



Procesos de unión

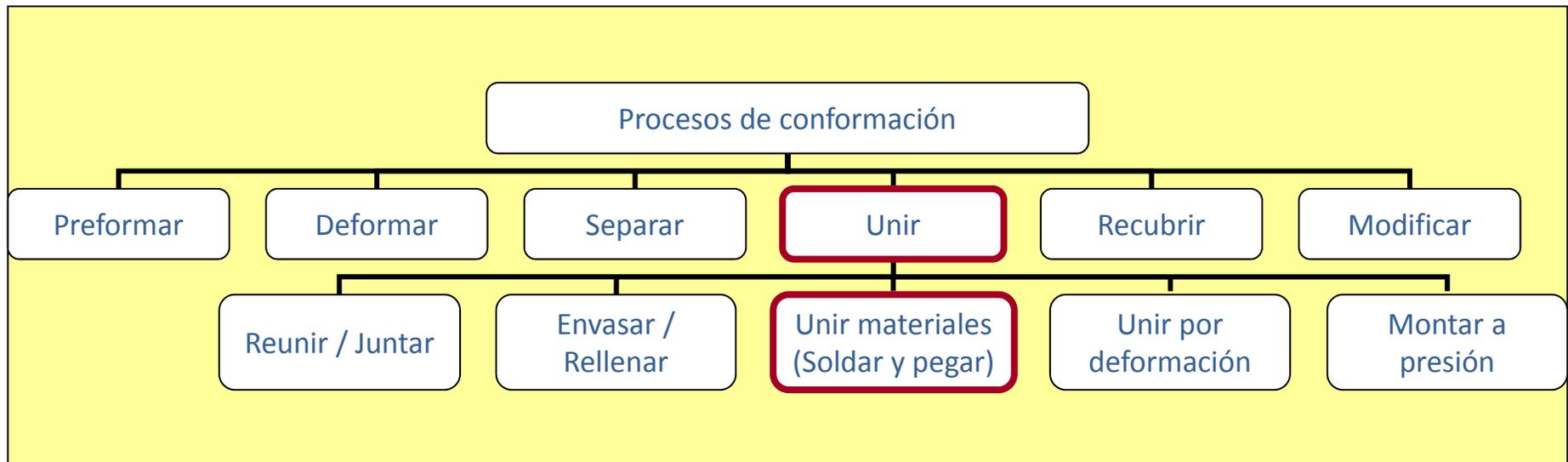


Jesús Velázquez Sancho



Clasificación

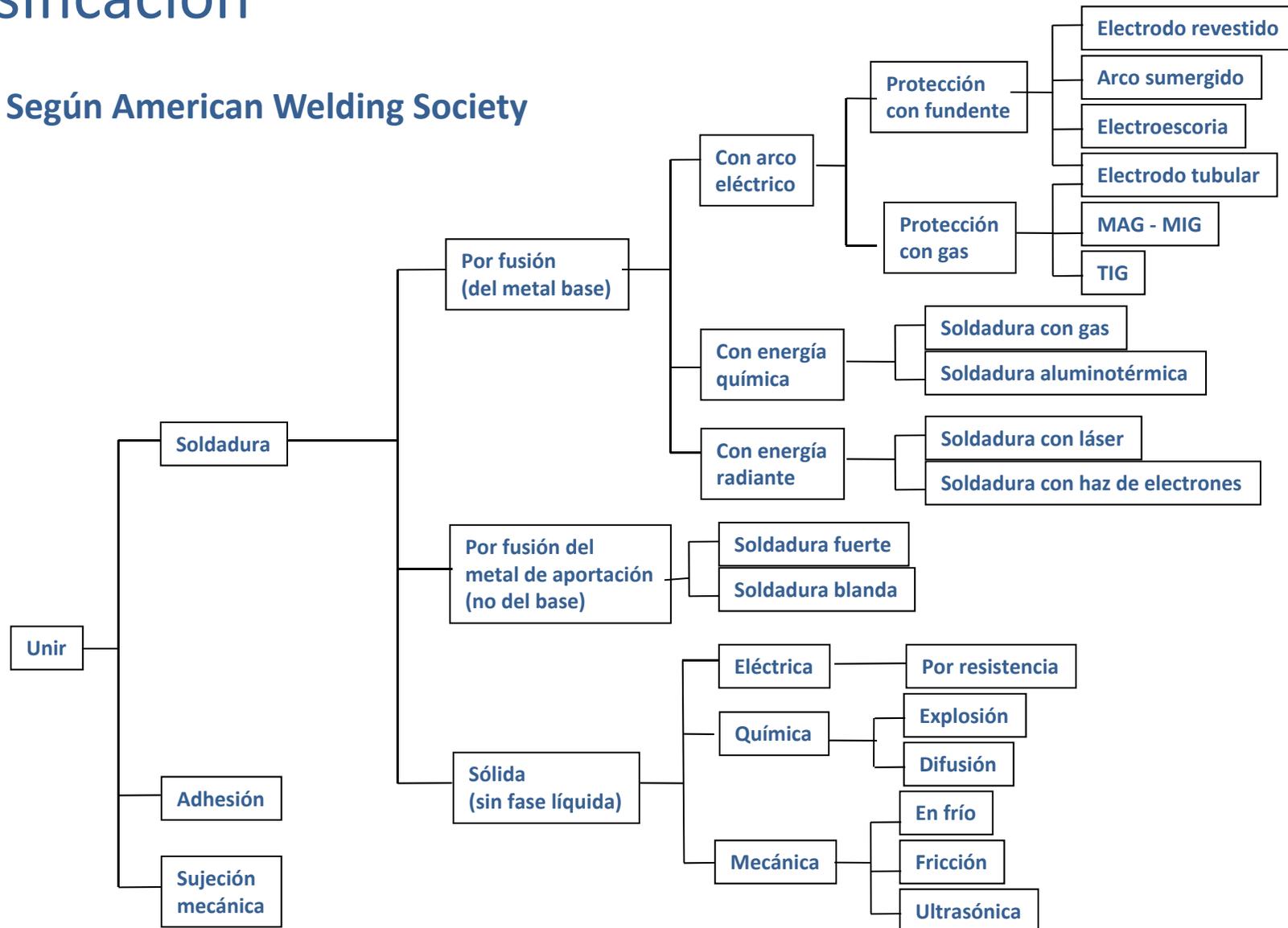
Según DIN 8580





Clasificación

Según American Welding Society





Índice

1. Introducción
2. Uniones soldadas
 - Tipos de uniones soldadas
 - Tipos de soldaduras
 - Diseño de la unión soldada
 - Zonas de la unión soldada
3. Características del proceso de soldadura
 - Soldabilidad
 - Física de la soldadura
4. Calidad de la soldadura
 - Defectos
 - Técnicas de inspección
5. Selección del proceso

1. Introducción

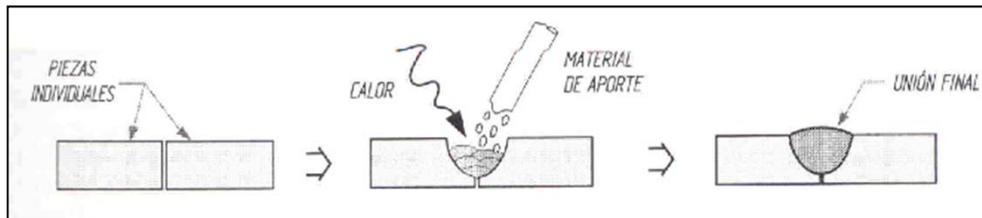
Soldadura:

Unión de dos piezas metálicas (aunque también puede aplicarse a plásticos) llevada a cabo por medio de calentamiento, rozamiento o presión entre ellas y la aportación o no de metal, pudiendo ser las piezas del mismo material o de distintos.

Elementos:

Metal base: material que va a ser sometido a cualquier operación de soldeo.

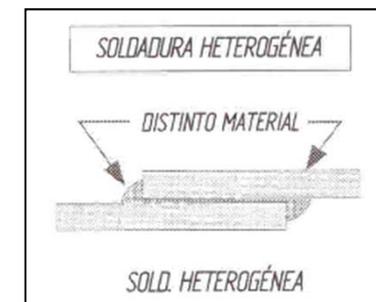
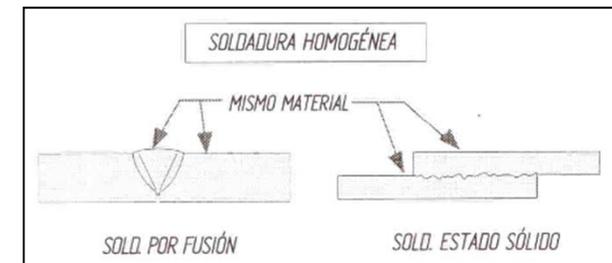
Metal de aportación: material que se aporta para poder unir las piezas.



Si estos materiales son iguales se dice que la soldadura es **homogénea** y, si son diferentes, que es **heterogénea**.

Soldadura homogénea: por fusión (del metal base) o en estado sólido (fuerte compresión de ambas piezas → activación de fuerzas moleculares entre los átomos).

Soldadura heterogénea: por fusión del material de aporte.

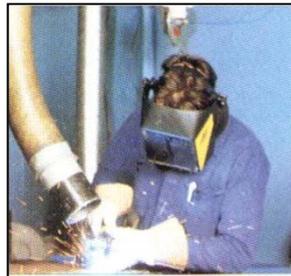




1. Introducción

Ventajas:

- La soldadura proporciona una unión permanente: las piezas soldadas se vuelven una sola unidad.
- La unión soldada puede tener mejores propiedades mecánicas que los materiales base utilizando un material de aporte y empleando técnicas de soldadura adecuadas.
- Es la forma más económica de unir componentes, en términos de materiales y equipos.
- Puede realizarse en el exterior mediante el uso de equipos portátiles.



Inconvenientes:

- Muchas operaciones de soldadura se realizan de forma manual y por operarios muy especializados → altos costes de mano de obra.
- Alto consumo energético.
- Procesos peligrosos → muy importantes las medidas y el uso de equipo de seguridad (para evitar los humos, las radiaciones luminosas del arco, las descargas eléctricas, explosiones e incendiosetc.).
- Unión permanente → no permite una separación adecuada y fácil.
- Aparecen defectos difíciles de detectar.
- Posibles deformaciones debidas a la dilatación térmica.



1. Introducción

Una soldadura ideal es aquella en la que existe una continuidad total entre las piezas unidas y en la que sólo se distingue una única parte.

Aunque en la práctica no es posible alcanzar este ideal, existen muchos procedimientos que prestan un servicio satisfactorio.

Condiciones que debe cumplir cualquier proceso de soldadura:

- Un aporte de energía (calor, presión) para crear la unión.
- Un mecanismo para eliminar la contaminación de las superficies a unir y mantenerlas libres de óxidos u otros contaminantes.
- Protección contra la contaminación de la atmósfera o sus defectos.
- $T^a \uparrow \rightarrow$ Oxidación metales $\uparrow \rightarrow$ Necesidad de aislar la zona de soldadura de la atmósfera \rightarrow 2 medios de protección.
 - Material fundente \rightarrow escoria protectora.
 - Gases protectores.
- Control metalúrgico de la soldadura.

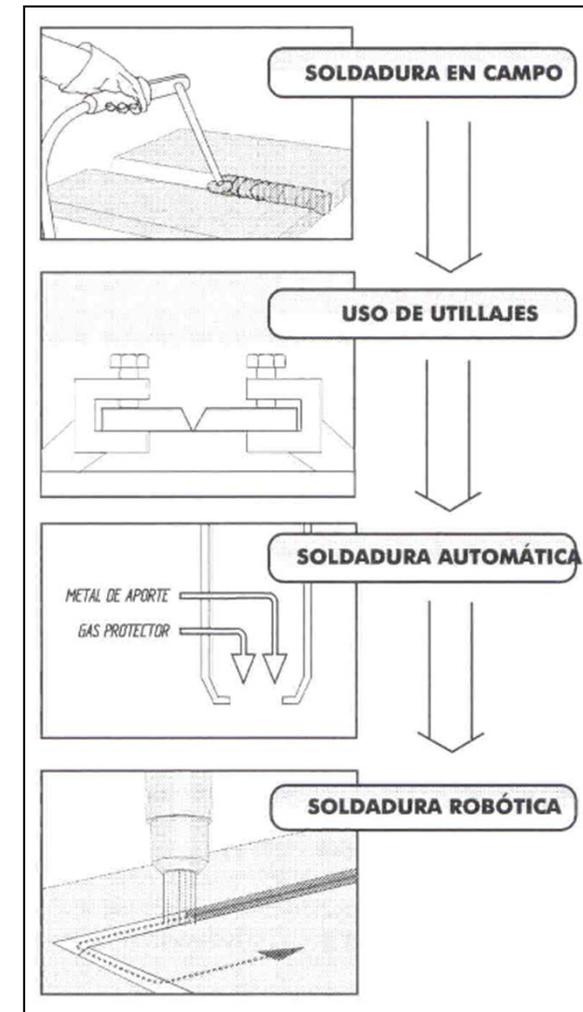




1. Introducción

Aspectos prácticos de la soldadura:

- Puede realizarse en campo, pero es más preciso y seguro en **naves o talleres** especializados.
- Es muy aconsejable el uso de **utillajes** de sujeción de las piezas.
- Se han desarrollado **máquinas** que automatizan procesos internos en algunos de los tipos de soldadura (activación del arco eléctrico, mezcla de gases de combustión, inyección de gases protectores, etc.) y ajustan sus valores en función de las condiciones instantáneas.
- **Soldadura robótica**: un robot controla automáticamente la posición de la herramienta de soldadura. Permite ser programado para distintas configuraciones de piezas y puntos de soldadura.

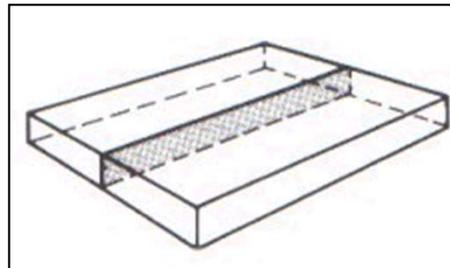




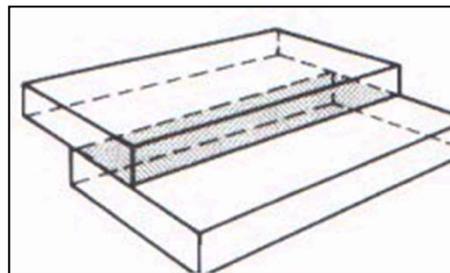
2. Uniones soldadas: Tipos de uniones

Hay cinco tipos básicos de uniones en función de la disposición de las piezas :

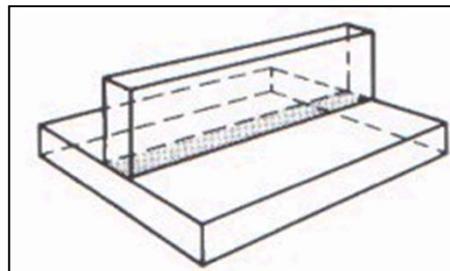
Unión a tope: las partes se encuentran en el mismo plano y se unen en sus bordes.



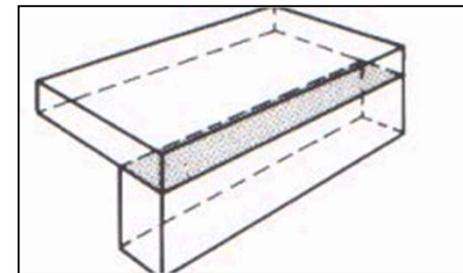
Unión a solape: las dos partes se superponen



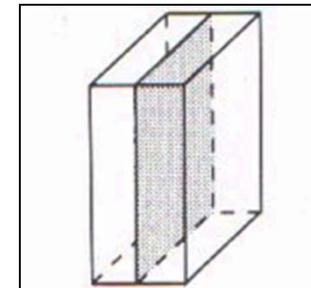
Unión en T: una parte es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra T.



Unión en esquina: las partes forman un ángulo recto y se unen en la esquina del ángulo.



Unión de bordes: las partes están paralelas con al menos uno de sus bordes en común y la unión se hace en el borde común.

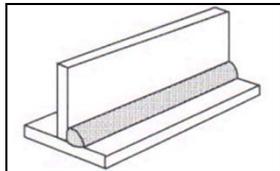
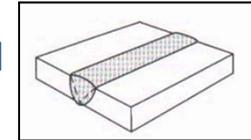




2. Uniones soldadas: Tipos de soldaduras

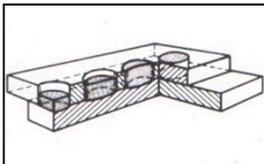
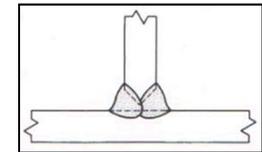
En función de la forma del cordón de soldadura (profundidad de la soldadura, resistencia final que se precise, nivel de preparación de las piezas):

Soldadura a tope: realizadas sobre uniones a tope, independientemente de la forma del chaflán



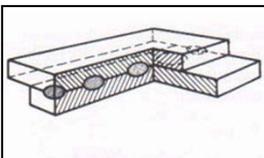
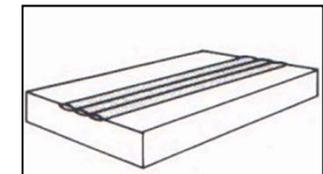
Soldadura en ángulo: une dos superficies que forman entre si un ángulo aproximadamente recto en una unión en T, a solape o a esquina. Los cantos de las piezas a unir deben ser planos.

Soldadura en ángulo con chaflán: una de las piezas sobre la que se realiza la soldadura tiene los bordes preparados, para facilitar la penetración.



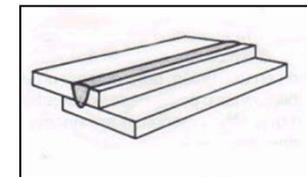
Soldadura de tapón y en ojal: son dos técnicas muy similares en diseño, pero diferentes en forma. En ambos casos se realiza un taladro en una de las piezas a unir.

Soldadura de recargue: se efectúa sobre una superficie para obtener unas dimensiones o propiedades deseadas.



Soldadura por puntos: se realiza en piezas solapadas y cuya forma es aproximadamente circular.

Soldadura de costuras: soldadura continua efectuada en piezas solapadas.





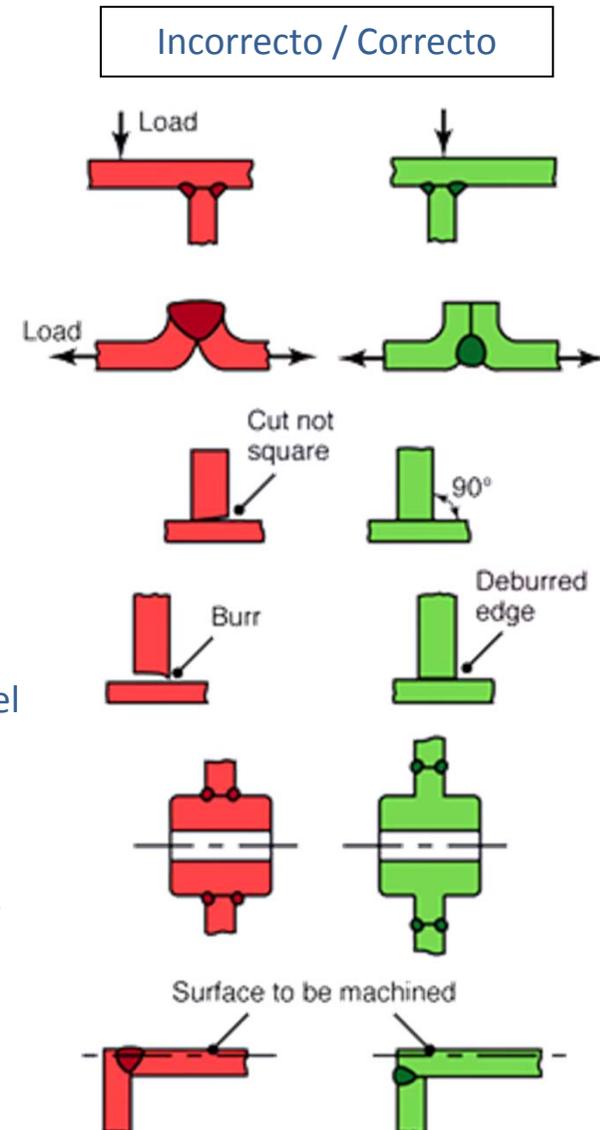
2. Uniones soldadas: Diseño de la unión

En la selección del tipo de unión y del tipo de soldadura a aplicar han de considerarse los siguientes elementos:

- Materiales, estructura, espesores y tamaños de las piezas a soldar.
- Métodos de fabricación de las piezas a soldar.
- Requerimientos de servicio (tipo de carga, esfuerzos generados, etc.)
- Ubicación, accesibilidad y facilidad para soldar.
- La apariencia.
- Los costes asociados a la preparación de los bordes, la operación de soldar y el posproceso (mecanizado y acabado).

Con ello, algunas recomendaciones generales de diseño:

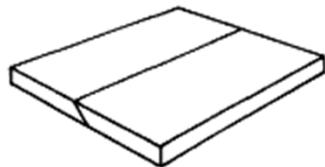
- La cantidad de soldadura ha de ser la mínima (proceso costoso) y en el lugar adecuado para evitar demasiados esfuerzos, evitar interferencias con procesos posteriores y para dar buena apariencia.
- Los componentes deben asentar bien antes de soldarlos → importancia del proceso de preparación del borde (sierra, mecanizado, corte).
- Minimizar la necesidad de preparación del borde con un diseño adecuado.





