calor.

Afuera de la zona afectada por el calor está el metal ba se que no fue lo suficientemente calentado para cambiar su microestructura.

Se aprecia fácilmente que la microestructura de una soldadura es variada y compleja. Mucha de la variación puede ser reducida o eliminada mediante un tratamiento térmico adecuado siguiendo a la soldadura. Sin embargo, también se aprecia fácilmente que un tratamiento de calor no puede restaurar todos los beneficios del trabajo en caliente. Otro procedimiento - que puede reducir la variación en microestructura, especialmente la agudez de la variación, es precalentar el metal base adyacente a la soldadura justamente antes de soldar. Para aceros al carbono simples, generalmente una temperatura de 200 a 400 °F es adecuada. Este procedimiento reduce la rapidez de enfriamiento del depósito de soldadura y del metal inmediatamente adyacente en la zona afectada por el calor. El precalen tamiento también tiende a reducir la agudeza de las fronteras entre la zona de soldadura y la afectada por el calor, produciendo un cambio más gradual en microestructuras y, por lo tanto, eliminando un incrementador de esfuerzos metalúrgicos.

Si el contenido de carbono de aceros al carbono simple es mayor de aproximadamente 0.3%, las velocidades de enfriamiento encontradas en soldadura normal son suficientes para -

causar endurecimiento, a menos que se tomen medidas de precaución.

Esto también es cierto para muchos aceros aleados, debido a su gran endurecibilidad. Por lo tanto, se deben usar ciclos de calentamiento especiales previos y posteriores a la soldadura cuando se sueldan tales aceros. Es por esta razón que los varios aceros soldables de baja aleación han ganado aceptación, ya que generalmente pueden ser soldados sin la necesidad de pre o postcalentamiento.

Donde no ocurre fusión, o solamente un poco, y se aplica una presión considerable al metal caliente, como en soldadura de forja o de resistencia, la soldadura puede retener algunas de las características de material forjado.

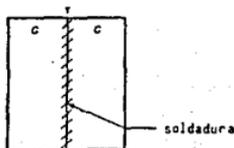
Hasta aquí se han considerado los efectos metalúrgicos relacionados con la soldadura del acero. Los efectos de calentamiento y enfriamiento que acompañan la soldadura de otros metales dependerán, por supuesto, de las transformaciones y cambios que pueden ocurrir en tales metales al sujetarlos a los ciclos de calentamiento y enfriamiento que acompañan al proceso de soldadura.

**ESFUERZOS TERMICOS.-** Como se mencionó anteriormente, - otro efecto del calentamiento y enfriamiento que acompañan a la soldadura es el establecimiento de esfuerzos térmicos. Estos son de dos tipos y son más pronunciados en la soldadura con fusión, donde ocurre el máximo calentamiento.

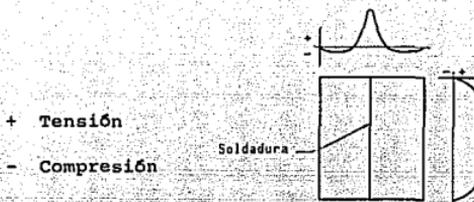
Los esfuerzos residuales de soldadura son el resultado de la restricción a la expansión y contracción térmicas ofrecidas por las piezas que se sueldan. Pueden existir estén o no fijadas las piezas a otras partes de una estructura o si están res-

tringidas externamente de cualquier manera. La forma en la que ocurren los esfuerzos residuales puede explicarse por medio de la fig. 1.1.2. Al calentar el material en T, el metal de soldadura y el inmediatamente adyacente se expande. Su libertad para expandirse en la dirección paralela a la soldadura está restringida por las secciones mucho más largas de metal relativamente frío en las zonas marcadas con C. como resultado, debido a que el metal en la zona T, no puede expandirse libremente en la dirección longitudinal, engrosa, resultando ligeramente más ancho para poder acomodar el volumen incrementado. Este engrosamiento implica deformación plástica permanente.

Fig. 1.1.2 Condiciones que causan esfuerzos residuales de soldadura



Después de que el metal de soldadura es depositado y solidifica, se enfría y se empieza a contraer. Esta contracción también se evita por el metal en las zonas marcadas con C y, - en consecuencia, el metal en la zona T se estira, al intentar tener una longitud tan grande como la tenía mientras estaba caliente y después de engrosar. Al enfriarse, el metal en esta zona está en estado de tensión, balanceado por baja compresión en las zonas C, como se muestra en la figura 1.1.3.



**Fig. 1.1.3 Patrón típico de esfuerzos residuales en una soldadura a tope**

Los esfuerzos residuales longitudinales, paralelos a la soldadura, son máximos en la soldadura, estando ligeramente - arriba de la resistencia a la cedencia del material base, dependiendo del espesor del metal y de la cantidad y tipo del metal de soldadura. Por ejemplo, en una soldadura a tope con fusión en placa de acero dulce de una pulgada, teniendo una resistencia a la cedencia de  $32,000 \text{ lbs/pulg}^2$ , los esfuerzos residuales longitudinales tendrán un valor máximo de aproximadamente  $48,000 \text{ lbs/pulg}^2$ . En una placa similar de  $\frac{1}{2}$  pulgada, estos esfuerzos serán de aproximadamente  $40,000 \text{ lbs/pulg}^2$ . La razón por la que estos esfuerzos pueden ser mayores que el punto de cedencia de la placa es el hecho de que el metal de soldadura en la condición de depositado tiene una resistencia a la cedencia de aproximadamente  $52,000 \text{ lbs/pulg}^2$ , siendo diseñado para ser más fuerte que la placa, y la soldadura resultante, siendo una mezcla de metal de soldadura y metal base, tiene propiedades entre aquéllas del metal de soldadura y de la placa del metal forjado. Los esfuerzos residuales longitudinales disminuyen rápidamente lejos de la soldadura y llegan a ser esfuerzos de compresión de baja magnitud-generalmente no exceden  $5,000 \text{ lbs/pulg}^2$ .

El segundo tipo de esfuerzos térmicos son llamados esfuerzos de reacción; éstos se deben a la restricción a la expansión y contracción térmicas ofrecidas por otras partes de la estructura a las que están sujetas las piezas que se están soldando. Así que existen solamente cuando dos piezas que están siendo unidas por soldadura están fijas a otras partes de una estructura.

La magnitud de esfuerzos de reacción es básicamente una función inversa de la longitud del material que existe entre la unión de soldadura y un punto de máxima rigidez. Nunca puede exceder la resistencia al punto de cedencia del material base y, excepto donde las condiciones de restricción son rígidas, estos esfuerzos están bastante abajo del valor de resistencia a la cedencia, rara vez excediendo quince mil libras - por pulgada cuadrada en acero ordinario.

EFFECTOS DE ESFUERZOS TERMICOS.- Los efectos de los esfuerzos térmicos que resultan de soldadura han sido ampliamente mal entendidos. El efecto más obvio es que pueden causar distorsión o flexión en las piezas. La flexión y el abombamiento tienden a reducir los esfuerzos desbalanceados, pero generalmente son indeseables.

No se pueden dar reglas fijas para evitar la flexión debido a que las posibles condiciones que le causan son muy variadas. Se utilizan varios procedimientos. En general, se deberá usar una secuencia de soldadura que permita que las placas tengan tanta libertad como sea posible durante la realización de cada soldadura. Una regla general es soldar hacia el punto de mayor libertad. Algunas veces las placas pueden preposicionarse de tal manera que la distorsión resultante las deje en la forma deseada.

Otro procedimiento común es evitar el movimiento de las placas durante la soldadura, forzando por lo tanto un flujo -

plástico en las placas y/o en el metal de soldadura que se enfría. Este procedimiento se puede utilizar mejor en soldaduras pequeñas. Otro procedimiento es balancear los esfuerzos térmicos resultantes depositando el metal de soldadura en patrones y áreas predeterminados, con frecuencia en longitudes cortas. La flexión frecuentemente puede minimizarse mediante el uso de martillo de peña en cada paso de una soldadura de múltiples pasos, excepto en el primero y último pasos, para provocar una pequeña cantidad de flujo plástico localizado y por lo tanto - permitir que ocurra el movimiento necesario.

En cuanto a los esfuerzos residuales, ho hay evidencia - sustancial de que tengan un efecto dañino en la resistencia de funcionamiento de las soldaduras, excepto en presencia de muecas o en estructuras muy rígidas donde no puede ocurrir flujo plástico. Estas son dos condiciones que no deberfan existir en las soldaduras si son diseñadas adecuadamente y se emplea mano de obra adecuada. Desafortunadamente, la soldadura hace fácil unir inadvertidamente secciones pesadas de acero y configuraciones rígidas que no permitirán que ocurra la pequeña cantidad de movimiento elástico o plástico requerido para reducir - esfuerzos pico o concentrados. Demasiado frecuentemente, irregularidades geométricas, tales como esquinas interiores agudas, se incorporan en estructuras soldadas. Un diseño adecuado puede eliminar tanto la rigidez como las irregularidades geométricas. Otras irregularidades dañinas tales como bolsas de gas, - pueden ser puntos de partida para fallas en la soldadura, pero éstas, también pueden evitarse mediante procedimientos de soldadura adecuados, buena mano de obra, y supervisión e inspección adecuadas.

Los esfuerzos residuales pueden causar flexión cuando se maquinan las soldaduras, para desbalancear el sistema de esfuerzos. Consecuentemente, a las soldaduras que van a sufrir - maquinado considerable, generalmente se les da un tratamiento

de calentamiento para aliviar los esfuerzos antes del maquinado.

Los esfuerzos de reacción constituyen un sistema de esfuerzos que se imponen en el sistema de carga viva. Ellos también pueden causar distorsión. Sin embargo, su efecto más frecuente es su tendencia a producir cuarteaduras durante o al enfriarse la soldadura. Esto es probable especialmente cuando las soldaduras se realizan bajo condiciones "apretadas" donde hay gran restricción al encogimiento normal que ocurre en la dirección transversal a la longitud de la soldadura. A menudo, cuando se está realizando una soldadura de pasos múltiples, - tal cuarteadura puede ocurrir en uno de los primeros cordones cuando no hay metal suficiente para soportar los esfuerzos de encogimiento. Tal condición puede ser seria si la cuarteadura no se nota y no se repara, o si no es resoldada completamente al depositar los cordones siguientes. Precalentar el metal adyacente unas pulgadas a cada lado de la soldadura que debe ser realizada bajo condiciones "apretadas", con frecuencia - eliminará este tipo de cuarteadura.

Algunos códigos de soldadura requieren que algunos tipos de soldadura sean aliviados de esfuerzos mediante calentamiento antes de su uso. En muchos casos parece que el funcionamiento mejorado que resulta de tal tratamiento se debe tanto al mejoramiento en la microestructura como a la reducción de esfuerzos residuales.

## 1.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La soldadura es un proceso único. No es un proceso que pueda ser sustituido por otro método de unión sin considerar adecuadamente sus características peculiares y requisitos. Desafortunadamente la soldadura es tan fácil y conveniente de usar que estos dos hechos importantes a menudo se pasan por alto y, la causa de muchas así llamadas fallas de soldadura, pueden ser atribuidas a tal negligencia.

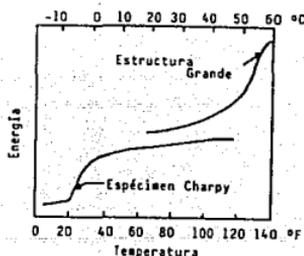
Aunque al utilizar el proceso de soldadura se corre el riesgo de hacer estructuras demasiado rígidas, con un adecuado razonamiento en el diseño de la estructura, se puede lograr una suficiente flexibilidad para que pueda ocurrir un deseable reajuste de esfuerzos.

Un factor muy importante que debe tenerse en mente al usar la soldadura es que ella produce estructuras monolíticas o de una pieza. Cuando se sueldan dos piezas se convierten en una pieza. Esto puede causar complicaciones si no se toma en cuenta adecuadamente. Por ejemplo, una cuarteadura en una pieza de estructura de múltiples piezas puede no ser seria, porque rara vez progresará más allá de la pieza sola en la que ocurre. Sin embargo, cuando una estructura grande, como un barco soldado, tubería, un tanque de almacenamiento, o un recipiente a presión, consiste de una sola pieza, una cuarteadura que empieza en una sola placa o soldadura puede progresar una gran distancia y causar una falla completa; obviamente esta situación no es de la soldadura, sino más bien una falla de tomar en cuenta un simple hecho al diseñar la estructura.

Otro factor que se relaciona con el diseño es que un material dado, en pequeñas piezas puede no comportarse como lo haría en una pieza grande. La soldadura hace muy fácil obtener una estructura que sea una pieza grande. La importancia -

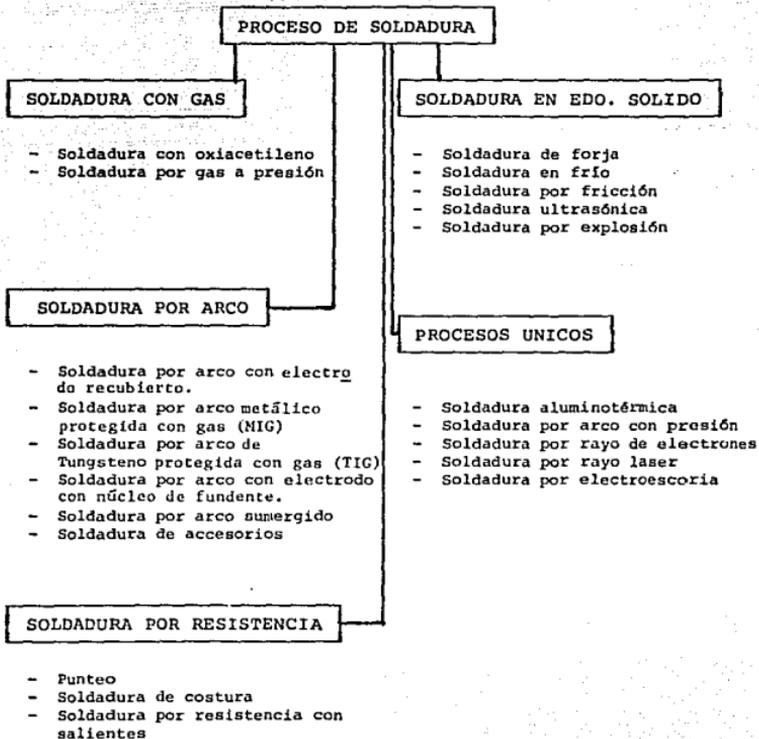
de este hecho se ilustra vívidamente en la figura 1.2.1, la cual muestra la relación entre la absorción de energía y temperatura para el mismo acero al probarlo en un espécimen de impacto Charpy y en una estructura soldada grande. En una barra Charpy el material mostró comportamiento dúctil y buena absorción de energía a temperaturas bajas de hasta  $-4^{\circ}\text{C}$ , pero cuando se soldó en una estructura grande mostró comportamiento dúctil a temperaturas bajas hasta solamente  $43^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, las características típicas de ductilidad del acero a usarse en grandes estructuras soldadas puede ser de gran importancia, y las especificaciones ordinarias para acero frecuentemente no controlan esta cualidad. Más de una estructura soldada ha fallado debido a que el diseñador no toma este hecho en cuenta.

Fig. 1.2.1 Efecto del tamaño en la capacidad de absorción (temperatura de transición) de un espécimen de acero.



Antes de que la soldadura se adopte y se use para fabricar un producto o estructura, se debe estar seguro de que el producto ha sido diseñado adecuadamente para soldadura.

## CAPITULO 2

CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA<sup>1</sup>

1.- E. Paul de Garmo, Materials and Processes in Manufacturing, Collier Mac Millan, 5a. edición, p. 833.

## CAPITULO 3

## SOLDADURA EN ESTADO SOLIDO

3.1 SOLDADURA POR FORJA

## Descripción del Proceso

En este proceso las partes de metal que se van a soldar se calientan en una forja que utiliza carbón vegetal o carbón mineral para producir el calor necesario (fig. 3.1.1). Los metales a unir se calientan al rojo blanco, entonces se colocan juntos de tal manera que las superficies puedan ser forzadas una con otra golpeando con un martillo. La presión de los golpes del martillo y el calor extra producido por el martillo unen las dos piezas.

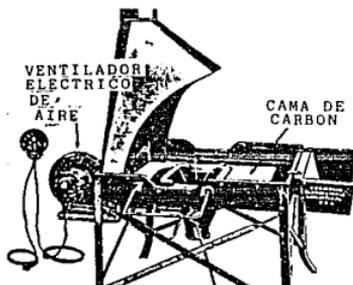


Fig. 3.1.1 Forja de herrero usada para calentar metal para soldarlo por forja

Este mismo tipo de soldadura puede hacerse usando martillos mecánicos, dispositivos y prensas.

#### Aplicaciones

Generalmente este proceso se limita a unir piezas de acero sólido.

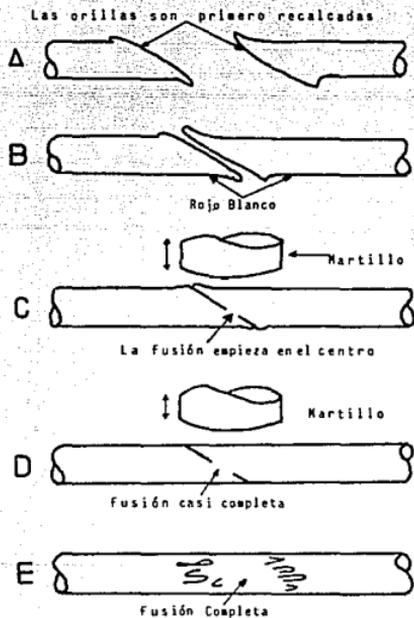
#### Ventajas y Desventajas

Cuando una soldadura de este tipo se hace correctamente, tiene todas las cualidades del metal original.

La fuente de calor es demasiado rústica, por lo que es difícil tener un control adecuado de la temperatura; es difícil mantener la limpieza de los metales; se requiere gran habilidad de parte del soldador.

La soldadura por forja ha sido virtualmente reemplazada por procesos de soldadura más modernos.

La fig. 3.1.2 muestra los pasos de la soldadura por forja.



**Fig. 3.1.2** Ilustración de los pasos utilizados al soldar por soldadura por forja

### 3.2 SOLDADURA POR FORJA EN COSTURA

#### Aplicación

Este proceso de soldadura se utiliza extensamente en la fabricación de tubería de acero de diámetro pequeño. La manufactura de este producto puede obtenerse de dos maneras: con soldadura a tope y con soldadura traslapada, utilizándose en ambos casos tramos largos de acero en forma de plancha del espesor deseado. Debido a que la plancha ha sido rolada en caliente previamente, ya que el proceso de soldadura produce trabajo de compresión adicional, la tubería soldada mediante estos procesos es uniforme en calidad.

**SOLDADURA DE TUBERIA A TOPE.-** La figura 3.2.1 muestra esquemáticamente este proceso. La plancha de acero proviene de una bobina continua y se calienta a una temperatura de forja conforme pasa por un horno. Al salir del horno es jalada a través de rodillos formadores donde adquiere forma cilíndrica. La presión ejercida entre las orillas de la plancha conforme pasa a través de los rodillos es suficiente para recalcar el metal y soldar las orillas. Conjuntos adicionales de rodillos le dan el tamaño y la forma a la tubería, después de lo cual se corta a medida. Los diámetros de tubería van de 1/8 de pulgada a 3 pulgadas. Los índices de producción de una sola unidad con frecuencia exceden los 30,000 pies por hora.



Fig. 3.2.1 Método para hacer tubería mediante soldadura a tope

**SOLDADURA DE TUBERIA TRASLAPADA.**- Este proceso se ilustra en la figura 3.2.2 y difiere del anterior en que la placa tiene orillas chaflanadas y se utiliza un mandril en conjunto con un grupo de rodillos para hacer la soldadura. El proceso se usa principalmente para tamaños más grandes de tubería, - desde aproximadamente 2 hasta 14 pulgadas de diámetro. Debido a la necesidad de apoyar y remover el mandril, las longitudes se limitan a aproximadamente 20 pies.



**Fig. 3.2.2 Método para hacer tubería traslapada.**

### 3.3 SOLDADURA EN FRIO

#### Descripción del Proceso

La soldadura en frío es una variación única de la soldadura de forja en el sentido en que no se usa calentamiento y se emplea un solo golpe o aplicación de presión producido mediante cilindros hidráulicos. La coalescencia resulta únicamente por la rápida aplicación de presión y se da sólo en las moléculas de la superficie. Por lo tanto, representa un extremo del rango de posibilidades temperatura-presión.

Para producir una soldadura en frío, las superficies se limpian mediante cepillado con alambre (si se utilizan métodos químicos con frecuencia se quedan solventes residuales en la superficie del metal), se ponen en contacto y se someten a presión concentrada suficiente para producir aproximadamente de 30 a 50% de trabajo en frío. Esto se puede hacer en una prensa punzonadora, o en una herramienta especial. El resultado es como se muestra en la fig. 3.3.1. Sin duda ocurre algo de calentamiento como resultado del severo trabajo en frío del metal, pero la alta presión concentrada es el factor primario para producir coalescencia.

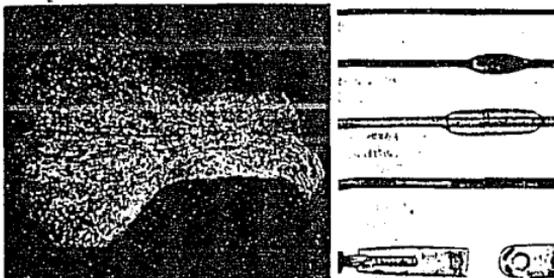


Fig. 3.3.1 (Izq.) Sección a través de una soldadura en frío.  
(Der.) Partes pequeñas unidas por soldadura en frío.

### Aplicaciones

La soldadura en frío se emplea para unir partes pequeñas tales como conexiones eléctricas. Trabaja mejor en materiales suaves, dúctiles, como el aluminio y sus aleaciones, - cobre, aleaciones de cadmio, níquel, plomo, zinc, etc. Se pueden hacer soldaduras a tope y traslapadas.

### 3.4 SOLDADURA POR FRICCIÓN

#### Descripción

La soldadura por fricción es un proceso en el cual el calor para soldar se produce por conversión directa de energía mecánica a energía térmica en las superficies de contacto de las piezas sin la aplicación de energía eléctrica, o calor de otras fuentes a las piezas. Las soldaduras por fricción se hacen manteniendo una pieza no rotatoria en contacto con una pieza rotatoria bajo presión constante o que se incrementa gradualmente hasta que las superficies de contacto alcanzan la temperatura de soldadura, y luego deteniendo la rotación para completar la soldadura. El calor de fricción desarrollado en las superficies de contacto incrementa rápidamente la temperatura de las piezas sobre una distancia axial muy corta a valores que se acercan al rango de fusión; la soldadura ocurre bajo la influencia de una presión que se aplica mientras la zona calentada está en el rango de temperatura plástica.

La soldadura por fricción se clasifica como un proceso de soldadura en estado sólido, en el que la unión ocurre a una temperatura por abajo del punto de fusión del metal de trabajo. Si ocurre alguna fusión inicial, no hay evidencia en la soldadura terminada, porque el metal se trabaja durante la etapa de soldadura.

La fig. 3.4.1 muestra los pasos para soldar por fricción dos piezas de una pulgada de diámetro. La barra a la izquierda se gira a alta velocidad mientras que la de la derecha se forza contra la barra en rotación. La fricción crea suficiente calor para lograr una buena soldadura.

En la fig. 3.4.2 se muestra una sección a través de una soldadura por fricción uniendo dos aceros disímiles. El acero con la mayor forjabilidad tiene la mayor cantidad de recalcado de soldadura. Cuando se sueldan por fricción metales similares la cantidad de recalcado de soldadura es aproximadamente el mismo en ambos lados de la línea de unión.

### Aplicaciones

La soldadura por fricción se ha usado en alta producción de cámaras de precombustión huecas para máquinas diesel, para soldar muñones a bloques de montaje para cilindros neumáticos e hidráulicos, para soldar conectores al Vástago del émbolo, y para fabricar mazas para rodillos.

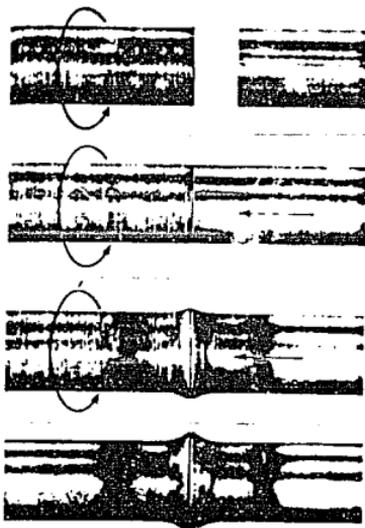


Fig. 3.4.1 Pasos por soldar por fricción dos piezas de acero al carbono de 1" de diámetro

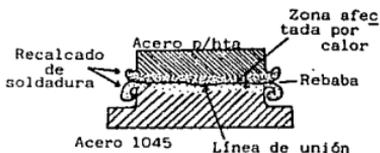


Fig. 3.4.2 Sección transversal a través de una soldadura por fricción uniendo dos aceros disímiles.

En la industria automotriz, la soldadura por fricción - se usa para fabricar ejes de motor, árboles de dirección, - ejes y válvulas bimetalicas, y para unir mazas a engranes. - Otra aplicación es para soldar acero en barra a pequeñas forjas o a placa para producir piezas que de otra manera serían forjadas. Los punzones para herramienta de corte se hacen soldando mangos de acero al bajo carbón o de baja aleación a los cuerpos de acero de la herramienta.

Partes de motor para jets se hacen soldando componentes hechos de una aleación resistente al calor a componentes hechos de una aleación endurecible o resistente al desgaste.

#### Capacidades del Proceso

Muchas aleaciones ferrosas y no ferrosas se pueden soldar por fricción. La soldadura por fricción también puede ser usada para unir metales cuyas propiedades mecánicas y térmicas difieran ampliamente. Con frecuencia combinaciones que - pueden soldarse por fricción, no pueden unirse por otros procesos de soldadura debido a la formación de fases quebradizas que harían tales uniones inservibles. Las temperaturas inferiores a la de fusión y los tiempos reducidos de soldadura - por fricción permiten que se unan muchas combinaciones de metales de trabajo.

La preparación de las orillas de las piezas, aparte de lo necesario para asegurar un alineamiento razonablemente buno y para producir la tolerancia de longitud requerida para - un conjunto específico de condiciones de soldadura, no es crítica. El desgaste friccional remueve irregularidades de las - superficies unidas y deja superficies limpias y tersas calentadas a la temperatura de soldadura. En algunas aplicaciones, donde la integridad de la soldadura es importante, se usa una

pequeña proyección en el centro de uno de los miembros para - asegurar el calentamiento y la acción de forja adecuados y pa ra eliminar defectos de centro. Esta proyección es especial-- mente útil para soldar barras de gran diámetro.

La carga y descarga automáticas de las máquinas de soldar permiten altos índices de producción. Por ejemplo, se pro ducen válvulas bimetalicas, dos a la vez, a un índice de 1200 piezas por hora.

Otras ventajas de la soldadura por fricción incluyen - las siguientes;

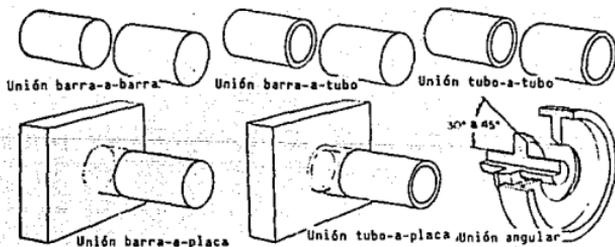
- 1.- No se necesita metal de relleno o atmósfera protec tora.
- 2.- Los requerimientos de potencia eléctrica y de ener gía total son una fracción de aquellos necesarios para otros procesos de soldadura.
- 3.- La operación es relativamente limpia, hay poco - - chisporroteo, y no se desarrollan arcos, vapores o incrustaciones.
- 4.- La zona afectada por el calor es muy angosta y tie ne un tamaño de grano que frecuentemente es más pe queño que el del metal base.

Las limitaciones de la soldadura por fricción son:

- 1.- Una pieza debe ser redonda (o casi redonda) en la superficie de contacto y debe tener un tamaño y - forma que pueda sujetarse y girarse. (Se han solda do por fricción barras hexagonales a lingotes).
- 2.- Las piezas deben ser capaces de soportar el par mo tor y la presión axial impuestos durante el calen-

tamiento y la forja.

- 3.- Los mecanismos sujetadores de las piezas deben ser lo suficientemente fuertes para soportar cargas de choque y de par motor pesadas.
- 4.- El proceso está restringido a soldaduras a tope, planas y angulares que sean concéntricas con el eje de rotación. (Ver fig. 3.4.3).
- 5.- Las máquinas convencionales para soldar por fricción requieren de modificaciones caras para que puedan soldar piezas que deban tener un alineamiento angular final.



**Fig. 3.4.3**

Tipos de uniones hechas comúnmente por soldadura por fricción. Las barras, tubos y superficies de unión angulares deben ser concéntricas con el eje de rotación; las superficies a soldar de barra, tubo y placa deben ser perpendiculares al eje de rotación.

**ECONOMIA EN OPERACION Y MATERIAL.-** La soldadura por fricción puede hacerse a altos índices de producción y, por lo tanto, es económica en operación. En aplicaciones en donde la soldadura por fricción ha sustituido otros procesos de unión, el índice de producción ha sido incrementado sustancialmente. En un caso, el índice de producción se incrementó de 3 a 30 soldaduras por hora cuando la soldadura por fricción reemplazó a la soldadura por gas a presión.

También se pueden lograr ahorros en material mediante el uso de soldadura por fricción. En un ejemplo se necesitaron 3/4 de pulgada menos de material en soldadura por fricción que en soldadura por arco con presión. En otro ejemplo se ahorró considerable metal con soldadura por fricción al soldar dos piezas de acero 4140 para hacer un tornillo de cabeza cuadrada en lugar de maquinar el tornillo de una sola pieza.

Se pueden lograr ahorros substanciales en material y en tiempo de maquinado usando soldadura por fricción para unir ejes de mazas a cuerpos de rotor de gran diámetro o a otros miembros rotativos.

**RESISTENCIA DE LA SOLDADURA.-** Para la mayoría de los metales la resistencia de una unión soldada por fricción es aproximadamente la misma que la del metal base. El metal en la superficie de contacto de la soldadura está trabajado en caliente, lo que refina la estructura del grano. Durante la porción final del ciclo de soldadura, el recalado y la extrusión de rebaba asegura la remoción de metal oxidado que pudo haber sido producido durante el calentamiento. Esta rebaba generalmente aparece en el valle en la intersección de los dos recalados de la soldadura (Ver fig. 3.4.2).

Las áreas relativamente grandes sin calentar adyacentes a la unión extraen calor rápidamente de la pequeña masa de la

zona afectada por el calor, manteniendo por lo tanto una zona pequeña en la parte soldada.

**SECCIONES SOLDADAS.**- En la soldadura por fricción, la superficie a unir de cuando menos una de las piezas debe ser esencialmente redonda. La pieza giratoria deberá ser algo con céntrica en forma, porque revoluciona a una velocidad relativamente alta. Piezas de trabajo que no son redondas, como las piezas de forma hexagonal, se han soldado por fricción, pero el recalado de soldadura resultante es áspero, asimétrico y difícil de remover sin dañar el ensamble soldado. Para unas pocas aplicaciones especiales, las máquinas de soldar se han modificado de tal manera que el husillo se detiene en el mismo lugar cada vez, haciendo posible por lo tanto orientar las piezas una a la otra.

Se pueden soldar barras sólidas de acero 1018 de  $\frac{1}{2}$  a 4 pulgadas de diámetro con soldadura por fricción en las máquinas de soldar disponibles. Soldar diámetros mayores, aunque es factible, está limitado por el costo de máquina.

Se han soldado alambre y tubería de materiales iguales y distintos de 0.04 a 0.1 pulgadas de diámetro con soldadura por fricción en máquinas especiales, a placas de 0.008 a 0.08 pulgadas de espesor. Se han unido alambres de metales distin tos de 0.06 a 0.08 pulgadas de diámetro.

Secciones tubulares pueden ser mucho mayores en diámetro que la capacidad nominal de la máquina de soldar para barras sólidas. y el diámetro máximo soldable de tubo depende principalmente del espesor de la pared. Por ejemplo, una máquina capaz de soldar una barra de acero de 4 pulgadas de diámetro puede soldar un tubo de acero 1018 de 30 pulgadas de diámetro con un espesor de pared de  $\frac{3}{16}$  pulgadas. El diámetro máximo decrece a aproximadamente  $7\frac{1}{2}$  pulgadas cuando el -

espesor de la pared es de una pulgada.

El tamaño de sección que puede soldarse por fricción depende en cierta medida de la distancia que el metal plástico debe viajar para ser extruido de la superficie de contacto de la soldadura. El metal en barras sólidas debe viajar hacia afuera desde el centro de la pared.

#### Metales Soldados

La soldadura por fricción puede usarse para unir casi cualquier metal que pueda ser forjado y que no sea un buen metal tratable en seco. Los elementos de aleación que proporcionan lubricación en seco (o que no se aferran bajo condiciones de operación normal sin grasa u otros lubricantes) evitan que las superficies de contacto se calienten por fricción hasta la temperatura de soldadura. Los metales que contienen aditivos de fácil fresado son muy propensos a ser quebradizos en caliente y generalmente no son satisfactorios para soldar.

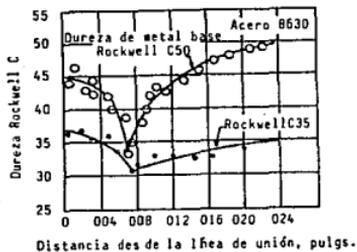
Se pueden soldar por fricción muchas combinaciones de metales similares y disímiles, y en la mayoría de las combinaciones se forma una buena liga metalúrgica. En algunas combinaciones la liga no es tan fuerte como el metal base y se puede necesitar tratamiento de calor posterior a la soldadura para desarrollar resistencia completa en la zona de soldadura en aceros aleados y en aceros inoxidable endurecibles.

**ACEROS AL CARBONO Y ALEADOS.**- Son relativamente fáciles de soldar por fricción. Aceros al bajo y medio carbono pueden soldarse bajo un amplio rango de condiciones de soldadura. Los aceros al alto carbono y aleados se unen fácil-

mente, pero las condiciones de soldadura deben ser controladas dentro de rangos más estrechos que los permisibles para soldar aceros al bajo carbono y se debe incrementar la presión axial para compensar la baja forjabilidad. El acero de alta velocidad para herramienta puede soldarse a mangos de acero al carbono y acero aleado para hacer brocas, escariadores y otras herramientas de corte. Bolas de acero hechas de acero 52100, que es normalmente difícil para soldar, se sueldan a uno o a los dos extremos de varillas de acero al carbono para hacer varillas de unión. Frecuentemente, las varillas están hechas de acero 1045 y un extremo se endurece por inducción antes que la bola de acero 52100 se suelde al extremo opuesto. Las soldaduras se templan después de soldar.

Aceros de fácil maquinado, excepto aquéllos que tienen un alto contenido de azufre y bajo contenido de manganeso se pueden soldar, pero los elementos de fácil maquinado resultan en propiedades direccionales indeseables en la zona de soldadura. Las soldaduras por fricción en aceros de fácil maquinado tienen una resistencia a la fatiga menor al 80% de la del metal base y no deberán usarse en aplicaciones donde estén involucrados altos esfuerzos y en donde se requiera alta resistencia a la fatiga. La soldadura por fricción de aceros de fácil maquinado deberá estar limitada a aquéllos con 0.08 a 0.13% de azufre, plomo o telurio. Por ejemplo, el acero 1141 se suelda satisfactoriamente, pero el 1144 no.

Los aceros tratados con calor pueden soldarse por fricción con solamente cambios localizados en dureza, porque el calentamiento se confina a una zona muy estrecha. También, el rápido enfriamiento restaura la dureza a la zona de soldadura. Por ejemplo, como se muestra en la figura 3.4.4, cuando se endurecieron barras de acero 8630 a Rockwell C 35 6 C 50, y luego se soldaron por fricción, la dureza mínima (Rockwell C 33 para el acero Rockwell C 50; Rockwell C 31 para el acero Rockwell C 35), ocurrió a aproximadamente 0.065 pulgadas de la -



**Fig. 3.4.4** Relación de la dureza del metal en la zona afectada por calor a la distancia desde la línea de unión después de soldar por fricción barras de acero 8630 con dureza de Rockwell C 35 y C 50.

línea de unión; la zona afectada por el calor se extendió - - aproximadamente 0.24 pulgadas dentro del metal base. Al soldar acero templable, el recalcado de la soldadura generalmente alcanza una gran dureza debido al rápido enfriamiento. Por lo tanto, el recalcado de soldadura generalmente debe removerse mediante esmerilado o mediante maquinado después de revenir. En algunas aplicaciones, el recalcado se remueve por coque en caliente antes de que se haya enfriado de la temperatura de soldadura a la temperatura Ms.

Los metales concrecionados se compactan más durante la soldadura por fricción y tienen una estructura forjada en la zona de soldadura. La unión generalmente es más fuerte que el metal base.

Los resultados de soldar por fricción forjas de acero y fundiciones de acero son aproximadamente los mismos que aquellos de soldar por fricción barras de acero de composición similar.

**ACEROS INOXIDABLES.-** Son comparativamente fáciles de soldar por fricción, y se pueden obtener buenas propiedades de soldadura bajo un amplio rango de condiciones de soldadura. Los aceros inoxidables tratables térmicamente son sensibles al calor y a la presión y, para buenas propiedades de soldadura requieren tratamiento de calor post-soldadura en la zona afectada por el calor. Una aplicación importante de soldadura por fricción de acero inoxidable es la producción de ejes bimetálicos que son expuestos a una atmósfera corrosiva o a degaste en servicio para proporcionar el tipo correcto de resistencia en donde se necesite, para reducir el costo del metal de trabajo o para incrementar la maquinabilidad; se puede unir una aleación que soportará una atmósfera corrosiva a un metal que sea menos caro y más fácil de maquinar.

**HIERRO FUNDIDO.**- En cualquier forma -gris, dúctil o maleable- no ha sido soldado por fricción satisfactoriamente en producción. El grafito libre se junta en las superficies de contacto y actúa como lubricante, lo que limita el calentamiento por fricción. Además, estos materiales no son forjables, lo que es un requisito general para soldar por fricción.

**METALES NO FERROSOS Y ALEACIONES.**- Las aleaciones de aluminio son soldadas por fricción a aleaciones de aluminio similares y disímiles, y aleaciones de cobre a aleaciones de cobre similares o disímiles. La mayoría de las aplicaciones de soldar por fricción estos metales se encuentran al unir aleaciones de aluminio y cobre a acero, aunque se presentan problemas por la alta conductividad térmica por grandes diferencias en temperaturas de forja y por la formación de compuestos quebradizos intermetálicos.

Las uniones entre la aleación de aluminio 6061 y cobre tienen una resistencia a la tensión cercana a la del cobre. Uniones entre la aleación de aluminio 1100 y acero inoxidable tienen una resistencia cercana a la de aleación de aluminio. La soldadura por fricción de otras aleaciones de aluminio puede desarrollar una resistencia en la unión de solamente 60 a 70% de la del metal base más débil. Aunque estas uniones son relativamente débiles, son útiles para sellos a presión y para unir ensamblajes que requieren buena conductividad eléctrica y térmica, en lugar de alta resistencia.

El titanio, aleaciones de titanio, aleaciones de circonio y aleaciones de magnesio se pueden soldar por fricción a ellos mismos.

La mayoría de aleaciones de base níquel y cobalto, incluyendo las aleaciones resistentes al calor son fácilmente soldables a ellas mismas y a aceros aleados. La aleación de -

base níquel GMR-235 puede soldarse a acero 1040, inconel - - (Aleación de níquel y cromo) 718 a inconel 713 C, e inconel - 713 C a acero 8630 para producir partes de motor jet que requieren ligas de alta resistencia.

