

CAPÍTULO IV

Procesos de Unión y Ensamble por Soldadura

4.1. FUNDAMENTOS DE SOLDADURA

La *soldadura* es un proceso de unión permanente de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos (o más) partes mediante la aplicación conveniente de calor, presión o ambas a la vez. La integración de las partes que se unen mediante soldadura se denomina un *ensamble soldado*. En algunos casos se agrega un material de aporte o *relleno* para facilitar la fusión. La soldadura se asocia por lo regular con partes metálicas, pero el proceso también se usa para unir plásticos. Nuestro análisis de la soldadura en presente capítulo se enfocará en la unión de metales.

La soldadura es un proceso relativamente nuevo. Su importancia comercial y tecnológica se deriva de lo siguiente:

- La soldadura proporciona una unión permanente. Las partes soldadas se vuelven una sola unidad.
- La unión soldada puede ser más fuerte que los materiales originales si se usa un metal de relleno que tenga propiedades de resistencia superiores a la de los materiales originales y se emplean las técnicas de soldadura adecuadas.
- En general, la soldadura es la forma mas económica de unir componentes, en términos de uso de materiales y costos de fabricación, los métodos mecánicos alternativos de ensamble requieren alteraciones mas complejas de las formas (por ejemplo, taladrado de orificios) y adición de sujetadores (remaches o tuercas). El ensamble mecánico resultante por lo general es más pesado que la soldadura correspondiente.
- La soldadura no se limita al ambiente de fábrica. Puede realizarse en el campo.

Aunque la soldadura tiene las ventajas indicadas, también tiene ciertas limitaciones y desventajas (o desventajas potenciales):

- La mayoría de las operaciones de soldadura se realizan en forma manual y son elevadas en términos de costo de mano de obra. Muchas operaciones de soldadura se consideran cuestiones especializadas y no son muchas las personas que las realizan.
- Casi todos los procesos de soldadura implican el uso de mucha energía, y por consiguiente son peligrosos.
- Dado que la soldadura obtiene una unión permanente entre los componentes, no permite un desensamble adecuado. Si se requiere un desensamble ocasional de producto (para reparación o mantenimiento), no debe usarse la soldadura como método de ensamble.
- La unión soldada puede padecer ciertos defectos de calidad que son difíciles de detectar. Los defectos pueden reducir la resistencia de la unión.

4.2. CONCEPTOS DE LA TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA

La soldadura implica la fusión o unión de dos partes metálicas en sus superficies empalmantes. Las *superficies empalmantes* son las superficies que están en contacto o están muy cercanas para ser

unidas. Por lo general, la soldadura se realiza en partes del mismo metal, pero es posible usar algunas operaciones para unir metales diferentes.

La American Welding Society (Sociedad Norteamericana de Soldadura) ha Catalogado más de 50 tipos de operaciones distintas que utilizan diversos tipos o combinaciones de energía para proporcionar la energía requerida. Podemos dividir los procesos de soldadura en dos grupos principales: a) soldadura por fusión y b) soldadura de estado sólido.

a) **Soldadura por fusión** Los procesos de *soldadura por fusión* usan calor para fundir los metales base. En muchas operaciones de soldadura por fusión, se añade un metal de aporte a la combinación fundida para facilitar el proceso de unión y aportar volumen y resistencia a la parte soldada. Una operación de soldadura por fusión en la cual no se añade un metal de aporte se denomina soldadura autógena. Las categorías de soldadura por fusión de uso más amplio son:

- *Soldadura con arco eléctrico*, SAE (en inglés AW). La soldadura con arco eléctrico hace referencia a un grupo de procesos de soldadura en los cuales el calentamiento de los metales se obtiene mediante un arco eléctrico, como se muestra en la figura 4.1. Algunas de las operaciones de soldadura con arco eléctrico también aplican presión durante el proceso, y la mayoría utiliza un metal de aporte.
- *Soldadura por resistencia*, SR (en inglés RW). La soldadura por resistencia obtiene la fusión usando el calor de una resistencia eléctrica para el flujo de una corriente que pasa entre las superficies de contacto de dos partes sostenidas juntas bajo presión.
- *Soldadura con oxígeno y gas combustible*. SOGC (en inglés OFW). Estos procesos de unión usan un *gas de oxígeno* combustible, tal como una mezcla de oxígeno y acetileno, con el propósito de producir una flama caliente para fundir la base metálica y el metal de aporte en caso de que se utilice.
- *Otros procesos de soldadura por fusión*. Además de los tipos anteriores hay otros procesos de soldadura que producen la fusión de los metales unidos. Los ejemplos incluyen la *soldadura con haz de electrones* y la *soldadura con rayo láser*.