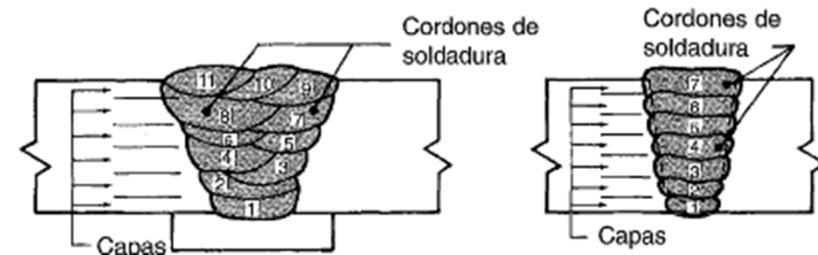
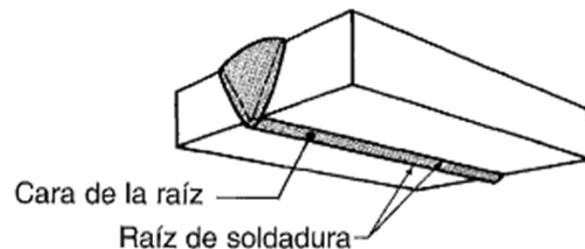
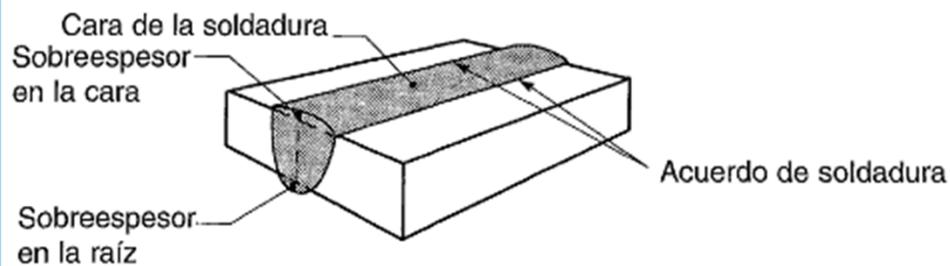
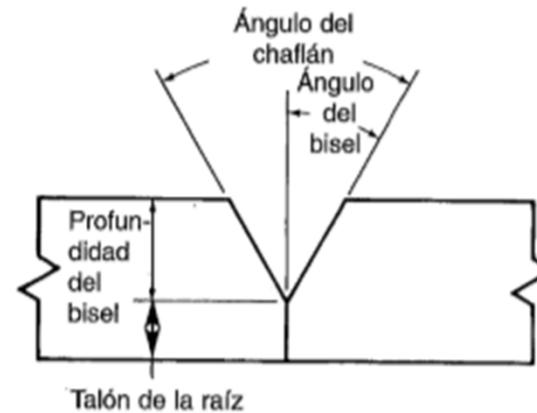
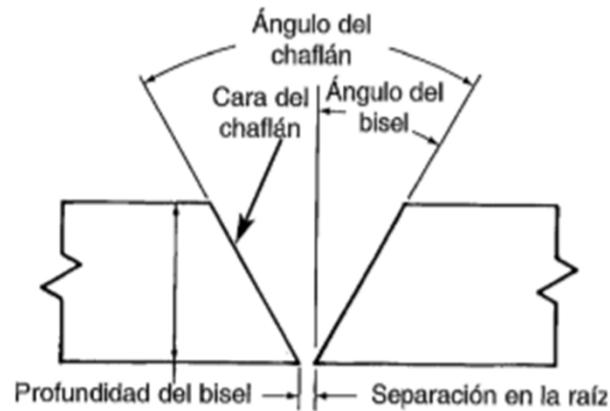
2. Uniones soldadas: Preparación de la soldadura

Chaflán plano simple 	
Chaflán en bisel simple o en Y 	Chaflán en V simple 
Chaflán en bisel doble o en K 	Chaflán en V doble 

Chaflán en J simple 	Chaflán en U simple 
Chaflán en J doble 	Chaflán en U doble 
Canto rebordeado 	Canto rebordeado 
Chaflán escarpado 	



2. Uniones soldadas: Terminología de la soldadura



(A)

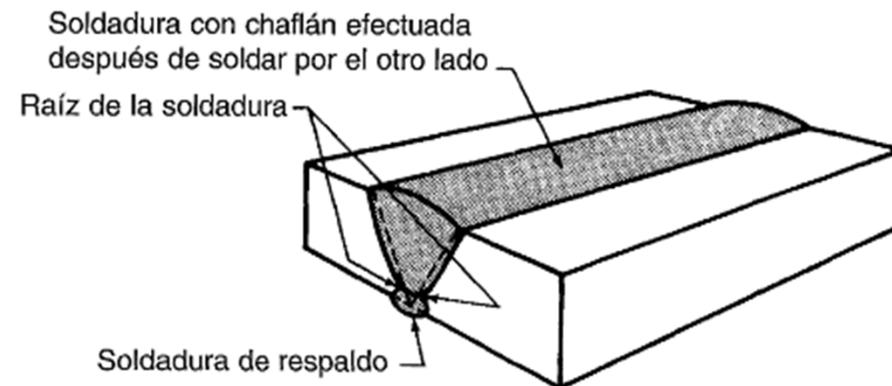
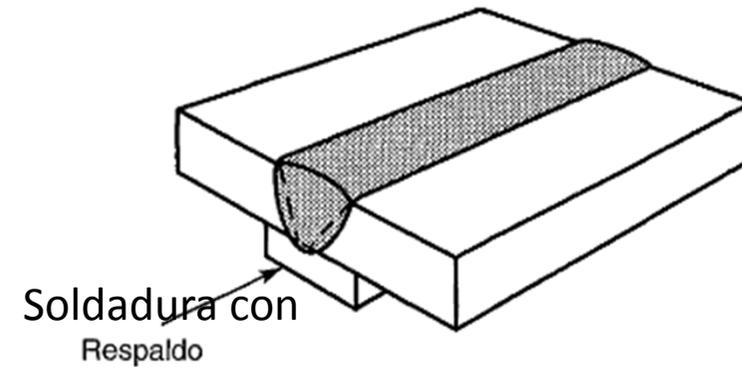
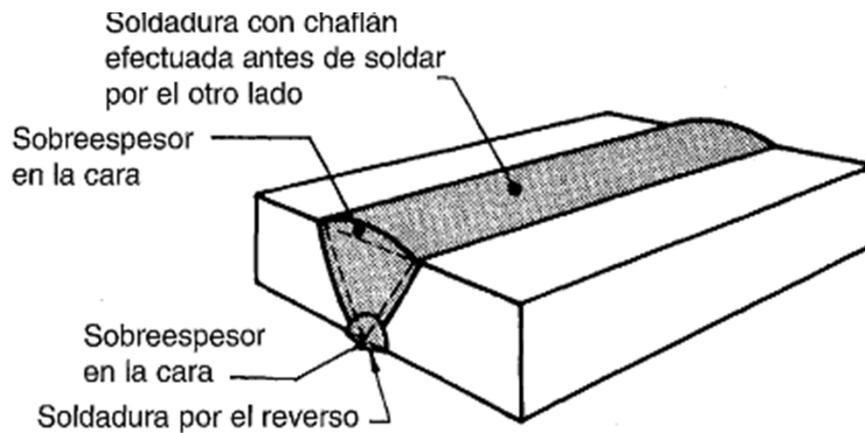
(B)

(A) Nº DE CORDONES = 11 ; Nº DE CAPAS = 6

(B) Nº DE CORDONES = 7 ; Nº DE CAPAS = 7



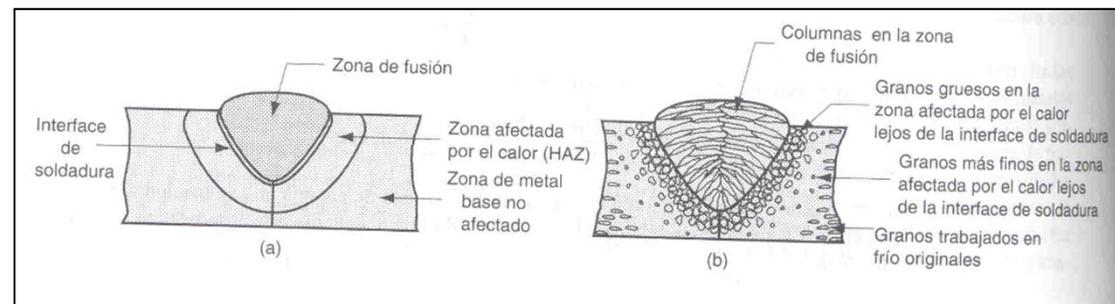
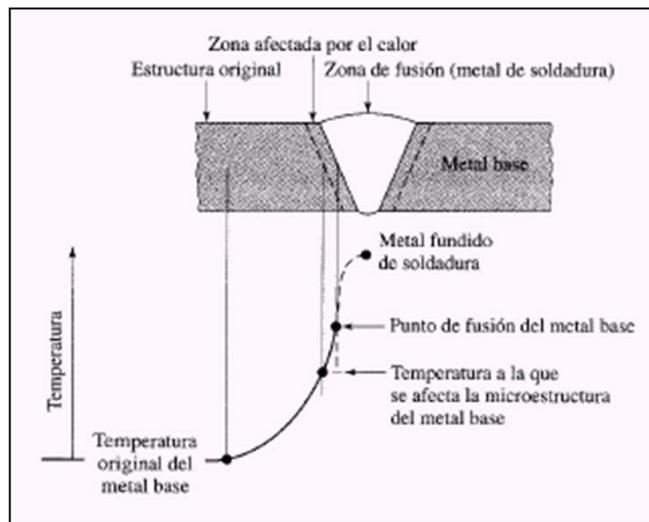
2. Uniones soldadas: Terminología de la soldadura



2. Uniones soldadas: Zonas de la unión

En una unión soldada por fusión se pueden identificar tres zonas distintas:

- **Metal base:** no está afectado por la soldadura y su composición química y estructura son las iniciales.
- **Metal de soldadura:** es el metal fundido y su composición química y estructura corresponden a las proporcionadas por la fusión del material de aportación y del base.
- **Zona afectada térmicamente (ZAT):** zona del metal base que sufre transformaciones o modificaciones estructurales (crecimiento de grano) debidas a que ha permanecido durante un tiempo a altas temperaturas → las transformaciones dependen de la temperatura alcanzada, el tiempo, la velocidad de enfriamiento, etc. → zona más crítica, en la que suelen ocurrir los fallos en la unión soldada.





3. Car. del proceso de soldadura: Soldabilidad

La **soldabilidad** o facilidad de soldado de un material se define como la capacidad de ser soldado en una estructura específica que tenga ciertas propiedades y características y que cumpla de forma satisfactoria con los requisitos de servicio.

La soldabilidad de los metales y sus aleaciones es una **propiedad compleja**, cuyo estudio previo es preceptivo en todo nuevo trabajo de construcción soldada de responsabilidad. Representa la aptitud para efectuar uniones de materiales por soldeo, mediante la utilización del calor, presión u otros agentes externos, individualmente o en acción conjunta.

Es una **propiedad cualitativa** y está en función de la obra a realizar, de los materiales a emplear y de su destino.

Aspectos influyentes en la soldabilidad:

- Temperatura alcanzada y tiempo.
- Propiedades mecánicas y físicas del material (resistencia, tenacidad, módulo de elasticidad, calor específico, dilatación térmica, etc.)
- Preparación de las superficies a soldar.
- Proceso de soldadura (gases protectores, fundentes, velocidad de avance, posición al soldar, etc.)
- Tratamientos posteriores: relevado de esfuerzos, tratamiento térmico, etc.



3. Car. del proceso de soldadura: Soldabilidad

Resumen de las características de soldabilidad de los metales y aleaciones:

- **Aceros al carbono:** excelente para aceros al bajo carbono, de regular a buena para los aceros al medio carbono y mala para los aceros al alto carbono (mejora al disminuir el % de C).
- **Aceros de baja aleación:** parecida a la de los aceros al medio carbono.
- **Aceros de alta aleación:** buena con condiciones muy controladas.
- **Aceros inoxidables:** se pueden soldar con varios procesos.
- **Aleaciones de aluminio:** son soldables con fuentes intensas de calor. En general las que contienen zinc o cobre no son soldables.
- **Aleaciones de cobre:** parecida a las de aluminio.
- **Aleaciones de magnesio:** soldables si se usan gases y fundentes de protección.
- **Aleaciones de níquel:** parecida a las de los aceros inoxidables.
- **Aleaciones de titanio:** soldables cuando se usan gases de protección en forma correcta.



3. Car. del proceso de soldadura: Física de la sold.

Centrando el estudio en la soldadura por **fusión**:

- Es necesaria una **densidad calorífica** lo suficientemente alta para fundir el metal.
- La densidad calorífica se define como la energía transferida por unidad de superficie (W/mm^2).
- Densidad calorífica $\uparrow \rightarrow$ Tiempo para fundir el metal \downarrow
- Densidad demasiado baja ($< 10 W/mm^2$) \rightarrow el calor se transmite a la zona de trabajo y a la superficie igual de rápido \rightarrow la fusión no ocurre.
- Densidad demasiado alta ($> 10^5 W/mm^2$) \rightarrow el metal se vaporiza en la región afectada.
- Factores influyentes: velocidad de soldadura y tamaño de región.
- Por ahorro de energía y razones metalúrgicas conviene fundir el metal con el mínimo de energía \rightarrow se prefieren densidades caloríficas altas.

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)



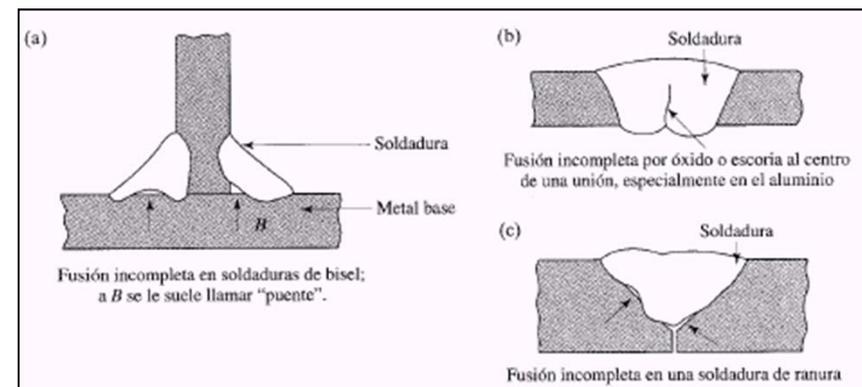
4. Calidad de la soldadura: Defectos

Principales **causas** de defectos en la soldadura:

- Ciclos térmicos → Cambios microestructurales.
- Defectuosa realización del proceso de soldadura.

Principales **tipos de defectos**:

- Porosidad: causada por gases atrapados en la solidificación, reacciones químicas durante la soldadura o contaminantes.
Se puede reducir: adecuados electrodos y material de aporte; precalentar la zona de unión; adecuada limpieza; menor velocidad de soldadura (dando tiempo para que escape el gas).
- Inclusiones de escoria: óxidos, fundentes, etc que quedan atrapados en la zona de soldadura. Causadas por no efectividad de los gases protectores o por la contaminación del ambiente.
Se pueden evitar: limpieza del cordón antes de depositar la siguiente capa; con suficiente gas de protección; rediseño de la unión para que tenga espacio suficiente el botón de metal fundido.
- Fusión y penetración incompletas: la fusión incompleta se puede evitar: elevando la temperatura del metal base; limpiando el área de la unión antes de soldar; cambiando el diseño de la unión y el tipo de electrodo; con el suficiente gas de protección.
La penetración incompleta se puede evitar: con más suministro de calor; con menor velocidad de avance; cambiando el diseño de la unión; ajustando bien las superficies a unir.

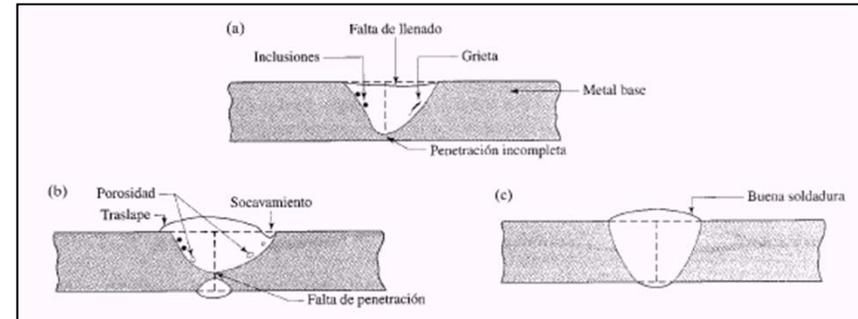




4. Calidad de la soldadura: Defectos

- Perfil de la soldadura: puede tener defectos producidos por:

- Falta de llenado
- Socavamiento: puede ser concentrador de esfuerzos.
- Traslape: por deficiente soldado.



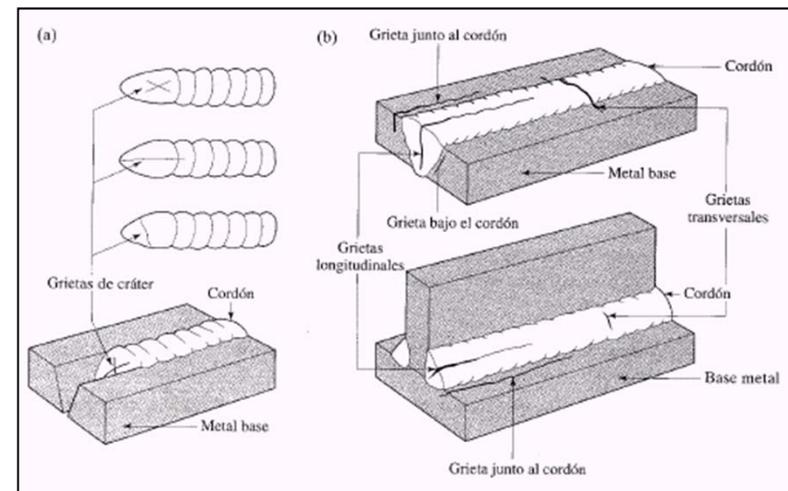
- Grietas: tipos: longitudinal, transversal, en cráter, bajo el cordón, junto al cordón. Debidas a:

- Gradientes de temperatura → esfuerzos térmicos.
- Variaciones en la composición en la zona de soldadura → diferentes veloc. de contracción.
- Restricción excesiva en la pieza → incapacidad de contracción del metal de soldadura en el enfriamiento.

Grietas calientes: aparecen con la unión a T^a elevada;
Grietas frías: después de la solidificación.

Para evitarlas:

- Cambio de diseño → minimizar esfuerzos de contracción.
- Cambio de parámetros, procedimientos y secuencia del proceso de soldadura.
- Pre calentamiento de las piezas.
- Evitar enfriamiento rápido



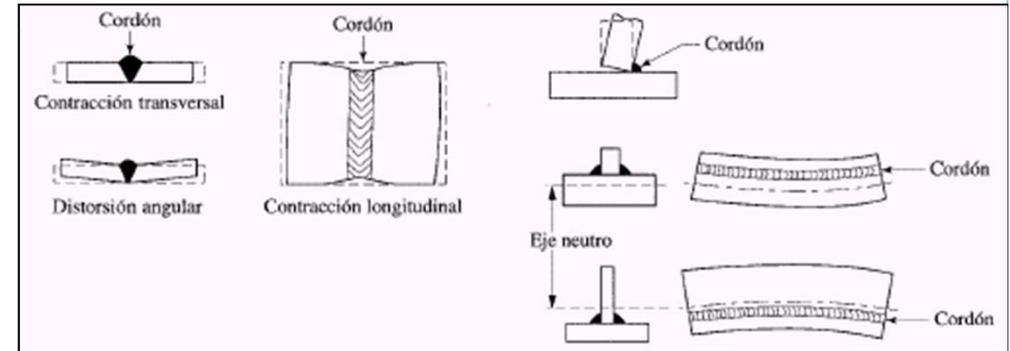


4. Calidad de la soldadura: Defectos

- Esfuerzos residuales: calentamiento / enfriamiento → dilatación y contracción del área de unión.

Posibles defectos:

- Distorsión, pandeo y torcimiento de las partes soldadas.
- Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos.
- Menor duración a fatiga.



- Relevado de esfuerzos: Los problemas por esfuerzos residuales se pueden reducir **precalentando** el metal base o las piezas a soldar.

Precalentamiento → Velocidad enfriamiento ↓ → Módulo elasticidad ↓ → Esfuerzos térmicos ↓ → Distorsión ↓.

Otros métodos de relevado de esfuerzos:

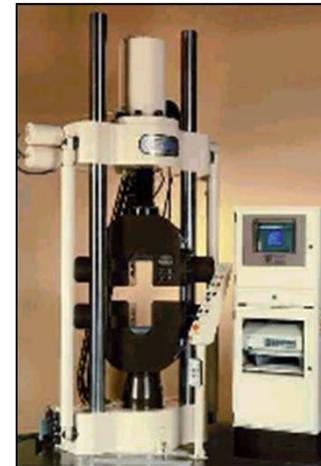
- **Laminado** por la superficie del cordón → inducen esfuerzos de compresión que compensan los de tracción.
- **Tratamientos térmicos**: recocido, normalizado, templado, revenido, etc.



4. Calidad de la soldadura: Técnicas de inspección

Ensayos destructivos:

- Ensayos de tracción: longitudinal y transversal.
- Ensayos de flexión: para ductilidad y resistencia.
- Ensayo de tenacidad a la fractura: por impacto (Charpy).
- Ensayos de corrosión y termofluencia (comportamiento a Tª elevadas).



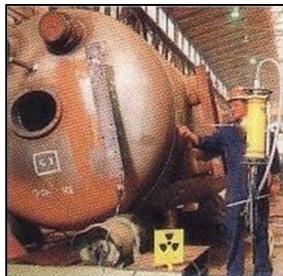
Máq. ensayo tracción



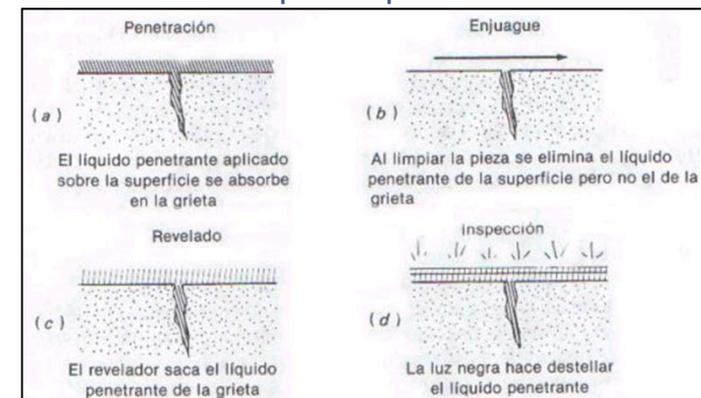
Péndulo Charpy

Ensayos no destructivos:

- Partículas magnéticas: se dispersan partículas metálicas → se induce un campo → los defectos se manifiestan por concentraciones de las partículas en determinados puntos.
- Ultrasonidos: los defectos se manifiestan por discontinuidades en la transmisión de una onda ultrasónica a través de la pieza.



- Inspección visual.
- Radiografías.
- Líquidos penetrantes:





5. Selección del proceso

- **Criterios de selección:**
 - Tipo de producto. Por ejemplo:
 - Estructuras: los equipos de soldadura han de trasladarse.
 - Componentes de ingeniería: pueden llevarse a las instalaciones de soldadura.
 - Material. Aspectos a tener en cuenta:
 - Tendencia al agrietamiento.
 - Porosidad.
 - Tenacidad de la soldadura y de la ZAT.
 - Corrosión
 - Espesor del material: existen unos espesores recomendados para cada proceso. Cuanto mayor es el espesor, mayores son las dificultades de soldadura.
 - Medios de producción.
 - Tipos de unión y posición: incluyendo la accesibilidad de la unión.



Procesos de unión: Soldadura por fusión



Jesús Velázquez Sancho



Índice

1. Introducción
2. Elementos de la soldadura con arco eléctrico
 - 2.1. Arco eléctrico
 - 2.2. Generadores de corriente
 - 2.3. Electrodo y protección del arco
3. Soldadura con arco eléctrico y protección con fundente
 - 3.1. Soldadura con electrodo revestido (SMAW)
 - 3.2. Soldadura con arco sumergido (SAW)
 - 3.3. Soldadura por electroescoria (ESW)
4. Soldadura con arco eléctrico y gases de protección
 - 4.1. MIG –MAG (GMAW)
 - 4.2. Soldadura con electrodo tubular (FCAW)
 - 4.3. TIG (GTAW)
5. Soldadura con energía química
6. Soldadura con energía radiante
7. Comparación entre procesos



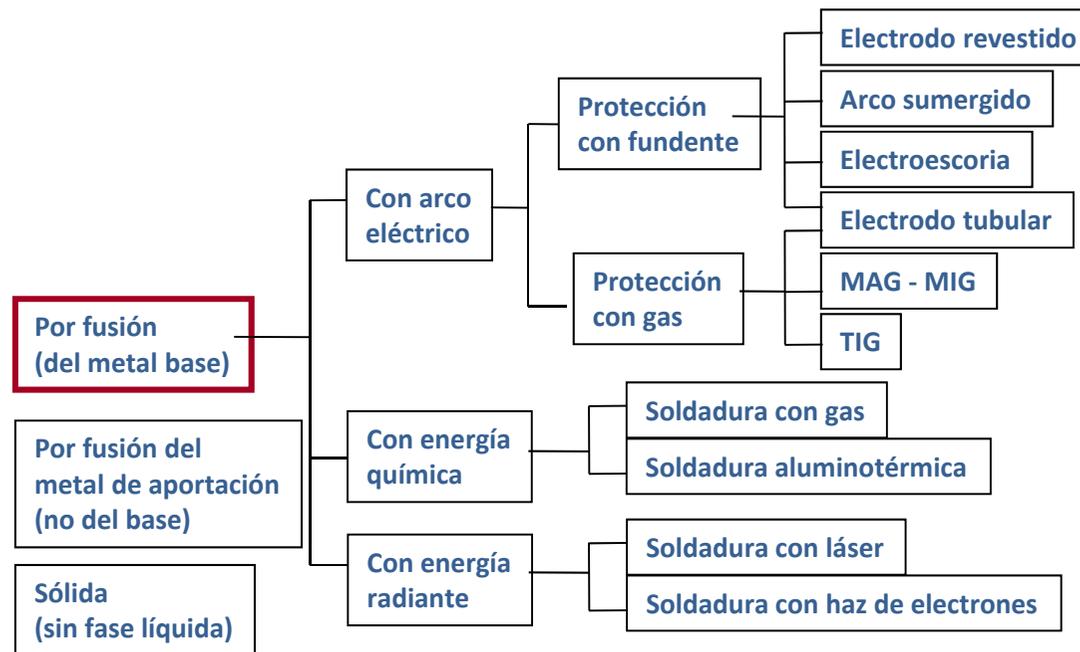
1. Introducción

Soldadura por fusión:

conjunto de procesos en los cuales la unión de los metales se efectúa a una temperatura superior a la de fusión del metal base y, si lo hay, del metal de aportación.

Tipos de soldadura por fusión del metal base: en función del tipo de energía utilizada para aportar calor a la fusión:

- Energía eléctrica (arco eléctrico): con protección mediante escoria y/o gas.
- Energía química: con gas, aluminotérmica.
- Energía radiante: con láser, con haz de electrones.