Los metales refractarios -tungsteno, molibdeno, columbio y tántalo- pueden soldarse a sí mismos. Soldaduras por fricción entre varillas de molibdeno son lo suficientemente dúctiles para soportar una reducción substancial mediante estirado de alambre.

#### Métodos para Soldar

Existen tres métodos para unir piezas por medio de la soldadura por fricción: a) Soldadura por fricción convencional; b) Soldadura por inercia; y c) Soldadura por fricción con volante.

A) SOLDADURA POR FRICCIÓN CONVENCIONAL.- La soldadura por fricción convencional requiere una máquina parecida a un torno común equipado con un sistema eficiente de frenado por árbol, un medio de aplicar y controlar presión axial y un contador de tiempo y control del ciclo de la soldadura. El equipo es sencillo en principio, pero las máquinas son complejas cuando son lo suficientemente grandes para soldar piezas grandes.

Principio de Operación.- La pieza que se va a girar se asegura en el plato del husillo, y éste se lleva a una velocidad predeterminada. El componente no rotatorio se asegura en un plato o dispositivo montado a un cabezal móvil operado hidráulicamente. Para calentar las piezas a temperatura de soldadura, el cabezal móvil se avanza para poner las piezas en contacto bajo una presión axial constante o gradualmente in-

crementada. Cuando las piezas están en, o ligeramente arriba de la temperatura de soldadura, se aplica el freno del husillo, el que detiene repentinamente la rotación del mismo. Simultáneamente, se aumenta la presión del cabezal móvil para completar la soldadura.

La velocidad del husillo, la presión axial y el período de tiempo que la presión se aplica para una soldadura determinada depende de: a) El área de la sección transversal de las piezas a soldar; b) El punto de fusión y conductividad térmica del metal de trabajo; y c) Los cambios metalúrgicos que ocurren durante el ciclo de calentamiento, especialmente cuando se están soldando metales disímiles.

Las variables a controlar en el proceso son la velocidad rotacional, presión de calentamiento, período de tiempo - que la presión de calentamiento se aplica y presión de soldadura. El tiempo necesario para detener el husillo puede afectar la temperatura a la que las piezas se calientan, al momento de aplicación de la presión de soldadura, y a las propiedades de soldadura.

La velocidad rotacional o velocidad periférica, es la variable menos sensitiva del proceso y puede variarse en un rango amplio si el tiempo de calentamiento y la presión están ajustadas adecuadamente. Sin embargo, el tiempo de calentamiento debe limitarse para evitar una profundidad excesiva de calentamiento. La velocidad periférica recomendada para soldar la mayoría de aceros al carbono, es de 400 a 1,400 sfm.

Las presiones de calentamiento usadas para soldar aceros al bajo carbono y aceros de baja aleación son de 3,000 a 20,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. Las presiones para soldar estos aceros son de 5,000 a 25,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. Generalmente, la presión de soldar es mayor que la de calentamiento, pero algunas veces son

casi iguales.

Para aceros al medio y alto carbono las presiones de calentamiento son de 10,000 a 30,000 lbs/pulg<sup>2</sup> y las presiones de soldar son de 15,000 a 60,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. Algunas veces se usan presiones de calentamiento más bajas para piezas grandes de tal manera que los requerimientos de poder no excedan la capacidad de la máquina soldadora.

El tiempo de calentamiento varía con la presión de calentamiento, el contenido de carbono y de aleación del acero, y el diámetro de la pieza. Generalmente el tiempo de calentamiento se determina por tanteo.

El husillo deberá detenerse rápidamente para evitar que la soldadura se rompa o tuerza. Para una pieza con un diámetro menor de media pulgada, el tiempo de paro deberá estar dentro de 1 ½ segundos; una barra de 3 pulgadas de diámetro deberá detenerse dentro de 3 segundos.

B) SOLDADURA POR INERCIA.- La soldadura por inercia hace uso de la energía cinética de un cuerpo que gira libremente para obtener el calentamiento requerido para producir una soldadura.

Máquina de Soldar.- La máquina se construye con una cama horizontal y barras separadoras arriba que contienen las reacciones de presión axial y par motor, y para asegurar el alineamiento husillo-cama. El husillo es movido por un motor hidrostático mediante una transmisión de engranaje de cambio. Un cabezal móvil impulsado hidráulicamente se retira sobre vñas ajustables para cargar y descargar. Se puede unir una prensa autocentable al cabezal móvil para sujetar partes cilíndricas y se utilizan dispositivos para sujetar partes asimétricas para las que la prensa no es adecuada. El husillo -

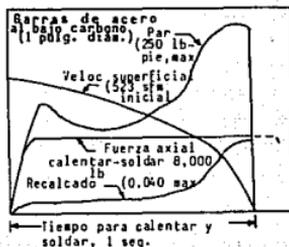
tiene un medio para montar una boquilla de quijadas convergentes y se usa una barra para abrir y cerrar la boquilla.

El tamaño del volante (momento de inercia del volante o de husillo) se ajusta añadiendo o retirando discos del volante. La velocidad de husillo y la presión axial se ajustan con carátulas con el tablero de control.

Principio de Operación.- En la soldadura por inercia, como en la soldadura por fricción convencional, una pieza se sujeta en una prensa que no gira o en un dispositivo, y la otra se sujeta en un plato montado en un husillo giratorio.

El motor de propulsión acelera la rotación del ensamble volante-husillo a una velocidad predeterminada y luego el poder propulsor de rotación se cierra. Las superficies a soldar se juntan, y la energía cinética del volante girando libremente se convierte rápidamente en calor en las superficies de contacto de la soldadura al aplicarse la presión axial. Una vez que se han establecido para una pieza dada la presión axial, el momento de inercia del volante y la velocidad del husillo, se producen repetitivamente soldaduras uniformes.

En la fig. 3.4.5 se ilustran dos características de la soldadura por inercia: velocidad superficial de la pieza continuamente decreciente y par motor continuamente cambiando en las superficies de contacto de la soldadura. La velocidad de la superficie empieza en algún valor inicial y decrece a lo largo de una curva esencialmente parabólica a cero, tiempo en el cual la soldadura se completa. El tiempo de calentamiento y soldadura es generalmente de 0.2 a 4 segundos. El par motor tiene un valor pico de corta duración al inicio del ciclo, decrece gradualmente, y luego aumenta hasta que la velocidad ha disminuido al valor al cual la soldadura empieza, tiempo en el cual el par aumenta agudamente. Este par alto está acompa-



**Fig. 3.4.5** Variación de la velocidad superficial, par, fuerza axial y recalado de soldadura en un tiempo - de un segundo para calentar y soldar en soldadura por inercia.

ñado por forjado en la zona de soldadura y es responsable de mucho del recalado. La fase de par alto, presente solamente en la soldadura por inercia, refina la estructura de grano y expulsa cualquier óxido en las superficies de contacto de la soldadura. La parte gradualmente decreciente y aumentante de la curva del par es esencial para la formación de buenas soldaduras. La segunda fase (par bajo) generalmente no se desarrollará si la velocidad inicial es demasiado baja. La figura 3.4.5 es típica de la soldadura por inercia de barras de acero al bajo carbono de una pulgada de diámetro.

Otras diferencias entre la soldadura por inercia y la soldadura por fricción convencional son el poder de alimentación en las superficies de contacto de la soldadura, y el tiempo de calentamiento. El poder necesario para la soldadura misma no importa en la soldadura por inercia porque cualquiera que sea el poder que se necesite, siempre puede ser suministrado mediante desaceleración del volante al índice requie-

rido. En la soldadura por fricción convencional el poder está limitado por el tamaño del motor impulsor.

El alto poder usado en la soldadura por inercia es un resultado de una presión axial relativamente alta rápidamente aplicada. Las demandas de poder en la soldadura por fricción convencional están controladas y limitadas a la capacidad del motor aplicando la presión axial lentamente; generalmente, - transcurren de 2 a 4 segundos antes de que se aplique toda la presión. Los índices de calentamiento más bajos de la soldadura por fricción convencional requieren más energía porque mucho del calor se conduce lejos de las superficies de contacto de la soldadura. Mediante aplicación rápida de pequeñas cantidades de energía, la soldadura por inercia produce zonas afectadas por el calor más estrechas que aquellas producidas en la soldadura por fricción convencional.

En la soldadura por inercia, el intenso trabajo en caliente de la zona de soldadura en conjunción con un rápido enfriamiento inmediatamente después del trabajo en caliente resulta en un tamaño de grano muy pequeño en la condición de como soldado. Un calentamiento subsecuente restaurará los granos a su tamaño normal.

Variables del Proceso.- Tres variables controlan las características de una soldadura por inercia: velocidad periférica inicial de la pieza rotatoria, presión axial y el tamaño del volante (momento de inercia).

Para cada soldadura la alimentación mínima de energía requerida se proporciona usando la combinación adecuada de tamaño de volante y velocidad del husillo. Se puede necesitar energía adicional si las superficies a soldar están ásperas o desiguales con el eje de rotación. Una alimentación de energía muy alta provoca pérdida excesiva del metal, pero generalmente no afecta la resistencia o calidad de la soldadura.

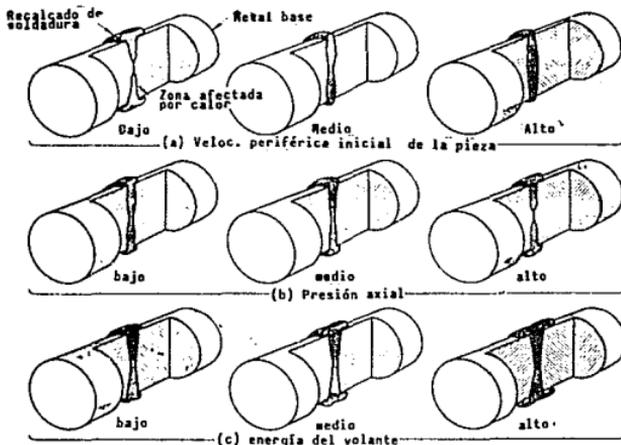
La tabla 3.4.1 da condiciones representativas para soldadura por inercia de barras de 1 pulgada de diámetro de varios metales y aleaciones, en combinaciones semejantes y disímiles.

Tabla 3.4.1 Condiciones para soldar por inercia barras de 1 pulgada de diámetro en combinación de metales similares y disímiles.

METAL DE TRABAJO	CONDICIONES DE SOLDADURA			CONDICIONES RESULTANTES DE SOLDADURA			
	Velocidad del husillo, rpm.	Fuerza axial, lb.	Tamaño del volante, (lb-pie <sup>2</sup> )(a)	Energía de soldadura, pie-lb	Metal perdido, pulgs. (b)	tiempo total, segs. (c)	
<b>METALES SOLDADOS A ELLOS MISMOS</b>							
Acero 1018.....	4600	12,000	6.7	24,000	0.10	2.0	
Acero 1045.....	4600	14,000	7.8	28,000	0.10	2.0	
Acero 4140.....	4600	15,000	8.3	30,000	0.10	2.0	
Inconel 718.....	1500	50,000	130.0	50,000	0.15	3.0	
Acero Maragente.....	3000	20,000	20.0	30,000	0.10	2.5	
Acero inox. tipo 410.....	3000	18,000	20.0	30,000	0.10	2.5	
Acero inox. tipo 302.....	3500	18,000	14.0	30,000	0.10	2.5	
Cobre comercialmente puro....	8000	5,000	1.0	10,000	0.15	0.5	
Aleación de cobre 260.....	7000	5,000	1.2	10,000	0.15	0.7	
Aleación de titanio Ti-6Al-4V	6000	8,000	1.7	16,000	0.10	2.0	
Aleación de aluminio 1100.....	5700	6,000	2.7	15,000	0.15	1.0	
Aleación de aluminio 6061....	5700	7,000	3.0	17,000	0.15	1.0	
<b>COMBINACIONES DE METALES DISÍMILES</b>							
Cobre a acero 1018.....	8000	5,000	1.4	15,000	0.15	1.0	
Acero p/hta M2 a acero 1045..	3000	40,000	27.0	40,000	0.10	3.0	
Aleación de níquel 718 a acero 1045.....	1500	40,000	130.0	50,000	0.15	2.5	
Acero inoxidable tipo 302 a acero 1018.....	3000	18,000	20.0	30,000	0.10	2.5	
Acero superaleado de alto carbono 1018.....	4600	12,000	8.3	30,000	0.10	2.5	
Aluminio 6061 a acero inox. tipo 302.....	5500	5000 E	15,000(d)	3.9	20,000	0.20	3.0
Cobre a aleación de aluminio 1100.....	2000	7,500	11.0	7,500	0.20	1.0	

(a) Momento de inercia del volante, (b) Encogimiento axial total de las piezas durante la soldadura, (c) Incluye tiempo de calentamiento y de soldadura, (d) La fuerza de 5,000 lb se aplica durante la etapa de calentamiento de la soldadura; la fuerza se incrementa a 15,000 lb cerca del final de la soldadura.

**Velocidad Periférica de la Pieza.**- Para cada combinación de metales de trabajo, hay un rango de velocidad periférica que produce las mejores propiedades de soldadura. Para soldar acero a acero, la velocidad periférica inicial recomendada de la pieza varía de 500 a 1,500 sfm; sin embargo, se pueden hacer soldaduras a velocidades tan bajas como 275 sfm. Como se ilustra en la figura 3.4.6 (a), velocidades bajas (menos de 300 sfm) pueden reducir el calentamiento en el centro y producir un recalco áspero y disparejo. A velocidades medias (300 a 900 sfm) el patrón de calentamiento en acero tiene una forma de reloj de arena en el valor más bajo y gradualmente se aplanan al irse aproximando a la velocidad superior. El patrón de calentamiento es esencialmente plano y uniforme en espesor a través de la pieza a velocidades de 900 a 1,200 sfm. A una velocidad inicial alta (arriba de 1,200 sfm), la soldadura se redondea y es más ancha en el centro que en la periferia.



**Fig. 3.4.6** Efectos de niveles bajo, mediano y alto de las tres variables de soldadura en la profundidad y uniformidad del calentamiento, y en el tamaño y forma del recalco de soldadura en la soldadura por inercia de acero.

Velocidades del husillo en rpm para soldar por inercia barras de 1 pulgada de diámetro de varios metales y aleaciones se dan en la tabla 3.4.1. La relación de tiempo total y recalcado de soldadura al diámetro de la barra es aproximadamente lineal.

Presión Axial.- El efecto de variar la presión axial es similar pero opuesto al efecto de variar la velocidad. Como muestra la figura 6 (b), soldaduras hechas a una presión axial baja parecen soldaduras hechas a velocidad media en relación a la formación de recalcado de soldadura y zonas afectadas por el calor. El uso de presión excesiva produce una soldadura que es pobre en el centro y tiene una gran cantidad de recalcado, similar a una soldadura hecha a baja velocidad.

La fuerza axial (en lbs) para soldar barras de 1 pulgada de diámetro se da en la tabla 3.4.1. La presión (lbs/pulg<sup>2</sup>) varía como una función de la raíz cuadrada del diámetro de la pieza. Por ejemplo, una barra de dos pulgadas de diámetro utiliza 1.414 veces la presión axial necesaria para una barra de una pulgada de diámetro.

Efecto de la Energía del Volante.- El momento de inercia del volante se selecciona para producir la cantidad deseada de energía cinética y la cantidad deseada de forja. El forjado resulta del aumento característico en par, que ocurre en las superficies de contacto de la soldadura al disminuir la velocidad del volante y llegar al descanso. Este par incrementado, en combinación con la presión axial produce forjado como se presenta en la curva de recalcado en la figura 3.4.5. Debido a que el forjado empieza a una velocidad crítica (aproximadamente 200 sfm para acero al bajo carbono), la cantidad de forjado depende de la cantidad de energía que permanece en el volante, la cual es una función lineal del momento de inercia del volante. Volantes grandes, de baja velocidad,

producen más forjado que volantes pequeños de alta velocidad, aunque contienen la misma cantidad de energía cinética. Aunque cantidades bajas, medias y grandes de energía del volante producen patrones similares de calentamiento, la cantidad de energía afecta grandemente el tamaño y forma del recalcado de soldadura, como se muestra en la figura 3.4.6 (c).

Ejemplos: La soldadura por inercia se usa en la manufactura de válvulas de escape bimetálicas para máquinas de combustión interna, ejes bimetálicos para bombas y para trenes de engranajes y coronas para aplicaciones automotrices y de aviación. El proceso se ha incorporado en el rediseño de muchas partes para reducir costos o mejorar la vida de servicio.

C) SOLDADURA POR FRICCIÓN CON VOLANTE.- La soldadura por fricción con volante se hace con una máquina en la que se almacena y libera energía mecánica en cantidades predeterminadas y medidas por la velocidad del volante. La cantidad de energía liberada por el volante se determina por su velocidad cuando la presión axial se aplica por primera vez, y por la velocidad a la cual el clutch desembraga el husillo del motor.

En la operación, se sujeta una pieza en una boquilla de quijadas convergentes montada al husillo y se embraga el clutch, lo que causa que la pieza sea girada a una velocidad predeterminada. La pieza complementaria se sujeta en el cabezal móvil, y luego es puesta en contacto con la pieza giratoria y se aplica presión para calentar las piezas. En un tiempo o velocidad de husillo predeterminados el clutch se desembraga y se aplica una presión de soldadura para detener la rotación y completar la soldadura. Después de que el volante se libera, la presión de calentamiento puede continuarse o se puede aplicar la presión de soldadura inmediatamente. Por lo tanto, se pueden usar tanto energía mecánica como energía ci-

nética para calentar las piezas a la temperatura de soldadura, aunque la máquina se diseña con la intención que todo el calor se derive de la energía cinética del volante girando libremente, y nada por energía mecánica directa.

Las variables en la soldadura por fricción con volante son la velocidad rotacional, tamaño del volante, velocidad de cortocircuito y presión axial. Los efectos de cada variable - (excepto de la velocidad de cortocircuito) sobre la soldadura, son los mismos que en la soldadura por inercia. La continua rotación del ensamble transmisión-motor-volante hace casi inmediatamente disponible la energía para soldar tan pronto como las piezas se colocan en las boquillas o dispositivos.

#### Diseño de la Unión

La mecánica de la soldadura por fricción restringe su uso a soldaduras planas y angulares a tope que sean perpendiculares y concéntricas con el eje de rotación. Las soldaduras planas son las más comunes y se pueden clasificar como sigue: a) barra a barra; b) barra a tubo; c) tubo a tubo; d) barra a placa; y e) tubo a placa; como se muestran en la figura 3.4.3. Estas clasificaciones se refieren a la unión misma y no a la forma de las partes.

CONDICIONES DE LA SUPERFICIE DE LA UNIÓN.- Condiciones tales como el acabado de la superficie, cuadratura y limpieza, no son críticas para la soldadura por fricción porque las superficies originales a tope son rebajadas y extruidas en el proceso. Se aceptan superficies forjadas, cortadas con gas, con abrasivo o con segueta, pero se necesita calor extra para remover irregularidades y permitir que ocurra un calentamiento uniforme. También, si la cara de una pieza no es perpendicular al eje de rotación, se producen fuerzas que pueden afec

tar la concéntrica de los componentes después de la soldadura.

Los bordes dejados por herramientas de corte no presentan problema y, en algunas aplicaciones, incluso pueden ayudar a calentar el centro de la barra. Sin embargo, se deben evitar agujeros de broca en el centro; cuando el metal recalcado comprime al aire atrapado en un agujero de broca en el centro durante el recalcado generalmente ocurre un defecto de soldadura.

Costras pesadas, placas de cromo, o capas delgadas carburizadas actúan como superficie de soporte y no pueden ser extruidas del área de soldadura. Cuando se van a soldar piezas hondamente carburizadas, la superficie de unión y las superficies adyacentes deben maquinarse antes de soldar (o antes de templar, si esto precede a la soldadura), para remover el metal carburizado, o encobrizarse o cubrirse de alguna otra manera durante la operación de carburizado para evitar que se carburicen en zonas no deseadas.

**SOLDADURAS TUBULARES.**- Las soldaduras tubo-placa no son tan fuertes como las tubo-tubo, porque el redondeado del extremo del tubo durante el calentamiento y recalcado reduce la efectividad de la soldadura. La vida de fatiga de una soldadura tubo-placa aumenta con la remoción de la mella aguda en la base del tubo antes de que se ponga la pieza en uso. En algunos metales, cuando el calentamiento es demasiado lento, o cuando se aplica energía de soldadura excesiva, el metal recalcado fluye arriba y alrededor del exterior del tubo y forma, en efecto, un tubo dentro de un tubo.

En soldaduras tubulares, el recalcado se extruye equitativamente hacia el interior y hacia la periferia. Cuando no se puede permitir que el recalcado de soldadura permanezca en

el interior, y no puede alcanzarse para removerse después de la soldadura, se debe introducir una trampa en el diseño de la unión.

UNIONES ANGULARES.- (Ver figura 3.4.3). Se usan para soldar el diámetro interior de un componente al diámetro exterior de otro -por ejemplo, para soldar la ceja de un ventilador de motor de jet a la ceja de la sección de la masa-.

La unión puede hacerse donde un respaldo biselado pueda acoplarse con un interior igualmente biselado en la ceja. Las superficies de uniones angulares deben tener ángulos iguales y el interior ahusado en el componente exterior debe tener resistencia suficiente para soportar la presión axial requerida para hacer la soldadura.

Las uniones angulares generalmente se diseñan con caras de  $30^\circ$  a  $45^\circ$  de la línea del centro (un ángulo comprendido de  $60^\circ$  a  $90^\circ$ ) para evitar que una parte sea empujada a través del orificio en la otra parte. Algunas aleaciones de base níquel han sido soldadas usando ángulos más pequeños.

DISEÑO PARA BALANCE DE CALOR.- Cuando se sueldan por fricción dos metales similares, o disímiles, pero que tengan aproximadamente la misma temperatura de forja y conductividad térmica, no hay restricciones en la relación del área de sección transversal de una barra o tubo al tamaño de la placa a la cual se suelda. Índices de calentamiento tan altos como  $100,000^\circ\text{F}$  ( $55,538^\circ\text{C}$ ) por segundo hacen al ciclo de soldadura muy corto y mantienen las pérdidas de calor al metal frío en la placa adyacente a la soldadura muy bajas. Por lo tanto, soldaduras barra-placa y tubo-placa son factibles para unir combinaciones de metales similares y algunas disímiles.

Al soldar metales disímiles con temperaturas de forja y

conductividades térmicas muy distintas, puede ser necesario - un ajuste de tamaño o área adyacente a las superficies de contacto de la soldadura en una de las piezas. Las diferenciales del área deben ser determinadas experimentalmente, porque cada metal reacciona en forma diferente. Por ejemplo, para soldar una flecha de aleación de base níquel de una pulgada de diámetro, a una flecha de aleación de acero, la flecha de aleación de acero deberá ser de 1/6 a 1/8 de pulgada de diámetro mayor que la aleación de base níquel. Si los componentes son tubos, el diámetro interior del tubo de aleación de acero deberá ser de 1/16 a 1/8 de pulgada menos que aquél del tubo de aleación níquel. Por lo tanto, el tubo de aleación de acero tendría un diámetro interior más pequeño y un mayor espesor de pared y diámetro exterior que el tubo de aleación níquel. Al hacer un punzón, un mango de acero para herramienta puede soldarse fácilmente a un cuerpo de acero para herramienta usando una unión barra a placa, pero si el mango se cambia a acero aleado, el cuerpo de acero para herramienta debe modificarse para producir una unión barra a barra.

Cuando se suelda un tubo a una placa delgada con un orificio del mismo diámetro que el diámetro interior del tubo, el orificio en la placa frecuentemente se hace más pequeño que el diámetro interior del tubo para evitar calentamiento excesivo de la placa alrededor del orificio. Esta dificultad no ocurre con placas gruesas porque el metal alrededor del orificio no se calienta de lado a lado.

DISEÑO PARA EL FLUJO DEL RECALCADO DE SOLDADURA.- En aplicaciones donde no es deseable la presencia de recalco de soldadura en una o más superficies del metal de trabajo, y en donde el recalco no puede removerse después de soldar, se pueden incorporar trampas dentro del diseño de la unión, para proporcionar un claro para el flujo del metal de soldadura de las superficies de contacto. Cuando se suelda una placa

a una flecha que pasa a través de un orificio en la placa o una protuberancia en una pieza que se extiende dentro de un orificio en la otra pieza, se debe proveer un claro suficiente para evitar fricción de la flecha o protuberancia en contra de las superficies adyacentes. La fricción de superficies adyacentes paralelas al eje de rotación utiliza la energía del volante impredeciblemente y disminuye la reproductibilidad de la soldadura.

Diseños típicos de trampas para recalado de soldadura se muestran en la figura 3.4.7. En la figura 3.4.7a y 3.4.7b, se muestra un ensamble de una flecha con cabeza y una placa. En 3.4.7a el recalado de la soldadura no podía tolerarse en la superficie de la placa opuesta a la unión y no podía removerse después de la soldadura. Un ensanchado en el orificio en la placa, extendiéndose hacia adentro de la superficie de unión de la placa, sirvió como una trampa para el recalado de soldadura, al cual se le permitió fluir alrededor de la cabeza de la flecha. En la figura 3.4.7b no se permitió recalado de la soldadura en la superficie de unión de la placa y se formó la trampa en la cabeza de la flecha. Una superficie en la cabeza tocó la placa al cesar la rotación y proyectó un sello.

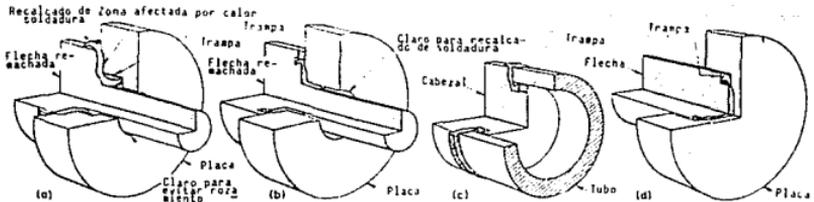


Fig. 3.4.7 Recesos usados como trampas para recalado de soldadura en uniones soldadas por fricción.

En la figura 3.4.7c se muestra una soldadura del extremo de cabecera a un tubo. Se obtuvo una unión interna fuerte, libre de metal de soldadura haciendo la trampa en la saliente en el extremo de la cabecera. En la figura 3.4.7d el paso en el extremo de la unión de la flecha proporcionó la trampa para el recalco de soldadura, dejando la esquina exterior, formada por la intersección de la placa y la flecha, libre de metal de recalco.

Partes que requieren recesos internos o cámaras difíciles de maquinar pueden hacerse uniendo dos partes especialmente diseñadas y maquinadas. La remoción de recalco de soldadura de las superficies interiores de tales partes es difícil; por lo tanto, la unión debe diseñarse con una trampa para que el recalco de soldadura no pueda formarse en la superficie interna.

DISENO PARA TAMAÑO DE MAQUINA.- La cantidad de energía necesaria para soldar por fricción depende parcialmente de la distancia que el metal debe ser extruido desde el punto más interno de las superficies de contacto de las piezas. Por lo tanto, se requiere más energía de soldadura por pulgada cuadrada de área de soldadura, para unir dos barras de una pulgada de diámetro que para unir una barra de una pulgada de diámetro a un tubo de una pulgada de diámetro. Las uniones son de resistencia casi igual, porque el metal en el centro de la barra está cerca del eje neutral y contribuye muy poco a la resistencia torsional o para doblar.

Algunas uniones pueden diseñarse con un alivio central en una o en ambas piezas para eliminar el metal que no trabaja, pero que es difícil de soldar, en el centro. Esto también puede permitir que la parte se suelde en una máquina de menor capacidad, o que se reduzca la duración del ciclo de soldadura. El tamaño del alivio central debe ser lo suficientemente

grande para que la compresión del aire entrampado no cause - un defecto de soldadura y para proporcionar espacio adecuado para el recalco de soldadura.

Similarmente, se puede rediseñar una unión barra a placa como una unión tubo a placa o unión barra a barra si es - deseable llevarla al rango de capacidad de una máquina particular. Una unión barra a barra requiere menos energía que - una unión barra a placa.

#### Control de Calidad de la Soldadura

La inspección de soldaduras por fricción generalmente consiste de un examen visual del recalco de soldadura y de una medición de la longitud total del ensamble para determinar la variación en acortamiento axial de los miembros durante la soldadura.

La variación en acortamiento axial, o pérdida de metal, es una buena indicación de la calidad de la soldadura. Debido a que la velocidad rotacional y el calentamiento y las - presiones de soldadura son fácilmente controlables dentro de límites estrechos, generalmente la cantidad de pérdida de metal está dentro de  $\pm 5\%$  del valor nominal.

Por lo tanto, cuando las longitudes de las piezas se - mantienen en tolerancias estrechas, la variación esperada en la longitud total del ensamble soldado puede calcularse utilizando las tolerancias de las piezas y el recalco de la - soldadura. La cantidad nominal de pérdida de metal puede determinarse al hacer pruebas para establecer las condiciones de soldadura.

Frecuentemente, se usan pruebas de tensión, impacto, -

fatiga o doblez para checar la calidad de la soldadura. También se realiza seccionamiento para examen a microscopio y para pruebas de dureza en muestras de prueba o en partes de producción seleccionadas al azar.

Se ha utilizado probar los ejes soldados de bombas doblando apenas lo suficientemente para causar una ligera cedería en la zona de soldadura. Se descubren las soldaduras defectuosas pero no se hace daño a las soldaduras satisfactorias. Se puede hacer inspección con partículas magnéticas en partes de acero después de que se ha removido el recalco de soldadura.

#### Soldadura por Fricción contra otros Procesos

La soldadura por fricción puede reemplazar o completar otros procesos de manufactura para reducir el maquinado y los costos de material, para permitir el uso de metales de trabajo que satisfagan los requerimientos de aplicación y, para proporcionar uniones confiables.

### 3.5 SOLDADURA ULTRASONICA

#### Descripción

Es un proceso en estado sólido donde se produce coalescencia mediante aplicación concentrada de energía vibratoria de alta frecuencia a las piezas de trabajo mientras que están sujetas bajo presión. Las vibraciones arriba de las frecuencias que el humano puede oír, rompen las películas superficiales y provocan que los metales sólidos se unan fuertemente. Los componentes básicos del proceso se muestran en la figura 3.5.1. Aunque hay cierto aumento de la temperatura en las superficies a unir, siempre es mucho menor que los puntos de fusión de los materiales. Parece que las rápidas inversiones de esfuerzos sobre las superficies de contacto de la unión juegan un papel importante al facilitar la coalescencia rompiendo y dispersando las películas en las superficies que se unen.

El transductor (o transductores) electrónico utilizado es esencialmente el mismo que el empleado en el maquinado de ultrasonido, y convierte la potencia eléctrica de alta frecuencia a vibración mecánica de la misma frecuencia (esto es generalmente entre 10,000 y 75,000 hertz o ciclos por segundo). Está acoplado a un sistema sensible a la fuerza que contiene en un extremo una punta para soldar. Las piezas a soldar se colocan entre esta punta y un yunque reflector, concentrando por lo tanto la energía vibratoria en el trabajo. Se pueden utilizar puntas estacionarias para puntear o discos rotatorios para soldaduras de costura.

#### Aplicaciones

La soldadura ultrasónica se utiliza para unir materiales delgados, como placa, lámina y alambre; el máximo espesor a soldar es aproximadamente una pulgada para aluminio y 13/32

pulgada para materiales más duros. Se pueden soldar láminas delgadas a secciones gruesas. Para punteo, los metales se unen y se aplica una vibración lateral o transversal al ensamble, como se muestra en las figuras 3.5.1 y 3.5.2. Como se indica en la tabla 3.5.1, el proceso es particularmente valioso ya que numerosos materiales disímiles pueden unirse fácilmente mediante este proceso. Debido a que las temperaturas involucradas son bajas, y no está involucrado flujo de corriente y no hay arco, rara vez se forman compuestos intermetálicos y no hay contaminación de las áreas alrededor.

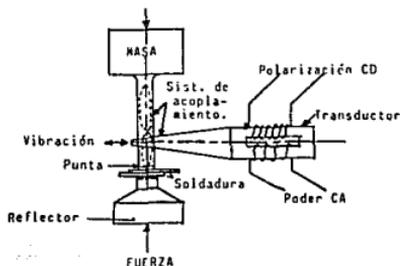
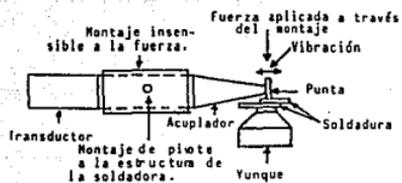


Fig. 3.5.1 Diagrama esquemático del equipo usado en soldadura ultrasónica. Vibración transversal al ensamble.



**Fig. 3.5.2 Principio de vibración lateral en soldadura ultrasónica.**



### Ventajas

- No existe distorsión por calor en las partes.
- No se requieren metales de relleno ni fundentes.
- Las presiones utilizadas son menores, y los tiempos de soldadura son más cortos que los usados en la soldadura por resistencia.
- El equipo es sencillo y confiable y sólo se requiere una habilidad moderada de parte del operador.

### Desventajas

- No es económicamente competitivo cuando se pueden utilizar otros procesos.

### 3.6 SOLDADURA POR EXPLOSION

#### Descripción

Este proceso se usa principalmente para unir placas de metales resistentes a la corrosión a placas más pesadas de metales base (revestimiento de acero inoxidable), especialmente donde están involucradas grandes áreas. Un material explosivo, generalmente en forma de lámina, se coloca arriba de las dos capas de metal y se detona progresivamente. Una onda compresiva de esfuerzos del orden de miles de megapascales avanza a lo largo de las superficies de las placas, de manera que se forma un pequeño ángulo abierto entre las dos superficies que chocan. Las películas de superficie son licuadas o rebajadas de las superficies e impulsadas fuera de las superficies de contacto, dejando superficies limpias que se unen bajo la alta presión. El resultado es una soldadura fría que tiene una configuración ondulada en las superficies de contacto.

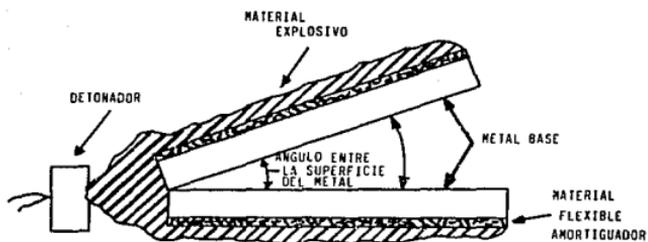
#### Aplicaciones

Este proceso se ha utilizado exitosamente para soldar - acero a acero, aluminio a aluminio, cobre a acero, acero - - inoxidable a molibdeno, y muchas otras combinaciones de metal.

#### Desventajas

Este proceso es muy peligroso; debe efectuarse únicamente por expertos en explosivos y en cámaras especialmente diseñadas o llenas de agua.

La figura 3.6.1 muestra esquemáticamente un arreglo para soldadura por explosión.



**Fig. 3.6.1** Dibujo esquemático de un arreglo para soldadura por explosión. Muestra cómo el material explosivo y la cubierta protectora se colocan sobre el metal base.

## CAPITULO 4

## SOLDADURAS POR GAS

4.1 SOLDADURA POR GAS

## Descripción

La soldadura por gas comprende un grupo de procesos de soldadura que utilizan como fuente de calor a una flama que resulta al quemarse un gas combustible y oxígeno, mezclados - en proporciones adecuadas. Normalmente el oxígeno se provee - en forma relativamente pura, pero puede en raras ocasiones, - provenir del aire. Las superficies a unir se funden progresi- - vamente mediante calor de una flama de gas, con o sin metal - de aporte, y se inducen a fluir juntas y solidificar sin - aplicación de presión a las partes que se sueldan.

Un poco después del año 1900 se desarrolló un soplete - práctico para quemar acetileno y oxígeno; esto demostró la po- - tencialidad de la soldadura e inició su desarrollo como un - proceso de manufactura. Sin embargo, la soldadura con flama - de gas ha sido ampliamente reemplazada por otros procesos de - soldadura, excepto en algunos trabajos de reparación y aplica- - ciones especiales, permaneciendo el acetileno como el princi- - pal gas combustible utilizado en el proceso. También se utili- - za hidrógeno, principalmente para soldar metales de baja fu- - sión, como aluminio, magnesio y plomo. No es aplicable para - la soldadura de espesores comunes de lámina de acero porque - produce una temperatura de flama que es demasiado baja para -

producir buena fusión; sin embargo, se ha utilizado para soldar lámina delgada, en donde su baja intensidad de combustión es una ventaja.

La combustión de oxígeno y acetileno ( $C_2H_2$ ) por medio de un soplete como el que se muestra en la figura 4.1.1 produce una temperatura de aproximadamente 6,300 °F en una reacción de dos etapas. En la primera etapa el oxígeno y acetileno provenientes de los tanques a presión reaccionan de la siguiente manera:

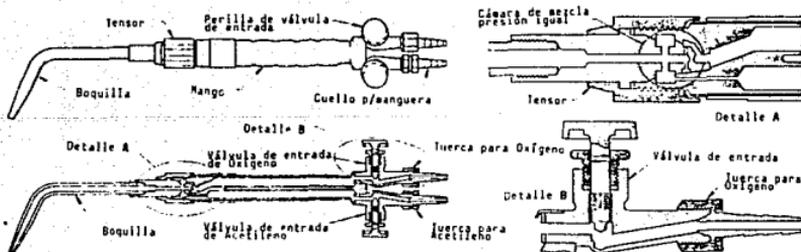
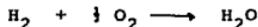


Fig. 4.1.1 Construcción general de un soplete para soldadura con oxiacetileno.

Esta reacción ocurre cerca del extremo de la punta del soplete. La segunda etapa de la reacción -combustión del CO y H<sub>2</sub>- ocurre justamente adelante de la primera zona de combustión en dos reacciones:



El oxígeno para estas reacciones secundarias se obtiene de la atmósfera. Este proceso de dos etapas produce una flama que tiene dos zonas distintas, obteniéndose la temperatura - más alta en el extremo del primer cono, como se muestra en la figura 4.1.2, donde se completa la primera etapa de la combustión. La mayor parte del proceso de soldadura se debe hacer - sosteniendo el soplete de tal manera que este punto de máxima temperatura esté completamente cerca del metal soldado. La zona exterior de la flama sirve para precalentar el material y al mismo tiempo proporciona protección contra la oxidación, - ya que se consume algo de oxígeno del aire cercano para la - combustión secundaria.



Fig. 4.1.2 Características de las flamas neutrales, oxidantes y carburizantes.

Se pueden obtener tres tipos de flama, como se muestra en la figura 4.1.2, variando la relación oxígeno-acetileno. - Si la relación es aproximadamente de 1:1 hasta 1.15, se obtiene una flama neutral. Una relación mayor produce una flama oxidante, mientras que una relación menor produce una flama carburizante. Estos mismos tres tipos de flama se pueden obtener con otros gases combustibles.

La mayor parte de soldadura se hace con una flama neutral debido a que tal flama tiene un efecto químico mínimo en la mayoría de metales calentados. Las flamas oxidantes sólo se usan al soldar algunos bronce y latones. Las flamas carburizantes se utilizan para soldar aleaciones de níquel y cobre, aceros de muy bajo carbono, unos cuantos aceros aleados, y al aplicar materiales de revestimiento duro como la estelita.

Las presiones utilizadas en la soldadura con flama de gas varían normalmente de 1 a 15 lbs/pulg<sup>2</sup>, y se usan reguladores de presión para reducir y mantener la presión deseada.

Debido a que las mezclas de acetileno y oxígeno, o aire, son altamente explosivas, se deben tomar precauciones para evitar mezclar estos gases inadecuadamente o por accidente. - Todos los accesorios del acetileno tienen rosca izquierda, mientras que los del oxígeno tienen rosca derecha.

#### Metales que se pueden Soldar por Gas

La mayoría de los metales ferrosos y no ferrosos pueden soldarse con gas, pero se debe seleccionar una mezcla de oxígeno y gas combustible que dé las características apropiadas de flama, temperatura, intensidad de transferencia de calor, y composición de la atmósfera. El oxiacetileno proporciona la intensidad de calor y la atmósfera de flama necesarias para -

soldar acero al carbono, fundiciones y otras aleaciones de hierro, aleaciones de cobre y de níquel. Aleaciones de aluminio y zinc también son soldadas con el proceso de oxiacetileno. - La soldadura por gas del acero se hace casi exclusivamente con una flama de oxiacetileno. Para soldar metales con puntos de fusión más bajos, como aluminio, magnesio, zinc, plomo y algunos metales preciosos, se utilizan hidrógeno, gas natural, propano y varios gases procesados como gases combustibles.