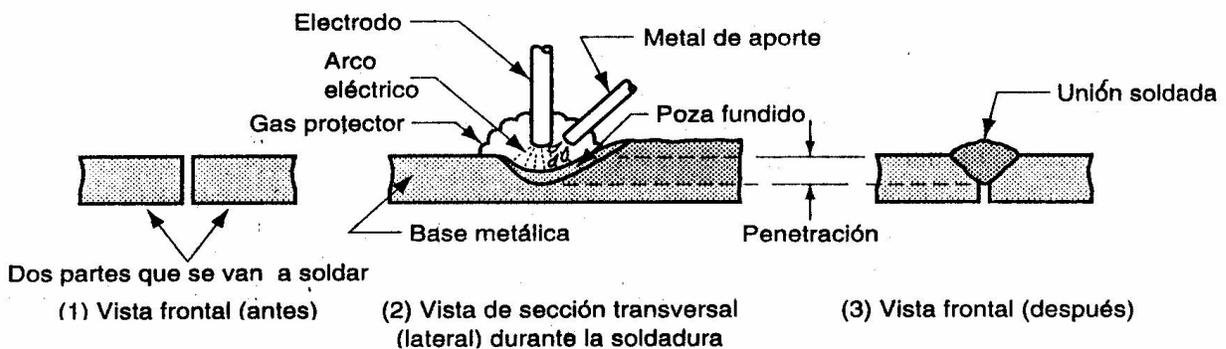


FIGURA 4.1 Fundamentos de la soldadura con arco eléctrico: (1) Antes de la soldadura, (2) Durante la soldadura se funde la base metálica y se agrega el metal de aporte al conjunto fundido y (3) La soldadura terminada. Hay muchas variaciones del proceso de soldadura con arco eléctrico.

b) **Soldadura de estado sólido** Los procesos de *soldadura de estado sólido* usan presión o una combinación de calor y presión. Si se usa calor, la temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar. No se utiliza un metal de aporte en estos procesos. Algunos de los procesos más representativos son :

- *Soldadura por difusión*, SD (en inglés DFW). En la soldadura por difusión, se colocan juntas dos superficies bajo presión a una temperatura elevada y se produce la coalescencia de las partes por medio de fusión de estado sólido.
- *Soldadura por fricción*, SF (en inglés FRW). En este proceso, la coalescencia se obtiene mediante el calor de la fricción entre dos superficies.
- *Soldadura ultrasónica*, SU (en inglés USW). La soldadura ultrasónica se realiza aplicando una presión moderada entre las dos partes y un movimiento oscilatorio a frecuencias ultrasónicas en una dirección paralela a las superficies de contacto. La combinación de las fuerzas normales y vibratorias produce intensas tensiones que remueven las películas superficiales y obtienen la unión atómica de las superficies.

La soldadura tiene sus principales aplicaciones en 1) la construcción por ejemplo. Edificios, puentes, estructuras metálicas, etc.; 2) la producción de tuberías con costura, recipientes para presión, calderas, tanques de almacenamiento, etc.; 3) la construcción naval; 4) la industria de la aeronáutica y espacial; 5) los automóviles y los ferrocarriles. La soldadura se realiza en grandes industrias pero también, por su facilidad de manipulación para de los procesos tradicionales, se lo realiza en distintos lugares (terreno al aire libre un garaje un taller común) y no se limitan a una fabrica.

La cuestión de la seguridad La soldadura es por naturaleza peligrosa para las personas. Quienes ejecutan estas operaciones deben tomar serias medidas de seguridad. Las altas temperaturas de los metales fusionados en la soldadura son un peligro obvio. En la soldadura con gas, los combustibles (por ejemplo, el acetileno) corren el riesgo de incendiarse. Gran parte de los procesos usan mucha energía para producir la fusión de las superficies de las partes que se van, a unir En muchos procesos de soldadura, la corriente eléctrica es una fuente de energía térmica, por lo que existe el riesgo de una descarga eléctrica para el trabajador.

Ciertos procesos de soldadura tienen sus propios peligros particulares. En la soldadura con arco eléctrico, el trabajador debe considerar los siguientes aspectos:

- **Máscara de soldar**, protege los ojos, la cara, el cuello y debe estar provista de filtros inactínicos de acuerdo al proceso e intensidades de corriente empleadas.
- **Guantes de cuero**, tipo mosquetero con costura interna, para proteger las manos y muñecas.
- **Coletos o delantal de cuero**, para protegerse de salpicaduras y exposición a rayos ultravioletas del arco.
- **Polainas y casaca de cuero**, cuando es necesario hacer soldadura en posiciones verticales y sobre cabeza, deben usarse estos aditamentos, para evitar las severas quemaduras que puedan ocasionar las salpicaduras del metal fundido.

- **Zapatos de seguridad**, que cubran los tobillos para evitar el atrape de salpicaduras.
- **Gorro**, protege el cabello y el cuero cabelludo, especialmente cuando se hace soldadura en posiciones.
- **Protección de la vista** La protección de la vista es un asunto tan importante que merece consideración aparte. El arco eléctrico que se utiliza como fuente de calor y cuya temperatura alcanza sobre los 4.000° C, desprende radiaciones visibles y no visibles. Dentro de las no visibles, tenemos aquellas de efecto más nocivo como son los rayos ultravioletas e infrarrojos. El tipo de quemadura que el arco produce en los ojos no es permanente, aunque sí es extremadamente dolorosa. Su efecto es como “tener arena caliente en los ojos”. Para evitarla, debe utilizarse un lente protector (vidrio inactínico) que ajuste bien y, delante de éste, para su protección, siempre hay que mantener una cubierta de vidrio transparente, la que debe ser sustituida inmediatamente en caso de deteriorarse. A fin de asegurar una completa protección, el lente protector debe poseer la densidad adecuada al proceso e intensidad de corriente utilizada.