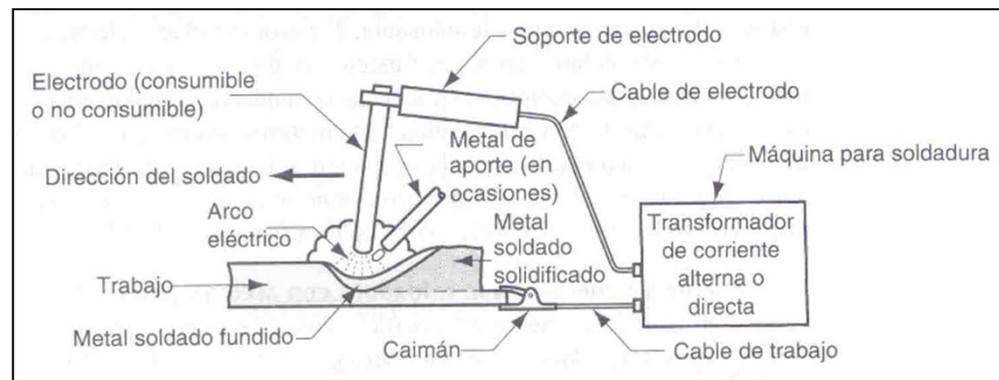
2.1. Arco eléctrico

El arco eléctrico: es una descarga continuada entre dos conductores separados ligeramente, por donde pasa la corriente, al hacerse conductor el aire o gas comprendido entre los mismos. Se manifiesta con gran desprendimiento de luz y calor.

Para ello es necesario que el aire o el gas comprendido entre ellos (plasma) se haga conductor → **ionización** del gas (separación de sus átomos en iones y electrones gracias a la alta T^a).

El arco eléctrico es la fuente de calor que utilizan muchos de los procesos de soldeo porque:

- Proporciona altas intensidades de calor
- Es fácilmente controlable a través de medios eléctricos.



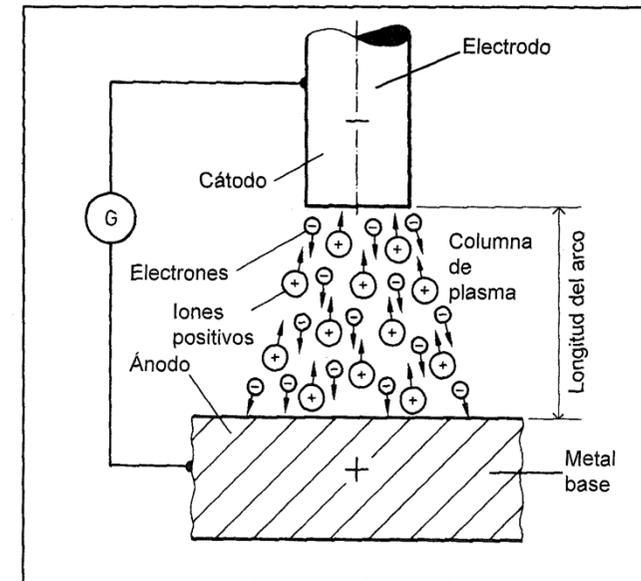


2.1. Arco eléctrico

- **Procedimiento de ionización:** calentar el electrodo a T^a muy elevada estableciendo cortocircuito entre la pieza y el electrodo (cebado) y separarlo \rightarrow el arco se establece y se mantiene con sólo unos voltios. Los electrones que salen del cátodo (electrodo) ionizan el gas al chocar con sus átomos.
- Los electrones siguen hacia el ánodo (manteniendo el arco) y los iones del plasma hacia el cátodo, al que ceden su energía cinética que se transforma en calor, manteniendo la temperatura del cátodo.

Zonas del arco eléctrico:

- Cátodo:
 - Electrodo negativo, en el que se produce la emisión de electrones.
- Ánodo:
 - Electrodo positivo, al que se dirigen los electrones.
- Columna de plasma:
 - En ella la energía es absorbida para mantener el gas a una T^a en la que sea conductor.





2.1. Arco eléctrico. Corriente continua

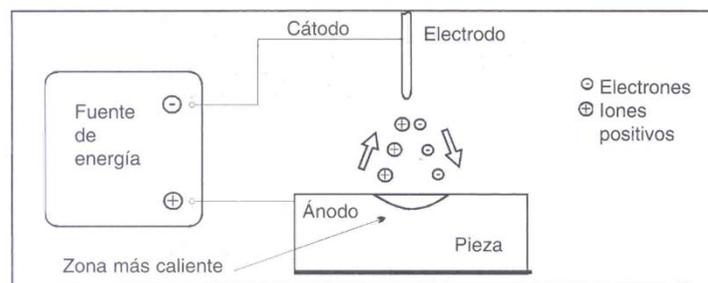
Polaridad directa o con corriente continua electrodo negativo (CCEN):

- Electrodo = Cátodo (al terminal negativo) / Pieza = Ánodo (terminal positivo)
- El electrodo se calienta menos que la pieza → Puede soportar intensidades 8x las de CCEP.
- Las piezas no se decapan (no se autolimpian) → Aleaciones con capas refractarias (Al) han de ser decapadas previamente si quieren soldarse con este método.
- Cordones más anchos, con menor penetración.

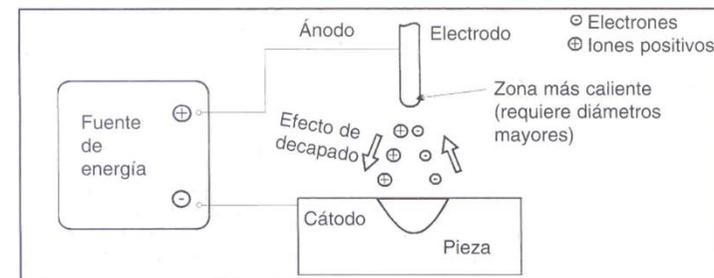
Polaridad inversa o con corriente continua electrodo positivo (CCEP):

- Electrodo = Ánodo (al terminal positivo) / Pieza = Cátodo (terminal negativo)
- Excesivo calentamiento del electrodo → Rápido deterioro, aún con bajas intensidades.
- Efecto de decapado (limpieza de óxidos) → Facilita el soldeo de algunas aleaciones (Al, Mg).
- Cordones poco anchos, con mayor penetración.

La elección de la polaridad depende de: tipo de proceso, tipo de electrodo y de material base.



CCEN

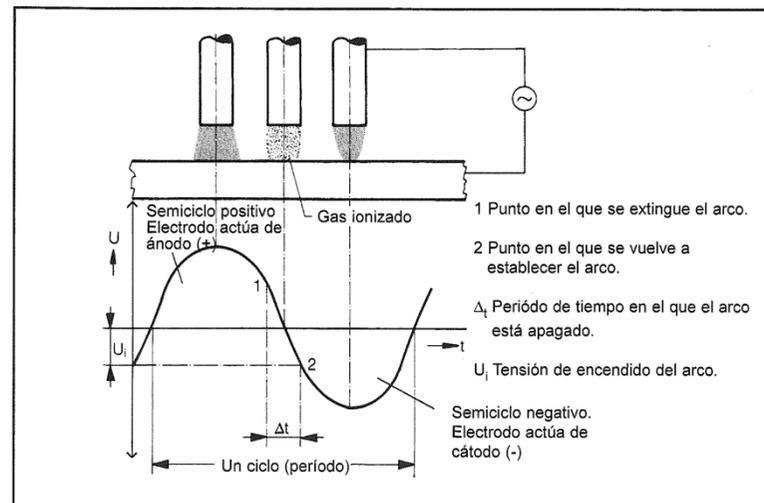


CCEP



2.1. Arco eléctrico. Corriente alterna

- El electrodo actúa de ánodo medio ciclo y de cátodo el otro medio.
- Aún a de forma reducida los efectos de las dos polaridades en corriente continua.
- Arco más inestable ← La tensión varía constantemente → Es necesario que la tensión sea mayor que la tensión de encendido del arco (U_i).



EFFECTO DE LA CORRIENTE ALTERNA EN EL ARCO ELÉCTRICO

- Las máquinas de corriente alterna son menos costosas de adquirir, pero en general están limitadas a las soldadura de metales ferrosos.
- Las máquinas de corriente continua se utilizan con todos los metales y se tiene un mejor control del arco eléctrico.



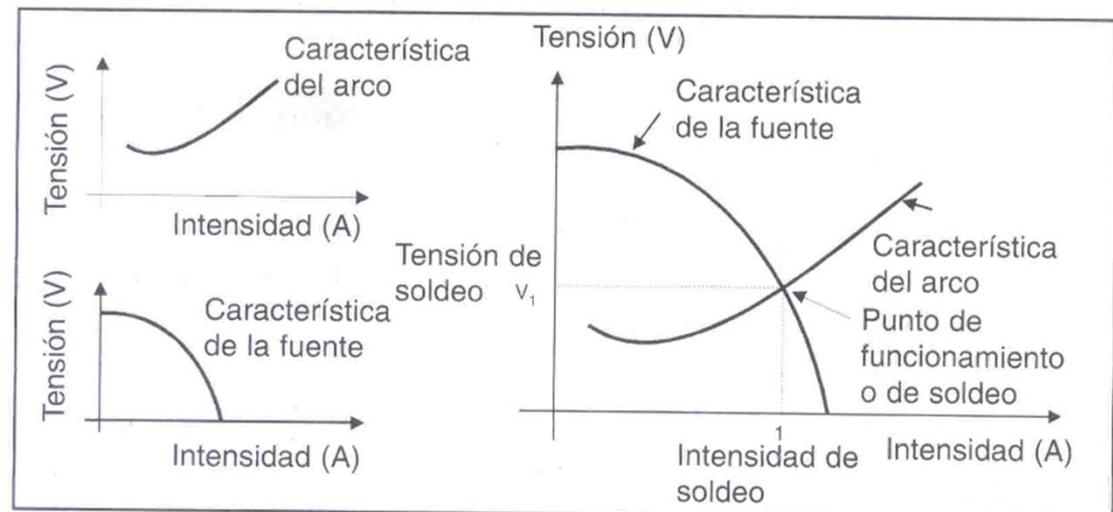
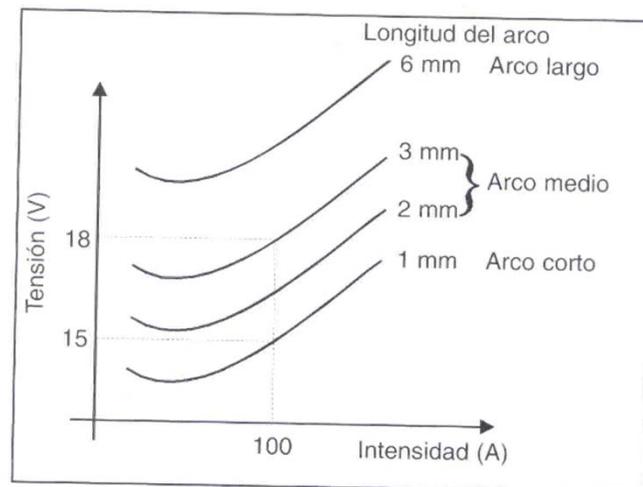
2.2. Generadores de corriente

Característica eléctrica del arco:

- Característica del arco: relación entre el voltaje y la intensidad.
- Depende de: tamaño y naturaleza del cátodo y del ánodo, naturaleza del gas de protección o del recubrimiento del electrodo, de la longitud del arco (**para una misma intensidad la tensión aumenta con la longitud del arco** → cuanto mayor separación entre electrodo y pieza, mayor tensión)

Característica eléctrica de la fuente:

- Relación entre el voltaje y la intensidad.
- La intensidad y el voltaje reales obtenidos en el proceso de soldeo vienen determinados por la intersección de las curvas características del generador y del arco → Pto. de trabajo (I_1, V_1).

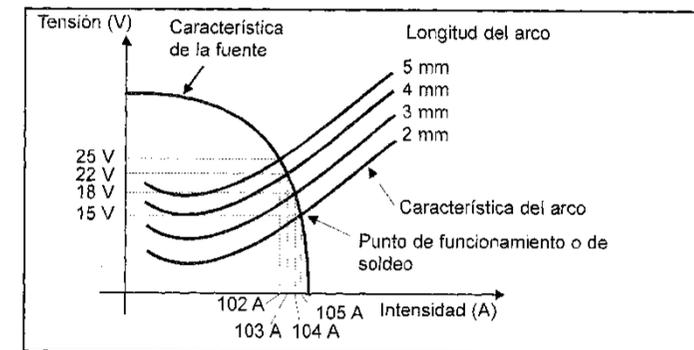
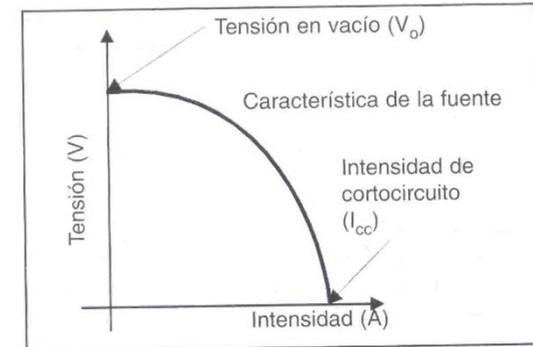




2.2. Generadores de corriente

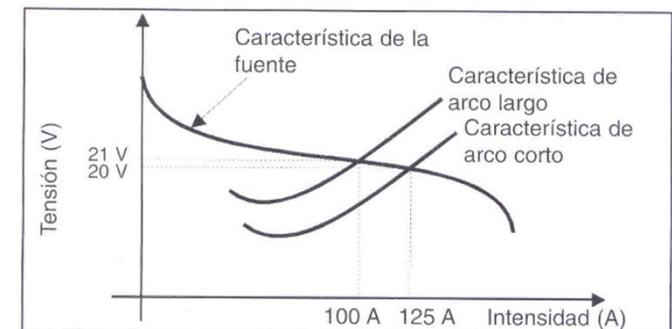
Fuente de intensidad constante o de característica descendente:

- Intensidad de cortocircuito (I_{CC}): máxima intensidad que proporciona la fuente. Se da cuando se ceba el arco (se produce un cortocircuito) → calentamiento electrodo → cebado.
- Tensión en vacío (V_0): máxima tensión que proporciona la fuente (cuando no está soldando).
- Adecuada para **TIG** y soldeo con **electrodos revestidos**, ya que en ellos es más difícil mantener la distancia entre electrodo y pieza → cambio de long. de arco → cambio de voltaje → no produce grandes cambios de intensidad.



Fuente de tensión constante:

- Adecuada para **MIG-MAG**, soldeo con **arco sumergido**, ..., ya que en ellos el alambre es alimentado a velocidad constante → necesario mantener long. de arco cte. → necesidad de voltaje cte.



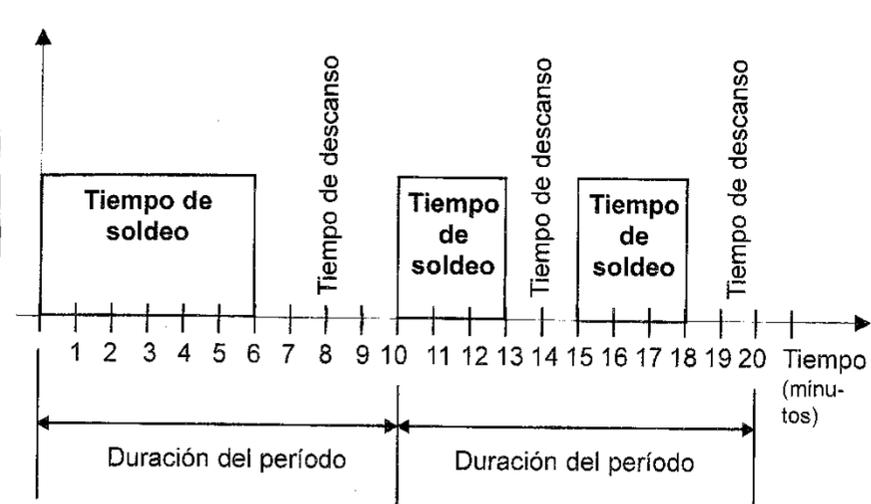


2.2. Generadores de corriente

Factor de marcha o de operación:

$$\text{Factor de marcha (\%)} = \frac{\text{Tiempo de soldeo}}{\text{duración del periodo de tiempo}} \times 100$$

$$\text{Duración del periodo} = \text{tiempo de soldeo} + \text{tiempo de descanso}$$



Aportación térmica y su influencia en el aspecto del cordón:

- La pieza a soldar recibe una cantidad de calor (Q en J/cm) que es función de la Intensidad de corriente (I en A), Tensión (V en V) y veloc. de soldadura (v en cm/min).

$$Q = (I \cdot V \cdot 60) / v$$

- Una aportación térmica más o menos elevada determina el aumento o disminución de la penetración.



2.3. Electrodo y protección del arco

Electrodos:

- Pueden ser consumibles o no consumibles.
- Consumibles:
 - Llevan el metal de aporte
 - Disponibles en varillas o en forma de alambres (permiten alimentación automática).
- No consumibles:
 - Suelen ser de tungsteno para resistir la fusión → TIG.
 - No aportan material, sino que sirven sólo de electrodo → si es necesario, el metal de aporte ha de proporcionarse separadamente.
 - No se consumen pero se desgastan gradualmente.

Protección del arco eléctrico:

- Altas T^a → reacciones de los metales con el O, N, H del aire → Degradación de las propiedades mecánicas de la soldadura → necesidad de protección → cubriendo la punta del electrodo, el arco eléctrico y el pozo de soldadura con un manto de gas y/o fundente.
- Gases: se suelen utilizar Argón o Helio, Nitrógeno y/o CO_2 .
- Fundente:
 - Durante la soldadura el fundente se derrite y se convierte en una escoria líquida que cubre la operación y protege al metal. Después se endurece y ha de eliminarse con un cepillo.
 - Métodos de aplicación del fundente:
 - Electrodo con recubrimiento de fundente (electrodo revestido).
 - Electrodo tubular con fundente en el núcleo (electrodo tubular).
 - Fundente granular vaciado en la operación de soldadura (arco sumergido).



3.1. Soldadura con electrodo revestido (SMAW)

Descripción:

- El material de aportación se obtiene por la fusión del electrodo en forma de pequeñas gotas.
- La protección se obtiene por la descomposición del revestimiento del electrodo en forma de gases y en forma de escoria líquida que flota sobre el baño de fusión y después, solidifica.

Denominaciones:

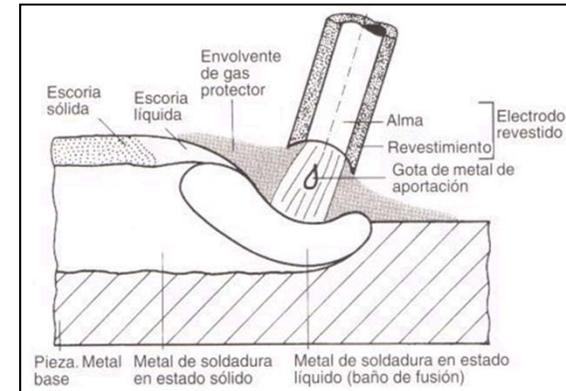
- SMAW (*Shielded Metal-Arc Welding*) según AWS.
- 111 según UNE-EN 4063.

Ventajas:

- Equipo de soldeo relativamente sencillo, barato y portátil
- No es necesaria la protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.
- Se puede emplear en cualquier posición. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases de protección, así es que se puede emplear en lugares algo alejados de la fuente de energía.
- Aplicable a una gran variedad de espesores y a la mayoría de los metales y aleaciones de uso normal.

Inconvenientes:

- Proceso lento, que requiere gran habilidad por parte del soldador.
- No aplicable a metales de bajo punto de fusión ni a metales de alta sensibilidad a la oxidación.
- No aplicable a espesores inferiores a 1,5 - 2 mm y no rentable para espesores mayores de 38 mm.





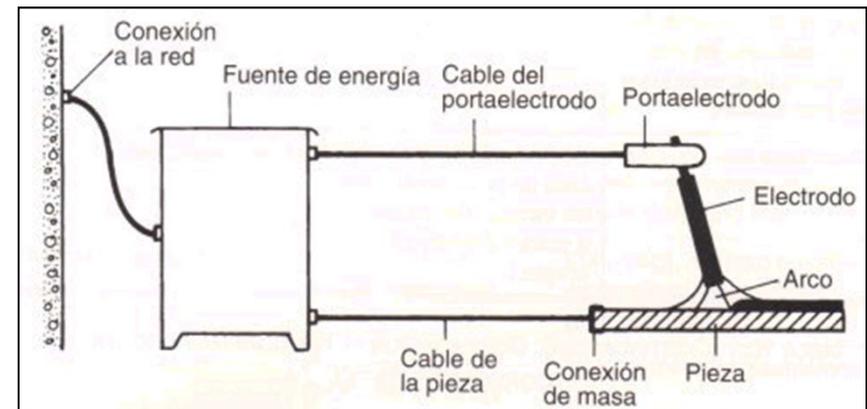
3.1. Soldadura con electrodo revestido (SMAW)

Aplicaciones:

- Es uno de los procesos de mayor utilización en la actualidad, especialmente en producciones cortas, construcciones en campo y trabajos de mantenimiento y reparación.
- Se aplica a los aceros al carbono, aceros aleados, inoxidable, fundiciones y metales no féreos como el níquel, aluminio, cobre y sus aleaciones.
- Los sectores de mayor aplicación de este proceso son la construcción naval, de máquinas, estructuras, puentes, recipientes a presión y calderas, refinerías de petróleo, oleoductos y gasoductos.

Equipo:

- Generador de corriente: puede ser de CC o de CA.
- Pinza portaelectrodo: herramienta manual, conectada al generador y provista de un dispositivo para sostener el electrodo durante la operación de soldadura. Debe ser ligera para reducir la fatiga durante la soldadura, debe tener buena resistencia al calentamiento, debe permitir una fácil colocación y eliminación del electrodo.
- Conexión a tierra.

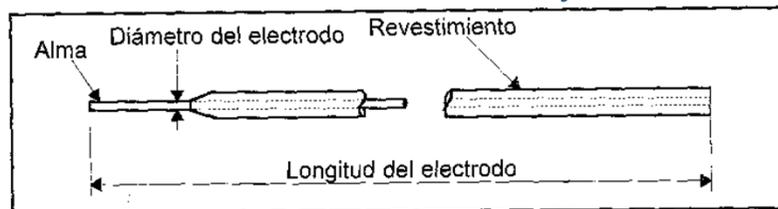




3.1. Soldadura con electrodo revestido (SMAW)

Electrodos:

- Varilla metálica con una composición aproximada a la del metal a soldar y recubierta de una sustancia llamada revestimiento.
- Revestimiento: aglomerado de sustancias pulverizadas unidas por un aglutinante. Suele ser de celulosa, silicato sódico, silicato potásico, óxido de titanio (rutilo), óxidos de hierro, etc.
 - Actuar como agente limpiador y desoxidante del baño de fusión.
 - Formar sobre el metal depositado una capa de escoria que lo proteja hasta su enfriamiento.
 - Facilitar el mantenimiento y el cebado del arco.
 - Permitir una mejor penetración
 - Aumentar la calidad de la soldadura.
- Longitudes de los electrodos normalizadas: 150, 200, 250, 300, 350 y 450 mm. Diámetros normalizados: 1'6, 2, 2'5, 3'25, 4, 5, 6, 6'3, 8, 10 y 12'5 mm.
- Dependiendo del espesor del revestimiento se clasifican en:
 - Delgados: Protegen poco el metal fundido → sólo se utilizan en el aprendizaje.
 - Medios: Proporcionan una mayor estabilidad al arco, permiten el soldeo con corriente alterna y protegen mejor el metal soldado.
 - Gruesos: Permiten obtener las mejores cualidades del metal soldado.