Excepto para plomo, zinc, y algunos metales preciosos, la soldadura con gas de metales no ferrosos requiere de fundente. Esto también se aplica a fundiciones y al acero inoxidable. Al soldar acero al carbono la flama de gas protege adecuadamente la soldadura y no se requiere fundente. El ajuste para una atmósfera correcta de la flama es importante, pero la ausencia de fundente significa que hay una variable menos que controlar.

#### Metales no Adecuados para Soldar con Gas

Son los metales refractarios (columbio, tántalo, molibdeno y tungsteno), y los metales reactivos como el titanio y el circonio.

#### Selección del Tamaño del Orificio de las Boquillas y de la Presión de Gas

Los fabricantes de sopletes proporcionan tablas que dan el tamaño del orificio de la boquilla y las presiones aproximadas de gas a utilizar para soldar diferentes espesores de metal. La tabla 4.1.1 presenta los datos de una tabla típica mostrando estas relaciones. Las presiones son aproximadas y deben ajustarse por el soldador para obtener una flama que tenga la relación correcta oxígeno-combustible y otras carac-

terísticas que puedan requerirse para las condiciones específicas del soplete y del trabajo, o que son peculiares a su estilo de trabajo.

Espesor del acero (pulg.)	Tamaño del orificio de la boquilla. Diámetro, pulgs.	Orificio No.	Presión de gas, lbs/pulg <sup>2</sup>				Consumo de acetileno pies <sup>3</sup> /h.
			Soplete in- Aceti- leno	Soplete in- oxíge- no	Soplete ordi- nario	Soplete ordi- nario	
0.010.....	0.0225	74	5	5 a 7	1	1	hasta 1
0.016.....	0.0280	70	5	7 a 8	1	1	hasta 1
0.019.....	0.0280	70	5	7 a 10	1	1	hasta 1
1/32.....	0.0350	65	5	7 a 18	2	2	1/2 a 2
1/16.....	0.0465	56	5	8 a 20	3	3	1 a 4
3/32.....	0.0465 a 0.0550	56 a 54	5	15 a 20	4	4	4 a 6
1/8.....	0.0550 a 0.0595	54 a 53	5	12 a 24	4	4	6 a 10
3/16.....	0.0595 a 0.0700	53 a 50	5	16 a 25	5	5	10 a 17
1/4.....	0.0700 a 0.0810	50 a 46	5	20 a 29	6	6	17 a 30
3/8.....	0.0810 a 0.0880	46 a 44	5	24 a 33	7	7	30 a 45
1/2.....	0.0980	40	5	29 a 34	8	8	40 a 60
5/8.....	0.1285	30	5	30 a 40	9	9	50 a 75
3/4.....	0.1285 a 0.1360	30 a 29	5	30 a 40	10	10	65 a 100
1.....	0.1540	23	5	30 a 42	12	12	85 a 140

(a) Los datos están basados en las recomendaciones de un fabricante de sopletes, excepto los datos sobre consumo de acetileno, que son rangos estimados e incluyen ambos tipos de soplete.

Tabla 4.1.1 Tamaños de orificio de boquilla, presiones aproximadas de gas, y consumo de acetileno al soldar acero en espesores de 0.010 a 1 pulgada (a).

El número de tamaño de la boquilla y el tamaño del portaboquilla no son medios precisos para comparar boquillas debido a que hay diferencias significantes entre una boquilla de las mismas dimensiones cuando se opera bajo presión positiva, y cuando se opera bajo presión de inyector. La única base de comparación válida es el volumen de combustible que pasa a través de la boquilla en una unidad de tiempo. La mayoría de las boquillas operan bajo un rango, generalmente registrado - en pies cúbicos de combustible por hora.

#### Varillas de Soldadura

El metal de relleno para soldar con gas acero al bajo carbono está disponible en forma de varillas de acero estiradas en frío, de 90 cms. de longitud, y de 1/16 a 1/4 pulg. de diámetro. Las varillas para soldar con gas otros metales se suministran en varias longitudes dependiendo de si son forjadas o fundidas.

ESPECIFICACIONES.- Las varillas de acero para soldar se han estandarizado en la especificación A5.2 de la AWS, "Varillas de hierro y acero para soldar con gas". La revisión de 1969 de esta especificación muestra tres clasificaciones de las varillas para soldar, basadas en la resistencia mínima a la tensión de 2 especímenes de prueba: uno completamente de metal de soldadura y otro de soldadura transversal, como se muestra en la tabla 4.1.2.

Clasificación	Resistencia mínima a la tensión, lbs/pulg. <sup>2</sup>	Elongación mínima en 4D, %
RG65	67,000 (b)	16
RG60	60,000 (b)	20
RG45	45,000 (c)	

**TABLA 4.1.2 Clasificación de las varillas para soldar.**

La especificación comprende la composición química de las varillas de soldar solamente al grado de limitar el azufre y fósforo de 0.040% máximo, y el aluminio, si existe, a 0.02% máximo. Por lo tanto, varillas de soldar de diferentes fabricantes pueden variar considerablemente en composición química.

Las varillas de acero para soldar con gas no tienen recubrimiento de fundente, y la soldadura fuera de posición depende únicamente de la habilidad del soldador. En ausencia de recubrimientos de fundentes las propiedades del metal de aporte dependen de la composición química de la varilla de soldar, del control de la atmósfera para soldar y de las técnicas empleadas para asegurar la mezcla del metal base y de relleno.

TECNICAS DE DEPOSICION.- Las propiedades especificadas para las varillas RG65, RG60 y RG45, se obtienen soldando en una atmósfera neutral o con una atmósfera con un poco de exceso de acetileno. (Propiedades mecánicas).

Al soldar con gas con varillas se puede usar técnica directa o técnica inversa. Aunque una agitación excesiva del charco de soldadura es generalmente indeseable, se puede usar una agitación controlada para ayudar a mezclar los metales base y de relleno y, por lo tanto, para asegurar las propiedades deseadas en el metal de soldadura.

REFORZAMIENTO DEL METAL DE SOLDADURA.- La capacidad para controlar las propiedades de la soldadura mezclando metal base y metal de relleno quiere decir que la selección de la varilla de soldadura puede influenciar la resistencia de la soldadura en un grado considerable como se describe a continuación: soldaduras completamente reforzadas en tubos de pared delgada de metal tipo 4130, soldadas con una varilla RG45, mostraron consistentemente resistencias a la tensión de 90,000

a 100,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. Cuando las soldaduras se hicieron con varillas RG60, las resistencias incrementaron a 100,000 - 125,000 lbs/pulg<sup>2</sup>, y con RG65 se lograron resistencias tan altas como 145,000 lbs/pulg<sup>2</sup>, cuando la unión se trató con calor después de soldar.

Las varillas para soldar de la clase RG65 tienen una composición de acero de baja aleación y se usan para soldar con gas aceros al carbono y aceros de baja aleación que tienen resistencias de 65,000 a 75,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. Se usan en lámina, placa, tubos y tubería. Estas varillas dan las resistencias más altas al soldar aceros aleados 4130, 4340 y 8630, cuando se usa el principio de mezclado anteriormente descrito del metal de relleno. El uso final tiene un marcado efecto en la selección. Por ejemplo, si el metal base se seleccionó para cumplir una aplicación específica resistente a la corrosión o al calor, el metal de relleno deberá ser de composición similar. Por otro lado, si el principal requisito es una propiedad mecánica a temperatura ambiente, la base de la selección será la resistencia y la ductilidad del metal de relleno.

Las varillas para soldar de la clase RG60 son probablemente las más ampliamente utilizadas. Generalmente son de acero de baja aleación y se prefieren para la soldadura con gas de aceros al carbono y aceros de baja aleación en el rango de resistencia a la tensión de 50,000 a 65,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. La clase RG60 se usa más comúnmente para propósitos tales como soldar tuberías de acero al carbono para plantas de fuerza.

Las varillas para soldar de la clase RG45 tienen una composición simple de acero al bajo carbono. Estas varillas pueden usarse para soldar con gas aceros de baja aleación.

## Fundentes

No se utiliza fundente alguno en las soldaduras con gas del acero. Se utilizan fundentes en la soldadura con gas de - hierro fundido, acero inoxidable y para la mayoría de metales no ferrosos que no sean plomo, zinc y algunos metales preciosos.

## Posiciones para Soldar y Técnicas

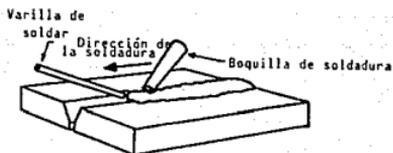
Se usan técnicas directa e inversa en soldadura por gas, y se emplean las posiciones comunes para soldar: horizontal, vertical, plana, y sobre la cabeza. Las técnicas varían en - cierto grado para diferentes espesores de unión, posiciones - de soldar y preferencias del soldador.

En la soldadura directa, ilustrada en la figura 4.1.3a, la flama se dirige hacia adelante de la soldadura completada, en la dirección de la soldadura, sosteniéndose el soplete a - aproximadamente  $45^\circ$  a la pieza de trabajo. La varilla de soldar se sostiene en un ángulo de aprox.  $40^\circ$  a la pieza, estando la flama entre el extremo de la varilla y la soldadura. El cono interior de la flama se mantiene cerca del trabajo, pero sin tocarlo. El soplete se mueve de lado a lado de tal manera que la flama calienta la varilla de soldar, las orillas a sol dar adelante de la flama, y el metal de soldadura. La varilla puede ser oscilada en una dirección contraria al movimiento - de lado a lado del soplete. Tanto la punta de la varilla como el charco de soldadura deberán mantenerse bajo la influencia protectora de la flama.

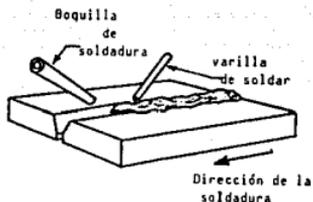
La técnica directa requiere una manipulación cuidadosa para evitar la fundición excesiva del metal base, lo que re-- sulta en mezcla considerable del metal base y del metal de re

lleno. La influencia del metal base sobre las propiedades del metal de soldadura puede ser muy grande.

En la técnica inversa ilustrada en la figura 4.1.3b, la flama se dirige hacia la soldadura completada. La punta de la varilla de soldar se mantiene entre la flama y la soldadura - en un ángulo de aprox.  $40^\circ$  a la pieza de trabajo, y el soplete a aprox.  $50^\circ$  a la pieza.



a) Soldadura directa.



b) Soldadura inversa.

Fig. 4.1.3 Dos técnicas básicas para la manipulación de la boquilla de soldadura y de la varilla en soldadura por gas.

La varilla y el soplete generalmente se oscilan en direcciones opuestas. Debido a que generalmente hay menos movimiento de lado a lado de la flama y menos fusión de las orillas de unión, una soldadura inversa es más probable que retenga las propiedades del metal de relleno sin ser alteradas por el metal base. También hay menos agitación del charco de soldadura, mejor protección del metal de soldadura por la flama, y enfriamiento más lento de la soldadura que en la soldadura directa.

La soldadura inversa a menudo se prefiere en relación -

a la directa para uniones en metales lo suficientemente gruesos para requerir orillas chaflanadas. Se pueden usar canales más pequeños porque la flama no necesita moverse alrededor de la varilla para fundir las orillas del canal. Los que proponen esta técnica creen que ahorra tiempo, metal de relleno, oxígeno y acetileno. Para evitar solapaduras frías e inclusiones de óxido en la raíz de la soldadura, la flama deberá ser dirigida principalmente a la sección más pesada y continua del metal base al hacer una soldadura de filete con la técnica inversa.

POSICIONES PLANA Y HORIZONTAL.- Soldar con gas en las posiciones plana y horizontal presenta pocos problemas. Sin embargo, cuando las aberturas de la raíz deben ser grandes, debido a que el espesor de la unión es grande, se prefiere la técnica inversa. Si se usa la técnica directa, es necesario trabajar el charco fundido de lado a lado, tanto como hacia adelante, con el auxilio de la flama.

POSICIONES VERTICAL Y SOBRE LA CABEZA.- Al soldar en estas posiciones, se necesita un control cuidadoso en la alimentación de calor para mantener la viscosidad del charco de soldadura lo suficientemente alta para que el metal de soldadura no se choree. Además, la fuerza de la flama debe ser dirigida de tal manera que asegure que el charco solidifique en la posición correcta.

#### Ventajas y Limitaciones

Casi toda la soldadura por gas es soldadura de fusión; los metales que se unen se funden en el momento en que ocurre la soldadura sin que intervenga ninguna presión. Debido a que generalmente existe un pequeño claro entre las piezas que se unen, generalmente se debe añadir material de aporte, o de re

lleno, en forma de alambre o varilla, el cual se funde en la flama o en el charco de metal de soldadura.

Mediante este proceso se pueden obtener soldaduras de buena calidad si se utilizan la técnica y el cuidado adecuados. El control de la temperatura de trabajo se logra fácilmente. Sin embargo, la exposición del metal caliente y fundido a varios gases en la flama y en la atmósfera, sin protección adecuada, hace difícil evitar la contaminación. Además, debido a que la fuente de calor no es concentrada, se calientan considerables áreas de metal y, por esto, es muy probable que ocurra distorsión. A consecuencia de lo anterior, desde el alto desarrollo de la soldadura por arco con metal cubierto y de la soldadura por arco con metal y gas, estos procesos han reemplazado en alto grado la soldadura por flama.

## 4.2 SOLDADURA A PRESION POR GAS

### Descripción

Este es un proceso utilizado para hacer uniones a tope entre objetos tales como tubería y vías de ferrocarril. Se calientan los extremos con una flama de gas hasta una temperatura por abajo de la del punto de fusión y luego se unen bajo presión considerable. El proceso es un tipo de soldadura de fase sólida. En la figura 4.2.1 se muestra un arreglo para calentar piezas para soldarlas por soldadura a presión con oxiacetileno mediante el método de claro estrecho.

PRINCIPIOS DE OPERACION.- Aunque existe más de un método para soldar con gas a presión, a continuación se describe el método del claro estrecho. Este se logra mediante dos técnicas. En una, llamada soldadura de una sola presión, primero se ponen las piezas a tope bajo una presión impuesta pre establecida, y luego la unión se rodea con sopletes de oxiacetileno para calentarla hasta que haya ocurrido una cierta cantidad de recalado. En la otra técnica, llamada soldadura de presión doble, las piezas se unen a tope bajo una presión inicial, se calienta la unión a una temperatura dada y luego se aumenta la presión para lograr el recalado.

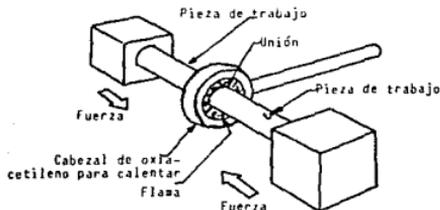


Fig. 4.2.1 Arreglo para calentar piezas en soldadura a presión con oxiacetileno con el método de claro estrecho.

### Ventajas

Esta soldadura es más rápida que aquella que implica fusión, y no desarrolla una estructura de metal vaciado en la zona de soldadura. No se introducen inclusiones o porosidad durante la soldadura, y no se expulsa metal en forma de rebaba (como en la soldadura por arco con presión). El metal en la zona de soldadura es capaz de la misma respuesta al calentamiento como el metal base, la susceptibilidad a la fractura se minimiza porque los gradientes de temperatura desarrollados durante la soldadura no son pronunciados.

### Limitaciones

La soldadura a presión con oxiacetileno es lenta comparándola con otros procesos de soldadura con presión. Las superficies que se van a poner a tope deben ser planas, paralelas y limpias, aumentando por lo tanto el costo de preparación de la superficie.

Se han soldado barras hasta de 3 pulgadas de diámetro y tubos tan grandes como 25" de DE. mediante el método de claro estrecho. Sin embargo, para soldar tubos de espesor grueso o barras de gran diámetro, se requiere tiempo para transmitir suficiente calor dentro del metal más lejano de la superficie. Esta dificultad puede aliviarse mediante el uso de diseño de unión ahusada.

La tabla 4.2.1 muestra las condiciones típicas para soldar a presión con oxiacetileno tubos de acero al carbono (a).

Espesor de pared, pulgs.	Tiempo de soldadura, seg.	Acortamiento total, pulgs.	Chafilón del extremo del tubo
0.187 .....	45	0.25	4°
0.203 .....	50	0.265	4°
0.238 .....	55	0.300	4°
0.250 .....	60	0.312	5°
0.375 .....	90	0.412	6°

(a) Usando el método de presión doble, con presión inicial de 1000 lbs/pulg<sup>2</sup> de sección transversal del tubo y presión final de 4000 lbs/pulg<sup>2</sup> de sección transversal de tubo.

**TABLA 4.2.1** Condiciones típicas para soldar a presión con oxiacetileno tubos de acero al carbono

## C A P I T U L O    5

### SOLDADURA POR ARCO

#### 5.1 SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO RECUBIERTO

##### Descripción

Este tipo de soldadura utiliza electrodos que consisten de un alambre de metal, generalmente con un diámetro de 1/16 a 3/8 de pulgada, sobre el cual se ha extruido un recubrimiento que contiene componentes químicos para adicionar un número de características deseables, incluyendo todas o parte de las siguientes:

- 1.- Proporcionar una atmósfera protectora.
- 2.- Estabilizar el arco.
- 3.- Actuar como fundente para remover impurezas del metal fundido.
- 4.- Proporcionar una escoria protectora para acumular impurezas, evitar oxidación y retardar el enfriamiento del metal de soldadura.
- 5.- Reducir las salpicaduras e incrementar la eficiencia de deposición.
- 6.- Adicionar elementos de aleación.
- 7.- Afectar la penetración del arco.
- 8.- Influir en la forma del cordón de soldadura.
- 9.- Proporcionar metal de relleno adicional.

Los electrodos recubiertos se clasifican en base a la - resistencia a la tensión del metal de soldadura, la posición en la que pueden ser utilizados, el tipo de corriente y la polaridad (para corriente directa) y el tipo de recubrimiento. Se utiliza un sistema de designación de 4 ó 5 dígitos, como - se indica en la figura 5.1.1. Como ejemplo, el tipo E7016 es un electrodo de acero de baja aleación que proporcionará un - depósito que tendrá una resistencia mínima de tensión de - - 70,000 lbs/pulg<sup>2</sup> en la condición de esfuerzos no aliviados; - puede ser utilizado en cualquier posición y ya sea con corrien te alterna o con corriente directa y polaridad inversa y tie- ne un recubrimiento del tipo de bajo hidrógeno.

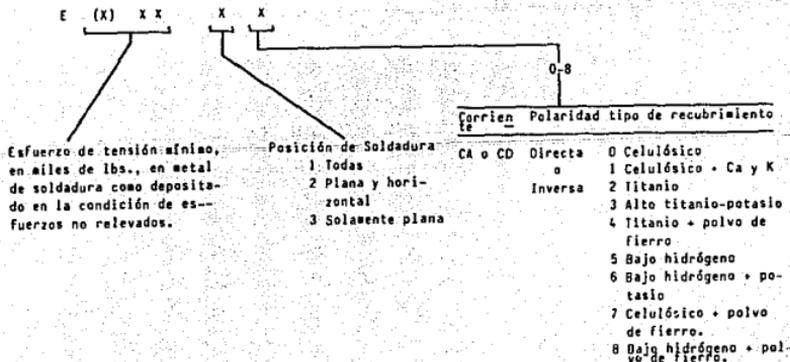
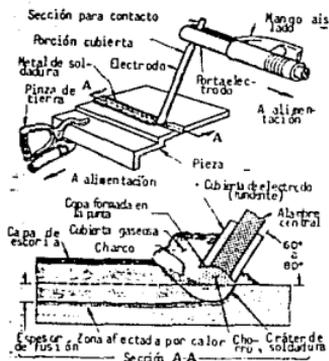


Fig. 5.1.1 Sistema de designación de electrodos para soldadura por arco.

En general, los recubrimientos celulósicos contienen - aproximadamente 50% de  $\text{SiO}_2$ , 10% de  $\text{TiO}_2$ , pequeñas cantidades de  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{NaO}$ , y aproximadamente 30% de materia volátil. Los recubrimientos de Titanio contienen aproximadamente 30% - de  $\text{SiO}_2$ , 50% de  $\text{TiO}_2$ , pequeñas cantidades de  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y aproximadamente 5% de materia volátil. Los recubrimientos de bajo hidrógeno contienen típicamente aproximadamente 28% de  $\text{TiO}_2$  más  $\text{ZrO}_2$  y 25% de  $\text{CaO}$  más  $\text{MgO}$ . Estos eliminan el hidrógeno disuelto en el metal de soldadura depositado y - evitan rotura en la microestructura. Para ser efectivos deben ser horneados justo antes de usarlos para asegurar la eliminación de toda la humedad del recubrimiento.

Al fundirse y evaporarse el recubrimiento del electrodo, forma una atmósfera protectora que estabiliza el arco y protege de la contaminación al metal fundido y al metal caliente. Los elementos fundentes se unen con las impurezas del metal - fundido y las sacan a la superficie para que queden atrapadas en la capa de escoria que se forma sobre la soldadura. Esta - escoria protege el metal que se enfría de la oxidación y re-- tarda la rapidez de enfriamiento para evitar el endurecimiento. La escoria se retira fácilmente de la soldadura cuando ésta se ha enfriado. La figura 5.1.2 muestra esquemáticamente - el proceso.

Los electrodos que contienen polvo de hierro en su recubrimiento se usan ampliamente, particularmente en soldadura - de tipo producción. Estos electrodos incrementan grandemente la cantidad de metal que puede ser depositado con un tamaño - de electrodo y una corriente dados, reduciendo así los costos de soldadura.



**Fig. 5.1.2** Arreglo típico y fundamentos de la operación para la soldadura por arco con electrodo recubierto

En un tipo de electrodo, el recubrimiento aislante se funde con una determinada lentitud que hace que sobresalga ligeramente del alambre de relleno, lo que permite deslizarlo sobre el trabajo, manteniéndose la adecuada longitud del arco. Estos electrodos se llaman de contacto o de arrastre.

Aunque un alto porcentaje de soldadura todavía se realiza con electrodos recubiertos ordinarios, en años recientes ha habido un gran incremento en el uso de otros métodos de protección, en gran parte debido a que éstos permiten el uso de elec

trodos continuos y dispositivos de alimentación continua de electrodos.

Las tablas 5.1.1 y 5.1.2 muestran las especificaciones para electrodos recubiertos de acero al carbono y acero aleado, respectivamente.

TABLA 5.1.1 Electrodos de Acero al Carbono Cubiertos para soldadura por arco (AWS).

Clasificación AWS	Tipo de recubrimiento.	Capaz de producir soldaduras satisfactorias en la posición mostrada <sup>a</sup>	Tipo de corriente. <sup>b</sup>
Electrodos Serie E60			
E6010	Sodio de Alta Celulosa	P, V, SC, H	CDEP
E6011	Potasio de Alta Celulosa	P, V, SC, H	CA o CDEP
E6012	Sodio de Alto Titanio	P, V, SC, H	CA o CDEP
E6013	Potasio de Alto Titanio	P, V, SC, H	CA o CD, cualquier polaridad
E6020	Alto Oxido de Hierro	Filetes H	CA o CDEP
E6022 <sup>c</sup>	Alto Oxido de Hierro	P	CA o CD, cualquier polaridad
E6027	Alto Oxido de Hierro, polvo de hierro	Filetes H, P	CA o CDEP
Electrodos Serie E70			
E7014	Pulvo de Hierro, Titanio	P, V, SC, H	CA o CD, cualquier polaridad
E7015	Sodio de Bajo Hidrogeno	P, V, SC, H	CDEP
E7016	Potasio de Bajo Hidrogeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E7018	Potasio de Bajo Hidrogeno, polvo de Hierro	P, V, SC, H	CA o CDEP
E7024	Pulvo de Hierro, Titanio	Filetes H, P	CA o CD, cualquier polaridad
E7027	Alto Oxido de Hierro, Pulvo de Hierro	Filetes H, P	CA o CDEP
E7028	Potasio de Bajo Hidrogeno, polvo de Hierro	Filetes H, P	CA o CDEP
E7048	Potasio de Bajo Hidrogeno, polvo de Hierro	V-abajo	
<p>a. P= plana, H= horizontal, Filetes H= filetes horizontales, V abajo= vertical abajo, V vertical= sobre la cabeza* . * para electrodos de 3/16 y menores, excepto para 5/32 y menores para clasificaciones E7014, E7015, E7016 y E7018.</p> <p>b. CDEP= corriente directa electrodo positivo (CD polaridad inversa). CDEP= corriente directa, electrodo negativo (CD, polaridad directa).c.Los electrodos E6022 son para un solo paso.</p>			

TABLA 5.1.2

**Electrodos para soldadura por arco cubiertos  
con acero de baja aleación (AWS)**

Clasificación AWS	Tipo de recubrimiento	Posiciones para soldaduras satis- factorias a	Tipo de corriente b
<b>Serie E70-Resistencia mínima a la tensión del metal depositado, 70,000 lbs/pulg<sup>2</sup></b>			
E7010	Sodio de alta celulosa	P, V, SC, H	CDEP
E7011	Potasio de alta celulosa	P, V, SC, H	CA o CDEP
E7015	Sodio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CDEP
E7016	Potasio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E7018	Pulvo de hierro, bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E7020	Alto óxido de hierro	P Filetes H	CA o CDEW CA o CDW
E7027	Pulvo de hierro, óxido de hierro	P Filetes H	CA o CDW CA o CD, cualquier pul.
<b>Serie E80-Resistencia mínima a la tensión del metal depositado, 80,000lbs/pulg<sup>2</sup></b>			
E8010	Sodio de alta celulosa	P, V, SC, H	CDEP
E8011	Potasio de alta celulosa	P, V, SC, H	CA o CDEP
E8013	Potasio de alto titanio	P, V, SC, H	CA o CD, cualquier pul.
E8015	Sodio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CDEP
E8016	Potasio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E8018	Pulvo de hierro, bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
<b>Serie E90-Resistencia mínima a la tensión del metal depositado, 90,000lbs/pulg<sup>2</sup></b>			
E9010	Sodio de alta celulosa	P, V, SC, H	CDEP
E9011	Potasio de alta celulosa	P, V, SC, H	CA o CDEP
E9013	Potasio de alto titanio	P, V, SC, H	CA o CD, cualquier pul.
E9015	Sodio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CDEP
E9016	Potasio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E9018	Pulvo de hierro, bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
<b>Serie E100-Resistencia mínima a la tensión del metal depositado, 100,000lbs/pulg<sup>2</sup></b>			
E10010	Sodio de alta celulosa	P, V, SC, H	CDEP
E10011	Potasio de alta celulosa	P, V, SC, H	CA o CDEP
E10013	Potasio de alto titanio	P, V, SC, H	CA o CD, cualquier pul.
E10015	Sodio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CDEP
E10016	Potasio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E10018	Pulvo de hierro, bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
<b>Serie E110-Resistencia mínima a la tensión del metal depositado, 110,000lbs/pulg<sup>2</sup></b>			
E11015	Sodio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CDEP
E11016	Potasio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E11018	Pulvo de hierro, bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
<b>Serie E120-Resistencia mínima a la tensión del metal depositado, 120,000lbs/pulg<sup>2</sup></b>			
E12015	Sodio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CDEP
E12016	Potasio de bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP
E12018	Pulvo de hierro, bajo hidrógeno	P, V, SC, H	CA o CDEP

a. P-plana, H=horizontal. Filetes H= filetes horizontales, V=vertical\*, SC=sobre la cabeza\*. \*para electrodos de 3/16 y menores, excepto 5/32 y menores para clasificaciones EX415, EX416, y EX418. b. CDEP=corriente directa,electrodo positivo (polaridad inversa), CDW=corriente directa electrodo negativo (polaridad directa).

## Aplicaciones

La soldadura por arco con metal cubierto es generalmente más útil que otros procesos de soldadura para unir componentes de ensambles estructurales complejos. Los metales más fácilmente soldados mediante este proceso son: aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidables y aleaciones resistentes al calor.

## Ventajas y Desventajas

La soldadura por arco con electrodo recubierto es el proceso de soldadura por arco más versátil, el equipo es el menos complejo, más portátil y económico, pero no siempre el proceso es el más bajo en costo o el más rápido.

Aunque existen aplicaciones para las cuales varios procesos de soldadura pueden ser alternativas adecuadas a la soldadura por arco con electrodo recubierto, para la mayoría de las aplicaciones la soldadura por arco con metal y gas y la soldadura por arco con electrodo relleno de fundente son los dos procesos que más compiten con aquél. Ambos son más rápidos que la soldadura por arco con metal cubierto en términos de rapidez y metal depositado. Debido a que ambos son procesos semiautomáticos (es decir, el metal de relleno se suministra a una velocidad establecida desde una bobina), el tiempo de arco puede ser un porcentaje mayor del tiempo total que en la soldadura por arco con electrodo recubierto. Además, ambos procesos pueden ser totalmente automatizados. Sin embargo, aparte de estas ventajas importantes, los dos procesos mencionados son menos versátiles que la soldadura por arco con electrodo recubierto.

5.2 SOLDADURA POR ARCO DE TUNGSTENO PROTEGIDA CON GAS (TIG)

## Descripción

Este proceso constituye uno de los primeros mayores adelantos fuera del uso de electrodos recubiertos. Originalmente desarrollado para soldar magnesio, emplea un electrodo de Tungsteno, colocado en un sujetador especial a través del cual se suministra un gas inerte con flujo suficiente para formar una protección inerte alrededor del arco y del depósito de metal fundido, protegiéndolos de la atmósfera. Este arreglo se muestra en la figura 5.2.1. Como medio inerte se utiliza Argón o Helio, o una mezcla de ambos.

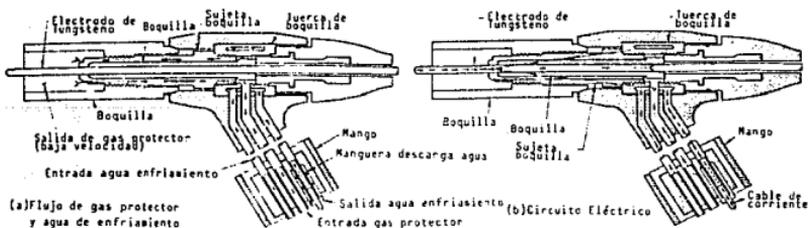


Fig. 5.2.1 Vistas seccionales de un soplete típico enfriado por agua para soldadura manual por arco con Tungsteno y gas.

Debido a que prácticamente el electrodo de tungsteno no se consume a las temperaturas del arco en estos gases inertes, la longitud del arco permanece constante y, por lo tanto, el arco es estable y fácil de mantener. Con frecuencia los electrodos de tungsteno son tratados con Torio y Circonio para proporcionarles mejores características de transmisión de corriente y de emisión de electrones. Generalmente se sobrepone a la corriente directa o alterna normales, una corriente de alto voltaje y alta frecuencia para hacer más fácil iniciar y mantener el arco.

#### Aplicaciones

La naturaleza del proceso de soldadura por arco con Tungsteno y gas permite su uso para soldar la mayoría de metales y aleaciones. Se puede mencionar a los aceros al carbono y aleados, aceros inoxidable, aleaciones resistentes al calor, metales refractarios, aleaciones de aluminio, de berilio, de cobre, de magnesio, de níquel, de titanio y de circonio.

Si se requiere metal de relleno, éste debe ser suministrado mediante un alambre separado, como en la soldadura por flama de gas. Sin embargo, en muchas aplicaciones donde existe un ajuste estrecho entre las partes a soldar, es posible que no se requiera metal de relleno.

La modificación mostrada en la figura 5.2.2 se usa en algunas ocasiones. Un alambre delgado y continuo se calienta por el paso de una corriente alterna, de tal manera que se funde al alimentar el charco de soldadura, justo atrás del charco, como resultado del efecto  $I^2R$ . Como se muestra, la rapidez de deposición es varias veces la que se puede obtener con un alambre frío, y puede incrementarse más oscilando de lado a lado el alambre de relleno al hacer una soldadura an-

cha. El proceso de alambre caliente no puede usarse al soldar cobre o aluminio, debido a sus bajas resistividades.

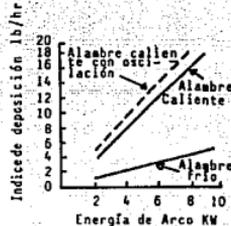
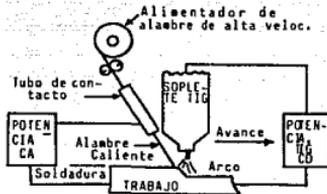


Fig. 5.2.2 (izq.) Diagrama esquemático del proceso de soldadura con alambre de relleno caliente. (der.) Comparación de los índices de deposición de metal de soldadura con alambre de relleno caliente y -frío.

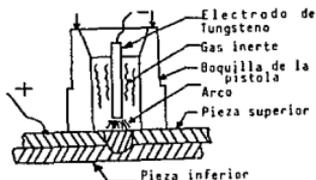
### Ventajas y Desventajas

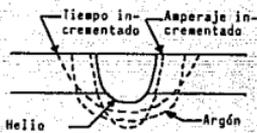
La soldadura por arco con tungsteno y gas produce soldaduras muy limpias, y no se requiere limpieza especial o eliminación de escoria porque no se utiliza fluidificante. Con operadores hábiles se pueden realizar soldaduras que son difícilmente visibles. Sin embargo, las superficies a soldar deben estar limpias y libres de aceite, grasa, pintura y herrumbre, ya que el gas inerte no realiza ninguna acción de limpieza o fluidificante. Para algunas aplicaciones, la soldadura de arco con tungsteno puede ser el único proceso de soldadura técnicamente aceptable para el metal de trabajo o para las condiciones bajo las cuales se deba realizar la soldadura. Tales condiciones restrictivas son más importantes que el costo en la selección del proceso de soldadura.

### 5.3 PUNTEO POR ARCO DE TUNGSTENO PROTEGIDO CON GAS

Este proceso constituye una variación de la soldadura por arco con tungsteno y gas y se emplea para puntear dos piezas de metal sin la necesidad de tener acceso a ambos lados de la unión. El procedimiento básico se ilustra en la figura 5.3.1. Se utiliza una pistola modificada de gas inerte, electrodo de tungsteno y boquilla; la boquilla se presiona contra una de las dos piezas de la unión. Las piezas de trabajo deben estar suficientemente rígidas para soportar la presión que debe ser aplicada en un lado para mantenerlas en un razonable buen contacto. El arco entre el electrodo de tungsteno y la pieza de trabajo superior proporciona el calor necesario, y un gas inerte, generalmente Argón o Helio, fluye a través de la boquilla proporcionando la atmósfera protectora. Control los automáticos mueven el electrodo para hacer contacto momentáneo con la pieza de trabajo para iniciar el arco. La duración del arco se regula automáticamente de tal manera que las dos piezas de trabajo se calientan lo suficiente para formar un punto bajo la presión de la boquilla de la pistola. La profundidad y tamaño de la "pepita" de soldadura se controlan por el amperaje, tiempo y tipo de gas protector, como se muestra en la figura 5.3.2.

Fig. 5.3.1 Diagrama esquemático del método de hacer puntos mediante el proceso de arco con gas inerte y tungsteno.





**Fig. 5.3.2** Efecto de los cambios de corriente, tiempo y gas protector sobre la forma de la pepita de soldadura de punteo protegida con gas inerte.

Debido a que únicamente es necesario tener acceso a un lado del trabajo, en algunas aplicaciones este tipo de punteo tiene una ventaja sobre el punteo por resistencia, como al unir láminas delgadas de metal a estructuras más pesadas.

## 5.4 SOLDADURA POR ARCO METALICO PROTEGIDA CON GAS

### Descripción

Este proceso fue un gran avance lógico que siguió a la soldadura por arco con tungsteno, con la diferencia de que el arco se mantiene entre un electrodo de alambre que se consume y que se alimenta automáticamente, y la pieza de trabajo. Por lo tanto, el electrodo suministra automáticamente el material de relleno. Originalmente designado MIG (metal, gas inerte), - el circuito y equipo básicos se muestran en la figura 5.4.1. Aunque el Argón o Helio, o mezclas de ellos, pueden utilizarse para soldar prácticamente cualquier metal, se utilizan - - principalmente para soldar metales no ferrosos. Para soldar - acero generalmente se añade algo de  $O_2$  o  $CO_2$  para mejorar la estabilidad del arco y reducir salpicaduras. El  $CO_2$  más económico, puede usarse sólo para soldar acero si se utiliza un - electrodo desoxidante.

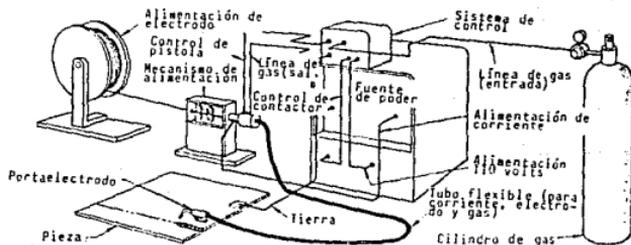


Fig. 5.4.1 Esquema de los requerimientos esenciales para soldadura por arco con metal y gas, empleando un sistema de velocidad constante de alimentación de alambre y una fuente de poder de voltaje constante.

Los gases protectores tienen un efecto considerable en la naturaleza de la transferencia de metal (gota) del electrodo al trabajo. Varios tipos de controles electrónicos, que alteran la forma de onda de la corriente, hacen posible variar el mecanismo de transferencia de metal por gotas, spray, o gotas de corto circuito. Algunas de estas variaciones en el proceso básico son: soldadura por arco con pulsos, soldadura por arco con corto circuito, y soldadura con transferencia por spray. La soldadura por arco enterrado es otra variación en la que se utiliza un gas rico en dióxido de carbono y el arco se entierra en su propio cráter. La figura 5.4.2 ilustra un sistema para producir una serie de ondas pico de corriente que precalditan el electrodo justamente antes de la formación de las gotas.

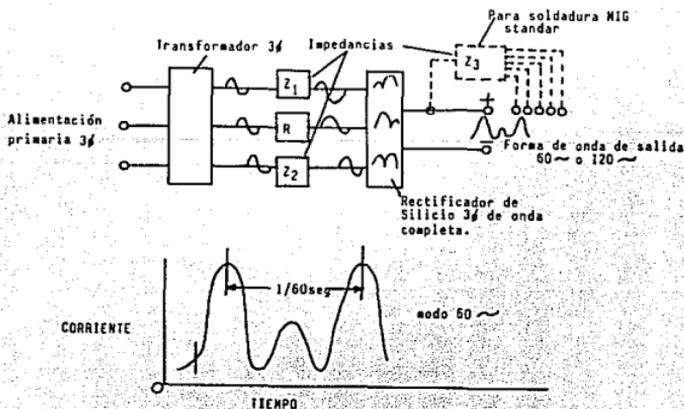


Fig. 5.4.2 Método de producir ondas de corriente pico para controlar la transferencia de gotas.

### Aplicaciones

El proceso de soldadura por arco metálico protegido con gas se utilizó primero para soldar aleaciones de magnesio y aluminio, y acero inoxidable, porque con frecuencia era el único método mediante el que se podían producir soldaduras satisfactorias a un índice económico.

La naturaleza del proceso permite su uso para soldar la mayoría de metales y aleaciones; sin embargo, algunos metales son más adaptables que otros y existen algunos pocos que no pueden soldarse. Los metales más fácilmente soldables incluyen aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidables, aleaciones resistentes al calor, aluminio y aleaciones de aluminio de las series 3,000, 5,000 y 6,000, cobre y aleaciones de cobre que no sean las de alto zinc, y aleaciones de magnesio.

