

## Índice

Contenido	Página
<b>Soldadura de metales y aleaciones.</b>	
<b>Soldabilidad de los materiales metálicos</b> .....	2
Definición de soldadura,	
Definición ISO de soldabilidad.....	3
1° Clasificación de los procesos de Soldadura.....	4
2° Clasificación de los procesos de Soldadura,	
Tipos de Soldadura,	
Elementos de la geometría de una soldadura.....	5
Tipos de juntas soldadas.....	6
Aspectos económicos de la preparación de bordes,	
Efectividad de los procesos de soldeo,	
Consideraciones de interés.....	7
Posiciones de soldadura.....	8
Ciclos térmicos de la soldadura,	
Zona Metalúrgica.....	9
Ciclo térmico de la soldadura – Dilución.....	10
Ciclo térmico de la soldadura – Aporte Térmico.....	11
Diferencias de los procesos de soldadura con los procesos de la metalurgia clásica (colada en molde de pequeño tamaño),	
Microestructura del cordón.....	12
Control del tamaño de grano.....	15
Factores que afectan a la composición del metal fundido,	
Modificaciones metalúrgicas en la ZAT.....	16
Modificaciones metalúrgicas en la ZAT - Engrosamiento de grano.....	17
<b>Descrip. de procesos empleados en soldadura de metales y aleaciones</b> .....	18
Soldadura por Fusión - Soldadura a la llama.....	19
Soldadura por arco eléctrico.....	27
Soldadura al arco con prot. gaseosa y electrodo cons. (MIG y MAG).....	44
Técnica de soldadura TIG.....	50
Bibliografía.....	55

Soldadura de metales y aleaciones.  
Soldabilidad de los materiales metálicos.

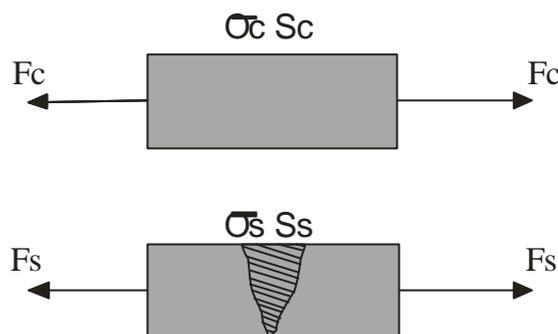
**Definición de Soldadura:**

Es el Arte o Ciencia de unir dos piezas metálicas de igual o distinta naturaleza. Proceso de unión entre metales en que la adherencia se produce, con aporte de calor, a una temperatura adecuada, con aplicación de presión o sin ella, y con adición de metal, aleación fundida o sin ella.

**Definición ISO de Soldabilidad:**

Una sustancia metálica se considera soldable en un grado dado, por un proceso dado, y para un objetivo dado, cuando se puede establecer una continuidad metálica usando un procedimiento adecuado, de tal forma que la junta cumpla los requisitos especificados, tanto en sus propiedades locales como en su influencia sobre la construcción de que forma parte.

- Índice de soldabilidad:

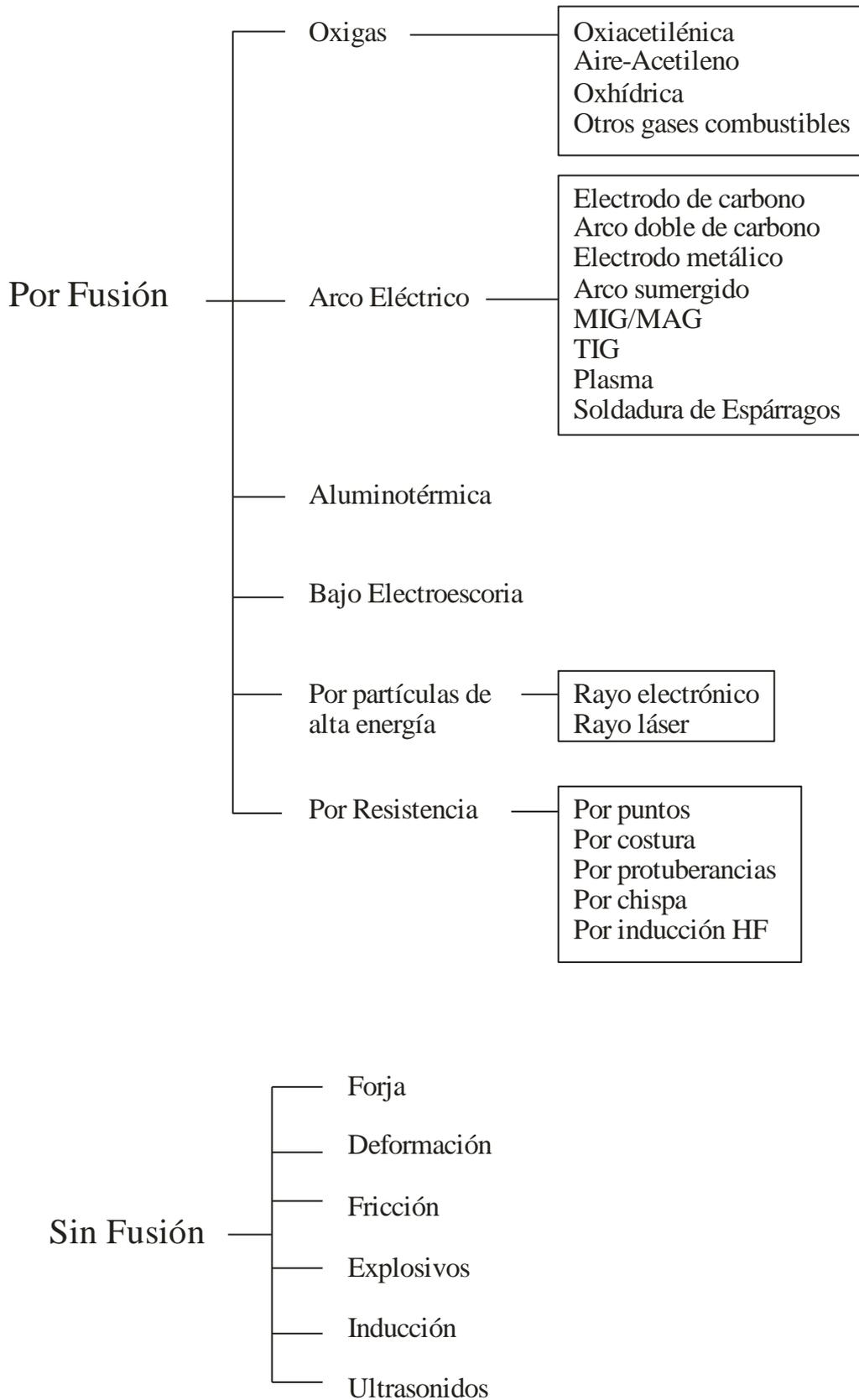


$$I_s = \frac{F_s}{F_c} = \frac{(\sigma_s - \sigma_i) \cdot S_s}{\sigma_c \cdot S_c}$$

En la definición aparecen involucrados todos los factores de la soldabilidad:

- Continuidad física:  $S_s$  debe tender a valores de  $S_c$ .
- Continuidad tensional: ausencia o minimización de tensiones residuales  $\sigma_i$ .
- Continuidad de características resistentes: las propiedades del cordón de soldadura y de la ZAC (Zona de Alteración de Continuidad) deben ser similares a los del metal base.

1º Clasificación de los procesos de Soldadura:



2º Clasificación de los procesos de Soldadura:

- Con aporte o sin aporte de material.
- En función de la naturaleza del aporte/metal base.
- Soldadura homogénea y soldadura heterogénea.
- Soldadura blanda y soldadura fuerte.