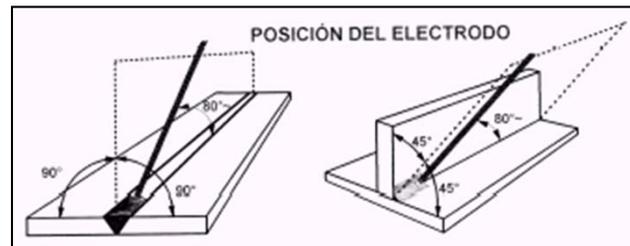




3.1. Soldadura con electrodo revestido (SMAW)

Parámetros de soldeo:

- Diámetro del electrodo:
 - Diámetro ↓ (2; 2,5; 3,25; 4 mm): punteado, uniones de pieza de poco espesor, primeras pasadas y cuando se requiera que el aporte térmico sea bajo.
 - Diámetro ↑: piezas de espesores medios y gruesos, soldaduras en posición plana y recargues.
- Intensidad: Cada electrodo, en función del diámetro, posee un rango de intensidades en el que puede utilizarse.
- Longitud del arco: En general, debe ser igual al diámetro del electrodo.
 - Un arco demasiado corto puede producir cortocircuitos durante la transferencia de metal. Un arco demasiado largo perderá direccionalidad e intensidad, además el gas y el fundente generados por el revestimiento no son tan eficaces para la protección del arco y del metal de soldadura, por lo que se puede producir porosidad y contaminación del metal de soldadura.
- Velocidad: debe ajustarse de tal forma que el arco adelante ligeramente al baño de fusión.
 - Cuanto mayor es la velocidad de desplazamiento menor es la anchura y la penetración del cordón, menor es el aporte térmico y más rápidamente se enfriará la soldadura. Si la velocidad es excesiva se pueden producir mordeduras, inclusiones de escoria y porosidad.
- Orientación del electrodo:





Se quiere soldar 2m de chapa de acero de 8mm de espesor. Los bordes de la unión están preparados con un chaflán en V de 90° sin talón y con una separación en la raíz de 1mm.

¿Cuántos electrodos de diámetro 2.5mm y longitud 250mm se necesitan suponiendo un rendimiento global del 65% (pérdidas, difusiones, colilla, convexidad)?

a) 21; b) 101; c) 181; d) 241

¿Cuántos electrodos del mismo tipo serían necesarios si la preparación fuera con un chaflán en V doble de 90° manteniendo el resto de características?

a) 21; b) 101; c) 181; d) 241

Repita los cálculos para un chaflán plano.

a) 21; b) 101; c) 181; d) 241



3.2. Soldadura con arco sumergido (SAW)

Descripción:

- Consiste en la fusión de un alambre electrodo continuo y desnudo protegido por la escoria generada por un fundente, granulado o en polvo (*flux*).
- Puede ser semiautomático o automático, aunque se suele emplear de manera automática, ya que no hace falta operario y se asegura un gran rendimiento de producción.
- No existen pérdidas de metal por proyecciones y el rendimiento térmico es muy elevado (en torno al 80%)

Denominaciones:

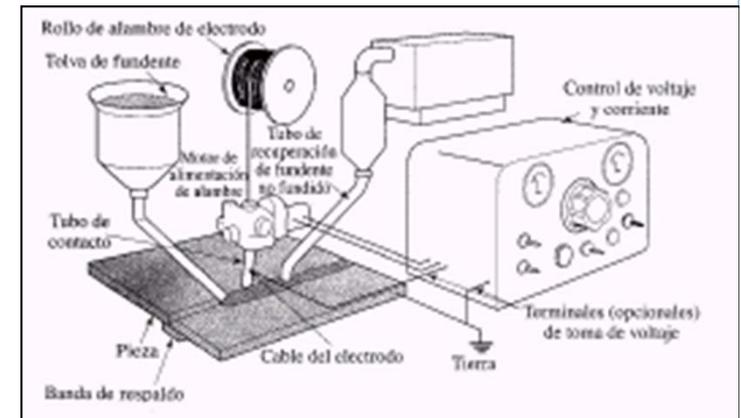
- SAW (*Submerged - Arc Welding*) según AWS.
- 121 según UNE-EN 4063.

Ventajas:

- Gran productividad (velocidad, penetración, largas soldaduras continuas) y automatización.
- Alta calidad de soldadura.
- Espesores elevados con chaflanes reducidos o inexistentes.
- Arco invisible (sin necesidad de gafas) y limitada producción de humos.

Inconvenientes:

- Posiciones de soldadura plana, plano-frontal o circunferencial.
- Espesor mínimo: 2-3 mm.
- Fundente sujeto a contaminaciones que pueden producir defectos en la soldadura
- No aplicable a metales de bajo punto de fusión ni a metales de alta sensibilidad a la oxidación





3.2. Soldadura con arco sumergido (SAW)

Aplicaciones:

- Para soldaduras en línea recta, especialmente en la formación de marcos para cajas, la construcción naval, de tuberías, puentes y recipientes presurizados, reparaciones, industria del motor y la fabricación en general.

Equipo:

- Fuente de alimentación: puede ser de CC de tensión cte; de CC de intensidad cte (+ alimentador de alambre de velocidad variable); CA (no muy usadas, sólo donde se requieren intensidades muy altas).
- Sistema de control: para controlar la velocidad de alimentación del alambre (intensidad), la potencia suministrada (tensión) y la marcha-paro del soldeo.
- Cabezal de soldeo: que suele constar de:
 - Sistema de alimentación del alambre, que se compone de: motor-reductor, rodillos de arrastre y de presión, enderezador y guía del alambre.
 - Pistola de soldeo con tubo de contacto.
 - Accesorios para el montaje y posicionamiento del cabezal (deslizaderas).
 - Tolva de fundente y manguera de fundente, para suministrarle por delante del alambre.
 - Sistemas de recuperación de fundente.





3.2. Soldadura con arco sumergido (SAW)

Electrodos:

- Alambre sólido o compuesto (hilo hueco con flux en su interior) bobinados en carretes. El flux puede desprender gases protectores o no (siendo éstos proporcionados externamente) → **Soldadura con electrodo tubular.**
- Condiciones: superficie lisa, libre de grasas y óxidos, calibrados y flexibles.

Fundentes o *flux* de protección:

- *Flux*: polvo compacto compuesto de granos (compuestos a su vez de minerales como óxidos de aluminio y talio) cuyo tamaño depende del tipo de soldadura a realizar.
- Se usa polvo de grano fino en operaciones de soldadura que requieran gran intensidad. Si se requiere grandes velocidades de soldeo, se usa flux de grano medio y grueso.
 - Fluxes fundidos: Se fabrican partiendo de minerales como el cuarzo, dolomita, caolín; que se mezclan en seco y se fusionan en el horno eléctrico a unos 1500 °C. Son fáciles de almacenar, permiten el reciclado y son adecuados para las más altas velocidades de soldeo. La intensidad máxima de uso se limita a 800 A.
 - Fluxes sinterizados: Se fabrican igual que los fluxes fundidos. Permiten un mayor espesor de capa y eliminar las escorias más fácilmente. Pero, su composición puede verse afectada por la pérdida de partículas finas y tiende a absorber más humedad que los fluxes fundidos.
 - Fluxes aglomerados: Se fabrican igual que los anteriores, pero usando silicatos, fluoruros, óxidos de hierro, carbonato. Aportan más elementos al baño de fusión que los fluxes fundidos, mejorando así su aleación. Absorben mucho la humedad, por lo que requieren muy buenas condiciones de almacenamiento.
 - Mezcla de fluxes: Se pueden mezclar distintos tipos de fluxes para conseguir uno nuevo especialmente adaptado a unas necesidades específicas.



3.2. Soldadura con arco sumergido (SAW)

Parámetros de soldeo:

- Intensidad:
 - $I \uparrow \rightarrow$ Tasa de deposición y penetración \uparrow .
 - I excesiva \rightarrow Cordón estrecho, sobreespesor, exceso de penetración.
 - I demasiado baja \rightarrow Arco inestable y falta de penetración.
- Tensión:
 - $v \uparrow \rightarrow$ Dilución del baño $\uparrow \rightarrow$ Cordón más ancho y plano.
 - V excesiva \rightarrow Cordones muy anchos con tendencia a formar grietas; Falta de material; Excesiva escoria fundida, incrementándose el contenido de Mn y Si en el metal aportado.
- Velocidad de soldeo:
 - $v \uparrow \rightarrow$ Energía térmica introducida y Cantidad de metal de aportación \downarrow .
 - v excesiva \rightarrow Menor penetración y anchura del cordón; Mayor porosidad y rugosidad.
 - v demasiado baja \rightarrow Excesivo sobreespesor con tendencia a formar grietas; Grandes baños de fusión \rightarrow Inclusión de escorias más fácil.
- Clase de corriente y polaridad:
 - Es preferible usar C.C que C.A. Se suelen emplear, por ello, rectificadores.
 - Si la soldadura es de unión, se usa la polaridad inversa. Para el recargue, se usa la polaridad directa, consiguiendo disminuir la penetración y la dilución del metal base.



3.3. Soldadura por electroescoria (ESW)

Descripción:

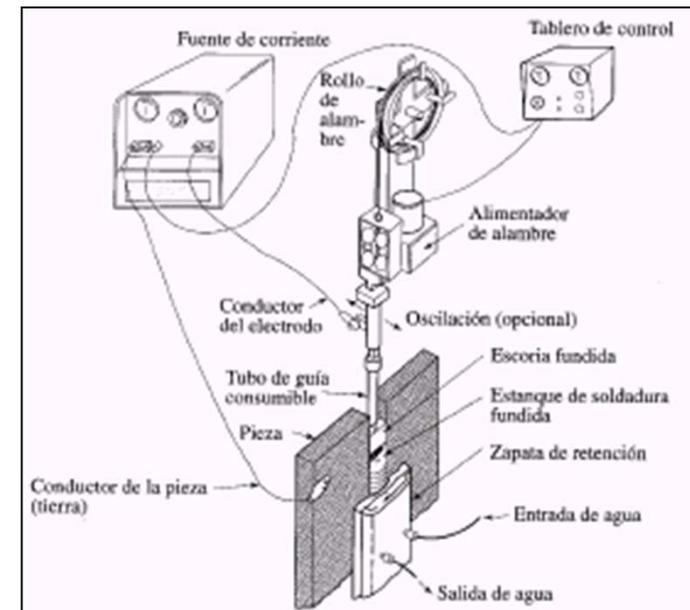
- Para la soldadura vertical de grandes piezas gruesas.
- Se colocan dos zapatas de cobre refrigeradas y en el hueco que forman éstas y las piezas se agrega fundente.
- Se genera arco eléctrico entre el electrodo y el fondo de la pieza a soldar.
- El arco eléctrico funde el fundente alcanzando T^a muy superiores a la de fusión del material.
- Las zapatas se van moviendo verticalmente conforme avanza la soldadura.
- Cuando la escoria fundida llega a la punta del electrodo, éste se extingue y el calor se sigue produciendo por la resistencia eléctrica de la escoria fundida.

Denominaciones:

- ESW (*Electroslag welding*) según AWS.

Ventajas e inconvenientes:

- Permite soldar placas de espesores entre 50 y más de 900 mm.
- La calidad de la soldadura es buena.
- Se usa para secciones estructurales gruesas de acero (maquinaria pesada, recipientes de reactores nucleares).
- Es un proceso con enfriamiento lento y baja velocidad de solidificación.
- Coste del sistema elevado (entre 15000 y 25000 euros).





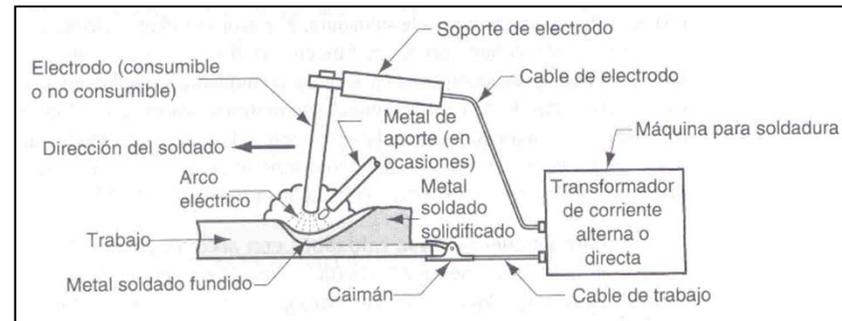
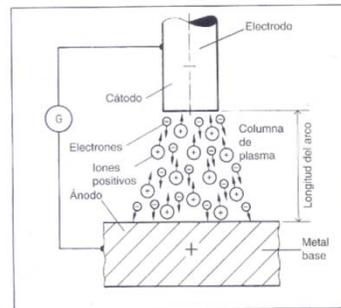
Índice

1. Introducción
2. Elementos de la soldadura con arco eléctrico
 - 2.1. Arco eléctrico
 - 2.2. Generadores de corriente
 - 2.3. Electrodo y protección del arco
3. Soldadura con arco eléctrico y protección con fundente
 - 3.1. Soldadura con electrodo revestido (SMAW)
 - 3.2. Soldadura con arco sumergido (SAW)
 - 3.3. Soldadura por electroescoria (ESW)
4. Soldadura con arco eléctrico y gases de protección
 - 4.1. MIG –MAG (GMAW)
 - 4.2. Soldadura con electrodo tubular (FCAW)
 - 4.3. TIG (GTAW)
5. Soldadura con energía química
6. Soldadura con energía radiante
7. Comparación entre procesos





4. Sold. con arco eléctrico y gases de protección



Funciones de los gases de protección:

- Evitar la oxidación y la contaminación del metal, del baño de fusión y del electrodo a altas temperaturas (el O_2 produce oxidación, el N_2 porosidad y la humedad del aire porosidad y grietas).
- Facilitar la transferencia de material en el arco eléctrico, facilitando la ionización.

Tipos de gases de protección:

- Gases **inertes** como el Argón (Ar), Helio (He) separados o mezclados entre sí, añadiendo en algunos casos gases **activos** (CO_2 , O_2 , H_2 o N_2) que reaccionan químicamente a la T^a del arco.

Características de los gases de protección:

- Energía de ionización ($E_{Ar} < E_{CO_2} < E_{He}$): cuanto mayor, más difícil es la ionización y por lo tanto el establecimiento del arco y menor estabilidad, aunque la energía aportada a la pieza será mayor.
- Densidad ($\rho_{He} < \rho_{Ar} < \rho_{CO_2}$): cuanto mayor, más fácil cubre la zona de soldeo y se necesita menos caudal.
- Conductividad térmica ($c_{Ar} < c_{CO_2} < c_{He}$): cuanto mayor, más homogénea la distribución de T^a → cordones más anchos y penetración uniforme.



4.1. MIG – MAG (GMAW)

Descripción:

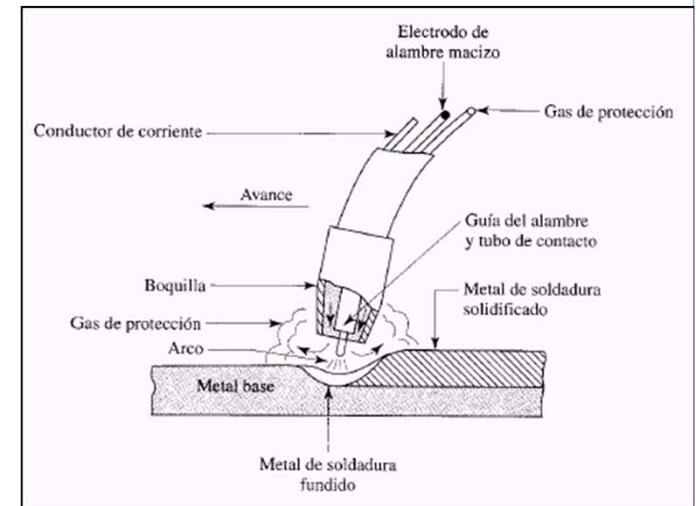
- El arco se establece entre un electrodo de hilo continuo alimentado automáticamente y la pieza a soldar, protegido por un gas activo (MAG) o inerte (MIG).
- **Denominaciones:**
- GMAW (*Gas Metal-Arc Welding*) según AWS, antes MAG (*Metal Active Gas*) y MIG (*Metal Inert Gas*).
- 135 (MAG) y 131 (MIG) según UNE-EN 4063.

Ventajas:

- Soldeo de cualquier material y en cualquier posición.
- Simplificación de las operaciones de limpieza (no hay escoria y las proyecciones son escasas) que reducen el costo total.
- Electrodo continuo y gran veloc. de soldadura → mejora la productividad, soldaduras largas y sin empalmes y reduce el riesgo de defectos.
- Esta mayor velocidad favorece la metalurgia de la soldadura ya que se reducen las deformaciones y transformaciones de estructura del metal base.

Inconvenientes:

- Es necesario un control estricto de la intensidad de corriente → compleja regulación de parámetros.
- Debe conseguirse un equilibrio entre la velocidad de fusión y la alimentación del electrodo.
- Es necesaria la limpieza de los bordes para obtener una unión sana.
- Equipo difícil de transportar y proceso sensible a las corrientes de aire → aplicación limitada al aire libre.





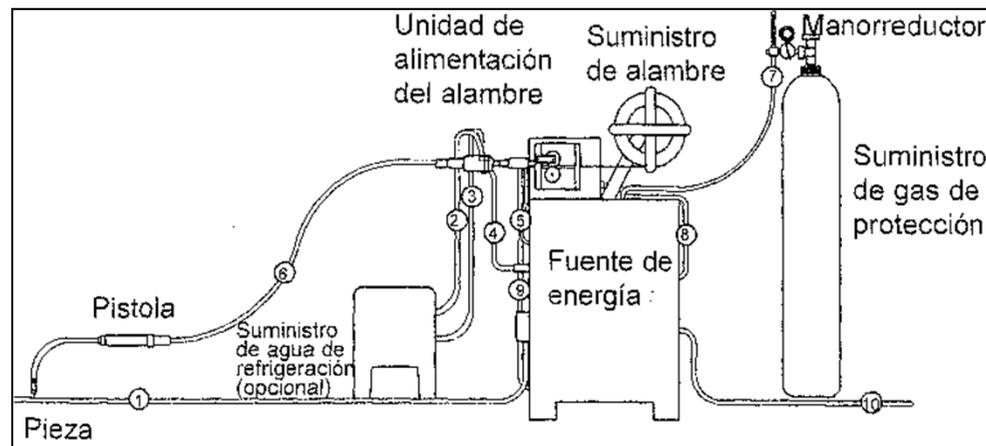
4.1. MIG - MAG (GMAW)

Aplicaciones:

- Es uno de los procesos más utilizados en la actualidad, y sus principales aplicaciones se centran en la construcción, la producción de tuberías, recipientes a presión, calderas y tanques de almacenamiento, construcción naval y las industrias automovilísticas, ferroviarias y aeronáuticas.

Equipo:

- Generador de corriente continua, se suele recurrir a equipos de potencial constante.
- Unidad de alimentación del hilo. Puede ser independiente o integrada en el propio generador. Es un pequeño motor que impulsa el hilo continuamente.
- Circuito de gas protector.
- Eventualmente, circuito de refrigeración (si se trabaja con $I > 300$ A).
- Pistola de soldadura.
- Conjunto de válvulas y órganos de reglaje de control.





4.1. MIG - MAG (GMAW)

- Generador de corriente: continua, se suele recurrir a equipos de potencial constante.

Debido a las peculiaridades del proceso MIG, se han desarrollado generadores de potencial constante, que presentan unas características voltaje-intensidad casi horizontal. Poseen autorregulación, que les permite mantener un arco de longitud prácticamente constante → suministran la intensidad adecuada a la velocidad de alimentación que se establezca.

- Sistema de alimentación del alambre: tira del hilo electrodo procedente de la bobina y lo empuja hacia la pistola de soldadura. Suele poseer reguladores de velocidad de alimentación del hilo, contactores para accionamiento del generador de soldadura, válvula para el control del agua en aquellos procesos que utilicen agua para su refrigeración. El sistema puede montarse sobre el mismo generador de soldadura o separado de él.
- Pistola de soldadura: dirige el hilo de aportación, el gas protector y la corriente hacia la zona de soldadura. Puede tener refrigeración natural (por aire) o refrigeración forzada (por agua). Algunas pistolas llevan incorporado un sistema de tracción que tira del electrodo y ayudan así al sistema de alimentación. Disponen de un gatillo o pulsador que controla el sistema de alimentación del alambre, la corriente de soldadura, la circulación del gas protector y la del agua de refrigeración.
- El coste del equipo puede estar entre los 1000 y los 3000 euros.





4.1. MIG - MAG (GMAW)

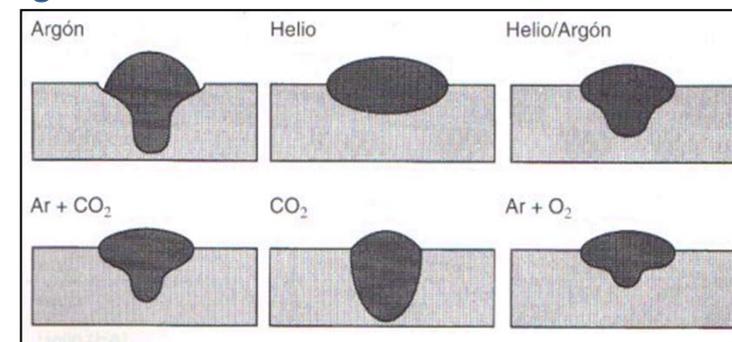
Electrodos:

- El electrodo consiste en un hilo macizo o tubular y continuo con un diámetro que oscila entre 0,8 y 1,6 mm. Si la intensidad es muy grande, se puede emplear hilo de 2,4 mm de diámetro.
- Generalmente, va recubierto de cobre para favorecer el contacto eléctrico con la boquilla, disminuir rozamientos y protegerlo de la oxidación.
- Dado sus pequeños diámetros, la relación superficie/volumen es muy alta. Esto implica que pequeñas partículas de polvo, grasa o suciedad puedan suponer una importante cantidad de relación con el volumen aportado, de aquí que sea de gran importancia la limpieza.
- El material de aportación es en general similar en composición química a la del metal base.

Gases de protección:

- Gas inerte (en MIG): tiene la ventaja de no reaccionar con los metales.
Gas activo (en MAG): reacciona con los metales, pudiendo producir proyecciones durante la soldadura y poros en el metal depositado.
- Gases inertes como el Ar y el He (MIG) caros → se buscó un gas protector más barato e igual de eficaz → CO₂ (MAG): no es tóxico y a T^a ambiente se puede almacenar en grandes cantidades.

GASES	APLICACIONES
Helio	Aluminio, magnesio y cobre
CO ₂	Aceros al carbono y débilmente aleados
Argón	Aluminio y magnesio
Argón + N ₂	Cobre





4.1. MIG - MAG (GMAW)

Métodos de transferencia del metal de aporte al metal base:

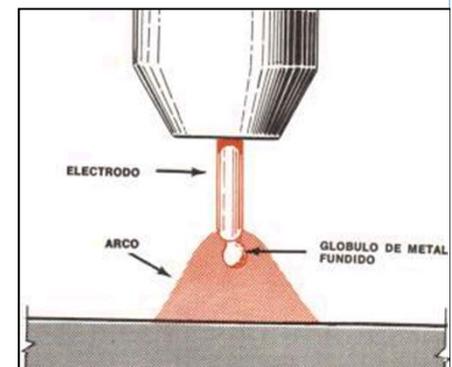
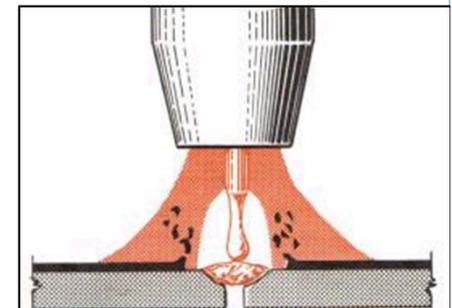
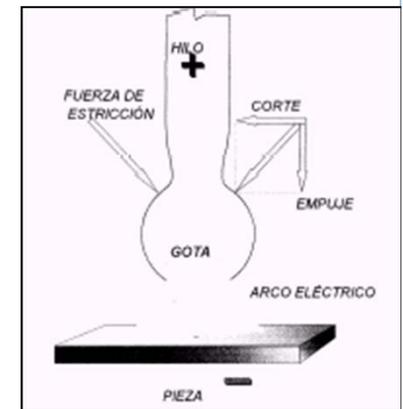
- La intensidad de corriente que circula a través del hilo y la atracción magnética entre el hilo y la pieza provocan la aparición de una fuerza de estricción en la parte final del hilo.
- La fuerza de estricción se descompone en dos: una corta la gota y la otra la empuja hacia la pieza a soldar.
- Cuanto mayor es la intensidad mayor es la fuerza de estricción (mejor caen las gotas y más gotas caen).

Transferencia por cortocircuito:

- Bajas tensiones e intensidades (V: 16-22V, I: 50-150 A). La gota de metal fundido que se forma en el extremo del hilo electrodo va aumentando su tamaño y se pone en contacto con el baño de fusión. Entonces se desprende del hilo y se transfiere a la pieza.
- Para todas las posiciones, espesores muy finos y muy baja penetración. Se suelen utilizar hilos de muy pequeño diámetro.