Los metales que pueden soldarse mediante este proceso, pero que pueden requerir procedimientos especiales, son los aceros de alta resistencia, aleaciones de aluminio de la serie 2,000 y 7,000, las aleaciones de cobre que contienen altos porcentajes de zinc (como el bronce manganésico), las fundiciones, el acero austenítico al manganeso, titanio y aleaciones de titanio, y los metales refractarios. La soldadura de estos metales por arco metálico puede requerir precalentamiento o postcalentamiento del metal base, el uso de metales especiales de relleno, y un control más estrecho del gas protector.

Los metales con alto punto de fusión que están cubiertos con un metal de bajo punto de fusión (como plomo, estaño, cadmio o zinc) son difíciles o imposibles de soldar satisfactoriamente, porque el calor para soldar causa que el recubrimiento se vaporice o que se ale con el metal base, o ambos,

el resultado de lo cual son soldaduras con propiedades mecánicas pobres.

#### Ventajas y Desventajas

La soldadura por arco metálico protegida con gas es rápida y económica porque no hay cambios frecuentes de electrodos como ocurre con la soldadura con electrodos de tipo varilla. - Además, no se forma escoria sobre la soldadura, el proceso puede automatizarse y, si se hace manualmente, la pistola usada es relativamente ligera y compacta.

Los procesos de soldadura que son los competidores más cercanos del MIG, para unir aceros al carbono y aleados, son la soldadura por arco con metal cubierto, soldadura por arco con metal relleno de fundente, y soldadura por arco sumergido. La soldadura por arco con metal y gas es generalmente más rápida que la de metal cubierto, la que no es fácilmente automatizable; sin embargo, la soldadura por arco con metal cubierto puede preferirse para ubicaciones difíciles de alcanzar y para aplicaciones fuera del taller. La soldadura por arco con electrodo relleno de fundente, que puede automatizarse, es en ocasiones más económica que la soldadura por arco con metal y gas, dependiendo principalmente de si se usa o no un gas protector para complementar la protección proporcionada por el fundente.

## 5.5 SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO CON NUCLEO DE FUNDENTE

### Descripción

En este proceso de soldadura el calor para soldar se produce mediante un arco entre un electrodo de alambre tubular consumible y el metal de trabajo, con protección proporcionada por el gas generado durante la combustión y descomposición de un fundente contenido dentro del electrodo de alambre tubular, o por un gas fundente más un gas de protección auxiliar. Por lo tanto, existen dos versiones mayores del proceso: una que utiliza tanto un gas de protección adicional (generalmente dióxido de carbono) y protección obtenida del fundente del electrodo, y el método de protección propia, que depende para su protección de la combustión y descomposición de los componentes del fundente dentro del electrodo.

Ambos métodos de soldadura por arco con electrodo relleno de fundente están ampliamente relacionados a otros procesos de soldadura por arco. El método que utiliza un gas de protección adicional es similar a la soldadura por arco con metal y gas, que emplea un electrodo sólido consumible y depende de un gas de protección aplicado externamente para proteger el arco y metal fundido de contaminación de la atmósfera. El método autoprotector está más cercanamente relacionado a la soldadura por arco con electrodo recubierto, que también depende de la combustión y descomposición de un fundente sólido para proporcionar la protección gaseosa. En la soldadura por arco con metal cubierto, el fundente está en el exterior del electrodo, lo que limita la forma del electrodo a una longitud "derecha" (electrodos de varilla), mientras que en la soldadura por arco con electrodo relleno de fundente, éste está dentro del electrodo tubular, que puede embobinarse y suministrarse al arco como un alambre continuo.

La figura 5.5.1 muestra los principios de operación de la soldadura por arco con electrodo con núcleo de fundente, - con gas de protección adicional.

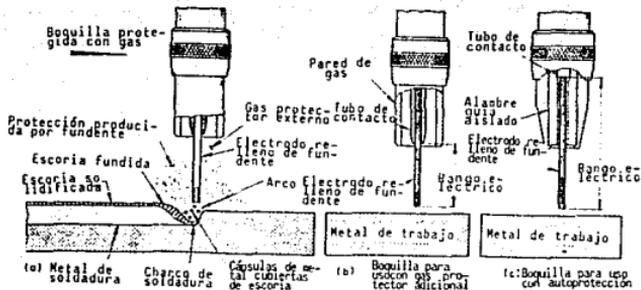


Fig. 5.5.1 (a) Principios de operación para soldadura por arco con electrodo relleno de fundente con gas de protección auxiliar; (b) y (c) boquillas para gas de protección adicional y para autoprotección.

### Aplicaciones

Las aplicaciones de los métodos de soldadura por arco con electrodo con núcleo de fundente se traslapan considerablemente. Sin embargo, las características específicas de cada proceso lo hacen adecuado para diferentes condiciones de operación.

La soldadura por arco con electrodo con núcleo de fundente y con gas de protección adicional se usa principalmente para soldar aceros al carbono y de baja aleación, y aceros inoxidables. El método es aplicable a trabajo semiautomático (portaelectrodos manipulados manualmente) y a los varios procedimientos de soldadura automática (en los que el portaelectrodo se sostiene mecánicamente); también es adaptable a punteo por arco.

La soldadura por electrodo con núcleo de fundente y con autoprotección se ha hecho popular principalmente debido a la simplicidad de operación que resulta de la ausencia del equipo necesario para protección con gas. Debido a que este método no penetra la soldadura tan profundamente como en el anterior, puede usarse más favorablemente bajo condiciones de ensamble pobre. El método autoprotegible se usa principalmente para soldar aceros al carbono, pero se ha usado para soldar algunos aceros de baja aleación, y se han desarrollado electrodos para soldar aceros austeníticos inoxidables.

#### Ventajas y Desventajas

Para aplicaciones en las que dos o más procesos de soldadura pueden producir resultados aceptables, la selección depende principalmente del equipo disponible, la habilidad de los soldadores, el número de soldaduras a producir y el costo.

En comparación con la soldadura por arco con metal cubierto, la soldadura por arco con electrodo con núcleo de fundente es más rápida porque utiliza un alambre de electrodo alimentado continuamente, aunque es menos versátil. Además, el método con electrodo relleno de fundente con protección adicional de gas tiene una mayor penetración, lo que con frecuencia permite que se utilice un filete más pequeño para lograr la requerida

sistencia de unión requerida, necesitándose por lo tanto menos metal de relleno.

En relación a la soldadura por arco sumergido, la soldadura por arco con electrodo con núcleo de fundente proporciona también altos índices de deposición y penetración profunda de unión, aunque cuando se utiliza protección adicional en la segunda, la penetración es mayor que en la primera.

## 5.6 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

### Descripción

La soldadura por arco sumergido es un proceso de soldadura por arco en el que el calor para soldar se suministra mediante un arco (o arcos) formado entre un electrodo (o electrodos) consumible de metal descubierto y una pieza de trabajo. El arco está cubierto por una capa de fundente granular que cubre el metal de soldadura fundido y el metal base cerca de la unión, y protege al metal de soldadura fundido de la contaminación atmosférica.

En esta soldadura, la corriente eléctrica fluye a través del arco y del charco de soldadura, que consiste de fundente y de metal de soldadura fundidos. El fundente fundido es en general altamente conductor, aunque frío no conduce electricidad. Además de actuar como un medio protector, la cubierta de fundente puede proporcionar desoxidantes y limpiadores que reaccionan químicamente con el metal de soldadura. Fundentes para soldar por arco sumergido acero aleado pueden también contener ingredientes de aleación que modifican la composición del metal de soldadura.

La figura 5.6.1 muestra cómo se realiza una soldadura por arco sumergido. La corriente eléctrica de un generador, de un transformador-rectificador o de un transformador pasa a través del tubo de contacto y de ahí a través del electrodo de alambre, para producir un arco entre el electrodo y el metal base. El calor del arco funde al electrodo, al fundente y a algo de metal base, formando un charco de soldadura que llena la unión.

En todos los tipos de equipo, rodillos impulsores de ac

ción mecánica alimentan continuamente el electrodo consumible de metal descubierto a través de un tubo de contacto (boquilla) y a través de la cubierta de fundente a la unión que se está soldando. El alambre de electrodo, en general un acero - al bajo carbono de composición química estrechamente controlada, se embobina en un carrete. El alambre de electrodo se funde en la zona de soldadura y se deposita a lo largo de la unión. Fundente granular se deposita adelante del arco y, después de que el metal de soldadura solidifica, el fundente sin fundir se remueve mediante un sistema de recolección por vacío, para tamizarlo y reusarlo. En soldadura automática la recuperación de fundente puede ser una función integral del equipo, con un tubo recolector directamente atrás del tubo de contacto.

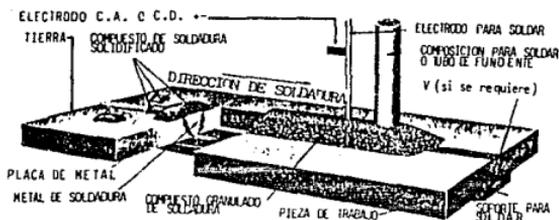


Fig. 5.6.1 Características básicas del proceso de soldadura por arco sumergido.

La soldadura por arco sumergido es adaptable, tanto a operación semiautomática como a operación completamente automática, aunque esta última, debido a ventajas inherentes, es más ampliamente utilizada. En soldadura semiautomática, el soldador guía manualmente una pistola de soldar (con un embu-

do de fundente unido) que alimenta el fundente y el electrodo a la unión, y él controla la velocidad de avance. En soldadura completamente automática, el equipo alimenta automáticamente y guía al electrodo y al fundente a lo largo de la unión y controla el índice de deposición. Una máquina típica para soldadura automática por arco sumergido se muestra esquemáticamente en la figura 5.6.2.

En algunas aplicaciones de soldadura automática por arco sumergido, se alimentan simultáneamente dos o más electrodos a la misma unión. Los electrodos pueden estar uno al lado del otro y alimentarse dentro del mismo charco de soldadura, o pueden estar espaciados apenas lo suficiente para permitir que dos charcos de soldadura solidifiquen independientemente. La segunda técnica, algunas veces llamada soldadura por arco en tandem, produce una soldadura de paso múltiple en una sola carrera de la unión, incrementando por lo tanto el índice de deposición y la velocidad de la soldadura.

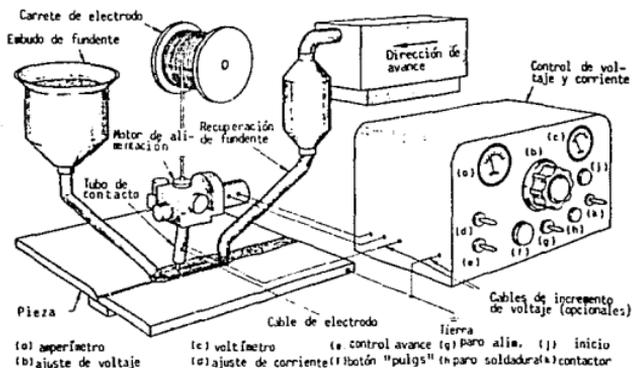


Fig. 5.6.2 Componentes esenciales de una máquina típica para soldadura automática por arco sumergido.

### Aplicaciones

La soldadura por arco sumergido no se adapta a todos los metales y aleaciones. Para conveniencia, los metales y aleaciones pueden dividirse en tres grupos con respecto a su aplicabilidad al proceso: más adecuados, menos adecuados y no adecuados.

Metales de trabajo más adecuados.- Este tipo de soldadura se usa más ampliamente en soldadura de producción de aceros al carbono sin alear que no contengan más de 0.30% de carbono, 0.05% de fósforo, y 0.5% de azufre. Los aceros al medio carbono y aceros estructurales aleados son igualmente adecuados para soldadura por arco sumergido, aunque requieren con más frecuencia de precalentamiento, postcalentamiento y alambres de electrodo y fundentes especiales. El acero inoxidable, el acero endurecible al carbono, el acero de alta resistencia de baja aleación, y el acero estructural de alta resistencia endurecible, también se sueldan mediante el proceso de arco sumergido. La soldadura por arco sumergido también se usa para depositar recubrimientos de restauración y resistentes a la abrasión.

Metales de trabajo menos adecuados.- Algunos metales y aleaciones que pueden soldarse por arco sumergido son soldados con más frecuencia mediante procesos que dan una zona caliente más estrecha. Algunos aceros estructurales al bajo carbono de alta resistencia se incluyen en este grupo debido a requisitos de resistencia y de dureza a la escopleadura, que son difíciles de cumplir mediante soldadura por arco sumergido. También se incluyen aceros al alto carbono, cobre y aleaciones de cobre.

Metales de trabajo no adecuados.- El hierro fundido generalmente no puede ser soldado por arco sumergido, porque no

puede soportar los esfuerzos térmicos que resultan de la alta alimentación de calor. Se encuentran problemas con acero austenítico al manganeso y con acero para herramienta al alto carbono, que son difíciles de soldar mediante cualquier proceso convencional de soldadura. Las aleaciones de aluminio y de magnesio no pueden soldarse por arco sumergido porque no hay disponibilidad de fundentes adecuados. El plomo y el zinc no son adecuados debido a sus bajos puntos de fusión. El titanio ha sido soldado bajo una base experimental, pero no se ha desarrollado un fundente adecuado para soldadura de producción.

#### Ventajas y Desventajas

Esta soldadura, ya sea semiautomática o automática, -- ofrece las siguientes ventajas sobre algunos otros procesos de soldadura:

- 1.- Las uniones se pueden preparar con una ranura en "V" superficial, resultando en menos material de relleno usado (en algunas aplicaciones no se requiere ranura en uniones entre placas de 1½ pulgs. o menos de espesor).
- 2.- No se requiere protección para el operador del arco, aunque se recomienda protección ocular. El arco opera bajo la cubierta de fundente, eliminando por lo tanto el chisporroteo.
- 3.- El proceso puede usarse a altas velocidades de soldadura e índices de deposición para soldar placa cilíndrica o plana, o tubería de casi cualquier espesor, y puede usarse para dar recubrimiento duro.

- 4.- El fundente actúa como un limpiador y desoxidante para remover contaminantes indeseables del charco de soldadura y para producir soldaduras adecuadas con buenas propiedades mecánicas. El fundente puede, si se requiere, proporcionar elementos de aleación para el metal de soldadura.
- 5.- Para soldar acero al bajo carbono sin alear se pueden usar alambres de electrodos baratos -generalmente alambre de acero al carbono, ya sea descubierto o con una capa de cobre para mejorar el contacto eléctrico y para proteger de la herrumbre.
- 6.- El proceso de arco sumergido puede usarse para soldar en áreas expuestas con vientos relativamente altos; la protección de flujo granular proporciona protección superior a la obtenida del recubrimiento del electrodo en soldadura por arco con electrodo recubierto.

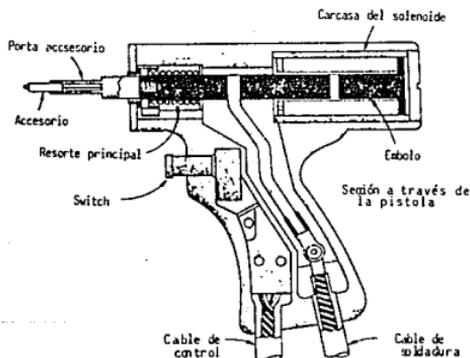
Las desventajas y limitaciones de la soldadura por arco sumergido, algunas de las cuales también se aplican a otros procesos de soldadura, incluyen las siguientes:

- 1.- Se requieren fundente, equipo para manejar el fundente, y dispositivos para sujeción del trabajo. Muchas uniones también requieren el uso de placas, soleras o anillos de soporte.
- 2.- El fundente está sujeto a contaminación, que puede causar porosidad en la soldadura.
- 3.- Para obtener soldaduras de buena calidad, el metal base debe ser homogéneo y esencialmente libre de escamas, óxido, aceite y otros contaminantes.

- 4.- La escoria debe removerse del cordón de soldadura, y esto, en ocasiones, es una operación difícil. En soldadura de paso múltiple, la escoria debe removerse después de cada paso para evitar atrapamiento en el cordón de soldadura.
- 5.- El proceso generalmente no es adecuado para usar en metal de menos de 3/16 de pulg. porque puede ocurrir que el metal se queme de lado a lado.
- 6.- A excepción de aplicaciones especiales, la soldadura está grandemente restringida a la posición plana para soldaduras de ranura, y a las posiciones plana y horizontal para soldaduras de filete, para evitar que el fundente se deslice.

## 5.7 SOLDADURA DE ACCESORIOS

Es un proceso de soldadura por arco mediante el cual pueden unirse tipos especiales de accesorios metálicos a piezas de trabajo. Se utiliza una pistola especial como la que se muestra en la figura 5.7.1, dentro de la cual se inserta el accesorio. Se establece un arco de cd entre el extremo del accesorio y la pieza de trabajo, hasta que se produce suficiente temperatura, soldándose por lo tanto el accesorio a la pieza. Equipo automático controla la iniciación del arco, su duración, y la aplicación de presión al accesorio.



**Fig. 5.7.1** Diagrama esquemático de una pistola para soldar accesorios.

Como se muestra en la figura 5.7.2, hay disponible una gran variedad de accesorios. El extremo ahuecado del accesorio se llena con fundente. Un casquillo de cerámica, que se coloca en el extremo del accesorio antes de que éste se coloque en la pistola, es un factor importante en el proceso, ya que actúa para concentrar el calor del arco y para proteger

el metal de la atmósfera. También confina el metal fundido o plástico al área de soldadura y lo moldea alrededor de la base del accesorio. Después de que se completa la soldadura, el casquillo se rompe y se retira.

El proceso no requiere mucha pericia de parte del operador; una vez que el accesorio y el casquillo se colocan en la boquilla de la pistola, y la pistola se posiciona en la pieza, todo lo que el operador tiene que hacer es jalar el gatillo; la parte restante del ciclo es automática, consumiendo menos de un segundo. Debido a esto, es apropiado, y muy ampliamente usado para manufactura, eliminando la necesidad de taladrar y roscar muchos agujeros. Hay disponibilidad de máquinas especiales de tipo producción para soldar accesorios.

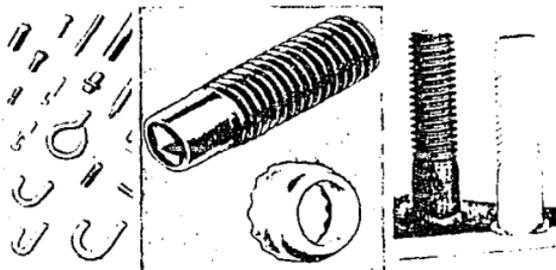


Fig. 5.7.2 (izq.) Algunos de los tipos de accesorios disponibles para soldadura de accesorios. (centro) Un accesorio y un casquillo de cerámica. (der.) Un accesorio después de soldar, y una sección a través de un accesorio soldado.

## 5.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA POR ARCO

Además de lo ya mencionado específicamente para la mayoría de los procesos de soldadura por arco, podemos mencionar a nivel general las siguientes ventajas y desventajas:

Debido a su gran flexibilidad y a la variedad de procesos disponibles, la soldadura por arco es un proceso extremadamente útil, versátil y ampliamente utilizado. Sin embargo, a excepción del punteo por arco de tungsteno protegido con gas, la soldadura de accesorios y, hasta cierto punto, la soldadura por arco sumergido, los muchos procesos de soldadura por arco tienen una desventaja, y ésta es que la calidad de la soldadura depende en última instancia de la habilidad e integridad del trabajador que hace la soldadura. En consecuencia, el entrenamiento adecuado, la selección y supervisión del personal son de gran importancia, aún más que la adecuada inspección.

## 5.9 TIPOS DE SOLDADURA POR FUSIÓN, Y TIPOS DE UNIONES

Existen cuatro tipos básicos de soldadura por fusión, - como se muestra en la ilustración a continuación.



Las soldaduras de cordón no requieren preparación de - las orillas. Sin embargo, como la soldadura se realiza sobre una superficie plana y, por lo tanto, su penetración es limitada, estas soldaduras son adecuadas sólo para unir láminas - delgadas de metal, para reconstruir superficies o para apli- - car metales de recubrimiento duro.

Las soldaduras de ranura se usan cuando se busca resis- - tencia en todo el espesor en materiales más gruesos. Estos re - quieren de alguna preparación en las orillas para hacer una - ranura entre ellas. Las configuraciones más comunes son: V, - U y J, normalmente producidas por medio de corte con flama - oxiacetilénica. El tipo de configuración de la ranura depende principalmente del espesor de la pieza, del proceso de solda- - dura a emplear, y de la posición de la pieza, siendo la prin- - cipal consideración el obtener una buena soldadura a través - de todo el espesor con un depósito mínimo de metal de soldadu - ra. La soldadura puede hacerse ya sea con procedimiento de un - paso o de paso múltiple, dependiendo del espesor del material y del proceso de soldadura empleado. Con frecuencia se utili- - zan insertos consumibles en forma de anillos o bandas, para - auxiliar en la obtención de una separación adecuada entre las orillas a unir, y para ayudar en el aseguramiento de una cali- - dad adecuada en el paso de raíz de la soldadura; éstos son es

pecialmente útiles en soldadura de tubería, particularmente - bajo condiciones de campo y donde la soldadura debe ser hecha desde un solo lado de la pieza.

Las soldaduras con filete se utilizan para uniones en T, uniones traslapadas y uniones en esquina. El tamaño de las soldaduras de filete se mide por el pie del triángulo recto de  $45^\circ$  más grande que pueda trazarse dentro del contorno de la sección transversal de la soldadura. Esto se muestra en la figura 5.9.1, que también indica la forma apropiada para soldaduras de filete, para evitar el exceso de metal y reducir la concentración de esfuerzos. Las soldaduras de filete no requieren preparación especial de las orillas. Pueden ser continuas o hacerse intermitentemente, dejándose espacios entre pequeñas distancias de soldadura.

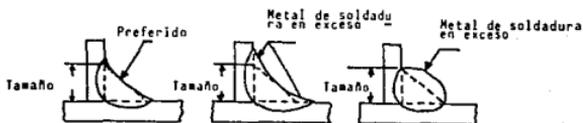


Fig. 5.9.1 Forma preferida de soldaduras de filete, y el método de medir el tamaño del filete de la soldadura.

Las soldaduras de tapón se utilizan para añadir una parte sobre otra, reemplazando remaches o tornillos. Se hace un orificio en la placa superior y se inicia la soldadura en la parte inferior de este agujero. Ofrecen un ahorro sustancial en peso comparadas con remachado o atornillado.

La figura 5.9.2. muestra los cinco tipos básicos de uniones que pueden hacerse mediante el uso de soldaduras de cordón, de ranura y de filete.

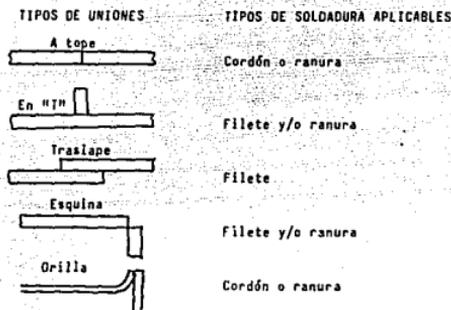


Fig. 5.9.2 Tipos básicos de uniones con soldadura con fusión, y tipos de soldaduras usados para hacerlos.

Al seleccionar el tipo de unión de soldadura a usarse, - la principal consideración deberá ser el tipo de carga que será aplicado. También el costo y la accesibilidad son factores importantes, pero secundarios, en la selección de la unión. El costo es afectado por la preparación necesaria en las orillas, la cantidad de metal de soldadura que debe ser depositado, el tipo de proceso y equipo que debe usarse y la velocidad y facilidad con las que la soldadura puede lograrse. La accesibilidad obviamente tendrá considerable influencia en varios de estos factores.

En la soldadura de producción se hace amplio uso de posicionadores a los cuales se sujeta la pieza. Estos hacen posible que la pieza sea girada para permitir que la soldadura se haga en la posición más favorable.

**C A P I T U L O 6****SOLDADURA POR RESISTENCIA****6.1 INTRODUCCION**

En la soldadura por resistencia se utilizan tanto calor como presión para producir la aglutinación. El calor es la consecuencia de las resistencias de las piezas de trabajo, y de las superficies de contacto entre ellas, al flujo de corriente eléctrica. Una cierta cantidad de presión se aplica inicialmente para mantener las piezas en contacto, controlando por lo tanto la resistencia eléctrica en la superficie de contacto y, al obtenerse la temperatura adecuada, se incrementa para facilitar la aglutinación. Debido a la presión utilizada, la unión ocurre a una temperatura menor que en la soldadura por gas o con arco. Consecuentemente, en toda la soldadura por resistencia no ocurre fusión intencional del metal. Debido a lo anterior, estos procesos son de estado sólido, aunque no estén clasificados así por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS).

En algunos de los procesos de soldadura por resistencia, se puede aplicar presión adicional inmediatamente después de que se logre la conglutinación, para proporcionar una cierta cantidad de acción de forja, con acompañamiento de refinamiento de grano. También se puede inducir un poco de calor, como parte del proceso, para proporcionar templado y/o alivio de esfuerzos. Generalmente, la temperatura requerida y la realización del proceso pueden obtenerse en unos segundos. Conse--

cuentemente, la soldadura por resistencia es un proceso muy - rápido y económico, extremadamente bien adecuado para fabrica- ción, y es ampliamente utilizado, particularmente en produc- ción masiva.

CALOR.- El calor para la soldadura por resistencia se obtiene al pasar una gran corriente eléctrica a través de las piezas de trabajo, utilizando la relación básica:

$$H = I^2 R T$$

donde:

H = es el calor

I = la corriente

R = la resistencia eléctrica del circuito, y

T = el tiempo de duración del flujo de corriente.

En la mayoría de los casos se utiliza corriente alterna. Como se indica en la figura 6.1.1, la pieza es una parte del circuito eléctrico. Es importante notar que la resistencia to- tal del ensamble entre los electrodos consiste de tres partes: 1) la resistencia de las piezas de trabajo; 2) la resisten- cia de contacto entre los electrodos y las piezas; y 3) la - resistencia entre las superficies de contacto de las piezas. Debido a que se desea que la temperatura máxima ocurra en el punto en donde se va a realizar la soldadura -es decir, en - las superficies de contacto-, es esencial mantener las resis- tencias 1) y 2) tan bajas como sea posible en relación a la - resistencia 3). Obviamente, con materiales que tienen una re- sistencia eléctrica baja, como aluminio y cobre, esta condi- ción es difícil de lograr, y requieren corrientes mucho mayo- res y más atención a las condiciones de la superficie de con- tacto que cuando se está soldando acero.

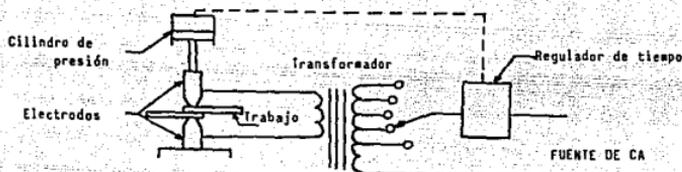


Fig. 6.1.1 Circuito básico de soldadura por resistencia.

La resistencia entre las superficies de contacto es función de: 1) la calidad de las superficies; 2) la presencia de incrustaciones, suciedad u otros contaminantes no conductores; 3) la presión; y 4) el área de contacto. Estos factores deben controlarse para obtener resultados uniformes.

Como se indica en la figura 6.1.2, el objetivo es llevar las superficies de contacto simultáneamente a la temperatura elevada adecuada mientras que el resto del material y los electrodos se mantienen a temperaturas mucho más bajas. Los electrodos normalmente se enfrían por agua para mantener su temperatura baja y para ayudar a mantenerlos en condición adecuada.

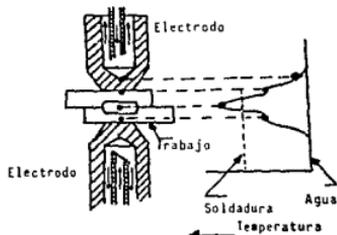


Fig. 6.1.2 Distribución deseada de temperatura a través de los electrodos y de la pieza de trabajo en la soldadura por resistencia.

Cuando se van a soldar materiales de diferente espesor o de diferentes conductividades, pueden llevarse simultáneamente a la temperatura de soldar adecuada usando un electrodo que tenga una mayor conductividad contra el material de mayor espesor, o de mayor resistencia, que el que está en contacto con el material más delgado o de menor resistencia.

**PRESION.-** Debido a que la presión en la soldadura por resistencia afecta la resistencia de contacto, permite que las soldaduras se hagan a temperaturas más bajas y proporciona una acción de forja, es muy importante el control de su magnitud y del momento de aplicación. Si se utiliza muy poca presión, la resistencia de contacto es alta y puede resultar en quemado de la superficie o deterioramiento de los electrodos. Por otro lado, si se utiliza una presión demasiado alta, se puede expulsar metal fundido de entre las superficies de contacto o las piezas pueden ser indentadas por los electrodos. Idealmente, debería aplicarse una presión moderada antes de y durante el paso de la corriente de soldadura, para establecer la adecuada resistencia de contacto. Entonces debería aumentarse considerablemente el momento en que se logra el calor adecuado para soldar para completar la conglutinación y forjar la soldadura para producir una estructura de grano fino.

En las máquinas pequeñas operadas por pedal, solamente se utiliza presión controlada por un resorte. En soldaduras más grandes, de tipo producción, las presiones normalmente son aplicadas mediante cilindros neumáticos o hidráulicos que son controlados y regulados automáticamente.

**CONTROL DE CORRIENTE.-** Manteniendo constantes las condiciones en las superficies, y una vez controlada la presión, la temperatura en la soldadura por resistencia se regula controlando la magnitud y el momento de aplicación de la corriente.

te de soldadura. Para este propósito existen controles muy - -  
precisos y sofisticados.

Generalmente, la corriente se obtiene de un transformador reductor. En máquinas pequeñas la magnitud es controlada - mediante derivaciones en el primario del transformador o con - un autotransformador que varía el voltaje primario suministrado al transformador principal. En máquinas más grandes se emplean varios métodos. En control por desplazamiento de fase, - la magnitud y la forma de onda de la corriente primaria son alteradas. Con control de inclinación se permite que la corriente aumente gradualmente a su magnitud total en 3 a 25 ciclos.

En las soldaduras grandes del tipo producción, no sólo - se controla la magnitud de la corriente, sino que la duración del flujo de corriente y la aplicación de la corriente y la - presión son programadas cuidadosamente. Esto se logra mediante contadores de tiempo electrónicos síncronos ajustables que inician y detienen la corriente en sincronización adecuada con la onda de voltaje para evitar corrientes altas transitorias indeseables que podrían dañar los electrodos o contadores y producir soldaduras no uniformes. La figura 6.1.3 muestra un ciclo relativamente sencillo de corriente y presión para puntear, - que incluye forja y postcalentado.



Fig. 6.1.3 Ciclo típico de corriente y presión para puntear. El ciclo incluye forjado y postcalentamiento.

## 6.2 PUNTEO POR RESISTENCIA

### Descripción

El punteo por resistencia es el tipo más sencillo y más ampliamente utilizado de la soldadura por resistencia. Como se muestra en la figura 6.2.1, las piezas sobrepuestas se posicionan entre electrodos enfriados por agua que tienen áreas reducidas en las puntas para producir soldaduras que normalmente van de 1/16 a 1/2 pulg. de diámetro. Después de que los electrodos se cierran sobre el trabajo, ocurre un ciclo controlado de aplicación de presión y flujo de corriente, produciendo una soldadura en la superficie de contacto. Los electrodos se abren entonces y se retira el trabajo.

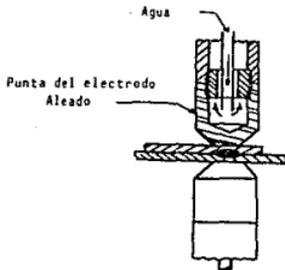


Fig. 6.2.1 Arreglo de los electrodos y el trabajo en punteo por resistencia.

Una soldadura por punteo satisfactoria, como la que se muestra en la figura 6.2.2 consiste en una "pepita" de material conglutinado formada sin fusión del material entre las superficies de contacto.

Fig. 6.2.2 Sección mostrando pepita de soldadura entre dos láminas de 0.051 pulgs. de aleación de aluminio. El radio del electrodo superior fue mayor que el del inferior.



En una buena soldadura, no deberá existir indentación en el metal bajo los electrodos, o deberá ser mínima. La resistencia de la soldadura deberá ser tal, que en una prueba de tensión o de desgarre, la soldadura se mantendrá intacta y la falla ocurrirá en la zona afectada por el calor alrededor de la pepita. Si se mantienen una densidad de corriente y momento de aplicación, presión y forma de los electrodos y condiciones de la superficie adecuados, se pueden obtener buenas soldaduras por punteo con excelente consistencia.

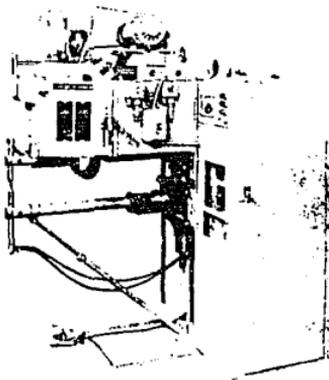
#### Máquinas Punteadoras

Hay disponibles tres tipos generales de punteadoras. Para trabajo de tipo de producción ligera, principalmente con acero, donde no se requieren ciclos complejos corriente-presión, se usa con frecuencia el tipo sencillo de brazo movable. En estas máquinas, el brazo del electrodo inferior es estacionario, y el electrodo superior está montado en un brazo con pivote; este último se baja para hacer contacto con las piezas -

mediante un pedal de pie con resorte. En máquinas más grandes y en máquinas para trabajo de mayor volumen, este movimiento se logra mediante un cilindro de aire o un motor eléctrico. - Hay máquinas de este tipo disponibles con profundidades de garganta de cerca de 48 pulgadas y capacidades de transformadores de hasta 50 kva.

La mayoría de las punteadoras grandes, y aquellas utilizadas para mayores índices de producción, son del tipo prensa, como la que se muestra en la figura 6.2.3. En éstas, el electrodo movable tiene un movimiento en línea recta, proporcionado por un cilindro de aire o hidráulico. Tales máquinas son adaptables a cualquier tipo de ciclo de presión controlada que se desee. Son comunes capacidades de hasta 500 kva y profundidades de garganta de 60 pulgs. Punteadoras de este tipo para objetivos especiales, empleando cabezas múltiples de soldadura, son ampliamente utilizadas en industrias de producción masiva. Algunas pueden hacer hasta 200 punteos en 60 segundos.

Fig. 6.2.3 Una punteadora trifásica tipo prensa de 50 - kva, de cd.



La aplicación del punteo se amplía grandemente mediante el uso de pistolas portátiles para puntear. Cada pistola se conecta al suministro de poder y a las unidades de control mediante mangueras flexibles de aire, por cables eléctricos, y por mangueras de agua para enfriamiento donde sea requerido. Tal arreglo permite llevar la unidad de soldadura y el operador a las piezas, ampliando así el uso del puntec en aplicaciones en donde el trabajo es demasiado grande para llevarlo a la máquina de soldar.

En algunas instalaciones se han instalado pistolas portátiles para puntear en posicionadores automáticos, los que posicionan la pistola en la ubicación tridimensional deseada y permiten que uno o más punteos se hagan automáticamente sin la necesidad de un operador.

#### Aplicaciones

Una de las grandes ventajas del proceso de punteo es el hecho de que prácticamente todos los metales comerciales pueden puntearse entre sí, y la mayoría de ellos unos con otros. En sólo unos cuantos casos las soldaduras tienden a ser quebradizas. La tabla 6.2.1 muestra las combinaciones de metales que pueden puntearse satisfactoriamente.

Aunque la mayoría de punteo se hace en lámina de acero forjado, otras formas de metales también pueden puntearse. Se pueden puntear láminas a formas roladas y a fundiciones de acero, y algunos tipos de fundiciones a troquel pueden soldarse sin dificultad. A excepción del aluminio, la mayoría de los metales no requieren preparación especial, excepto para estar seguro de que la superficie esté libre de corrosión y no esté muy picada. Para mejores resultados, el aluminio y el magnesio deben limpiarse inmediatamente antes de soldar me-



El límite práctico de espesor que puede ser punteado mediante procesos ordinarios es aprox. 1/8 de pulg., donde cada pieza es del mismo espesor. Sin embargo, una pieza delgada puede ser soldada fácilmente a otra pieza que sea mucho más gruesa que 1/8 de pulg. Se han realizado punteos de 2 placas de acero de 1/2 pulgada satisfactoriamente, como sustitución de remaches.

### 6.3 SOLDADURA DE COSTURA POR RESISTENCIA

#### Descripción

Las soldaduras de costura por resistencia se realizan mediante dos procesos distintos. En la mayoría de los casos, donde la soldadura es entre dos láminas de metal, la costura es en realidad una serie de puntos sobrepuestos, como se muestra en la figura 6.3.1. El equipo básico es el mismo que para punteo, pero se usan dos discos rotatorios como electrodos, acomodados como se muestra en la figura 6.3.2. Al pasar el metal entre los electrodos, pulsos programados de corriente pasan a través de él para formar las soldaduras elípticas sobrepuestas. La programación de las soldaduras y del movimiento de las piezas deben ajustarse de tal manera que las piezas no se calienten demasiado. Con frecuencia se utiliza enfriamiento externo del trabajo por aire o por agua.

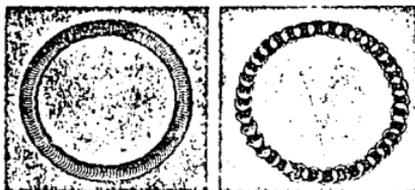


Fig. 6.3.1 Soldaduras por costura hechas con puntos sobrepuestos de separación variada.

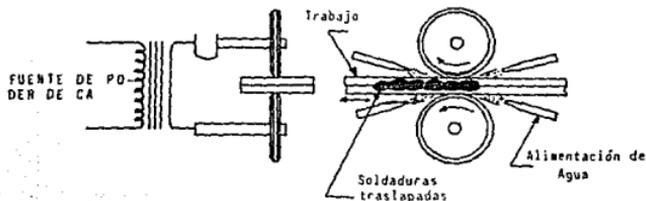


Fig. 6.3.2 Representación esquemática de soldadura de costura.

### Aplicaciones

Este tipo de soldadura se utiliza principalmente para la producción de recipientes para líquidos a presión, tales como tanques de gasolina, silenciadores de automóviles, o intercambiadores de calor. Formas especiales de electrodos pueden usarse para producir soldaduras de costura intermitentes y para adaptar procesos a una amplia variedad de productos.

El segundo tipo de costura por resistencia se está utilizando ampliamente para hacer soldaduras a tope entre placas de metal. En este proceso se utiliza la resistencia eléctrica de los metales a tope, pero se emplea una corriente de alta frecuencia, hasta de 450 khz, que confina el calentamiento a las superficies a unir; al alcanzar éstas la temperatura de soldadura, las superficies calientes se presan conjuntamente progresivamente pasándolas por rodillos de presión. El uso más extendido de este proceso es para hacer tubería, utilizando el arreglo mostrado en la figura 6.3.3. Sin embargo, se está utilizando cada vez más para hacer formas estructurales de material plano. Se puede soldar material con espesor de 0.005 pulgs. hasta 1/2 pulg. a velocidades hasta de 250 pies/min. La combinación de corriente de alta frecuencia y alta velocidad al soldar, produce una zona afectada por el calor muy estrecha.

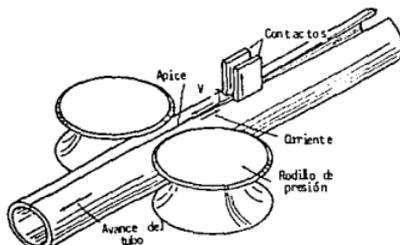


Fig. 6.3.3 Método para hacer una soldadura en costura en tubo mediante una corriente de alta frecuencia como el medio de calor.

#### 6.4 SOLDADURA POR RESISTENCIA CON SALIENTES

##### Descripción

Dos desventajas del punteo son que el mantenimiento de los electrodos es un problema considerable, y que generalmente sólo se hace un punto por vez. Si se requiere mayor resistencia o unión que la que puede proporcionar una soldadura de un punto, se deben realizar varias soldaduras similares. La soldadura por resistencia con salientes proporciona un medio de superar estas dos desventajas y, por lo tanto, se adapta particularmente bien a la producción masiva.