La automatización en la soldadura Debido a los riesgos de la soldadura manual y los requerimientos de aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos, se han desarrollado diversas formas de automatización. Las categorías incluyen la soldadura con máquina, la soldadura automática y la soldadura robótica.

La *soldadura con máquina* se define como una soldadura mecanizada con equipo que realiza la operación bajo la supervisión continua de un operador. Normalmente se obtiene mediante una cabeza para soldadura que se mueve por medios mecánicos. El trabajador humano debe observar continuamente e interactuar con el equipo para controlar la operación.

Si el equipo es capaz de ejecutar la operación sin el ajuste de los controles por parte de un operador humano, se denomina una *soldadura automática*. Una persona siempre está presente para vigilar el proceso y detectar variaciones de las condiciones normales. Lo que distingue la soldadura automática de la soldadura con máquina es un controlador del ciclo de soldadura, que regula el movimiento del arco eléctrico y la posición de la pieza de trabajo sin atención humana continua. La soldadura automática requiere una instalación o un posicionador de soldadura para colocar el material de trabajo en relación con la cabeza de soldador. También requiere en mayor grado de consistencia y precisión en las partes componentes usadas en el proceso. Por estas razones, la soldadura automática sólo se justifica para producción de cantidades grandes.

En la *soldadura robótica* se usa un robot industrial o un manipulador programable que controla en forma automática el movimiento de la cabeza para soldar con respecto al trabajo. El alcance versátil del brazo del robot permite el uso de instalaciones relativamente simples, y la capacidad del robot para reprogramarse con nuevas configuraciones de las partes, permite que esta forma de automatización se justifique para cantidades de producción relativamente bajas. Una celda robótica de soldadura con arco eléctrico normal consta de dos instalaciones para soldadura y un ajustador humano para cargar y descargar partes mientras el robot efectúa la soldadura. Además de la soldadura con el arco eléctrico,

también se usan robots industriales en las plantas de ensamble final de automóviles para realizar soldadura por resistencia sobre carrocerías.

4.2.1. LA UNIÓN POR SOLDADURA

La soldadura produce una unión sólida entre dos partes. En esta sección, se examinará el tema de las uniones por soldadura, los tipos de uniones y los diferentes tipos de soldaduras que se usan para unir las partes.

4.2.1.1. Tipos de uniones

Hay cinco tipos básicos de uniones para integrar dos partes de una junta. De acuerdo con la figura 4.2 se definen del modo siguiente:

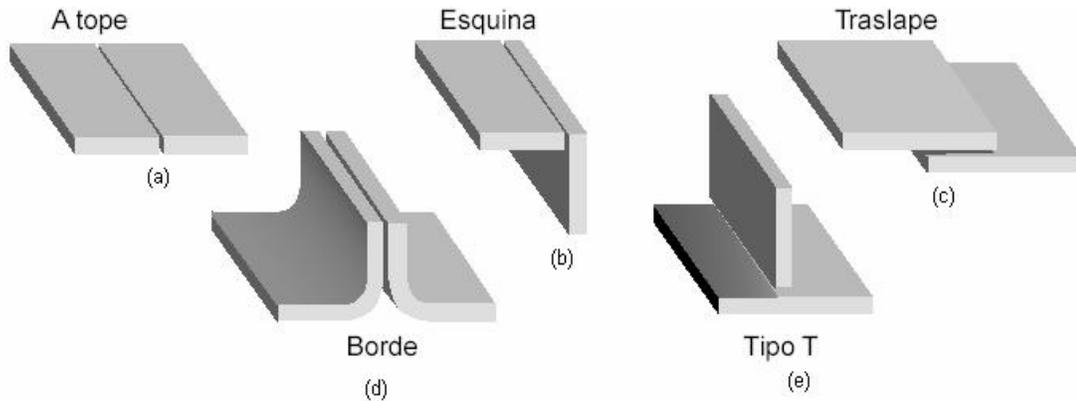


FIGURA 4.2. Cinco tipos básicos de uniones I: a) empalmada, b) de esquina, c) superpuesta, d) de borde y e) en T

- Unión empalmada.* En este tipo de unión, las partes se encuentran en el mismo plano y se unen en sus bordes.
- Unión de esquina.* Las partes en una unión de esquina forman un ángulo recto y se unen en la esquina del ángulo.
- Unión superpuesta.* Esta unión consiste en dos partes que se superponen.
- Unión de bordes.* Las partes en una unión de bordes están paralelas con al menos uno de sus bordes en común y la unión se hace en el borde común.
- Unión en T.* En la unión en T, una parte es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra T.

4.2.1.2. Tipos de soldaduras

Todas las uniones anteriores se hacen mediante soldadura. También es posible usar otros procesos para algunos de los tipos de uniones, pero la soldadura es el método de mayor aplicación. Es

conveniente distinguir entre el tipo de unión y el tipo de soldadura que se aplica a la unión. Las diferencias entre los tipos de soldadura están en la geometría y el proceso de soldadura.