Transferencia globular:

- Corrientes de soldadura bajas (V: 20-35V, I: 70-255 A) → pocas gotas por segundo. La gota de metal fundido va creciendo hasta alcanzar 2 o 3 veces el diámetro del hilo, hasta que se desprende.
- Difícil controlar el metal de aportación, arco inestable, muchas proyecciones, sobreespesores elevados y penetración débil. No es un método muy recomendado.

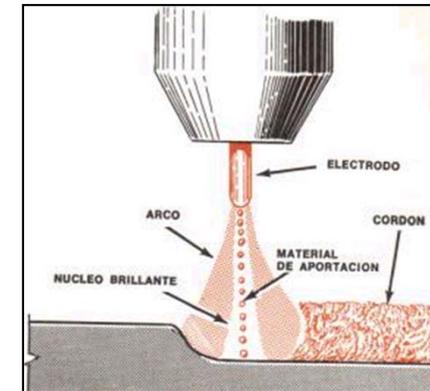




4.1. MIG - MAG (GMAW)

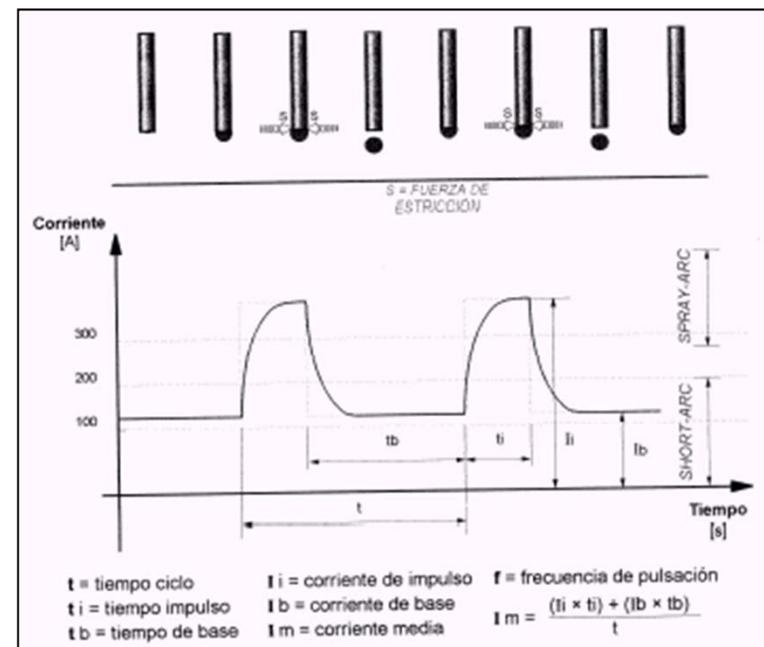
Transferencia arco-spray o por pulverización:

- Gotas muy pequeñas (diámetro igual o inferior al del electrodo), que se proyectan rápidamente en la dirección del hilo. El arco es muy estable y la pulverización ininterrumpida.
- Grandes intensidades y voltajes (V: 24-40V, I: 150-500 A), con Ar o mezclas Ar-O₂ (no CO₂).
- Es un método idóneo para espesores gruesos.



Transferencia arco pulsado:

- Modalidad del tipo spray → se produce por pulsos a intervalos regularmente espaciados, en lugar de suceder al azar como ocurre en el arco-spray.
- Necesita una corriente pulsada: corriente de baja intensidad constante (corriente de fondo o de base) que calienta el hilo y forma la gota + pulsos de intensidad elevada (corriente de pico) que separan la gota.
- Se reduce el calor → Permite soldar en spray secciones menores, en todas las posiciones y con menores deformaciones.
- Sin embargo, coste elevado del equipo y dificultad de establecer los parámetros adecuados de soldeo.





4.1. MIG - MAG (GMAW)

Parámetros de soldeo:

- Tipo de corriente y polaridad: corriente continua; la polaridad influye muchísimo en el comportamiento del arco, la penetración y la velocidad de fusión.
 - Se suele trabajar con fuentes de tensión constante, ya que la velocidad de salida del hilo es constante. Para trabajar con una fuente de intensidad constante sería necesario un alimentador de alambre de velocidad variable. Conviene recordar:
$$\begin{array}{l} \text{Longitud del arco } \uparrow \rightarrow \text{Tensión } \uparrow \\ \text{Veloc. alimentación del alambre } \uparrow \rightarrow \text{Intensidad } \uparrow \\ \text{Intensidad } \uparrow \rightarrow \text{Tasa de deposición } \uparrow \end{array}$$
 - Habitualmente polaridad inversa: permite obtener mejores resultados, ya que la mayor parte del calor se concentra sobre el baño de fusión y se ejerce una gran acción de limpieza sobre éste. Para disminuir la penetración se usa la polaridad directa.
- Tensión e Intensidad: Se recomienda para proporcionar el calor necesario un arco de bajo voltaje (18-40 V) y alta intensidad (60-450 A).
 - Tensión: Determina la forma de transferencia de metal. Para cordones anchos y de poca penetración \rightarrow tensión elevada; para cordones estrechos y abultados \rightarrow una tensión baja.
 - Intensidad: Función del calor necesario en el arco para fundir el espesor de la chapa, el diámetro del electrodo, la penetración deseada y la posición de soldeo. Se regula conjuntamente con la tensión. Mayor tensión e intensidad \rightarrow mayor densidad de soldeo y un mayor calor aportado.
- Diámetro del electrodo: pequeños, ya que favorecen la estabilidad del arco y la formación de gotas muy pequeñas que mejoran notablemente la transferencia del metal durante la soldadura.



4.1. MIG - MAG (GMAW)

Comparación MIG – MAG:

Criterio	MIG	MAG
Gas de protección	Inerte. Normalmente Argón	Activo. CO ₂ o mezclas
Generador	De potencial constante y gran capacidad	De potencial constante
Metales a soldar	Acero inoxidable, cobre y aluminio	Sólo aceros ordinarios
Espesores de soldeo	Medios y gruesos	Todos
Posiciones de soldeo	Sólo fáciles	Todas
Regulación	Poco sensible	Exige precisión
Visibilidad	Buena	Regular
Proyecciones	Raras	Abundantes
Limpieza de bordes	Exige poca limpieza	Admite piezas oxidadas
Humos	Poco molestos	Pueden ser nocivos



4.2. Soldadura con electrodo tubular (FCAW)

Descripción:

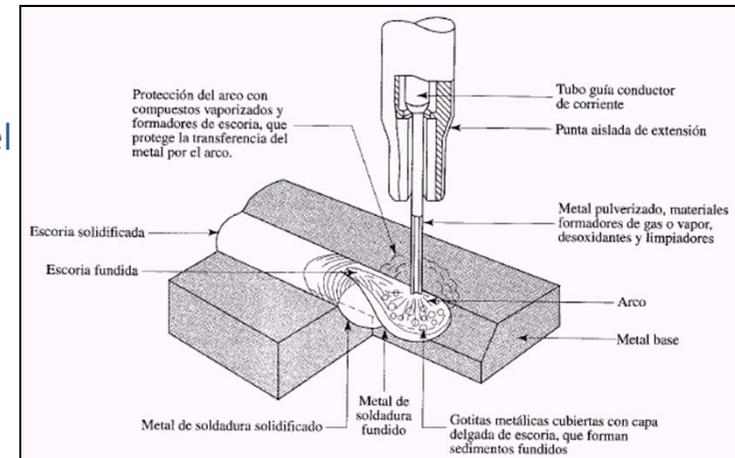
- Arco eléctrico entre alambre-electrodo tubular consumible y pieza.
- 3 posibles tipos de protección: fundente (*flux*) en el interior del alambre tubular, gas adicional (activo o inerte).

Denominaciones:

- FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*) según AWS.
- 114 (sin gas), 136 (con gas activo) o 137 (con gas inerte) según UNE-EN 4063.

Características:

- Similar al MAG-MIG, salvo por el relleno de fundente del electrodo. También tiene características del soldeo con electrodo revestido y con arco sumergido (se vio en ese apartado del tema anterior).
- Combina: versatilidad de soldeo con electrodo revestido + alimentación continua y automática del electrodo del MAG-MIG.
- Estos electrodos producen un arco más estable, mejoran el contorno del cordón y producen mejores propiedades mecánicas del metal de soldadura.
- Fundente más flexible que el recubrimiento de los electrodos en otros procesos → electrodos en tramos largos y enrollados → automatización.
- Pequeños diámetros de electrodos (de 0,5 a 4 mm) → soldadura de pequeños espesores.
- Con elementos de aleación en el *flux* → formulaciones específicas del metal de aporte.
- Gran productividad → Proceso económico (equipo entre 1000 y 3000 euros).
- Desventaja: gran cantidad de humos y generación de escoria (que hay que eliminar).





4.3. TIG (GTAW)

Descripción:

- Arco entre un electrodo no consumible de Tungsteno (Volframio) y la pieza a soldar, protegido por un gas inerte.
- Si es necesario material de aporte, se suministra exteriormente

Denominaciones:

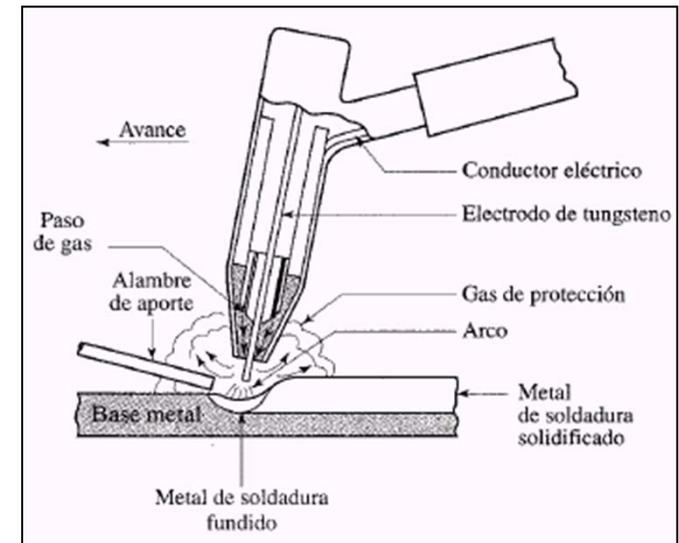
- GTAW (*Gas Tungsten-Arc Welding*) según AWS, antes TIG (*Tungsten Inert Gas*).
- 141 según UNE-EN 4063.

Ventajas:

- Proceso adecuado para unir la mayoría de los metales.
- Arco estable y concentrado.
- No se producen proyecciones ni escoria.
- Produce soldaduras lisas y regulares → alta calidad.
- Alta velocidad de soldeo en espesores finos (por debajo de 4 mm).
- Permite un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.

Inconvenientes:

- No resulta económico para espesores mayores de 10 mm.
- En presencia de corrientes de aire puede resultar difícil conseguir una protección adecuada de la zona de soldadura.
- Su aplicación manual exige, en general, gran habilidad por parte del soldador.
- Tasa de deposición menor que la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo por arco.





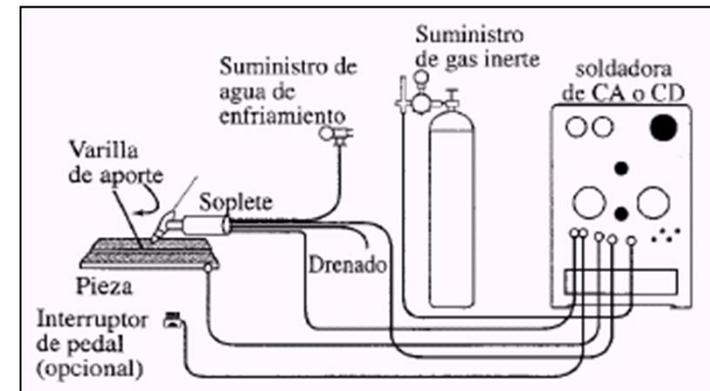
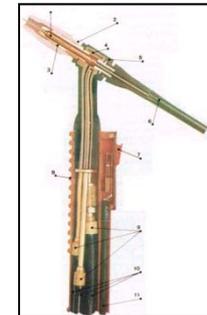
4.3. TIG (GTAW)

Aplicaciones:

- Es un procedimiento manual, automático e incluso robotizable. Se utiliza en espesores inferiores a 5-6 mm y conjuntamente con otros procedimientos más económicos (SMAW, MIG-MAG) → Asegura en una primera pasada, una penetración regular, utilizando después los otros procedimientos de relleno.
- En aceros inoxidable, al cromo-molibdeno resistentes al calor, aluminio, níquel y sus aleaciones y en la soldadura de metales sensibles a la oxidación, como el titanio y el circonio..
- Para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, de alimentación, de generación de energía, etc.

Equipo:

- Elementos básicos: Generador de CC y/o CA igual que los utilizados en la soldadura manual con electrodos revestidos; generador de alta frecuencia o generador de impulsos, para resolver el problema del cebado y estabilidad del arco con electrodo desnudo, fundamentalmente en corriente alterna; circuito de gas; portaelectrodos; refrigeración por aire o agua; conjunto de válvulas y órganos de control.
- Es portátil y su coste puede estar entre los 1000 y los 5000 euros.





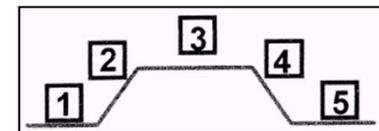
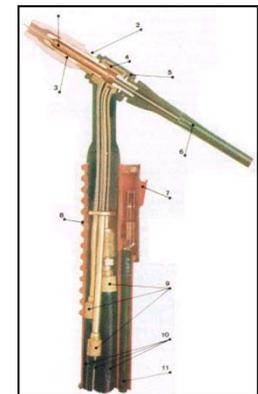
4.3. TIG (GTAW)

Fuente de energía: continua (polaridad directa o inversa) o alterna:

- CC: polaridad recomendada directa; la inversa implica intensidades muy bajas para que no se sobrecaliente el electrodo.
- CA: une las ventajas de las dos polaridades: buen comportamiento en el semiciclo de polaridad directa y efecto decapado en el semiciclo de polaridad inversa → para aleaciones ligeras (Al y Mg).
Inconvenientes: dificultades de cebado y de estabilidad del arco.
- De intensidad constante o característica descendente: para que el arco se vea poco afectado por las variaciones de longitud (es un proceso manual). Para eliminar posibles factores de variación de la intensidad se emplean generadores con regulación electrónica.
- Se puede trabajar con fuentes de corriente pulsada.

Pistola portaelectrodo: conduce la corriente y el gas de protección hasta la zona de soldeo.

- Refrigeradas por aire (refrigeración natural) o por agua (refrigeración forzada) si la I es elevada ($I > 200$ A).
- El ciclo que siguen el gas y la corriente es:
 1. Pregas: envía gas antes del cebado → expulsa aire ambiental → evita oxidación y asegura un mejor cebado.
 2. Intensidad inicial y rampa ascendente.
 3. Intensidad nominal.
 4. Desvanecimiento del arco: evita rechupes.
 5. Postgas: continúa la protección gaseosa tras el arco.





4.3. TIG (GTAW)

Pistola portaelectrodo: conduce la corriente y el gas de protección hasta la zona de soldeo.

- Refrigeradas por aire (refrigeración natural) o por agua (refrigeración forzada) si la I es elevada ($I > 200 \text{ A}$).

Electrodos:

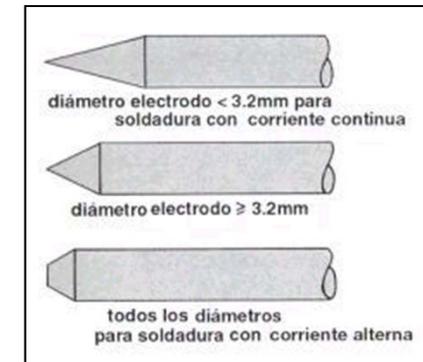
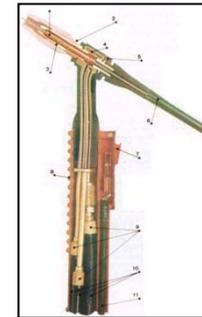
- No consumibles (mantienen el arco sin aportar material al baño de fusión).
- Preferibles electrodos de Tungsteno aleado \rightarrow un establecimiento de arco más fácil y una mayor estabilidad.
Aleados con Torio (2%) \rightarrow arco más direccional; Pto. Fusión = 4000°C \rightarrow con CC
Aleados con Circonio (2%) \rightarrow Pto. Fusión = 3800°C \rightarrow soldadura de Al con CA.
- Diámetro en función de la intensidad y el tipo de corriente.
CC \rightarrow punta muy afilada (para mejor acceso) y menos desgaste.
CA \rightarrow suficiente pequeño chaflán (la punta se redondea cuando el arco está operando).

Material de aporte: similar al material base

- No siempre es necesario. Especialmente en espesores pequeños ($< 3\text{mm}$).

Gases de protección:

- El más utilizado es el Ar (para todos los metales), aunque también se utiliza el He, o mezclas de ambos.
- Mezclas Ar-He: para aceros inoxidables y aleaciones de alta conductiv. térmica. Dan mayor penetración y la soldadura suele ser más rápida, aunque el cebado del arco es más complicado.
- Mezclas de Ar-H₂ (de un 2% a un 5% de H₂): para el acero inoxidable y aleaciones de Níquel. Esta mezcla permite utilizar una mayor tensión del arco, aumentando la penetración.

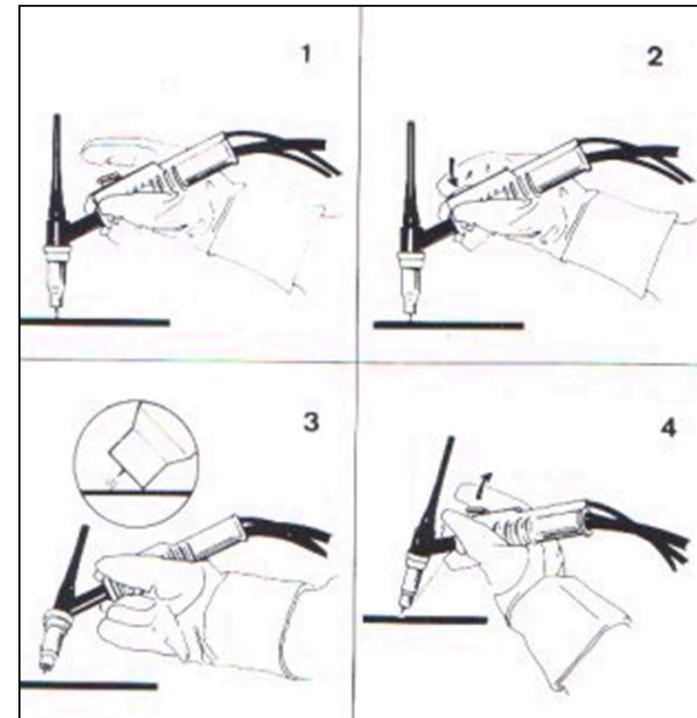




4.3. TIG (GTAW)

Cebado del arco:

- Aspecto crítico: conviene evitar el contacto del electrodo con la pieza, para evitar el depósito de polvo u ocasionar una inclusión de tungsteno en el cordón.
- En CA: Se utiliza cebado por alta frecuencia (HF), entre el generador y la pistola.
 - Se establece una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza mediante la regulación del voltaje, se coloca el portaelectrodos en posición horizontal a unos 5 cm de la superficie. Después se gira el electrodo mediante un movimiento suave de muñeca, posicionándolo perpendicularmente a la superficie de la pieza hasta que diste unos 3 mm. Entonces, como consecuencia de la corriente de alta frecuencia, el aire se hace conductor y se establece el arco.
- En CC:
 - Se sitúa el portaelectrodo en posición horizontal y a unos 50 mm de la pieza, luego se gira hasta que el electrodo toca la superficie de la pieza, momento en que el arco queda cebado; a continuación se retira hasta una distancia de unos 3 mm





4.3. TIG (GTAW)

Variantes del proceso:

Arco pulsado:

- Corriente pulsada: la intensidad varía cíclicamente entre un valor mínimo y uno máximo.
- Resultado: puntos que se solapan hasta formar un cordón continuo.
- Ventajas: menor aporte térmico, mayor penetración y mejor control del baño en condiciones difíciles (menos sensible a variaciones de posición).
- Se utiliza para pequeños espesores y soldadura circular para tubos. Cuando el diámetro del tubo es pequeño, proporciona una penetración y una longitud de cordón regulares y evita que la Tª suba demasiado.

Con hilo caliente:

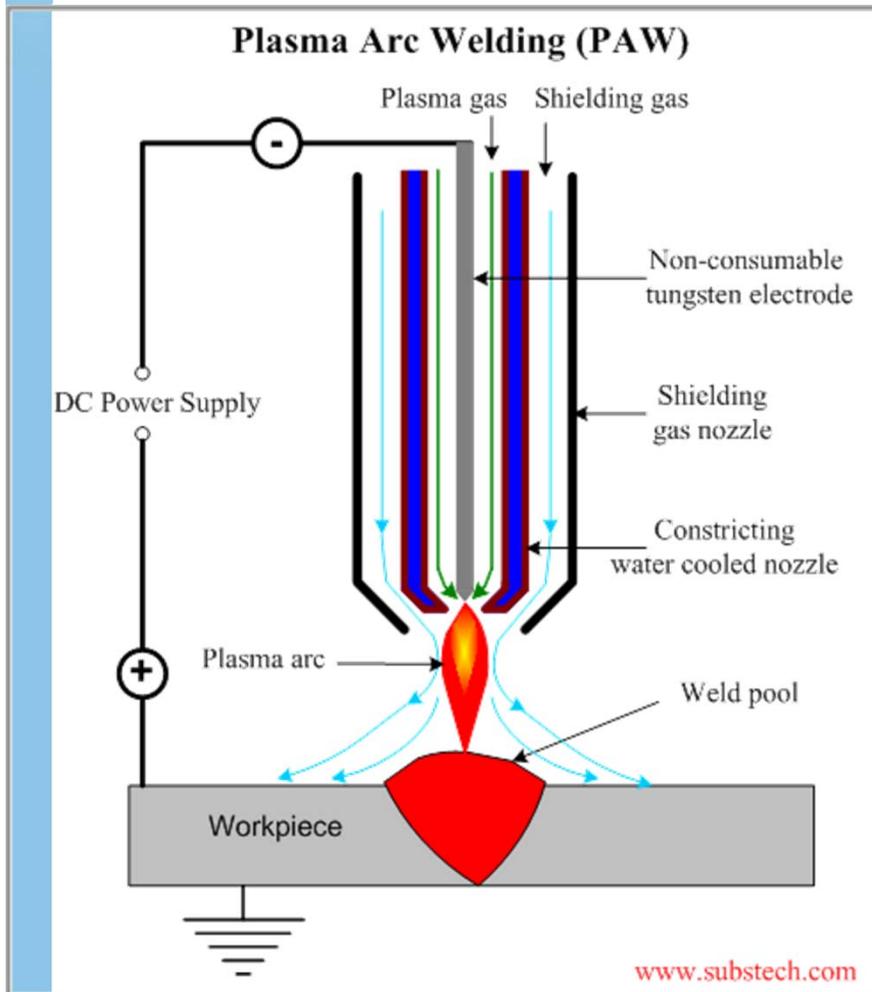
- Se precalienta la varilla aportada de forma continua → entra a alta Tª en el baño y se funde más rápido → altas velocidades de aportación.
- Ventajas: mayor velocidad de soldeo, menor riesgo de sopladuras y menor peligro de falta de fusión.

Soldadura de Al:

- Las planchas de material están recubiertas de alúmina, con Tª de fusión de 2000°C, mientras que el aluminio funde a 685°C.
- Es necesario romper la capa de óxido sin deteriorar el material con una penetración excesiva → soldadura en CA, con frecuencia de 100 a 120 Hz.



4.3.1. Soldadura por Plasma (PAW)



Temperatura de trabajo de 33000°C, I menores de 100A.

Electrodo de tungsteno

Posibilidad de aporte de material (similar al TIG)

Separación entre aporte de calor y material de aportación.

Proceso manual aunque permite la automatización

Ventajas

- Alta densidad de energía
- Reducción de la preparación (chaflanes)
- ZAT pequeña (menor que en TIG) y de caras paralelas.
- Generalmente para espesores menores de 6mm pero puede llegar hasta 20mm
- Velocidad de soldeo (120 a 1000mm/min)

Aplicaciones

- Tubos, espesores delgados, pasadas de raíz (similares al TIG)
- Prácticamente todos los metales comerciales



5. Sold. con energía química: Sold. de gas (OFW)

Descripción:

- Utiliza el calor producido por una llama, obtenida de la combinación de un gas combustible con un gas comburente, para fundir el metal base y, si se emplea, el metal de aportación.
- Gas combustible: acetileno (el más utilizado), propano, gas natural, etc.
- Gas comburente: oxígeno.
- La llama oxiacetilénica también se puede utilizar para cortar metales, lanzando una corriente de oxígeno hacia el metal cuando se encuentre al rojo (Oxicorte).