El principio de este proceso se ilustra en la figura 6.4.1. Se hace una depresión en una de las piezas en el lugar en donde se desea una soldadura. Después se colocan las piezas entre electrodos planos de gran área en la máquina de soldadura por resistencia con salientes, y se aplican presión y corriente como en el punteo. Debido a que el área de contacto entre las piezas y los electrodos es mucho mayor que el área del extremo de la depresión, casi toda la resistencia del circuito se localiza en ésta y, de hecho, todo el calentamiento ocurre en el punto en donde se desea la soldadura. Al hacerse plástico el metal en la depresión, debido al calor, la presión hace que la depresión desaparezca al formarse la soldadura y las piezas se unen fuertemente.

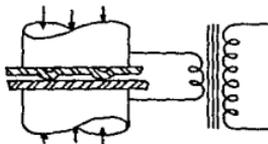


Fig. 6.4.1 Principio de soldadura con salientes.

Se pueden realizar varias soldaduras a la vez haciendo -  
varias depresiones entre los electrodos, estando limitado el -  
número sólo por la capacidad de la máquina para proporcionar -  
la corriente y presión requeridos. Otra ventaja importante es  
que las depresiones o salientes, pueden hacerse de casi cual-  
quier forma que se desee, tal como redonda, ovalada, o en for-  
ma de anillo circular, para producir soldaduras de las formas  
deseadas, según sea necesario de acuerdo a la resistencia y a  
la ubicación. Muchas máquinas de puntear son convertibles a má-  
quinas para soldar por resistencia con salientes cambiando - -  
electrodos.

Debido a que las depresiones se forman en las piezas en  
prensas punzonadoras, a menudo se pueden formar conjuntamente  
con otras operaciones de formado y de punzonado con un costo -  
virtualmente nulo. Las depresiones deberán tener la forma que  
permita que la soldadura se forme hacia afuera del centro de -  
cada depresión. Tornillos y tuercas normalmente se unen a otras  
partes de metal mediante este tipo de soldadura. Tales torni-  
llos y tuercas están disponibles con las depresiones formadas,  
listos para soldarse.

## 6.5 SOLDADURA ELECTROMAGNETICA EN ESTADO SOLIDO

Este proceso es un tipo especial de soldadura por resistencia en el cual se inducen corrientes de alta frecuencia en las piezas a unirse, mediante un campo magnético. Esto produce un calentamiento rápido en las superficies de contacto. Entonces se pasan grandes pulsos de corriente a través de las piezas en direcciones paralelas, para causar que se atraigan y se unan como consecuencia de los campos electromagnéticos mutuamente atrayentes que se establecen. El calor y la presión combinados producen coalescencia en estado sólido. Aunque el proceso no se usa ampliamente, es muy rápido y es útil para unir un buen número de metales similares y disímiles, especialmente combinaciones que son difíciles de unir por la mayoría de los procesos de soldadura.

## 6.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA

Los procesos de soldadura por resistencia tienen un número de ventajas distintas que cuentan para su amplia utilización, especialmente en producción masiva:

- 1.- Son muy rápidos.
- 2.- El equipo es semiautomático.
- 3.- Son económicos en material; no se requiere material de aporte.
- 4.- No se requieren operadores diestros.
- 5.- Se pueden unir fácilmente metales disímiles.
- 6.- Se puede lograr un alto grado de confiabilidad y de reproductibilidad.

Las principales desventajas son:

- 1.- El equipo tiene un alto costo inicial.
- 2.- Existen limitaciones acerca de los tipos de unión que se pueden realizar.
- 3.- Se requiere personal de mantenimiento hábil para dar servicio al equipo de control.
- 4.- Para algunos materiales, las superficies deben recibir preparación especial antes de soldarse.

Es evidente que las desventajas no son considerables cuando se va a realizar soldadura por resistencia en un volumen alto.

## CAPITULO 7

## OTROS PROCESOS DE SOLDADURA

7.1 INTRODUCCION

Como se indica en el capítulo 2, existe un número de procesos de soldadura muy útiles que utilizan fuentes de calor - distintas a la flama de oxiacetileno, a la resistencia eléctrica, o al arco eléctrico. Aunque algunos son completamente viejos, otros están entre los más nuevos de los procesos de soldadura. La mayoría de ellos son adecuados solamente para aplicaciones limitadas, pero muy importantes. En este capítulo se abordarán este tipo de procesos.

## 7.2 SOLDADURA ALUMINOTERMICA

### Descripción y Aplicaciones

La soldadura aluminotérmica se basa en el principio químico fundamental de que el aluminio es un metal químicamente más activo que el hierro. El proceso consiste en mezclar óxido de hierro y aluminio, ambos en forma de polvo. Se colocan en una tolva o embudo arriba de un molde que rodea el área a soldar. Se enciende la mezcla. El aluminio se combina químicamente con las moléculas en el óxido de hierro, produciendo una temperatura de aproximadamente 2760 °C. Se producen una escoria de aluminio (óxido de aluminio) y hierro líquido. Este hierro de alta temperatura es más pesado que el óxido de aluminio y se dirige al fondo del molde, lo que le permite entrar en contacto con la unión de acero. El mismo hierro fundirá la superficie del acero a soldar y se fundirá con ella. Este método puede usarse para soldar piezas de acero tanto pequeñas como grandes. Es muy popular en donde se van a soldar secciones grandes. Con frecuencia se utiliza precalentamiento si el tamaño de las piezas a soldar es grande. El proceso utiliza una mezcla mecánica de aproximadamente una parte de aluminio finamente dividido y tres partes de óxido de hierro. Cuando se enciende la mezcla, reacciona de acuerdo a la siguiente ecuación química:



La soldadura aluminotérmica puede ser comparada burdamente con una operación de vaciado en un taller de fundición. Una diferencia es que el metal vertido es de una temperatura considerablemente más alta que el metal fundido en un horno.

Aplicaciones comunes de este proceso son: soldar vías de

ferrocarril, soldar dientes nuevos a engranes grandes, y soldar árboles grandes fracturados. También se usa para soldar - secciones de fundiciones cuando su tamaño no permite que sean fundidas en una sola pieza. Asimismo se usa para reparar grandes estructuras de acero que se hacen por orden especial, y - que sería muy costoso reemplazar. La soldadura aluminotérmica se ha aplicado exitosamente en casi todas las industrias.

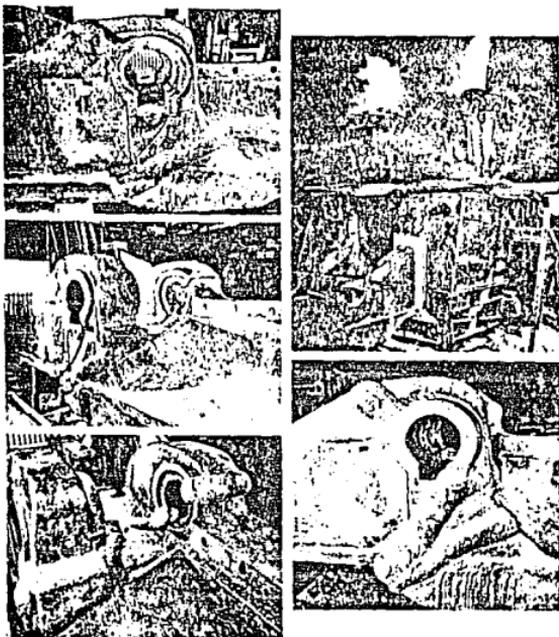
La soldadura aluminotérmica también se usa para soldar tubo. Sin embargo, en esta aplicación el hierro fundido no se mezcla con el metal del tubo, sino que únicamente proporciona el calor para fundir los extremos del tubo. Las partes del tubo se presionan cuando están fundidas.

#### Procedimiento para Soldar

Como la soldadura aluminotérmica es una forma especializada de vaciado, son necesarios moldes para controlar el flujo y forma del hierro líquido. Las partes metálicas se acomodan firme y exactamente para soldar. Una unión generalmente - se maquina para proporcionar un claro en V alrededor de la - unión para permitir que el metal fundido tenga acceso a todas partes. Otro método consiste en utilizar un patrón de cera colocado en la unión, y que tenga la misma forma que la soldadura final; se construye un molde de arena alrededor del patrón de cera y del trabajo a soldar. En los trabajos más grandes - son necesarios respiraderos; durante el precalentamiento del metal a soldar, la cera utilizada como patrón se derrite, dejando la cavidad correctamente formada para recibir el metal fundido.

Un tercer método utiliza un molde permanente.

La figura 7.2.1 muestra los pasos para reparar una fundición mediante el proceso de soldadura aluminotérmica.



**Fig. 7.2.1** Pasos para reparar una fundición grande mediante el proceso de soldadura aluminotérmica; (arriba izq.) la fundición quebrada; (centro izq.) la grieta lista para la cera; (abajo izq.) patrón de cera en su lugar; (arriba der.) polvo aluminotérmico fundido y fluyendo dentro del molde; - - (abajo der.) soldadura completa y lista para acabad).

En la mayoría de aplicaciones, se construye arriba del molde un contenedor en forma de embudo hecho de los mismos materiales que el molde. Este embudo contiene el aluminio y el óxido de hierro en su forma original en polvo. Se requiere una cantidad suficiente para proporcionar el hierro necesario para la soldadura. Algunos moldes tienen una entrada de precalentamiento, que proporciona el calentamiento al metal justamente antes del vertido del hierro. El precalentar también asegura que se remueva toda la humedad. Como en todos los trabajos de vaciado, cualquier humedad presente cuando el metal fundido se vacía puede provocar una creación repentina de vapor y una explosión. Se debe utilizar un polvo de ignición que tenga una temperatura de ignición baja, pero que se quemara a una temperatura alta para iniciar la reacción de termita. La mezcla de aluminio y de óxido de hierro encenderá solamente después de que haya sido llevada a la temperatura de aprox. 1043°C. Una vez que la mezcla empieza a quemarse, se propaga sola. Deberá permitirse que la reacción química se complete antes de iniciar el vertido. Se considera que el proceso es seguro debido a la alta temperatura necesaria para iniciar la reacción de termita, lo que elimina la posibilidad de encendido accidental de la mezcla.

Después de que se completa la soldadura y el metal se ha dejado enfriar, se retira el molde. La soldadura puede necesitar desbastado debido al metal en exceso adherido a ella, por ejemplo en la entrada del vaciado y en los respiraderos. Es especialmente importante remover aceite, grasa o agua del metal a soldar, porque podrían vaporizarse y generar una presión excesivamente alta y dañar al molde.

El proceso de termita también se utiliza para soldar cables para conductores eléctricos, como se muestra en la figura 7.2.2.

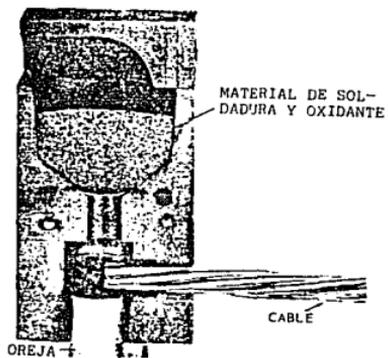


Fig. 7.2.2 Partes de cables para soldar siendo unidas mediante el proceso de soldadura aluminotérmica.

### 7.3 SOLDADURA POR ARCO CON PRESION

#### Descripción del Proceso

La soldadura por arco con presión es un proceso de soldadura a tope por resistencia, en el cual se sujetan dos piezas en dispositivos conductores de corriente adecuados que las sujetan extremo a extremo con un contacto muy ligero. Se aplica un potencial eléctrico que provoca que la corriente fluya a través de las piezas para producir un chisporroteo, o la formación del arco, que, en combinación con la resistencia eléctrica, calientan los extremos a tope hasta el punto de fusión. Cuando los extremos a tope alcanzan la temperatura adecuada, las piezas se unen repentinamente con fuerza suficiente para causar una acción de recalado, la cual fuerza al metal plástico junto con la mayoría de impurezas no expulsadas por el chisporroteo, fuera de la unión.

La máquina usada para este proceso generalmente consiste en un transformador para soldar de baja impedancia, una plancha estacionaria, y una plancha movable en la que se montan los dados de sujeción, electrodos y otras herramientas necesarias para posicionar y mantener las piezas, mecanismos de chisporroteo y recalado, y los controles eléctricos, neumáticos o hidráulicos necesarios.

#### Aplicaciones

En la industria aeroespacial este proceso se usa en la producción de ensamblajes estructurales sólidos y tubulares, trenes de aterrizaje, y anillos de varios tamaños. Rines de llantas y arillos de faro, son típicos de partes automotrices unidas comúnmente por soldadura por arco con presión. Otras apli-

caciones incluyen la soldadura de estructuras de ventanas en - las industrias automotriz y de la construcción, soldadura de - hojas de sierra sin fin en lazo continuo, y la unión de brocas de acero para herramienta, cuerpos de machuelos y escariadores a mangos de acero al carbono y aceros aleados.

Las máquinas más grandes de este proceso se usan en la - producción de tubería de conducción. Máquinas con capacidades de 6,000 kva, capaces de entregar más de un millón de amperes se usan para soldar uniones longitudinales de 40 pies de longitud en tubería de hasta 5/8 de pulg. de espesor de pared en - una operación. La tubería se forma de placa en prensas dobladas en U, plegadoras y cerradoras. La unión se posiciona con - la ayuda de topes de ubicación, y luego la longitud entera se suelda mediante soldadura por arco con presión simultáneamente.

Máquinas de soldadura por arco con presión se usan en líneas de baños químicos en acerías, líneas de reducción en frío y líneas de rebobinado para unir bobinas para operación continua. En plantas estiradoras el proceso se usa para producir bobinas de pesos específicos. Tanto en acerías como en plantas estiradoras la unión soldada se somete a la misma reducción - que el metal base.

#### Capacidades del Proceso

Cualquier metal que pueda ser forjado puede ser soldado por arco con presión y, mediante un control cuidadoso de las - condiciones de soldadura, se pueden unir muchas combinaciones de metales disímiles.

Este proceso puede usarse para producir ensambles que de otra manera requerirían forjas o fundiciones más costosas. El proceso es capaz de producir soldaduras con resistencia igual,

o algunas veces mayor, a aquella del metal base, de unir una amplia variedad de metales similares y disímiles en muchas formas de sección transversal, y de mantener, con alta exactitud, la longitud y alineación de las piezas.

Se pueden hacer soldaduras con los ejes longitudinales de las piezas, tanto en línea uno con el otro, o en ángulos, como en un empalme biselado.

Generalmente, el acabado o forma de las superficies a tope no son críticos, excepto en piezas grandes, donde los extremos se biselan para iniciar el chisporroteo y para promover la expulsión de las partículas del chisporroteo. Para soldaduras de gran calidad, los dos extremos a soldar deberán ser similares en tamaño y forma.

ECONOMIA EN OPERACION Y MATERIAL.- La soldadura por arco con presión es económica en operación y en uso de metal. En aplicaciones en donde este proceso ha reemplazado otros procesos de unión, el índice de producción ha sido aumentado sustancialmente.

Barras de metal en plancha o extruidas se rolan y se convierten en anillos de dimensiones adecuadas, los cuales son soldados después por arco con presión, volviéndose anillos continuos. Cuando se producen anillos de esta manera, se pierde menos metal al maquinar que cuando los anillos se forjan, y se incurre en menos pérdida de desecho que cuando los anillos se cortan de placa. La unión soldada por arco con presión tiene una resistencia casi igual a aquella del metal base y generalmente puede trabajarse en frío o en caliente en la misma manera que el metal base.

Al unir forjas a tubos se pueden minimizar los costos de material y el peso de los ensambles, usando soldadura por arco con presión.

**RESISTENCIA DE LA SOLDADURA.**- Con tratamiento posterior a la soldadura, se pueden producir soldaduras de alta calidad en acero, que son casi tan fuertes como el metal base, incluso cuando las soldaduras son tratadas térmicamente a una resistencia a la tensión de tanto como 200,000 lbs/pulg<sup>2</sup> para acero - 4130, ó 240,000 lbs/pulg<sup>2</sup> para acero 4340. Los componentes que se hacen de aceros tratables térmicamente generalmente son soldados en la condición de revenido, y luego se normalizan, se enfrían y se templean después de soldar. La soldadura por arco con presión afecta o elimina cualquier propiedad del metal tra bajado en frío.

Las propiedades de fatiga de uniones soldadas por arco - con presión, después de que se remueve el recalado de soldadura, generalmente son iguales o mejores que aquéllas de uniones hechas por otros procesos de soldadura.

**SECCIONES SOLDADAS.**- Se puede soldar por arco con presión una gran variedad de formas de secciones transversales, - incluyendo tiras planas, lámina, tubería, acero en barra o en placa, forjas, extrusiones y muchas combinaciones de estas formas de producto.

**EXACTITUD.**- Con dispositivos adecuados, la alineación - de las partes soldadas puede mantenerse bien dentro de los requerimientos necesarios. De acuerdo a especificaciones, la - máxima excentricidad entre las partes soldadas no debe exceder del 10% del espesor de la lámina o tubería, y de 0.008 pulgs. cuando el espesor de la lámina o de la pared del tubo sea de - 0.080 pulgadas o menos. Además, el desalineamiento angular (de rechez) de las partes soldadas no debe exceder de 0.005 pulgs. por pulgada de longitud. La figura 7.3.1 muestra un arreglo - con posicionadores para soldar por arco con presión.

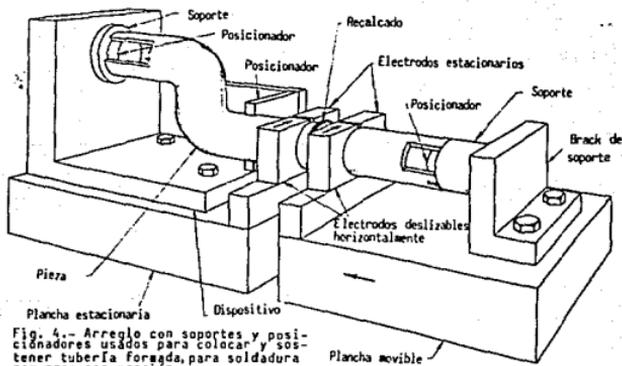


Fig. 4.- Arreglo con soportes y posicionadores usados para colocar y sostener tubería formada, para soldadura por arco con presión.

Fig. 7.3.1 Arreglo con soportes y posicionadores usados para colocar y sostener tubería formada, para soldadura por arco con presión.

La tolerancia en la longitud soldada puede ser menor que la suma de las tolerancias en las partes individuales cuando se usa un instrumental adecuado de ubicación y una adecuada preparación de la máquina de soldar. No hay estándares uniformes para tolerancias en longitud soldada, y las prácticas varían ampliamente. En general, la tolerancia en la longitud soldada se afecta por cuatro factores: a) las tolerancias en las partes individuales; b) la tolerancia por cambios dimensionales durante el tratamiento de calor; c) la cantidad de maquinado después de soldar; y d) el cuidado puesto en montar y ubicar las partes en la máquina de soldar.

### Desventajas y Limitaciones

Una de las características más indeseables de la soldadura por arco con presión es la operación misma de chisporroteo, durante la cual partículas fundidas de metal se expulsan rápidamente de la región de soldadura. Es imposible proteger la máquina soldadora y el área alrededor de estas partículas que pueden quemarse en los baleros, en el aislamiento y en otras partes críticas de la máquina; el desensamble periódico de ésta, y la sustitución del aislamiento y los baleros, son parte del procedimiento de mantenimiento normal.

La soldadura por arco con presión también presenta un riesgo considerable de incendio. Los trabajadores deben protegerse de las partículas voladoras. Los materiales combustibles deben mantenerse lejos de la máquina soldadora y de su área contigua, y se debe usar un grado de aceite hidráulico resistente al fuego.

La remoción de la rebaba y del recalcado generalmente es necesaria y requiere maquinaria adicional, como un desbastador, y por lo tanto, aumenta el costo del producto. La remoción del recalcado de soldadura de piezas planas es sencillo, suponiendo que las partes son de espesor igual o de igual sección transversal; la remoción del recalcado de soldadura de piezas curvas debe hacerse por esmerilado manual o por cincelado. El recalcado en el interior de tubería soldada a tope puede restringir el flujo del fluido, reducir la resistencia a la fatiga, y servir como un punto de concentración para corrosión o contaminantes; el recalcado es difícil o imposible de remover del interior de tubería de diámetro pequeño.

La concetricidad y derecha de las piezas durante la soldadura es a menudo difícil de mantener y el desalineamiento puede causar rechazo, o puede implicar operaciones de maquinado posteriores a la soldadura.

Otra desventaja de este proceso es el costo de proporcionar material para compensar el metal perdido durante el chisporroteo y el recalado.

LIMITACIONES.- El tamaño y área transversal de las piezas que pueden soldarse mediante este proceso están limitados por la potencia y fuerza de recalado disponibles en la máquina. Algunas veces, el tamaño de la pieza está limitado por la carrera máxima de las abrazaderas y la apertura máxima entre las superficies de sujeción. La tabla 7.3.1 da las áreas típicas de sección transversal máxima y las capacidades requeridas de la máquina soldadora para soldar por arco con presión varios metales.

TABLA 7.3.1 Áreas máximas de sección transversal y capacidades requeridas de máquina soldadora para soldar por arco con presión varios metales.

METAL DE TRABAJO	AREA MAXIMA pulg <sup>2</sup>	CAPACIDAD DE MAQUINA Kva	MAQUINA Tons.
Aceros al carbono y de baja aleación	60	1500	750
Acero aleado 4340 modificado	33	1600	500
Aceros inoxidables serie 300	40	1600	500
Aceros inoxidables serie 400	22	1600	500
Aleaciones resistentes al calor	25	1600	500
Acero aleado 18% Ni	15	1600	500
Aleaciones de Níquel	25	1600	500
Aleaciones de Aluminio	14	1600	500
Aleaciones de Titanio	40	1600	500

Si se desea realizar una buena soldadura por arco con presión, los extremos a tope deberán ser esencialmente del mismo tamaño y forma. Se encuentra una dificultad considerable si las secciones transversales son desiguales. Al soldar extrusiones que tengan formas diferentes, generalmente deben cortarse las porciones que no empalman.

La soldadura por arco con presión de uniones en T generalmente está limitada. Por ejemplo, cuando se suelda el extremo de un tubo redondo al lado de otro tubo redondo, las diferencias en sección, balance de calor y resistencia a la fuerza de recalado generalmente resultan en una soldadura de calidad pobre.

En la región de contacto con los dados de sujeción, las superficies de piezas con escamas, oxidadas, herrumbradas o cubiertas de otra manera, deben limpiarse antes de soldarse por arco con presión, para asegurar el flujo adecuado de corriente. En aleaciones de aluminio, que requieren alta corriente de soldadura, recubrimientos superficiales, tales como óxido, pintura, aceite o capas anodizadas, pueden causar marcas calientes; éstas a la vez pueden causar sobrecalentamiento de los dados sujetadores, o fusión de algunas secciones de los dados o piezas.

El alineamiento de piezas hechas de material delgado, tubular o plano, a veces es difícil. Si los dados no se mantienen cuidadosamente, resulta un alineamiento pobre de las piezas y el chisporroteo ocurre solamente en los puntos de contacto. Durante el recalado, las piezas se resbalan pasándose una a la otra, resultando en un traslape en lugar de una soldadura. El desbastado posterior puede remover la región soldada y causar separación.

En la soldadura por arco con presión de inglete, las

formas de las piezas pueden evitar una sujeción adecuada que - aseguraría una buena soldadura. En muchos marcos de ventani- - llas de aluminio, hechos de secciones extruidas, las secciones de las distintas partes con diferentes. En la mayoría de unio- nes de inglete, se pueden hacer soldaduras aceptables en par- - tes que, en posición de soldar, están en el mismo plano que el de la dirección de la fuerza de recalado o de el movimiento - de la plancha, pero se hacen soldaduras pobres en partes que - no están en el plano del movimiento de la plancha.

#### Metales Soldados

La soldadura por arco con presión se puede usar para - - unir muchas aleaciones ferrosas y no ferrosas, y combinaciones de metales disímiles. Además de acero al bajo carbono, los me- - tales que son soldados por arco con presión bajo una base de - producción incluyen aceros de baja aleación de mediana y alta resistencia, aceros para herramienta, aceros inoxidables auste - níticos, martensíticos y ferríticos, aleaciones de cobre, de - magnesio, de molibdeno, de níquel y de titanio.

Cuando se sueldan aceros aleados y al carbono de gran - templabilidad, las propiedades de como soldado de la zona afec - tada por el calor se desvían sustancialmente de aquéllas del - metal base, y se necesita un tratamiento térmico postsoldadura para obtener uniformidad de propiedades, especialmente si la - pieza soldada va a ser estirada o reducida en sección. Tratar con calor en la máquina soldadora es poco probable que tenga - el efecto metalúrgico adecuado. Algunas veces el proceso requere - rido de tratamiento de calor implica un ciclo más largo de ca - lentamiento y enfriamiento del que es posible en la máquina - soldadora.

Las fundiciones nunca han sido satisfactoriamente solda-

das por arco con presión en producción, aunque se han obtenido algunos resultados aceptables en el laboratorio.

Los aceros al bajo carbono son fácilmente soldados por arco con presión sin precalentamiento. Conforme aumentan los contenidos de carbono y aleación, puede necesitarse precalentamiento o postcalentamiento, o ambos, para una máxima calidad de la soldadura. La presión requerida para recalado para soldar varios tipos de acero, se relaciona con la resistencia de forja del acero a temperaturas elevadas, y con el gradiente de temperatura en el acero en el área de recalado. La mayoría de los tipos de acero son fácilmente soldables en combinaciones similares y disímiles, pero algunas combinaciones requieren procedimientos especiales.

Las aleaciones de aluminio son, en general, soldables, pero el espesor del material deberá ser mayor de 0.050 pulgadas. Las extrusiones de aluminio son fácilmente soldables, pero pueden necesitar atención especial en las superficies a tope.

En general, aleaciones de cobre con un alto contenido de zinc, sueldan mejor que aquellas con un bajo contenido del mismo; las aleaciones de cobre con alto plomo pueden dar soldaduras quebradizas. La ductilidad de las soldaduras en algunas varillas de aleación de cobre permite que las varillas sean aplastadas bajo martilleo repetido a aproximadamente 15% del espesor sin indicaciones de fractura en la soldadura.

La soldadura por arco con presión de zinc, estaño, bismuto y antimonio, y aleaciones de estos metales, es impráctica al igual que la del plomo.

Metales tóxicos como el berilio y sus aleaciones, no son adecuados para este proceso si no se toman medidas precauto-

TABLA 7.3.2 Algunas combinaciones de metales base que han sido soldadas por arco con presión.

	Aleaciones de aluminio	Aleaciones de cobre	Aleaciones de magnesio	Molibdeno	Aleaciones de níquel	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables	Aceros p/herramienta	Tántalo	Aleaciones de titanio	Tungsteno
Aleaciones de aluminio	X	X	X	X							
Aleaciones de cobre	X	X	X			X	X	X		X	
Aleaciones de magnesio	X	X	X								
Molibdeno				X	X	X	X	X			
Aleaciones de níquel	X	X		X	X	X	X	X	X		X
Aceros al carbono y aleados		X		X	X	X	X	X	X	X	X
Aceros inoxidables		X		X	X	X	X	X	X	X	X
Aceros p/herramienta		X		X	X	X	X	X	X		X
Tántalo		X			X	X	X	X			
Aleaciones de titanio		X				X	X			X	
Tungsteno					X	X	X	X			X

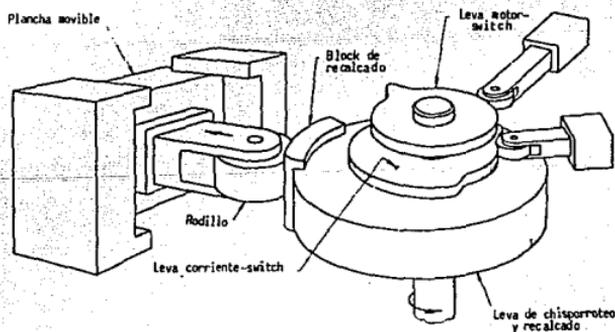


Fig. 7.3.2 Arreglo esquemático de tres levas ligadas a una sola flecha y giradas por ella, usadas para controlar el chisporroteo y fuerza de recalcado y el tiempo en soldadura por arco con presión.

rias estrictas para evitar la contaminación del aire y del - -  
equipo y peligro al personal por partículas de chisporroteo y  
polvo.

Muchas combinaciones de metales disímiles son fácilmente  
soldadas mediante este proceso si se utilizan las condiciones  
adecuadas de soldadura y un buen diseño de la pieza. La tabla  
7.3.2 enlista algunas combinaciones de metales que han sido -  
unidos por arco con presión.

#### Fundamentos del Proceso

El calor para la soldadura por arco con presión se gene-  
ra por cortocircuitos rápidamente recurrentes de corriente - -  
eléctrica alta en los extremos a tope de las piezas a soldar.  
La soldadura se produce por la aplicación de una fuerza de for-  
ja conforme la pieza alcanza la temperatura de soldadura. La -  
fuerza de recalcado se produce ya sea manualmente mediante ac-  
ción de palanca, mecánicamente mediante una leva movida por mo-  
tor, o hidráulicamente mediante cilindros hidráulicos. Las dos  
piezas se aseguran firmemente con dos conjuntos de dados suje-  
tadores que conducen la corriente de soldadura. Un conjunto de  
dados sujetadores se monta en la plancha movable y el otro en  
la plancha estacionaria de la máquina soldadora. La figura - -  
7.3.2 muestra un arreglo para controlar el chisporroteo, la -  
fuerza de recalcado y el tiempo en la soldadura por arco con -  
presión.

El proceso se inicia llevando los extremos de las piezas  
a un contacto ligero para establecer una acción de chisporro-  
teo. El contacto localizado irregular entre las dos superfi- -  
cies ligeramente unidas resulta en una localización extrema de  
calor en las superficies adyacentes. El área de contacto con-  
siste de una serie de contactos de cortocircuito pequeños en -

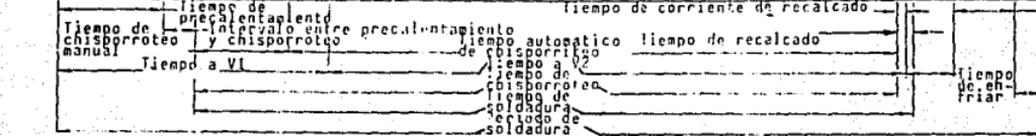
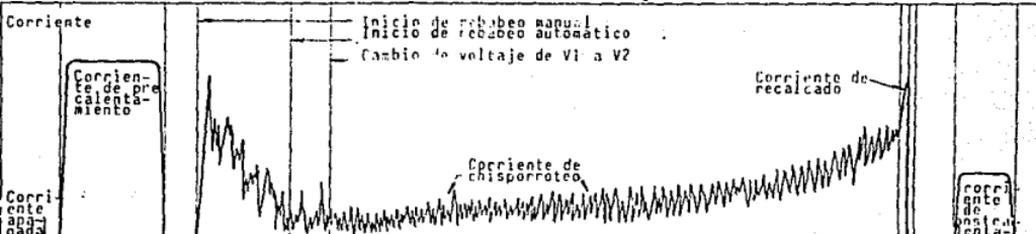
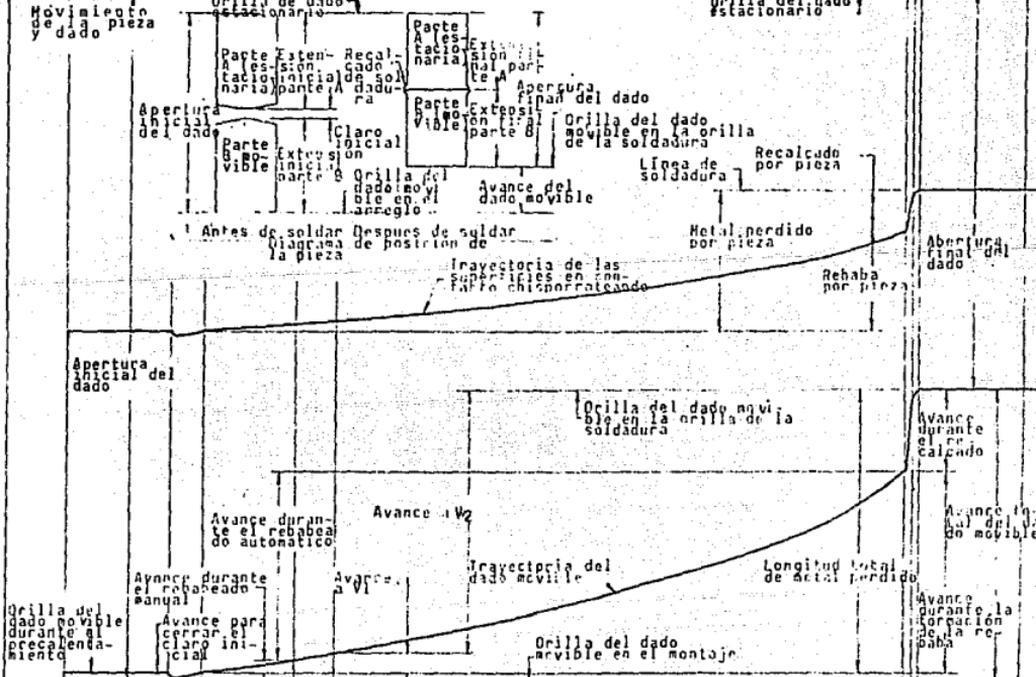
forma de puentes de metal entre las dos piezas. Estos puentes de metal son llevados repetidamente al punto de fusión, rotos y botados en forma de chispas. Esto genera el calor necesario para llevar una zona pequeña atrás de las superficies fundidas a una temperatura dentro del rango plástico.

La plancha movable, en la cual se sujeta una de las piezas, avanza para poner nuevos puntos en contacto conforme el metal se expulsa durante el chisporroteo, y continúa moviéndose hacia la plancha estacionaria, hasta que la acción de chisporroteo es uniforme en las superficies a tope. Para mantener el chisporroteo, el índice de alimentación debe estar proporcionado adecuadamente al voltaje y a la corriente de soldadura. Si la alimentación es demasiado baja, el chisporroteo es débil y se genera calor insuficiente. Si la alimentación es demasiado rápida, las piezas se adhieren prematuramente y, si no son separadas, se unen en una soldadura pobre.

Cuando se calienta la profundidad correcta de metal al rango plástico, la velocidad de la plancha movable se aumenta repentinamente, uniendo las piezas bajo una fuerza de recalcado y produciendo una soldadura forjada.

La acción de forja empuja al metal fundido y a parte del metal plástico fuera del área de soldadura, dentro de un recalcado de soldadura. En muchas aplicaciones, el recalcado debe ser removido después de soldar, mediante rebajado o maquinado.

La figura 7.3.3 muestra variaciones durante un ciclo de soldadura por arco con presión, como función del tiempo. Las interrelaciones entre las variables no representan valores intrínsecos. No todas las funciones o elementos mostrados en la figura se usan en cada máquina de soldadura por arco con presión o en cada operación de este proceso.



La profundidad de la zona plástica y el grado de plasticidad afectan la inclinación del metal recalado. Un recalado con una inclinación entre  $45^\circ$  y  $80^\circ$ , como se muestra en la fig. 7.3.4a, generalmente indica que se ha utilizado la cantidad correcta de calor, y que ha ocurrido suficiente recalado. Si la inclinación del recalado es pronunciada y aparecen grietas longitudinales, como se observa en 7.3.4b, se ha aplicado una fuerza de recalado demasiado grande a una temperatura del metal demasiado baja; estas grietas son similares a las grietas de forja, y resultan de la aplicación de la fuerza de recalado antes de que el metal de trabajo ha llegado a ser lo suficientemente plástico. Si la inclinación es mucho menor de  $45^\circ$ , como en la fig. 7.3.4c, el calor y la fuerza recaladora han sido demasiado bajos.

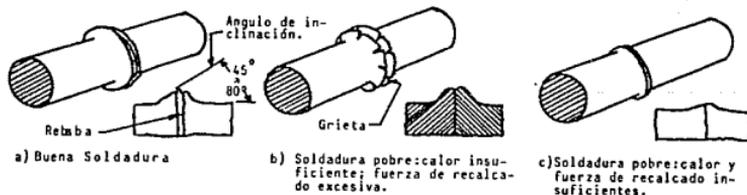


Fig. 7.3.4 Formas de recalado de soldadura que indican la calidad de la soldadura y adecuación de calor y fuerza de recalado usados durante la soldadura.

La calidad de una soldadura por arco con presión es afectada grandemente por la fuerza recaladora. Durante la acción de recalado, la fuerza deberá ser suficiente para cerrar todos los huecos, para expulsar el metal fundido, escorias y - otras impurezas y para permitir una fusión completa de las dos piezas. La relación del tiempo a la magnitud de la fuerza de recalado se muestra en la fig. 7.3.3. La presión en la plancha es relativamente constante durante el chisporroteo, pero aumenta rápidamente para realizar el recalado. Esta presión de recalado generalmente es constante durante el tiempo frío, el tiempo de postcalor y el tiempo en que se mantiene la presión después de cortar la corriente.

La cantidad necesaria de fuerza de recalado se relaciona con la temperatura del metal en el área de recalado, y a la resistencia del metal a la compresión a la temperatura de soldadura. La tabla 7.3.3 lista las presiones requeridas para recalcar algunas aleaciones ferrosas y no ferrosas sin precalentamiento.

**TABLA 7.3.3** Presiones requeridas para recalcar varios metales, ferrosos y no ferrosos, de varios espesores (a).

METAL DE TRABAJO	Espesor (pulg.)	Presión lbs/pulg <sup>2</sup> (b)
Aleaciones de aluminio:		
-Suaves	Hasta 5/8	8000 a 10000
-Alta resistencia		hasta 20000
Cobre, simple	Hasta 3/4	5000 a 7500
Aleaciones resistentes al calor		hasta 35000
Aleaciones de magnesio		6000 a 8000
Aceros inoxidables	Hasta 2	13000 a 25000
Aceros al carbono y de baja aleación:		
-1020	Hasta 3/8	6000 a 10000
	3/8 a 1	7000 a 10000
	1 a 2	9000 a 11000
	2 a 4	10300 a 12000
-2340, 3140	Hasta 1	10000 a 12000
-4140, 6145	Hasta 1 1/4	11000 a 18000

(a) basadas en la temperatura de soldadura obtenida sin precalentamiento. Las presiones pueden ser tanto como 50% menos si se usa precalentamiento. (b) libras por pulgada cuadrada de área de sección transversal de soldadura.

Con precalentamiento, los valores de la tabla anterior - pueden reducirse hasta en un 50%.

#### Extensión de las Piezas desde los Dados

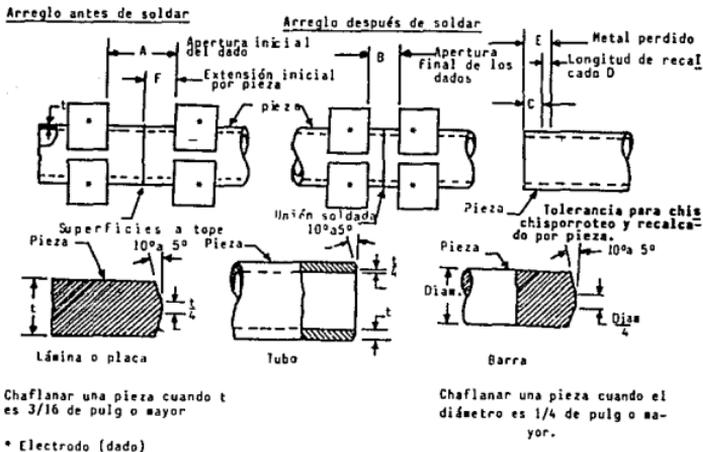
La cantidad de extensión inicial de la pieza desde el da do sujetador o electrodo se determina principalmente por la ca pacidad del metal de alcanzar la temperatura correcta en el - rango plástico durante el precalentamiento y el chisporroteo. Algo del calor generado por el chisporroteo se pierde por ra diación y algo se pierde por conducción a los dados, por lo - que la extensión inicial debe ser lo suficientemente grande pa ra minimizar la pérdida por conducción. Sin embargo, la exten- sión no debe ser demasiado grande, porque una extensión grande disminuye el gradiente de temperatura y, por lo tanto, reduce el efecto de la fuerza de recalado y su capacidad para purgar la soldadura mediante la expulsión del metal fundido.