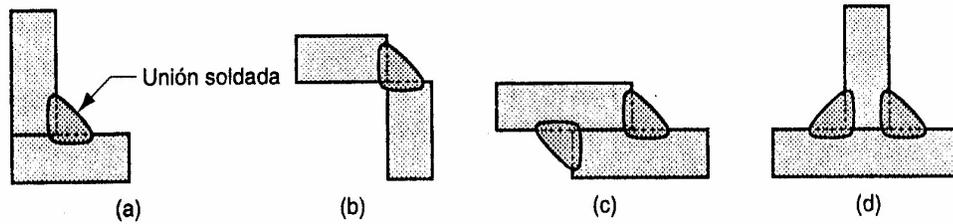


FIGURA 43 Diversas formas de soldadura de filete: a) unión de esquina con filete interno único, b) unión de esquina con filete externo único, c) unión sobrepuesta con filete doble, y d) unión en T con filete doble. Las líneas con guiones muestran los bordes originales de las placas.

Se usa una soldadura de filete para rellenar los bordes de las placas creadas mediante uniones de esquina, sobrepuestas y en 'T', igual que en la figura 4.3. Se usa un metal de relleno para proporcionar una sección transversal de aproximadamente la forma de un triángulo. Es el tipo de soldadura más común en la soldadura con arco eléctrico y en la de oxígeno y gas combustible. Porque requiere una mínima preparación de los bordes; se usan los bordes cuadrados básicos de las partes. Las soldaduras de filete pueden ser sencillas o dobles (esto es, soldarse en uno o ambos lados) y continuas o intermitentes (esto es, soldadas a lo largo de toda la longitud de la unión, o con espacio sin soldar a lo largo de una orilla).

Las soldaduras *con bisel o ranura* generalmente requieren que se moldeen las orillas de las partes con un bisel para facilitar la penetración de la soldadura. Las formas de bisel incluyen un cuadrado en un lado, bisel en "V", en U y en J, en lados sencillos o dobles, como se muestra en la figura 4.4.

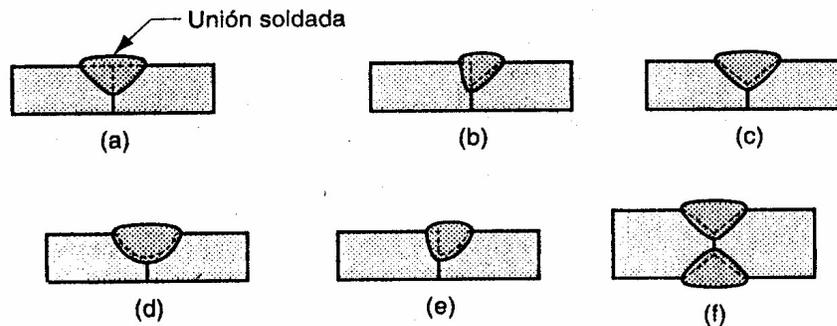


FIGURA 4.4 Algunas soldaduras con bisel típicas: a) soldadura con bisel cuadrado en un lado; b) soldadura con bisel único; c) soldadura con bisel en V único; d) soldadura con bisel en U único; e) soldadura con bisel en J único; f) soldadura con surco en X para secciones más gruesas. Las líneas con guiones muestran los bordes originales de las partes.

Se usa material de relleno para saturar la unión, por lo general mediante soldadura con arco eléctrico o con oxígeno y gas combustible. Con frecuencia se preparan los bordes de las partes más allá de un cuadrado básico, aunque se requiera de un procesamiento adicional, para aumentar la firmeza de la unión soldada o donde se van a soldar partes más gruesas. Aunque se asocia más estrechamente con una unión empalmada, la soldadura con bisel se usa en todos los tipos de uniones, excepto en la sobrepuesta.

Las soldaduras *con insertos* y *las soldaduras ranuradas*, se usan para unir placas planas, como se muestra en la figura 4.5, usando una o más huecos o ranuras en la parte superior, que después serán rellenados con metal de aporte.

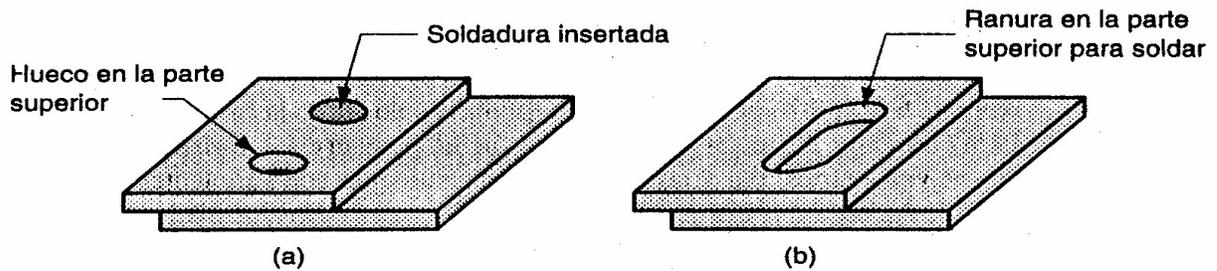


FIGURA 4.5 (a) Soldadura con inserto y (b) soldadura en ranura.

La soldadura de puntos y la soldadura engargolada, usadas para uniones sobrepuestas. Se muestran en la figura 4.6. Una *soldadura de puntos* es una pequeña sección fundida entre las superficies de dos chapas o placas. Normalmente se requieren varias soldaduras de puntos para unir las partes. Se asocia más estrechamente con la soldadura por resistencia. Una *soldadura engargolada* es similar a una de puntos, excepto que consiste en una sección fundida más o menos continua entre las dos chapas o placas.