Denominaciones:

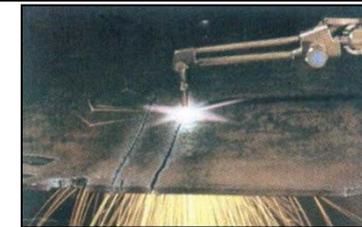
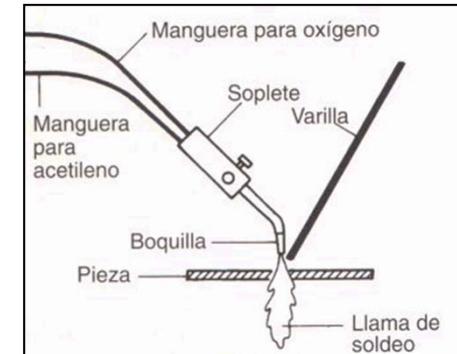
- OFW (*Oxy-Fuel Welding*); si se usa acetileno OAW (*Oxy-Actilene Welding*), según AWS.
- 31 soldeo con gas; 311 soldeo oxiacetilénico, según UNE-EN 4063.

Ventajas:

- El soldador tiene control sobre la fuente de calor y sobre la temperatura de forma independiente del control sobre el metal de aportación.
- Equipo de soldeo de bajo coste, suele ser portátil y de gran versatilidad → para reparaciones.

Inconvenientes:

- Se producen grandes deformaciones y tensiones internas causadas por el elevado aporte térmico debido a la baja velocidad de soldeo.
- Proceso lento, de baja productividad y destinado a espesores pequeños (para grandes espesores es más económico el soldeo por arco eléctrico).

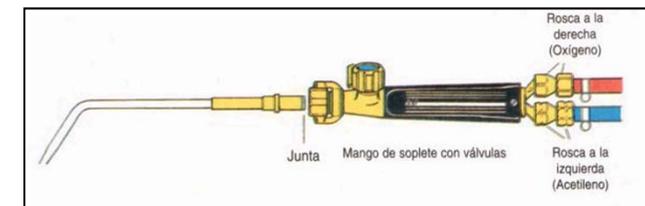
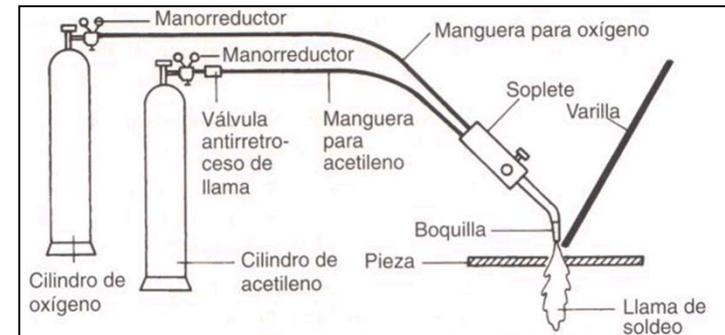




5. Sold. con energía química: Sold. de gas (OFW)

Equipo:

- Elementos básicos: Botellas (cilindros) de acetileno y oxígeno, mangueras, soplete y válvulas de seguridad y antirretroceso.
- Soplete: sirve para mezclar el acetileno y el oxígeno en las proporciones adecuadas y suministrar la mezcla a una velocidad que permita establecer una llama estable.
 - De baja presión: conductos separados de oxígeno y acetileno.
 - De alta presión: con inyector. El acetileno y el oxígeno se alimentan con presiones similares y se mezclan en el dispositivo mezclador.
- Reguladores de presión: Cumplen dos funciones básicas: reducen la presión del cilindro a un nivel aceptable para los sopletes y mantienen una presión constante en el soplete.
- Mangueras para oxígeno y acetileno: Se utilizan para la conducción de los gases de soldadura. Son especiales y no presentan poros. Para su conexión a los reguladores y los sopletes se utilizan acoplamientos normalizados.
- El coste suele ser menor de 500 euros para unidades pequeñas.





5. Sold. con energía química: Sold. de gas (OFW)

Llamas para soldadura con gas:

- En el caso del acetileno la reacción que se produce es:

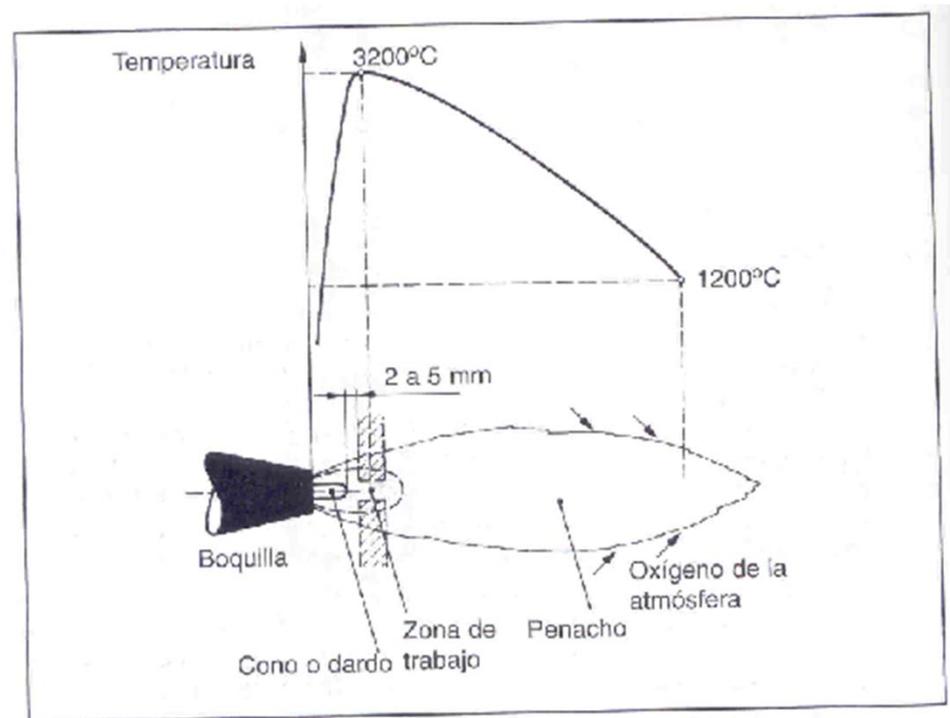
Disociación del acetileno: $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + \text{calor}$ (1/3 del calor generado en la llama)

Quemado del H_2 y CO : $2CO + H_2 + 1,5O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O + \text{calor}$ (2/3 del calor generado en la llama)

- Como resultado de las reacciones $\rightarrow T^a$ en llama de hasta 3300°C .

Zonas de la llama:

- dardo (combustión del acetileno)
- zona de trabajo (zona de máxima T^a)
- penacho (combustión del resto de productos \rightarrow el O_2 del aire no entra en contacto con los metales a unir \rightarrow protección ante oxidación).





5. Sold. con energía química: Sold. de gas (OFW)

Tipos de llama:

- Llama carburante: cuando la mezcla tiene un exceso de acetileno. Se forma una zona de color amarillo claro luminoso delante del dardo de la llama.

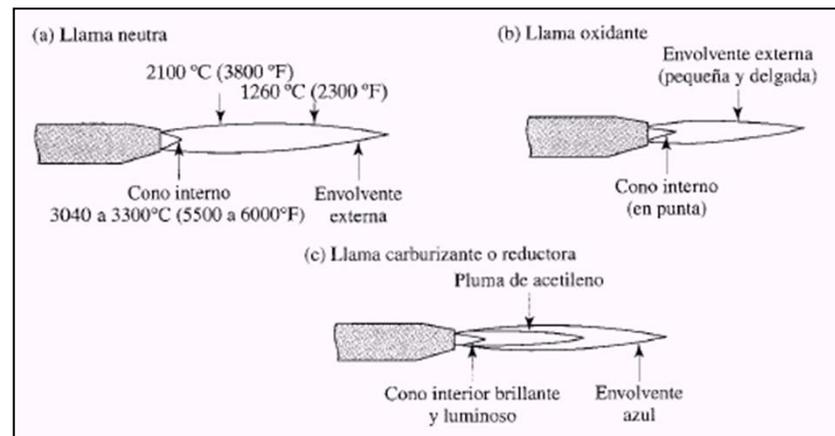
Menor T^a → Se utiliza para la soldadura de aceros al carbono, aceros fundidos y sus aleaciones, aluminio fundido y aceros especiales.

- Llama neutra: partiendo de la llama carburante, se disminuye la cantidad de acetileno y se aumenta la cantidad de oxígeno alternativamente, hasta que desaparezca la llama carburante.

Se utiliza para soldar piezas de materiales como el hierro fundido, acero maleable, bronce, acero inoxidable, acero al cromo-níquel, cobre, latón, aluminio y sus aleaciones.

- Llama oxidante: Partiendo de la llama neutra, se disminuye la cantidad de acetileno y se aumenta la cantidad de oxígeno alternativamente, hasta que la zona reductora desaparece.

Perjudicial para los aceros (los oxida) → Se utiliza en las soldaduras de latón, con grandes porcentajes de zinc y aleaciones de cobre.

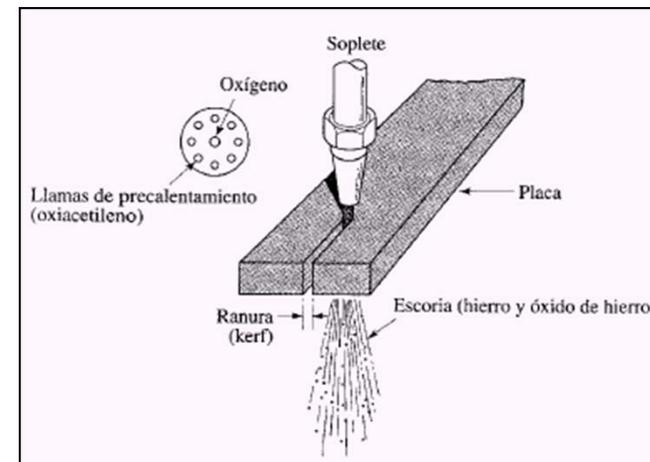
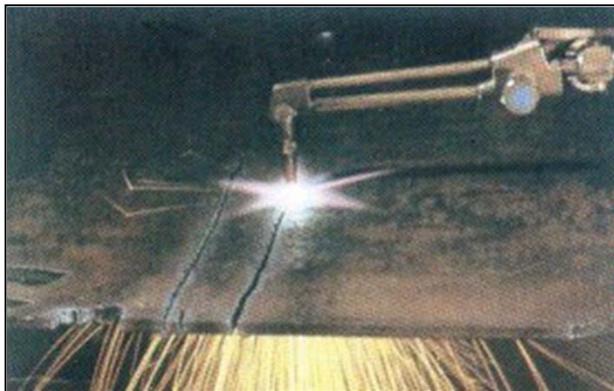




5. Sold. con energía química: Sold. de gas (OFW)

Oxicorte:

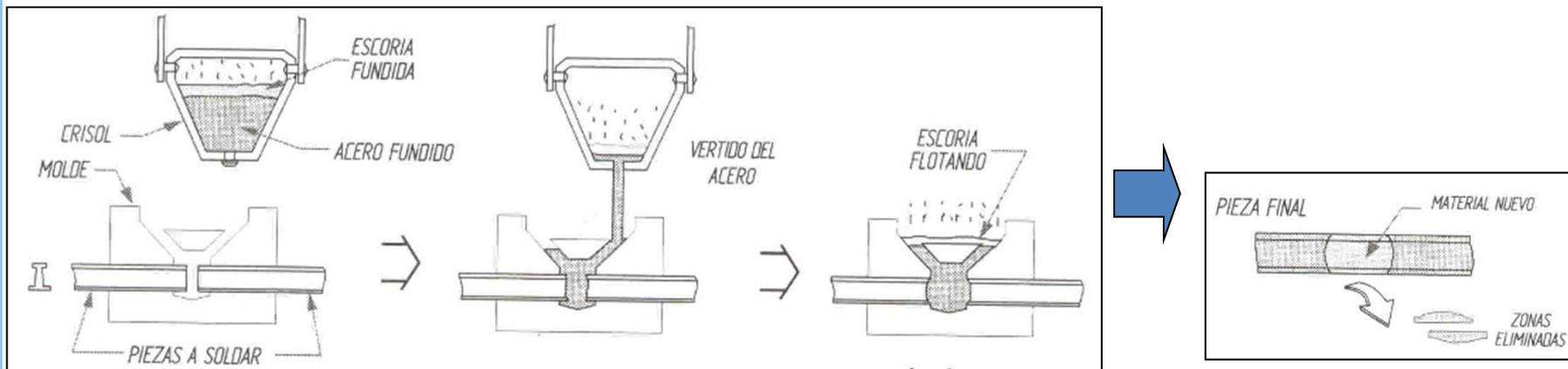
- Consiste en cortar un metal mediante la proyección de un chorro de oxígeno puro sobre la superficie previamente calentada (a T° superior a las de ignición e inferior a la de fusión), con un soplete que está alimentado por un gas combustible y un gas comburente, que intensifica la combustión.
- Se utiliza para aceros sin alear o débilmente aleados. El proceso de oxicorte se utiliza para espesores de chapa comprendidos entre 0,8 y 250 mm (dependiendo del gas utilizado).
- Gases combustibles: acetileno y el propano (alcanza menor T° : 2800°C), aunque también se pueden usar el butano, el isobutano y algunos biogases.
- Soplete: formado por un mango, una boquilla, llaves para la admisión de oxígeno y gas de calentamiento, y un gatillo para el disparo del dardo de oxígeno.
- La boquilla está mecanizada para que el oxígeno y el gas de calentamiento envuelvan a su salida el chorro de oxígeno de corte que será disparado mediante el accionamiento del gatillo.





5. Sold. con energ. química: Sold. Aluminotérmica (TW)

- También llamada con termita (TW: *Thermit Welding*).
- Termita: marca comercial de una mezcla de polvo de aluminio y óxido de hierro que reacciona exotérmicamente (alcanza $T^a > 2200^{\circ}\text{C}$ en un solo minuto).
- Proceso:
 1. Se alinean las piezas a unir (con un hueco entre ellas) dentro de un molde.
 2. En un crisol se genera la reacción exotérmica (con ayuda de polvos de ignición para iniciarla).
 3. En el crisol el metal fundido se sitúa en el fondo, con la escoria de alúmina flotando.
 4. Se vierte el metal en el molde.
 5. La alta T^a del metal fundido provoca la fusión del metal base y la soldadura.
- Aplicaciones: unión de raíles de ferrocarril, reparación de grietas de piezas de gran volumen (grandes ejes, cajas para máquinas, etc.).
- Posee una gran profundidad de penetración, pero necesita de moldes, crisol, etc. lo que limita su aplicación y la encarece.





6. Sold. con energía radiante: Sold. con láser (LBW)

Descripción:

- Proceso de fusión en el que se obtiene un calentamiento localizado mediante la energía de un láser (haz luminoso coherente altamente concentrado y enfocado).
- No es necesario contacto mecánico con la pieza y el material no tiene por qué ser conductor de la electricidad.
- Son necesarios gases protectores para evitar oxidación.
- No se aporta material.
- Rayo muy focalizado → gran densidad de energía → uniones profundas y delgadas.

Denominaciones:

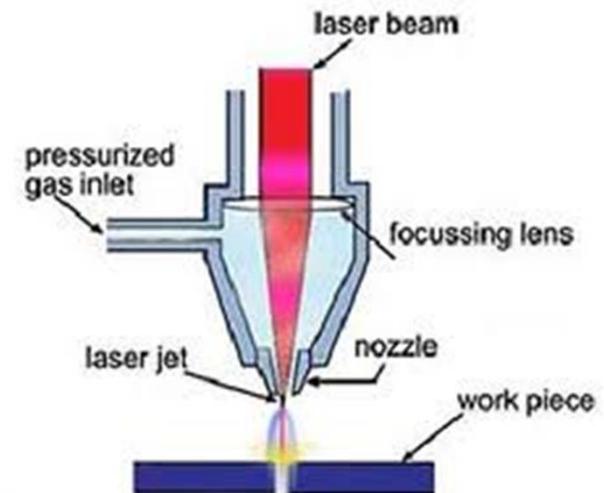
- LBW (*Laser-Beam Welding*), según AWS.

Ventajas:

- Mínima ZAT del metal base.
- Ausencia casi total de distorsión en la pieza soldada.
- Posibilidad de automatización del proceso (mediante el uso del control numérico y los robots).
- Facilidad de integración del sistema en líneas de producción ya existentes.
- Especialmente eficaz en piezas delgadas.

Inconvenientes:

- Alta inversión inicial: coste equipo de 40.000 a 1 millón de euros.
- Parámetros críticos de incidencia del gas de protección sobre la pieza a soldar
- Precauciones extremas requeridas en la preparación de la pieza a ser soldada (medidas de seguridad → peligrosidad del láser en los ojos).

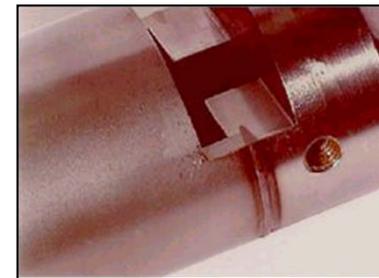
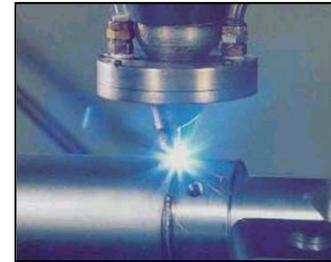




6. Sold. con energía radiante: Sold. con láser (LBW)

Aplicaciones:

- Soldadura de componentes de transmisiones en la industria del automóvil, soldadura de piezas delgadas para componentes electrónicos.
- Materiales: aluminio, titanio, metales ferrosos, cobre, superaleaciones y metales refractarios.
- Automatización, con velocidades entre 2,5 m/min y 80 m/min.



Corte por láser:

- La energía del láser es absorbida por el material a cortar que se funde o vaporiza y hace que se produzca el corte.
- Además del láser, se ha de usar un flujo coaxial de gas de aporte.
- Para evitar la reflexión de las superficies metálicas durante el corte se debe recurrir a altas densidades de potencia.
- Aplicaciones: para corte preciso de una gran variedad de metales, con un acabado superficial mejor que otros procesos térmicos de corte (oxicorte).





6. Sold. con E. radiante: Sold. con haz de electrones (EBW)

Descripción:

- Se genera calor mediante los electrones de un haz fino y de alta velocidad (la energía cinética de los electrones se convierte en calor al chocar con la pieza).
- Es necesario un equipo especial para enfocar el haz de electrones en la pieza en el vacío.
- Mayor vacío → Mayor penetración y relación profundidad / anchura.
- Aplicaciones: componentes de aviones, de misiles, nucleares y electrónicos. Ejes y engranajes de automóvil.

Denominaciones:

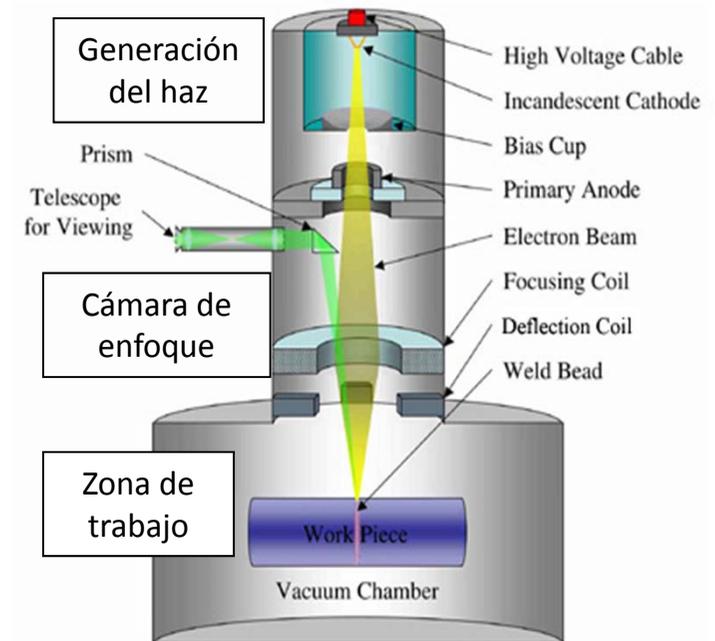
- EBW (*Electron-Beam Welding*), según AWS.

Ventajas:

- Válido para casi todos los metales, incluso los refractarios.
- Amplio rango de espesores (desde membranas hasta 150 mm).
- Muy alta calidad de soldadura, con gran profundidad y sin necesidad de fundentes ni gases protectores.
- Calor muy concentrado → ZAT y distorsiones mínimas.

Inconvenientes:

- La necesidad de realizar el vacío para cada pieza → elevados costes y tiempos.
- Coste equipo (de 75.000 a más de 1 millón de euros).
- Generación de rayos X → problemas de seguridad.





7. Comparación entre procesos

- Breve comparación entre los diferentes procesos de soldadura por fusión:

Proceso de unión	Operación	Ventaja	Capacitación requerida	Posición de soldar	Tipo de corriente	Distorsión*	Costo del equipo
Arco y metal protegido	Manual	Portátil y flexible	Alto	todas	ac, dc	1 a 2	Bajo
Arco sumergido	Deposición automática	Medio alto	Bajo a horizontal	Plana y horizontal	ac, dc	1 a 2	Medio
Arco, metal y gas	Semiautomática o automática	Mayor parte de metales	Bajo a alto	todas	dc	2 a 3	Medio a alto
Arco de tungsteno y gas	Manual o automática	Mayor parte de metales	Bajo a alto	todas	ac, dc	2 a 3	Medio
Arco con núcleo de fundente	Semiautomática o automática	Gran deposición	Bajo a alto	todas	dc	1 a 3	Medio
Oxicombustible	Manual	Portátil y flexible	Alto	todas	—	2 a 4	Bajo
Haz de electrones, rayo láser	Semiautomática o automática	Mayor parte de metales	Medio a alto	todas	—	3 a 5	High

* 1, más alto; 5, más bajo



Procesos de unión:
Soldadura sin fusión del metal
base y soldadura sólida





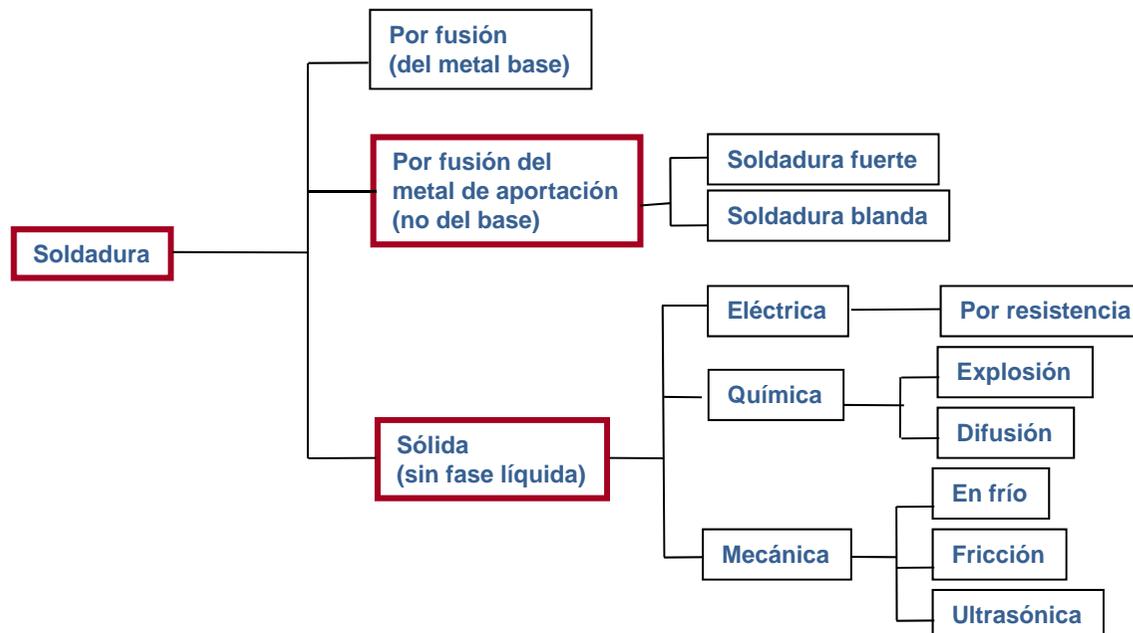
Índice

1. Introducción
2. Soldadura fuerte y soldadura blanda
3. Soldadura en estado sólido
 - 3.1. Soldadura por resistencia
 - 3.2. Soldadura con acción química
 - 3.3. Soldadura con acción mecánica



1. Introducción

- **Soldadura sin fusión del metal base:**
conjunto de procesos en los cuales la unión de los metales se efectúa a una temperatura inferior a la de fusión del metal base.
- **Tipos de soldadura sin fusión del metal base:**
 - Por fusión del metal de aportación (pero no del metal base).
 - Sólida: no existe fase líquida en ninguno de los metales.