Tipos de Soldadura:

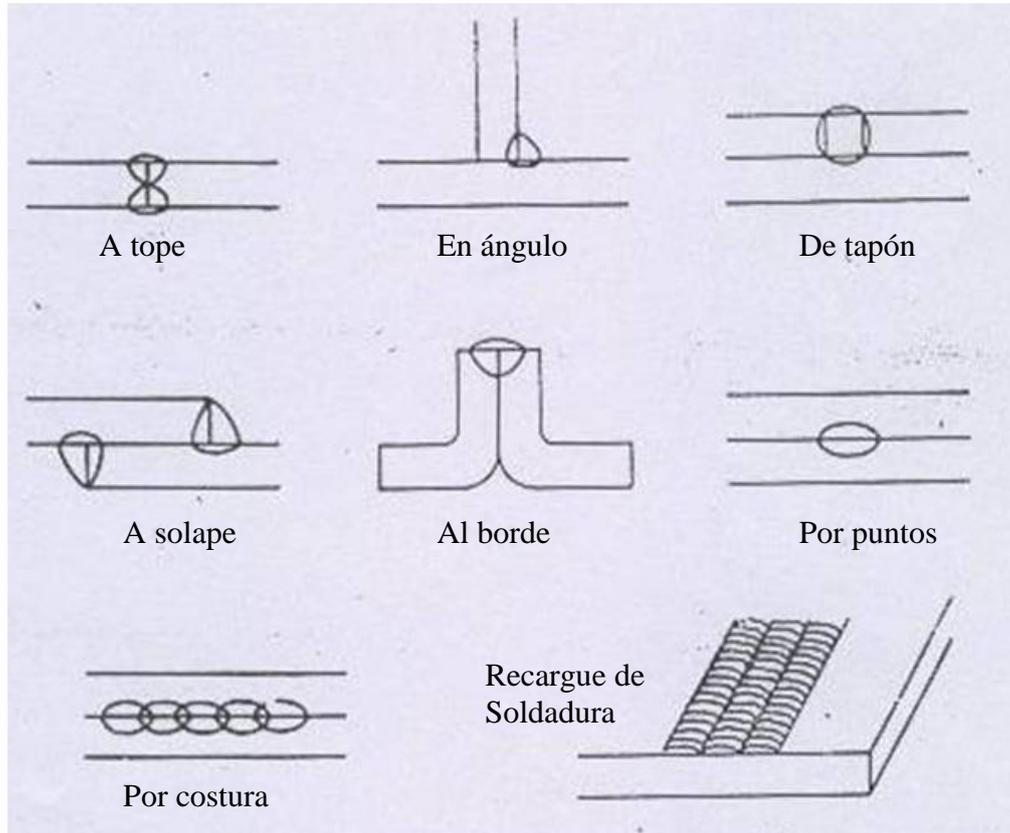


Figura 1, tipos de soldadura.

Elementos de la geometría de una soldadura:

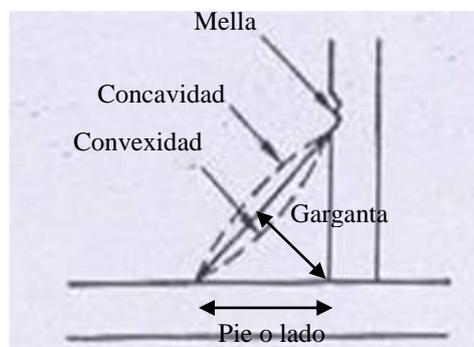


Figura 2, elementos de una soldadura.