Las extensiones iniciales que son más grandes que las re queridas, pueden contribuir a un desalineamiento de las piezas después de soldar. Con frecuencia, se debe hacer un compromiso entre las condiciones de soldadura y desalineamiento permisi- ble, especialmente al soldar láminas o piezas delgadas.

El tamaño de la zona afectada por el calor depende par- cialmente de las extensiones iniciales y finales. Puede de sear se templar una pieza antes de soldar y retener una dureza espe cífica en una cierta porción de la zona de soldadura después - de soldar. Se puede retener la dureza deseada mediante manipu- lación adecuada de las extensiones inicial y final de la pieza.

Quando las piezas son del mismo tamaño, forma y metal, - las extensiones iniciales se hacen iguales. Se usan extensio- nes desiguales para ayudar a producir un mejor balance de ca-

lor cuando extensiones iguales dan resultados insatisfactorios. La tabla 7.3.4 muestra tolerancias dimensionales típicas, incluyendo longitudes de extensiones iniciales y finales, para soldar tubos de acero, plancha y barras sólidas.



**TABLA 7.3.4** Tolerancias dimensionales típicas para soldar - por arco con presión tubería de acero, material plano y barras sólidas de baja y media resistencia a la forja.

TABLA 7.3.4 (Continuación)

Espesor (t) de la pared de tubo o material pla- no, pulgs. (b)	Tolerancia dimensional, pulgs. (ver ilustr. p 127 para ubicación y definición).					Tiempo de chispa p roteo, segs.	
	A(c)	B	C	D	E		F
<b>Tubería o metal plano</b>							
0.010 .....	0.110	0.050	0.020	0.010	0.030	0.055	0.40
0.020 .....	0.215	0.100	0.040	0.018	0.058	0.108	0.80
0.030 .....	0.325	0.150	0.063	0.025	0.088	0.163	1.25
0.040 .....	0.430	0.200	0.083	0.032	0.115	0.215	1.75
0.050 .....	0.530	0.250	0.103	0.037	0.140	0.265	2.25
0.060 .....	0.620	0.290	0.120	0.045	0.165	0.310	2.75
0.070 .....	0.715	0.330	0.140	0.053	0.193	0.358	3.50
0.080 .....	0.805	0.370	0.158	0.060	0.218	0.403	4.00
0.090 .....	0.885	0.410	0.173	0.065	0.238	0.443	4.50
0.100 .....	0.970	0.450	0.188	0.072	0.260	0.485	5.00
0.110 .....	1.060	0.490	0.205	0.080	0.285	0.530	5.75
0.120 .....	1.140	0.530	0.220	0.085	0.305	0.570	6.25
0.140 .....	1.320	0.620	0.255	0.095	0.350	0.660	7.75
0.150 .....	1.390	0.660	0.265	0.100	0.365	0.695	8.50
0.160 .....	1.470	0.700	0.280	0.105	0.385	0.735	9.00
0.170 .....	1.540	0.740	0.290	0.110	0.400	0.770	9.75
0.190 .....	1.690	0.820	0.315	0.120	0.435	0.845	11.25
0.200 .....	1.760	0.860	0.325	0.125	0.450	0.890	12.00
0.250 .....	2.010	1.000	0.365	0.140	0.505	1.005	16.00
0.300 .....	2.245	1.125	0.405	0.155	0.560	1.123	21.00
0.400 .....	2.640	1.350	0.465	0.180	0.645	1.320	33.00
0.500 .....	2.910	1.500	0.510	0.195	0.705	1.455	45.00
0.600 .....	3.135	1.630	0.543	0.210	0.753	1.568	56.00
0.700 .....	3.360	1.750	0.580	0.225	0.805	1.680	70.00
0.800 .....	3.525	1.850	0.605	0.233	0.838	1.763	83.00
0.900 .....	3.660	1.930	0.625	0.240	0.865	1.830	97.00
1.000 .....	3.800	2.000	0.650	0.250	0.900	1.900	110.00

TABLA 7.3.4 (Continuación)

Diámetro (o dimensión seccional mínima de barra, pulgs. (d))	Tolerancia dimensional, pulgs. (ver ilustr. p 127 para ubicación y definición)						Tiempo de chispa- roteo, segs.
	A(c)	B	C	D	E	F	
Barras sólidas (redonda, hexagonal, cuadrada o rectangular) (e)							
0.050 .....	0.100	0.050	0.020	0.005	0.025	0.050	0.40
0.100 .....	0.182	0.100	0.031	0.010	0.041	0.091	0.75
0.150 .....	0.270	0.150	0.045	0.015	0.060	0.135	1.15
0.200 .....	0.360	0.200	0.055	0.020	0.075	0.175	1.50
0.250 .....	0.430	0.250	0.065	0.025	0.090	0.215	1.90
0.300 .....	0.510	0.300	0.075	0.030	0.105	0.255	2.25
0.350 .....	0.600	0.350	0.090	0.035	0.125	0.300	2.75
0.400 .....	0.685	0.400	0.103	0.040	0.143	0.343	3.25
0.450 .....	0.770	0.450	0.115	0.045	0.160	0.395	3.75
0.500 .....	0.850	0.500	0.125	0.050	0.175	0.425	4.25
0.550 .....	0.940	0.550	0.140	0.055	0.195	0.470	5.00
0.600 .....	1.025	0.600	0.153	0.060	0.213	0.513	5.50
0.650 .....	1.100	0.650	0.163	0.062	0.225	0.550	6.75
0.700 .....	1.180	0.700	0.175	0.065	0.240	0.590	7.50
0.750 .....	1.260	0.750	0.198	0.067	0.255	0.630	8.25
0.800 .....	1.340	0.800	0.200	0.070	0.270	0.670	9.00
0.850 .....	1.420	0.850	0.213	0.072	0.285	0.710	9.75
0.900 .....	1.500	0.900	0.225	0.075	0.300	0.750	10.50
1.000 .....	1.660	1.000	0.250	0.080	0.330	0.830	13.00
1.100 .....	1.820	1.100	0.275	0.085	0.360	0.910	16.50
1.200 .....	1.980	1.200	0.300	0.090	0.390	0.990	20.00
1.250 .....	2.060	1.250	0.313	0.092	0.405	1.030	22.50
1.300 .....	2.140	1.300	0.325	0.095	0.420	1.070	25.00
1.500 .....	2.460	1.500	0.375	0.105	0.480	1.230	38.00
1.600 .....	2.620	1.600	0.400	0.110	0.510	1.310	45.00
1.700 .....	2.780	1.700	0.425	0.115	0.540	1.390	54.00
1.800 .....	2.940	1.800	0.450	0.120	0.570	1.470	63.00
1.900 .....	3.100	1.900	0.475	0.125	0.600	1.550	75.00
2.000 .....	3.260	2.000	0.500	0.130	0.630	1.630	80.00

## NOTAS A LA TABLA 7.3.4

- (a) Los datos se basan en soldar, sin precalentar, dos piezas con las mismas características de soldadura.
- (b) En las ilustraciones, las identificaciones de dimensiones en letra remarcada también son aplicables a material plano para el que  $t$  sería lo que se muestra en estas vistas como el espesor de pared de la tubería. Cuando el tubo o el material plano tiene  $t$  de 3/16 de pulg. o más, las orillas deberán chaflanarse como se muestra en Preparación de las Orillas.
- (c) Cuando se usa un claro inicial entre las piezas en el arreglo, la apertura inicial de los dados (dimensión A) se aumenta en una cantidad igual.
- (d) En las ilustraciones, las identificaciones en letra remarcada también son aplicables a material en barra, para el cual el diámetro (o sección dimensional mínima) sería el que se muestra en estas ilustraciones como el diámetro exterior de la tubería. Cuando el diámetro (o sección dimensional mínima) del material en barra es 1/4 pulg. o más, las orillas deberán chaflanarse, como se muestra en Preparación de las Orillas.
- (e) Los valores se aplican solamente cuando la razón máxima a mínima de dimensión transversal es menos que 1.5.

## Diseño de la Pieza

Al diseñar partes para soldar por arco con presión, se deben considerar los siguientes requisitos y efectos del proceso:

- 1.- Se deberá obtener un balance uniforme de calor en las partes, de tal manera que los dos extremos a soldar alcancen el mismo grado de plasticidad y profundidad de la zona plástica durante el chisporroteo.
- 2.- La longitud de metal perdido durante el chisporroteo y el recalcado debe añadirse a la longitud inicial de los componentes si la longitud total después de soldar es importante. Al diseñar componentes que se van a soldar en inglete, el ángulo entre el eje de la parte y la dirección de la plancha debe considerarse para la pérdida de metal.
- 3.- Las partes deberán diseñarse de tal manera que la reacción a la fuerza de recalcado se pueda resistir en una dirección paralela a la línea de aplicación de fuerza y de tal manera que sea posible respaldar y sujetar seguramente las partes durante la soldadura.
- 4.- Las partes deberán diseñarse para que se puedan mantener en alineación correcta durante el recalcado.
- 5.- Para soldaduras confiables en piezas que se van a unir en inglete, se debe cortar cualquier sección no coincidente para que no interfiera con el chisporroteo, y las "almas" deben ser soportadas o reforzadas de otra manera para soportar las fuerzas de -

recalcado.

- 6.- Los extremos a tope deberán diseñarse de tal manera que las partículas incandescentes no queden atrapadas en la soldadura y, en piezas grandes, el chisporroteo deberá iniciarse en el centro de la sección transversal de la pieza.
- 7.- Al diseñar miembros huecos, deberá darse consideración a la desventaja posible de recalcado en la superficie interior. Si la parte debe soportar cargas de fatiga, el efecto aumentador de esfuerzos del recalcado es importante. Bajo condiciones de corrosión, el metal en el recalcado puede sufrir ataque severo.

Un buen diseño de unión generalmente resulta en soldaduras de alta calidad y consistencia en producción. Un diseño pobre no necesariamente significa que las partes no son soldables, sino que la calidad de soldadura será dispareja y no se obtendrá consistencia en producción.

#### Balance de Calor entre las Piezas

Debido a que la misma corriente de soldadura y fuerza de recalcado se aplican a ambas piezas, las condiciones térmicas en las dos piezas deben ser aproximadamente iguales. Para lograr balance de calor, las dos piezas deberán tener la misma, o casi la misma, forma de sección transversal, área de contacto y contorno. En general, la razón de las áreas de las dos superficies a tope no deberá ser mayor que 5 a 4.

Los buenos diseños mostrados en la figura 7.3.5 se establecen suponiendo secciones y áreas similares en la vecindad de

la soldadura. En los diseños pobres mostrados en la misma figura, las secciones más pesadas se calentarían más lentamente, - haciendo difícil que ambas piezas alcancen plasticidad equivalente para soldar. Si el tubo de pared gruesa del diseño pobre en la figura 7.3.5a no puede reemplazarse con un tubo del mismo espesor de pared como la pieza adyacente (como se muestra - para un buen diseño), la pared gruesa deberá rebajarse en una cierta distancia de la unión maquinando la superficie exterior del tubo. La superficie interior del tubo de pared gruesa en - la figura 7.3.5f, deberá maquinarse por la misma razón. En la figura 7.3.5d, no sería posible obtener una soldadura con la - resistencia del metal base si el tubo fuera soldado a la barra sólida y, por lo tanto, la barra deberá ser abocardada como se muestra.

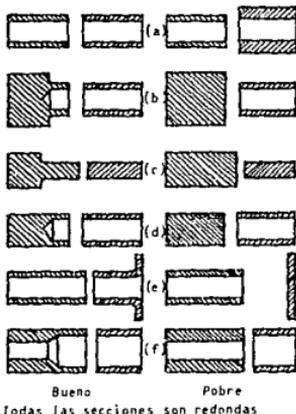


Fig. 7.3.5 Ejemplos de diseño bueno y pobre de unión para obtener balance de calor entre las piezas en la soldadura por arco con presión.

Es permisible cierto grado de desbalance seccional en la soldadura por arco con presión. Cuando se unen dos tubos o piezas de material cilíndrico sólido, los espesores de pared de los tubos, o los diámetros del material sólido, no deberán diferir por más de 15%. Esta tolerancia compensará para tole-

rancias de parte original o tolerancias aplicables en mal alineamiento o concetricidad.

En cada ejemplo de buen diseño mostrado en la figura 7.3.5, la longitud óptima de la sección alterada es igual a la extensión inicial. La longitud mínima es aproximadamente 125% del metal perdido durante el chisporroteo y el recalado. Extensiones iniciales para secciones hechas de aceros de resistencia baja y media a la forja se dan en la tabla 7.3.4.

Otro medio de ajustar el balance de calor es mediante preparación especial de los extremos de las partes a soldar. Con material de barra sólida, por ejemplo un extremo achaflonado en una de las piezas (o chaflanes desiguales en ambas piezas) afectará el balance de calor reduciendo el volumen de metal extendiéndose más allá del dado sujetador. El metal con la mayor conductividad de calor deberá tener el chaflán más pronunciado.

Cuando se van a soldar metales disímiles de la misma sección transversal, se puede obtener un balance de calor satisfactorio ajustando la extensión inicial. El metal que tenga la conductividad térmica mayor se extiende una distancia mayor que el metal con la conductividad térmica más baja. Esto mueve la soldadura fuera del centro entre los dados y, debido a la mayor longitud del metal que se calienta más lentamente, coloca la línea de soldadura más lejos del efecto enfriador de los dados sujetadores. El calentamiento de la pieza de mayor conductividad se aumenta también por el paso de la corriente de soldadura a través de una mayor longitud de metal.

Como se muestra en la figura 7.3.6, se pueden hacer varias soldaduras por arco con presión simultáneamente entre dos piezas del mismo espesor, incluso si las áreas de soldadura son diferentes. La razón de las áreas no deberá ser mayor

de 5 a 1. La soldadura de áreas desiguales es posible porque las aberturas de los dados y los tiempos de chisporroteo iniciales usados al soldar tubo y material plano (ver tabla - - 7.3.4), se basan en el espesor del material. Sin embargo, soldaduras por arco con presión simultáneas entre secciones redondas sólidas (ver figura 7.3.6b) deben tener áreas iguales para ser de calidad uniformemente buena, porque las aberturas iniciales de los dados y tiempos de chisporroteo son diferentes para cada diámetro de pieza (ver tabla 7.3.4).

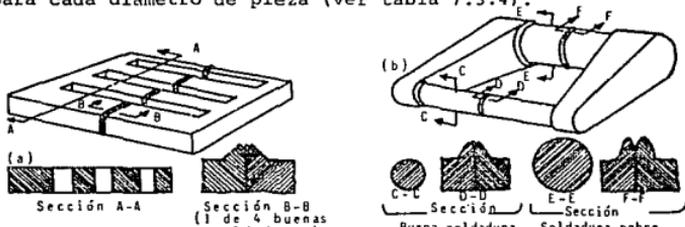


Fig. 7.3.6 Calidad de soldaduras simultáneas múltiples por arco con presión de áreas de secciones transversales distintas.

#### Alineación de las Piezas

Las piezas deben estar adecuadamente alineadas para obtener buenas soldaduras. La desalineación resulta en chisporroteo pobre y recalado insuficiente. La figura 7.3.7 ilustra el efecto de alineamiento bueno y malo.

Mantener la alineación y concentricidad durante el chisporroteo y recalado es difícil al soldar tubería de pared delgada o piezas con secciones relativamente delgadas. Las orillas de las láminas deben sostenerse con los dados sujetadores de tal manera que las ondulaciones resultantes de operaciones previas no causen desalineamiento. Si las orillas es-

tán dobladas o no coinciden, las láminas se traslaparán una con otra, en lugar de recalcarse y soldarse juntas.

El traslape generalmente se confina a pequeñas áreas locales a lo largo de la orilla soldada y en estas áreas ocurre una fusión pobre. Reduciendo el espesor de la hoja soldada, -rolándola, puede causar falla de soldadura.



**Fig. 7.3.7** Efectos de la alineación de piezas en la unión soldada y en recalcado de soldadura.

Algunas combinaciones de longitud de unión y espesor de material son difíciles y algunas son imposibles de soldar. La tabla 7.3.5 da relaciones de longitud de unión (ancho de la hoja) a espesor de hoja que han sido exitosas en un gran número de trabajos de producción.

Relaciones de diámetro de tubo a espesor de pared que han sido exitosamente soldadas, se enlistan en la tabla 7.3.6. Cuando la razón de diámetro de tubo a espesor de pared es demasiado grande, los dados sujetadores pueden deformar el tubo lo suficiente para causar que no coincidan los extremos de los tubos, produciendo una soldadura incompleta o defectuosa en esa área.

**TABLA 7.3.5 Longitud de uniones comúnmente soldadas por arco con presión en varios espesores de lámina.**

Esesor de lámina, pulgs.	Longitud de unión, pulgs.	Esesor de lámina, pulgs.	Longitud de unión, pulgs.
0.010 .....	1	0.060 .....	25
0.020 .....	5	0.080 .....	35
0.030 .....	10	0.100 .....	45
0.040 .....	15	0.125 .....	57
0.050 .....	20	0.187 .....	88

La longitud de uniones en espesores comunes de 0.050 pulgs. y mayores puede ser hasta 100 pulgs., dependiendo de la longitud del material, avance de la plancha, alineación del dado y sujeción.

**TABLA 7.3.6 Diámetros máximos soldables por arco con presión de tubos de varios espesores de pared.**

Esesor de pared, pulgs.	Diámetro máximo, pulgs.	Esesor de pared, pulgs.	Diámetro máximo, pulgs.
0.020 .....	$\frac{1}{2}$	0.125 .....	4
0.030 .....	$\frac{3}{4}$	0.187 .....	6
0.050 .....	$1\frac{1}{4}$	0.250 .....	9
0.062 .....	$1\frac{1}{2}$	0.375 .....	15
0.080 .....	2	0.500 .....	20
0.100 .....	3		

Las tolerancias diametrales son más críticas cuando se sueldan tubos de pared extremadamente delgada, porque los extremos de los tubos fuera de tolerancia no acoplarán exactamente en todos los puntos alrededor de las circunferencias de los tubos. Una diferencia en los diámetros de tubo también puede causar una acción de enchufe, que reduce la efectividad de la

acción de recalado y, por lo tanto, reduce las propiedades y calidad de la soldadura.

La tubería de acero ordinaria generalmente tiene sobremedida y, por lo tanto, las dimensiones y tolerancias de piezas a soldar deberán basarse en las dimensiones reales en lugar de en las nominales.

#### Tablas Típicas de Soldadura

Las tablas de soldadura por arco con presión se basan en el diámetro del acero en barra, en el espesor de lámina o placa, o en el espesor de pared de tubería, y no en el área transversal completa de la pieza. Debido a la distribución de energía eléctrica, es más fácil soldar una placa de 1 x 12 pulgs. que una barra de 3 x 4 pulgs., aunque ambas tengan la misma área de sección transversal. La máxima sección transversal que puede ser soldada exitosamente depende principalmente de la resistencia del metal de trabajo a las temperaturas elevadas.

La tabla 7.3.7. muestra las condiciones de soldadura para placa, barras y tubos hechos de varios metales y aleaciones.

#### Zona Afectada por el Calor

En una pieza soldada por arco con presión, existen diferencias metalúrgicas significativas entre la estructura altamente calentada en el centro de la soldadura y el metal base no afectado. Estas diferencias ocurren porque hay un gradiente grande de temperatura en el metal de trabajo entre las orillas interiores de los dados sujetadores o electrodos. El ca-

**TABLA 7.3.7** Tablas típicas de soldadura por arco con presión para placa, barras y tubos de metales varios.

Metal de trabajo y tamaño de sección, pulg.	Apertura de dados, púgs.		Longitud de rebabeo, pulg.	Longitud de recalcaer, pulg.	Metal total perdido, pulg.	Tiempo de chisporroteo seg.	Tiempo de re- calentamiento, min.	Posición de calor, volte
	Inicial	Final						
<b>Placas</b>								
Acero 1020, 0.25 por 16.75 .....	2.00	0.75	0.75	0.50	1.25	12	8	6.02
Acero aleado (a) 1.165 por 9.95 .....	3.00	1.25	1.00	0.75	1.75	25	50	8.17
Inconel X-750, 0.5 por 6.5 .....	3.44	1.25	0.81	1.38	2.19	18	40	5.8
Inconel X-750, 1.5 por 6.0 .....	4.44	1.75	1.06	1.63	2.69	25	75	8.17
<b>Barras sólidas</b>								
Acero al bajo carbono, soldado a acero M10 para herramienta, 0.875 de diámetro .....	2.25(b)	1.50	...	...	0.50	7(c)	60	6.28 máx.
Acero 8620, 0.405 por 0.505 (d) .....	0.94	0.44	0.31	0.19	0.50	3.5	0.5	5.5
Acero 8620, 2.56 de diámetro .....	3.75	2.25	1.10	0.40	1.50	57	40	7.2
Acero 8640 soldado a aleación HS-31, 1.5 diam 3.41(e) .....	2.31	...	...	...	0.88	25	...	45000 amp.
<b>Tubos</b>								
Acero 1008 soldado a 1010, 1.1250E por 0.090 de pared .....	0.75	0.25	...	...	0.50	4	...	(f)
Acero 5324 AMS, 4.94 DE por 0.52 de pared .....	3.25	2.03	0.86	0.36	1.22	32	40	6.8
Acero 5427 AMS (h), 1.94 DE por 0.22 pared .....	1.76	1.00	0.55	0.21	0.76	20	...	4.8
Acero AMS 6427(h), 8.75DE por 0.78 pared(g) .....	5.12	2.02	2.57	0.53	3.10	120	40	10.9
Aleación de titanio Ti-6Al-4V, 3.5DE por 0.5 de pared (g) .....	2.60	1.50	0.55	0.55	1.10	30	9	5.2
(a) 0.20 C, 1.0 Cr, 1.0 Mo, 0.1 V, 0.75 Si, 0.5 Mn. (b) extensiones de la pieza: acero al bajo carbono, 1.62 pulg.; M10 0.38 pulg.; 0.25 pulg. de claro. (c) incluye precalentamiento de 3 seg. (d) oro dentado. (e) extensiones de la pieza: 8640, 1.59 pulg.; HS-31, 1.82 pulg. (f) derivación no. 5 de 8 en un transformador de soldadura de 50kva. (g) soldaduras hechas en atmósferas protectoras. (h) 0.28 a 0.33 C, 1.8 Ni, 0.85 Cr, 0.40 Mo, 0.07 V.								

lor mayor se genera en las caras de soldadura debido a la acción de chisporroteo, mientras que en la orilla interior de los electrodos el metal está esencialmente a temperatura ambiente. La zona afectada por el calor es la región en cada lado de la línea de unión que ha sido calentada durante la soldadura a temperatura por arriba o dentro del rango de transformación de fase. Las porciones del metal de trabajo distintas a -

la zona de soldadura y a la zona afectada por el calor permanecen relativamente frías, y conducen al calor lejos de la soldadura. Consecuentemente, la soldadura se enfría a un índice mucho más alto del que se obtendría durante el enfriamiento simple por aire y, en el acero, resulta el endurecimiento, particularmente cuando la sección soldada es pequeña. No sólo hay un cambio marcado en la microestructura a través de la soldadura, sino también una variación de la dureza (desde un pequeño grado en aceros de baja templabilidad y hasta un mayor grado en aceros de alta endurecibilidad).

En aleaciones no sujetas a endurecimiento martensítico aparecen estructuras enfriadas por inmersión, revenidas y de otros tipos. En todas las aleaciones, el tamaño de grano en la soldadura es grande y se vuelve más pequeño al incrementar se la distancia desde la línea de unión.

En algunas aleaciones, las características deseables de soldadura por arco con presión incluyen una zona endurecida o afectada por el calor estrecha, y la resistencia y ductilidad tan iguales a aquéllas del metal base como sea posible. Una soldadura con estas características puede sufrir subsecuentemente formado o reducción en frío hasta el mismo grado que el metal base. Algunas veces, la calidad de la soldadura puede mejorarse soldando en una atmósfera distinta al aire.

#### Dureza de las Soldaduras

Un estudio de dureza a través de una soldadura por arco con presión en acero al bajo carbono rolado en frío muestra poco cambio en dureza. Por lo tanto, el tratamiento térmico es innecesario para obtener dureza uniforme. Cuando un acero endurecido se suelda por arco con presión, se producen considerables diferenciales a lo largo de la zona afectada por el calor;

si se desea dureza uniforme, es necesario un tratamiento térmico después de soldar.

Soldaduras en acero al bajo carbono rolando en frío tienen una estructura de grano grueso cerca de la soldadura y contienen algo de martensita. Durante el chisporroteo, ocurre considerable crecimiento de grano en el metal en la unión, porque la temperatura está cerca o por arriba del punto de fusión, que a su vez está muy por arriba del rango transformación-temperatura. (Teóricamente, todo el metal que se funde en la línea de unión, se extruye dentro del recalcado de soldadura). Avanzando desde la línea de unión a lo largo de la pieza, la temperatura disminuye, y cualquier martensita presente se vuelve cada vez más fina en apariencia. Cerca de la orilla exterior de la zona afectada por el calor, donde el metal se ha calentado a una temperatura entre la temperatura de transformación más baja y la más alta, sólo ocurre transformación parcial, que resulta en ablandamiento del acero. Las variaciones en dureza a través de la zona afectada por el calor en acero al bajo carbono rolando en frío se ilustran en la figura 7.3.8.a. La dureza del metal en la zona afectada por el calor es menor que aquella del metal base sin calentamiento, porque el calentamiento ha removido el endurecimiento por trabajo resultante del rolando en frío. La línea de unión y puntos cerca de las orillas externas de la zona afectada por el calor son ligeramente más suaves que el resto del metal calentado. Durante una prueba de tensión se puede esperar que ocurra fractura cerca de las orillas exteriores de la zona afectada por el calor debido al ligero ablandamiento.

Después de soldar por arco con presión acero rolando en caliente, el metal en la zona afectada por el calor es más duro que el metal base como resultado del tratamiento de calor durante la soldadura. Por lo tanto, en una prueba de tensión de soldadura por arco con presión en acero rolando en caliente, la

fractura generalmente ocurre en el metal base. Una soldadura - en un acero aleado conteniendo de 0.25 a 0.28 C, 0.60 a 0.80 - Cr, 0.80 a 1.0 Ni, y 0.50 a 0.60 Mo, tiene una estructura completamente martensítica, debido a la alta endurecibilidad del acero. La martensita se vuelve más finamente dividida al aumentar la distancia de la línea de unión, debido al gradiente de temperatura que disminuye. En una región cerca de la orilla de la zona afectada por el calor, donde la temperatura del metal se acerca a la temperatura más baja de transformación, el metal base original sólo está parcialmente transformado; después del enfriamiento, la microestructura es ferrita y martensita - de grano fino.

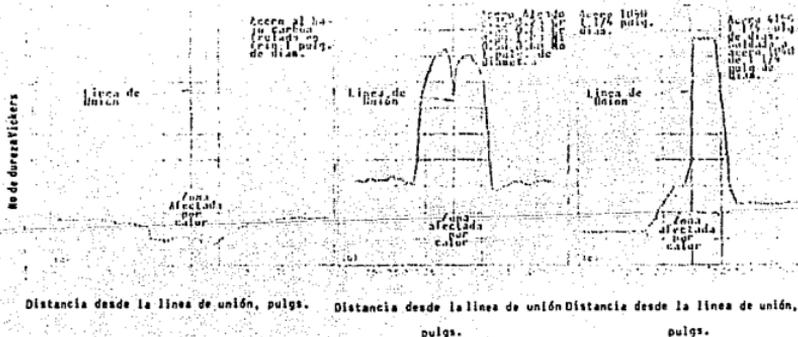


Fig. 7.3.8 Variaciones en dureza a través de la zona afectada por calor y en el metal base para uniones soldadas por arco con presión en: a) acero al bajo carbono rodado en frío; b) Un acero aleado Cr-Ni-Mo; y c) acero 1040 soldado a acero 4150.

Las variaciones en dureza a través de una soldadura en un acero aleado de la composición anteriormente indicada, se ilustran en la figura 7.3.8b. De la dureza original del metal base (aproximadamente 260 Vhn), la dureza aumenta agudamente en la orilla de la zona afectada por el calor, y es mayor de 500 Vhn (48 a 50 Rc), cerca de la línea de unión. La caída en dureza en la línea de unión es probablemente causada por descarburización. Durante la soldadura, las regiones en cualquier lado de la línea de unión se calientan a una temperatura lo suficientemente alta para causar endurecimiento completo durante el enfriamiento, y la dureza declina con la distancia desde la línea de unión.

La dureza más baja en la unión soldada estuvo justamente más allá de la zona afectada por el calor, en donde se habría alcanzado una temperatura ligeramente más alta que la temperatura de templado (1200°F) del metal base original. Si la temperatura original de templado hubiera sido menor, y la dureza del metal consecuentemente mayor, la caída en dureza hubiera sido más notoria.

Un trazo de dureza tomado por el centro de barras de 1 1/2 pulg. de diámetro de aceros 4150 y 1040 que fueron soldados por arco con presión se muestra en la figura 7.3.8c. Aunque si milares en contenido de carbono, los dos aceros difieren grandemente en dureza dentro de la zona afectada por calor, debido a la mayor endurecibilidad del acero 4150. Durante la soldadura, el acero 4150 se endureció a tal grado que se fracturó en la orilla exterior de la zona afectada por calor durante el enfriamiento. Ambas barras fueron completamente revenidas antes de soldar; por lo tanto, no hubo caída en dureza entre la zona afectada toda por el calor y el metal base sin calentar.

Un tratamiento térmico completo puede restaurar una parte de acero soldado por arco con presión a la dureza uniforme del

acero no soldado, pero únicamente templando el metal duro de soldadura a la dureza original del metal base, no resulta en homogeneidad completa, porque entre el metal endurecido de la soldadura y el metal base no afectado existe una zona estrecha que ha sido sobretemplada por el calor de soldadura, y que es más suave que el metal base original. Esta zona ablandada puede ser traída a dureza uniforme solamente por calentamiento completo. La zona ablandada puede o no ser dañina a la vida de servicio de la soldadura.

Templar en una máquina soldadora por arco con presión es impráctico por dos razones: a) es difícil mantener una temperatura uniforme en el metal entre los electrodos; y b) el templado adecuado de la orilla de la zona afectada por el calor no puede hacerse sin sobretemplar y ablandar las áreas más cercanas a la línea de unión.

#### Causas y Prevención de Defectos de Soldadura

Defectos comunes en soldaduras por arco con presión incluyen: rendijas circunferenciales en la línea de unión, que aparecen después de la remoción del recalcado; fractura causada por la fragilidad en la zona afectada por el calor; metal vaciado en la soldadura; huecos, óxidos e inclusiones en la soldadura; oxidación intergranular y descarbonización en la zona afectada por el calor.

RENDIJAS CIRCUNFERENCIALES.- Si el calentamiento o el recalcado son insuficientes, la unión no se extenderá a través de toda la pieza y dentro del recalcado de soldadura, y a la remoción del recalcado de soldadura revelará la presencia de una área sin soldar en la pieza. Tal rendija indica que no se ha obtenido una unión completa y que la resistencia de la pieza puede ser menor que los requerimientos mínimos. Este ti

po de defecto generalmente puede evitarse con el uso de una presión de recalco mayor, o con el uso de más calor, o con ambos.

**FRACTURA EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR.-** Causada por un rápido enfriamiento, puede minimizarse soltando los electrodos inmediatamente después del recalco y transfiriendo la pieza a un horno para igualación de temperatura y enfriamiento controlado. Después de que las piezas se han calentado uniformemente en el horno, pueden enterrarse en cal, en mica, en polvo o en asbesto para asegurar un enfriamiento lento. Si no existe un horno disponible, y las piezas son de acero al carbono, la soldadura puede ser recalentada en la máquina de soldar pasando corriente a través de la soldadura terminada hasta que se vea un color rojo mate. Entonces se desconecta la corriente, los electrodos se sueltan rápidamente y la pieza se entierra en cal u otro material aislante para su enfriamiento.

Al soldar por arco con presión partes hechas de aceros disímiles, como por ejemplo brocas de acero de alta velocidad a mangos de acero al medio carbono, se debe asegurar un enfriamiento lento para evitar fracturas en el acero de mayor endurecibilidad. Brocas nuevas hechas por soldadura por arco con presión normalmente son completamente tratadas por calor después de soldar. Cuando se reparan brocas o se hacen más largas por arco con presión soldando una broca corta a una extensión de mango, el reendurecimiento después de soldar puede no ser factible, y se puede necesitar un enfriamiento lento -no sólo para prevenir fracturas, sino también para minimizar la fragilidad en la zona de soldadura. Tal fragilidad podría llevar a una falla de la herramienta en servicio. En unas pocas aplicaciones, las partes a soldar se precalientan en horno, se sueldan y se tratan térmicamente en horno inmediatamente para evitar fractura.

**METAL FUNDIDO EN LA SOLDADURA.-** Una cierta cantidad de metal fundido se forma en las caras de la soldadura durante el chisporroteo, y deberá ser extruida de la soldadura durante el recalado, dejando el área de soldadura en una condición homogénea. Sin embargo, bolsas de metal fundido algunas veces son atrapadas en la soldadura y aparecen como metal vaciado bajo el microscopio. Debido a que el metal vaciado está propenso a contener pequeñas grietas por contracción, y es de menor ductilidad que el metal trabajado, su presencia deberá reducirse al mínimo. Se puede atrapar metal vaciado en soldaduras entre aleaciones disímiles que tengan resistencias completamente distintas a la compresión en caliente. El metal o aleación con la resistencia en caliente más baja a la compresión, se recalca en un grado mayor y así atrapa metal vaciado en la soldadura. Los metales con una resistividad eléctrica alta se calientan más durante la soldadura, aumentando la probabilidad de formación de metal vaciado.

**HUECOS.-** Frecuentemente se forman cuando la pieza que se está soldando es demasiado grande para la máquina soldadora, y la presión de recalado es insuficiente para cerrar todos los cráteres formados durante el chisporroteo. Algunas veces, metal fundido formado en la superficie de contacto de la soldadura, puede extruirse en hueco durante el recalado, y puede verse al microscopio como un glóbulo de metal vaciado en el hueco.

**OXIDOS Y OTRAS INCLUSIONES.-** Pueden estar presentes en las uniones que han sido soldadas con fuerza de recalado insuficiente para expulsarlos, o a una temperatura demasiado baja para dar plasticidad a la región de soldadura. Las inclusiones son muy pequeñas pero debilitan la soldadura, y el tratamiento por calor no las remueve ni mejora las propiedades de la soldadura.

Otro tipo de inclusión se conoce como un penetrante. Los penetrantes prevalecen más cuando se usa un alto voltaje de chisporroteo, y son causados por gradientes grandes de temperatura, gas absorbido e inclusiones no metálicas que son atrapadas en los cráteres en la superficie de chisporroteo durante el recalado. La ocurrencia de penetrantes puede minimizarse usando el voltaje, la velocidad de plancha y claro de chisporroteo correctos, y usando una atmósfera protectora.

DESCARBURIZACION.- Durante la soldadura por arco con presión el acero al alto carbono pierde parte de éste en las superficies de chisporroteo, especialmente cuando la soldadura se hace en aire o en una atmósfera de gas húmedo. El metal descarburizado no es completamente expulsado durante el recalado y parte permanece en la zona de soldadura como una zona de debilidad.

OXIDACION INTERGRANULAR.- ("Quemado") generalmente es causada por una extensión impropia del material durante la soldadura de metales disímiles. Se puede desarrollar calor suficiente para oxidar el metal en un punto atrás de la soldadura. Algunas veces, la oxidación puede causar que las piezas se separen en la región oxidada.

Un contacto inadecuado entre el electrodo y la pieza puede causar un área fundida o quemada localmente abajo del electrodo.

Soldadura por Arco con Presión  
vs.  
Procesos Alternativos

En algunas aplicaciones, la soldadura por arco con presión es el mejor método para unir, sin importar la cantidad de partes a producir. Otras partes que pueden producirse por arco con presión también se pueden producir por otros procesos de -

unión o por forja.

Dos ventajas de la soldadura por arco con presión sobre la soldadura de recalcado son la mayor rapidez del proceso y que las superficies no tienen que limpiarse antes de soldar.

#### 7.4 SOLDADURA POR RAYO DE ELECTRONES

##### Descripción

En la soldadura por rayo de electrones, la unión a soldar se calienta bombardeándola con un chorro denso de electrones a alta velocidad. La energía cinética de los electrones se cambia a calor al impacto con el trabajo.

El rayo de electrones se produce en un medio de alto vacío por una pistola de electrones, generalmente consistente en un cátodo de Tungsteno o Tántalo, una rejilla o electrodo de formación, y un ánodo. Los electrones se emiten desde el cátodo, que se calienta a aproximadamente 4,600°F o más. Los electrones son reunidos, acelerados a una alta velocidad, y formados en un rayo por campos eléctricos entre el cátodo, rejilla y ánodo. El rayo es enfocado pasándolo a través del campo de una bobina enfocadora electromagnética, o lentes magnéticas. Los rayos de electrones pueden ser desviados de su trayectoria normal por bobinas deflectoras magnéticas, generalmente localizadas abajo de la bobina enfocadora.

La pistola, que algunas veces es aislada de la cámara de soldar por una apertura con válvula, se mantiene en un alto vacío ( $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  Torr o menos), para proteger sus componentes, especialmente el cátodo, de la oxidación y de corto circuito a través de vapores desarrollados al soldar. El medio vacío también reduce la dispersión de electrones por moléculas de aire, conservando por lo tanto una energía efectiva de rayo. Las pistolas de electrones están nominadas a aproximadamente 30 a 175 kv y para una corriente de rayo de aproximadamente 50 a 100 ma.

Los rayos típicamente se enfocan a aproximadamente 0.010 a 0.030 pulgadas de diámetro, y tienen una densidad de potencia -

de aproximadamente  $10^{-6}$  watts por pulgada cuadrada que es suficiente para vaporizar cualquier metal. En el proceso de soldadura, el rayo primero crea un agujero en el trabajo; al avanzar a lo largo de la unión, se forma una soldadura por una combinación de tres efectos que ocurren al mismo tiempo: a) el metal en el lado avanzado del orificio se vaporiza, y el metal vaporizado se condensa para formar metal fundido en el lado de salida del orificio, b) el metal fundido en el lado de avanzada -- del orificio fluye al lado de salida del orificio y, c) el metal fundido formado de esa manera, llena continuamente el orificio y solidifica al avanzar el rayo de electrones.

La fig. 7.4.1 muestra el arreglo para soldar por rayo de electrones.

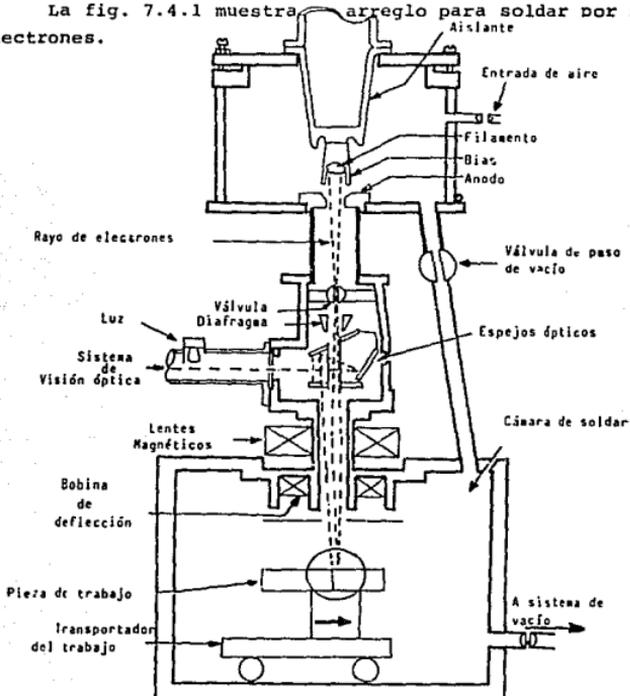


Fig. 7.4.1 Soldadura por Rayo de Electrones.