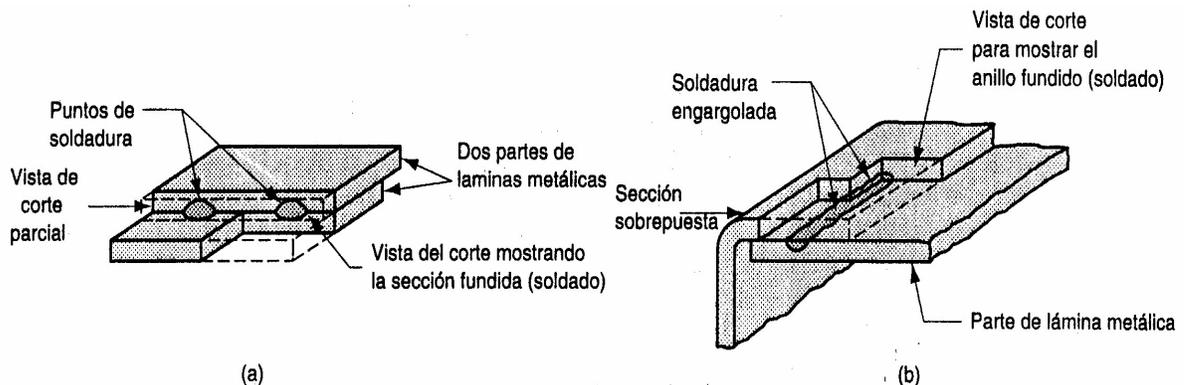


FIGURA 4.6 (a) Soldadura de puntos y (b) soldadura engargolada

La figura 4.7 muestra soldaduras en flancos y soldaduras en superficies. Una *soldadura en flanco* se hace en los bordes de dos (o más) partes, por lo general láminas metálicas o placas delgadas, en

donde al menos una de las partes está en un flanco, como se aprecia en la parte (a). Una *soldadura en superficie* no se usa para unir partes, sino para depositar metal de relleno sobre la superficie de una parte base en una o más gotas de soldadura, las gotas de soldadura se incorporan en una serie de pasadas paralelas sobrepuestas, con lo que se cubren grandes áreas de la parte base. El propósito es aumentar el grosor de la placa o proporcionar un recubrimiento protector sobre la superficie.

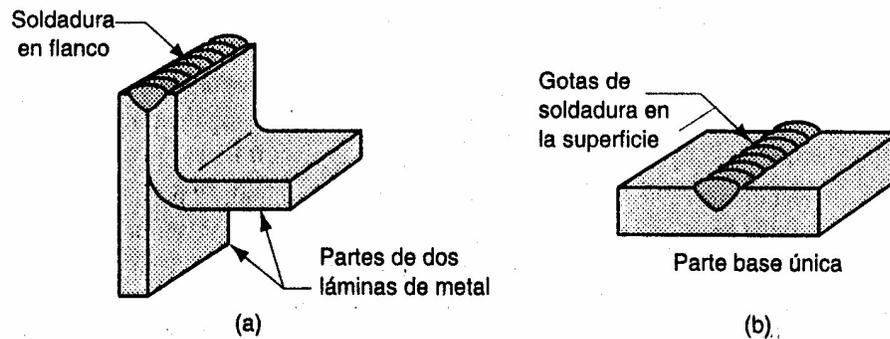


Figura 4.7 (a) Soldadura en flanco y (b) Soldadura en superficie

4.2.2. LA FÍSICA DE LA SOLDADURA

Aunque hay varios mecanismos para fundir la soldadura, la fusión es por mucho el medio más común. Para conseguir la fusión, se aplica una fuente de energía calorífica de alta densidad a las superficies que se van a empalmar y las temperaturas resultantes son suficientes para producir la fusión localizada de los metales base. Si se agrega un metal de aporte, la densidad calorífica debe ser suficientemente alta para fundirlo también. La densidad calorífica se define como la energía transferida al trabajo por unidad de área de superficie, esto es, W/mm^2 . El tiempo para fundir el metal es inversamente proporcional a la densidad de la potencia. A bajas densidades de potencia, se requiere una gran cantidad de tiempo para producir la fusión. Si la densidad de energía es demasiado baja, el calor se conduce a las partes de trabajo tan rápidamente como se transmite a la superficie y nunca ocurre la fusión. Se ha encontrado que la mínima densidad de energía requerida para fundir la mayoría de los metales en la soldadura es de aproximadamente $10 W/mm^2$. Conforme aumenta la densidad calorífica, se reduce el tiempo de fusión. Si la densidad de energía es demasiado alta, un poco arriba de $10^5 W/mm^2$, las temperaturas localizadas vaporizan el metal en la región afectada. Por tanto, hay un rango de valores prácticos para la densidad de energía, dentro del cual puede ejecutarse la soldadura. Las diferencias entre los procesos de soldadura en este rango son: 1) la velocidad a la que se ejecuta la soldadura ó 2) el tamaño de la región que puede soldarse. La tabla 4.1 proporciona una comparación de la densidad de energía para los grupos principales de procesos de soldadura por fusión (además de dos operaciones con densidad de energía muy alta).