2. Soldadura fuerte y soldadura blanda

Descripción:

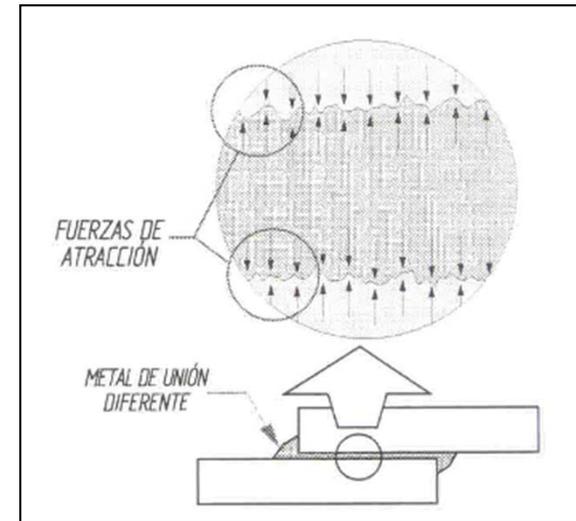
- La unión de las piezas a soldar se realiza con el aporte de otro material con menor punto de fusión. El calentamiento funde el metal de aporte, pero no alcanza la T^a de fusión de los metales originales.
- La unión que se obtiene es debida a la atracción o adhesión de las superficies en contacto.
- Se pueden usar fundentes para evitar la oxidación.
- Soldadura fuerte \rightarrow pto. fusión del metal de aporte $> 450^{\circ}\text{C}$
Soldadura blanda \rightarrow pto. fusión del metal de aporte $< 450^{\circ}\text{C}$

Ventajas:

- Se pueden soldar metales distintos o con poca soldabilidad.
- No fusión \rightarrow se evitan los problemas metalúrgicos y las distorsiones geométricas son mínimas.
- Unión de piezas difícilmente soldables por métodos de fusión: chapas finas, elementos muy pequeños, etc. \rightarrow piezas de precisión.
- Fácilmente automatizable.

Inconvenientes:

- Menor resistencia y continuidad que con soldadura por fusión.
- A altas T^a (próximas a la de fusión del metal de aporte), la unión se debilita considerablemente.
- El diseño de las piezas y su preparación son complicados y costosos.
- Aplicación difícil o costosa en piezas grandes.





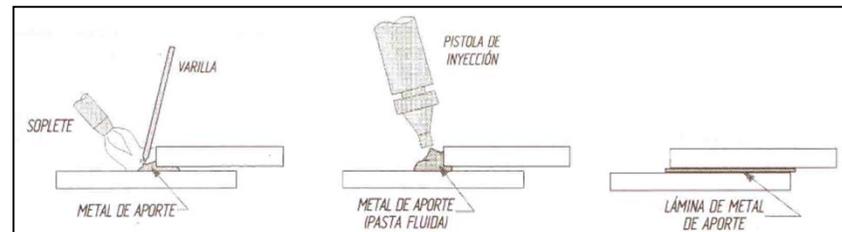
2. Soldadura fuerte y soldadura blanda

Aplicaciones:

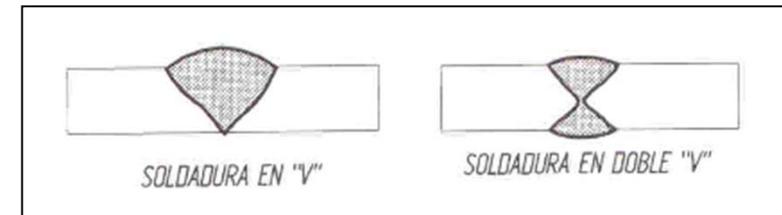
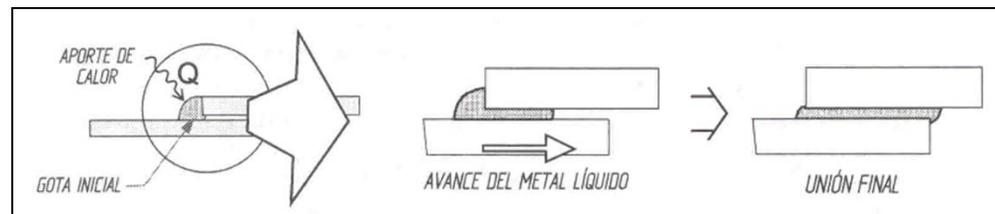
- En general: unión de piezas de pequeños tamaños, de diferentes materiales y de diseño complejo.
- Fuerte: plaquitas de corte, intercambiadores de calor, componentes de automóvil, etc.
- Blanda: componentes electrónicos, piezas ornamentales, etc.

Proceso:

- Aporte de material: con varilla exterior (fundiendo con soplete), pasta semifluida o preformas (láminas, arandelas, etc.) dependiendo de la posibilidad de automatización, sistema de calentamiento, geometría piezas, etc.



- Método de relleno: por capilaridad en el hueco entre las piezas o por gravedad (huecos grandes y piezas separadas con juntas en V o doble V).





2. Soldadura fuerte y soldadura blanda

Metal de aportación:

- Las características que debe cumplir son:
 - Capacidad de mojar al metal base
 - T^a de fusión (inferior a la del metal base)
 - Buena fluidez para permitir su distribución, por atracción capilar en las uniones.
 - Ser capaz de producir una unión soldada que cumpla los requisitos de resistencia mecánica y a la corrosión en estado normal de servicio.
- Se utilizará cada metal de aportación para un rango de temperaturas dadas. Este rango de temperaturas depende de la composición química del material.

Metal base	Metal de aporte	Temperatura de unión (°C)
Aluminio y sus aleaciones	Aluminio-silicio	570–620
Aleaciones de magnesio	Magnesio-aluminio	580–625
Cobre y sus aleaciones	Cobre-fósforo	700–925
Ferrosos y no ferrosos (excepto aluminio y magnesio)	Aleaciones de plata y cobre, cobre-fósforo	620–1150
Aleaciones a base de hierro, níquel o cobalto	Oro	900–1100
Aceros inoxidables, aleaciones base níquel y cobalto	Níquel-plata	925–1200



2. Soldadura fuerte y soldadura blanda

Fundentes:

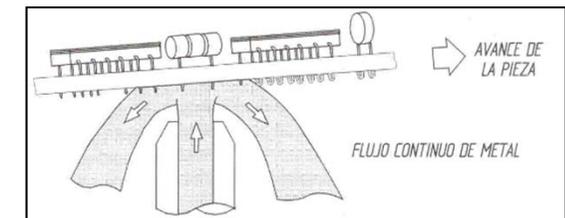
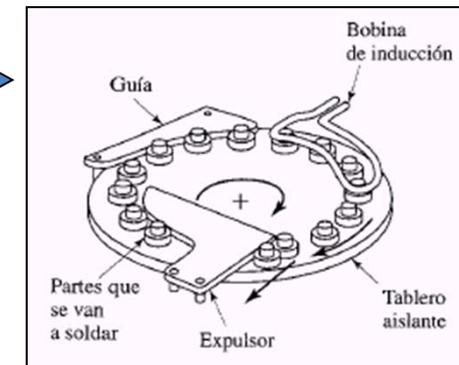
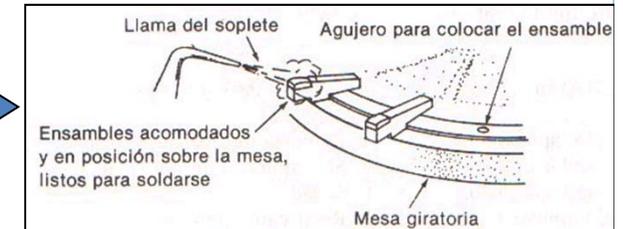
- Son esenciales en la soldadura fuerte.
- Funciones principales:
 - Aislar del contacto del aire
 - Disolver y eliminar los óxidos que puedan formarse
 - Favorecer el "mojado" del metal base por el metal de aportación fundido, consiguiendo que el metal de aportación pueda fluir y se distribuya en la unión.
- Modo de aplicación:
 - Limpiar y dejar libres de óxido, aceite y otros contaminantes las superficies a soldar.
 - Depositar el fundente sobre el metal base.
 - Soldar (el calor de la soldadura funde el fundente).
 - Finalizada la operación, eliminar (con agua caliente) los restos de fundente (es corrosivo).
- Tipos de fundentes:
 - Mezclas de muchos compuestos químicos: boratos, fluoruros, ácido bórico, etc.
 - Se suministran en polvo, pasta (el más usado) o líquido.



2. Soldadura fuerte y soldadura blanda

Procesos de soldadura: según el método de calentamiento:

- Soldadura fuerte y blanda con soplete: es la más utilizada hoy en día por su flexibilidad y bajo coste. Sin embargo es lento.
- Soldadura fuerte y blanda en horno: el calentamiento es uniforme → reducción de la deformación. Para producción masiva.
- Soldadura fuerte y blanda por inducción: corriente alterna de inducción de alta frecuencia → generación de calor. Para producción masiva.
- Soldadura fuerte y blanda por resistencia: calor por la resistencia de la pieza al paso de la corriente. Bajo coste. Para piezas peqñs.
- Soldadura fuerte y blanda por inmersión: la pieza se sumerge en un baño de sal fundida, para calentarla. El baño puede tener acción de fundente.
- Soldadura fuerte y blanda por infrarrojos.
- Soldadura fuerte por quemadores de gas radiante: Quemadores de cerámica que usan una mezcla de gas y aire a presión aplican calor concentrado a la pieza.
- Soldadura blanda con pasta.
- Soldadura blanda con olas: para unión de conexiones en circuitos impresos. Tarjeta + componentes + fundente precalentada → bombeo de metal de aporte fundido.

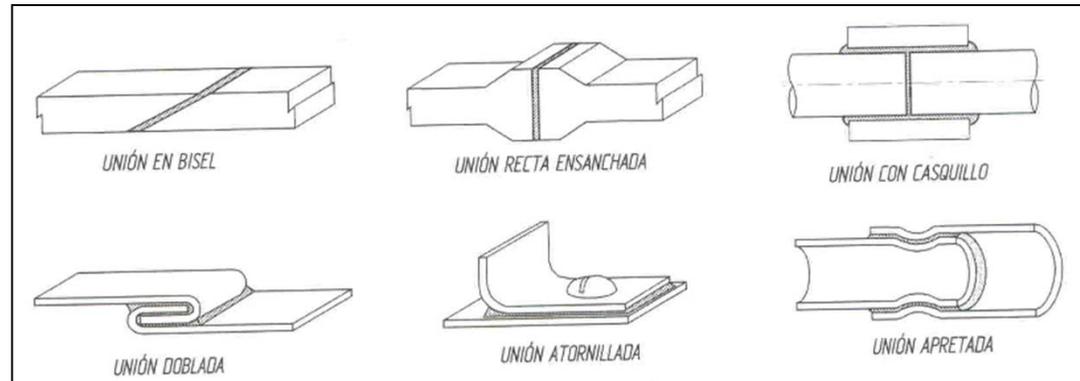




2. Soldadura fuerte y soldadura blanda

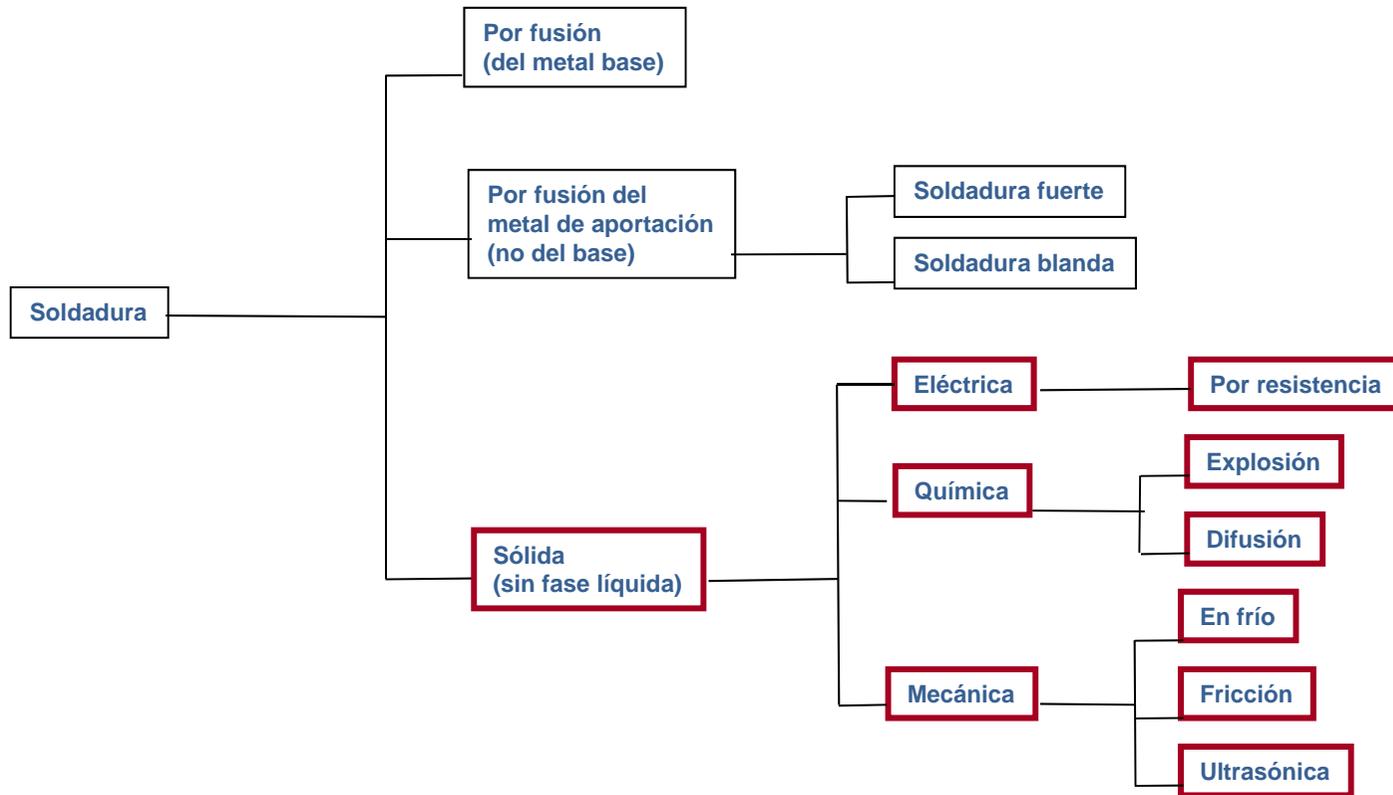
Diseño de uniones:

- Menor resistencia de la unión que en soldadura por fusión → necesidad de soluciones para mejorarla:
 - Soldadura fuerte: suele bastar con aumentar el área de unión (a bisel, recta ensanchada, con casquillo, etc.)
 - Soldadura blanda: suficiente para la industria electrónica. Si se necesita algo más de resistencia mecánica se suele combinar con uniones mecánicas (tornillos, remaches, etc.) o deformadas.





3. Soldadura en estado sólido





3. Soldadura en estado sólido

Descripción:

- La unión de las piezas a soldar se realiza aplicando presión (o presión + calor) a las piezas en contacto → activación de fuerzas interatómicas de cohesión → formación de cristales comunes en la interfase → propiedades resistentes tan buenas como las del metal original.
- Necesaria limpieza previa y completa de las superficies antes del proceso.
- Métodos para neutralizar o eliminar barreras intermedias (óxido, etc.): la propia presión, movimiento relativo entre las superficies, calor.

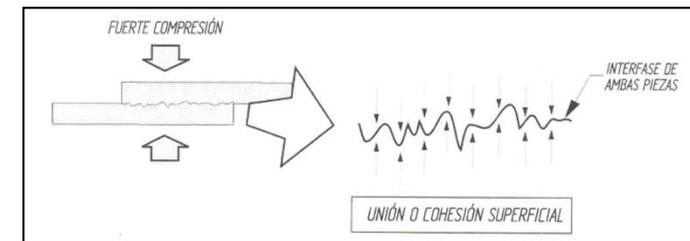
Ventajas:

- No necesita metal de aporte ni atmósfera de protección.
- Unión en toda la interfase y no sólo en puntos o líneas.
- No fusión → se evitan los problemas metalúrgicos y las distorsiones geométricas son mínimas.
- Posible unir materiales muy diferentes (incluso refractarios).
- Procesos muy rápidos, con altas tasas de producción.

Inconvenientes:

- Las superficies a unir deben ser muy lisas y requieren de gran limpieza. Se suelen mecanizar y pulir para reducir la rugosidad → aumento de coste.
- Costes elevados de algunos equipos → sólo se utiliza para soldaduras difíciles por otros medios.

Tipos: en función del tipo de acción para producir la presión (eléctrica, química o mecánica).





3.1. Soldadura por resistencia (RW)

Descripción:

- La unión se obtiene por aplicación de:
 - Calor: generado por una corriente eléctrica de elevada intensidad que circula entre dos electrodos durante un corto espacio de tiempo y atraviesa la unión a soldar.
 - Presión: durante y después del paso de la corriente.

Denominaciones:

- RW (*Resistance Welding*), según AWS.
- 2 (soldeo por resistencia), según UNE-EN ISO 4063.

Tipos:

- Por puntos
- Por resalte o proyección.
- Por roldanas o costura.
- A tope con recalado.
- Por chispa.
- Por inducción o alta frecuencia.

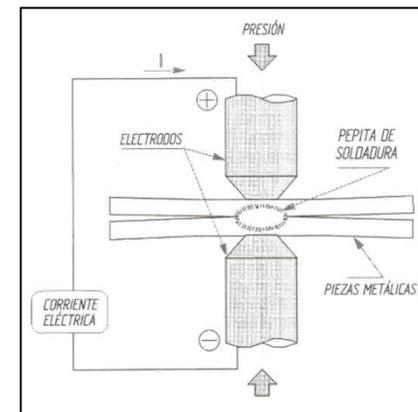
Ventajas:

- No necesita gases protectores, fundentes o metal de aporte.
- Los electrodos no son consumibles.
- Altas tasas de producción (proceso rápido y automatizable).

Inconvenientes:

- Elevado coste del equipo y necesidad de refrigeración por agua de los electrodos.

UNE-EN ISO 4063	AWS A3.0
2, Soldeo por resistencia	RW, Resistance Welding
21, Soldeo por puntos por resistencia	RSW, Resistance Spot Welding
22, Soldeo de costuras por resistencia	RSEW, Resistance Seam Welding
23, Soldeo por proyección o por protuberancias	PW, Projection Welding
24, Soldeo por chispa o por chisporroteo	FW, Flash Welding
25, Soldeo a tope por resistencia, soldeo por recalado	UW, Upset Welding





3.1. Soldadura por resistencia

Ciclo de soldeo:

- Viene determinado por la secuencia en el tiempo del paso de la corriente de soldadura y de la fuerza aplicada a los electrodos. El ciclo más usual es el de corriente alterna monofásica y consta de 4 fases:
 1. Posicionamiento: se ejerce una presión sobre los electrodos que obliga a las superficies a soldar a permanecer unidas.
 2. Soldadura: se hace pasar una corriente eléctrica entre los electrodos manteniendo una presión ligeramente inferior a la anterior.
 3. Forja o mantenimiento: al alcanzar la T^a de soldadura se corta el paso de corriente y se incrementa la presión.
 4. Cadencia o relajación: se reduce la presión hasta liberar las piezas ya soldadas.

Variables del proceso de soldeo:

- Calor generado en la soldadura: Ley de Joule: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$, con Q calor (J), I intensidad (A), R resistencia eléctrica (Ohm) y t tiempo durante el cual circula la corriente de soldadura (seg.).
- Tipo de corriente eléctrica: la más utilizada es la alterna, tanto monofásica como trifásica.
- Tensión: de 1 a 30 V.
- Intensidad: de 1.000 a 100.000 A. Ha de alcanzar un valor mínimo para asegurar la unión, pero no debe superar un máximo (exceso de fusión y salpicaduras).
- Frecuencia: La estándar (50 Hz en Europa), salvo en la soldadura de alta frecuencia (entre 10.000 y 500.000 Hz).



3.1. Soldadura por resistencia

- Tiempo de soldadura: tiempo durante el cual circula corriente. Reducido (de 0,1 a 1 seg) para alcanzar rápidamente la T^a y tener altos rendimientos y ZAT muy reducida.
- Resistencia eléctrica: es función del material base y de su espesor, suele ser baja, y está comprendida entre 50 y 500 microhmios. La resistencia se verá afectada si varía algún parámetro de los siguientes:
 - T^a del sistema, que hace que disminuya la resistencia a medida que aumenta la temperatura.
 - La fuerza aplicada a los electrodos.
 - El estado superficial de los metales base, en cuanto a rugosidad y limpieza.
 - El estado de conservación de los electrodos.
- Presión aplicada a los electrodos: varía entre 100 y 500 Kp, pudiendo en algunos casos sobrepasar ampliamente ese valor. Se desarrolla por la acción de un sistema mecánico o hidráulico.

Su influencia se manifiesta en 2 acciones distintas:

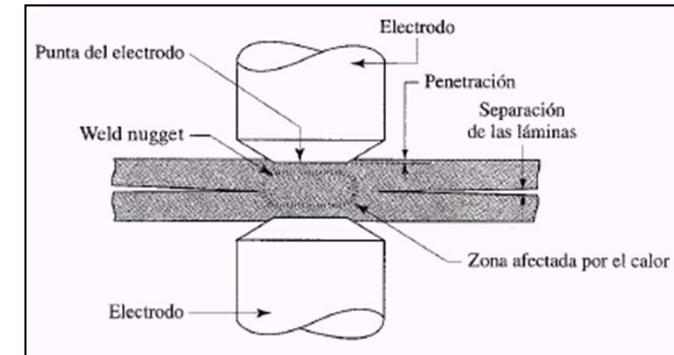
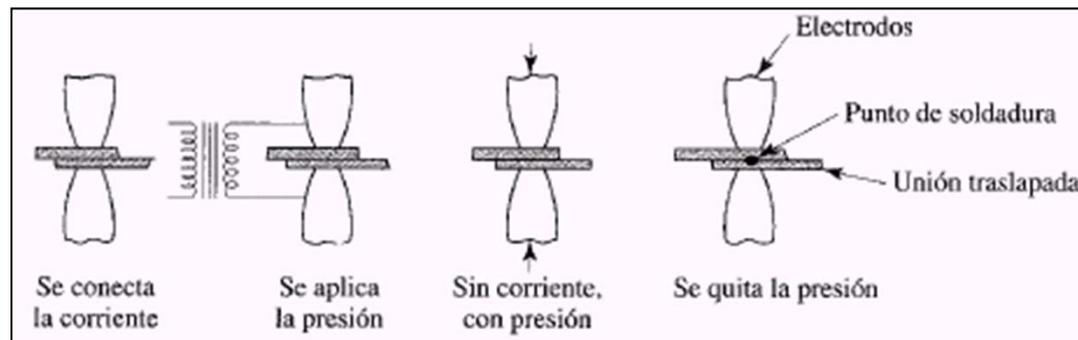
- Su efecto sobre la resistencia: cuanto mayor es, menor es la resistencia eléctrica.
- Su efecto de forja sobre un núcleo solidificado procedente del metal fundido, que le confiere una estructura de grano fino así como otras propiedades propias de los metales forjados.



3.1. Soldadura por resistencia

Soldadura por puntos:

- Variante de soldadura por resistencia más utilizada.
- Consiste en prensar dos o más piezas de metal laminado entre dos electrodos de soldar, de cobre o de una aleación de cobre, y pasar una corriente eléctrica de suficiente intensidad por las piezas, para conseguir su unión.