### Ventajas y Desventajas

Las mayores ventajas de la soldadura por rayo de electrones en vacio incluyen:

1. Capacidad para hacer soldaduras que son más profundas, más estrechas y menos ahusadas que las soldaduras por arco, con una alimentación total de calor mucho menor que aquella en la soldadura por arco.

2. Control superior en la penetración y en otras dimensiones y propiedades de soldadura.

3. Un medio de alta pureza para soldar (una cámara evacuada de trabajo), resultando en libertad de impurezas tales como óxidos y nitruros.

4. Velocidad más alta de soldadura.

5. Alta producción cuando un buen número de partes puede ser colocado en una cámara, o cuando la cámara es lo suficientemente pequeña para permitir evacuación rápida de la misma para crear el vacio.

Estas características hacen posible: minimizar la distorsión y contracción de la soldadura, soldar metales templados o endurecidos por trabajo y frecuentemente sin deterioro significativo en las propiedades mecánicas en la unión, soldar partes que ya han sido terminadas a las dimensiones finales del ensamble, soldar en cercana proximidad a componentes o a aditamentos sensibles al calor, hacer fácilmente soldaduras de cerradura hermética en encerramientos evacuados, soldar metales refractarios y reactivos y soldar combinaciones de metales disímiles que generalmente no son unibles por soldadura por arco. Proyectando el

rayo de varias pulgadas a varios pies, con frecuencia se pueden hacer soldaduras en ubicaciones de otra manera inaccesibles.

Las desventajas de la soldadura por rayo de electrones en vacío incluyen:

1. Alto costo de equipo. Las unidades para soldar del tamaño producción varían considerablemente en costo, dependiendo de los accesorios incluidos.

2. Alto costo de preparación precisa de la unión y del hermetismo de precisión, generalmente más alto que para los procesos de soldadura por arco. Debido al tamaño relativamente pequeño del rayo de electrones, los claros de unión deben mantenerse en un mínimo.

3. Limitaciones de la cámara de vacío. El tamaño del trabajo se limita por las dimensiones de la cámara, y el índice de producción y el costo de soldadura por unidad son afectados adversamente por la necesidad de evacuar la cámara de trabajo para cada carga.

La soldadura por rayo de electrones sin vacío no está sujeta a las limitaciones de la cámara de vacío; puede hacerse a alta velocidad y puede permitir ahorros en comparación a la soldadura por arco en partes producidas masivamente de forma adecuada. En un grado menor que la realizada en vacío, ofrece las primeras dos ventajas listadas en la página 175, y carece completamente de la tercera ventaja sobre la soldadura por arco.

La penetración es generalmente menos de 1/2 pulgada, y la forma de la pieza debe permitir una distancia de trabajo de 3/4 de pulgada o menos.

### Control del Proceso

Las variables básicas para controlar la soldadura por rayo electrónico en vacío son:

1. Voltaje de aceleración.
2. Corriente del rayo.
3. Velocidad de soldadura.
4. Corriente de enfoque.
5. Distancia de la pistola al trabajo.

El tamaño del punto del rayo (en el trabajo) está determinado por las características de la pistola electrónica, la corriente de enfoque (que controla la longitud focal del rayo), la distancia de la pistola al trabajo, voltaje de aceleración y corriente de rayo.

El aumentar el voltaje de aceleración, o la corriente del rayo, aumenta la profundidad de penetración; el producto de estas dos variables, llamado potencia del rayo, determina la cantidad de metal fundido. El aumentar la velocidad de soldadura (avance) sin cambiar otra variable del proceso reduce la profundidad de penetración casi proporcionalmente y reduce algo la anchura de la soldadura. El cambiar cualquiera de las otras cuatro variables de control para incrementar el tamaño de punto del rayo reduce la profundidad de penetración e incrementa la anchura de la soldadura si no se cambia la velocidad de soldadura.

Se puede usar la desviación del rayo para cambiar el ángulo de impacto del rayo para producir patrones controlados de os-

cilación de rayo para el efecto de mayor tamaño de punto del rayo u otros efectos especiales, y se puede pulsar el rayo para reducir su potencia efectiva.

En la soldadura por rayo de electrones no realizada en vacío, comúnmente las cinco variables básicas de control, excepto la corriente del rayo, se prefijan, y el control se basa en esta última. La corriente del rayo puede ser puesta en un valor fijo para la aplicación, y únicamente apagarse y encenderse en relación con el viaje de la pieza, o puede programarse para variar en un patrón predeterminado. La desviación del rayo no puede usarse; la oscilación del rayo es rara vez usada.

#### Operaciones

Los procedimientos de herramental y de soldadura para cada aplicación se desarrollan en trabajo experimental preliminar. Los detalles de la secuencia de soldadura pueden variar algo, dependiendo de las diferencias en equipo y de los requisitos de aplicación. Una secuencia típica para soldar al alto vacío es:

1. Ensamblar y preparar el trabajo y dispositivos para soldar. Esto incluye limpiar, y puede incluir desmagnetizar, precalentar y puntear provisionalmente.
2. Cargar el trabajo en la mesa de trabajo o mecanismo sujetador en la cámara de soldar.
3. Iniciar la evacuación de la cámara.
4. Hacer alineamiento preliminar de la unión con el rayo desenfocado.

5. Después de que la presión de la cámara se ha reducido a  $10^{-4}$  Torr, enfocar al bloque objetivo de tungsteno y fijar los parámetros del rayo.

6. Hacer el alineamiento final de la unión a la posición del rayo.

7. Iniciar la soldadura. Esta generalmente se realiza automáticamente, pero puede realizarse manualmente.

8. Terminar el ciclo de soldar.

9. Cuando el trabajo se ha enfriado lo suficiente, admitir aire en la cámara y remover el trabajo.

El paso 5 se aplica principalmente en la preparación de -- una operación repetitiva.

Para la soldadura por rayo de electrones no realizada en vacío, la pistola de electrones y columna de transferencia de rayo se mantienen a niveles establecidos de presión. La manipulación del trabajo y las operaciones de soldadura en este método normalmente están mecanizados para producción de alta velocidad, y el trabajo y arreglos de dispositivos se preparan antes de que se inicie un lote de producción o se hacen como parte de una operación en una línea de producción. Los parámetros de rayo, la alineación de la unión con la posición del rayo, y la transferencia y movimiento del trabajo para soldar se fijan antes de una tirada de producción. La alineación de la unión con la posición del rayo es solamente ligeramente menos crítica que para soldadura por rayo de electrones en vacío, porque el tamaño del punto del rayo y la anchura de la soldadura son solamente ligeramente más grandes para la soldadura realizada sin vacío.

**PREPARACION MECANICA DE LA UNION.-** Una unión para soldadura por rayo de electrones ordinariamente tiene caras bien ajustadas a tope y es de ranura recta, y normalmente no usa metal de relle no. Como regla general, las caras de la unión se maquinan a una aspereza de superficie de aproximadamente 120 micropulgadas o menos.

El acabado superficial en las caras de la ranura de soldadura puede no ser crítico, dependiendo del diseño de la parte, de la unión y de los requerimientos para propiedades de soldadura. En estudios al soldar a tope una aleación de aluminio 2219 de 2 pulgadas de espesor y Ti-6Al-4V en el que las caras de la ranura tenían valores de aspereza de superficie de 63, 125, 250, 500 y 1000 micropulgadas, el acabado de superficie no tuvo efecto en la calidad de la soldadura, como se determinó por examen visual y por radiografía de rayos X. El acabado de la orilla de la superficie es mucho menos crítico en soldaduras amplias que en soldaduras angostas.

La aspereza de la orilla no es crítica en uniones de traslape en metal delgado, en tanto que rebabas no separen las superficies.

**AJUSTE.-** Una unión a tope no es abierta, como en soldadura por arco, sino que tiene superficies derechas cercanamente ajustadas para permitir al rayo de electrones, característicamente angosto, fundir el metal base en ambos lados de la unión al hacer la soldadura. Los miembros de una unión a soldar por fusión a través también tienen ajuste cercano. La tolerancia del ajuste depende del espesor del metal de trabajo y del diseño de la unión, pero generalmente es 0.005 pulgadas o menos. El claro de la unión es generalmente más pequeño para metal de trabajo delgado y para uniones sin apoyo; puede ser 0.001 ó 0.002 pulgadas máximo.

Algunas veces se usan ajustes con interferencia donde la -  
contracción puede causar fractura, como en uniones circulares en  
metales templables.

Un claro de unión de 0.002 ó 0.003 pulgs. máximo, es común-  
mente usado para hacer soldaduras angostas.

Al hacer soldaduras profundas, un ajuste pobre o un claro  
de unión excesivo puede causar contracción excesiva, huecos y --  
uniones fallidas. En la mayoría de metales, el claro de unión no  
deberá exceder 0.010 pulgadas para soldaduras angostas más pro--  
fundas que aproximadamente 1/2 pulg., aunque se han obtenido bu  
nas soldaduras usando claros de unión de 0.030 pulgs., incremen-  
tando la anchura de la soldadura a 0.275 pulgs.

LIMPIEZA.- Las superficies de trabajo deben estar meticolosa--  
mente limpias para soldadura por rayo electrónico. Una limpieza  
inadecuada de superficie no solamente causa defectos de soldadu-  
ra sino también aumenta el tiempo del evacuado, y puede degradar  
el aceite usado en las bombas de vacío.

Se puede usar cualquiera de los métodos químicos y mecáni-  
cos comunes. Con frecuencia se usa una combinación de dos o más  
métodos. Si las piezas se limpian en compuestos que contengan -  
cloro, estos compuestos deberán removerse por otro método de lim  
pieza antes de soldar.

La limpieza final deberá hacerse dentro de unos pocos minu-  
tos antes de soldar. Después de la limpieza final las caras de -  
la unión no deberán tocarse con las manos o con herramientas.

MÉTODOS DE ARREGLO.- Para soldadura por rayo de electrones en -  
vacío, son generalmente como aquellos para soldadura por arco con  
tungsteno y gas de partes de precisión sin el uso de metal de re-

lleno, excepto que la fuerza sujetadora necesaria es generalmente más baja, y todos los materiales y miembros móviles deben -- ser adecuados para uso en alto vacío.

Debido a que la alimentación total de calor a la soldadura es mucho menor que para soldadura por arco y, debido a que el calor es altamente concentrado, hay menor necesidad de arreglos pesados, sumideros de calor masivos o enfriamiento por agua. En algunas aplicaciones, la sujeción puede complementarse o reemplazarse por pequeñas punteaduras o por un paso de soldadura poco profundo (paso de sello) sobre la unión, con la soldadura de penetración hecha más tarde a todo poder. Están disponibles arreglos básicos y especializados.

Posicionadores para soldar de uso general y mecanismos relacionados, son satisfactorios para soldadura por rayo de electrones no realizada en vacío. Los mecanismos localizadores y de alineamiento son más simples que para soldar en un vacío, debido a su accesibilidad y a que las anchuras de rayo para soldaduras en no-vacío no necesitan una alta exactitud para seguir la unión. El mantenimiento de equipo para manejo del trabajo para soldadura por rayo electrónico en no-vacío, se simplifica grandemente -- pos su ubicación fuera de cámara.

**DESMAGNETIZACION-** Piezas y dispositivos hechos de materiales magnéticos deberán desmagnetizarse antes de soldar. El magnetismo residual puede resultar de pruebas de partícula magnética, -- mandriles electromagnéticos, o maquinado electroquímico. Incluso una pequeña cantidad de magnetismo residual puede causar desviación de rayo.

Las piezas normalmente son desmagnetizadas colocándolas en un campo inductivo de 60 ciclos, y removiéndolas lentamente.

**TIEMPO DE EVACUADO.** Para la cámara de vacío depende principalmente del tamaño de la cámara, tipos de bomba usados y vacío requerido. Los controles de vacío en el equipo de soldadura por rayo de electrones generalmente proporcionan una alternativa de modo de bombeo automático o manual. En el modo manual la operación del sistema de vacío se controla por un switch de selección manual en la consola del operador, la que paso por paso secuenciaba las válvulas e instrumentación para todo el ciclo completo de vacío. En el modo automático, una serie de relevadores, interruptores limitadores y sensores de presión gobiernan el switch de selección manual.

Para la soldadura por rayo de electrones al alto vacío, se produce una presión de  $10^{-4}$  torr o menos mediante una bomba operada por pistón mecánico en conjunto con una bomba de difusión de aceite. El tamaño de estas bombas depende del tamaño de la cámara y del tiempo de bombeo requerido. Se puede esperar que una cámara de 30 pies cúbicos empleando una bomba de difusión de 21,000 pies cúbicos por minuto, y una bomba mecánica de 140 pies cúbicos por minuto, alcance presión de soldadura en menos de 3 minutos; una cámara de 300 pies cúbicos, empleando una bomba de difusión de 42,000 pies cúbicos por minuto, y una bomba mecánica de 600 pies cúbicos por minutos, podría esperarse que se evacúe en menos de 10 minutos.

Para soldadura por rayo de electrones en medio vacío, la presión en la cámara de trabajo es de  $2 \times 10^{-1}$  a  $10^{-3}$  torr. La cámara de la pistola, en la cual se genera y se enfoca el rayo, se mantiene a  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  torr, como en soldadura al alto vacío. Se necesita una pequeña bomba de difusión para proporcionar el vacío en la cámara de la pistola, pero no se necesita una bomba de difusión para bombear la cámara de soldadura, que puede ser evacuada con una bomba mecánica.

En algunas aplicaciones, sin embargo, puede requerirse un ventilador para soldadura de alta producción de partes pequeñas en un medio vacío. Los tiempos de bombeo en producción masiva - con frecuencia van de aproximadamente 40 segundos para una cámara de trabajo de propósitos múltiples relativamente grande (4 -- pies cúbicos), hasta menos de 5 segundos para cámaras pequeñas.

PRECALENTAR Y POSTCALENTAR.- Los metales más comúnmente soldados pueden soldarse por rayo de electrones, incluso en secciones gruesas, sin precalentamiento, debido a la anchura extremadamente angosta de la zona afectada por el calor. Metales endurecibles y difíciles de soldar pueden tener que ser precalentados, - especialmente para secciones anchas y donde la soldadura sea res tringida.

Aceros aleados de alta resistencia y aceros para herramienta más gruesos que aproximadamente 3/8 pulg., normalmente deben ser precalentados antes de la soldadura por rayo de electrones, - para evitar fractura. Soldaduras circulares profundas, especialmente soldaduras de penetración parcial, en secciones gruesas de acero al carbono conteniendo más de aproximadamente 0.35% de car bono, generalmente necesitan precalentamiento. Por otro lado, - soldaduras sujetas a menos restricción, tales como soldaduras -- circunferenciales en formas cilíndricas, pueden hacerse en acero al carbono al 0.50% de 1/2 pulgada de espesor sin precalentamiento.

El precalentamiento, cuando se necesita, generalmente se - hace antes de que el trabajo se coloque en la cámara. La selección del método de calentamiento depende del tamaño y forma del trabajo y de la temperatura de precalentamiento; se puede usar - una combinación de métodos. El calentamiento por soplete u hor no son ampliamente utilizados; el calentamiento por inducción y radiación infrarroja también se usan. En partes pequeñas o en -

donde la distorsión no constituye un problema, y en donde se puede tolerar un tiempo incrementado de ciclo, el calentamiento se hace algunas veces con un rayo electrónico desenfocado; este método también se puede usar para complementar otros métodos de calentamiento.

Cuando se emplea postcalentamiento en partes soldadas por rayo de electrones, normalmente se hace por medios convencionales después de remover el trabajo de la cámara de soldadura.

**CONDICIONES DE OPERACION.** Una secuencia típica de soldadura en vacío se indica anteriormente en el apartado de operaciones. Iniciar y detener la soldadura generalmente requiere consideración especial para evitar desuniformidad de la soldadura en estos puntos y posible quemado a través y pérdida de metal.

Una técnica que se usa para evitar estas dificultades es -- iniciar la soldadura a potencia completa de rayo en una proyección de inicio del metal que esté firmemente acoplado contra un extremo de la unión, y terminarla en una proyección de salida en el otro extremo de la unión. Otra solución consiste en hacer las piezas sobradas en tamaño para proporcionar material extra para iniciar y detener. Las proyecciones o el material extra pueden maquinarse después de soldar. Las proyecciones de inicio y salida se usan principalmente en operaciones de baja producción.

#### Diseño de la Unión

Se hacen soldaduras por rayo de electrones en ranura, y de fusión a través en todos los tipos básicos de unión: a tope, en esquina, T, traslape y orilla.

La mayoría de soldaduras por rayo de electrones son de ranu-

ra cuadrada o de ranura cuadrada modificada (generalmente rebajada) en uniones a tope o en esquina (ver figs. 7.4.3 y 7.4.4).

Las uniones pueden ser en línea recta, de contorno irregular, circunferenciales o circulares. Las dos últimas pueden soldarse girando el trabajo en la trayectoria de un rayo electrónico estacionario, como se muestra en la fig. 7.4.2.

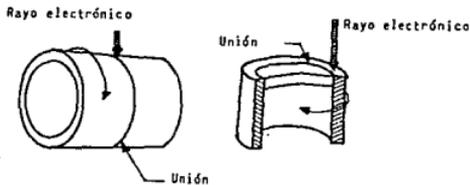


Fig. 7.4.2. Uniones circunferenciales y circulares en posición para soldadura por rayo de electrones.

**FACTORES DE DISEÑO.**— Muchas uniones para soldadura por rayo de electrones tienen ranuras rebajadas para hacerlas autoalineables y, al menos parcialmente, automontables, lo que es de particular importancia al cargar la cámara de vacío para una manipulación eficiente del trabajo.

La mayoría de las uniones se diseñan para soldarse en un solo paso con penetración completa o con penetración parcial a una profundidad específica. Dependiendo de la aplicación, la soldadura puede ser precedida por un paso para sellar o por punteo, y a continuación un "paso cosmético" o suavizante. La mayoría de soldaduras por rayo de electrones son continuas, pero también se hacen punteos y soldaduras de tapón intermitentes. Cuando

do se va a añadir metal de relleno al hacer una soldadura por rayo de electrones, ya sea precolocando alambre o tiras de metal de relleno dentro o al lado de la unión, o alimentando alambre de metal de relleno, se proporciona una abertura de raíz adecuada (o a veces un chaflán de raíz), para permitir una colocación conveniente o alimentación.

Algunas veces se añaden detalles de unión especiales para servir como barreras de conducción térmica o como disipadores de calor al hacer soldaduras cerca a ubicaciones sensibles al calor en las piezas. Soporte integral o tiras separadas de soporte o -- anillos se usan para prevenir chisporroteo y pérdida de metal, para servir como disipadores de calor o para evitar defectos de raíz en metal que no se maquinará después de soldar.

Como en la soldadura por arco, la resistencia de la unión, ductilidad, vida de fatiga y eliminación de la concentración de esfuerzos deben concordar con los requerimientos de servicio.

TIPOS COMUNES DE UNION Y SOLDADURA.- Las figuras 7.4.3 a 7.4.7 muestran los tipos comúnmente usados de unión y soldadura por rayo de electrones. Se usan diferentes preparaciones de unión, diseño de unión y posiciones de soldadura para satisfacer requisitos especiales.

Fig. 7.4.3 Nueve tipos de soldaduras a tope y soldaduras usadas para soldadura por rayo de electrones.

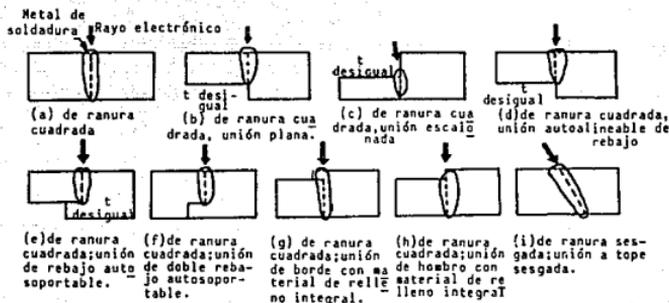


Fig. 7.4.4 Ocho tipos de uniones de esquina y soldaduras usadas en soldadura por rayo de electrones.

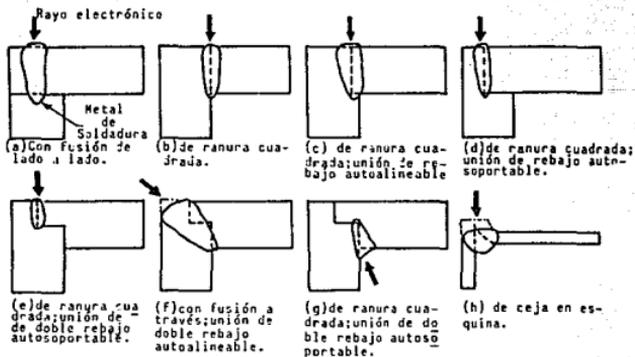


Fig. 7.4.5 Tres tipos de soldadura por rayo de electrones en uniones en T.

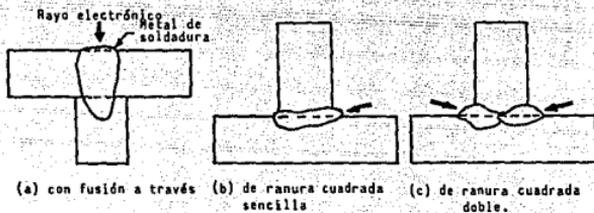
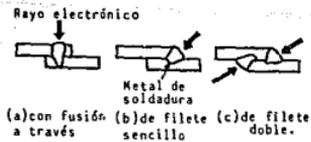
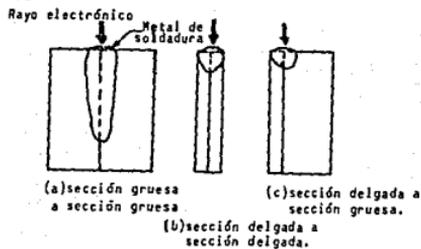


Fig. 7.4.6 Tres tipos de soldadura por rayo electrónico en uniones traslapadas.





**Fig. 7.4.7** Tres tipos de soldaduras por rayo electrónico en uniones de orillas entre miembros de espesores - de sección similar o distinta.

### Soldadura en Alto Vacío

Se realiza mucha soldadura por rayo de electrones en una cámara de vacío en la que la presión se mantiene en un máximo de  $10^{-4}$  torr. El mantenimiento de este alto vacío tiene efectos importantes en el rayo de electrones y en las propiedades de la soldadura y de la zona afectada por el calor.

**EFEECTO DE LA PRESION EN EL RAYO.-** En un alto vacío, el rayo de electrones sufre muy poca dispersión por choque con moléculas de gas. A presiones de  $10^{-4}$  torr o menos, el rayo puede mantenerse en un enfoque agudo en una distancia de varios pies, dependiendo principalmente de las características de la pistola de electrones y del sistema de enfoque electromagnético, para efectividad máxima para producir soldaduras profundas angostas. La dispersión del rayo por colisión con moléculas de gas empieza a ser significativo a una presión de aproximadamente  $10^{-3}$  torr, resultando en menor penetración y mayor anchura de soldadura a una distancia de trabajo dada, y en distancia de trabajo más corta. A presión atmosférica (760 torr), el rayo está tan disperso al viajar aproximadamente 6 pulgadas como para llegar a ser completamente inefectivo para soldar. Por lo tanto, las distancias de penetración y de trabajo para soldar a presión atmosférica son mucho más bajas que para soldar en vacío alto o medio.

**EFEECTO DE LA PRESION EN LA SOLDADURA Y EN LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR.-** El mantenimiento de un alto vacío en la cámara de trabajo protege al metal de soldadura y a la zona afectada por el calor de la oxidación y contaminación por gases dañinos, sirviendo la misma función que los gases protectores inertes en la soldadura por arco, mientras que también desgasifica la soldadura.

La ausencia casi completa de impurezas gaseosas elimina las

serias dificultades de contaminación que generalmente son encontradas al tratar de soldar por arco metales reactivos tales como titanio y circonio.

**ANCHURA DE LA SOLDADURA Y DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR.** --  
Las soldaduras por rayo de electrones hechas en un alto vacío son más angostas y tienen zonas afectadas por el calor más estrechas que soldaduras comparables hechas en medio vacío o a presión atmosférica, y son mucho más angostas que las soldaduras -- más angostas hechas en soldadura de producción por el proceso de soldadura por arco con tungsteno y gas. La anchura angosta de la zona templada en aceros endurecibles y en otras aleaciones endurecibles permite la soldadura de estos metales después de tratamiento por calor, sin pérdida de resistencia.

**LIMITACIONES.** -- Una gran limitación en el uso de alto vacío en la cámara de trabajo es el efecto en el tiempo unitario de producción, debido a la necesidad de evacuar la cámara antes de que se suelde cada carga. El tiempo de bombeo es típicamente alrededor de 3 minutos para una cámara de 30 pies cúbicos, y de 10 minutos para una cámara de 300 pies cúbicos. Estos tiempos son -- reales solamente para un sistema muy limpio y bien mantenido. -- En producción, el tiempo de bombeo con frecuencia será casi el -- doble de los tiempos mencionados.

El efecto de la limitación anterior en el tiempo unitario de producción se reduce soldando cierto número de ensamblés en cada carga, y manteniendo un tamaño de cámara tan pequeño como sea posible. Cámaras pequeñas especialmente diseñadas para usar con piezas pequeñas tienen tiempos típicos de bombeo de 1 minuto (cámara de 225 pulgadas cúbicas) y 15 segundos o menos (cámara de 60 pulgadas cúbicas).

Una segunda limitación importante en el uso de alto vacío

es que el tamaño del trabajo está limitado por la dimensión de la cámara. Esta limitación es algunas veces vencida mediante el uso de una cámara que tenga aberturas especiales y sellos que permitan que el trabajo pasado de tamaño se extienda fuera de la cámara, o por el uso de una cámara sujetable portátil.

**CONDICIONES DE SOLDADURA.**- La soldadura en alto vacío se hace tanto con equipo de bajo voltaje como con equipo de alto voltaje. La alimentación de energía al trabajo, necesaria para producir una soldadura de la profundidad de penetración requerida y anchura, es la base para seleccionar las condiciones de soldadura.

La profundidad de penetración se aumenta incrementando el voltaje o corriente para mayor potencia de rayo, o disminuyendo la velocidad de soldadura. La tabla 7.4.1 lista alimentaciones de energía aproximadas, por pulgada de longitud de soldadura, para hacer soldaduras por rayo de electrones angostas de un solo paso de 0.25 a 3 pulgadas de profundidad en las aleaciones soldables de cobre, hierro, níquel, aluminio y magnesio. Estos valores pretenden servir como puntos de partida para establecer condiciones para soldar trabajo para el que no hay disponible experiencia previa. Los requerimientos de alimentación de energía para aplicaciones específicas dependen de la composición de la aleación y condiciones de operación especial, tales como el uso de oscilación de rayo o un rayo desenfocado.

**TABLA 7.4.1 Alimentación de energía en la soldadura para soldadura por rayo de electrones de un solo paso en alto vacío para varias profundidades de penetración (a).**

Profundidad de penetración, pulgs.	Kilojoules por pulgada de longitud de soldadura para soldar aleaciones de:				
	Cu	Fe	Ni	Al	Mg
0.25	7	5	4	2	1
0.50	15	10	8	5	3
0.75	25	18	15	8	5
1.00	37	27	22	13	8
1.50	62	46	39	23	15
2.00	87	68	60	35	22
2.50	112	90	80	47	29
3.00	137	112	100	59	36

(a) Los valores son aproximados y se aplican a las aleaciones comunemente soldadas de los metales. Pretenden servir como puntos de partida para establecer condiciones para hacer soldaduras estrechas. La alimentación de energía puede variar sustancialmente de estos valores en aplicaciones específicas, dependiendo de la composición de la aleación y de las condiciones especiales de la operación. La alimentación de energía en la soldadura (kilojoules por pulgada de longitud de la soldadura) = voltaje del rayo (Kv) x corriente de rayo (ma) x 0.06 ÷ velocidad de soldadura (pulg. por minuto).

#### Soldadura en Medio Vacío

Para soldar por rayo de electrones en medio vacío, la presión en la cámara de soldadura se mantiene generalmente a aproximadamente  $10^{-1}$  a  $10^{-2}$  torr., pero puede ser de  $2 \times 10^{-1}$  a  $10^{-3}$  torr. La cámara de la pistola, en la que el rayo se genera y en foca, se mantiene de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  torr, como en la soldadura al alto vacío. Se necesita una pequeña bomba de difusión para proporcionar el vacío en la cámara de la pistola, pero no se necesita una bomba de difusión para bombear la cámara de soldadura, la que puede ser evacuada con una bomba mecánica.

**COMPARACION CON LA SOLDADURA AL ALTO VACIO.-** La ventaja principal de soldar en medio vacío, comparado con el soldar en alto va

cío, es el tiempo corto de bombeo para la cámara de soldadura, - que generalmente no excede de 40 segundos para una cámara de uso general (de aprox. 4 pies cúbicos) y que es menos de 5 segundos para las cámaras especialmente diseñadas usadas para soldar partes pequeñas.

De la misma manera, la soldadura en medio vacío permite la producción masiva de partes usando una cámara de volumen mínimo.

Los índices de producción para soldar en medio vacío dependen del diseño de la parte; el índice máximo de producción es típicamente aproximado a 50 piezas por hora para equipo manual, -- 500 piezas por hora para máquinas semiautomáticas con herramienta especial, y 1500 piezas por hora para máquinas completamente automáticas de un solo uso. Cámaras y herramienta de uso general se usan para partidas cortas.

Soldaduras en metales reactivos, y otras soldaduras para - las que los efectos de contaminación por gases son especialmente críticos, se hacen preferentemente al alto vacío.

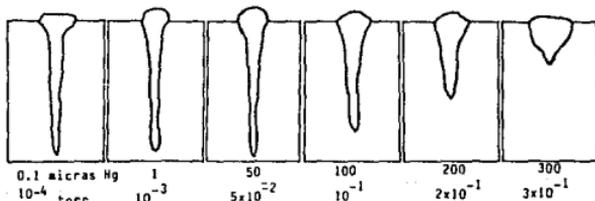
El nivel de contaminación del aire (concentración total de gases presente) es proporcional a la presión como sigue:

Presión, Torr	Gases, ppm
$10^{-5}$	0.01
$10^{-3}$	1.3
$10^{-1}$	132
$4 \times 10^{-1}$	500

Se pueden obtener niveles de contaminación más bajos que - aquellos observados en la realidad para soldadura por arco con - protección de gas inerte.

**PENETRACION Y FORMA DE SOLDADURA.**- La penetración a un nivel dado de potencia es generalmente de 5 a 10% menos que para soldadura al alto vacío, y las soldaduras son más anchas y ligeramente más ahusadas. Estos cambios son provocados por la dispersión de electrones en el rayo chocando con las moléculas de gas, lo que hace al rayo más amplio.

El efecto de la presión en la cámara de soldadura en la penetración y en la forma de la soldadura, se muestra en la fig. 7.4.8 para soldaduras hechas en acero inoxidable tipo 304, usando una longitud de rayo de 16 pulgadas. La penetración decae rápidamente a presiones de  $10^{-1}$  torr o más a esta longitud de rayo, y a presiones más bajas cuando la trayectoria del rayo es más larga.



Para soldaduras por rayo electrónico hechas en acero inoxidable tipo 304, usando una longitud de rayo de 16 pulgs. sin cambiar el enfoque. Las condiciones de soldadura fueron: 150 kv, 30 ma y 80 pulgadas por minuto.

**Fig. 7.4.8.** Efecto de la presión en la cámara de soldadura sobre la penetración y forma de soldadura.

**COMPARACION CON SOLDADURA SIN VACIO.**- Las desventajas de la soldadura en medio vacío, comparada con la soldadura a presión atmosférica son las limitaciones en el tamaño del trabajo impuestas por la necesidad de encerrar el trabajo en una cámara de vacío, y el tiempo necesario para el bombeo de la cámara.

La desviación y oscilación de rayo, que no pueden usarse - al soldar a presión atmosférica, pueden usarse en soldadura al medio vacío.

APLICACIONES DE LA SOLDADURA AL MEDIO VACIO.- La mayoría de - partes que pueden soldarse al alto vacío también pueden soldarse en medio vacío; la profundidad de penetración es menos que en la soldadura al alto vacío, y la razón profundidad-anchura es menos que aproximadamente 10 a 1. Los metales reactivos son menos fácilmente soldados en medio vacío que en alto vacío.

La soldadura en medio vacío ha sido usada para soldar partes de automóviles producidas en masa, tales como engranes y flechas que son soldadas a tolerancias estrechas, y no son subsecuentemente acabadas.

#### Soldadura sin Vacío (fuera de cámara)

En la soldadura por rayo de electrones sin vacío, o fuera de cámara, el trabajo a soldar no se encierra en una cámara de vacío, sino que se suelda a presión atmosférica. El rayo de electrones se genera a alto vacío, como para la soldadura en alto y en medio vacío, y se pasa a través de una columna de transferencia del haz, saliendo a través de un orificio pequeño a la atmósfera. La columna de transferencia del haz consiste de varias cámaras de bombeo distintas que están separadas por orificios pequeños, y se mantienen a niveles progresivamente más altos, del emisor de electrones a la salida (de presión).

La razón principal de usar soldadura por rayo de electrones sin vacío en lugar de soldadura por rayo de electrones de alto o medio vacío, es que los índices de producción son mucho más altos, y los costos más bajos, porque no se necesita cámara de -

vacío para el trabajo, y no se consume tiempo para evacuar en cada carga. Además, el tamaño del trabajo no está limitado por -- las dimensiones de la cámara. Estas ventajas se ganan a expensas de una penetración y distancia de trabajo reducidas, imponiendo por lo tanto límites en el espesor y forma del trabajo en los que se va a usar el método sin vacío. También, las soldaduras -- fuera de cámara no pueden hacerse tan angostas y sin ahusamiento, como las hechas en un vacío.

Casi todos los metales que son soldados por arco, o soldados por rayo de electrones en un vacío, pueden ser soldados por rayo de electrones sin vacío. Se proporciona protección con gas inerte en la zona de soldadura cuando el metal de soldadura fundido o la zona afectada por calor no pueden ser expuestos al aire. En metales fácilmente soldables, las propiedades de soldadura se aproximan a aquellas de soldaduras hechas en vacío; en metales difíciles de soldar, las propiedades de soldadura son generalmente más bajas que aquellas de soldaduras hechas en un vacío.

CONDICIONES DE OPERACION.- Las condiciones de operación para soldadura sin vacío difieren sustancialmente de aquellas para soldar en alto o medio vacío. La dispersión del rayo aumenta -- aproximadamente en proporción a la presión, y el rayo de soldadura sin vacío se volvería típicamente tan disperso al viajar una distancia de aproximadamente 6 pulgadas en el aire a presión atmosférica como para ser completamente inefectivo al soldar.

Para proporcionar un haz de electrones de velocidad suficiente para contrarrestar el efecto dispersante de choques con moléculas de gas en la columna de transferencia de haz y el espacio entre el extremo de la pistola de electrones, el voltaje se mantiene constante a un valor alto -- en el rango de 100 a 175 kv -- y la distancia de trabajo (distancia pistola a trabajo, --

medida desde el orificio de salida) se mantiene tan baja como sea posible y, generalmente, no es mayor de aproximadamente 3/4 de pulgada.

Con el voltaje mantenido constante, la corriente de haz, la distancia de trabajo, y la velocidad de soldadura, se seleccionan para proporcionar la penetración y forma de soldadura requeridas para una buena soldadura. Como generalmente es deseable mantener la distancia de trabajo tan corta como sea posible, y la velocidad de soldadura alta, la corriente de haz es la variable de control principal en la soldadura sin vacío.

El tamaño pequeño del orificio de salida en la pistola de electrones hace necesario enfocar el haz a, o muy cerca del orificio de salida. Consecuentemente, no es posible variar las características de soldadura en un grado significativo cambiando el enfoque. Análogamente, la oscilación del rayo y la desviación del mismo no son posibles. La ausencia de estas capacidades de ajuste en la soldadura sin vacío no es una limitación, porque la anchura del rayo es comúnmente lo suficientemente grande, de tal manera que no promueve socavación o porosidad en la raíz de la soldadura.

Rara vez se necesita un paso cosmético en soldaduras por rayo de electrones hechas a presión atmosférica, porque se produce una corona suave en las soldaduras en la mayoría de los metales. La suavidad de la corona también mejora la facilidad de inspección no destructiva de la superficie como soldada; un cepillado de alambre es con frecuencia una preparación adecuada para inspección radiográfica o de tinte penetrante.

La limitación en la forma de la pieza, impuesta por la necesidad de una distancia corta de trabajo, puede ser vencida hasta cierto grado con el uso de boquillas de pistolas de electro-

nes especialmente diseñadas para llegar a espacios restringidos. Por ejemplo, se usó una boquilla especial para hacer soldaduras circunferenciales de precisión en el fondo de ranuras de 0.070 - pulgadas de ancho y 1/4 de pulgada de profundidad de una flecha redonda de 1.1/4 pulgadas de diámetro en una aplicación de producción sin vacío.

Generalmente, el metal de relleno no se usa, excepto donde es necesario para refuerzo de soldadura, para producir las propiedades deseadas de soldadura, o para evitar fracturas.

Se pasa una corriente de aire seco filtrado, o un gas inerte protector, como argón o helio, a través de la región de la soldadura en el espacio entre el trabajo y la pistola electrónica, o puede ser suministrada a través de un ensamble de boquilla de tipo inserto, que es parte del orificio de salida y está diseñado para minimizar la entrada de vapores de soldadura y otros contaminantes, dentro de la pistola. Se suministra protección auxiliar por medio de gas inerte donde sea necesario para una protección completa del metal de soldadura fundido y de la zona afectada por el calor, contra contaminantes gaseosos. Algunas veces se hacen soldaduras en carbono y acero aleado, y otros metales fácilmente soldables, sin usar gas protector. Sin embargo, el gas protector se usa con frecuencia. La forma de soldadura puede cambiarse variando el flujo de helio.

**PENETRACION:** Las soldaduras por rayo de electrones sin vacío en aplicaciones de producción, rara vez son más profundas que aproximadamente 1/2 pulgada. Se han obtenido soldaduras con penetración mayor de 1 pulgada, pero esto generalmente conlleva una reducción sustancial en la velocidad de soldadura acompañada por el aumento correspondiente en el costo de la misma.

La fig. 7.4.9 muestra el efecto de la velocidad en la pene

tracción de soldaduras sin aplicarles vacío, hecha en acero en -  
aire, usando una potencia de rayo de 15 y 25 kw a una distancia  
de 1/4 de pulgada.

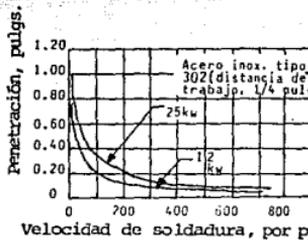


Fig. 7.4.9. Efecto de la velocidad de la soldadura en la penetración, al soldar acero al aire a presión atmosférica, con una potencia de rayo de 12 y 25 kw y una distancia de trabajo de 1/4 de pulg.

La fig. 7.4.10 muestra el efecto de la velocidad de la soldadura en la penetración de soldaduras sin vacío hechas en acero y aluminio, con protección de helio.

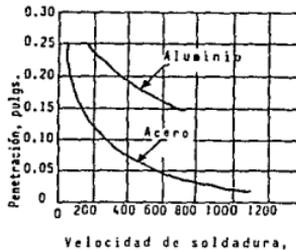


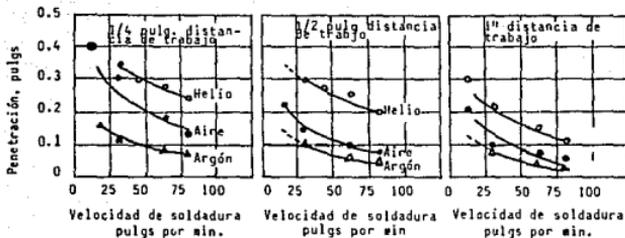
Fig. 7.4.10. Efecto de la velocidad de la soldadura en la penetración para soldar acero y aluminio en protección de Helio a presión atmosférica, usando una potencia de rayo de 9 kw.