TABLA 4.1 Comparación de varios procesos de soldadura por fusión con base en sus densidades de potencia.

Proceso de soldadura	Densidad de energía W/mm ²
Soldadura con oxígeno y gas combustible	(10)
Soldadura con arco eléctrico	(50)
Soldadura por resistencia	(1000)
Soldadura con rayo láser	(9000)
Soldadura con haz de electrones	(10000)

La soldadura con oxígeno y gas combustible es capaz de desarrollar grandes cantidades de calor, pero la densidad de calor es relativamente baja debido a que se extiende sobre un área grande. El gas oxiacetileno, el más caliente de los combustibles para soldadura con oxígeno y gas combustible, arde a una temperatura máxima de alrededor de 3500 °C. En comparación, la soldadura con arco eléctrico produce alta energía sobre un área más pequeña, lo que genera temperaturas locales de 5500 a 6600 °C. Por razones metalúrgicas, es conveniente fundir metales con el mínimo de energía y en general se prefieren las densidades caloríficas altas.

La densidad de energía se calcula como la potencia que entra a la superficie dividida por el área superficial correspondiente:

$$PD = \frac{P}{A} \quad 4.1$$

Donde:

PD = Densidad de energía, en W/mm²;

P = Potencia que entra a la superficie, en W;

A = Área superficial por la que entra energía, en mm².

La cuestión es más complicada de lo que indica la ecuación (4.1). Una dificultad es que la fuente de energía (por ejemplo, el arco eléctrico) se mueve en muchos procesos de soldadura, lo que produce un calentamiento antes de la operación y un calentamiento después de ella. Otra complicación es que la densidad de energía no es uniforme por toda la superficie afectada; se distribuye como una función del área, como se demuestra mediante el ejemplo siguiente.

EJEMPLO 4.1 Densidad de energía en la soldadura

Una fuente de calor es capaz de transferir 3000 [W] a la superficie de una parte metálica. El calor afecta la superficie en un área circular, con intensidades variables dentro de ésta. La distribución es la siguiente: 70% de la energía se transfiere dentro de un círculo con un diámetro = 5 [mm]. y el 90% se transfiere dentro de un círculo concéntrico con un diámetro = 12. [mm]. ¿Cuáles son las densidades de energía en:

a) el círculo interno de 5 [mm] de diámetro y b) el anillo con un diámetro de 12.[mm] que se encuentra alrededor del círculo interno?

Solución: a) El círculo interno tiene un área de:

$$A = \frac{\pi(5)^2}{4} = 19.635 \text{ mm}^2$$

La energía dentro de esta área $P = 0,70 \cdot 3000 = 2100$ [W]. Por tanto, la densidad de energía $PD = 2100/19.635 = 106.952$ [W/mm²]. b) El área del anillo fuera del círculo interno es:

$$A = \frac{\pi(12^2 - 5^2)}{4} = 93.46 \text{ mm}^2$$

La energía en esta región $P = 0.9 \cdot 3000 - 2100 = 600$ [W]. Por tanto, la densidad de energía $PD = 600/93.46 = 6.42$ [W/mm²]

Observación: La densidad de energía parece lo suficientemente alta para fundir en el círculo interno, pero es probable que no sea suficiente en el anillo que se encuentra fuera del círculo interno.

TABLA 4.2 Temperaturas de fusión sobre la escala de Temperatura absoluta de metales seleccionados

Metal	Temperatura de Fusión °K ^b
Aleaciones de aluminio	(930)
Hierro fundido	(1530)
Cobre y aleaciones	
Puro	(1350)
Latón	(1160)
Bronce	(1120)
Inconel	(1660)
Magnesio	(940)
Níquel	(1720)
Aceros	
Al bajo carbono	(1760)
Al medio carbono	(1700)
Al alto carbono	(1650)
Aleación baja	(1700)
Aceros inoxidables	
Austenítico	(1670)
Martensítico	(1700)
Titanio	(2070)

^b Escala Kelvin = temperatura Celsius (centígrados) + 273.

La cantidad de calor requerido para fundir un cierto volumen de metal es la suma de 1) el calor para elevar la temperatura del metal sólido a su punto de fusión, la cual depende del calor específico volumétrico del metal y 2) el calor para transformar el metal de la fase sólida a líquida en el punto de fusión, el cual depende de la temperatura de fusión del metal. Para una aproximación razonable, esta cantidad de temperatura puede estimarse mediante

$$U_m = KT_m^2 \quad 4.2$$

Donde:

U_m = la energía unitaria para fundir, la cantidad de calor requerida para fundir una unidad de volumen de metal, empezando a temperatura ambiente, en J/mm^3 ;

T_m = punto de fusión del metal en una escala de temperatura absoluta, (K); $K = 3.33 \times 10^{-6}$ cuando se usa la escala Kelvin. Las temperaturas de fusión absoluta para los metales seleccionados se presentan en la tabla 4.2.