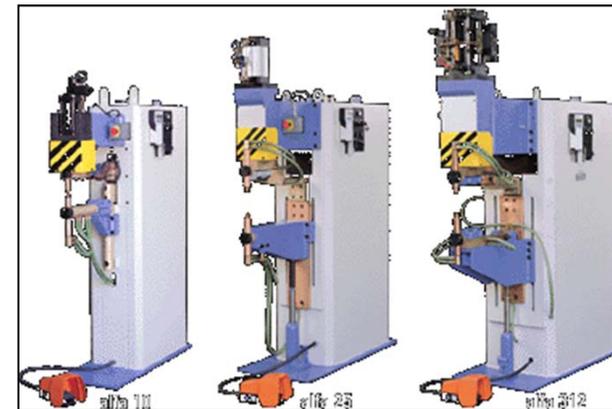
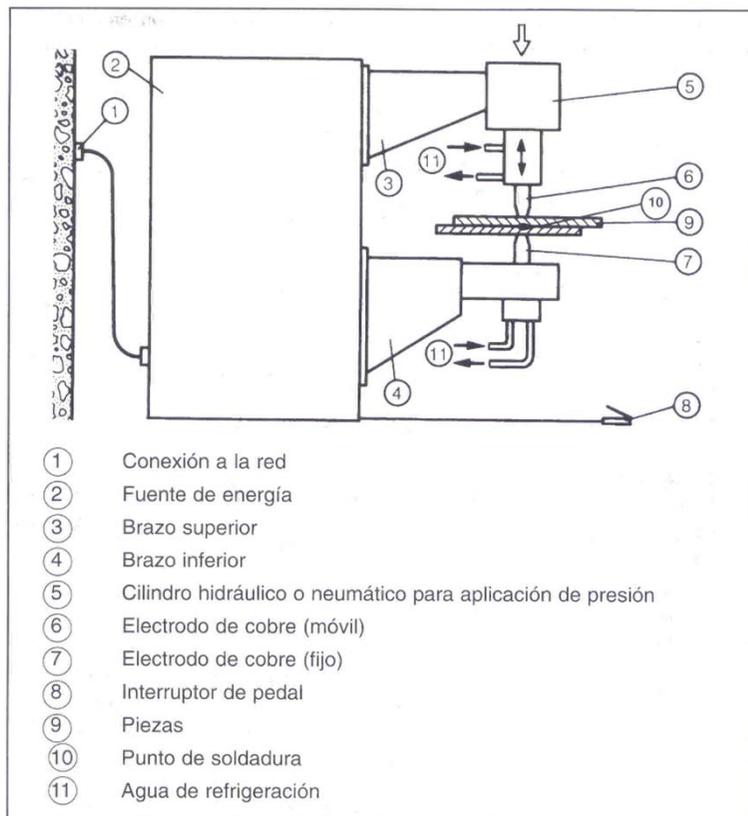


- El punto de unión, y de soldadura, se localiza bajo los electrodos y en la superficie de contacto de los dos materiales, por ser el área de mayor resistencia eléctrica.
- Para obtener una soldadura por puntos resistente, para chapas de igual espesor, se recomienda el siguiente dimensionado (con e = espesor de la chapa en mm):
 - solape de las chapas o bandas: $13 \cdot \sqrt{e}$
 - diámetro de la zona de contacto de los electrodos: $5 \cdot \sqrt{e}$
 - distancia entre centros de dos puntos consecutivos: $14 \cdot e + 3 \text{ mm}$
- Material de los electrodos: aleación de cobre con cadmio, cromo, berilio o wolframio, para que presente una buena resistencia a la deformación bajo la presión aplicada durante la soldadura.



3.1. Soldadura por resistencia

- Aplicaciones: fabricación de carrocerías de automóviles, electrodomésticos y muebles metálicos. El procedimiento es adecuado para soldar componentes de acero, de espesores comprendidos entre 0'1 y 20 mm.
- Alto grado de automatización, fundamentalmente en lo que se refiere a la aplicación secuencial de la presión y de la corriente → Robots de soldadura.
- Equipo: habitualmente se utiliza maquinaria estática, aunque existen pinzas de soldadura portátiles.

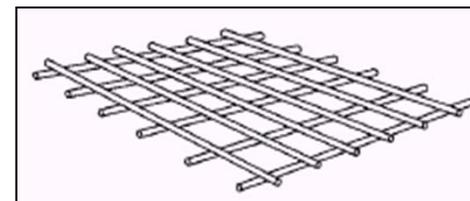
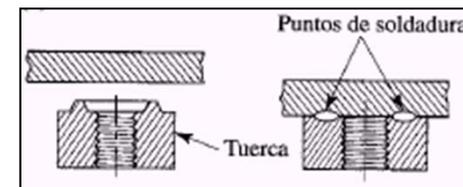
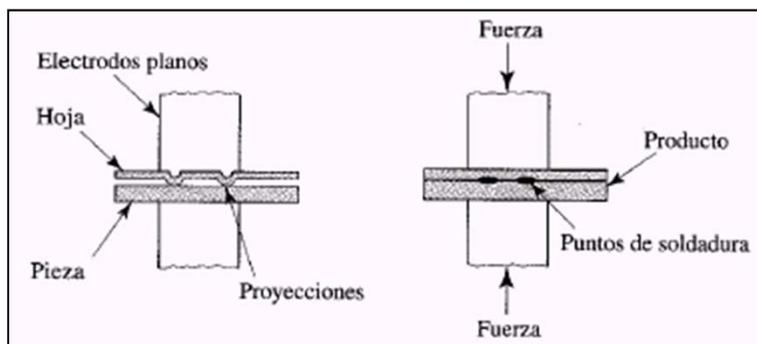




3.1. Soldadura por resistencia

Soldadura por proyección, resalte o protuberancias:

- Variante de la soldadura por puntos. Consiste en practicar previamente resaltes en uno de los materiales de base, y a veces a ambos, en los lugares donde se desea que exista un punto de soldadura → mejor distribución de la corriente y concentración del área de aplicación de la fuerza ejercida por medio de los electrodos.
- Aplicación: tuercas, tornillos, láminas, parrillas, carros de compra, etc. Espesores entre 0'5 y 6 mm.
- Los resaltes suelen hacerse por embutición, hasta de 2'5 mm, y por mecanizado para espesores mayores.
- Ventajas de la soldadura por proyección frente a la soldadura por puntos:
 - No hay posibilidad de desviación de la corriente
 - Mejor balance térmico
 - La vida del electrodo es más larga
 - Mejor aspecto de la unión
 - Núcleo de soldadura más sano

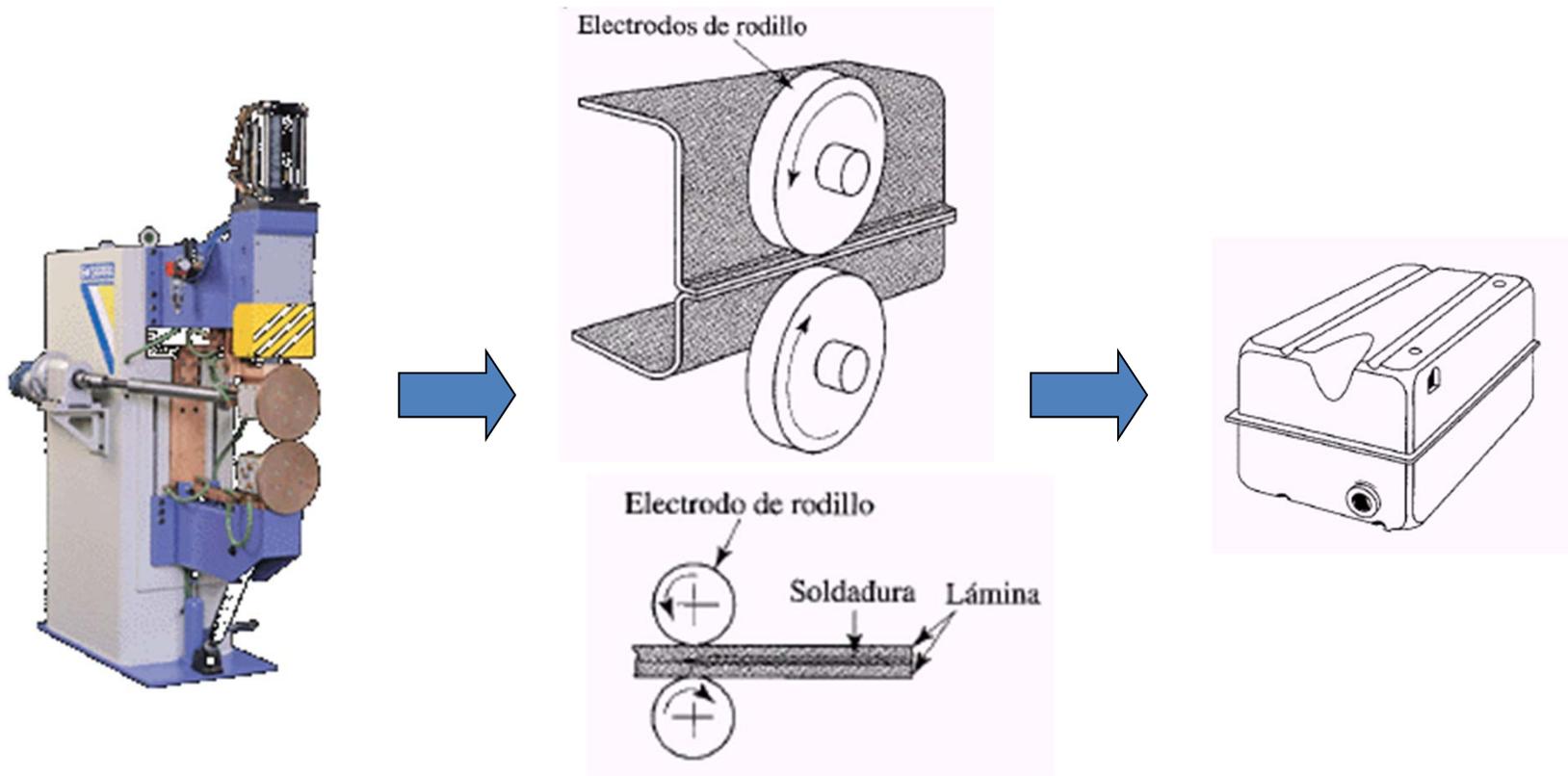




3.1. Soldadura por resistencia

Soldadura por roldanas o de costura (RSEW, *Resistance Seam Welding*):

- Otra variante de la soldadura por puntos en la que éstos se sueldan solapados, dando lugar a una costura estanca. En este tipo de soldadura, los electrodos son roldanas que, además de aplicar la fuerza y la corriente, arrastran en su giro a los materiales de base.
- Aplicación: la principal es la fabricación de recipientes de espesor de pared comprendido entre 0'05 y 3 mm.

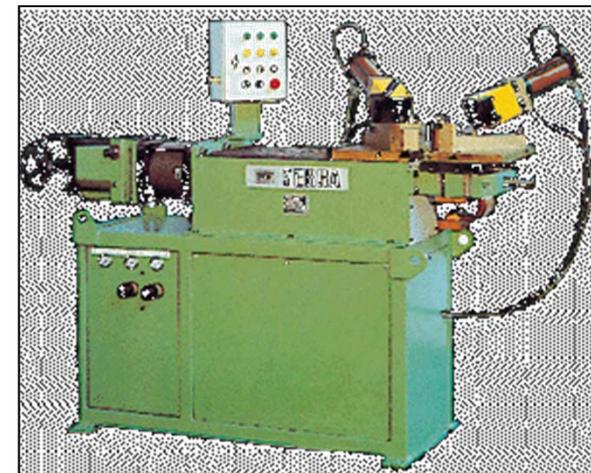
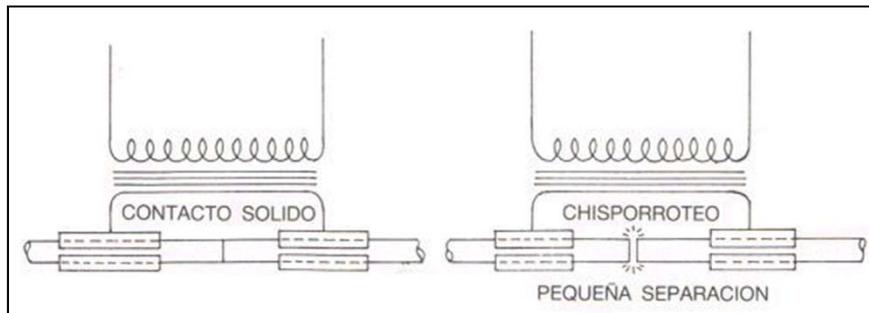




3.1. Soldadura por resistencia

Soldadura por chispa:

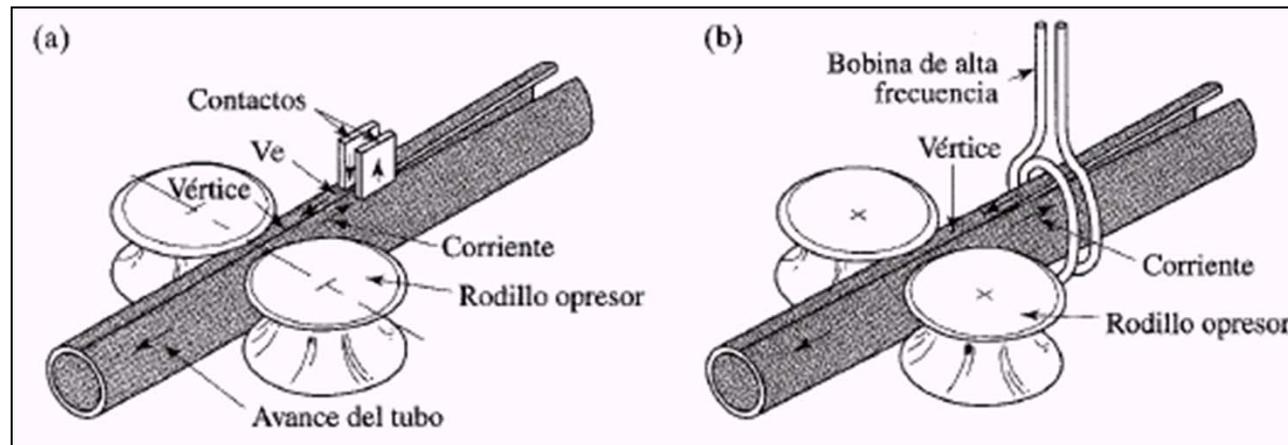
- Muy similar a la soldadura a tope, con la única diferencia que la fuerza aplicada durante la fase de posicionamiento es muy pequeña, y el contacto de las superficies a soldar sólo se produce en determinados puntos.
- La corriente de soldadura se concentra en estos puntos provocando su rápida fusión y estableciendo multitud de arcos eléctricos o chispas, que calientan más rápidamente los materiales con un consumo de energía mucho menor.
- Aplicaciones: las mismas que en el procedimiento a tope, aunque con un límite de sección máxima mucho más elevado.



3.1. Soldadura por resistencia

Soldadura por inducción o de alta frecuencia:

- Utiliza una corriente eléctrica de frecuencia comprendida entre 10.000 y 500.000 Hz. Su principal ventaja radica en que sólo se calientan las superficies de la unión a soldar, debido a lo cual se genera en el interior de los materiales de base una fuerza electromotriz que se opone a la circulación de la corriente de soldadura impidiendo que ésta penetre en el material y obligándola a circular superficialmente. Esta fuerza electromotriz produce el efecto de aumentar la resistencia eléctrica de los materiales de base, aumento que se acentúa a medida que aumenta la frecuencia.
- En este procedimiento, los electrodos sólo aportan la corriente eléctrica, aplicándose la presión por otros métodos.
- Aplicaciones: la soldadura longitudinal y helicoidal de tubería y la soldadura de aletas y tetones a tubos. Los límites de espesor están entre 0'125 mm y 25 mm.

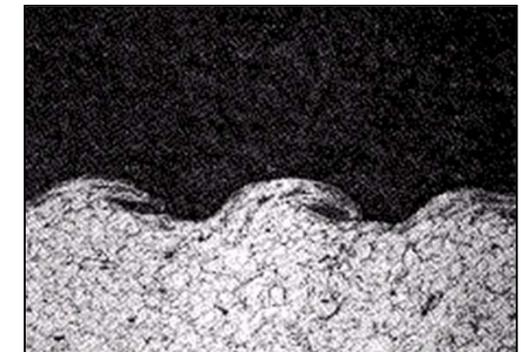
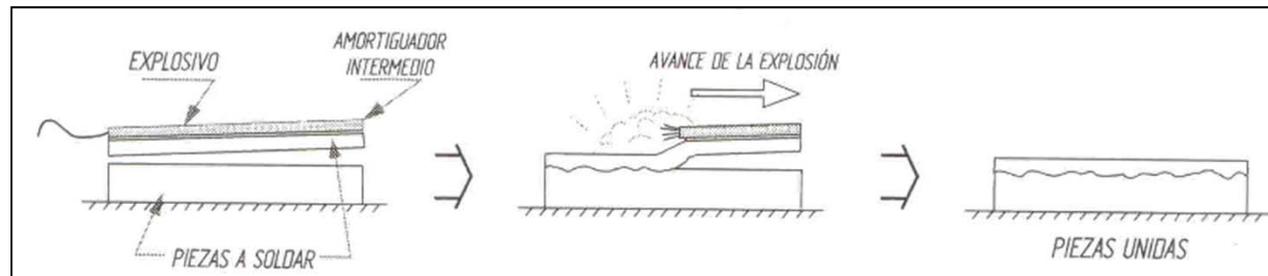
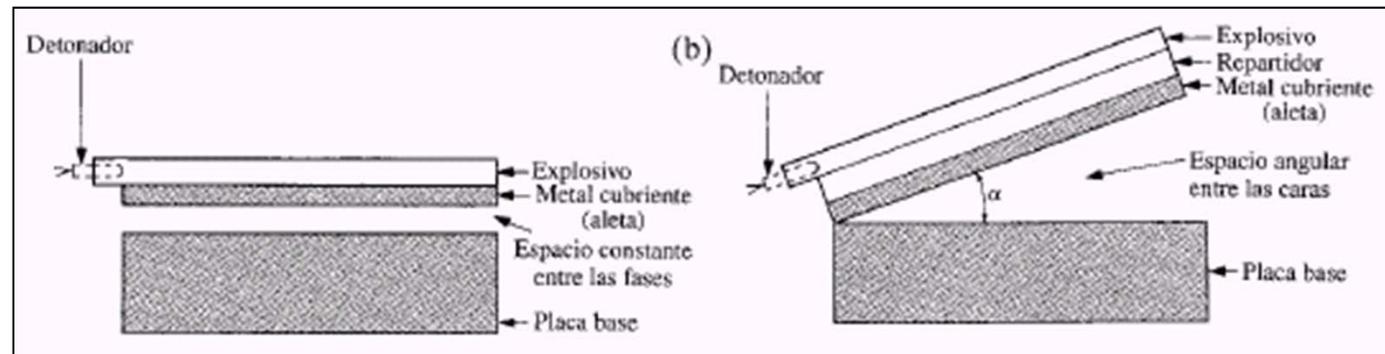




3.2. Soldadura con acción química

Soldadura por explosión (EXW, *Explosion Welding*):

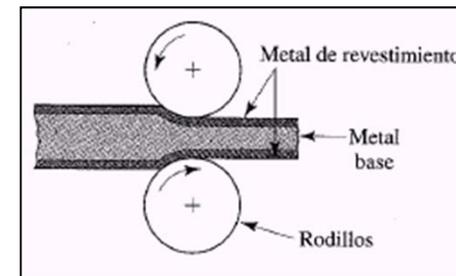
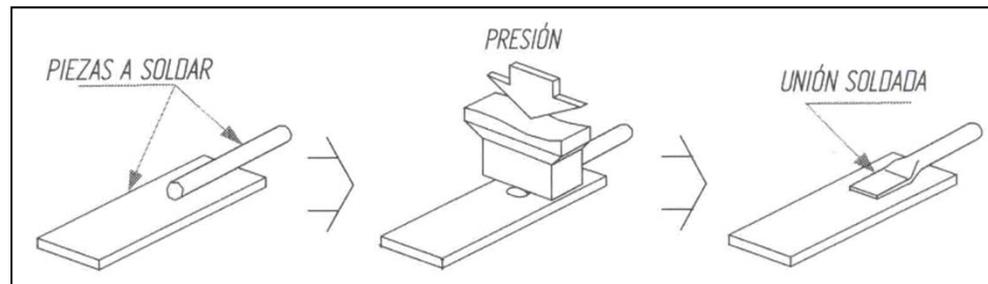
- La unión se establece a través de la deformación intensa de la interfase producida por la energía liberada por un explosivo detonado.
- No se aplica calor externo y durante el proceso no ocurre difusión (tiempo muy corto).
- Las capas de óxido de la interfase se rompen y son expulsadas → Resistencia de adhesión muy alta.
- Aplicaciones: unión de dos metales diferentes, como en el revestimiento de placas, unión de tubos a orificios de calderas, etc.



3.3. Soldadura con acción mecánica

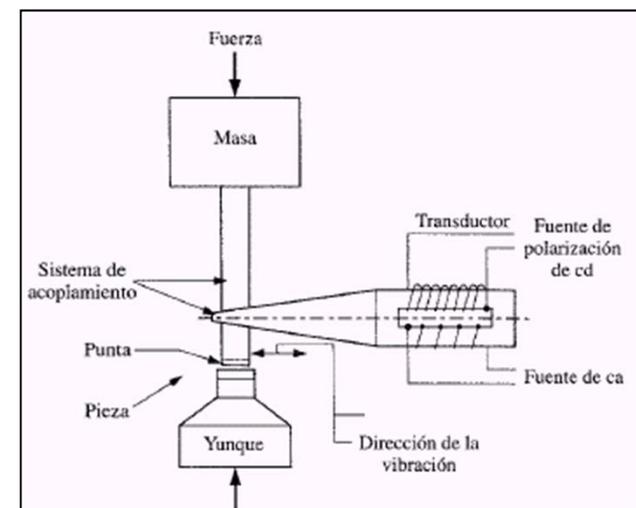
Soldadura en frío:

- La presión se aplica mediante matrices o rodillos a Tª ambiente, provocando deformación plástica.
- En necesario limpiar y desengrasar previamente la superficies.
- Aplicaciones: unión de piezas pequeñas hechas de metales suaves y dúctiles (monedas, conexiones eléctricas, etc.), revestimientos, etc.



Soldadura por ultrasonidos:

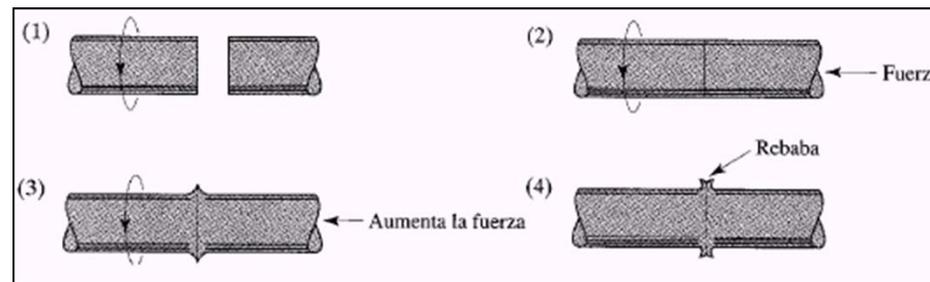
- Se aplica una presión y se induce un movimiento relativo de la interfase mediante vibración tangencial de frecuencia ultrasónica (15 a 75 kHz).
- El movimiento oscilatorio entre las dos piezas deshace las películas de superficie → permite el contacto íntimo y una unión fuerte.
- Aplicaciones: uniones superpuestas de materiales dúctiles y no endurecidos por deformación (aluminio y cobre), de pequeños espesores.



3.3. Soldadura con acción mecánica

Soldadura por fricción:

- La unión se obtiene por combinación de presión y calor producido por fricción.
- Proceso:
 1. Uno de los elementos a unir se mantiene fijo y el otro se hace girar a una velocidad de rotación alta y constante.
 2. Los elementos se ponen en contacto mediante fuerza axial.
 3. Tras establecer el suficiente contacto se frena rápidamente la pieza que giraba y se aumenta la fuerza axial.
- La rebaba que se produce arrastra hacia fuera los óxidos y demás contaminantes de la interfase.



- Ventajas:
 - Bajo tiempo de ciclo → producción de series.
 - Bajo consumo de energía.
 - Materiales diversos: cobre, aluminio, acero, titanio, aceros inoxidables, etc.
- Aplicaciones: válvulas para motores, machos para roscar, ejes para hélices, etc.