El efecto de variar la distancia de trabajo, dentro de límites prácticos de operación, se muestra esquemáticamente en la fig. 7.4.11, para aleación de aluminio 2219 de 1/4 de pulgada de espesor. Cuando se usó la distancia máxima de trabajo, la penetración fue sólo aproximadamente 80%, y la anchura máxima de soldadura fué aproximadamente un tercio mayor que cuando se usó la distancia de trabajo mínima.



**Fig. 7.4.11.** Efecto de variar la distancia de trabajo, dentro de límites prácticos de operación, en soldadura por rayo de electrones sin vacío de aleación de aluminio 2219 de 1/4 de pulg. de grueso.

Cuando un gas protector sustituye al aire en soldaduras -- sin vacío, suponiendo las mismas condiciones de operación, la penetración será mayor cuando se use un gas que tenga un peso molecular más bajo que aquel del aire, y será menor cuando se use un gas que tenga un peso molecular más alto que el del aire. En -- pruebas al soldar acero 4340 usando una potencia fija de rayo de 6.4 kw., distancias de trabajo de 1/4, 1/2 y 1 pulgada, y velocidades de soldadura de aproximadamente 15 a 80 pulgadas por minuto, la penetración se incrementó cuando el aire fue sustituido por helio, y disminuyó cuando el argón sustituyó al aire, como se muestra en la figura 7.4.12. Las capacidades relativas del helio, aire y argón para dispersar los electrones del rayo por choques de electrones con moléculas de gas se indica por sus pesos moleculares y densidades relativas, que se dan abajo de la -- fig. 7.4.12.



**Fig. 7.4.12** Efecto del gas protector, distancia de trabajo, y velocidad de soldadura sobre la penetración para soldar por rayo electrónico sin vacío acero 4340, usando una potencia de rayo de 6.4 Kw.

En promedio, cuando se usó helio como gas protector, la profundidad de penetración fue aproximadamente el doble de la obtenida cuando la soldadura se hizo en aire y, cuando se usó argón, aproximadamente la mitad de la obtenida cuando la soldadura se hizo en el aire. Por lo tanto, con protección de helio, la penetración promedió aproximadamente cuatro veces la obtenida con argón, especialmente a velocidades más altas. La velocidad a la que un determinado espesor de acero 4340 pudo ser soldado con penetración completa, usando helio, fue de dos a cuatro veces la usada con aire y, usando argón, de 25 a 50% la usada con aire.

Estudios hechos sobre soldadura sin vacío de tubería de acero mostraron que a velocidades de 100 a 1000 pulgadas por minuto se pudieron hacer soldaduras de penetración completa en metal dos veces más grueso si se usó protección de helio en lugar de aire. La tabla 7.4.2 da los resultados de esta comparación, en términos de velocidad de soldadura, para unir tubería de ace-

ro de 0.050 a 0.150 pulgadas de espesor en aire o en helio. - Las velocidades de soldadura fueron de 2.16 a 2.24 veces más grandes en helio que en aire. La potencia usada de rayo fue - de 12 kw.

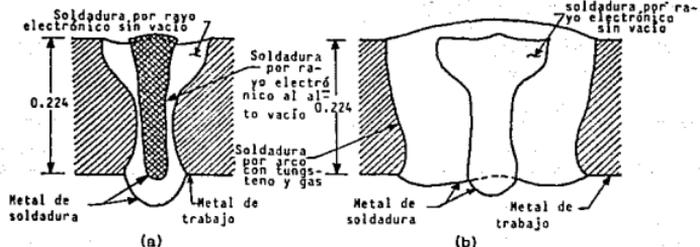
**TABLA 7.4.2** Velocidades para soldadura con penetración completa de tubería de acero al carbono de baja aleación a una potencia de rayo de 12 kw.

Espesor de pared, pulgs.	Velocidad de soldadura, pulg. por min.		Velocidad relativa de soldadura en helio. (a)
	En aire	Helio	
0.050 .....	417 .....	900 .....	2.16
0.080 .....	241 .....	528 .....	2.20
0.100 .....	187 .....	412 .....	2.21
0.150 .....	118 .....	264 .....	2.24

(a) Basada en la velocidad de soldadura en el aire, como 1.00.

**FORMA DE SOLDADURA Y ALIMENTACION DE CALOR.**- Las soldaduras por rayo electrónico son vacío son generalmente más anchas y más ahusadas que las soldaduras a alto vacío. Las soldaduras en medio vacío difieren sólo ligeramente en forma de las soldaduras al alto vacío, ver figura 7.4.8.

Formas típicas de soldaduras de penetración completa hechas en aleación de aluminio 2219 de 0.224 pulgadas de espesor por soldadura por rayo de electrones sin vacío y en alto vacío, y por soldadura por arco con tungsteno y gas, se muestran en la figura 7.4.13 y las condiciones se dan en la tabla acompañante.



CONDICIONES DE SOLDADURA	Fig. 13(a)		Fig. 13(b)	
	Alto vacío spre	Sin vacío spre	Spatg	Sin vacío spre
Voltaje, Kv .....	150	140	13 (v)	140
Corriente, ma .....	20	30	270 [amp]	20
Velocidad de soldadura, pulgs. por min. ..	100	100	20	50
Energía de soldadura, Kj por pulg. ....	1.8	2.5	10.5	3.36

spre= soldadura por rayo electrónico.  
 spatg= soldadura por arco con tungsteno y gas.

Fig. 13.- Comparación de soldaduras de penetración total en aleación de aluminio 2219 de 0.224 pulgs. de grueso, hechas por: (a) Soldadura por rayo electrónico sin vacío vs. soldadura por rayo electrónico al alto vacío y, (b) Soldadura por arco con tungsteno y gas vs. soldadura por rayo electrónico sin vacío.

Fig. 7.4.13 Comparación de soldaduras de penetración total en aleación de aluminio 2219 de 0.224 pulgs. de grueso, hechas por: (a) Soldadura por rayo de electrones sin vacío vs. soldadura por rayo de electrones al alto vacío, y (b) Soldadura por arco con tungsteno y gas vs. soldadura por rayo de electrones sin vacío.

Comparando las soldaduras por rayo de electrones sin vacío y al alto vacío en la figura 7.4.13(a), la alimentación de calor para la primera fue aproximadamente mayor en 40%, produciendo una anchura media de soldadura aproximadamente 33% mayor, y una anchura máxima de corona 160% mayor que aquéllas de la soldadura al alto vacío. Comparando la soldadura por rayo de electrones sin vacío a la soldadura por arco con tungsteno y gas en la figura 7.4.13(b), la alimentación de calor para la soldadura típica sin vacío fue 32% de aquélla para la soldadu-

ra por arco, produciendo una anchura media de soldadura de - - aproximadamente 25%, y una anchura máxima aproximada a 56%, de las anchuras correspondientes para la soldadura por arco. Comparada con la soldadura por arco, la soldadura más ancha producida por soldadura por rayo de electrones sin vacío, bajo condiciones de operación trabajables, fue aprox. 42% tan ancha en el punto medio, y aprox. 70% tan ancha en la corona.

CONTRACCION DE LA SOLDADURA.- A través de soldaduras por rayo electrónico sin vacío, generalmente es menor que la mitad de la de las soldaduras por arco con tungsteno y gas en el mismo metal y espesor de trabajo, y es típicamente aproximadamente el doble que para soldaduras por rayo electrónico al alto vacío.

Estudios al soldar aleación de aluminio 2219 de  $\frac{1}{8}$  de pulgada de espesor, mostraron una contracción promedio de 0.003 a 0.005 pulgadas para soldaduras al alto vacío, y de 0.014 pulgadas para soldaduras sin vacío con alta alimentación de calor, comparadas con una contracción normal de 0.030 pulgadas para soldaduras por arco con tungsteno y gas.

HERRAMENTAL.- La unidad básica de soldadura consiste en una fuente de poder, una pistola de electrones (emisor y columna de transferencia de rayo), y controles como aquéllos usados en una variedad de aplicaciones de soldadura. El herramental generalmente se diseña específicamente para soldar un ensamble particular en producción masiva. La disponibilidad de accesorios y equipos que permitirán soldar a altas velocidades y permitirán una manipulación eficiente del trabajo, es la clave para obtener altos índices de producción y bajo costo.

El equipo para manejo del trabajo está a presión atmosférica en lugar de al vacío, por lo tanto, los posicionadores de uso general y dispositivos relacionados, son generalmente sa--

tisfactorios. Los mecanismos sujetadores de anclaje pueden ser más simples que aquellos a menudo necesarios para soldar por arco partes similares, porque la distorsión angular es generalmente baja. Mecanismos de ubicación y alineación son más simples que para soldar en vacío, debido a su accesibilidad y porque los rayos son más anchos y tal exactitud alta no se requiere para seguir la unión. El mantenimiento del equipo de manejo del trabajo se simplifica grandemente por su ubicación fuera de la cámara.

APLICACIONES DE PRODUCCION.- La soldadura por rayo de electrones sin vacío se ha usado en producción comercial de engranes, ruedas, juntas de bola y otras partes automotrices, en refrigeración, en componentes de aparatos y en tuberías de longitudes continuas.

Generalmente no se usa metal de relleno en la soldadura por rayo de electrones sin vacío. Sin embargo, la adición de un metal de relleno adecuado puede ser útil para unir metales metalúrgicamente incompatibles o para evitar fracturas de soldadura causadas por fragilidad en caliente.

#### Uso de Metal de Relleno

La fusión de caras ranuradas cercanamente ensambladas generalmente proporciona suficiente metal de soldadura, o se proporciona metal extra, cuando sea necesario, incluyendo un espesor más grueso del metal, u hombros o labios integrales en la preparación de la unión.

Cuando los requerimientos del producto u otras circunstancias impiden el uso de una preparación de unión y condiciones de soldadura que proporcionen metal de soldadura suficiente, se añade metal de relleno.

PREVENCIÓN DE FRACTURA.- La adición de metal de relleno puede prevenir fracturas en soldaduras por rayo de electrones en un metal o combinación de metales disímiles susceptibles a la fractura. Puede ser necesario incluso cuando el diseño de la unión, el ensamble y las condiciones de operación se seleccionan para lograr el mínimo de restricción de la unión y esfuerzo residual. En otras aplicaciones, el uso de metal de relleno precolocado puede proporcionar metal de soldadura que sea menos quebradizo que el que se obtendría soldando un metal base (o metales) solo.

Entre los metales base para los que con frecuencia se requiere metal de relleno adicional, están las aleaciones de aluminio 6061, 6063, 6066 tratables térmicamente, aceros de fácil maquinado y otras aleaciones de fácil maquinado.

Muchas combinaciones de metales disímiles que son susceptibles de fractura cuando se sueldan directamente, generalmente debido a la formación de fases intermetálicas quebradizas, pueden soldarse por rayo de electrones con la ayuda de metal de relleno que tenga una composición compatible con ambos metales de la combinación.

PREVENCIÓN DE LA POROSIDAD.- La soldadura por rayo electrónico de acero encerrado, sin metal de relleno, comúnmente resulta en porosidad severa en la soldadura, incluso cuando la velocidad de soldadura es lenta, y se seleccionan otras condiciones para incrementar el tiempo durante el cual el gas puede escapar del metal de soldadura fundido. Insertar un metal de relleno que contenga un desoxidante tal como aluminio, manganeso o silicio, ayuda a minimizar la porosidad.

La aleación de cobre 110 y otros tipos de cobre que no contienen desoxidantes residuales también producen soldaduras porosas cuando se unen sin metal de relleno, pero se pueden ha

cer buenas soldaduras con la ayuda de níquel como metal de relleno, o un metal de relleno desoxidante.

**PRECOLOCACION DEL METAL DE RELLENO.**- La técnica más frecuentemente usada para la adición de metal de relleno en la soldadura por rayo de electrones, especialmente para soldaduras profundas, es la precolocación. Una placa de metal de relleno, generalmente de espesor de lámina, puede insertarse entre las caras de la ranura cuando se ensambla la unión para soldar.

**ALIMENTACION DEL ALAMBRE PARA RELLENO.**- Sistemas de alimentación de alambre operados eléctricamente, que son modificaciones de equipo de alimentación de alambre usado en la soldadura por arco con tungsteno y gas, o alimentadores de alambre especialmente diseñados para rayo electrónico, se utilizan algunas veces en la cámara de vacío.

Generalmente, la alimentación de alambre de relleno no ayudará para unir metales incompatibles, a menos que sean muy delgados.

El diseño de la boquilla de alimentación de alambre, y la técnica con la que se usa, son importantes para guiar al alambre de tal manera que intercepte el rayo de electrones. La falla en interceptar el rayo, de 0.010 a 0.030 pulgadas de diámetro, resulta en una aplicación irregular del metal de relleno. Cualquier metal de relleno insertado en la trayectoria del rayo absorbe energía y afecta la penetración.

La boquilla de alimentación de alambre se mantiene normalmente tan cerca del charco de soldadura como sea posible, sin dañar la boquilla, y el alambre se dirige adentro de la orilla de adelante del charco. La punta de la boquilla deberá estar hecha de un material resistente al calor, y deberá es-

tar cubierta para evitar que el metal de soldadura fundido se adhiera a ella si se hiciera contacto inadvertidamente. La boquilla generalmente se orienta en la dirección del viaje de la pieza.

#### Punteo

Al montar el trabajo para soldadura por rayo de electrones, la sujeción con frecuencia se complementa o se sustituye por punteo, que generalmente se hace con el rayo de electrones. Con frecuencia, el tiempo y costo del montaje se reducen sustancialmente mediante el uso efectivo de punteos.

En algunas aplicaciones, la selección del procedimiento para puntear es crítico, para evitar una variación inaceptable en la forma y dimensiones del cordón final de soldadura, y para evitar porosidad o fusión incompleta en la raíz. Con frecuencia se usan potencia reducida y otras condiciones especiales de operación.

TECNICAS.- Quizás la técnica más común es hacer uno o más puntos adecuadamente separados, a potencia de rayo completa, o reducida, antes de hacer el paso de soldadura. Para soldaduras circulares o circunferencias generalmente se hacen uno o más puntos.

Un paso superficial de sello a potencia reducida de rayo también se puede hacer a lo largo de toda la longitud de la unión para mantener alineadas las piezas, seguido por el paso de penetración a potencia total. Para algunas aplicaciones, es conveniente dejar claros ocasionales sin soldar como una ayuda para rastrear la unión durante el paso de penetración.

El punteo en soldadura por rayo de electrones puede mantener metal de relleno precolocado en posición dentro o sobre una unión. Se puede utilizar punteo por resistencia o por arco.

#### Soldadura de Acero al Bajo Carbono

Los aceros al bajo carbono son fácilmente soldables por rayo de electrones. El tamaño de grano en la soldadura y en la zona afectada por el calor es significativamente más pequeño - que en soldaduras por arco, debido a la alimentación más baja de calor y al calentamiento y enfriamiento excesivamente rápidos.

#### Soldadura de Acero Templable

La variación en soldabilidad por el proceso de rayo de electrones entre aceros templables sigue el mismo patrón que - para soldar por arco estos aceros. Las propiedades de soldaduras por rayo de electrones en un acero templable dado difieren de aquellas de soldaduras por arco principalmente debido a la estrechez de las zonas de fusión y afectada por calor, y a los ciclos extremadamente rápidos de calor-fusión-enfriamiento.

ACEROS AL MEDIO CARBONO.- Excepto para los tipos de fácil maquinado, son fácilmente soldados por rayo de electrones. La soldabilidad disminuye al aumentar el contenido de carbono.

ACEROS DE BAJA ALEACION.- Los que contienen menos de - 0.30% de carbono son generalmente soldados por rayo de electrones sin precalentamiento o postcalentamiento. Cuando se usa el precalentamiento, como para evitar fracturas en uniones altamente restringidas, generalmente una temperatura de 260 a 316°C es adecuada. Si la parte ha sido endurecida y templada antes -

de soldar, el templado posterior a la soldadura debe hacerse a una temperatura ligeramente por abajo de la cual el metal base fue originalmente templado.

ACEROS DE ALTA RESISTENCIA.- Los que contienen más de 0.30% de carbono son soldados por rayo de electrones, ya sea en la condición de revenido o normalizado o en la condición de enfriado por inmersión y templado, aunque la soldabilidad es mejor para la condición de revenido o normalizado. (Aceros aleados).

ACEROS AL ALTO CARBONO.- Debido a la baja alimentación total de calor y al ciclado térmico rápido, que son característicos de la soldadura por rayo de electrones, la fractura de soldadura de aceros que contienen más de 0.50% de carbono es menos probable que en la soldadura por arco.

#### Soldadura de Acero para Herramienta

La ventaja principal de la soldadura por rayo de electrones sobre otros procesos de soldadura al unir aceros para herramienta es su capacidad para producir uniones a alta velocidad sin revenido u otras operaciones de tratamiento térmico.

#### Soldadura de Acero Inoxidable

ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.- Los altos índices de enfriamiento, típicos de la soldadura por rayo de electrones, ayudan a inhibir la precipitación del carburo, debido al corto tiempo durante el cual el acero está en el rango de temperatura de sensibilización.

ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.- Aunque estos aceros

pueden soldarse por rayo de electrones en casi cualquier condición de tratamiento térmico, la soldadura producirá una zona afectada por calor de tipo martensítica. La dureza y la susceptibilidad a fractura aumentan con mayor contenido de carbono e índice de enfriamiento.

**ACEROS INOXIDABLES ENDURECIBLES POR PRECIPITACION.-** -  
Pueden, en general, soldarse por rayo de electrones para producir buenas propiedades mecánicas en la unión.

### Soldadura de Metales Refractarios

La soldadura por rayo de electrones se usa para unir los metales refractarios (tungsteno, molibdeno, columbio, tantaló), y sus aleaciones. El problema principal al soldar estos metales es que se hacen quebradizos, debido a la contaminación. El proceso de soldadura por rayo de electrones es especialmente adecuado para soldar estos metales, debido a que el vacío evita contaminación. Los metales refractarios tienen temperaturas de fusión arriba de los 2204 °C.

Las principales desventajas de soldar por rayo de electrones los metales refractarios son: a) las altas velocidades de soldadura no son deseables en metales susceptibles a shock térmico; b) cantidades significativas de elementos aleantes que tienen altas presiones de vapor pueden perderse; y c) algunos ensambles pueden requerir tiempos largos en la cámara de vacío, o enfriamiento forzado con gas inerte para evitar contaminación atmosférica.

### Soldadura de Aleaciones de Aluminio

Se han hecho soldaduras de un solo paso de penetración total con radios profundidad-anchura de más de 20 a 1 en placas de aleación de aluminio de 6 pulgadas de espesor.

La baja alimentación de calor, zona afectada por calor estrecha, y ciclo de calor corto, resultan en una disminución mínima de las propiedades mecánicas, especialmente en ensambles de algunas de las aleaciones tratables térmicamente.

### Soldadura de Cobre y sus Aleaciones

La soldadura por rayo de electrones de cobre y sus aleaciones está influenciada por los mismos factores que afectan la soldadura por arco de estos metales. La alta conductividad térmica del cobre causa menos dificultad en soldadura por rayo de electrones que en soldadura por arco.

### Soldadura de Aleaciones de Magnesio

La soldadura por rayo de electrones se usa en grado limitado, principalmente para reparación, en aleaciones comerciales de magnesio forjado y vaciado que contienen menos de 1% de zinc. La adecuabilidad relativa de las aleaciones de magnesio para soldadura por rayo electrónico es la misma que para soldadura por arco.

## Soldadura de Aleaciones de Titanio

Todas las aleaciones comerciales de titanio que pueden unirse por soldadura por arco también pueden unirse por soldadura por rayo de electrones. Su soldabilidad relativa y respuesta a ciclaje de calor en soldadura por rayo electrónico generalmente son las mismas que en soldadura por arco.

## Uniones de Metales Disímiles

La unión de metales disímiles es una aplicación importante de la soldadura por rayo de electrones. Muchas combinaciones que son difíciles de soldar, o insoldables, por otros procesos, pueden soldarse mediante este proceso.

## Soldadura por Rayo de Electrones vs. Procesos Alternativos

La ventaja principal de la soldadura por rayo de electrones sobre otros procesos de soldadura es su capacidad para hacer soldaduras profundas angostas, estrechamente controladas, en un solo paso con una alimentación total de calor baja, y con un ciclo calor-fusión-enfriamiento extremadamente corto. Otras ventajas incluyen: alta velocidad de soldadura, capacidad de hacer la mayoría de soldaduras sin usar metal de relleno o gas protector, y aplicabilidad para soldar en ubicaciones profundas y estrechas o cercanas a otros componentes que son sensibles al calor o que obstruyen el acceso para soldar por arco.

Las mayores desventajas incluyen: alto costo de equipo, alto costo de preparación precisa de la unión y de herramientas de precisión, y limitaciones en tamaño del trabajo y tiempo de producción unitario cuando la soldadura se hace en una cámara

de vacío. Otra desventaja es que las soldaduras por rayo de electrones son algo más susceptibles que las soldaduras por arco a huecos en la raíz, particularmente las soldaduras de 1/4 pulgada de profundidad o más.

En un análisis sobre selección de procesos de soldadura, las razones mayores dadas para escoger soldadura por rayo de electrones en preferencia a otros procesos de soldadura fueron: mejoramiento en propiedades mecánicas de unión, distorsión reducida, reducción de costo, y aplicabilidad única para soldar ensambles específicos.

## 7.5 SOLDADURA POR RAYO LASER

### Descripción

La fuente de calor en la soldadura por rayo laser es un rayo laser dirigido, generalmente proporcionando intensidades en exceso de 10 kilowatts por centímetro cuadrado, pero con una alimentación baja de calor, de 0.1 a 10 joules. El rayo de alta intensidad produce una columna muy delgada de metal vaporizado que se extiende dentro del metal base. La columna de metal vaporizado está rodeada de un charco líquido, que se desliza al progresar la soldadura, resultando en soldaduras que tienen radios profundidad-anchura mayores de 4:1. Las soldaduras de rayo laser son más efectivas para soldaduras autógenas, pero se puede añadir metal de relleno. La figura 7.5.1 muestra el proceso de soldadura por rayo laser.

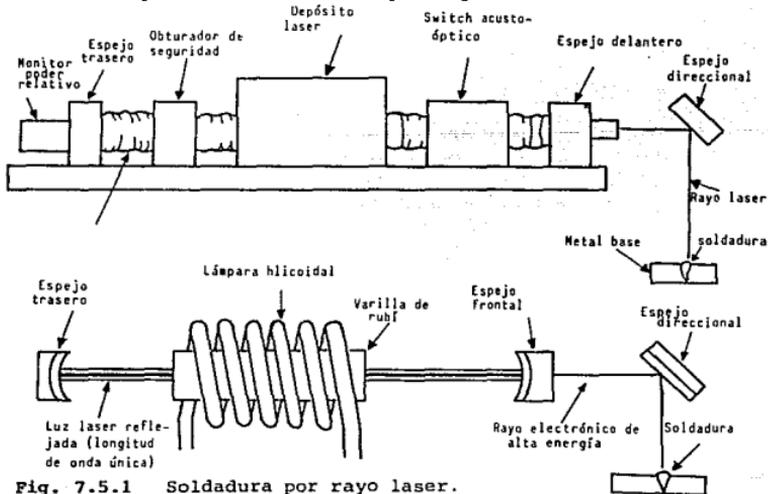


Fig. 7.5.1 Soldadura por rayo laser.

El término laser significa amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación. El rayo de luz tiene una longitud de onda y está en fase, es decir, las partículas u ondas se mueven juntas.

Un rayo laser se produce mediante uno de los tres tipos de laser:

- 1.- Laser Rubí.
- 2.- Laser Nd-YAG.
- 3.- Laser CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono).

Un laser rubí opera mediante la excitación de un cristal de rubí. Los electrones excitados provocan que los electrones adicionales se exciten. Cuando los electrones excitados regresan a su estado estable, emiten luz. Esta luz tiene una longitud de onda. La luz se refleja entre espejos y finalmente se libera. Se emite un pulso laser muy corto. El laser rubí no se puede usar continuamente, por lo tanto no es completamente adecuado para algunas aplicaciones de soldadura.

El Nd simboliza al Neodimio, un elemento metálico terrestre raro plateado. El YAG es un granate de Yttrio y aluminio, y actúa como un medio cristalino y anfitrión para el Neodimio. La combinación crea un cristal laser de estado sólido cuyos electrones se estimulan como los de los cristales rubí y CO<sub>2</sub>.

Un laser de CO<sub>2</sub> puede proporcionar un rayo laser continuo. Un laser CO<sub>2</sub> es el laser común usado para soldar. Un laser CO<sub>2</sub> opera bajo el mismo principio que el laser rubí. Un tubo largo se llena con CO<sub>2</sub> gaseoso. Los electrones en el gas dióxido de carbono se excitan mediante electrodos que rodean a los tubos de gas. Cuando los electrones excitados regresan a su estado normal, liberan energía luminosa. Esta energía excita a los electrones adicionales, que liberan energía adicional.

Con la energía luminosa produciéndose constantemente, el laser puede usarse para soldar continuamente.

El laser es luz. Se enfoca y se dirige usando espejos y lentes. Los lasers se operan a presión atmosférica. Se usa un gas protector para proteger al metal que se está soldando de la oxidación. Las partes a soldar deben tener orillas derechas y estar muy cercanas. Las velocidades de avance en soldadura por laser son mucho más altas que en soldadura por arco. La figura 7.5.2 muestra el aspecto de una soldadura laser.



**Fig. 7.5.2** Macrografía de una soldadura laser. La soldadura es más angosta que una soldadura de arco.

Soldadura por Rayo Laser  
VS  
Soldadura por Rayo Electrónico

Las soldaduras de gran penetración producidas por rayo laser son similares a las soldaduras de rayo electrónico, pero las primeras tienen varias ventajas:

- 1.- No se requiere un medio vacío.
- 2.- No se generan rayos X.
- 3.- El rayo laser se moldea y dirige fácilmente con óptica reflexiva.
- 4.- Como sólo se involucra un rayo de luz, no se necesita que haya contacto físico entre las piezas de trabajo y el equipo de soldadura, y el rayo pasará a través de materiales transparentes, permitiendo que se hagan soldaduras dentro de contenedores - transparentes.

#### Aplicaciones

Debido a que los rayos laser son concentrados, las soldaduras son pequeñas, generalmente menos de 0.001 pulgadas. - Por lo tanto, son muy útiles en la industria de la electrónica para unir cables a pequeños componentes electrónicos y en circuitos integrados. Se utilizan configuraciones de solapa, a tope, en T y en cruz. También es posible soldar conductores alámbricos con aislamiento de poliuretano sin remover el aislamiento; el laser evapora el aislamiento y completa la soldadura.

El laser también se usa para corte y para tratamiento térmico. En este último el rayo laser no se enfoca a un punto; el rayo es ligeramente divergente de tal manera que cubre y trata por calor un área pequeña.

### Ventajas y Desventajas

El equipo requerido para soldar con rayo laser es alto - en costo, aunque generalmente es diseñado para uso por trabajadores semihábiles. Su uso está restringido a aplicaciones especializadas.

## 7.6 SOLDADURA POR ELECTROESCORIA

### Descripción

La soldadura por electroescoria se ha desarrollado para soldar secciones muy gruesas o uniones. El proceso elimina la necesidad de múltiples pasos y de ranuras achaflanadas, en V, en U, o en J.

El proceso se usa para soldar uniones en una posición vertical. El equipo usado para la soldadura por electroescoria incluye:

- 1.- Una fuente de poder.
- 2.- Uno o más electrodos y tubos gafa electrodos.
- 3.- Uno o más alimentadores de alambre y osciladores.
- 4.- Zapatas de retención (moldes).
- 5.- Fundente.

El proceso se inicia produciendo un arco entre el electrodo(s) y el extremo bajo de la unión. Se añade fundente y se forma una capa de escoria fundida. Cuando se ha formado una capa grande de escoria, el arco ya no se necesita. La resistencia al flujo de corriente eléctrica a través del fundente crea el calor necesario para fundir el electrodo(s) y el metal base. Los electrodos usados son de alambre sólido o rellenos de fundente. El proceso es rápido y no requiere preparación de orilla del metal. Se puede usar más de un electrodo, lo que permite que una unión gruesa se suelde más rápido.

Se usan zapatas de cobre, enfriadas por agua, para contener el metal fundido y la escoria. Conforme se hace la soldadura, los moldes se mueven hacia arriba de la unión. La unión se completa en un paso. Con este proceso se pueden ha--

cer uniones a tope, en T, en esquina y otras. Las soldaduras a tope son las más comunes. Se requieren zapatas de forma especial para uniones en T o en esquina. La figura 7.6.1 muestra una operación de soldadura por electroescoria con tres electrodos.

El calor extremo producido por la escoria y el metal fundidos en la soldadura causa que el metal base se funda más allá del claro de unión original, como se muestra en la figura 7.6.2.

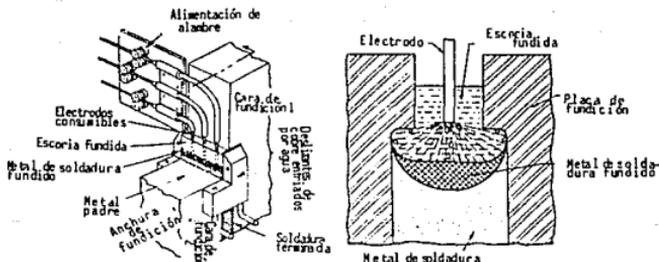


Fig. 7.6.1 (izq.) Arreglo de equipo y trabajo para hacer una soldadura vertical mediante el proceso de electroescoria.

Fig. 7.6.2 (der.) Sección a través de piezas y soldadura durante la realización de una soldadura por electroescoria.

## Aplicaciones

Aunque la mayoría de las aplicaciones de soldadura por electroescoria involucran la soldadura de acero al bajo carbono, el proceso también se usa ampliamente para soldar aceros al medio carbono como el 1045 y el 1050, y en un grado menor para soldar aceros estructurales de alta resistencia. El proceso por electroescoria también se ha utilizado exitosamente para soldar aleaciones de acero de alta resistencia, aceros -inoxidables y aleaciones de níquel.

### Soldadura por Electroescoria vs. Otros Procesos de Soldadura

Los índices de deposición son más altos para la soldadura por electroescoria que para cualquier otro proceso de soldadura -al menos 25 a 50% más alto que para soldadura por arco sumergido, que es generalmente la más cercana a la soldadura por electroescoria en índice de deposición.

En algunas aplicaciones, la soldadura por electroescoria es competidora cercana de la soldadura por electrogas. El equipo usado y los principios de operación son similares. El rango de espesor de metal de trabajo es mucho más angosto para la soldadura por electrogas (3/8 a 4 pulgs.) que para la soldadura por electroescoria, y los índices de deposición son mucho más bajos. Consecuentemente, la alimentación de calor es menor y el índice de enfriamiento es más alto en la soldadura por electrogas.

La soldadura por electroescoria no es adecuada para soldar estructuras complejas en las que las uniones sean cortas o interrumpidas, o en las que el tiempo requerido para alinear la unión para soldar en la posición vertical sería demasiado

grande.

Una aplicación especial de la soldadura por electroescoria es para unir dos piezas de tubo.

## CONCLUSIONES

La soldadura reviste una gran importancia como un proceso de manufactura, dado que una gran proporción de los productos metálicos tendrían que ser drásticamente modificados y serían considerablemente más costosos y no funcionarían tan eficientemente si no fuera por el uso de la soldadura.

La amplia gama de procesos de soldadura disponibles permite lograr soldaduras económicas y efectivas en casi todos los metales y combinaciones de metales, de tal manera que la soldadura ha reemplazado otros tipos de unión permanente a grado tal que una gran proporción de productos manufacturados contienen una o mas soldaduras.

Asimismo, de la gran diversidad de procesos analizados en la presente tesis, se desprende que es necesario hacer un análisis de algunas variables tales como tipo, forma y espesor de los materiales a unir, resistencia, calidad y limpieza requeridas, tamaño de lote de piezas a fabricar, requerimientos de metal de relleno, etc., para seleccionar el proceso de soldadura más adecuado. De la misma manera, es importante conocer los cambios que se producen en la estructura metalúrgica a consecuencia del calentamiento y enfriamiento que acompañan a la mayoría de los procesos de soldadura.

## A P E N D I C E

A.- ALEACIONES DE ALUMINIO. NOMENCLATURA

## ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADAS

Las aleaciones forjadas de base aluminio pueden dividirse en dos tipos básicos: aquéllas que alcanzan dureza mediante una aleación de solución sólida y endurecimiento de trabajo y aquéllas que pueden ser endurecidas por precipitación. Se utiliza una designación estandar para aluminio de 4 dígitos. El primer dígito indica el grupo de mayor aleación, como sigue:

ELEMENTO DE MAYOR ALEACION	
Aluminio 99.00% y mayor.....	1xxx
Cobre.....	2xxx
Manganeso.....	3xxx
Silicio.....	4xxx
Magnesio.....	5xxx
Magnesio y Silicio.....	6xxx
Zinc.....	7xxx
Otro elemento.....	8xxx

T a b l a A.1

El segundo dígito indica modificaciones de la aleación original o límites de impureza, y los dos últimos dígitos identifican la aleación particular o indican la pureza del aluminio.

Una especificación más amplia de la condición de la aleación se hace mediante la designación de "temple", un sufijo de una letra o de una letra y un número que siguen al número de código de designación de la aleación. Los símbolos y sus significados son:

- F : como se fabricó, como en fundición.
- H : endurecido por deformación
  - . H1 : endurecido por deformación mediante trabajo a las dimensiones deseadas; un segundo dígito hasta el 9, indica el grado de dureza, el 8 siendo comercialmente duro y el 9 extra duro.
  - . H2 : endurecido por trabajo en frío, seguida de revenido parcial, el número del segundo dígito 2 a 8, como se mencionó en el punto anterior.
  - . H3 : endurecido por deformación y estabilizada.
- O : revenida.
- T : tratada térmicamente (tratada con calor)
  - . T1 : enfriada de trabajo en caliente y envejecida naturalmente.
  - . T2 : enfriada de trabajo en caliente, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
  - . T3 : solución tratada con calor, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
  - . T4 : solución tratada con calor y envejecida naturalmente.

- . T5 : enfriada de trabajo en caliente y envejecida artificialmente.
  - . T6 : solución tratada con calor y envejecida artificialmente.
  - . T7 : solución tratada con calor y estabilizada.
  - . T8 : solución tratada con calor, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
  - . T9 : solución tratada con calor, envejecida artificialmente y trabajada en frío.
  - . T10 : enfriada de trabajo en caliente, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
- W : solución tratada con calor solamente.

Dígitos adicionales a aquéllos enlistados indican variaciones del temple básico.

#### ALEACIONES DE ALUMINIO DE FUNDICION

Grandes cantidades de aleaciones de aluminio son fundición, siendo los principales elementos de aleación, el Cobre, Silicio y Zinc. En la relativamente nueva designación de la Asociación de Aluminio, el primer dígito indica el grupo de aleación como sigue:

## ELEMENTO DE MAYOR ALEACION

Aluminio, 99.00% y mayor.....	1xx.x
Cobre.....	2xx.x
Silicio con Cobre y/o Mg.....	3xx.x
Silicio.....	4xx.x
Magnesio.....	5xx.x
Zinc.....	7xx.x
Estaño.....	8xx.x
Otros elementos.....	9xx.x

El segundo y tercer dígitos, identifican la aleación particular o la pureza del aluminio, y el último dígito, separado por un punto decimal, indica la forma del producto (pieza fundida, lingote, etc.). Una modificación de la aleación original se indica mediante una letra antes de la designación numérica.

**B.- ACEROS ALEADOS. CLASIFICACION**

Sin lugar a dudas el grupo más importante de aceros aleados, desde el punto de vista de fabricación, es el designado por el sistema de clasificación AISI (American Iron and Steel Institute). El sistema, que clasifica químicamente a las aleaciones, fue iniciado por la SAE (Society of Automotive Engineers) para proporcionar cierta estandarización de los aceros usados en la industria automotriz. Más tarde fue adoptado y ampliado por la AISI y ha llegado a ser el más conocido en los Estados Unidos. Tanto los aceros al carbono simples como los de baja aleación se identifican mediante una cifra de cuatro dígitos, el primer número identificando los elementos mayores de la aleación y el segundo número identificando una subdivisión del sistema mayor de la aleación. El agrupamiento mediante los dos primeros dígitos es de acuerdo a una tabla ordinaria. Los dos últimos dígitos indican el contenido aproximado de carbono en "puntos" de carbono, en donde un punto es equivalente a 0.01 por ciento de carbono.

La tabla B.1 muestra la clasificación de la composición básica. Como ejemplos, un acero 1080 sería un acero al carbono simple con 0.80 por ciento de carbono; un acero 4340 sería una aleación de Mo-Cr-Ni con 0.40 por ciento de carbono.

Se puede utilizar un prefijo de letra para indicar el proceso empleado para producir el acero, tal como el de hogar abierto (C), o el de horno eléctrico (E). Se utiliza un prefijo X para indicar variaciones permisibles en el rango de manganeso, azufre o cromo. Una letra B entre el segundo y tercer dígitos indica que el metal base ha sido complementado con adición de boro.

Los aceros de alto grado AISI se designan con la letra H como sufijo a la designación standard. Estos aceros se usan en donde el endurecimiento es un requisito mayor.

T a b l a B.1 -  
ALGUNAS DESIGNACIONES AISI-SAE DE ACEROS STANDARD

Número AISI	T i p o	Elementos de Aleación (%)					
		Mn	Ni	Cr	Mo	V	Otro
1xxx	Aceros al carbono						
10xx	Aceros simples						
11xx	Fácil corte (s)						
12xx	Fácil corte (s y p)						
15xx	Alto manganeso						
13xx	Alto manganeso	1.60-1.90					
2xxx	Aceros al níquel		3.5-5.0				
3xxx	Níquel-cromo		1.0-3.5	0.5-1.75			
4xxx	Molibdeno						
40xx	Mo				0.15-0.30		
41xx	Mo, Cr			0.40-1.10	0.08-0.35		
43xx	Mo, Cr, Ni		1.65-2.00	0.40-0.90	0.20-0.30		
44xx	Mo				0.35-0.60		
46xx	Mo, Ni (bajo)		0.70-2.00		0.15-0.30		
47xx	Mo, Cr, Ni		0.90-1.20	0.35-0.55	0.15-0.40		
48xx	Mo, Ni (alto)		3.25-3.75		0.20-0.30		
5xxx	Cromo						
50xx				0.20-0.60			
51xx				0.70-1.15			
6xxx	Cromo, Vanadio						
61xx				0.50-1.10		0.10-0.15	
8xxx	Ni, Cr, Mo						
81xx			0.20-0.40	0.30-0.55	0.08-0.15		
86xx			0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25		
87xx			0.40-0.70	0.40-0.60	0.20-0.30		
88xx			0.40-0.70	0.40-0.60	0.30-0.40		
9xxx	Otro						
92xx	Alto silicio						1.20-2.20 S:
93xx	Ni, Cr, Mo		3.00-3.50	1.00-1.40	0.08-0.15		
94xx	Ni, Cr, Mo		0.30-0.60	0.30-0.50	0.08-0.15		

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- Materials and Processes in Manufacturing  
E. Paul de Garmo  
Collier Macmillan, fifth edition.
- 2.- Metals Handbook  
Vol. 6, Welding and Brazing  
American Society for Metals (ASM).
- 3.- Soldadura y Corte de Metales  
M. Janapétov  
Editorial MIR, Moscú.
- 4.- Soldadura Indirecta de Metales  
N. F. Lashkó  
Editorial MIR, Moscú.
- 5.- Machine Design  
Paul H. Black, O. Eugene Adams Jr.  
Mc Graw Hill.
- 6.- Resistencia de Materiales  
William A. Nash  
Mac Graw Hill.
- 7.- Materiales para Ingeniería  
Van Black  
C.E.C.S.A.
- 8.- Standard Handbook for Mechanical Engineers  
Mc Graw Hill  
Seventh Edition.