No toda la energía que ingresa se usa para fundir el metal soldado. Hay dos mecanismos de transferencia de calor en las partes que se sueldan y ambos reducen la cantidad de calor disponible para el proceso de soldadura. El primer mecanismo es la transferencia de calor entre la fuente de calor y la superficie de trabajo. Este proceso tiene cierta *eficiencia, de transferencia de calor* f_1 definida como la razón del calor real que recibe la pieza de trabajo por el calor total que genera la fuente. El segundo mecanismo implica la conducción del calor lejos del área de soldadura para disiparse a través del metal de trabajo, por lo que sólo una porción del calor transferido a la superficie está disponible para fusión. Esta *eficiencia de fusión* f_2 es la proporción del calor que recibe la superficie de trabajo que puede usarse para fusión. El efecto combinado de estas dos eficiencias reduce la energía calorífica disponible para soldadura del modo siguiente:

$$H_w = f_1 f_2 H \quad 4.3$$

Donde:

H_w = calor neto disponible para soldadura, en J;

f_1 = eficiencia de transferencia de calor;

f_2 = eficiencia de fusión;

H = calor total generado por el proceso de soldadura, en J.

Es conveniente separar los Conceptos para f_1 y f_2 , aun cuando actúen juntos durante el proceso de soldadura. La eficiencia de transferencia de calor f_1 se determina en gran parte por el proceso de soldadura y la capacidad de convertir la fuente de energía (por ejemplo, energía eléctrica) en un calor utilizable en la superficie de trabajo. A este respecto, los procesos de soldadura con oxígeno y gas combustible son relativamente poco eficientes, en tanto que los procesos de soldadura con arco eléctrico son bastante eficientes.

La eficiencia de fusión f_2 depende del proceso de soldadura, pero también influyen en ella las propiedades térmicas del metal, la configuración de la unión y el grosor de la pieza. Los metales con alta conductividad térmica, como el aluminio y el cobre. Representan un problema para la soldadura, debido a la rápida disipación del calor en el momento de hacer contacto, con el área de trabajo. El problema aumenta con las fuentes caloríficas para soldadura que poseen bajas densidades de energía (por ejemplo, la soldadura con oxígeno y gas combustible), debido a que al ingresar el calor se extiende sobre un área más grande, lo que facilita la conducción dentro de la pieza. En general, una fuente de calor para soldadura de alta intensidad combinada con un material de trabajo de baja conductividad produce una alta eficiencia de fusión.

Ahora podemos escribir una ecuación de equilibrio entre el ingreso de energía y la energía necesaria para soldar:

$$H_w = U_m V \quad 4.4$$

Donde:

H_w = energía calorífica neta transmitida para la operación, en J;
 U_m = energía unitaria requerida para fundir el metal, en J/mm³; y
 V = volumen de metal fundido, en mm³.

La mayoría de las operaciones de soldadura son procesos de velocidad; esto es, la energía calorífica neta H_w se proporciona a cierta velocidad y la gota de soldadura se forma a cierta velocidad de viaje. Por ejemplo, esto es característico de la mayoría de las operaciones de soldadura con arco eléctrico y muchas de las actividades de soldadura con oxígeno y gas combustible. Por tanto, es conveniente expresar la ecuación (4.4) en forma de una ecuación de equilibrio de velocidad:

$$HR_w = U_m WVR \quad 4.5$$

Donde:

HR_w = velocidad de energía calorífica proporcionada para la operación, en W;
 WVR = razón de volumen de metal soldado, en mm³/seg.

En la soldadura de una gota continua, la rapidez volumétrica del metal soldado es el producto de área de soldadura A_w y la velocidad de viaje v . Sustituyendo estos términos en la ecuación (4.5), la ecuación de equilibrio de la rapidez puede expresarse como:

$$HR_w = f_1 f_2 HR = U_m A_w v \quad 4.6$$

Donde:

f_1 y f_2 son las eficiencias de transferencia de calor y de fusión;
 HR = velocidad de ingreso de energía generada por la fuente de energía para soldadura, en W;
 A_w = área de la sección transversal de la soldadura, en mm²;
 v = velocidad de viaje de la operación de soldadura, en mm/seg.

EJEMPLO 4.2 Velocidad de viaje en soldadura

La fuente de energía en una instalación para soldadura particular es capaz de generar 2000 [w], que pueden transferirse a la superficie de trabajo con una eficiencia $f_1 = 0.7$. El metal que se va a soldar es de acero al bajo carbono, cuya temperatura de fusión, tomada de la tabla 4.2, es $T_m = 1760$ °K. La eficiencia de fusión en la operación es $f_2 = 0.5$. Se realizará una soldadura de filete continua con un área de sección transversal $A_w = 20$ mm². Determine la velocidad de viaje a la cual puede realizarse la operación de soldadura.

Solución: Primero encontremos la unidad de energía requerida para fundir el metal U_m a partir de la ecuación (4.2).

$$U_m = 3.33 \cdot 10^{-6} \cdot 1760^2 = 10.315 \text{ J/mm}^3$$

Si reordenamos la ecuación (4.6) para solucionar la velocidad de viaje, tenemos:

$$v = \frac{f_1 f_2 HR}{U_m A_w}$$

Y si resolvemos para las condiciones del problema,

$$v = \frac{0.7 \cdot 0.5 \cdot 2000}{10.315 \cdot 20} = 3.39 \text{ mm/s}$$

En este capítulo examinamos cómo se generan la densidad de energía en la ecuación (4.1) y la velocidad de ingreso de energía para la ecuación (4.6) para algunos de los procesos de soldadura individuales.

4.2.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA JUNTA SOLDADA POR FUSIÓN

La mayoría de la uniones de soldadura consideradas anteriormente son fusiones soldadas como se ilustra en la sección transversal de la figura 4.8(a), una junta soldada por fusión común a la cual se ha agregado un metal de aporte, consta de varias zonas: 1) zona de fusión, 2) interfase de soldadura, 3) zona afectada por el calor y 4) zona de metal base no afectada.

La zona *de fusión* consiste en una mezcla de metal de aporte y de metal base que se ha fundido por completo. Esta zona se caracteriza por un alto grado de homogeneidad entre los metales componentes que se han fundido durante la soldadura. El motivo principal por el que se mezclan estos componentes es la convección que se suscita en el pozo de soldadura fundida. La solidificación en la zona de fusión se asemeja a un proceso de fundición. En la soldadura el molde se forma por medio de los bordes o superficies no fundidos de los componentes que se están soldando. La diferencia significativa entre la solidificación en fundición y la soldadura es que en esta última ocurre un crecimiento de grano epitaxial. El lector debe recordar que durante la fundición se forman granos metálicos a partir de la fusión, mediante la enucleación de partículas sólidas en la pared de fusión, seguida por el crecimiento del grano. En contraste, en el proceso de soldadura se evita la etapa de nucleación a través del mecanismo de *crecimiento de grano epitaxial*, en el cual los átomos del pozo fundido se solidifican sobre los sitios reticulares preexistentes de la base metálica sólida adyacente. En consecuencia, la estructura

del grano en el área de fusión cerca de la zona afectada por calor tiende a imitar la orientación cristalográfica de la zona afectada por calor circundante. Más hacia el centro de la zona de fusión se desarrolla una orientación preferencial, en la cual los granos están aproximadamente perpendiculares a los límites de interfase de la soldadura. La estructura resultante en la zona de fusión solidificada tiende a presentar granos columnares burdos, como lo muestra la figura 4.8 (b). La estructura del grano depende de varios factores que incluyen el proceso de soldadura, los metales que se sueldan (por ejemplo, metales idénticos contra metales diferentes), si se utiliza un metal de aporte y la velocidad de alimentación a la que se obtiene la soldadura. Un análisis detallado de la metalurgia de soldadura está más allá del alcance de este texto, pero los lectores interesados pueden consultar varias de las referencias.

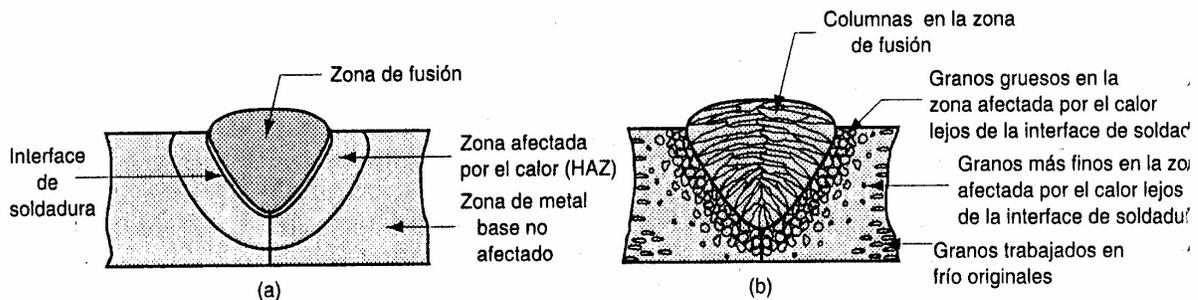


Figura 4.8 Sección transversal de una junta soldada por fusión común.

La segunda zona en la unión soldada es la *interfase de soldadura*, un estrecho límite que separa la zona de fusión de la zona afectada por el calor. La interfase consta de una banda completa y delgada de metal base fundido o parcialmente fundido durante el proceso de fusión (el fundido se localiza dentro de los granos), el cual se ha solidificado inmediatamente después, antes de mezclarse con el metal en la zona de fusión. Por tanto, su composición química es idéntica a la del metal base.

La tercera zona en la soldadura por fusión común es la *zona afectada por el calor* (en inglés HAZ). En esta zona, el metal ha experimentado temperaturas menores a su punto de fusión aunque lo suficientemente altas para producir cambios micro estructurales en el metal sólido.

La composición química en la zona afectada por el calor es igual a la del metal base, pero esta zona ha sido tratada con calor debido a las temperaturas de soldadura, por lo que se han alterado sus propiedades y estructura. La cantidad de daño metalúrgico en la HAZ depende de factores tales como la cantidad de calor que ha ingresado y la máxima temperatura alcanzada, la distancia de la zona de fusión, el intervalo de tiempo al que ha estado sujeto el metal a altas temperaturas, la velocidad de enfriamiento y las propiedades térmicas del metal. El efecto sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor por lo general es negativo y en esta región con frecuencia ocurren fallas en la junta soldada.

Conforme aumenta la distancia de la zona de fusión, se alcanza por fin la *zona de metal base no afectada*, en la cual no ha ocurrido un cambio metalúrgico. No obstante, es probable que el metal base que rodea la HAZ presente un estado de alta tensión residual, producido por la contracción en la zona de fusión.