Tipos de juntas soldadas:

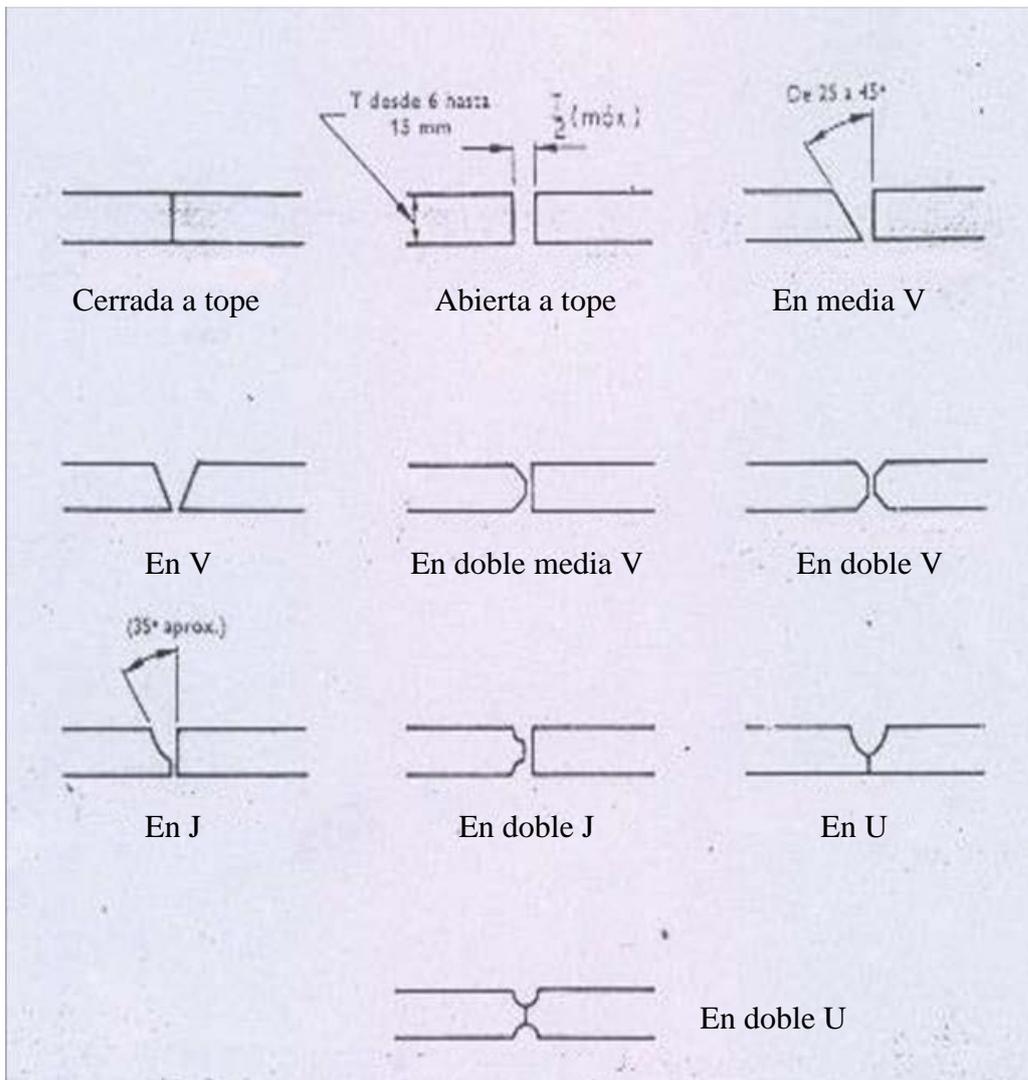


Figura 3, tipos de juntas soldadas.

Aspectos económicos de la preparación de bordes:

Tomando para comparación ángulos de 60° en las uniones en V y X, y de 20° en las uniones en U y doble U, talón y separación de 2.5mm, en todas tenemos los siguientes volúmenes a rellenar en mm<sup>3</sup>.

<u>Espesor (mm)</u>	<u>V</u>	<u>X</u>	<u>U</u>	<u>Doble U</u>
10	5	3	5	4
15	6	4	6	5
25	13	7	12	10
50	40	21	28	22
100	175	87	85	62

Conclusión: Se ve que hasta espesores de 15 mm las diferencias cuantitativas no son muy grandes. Para 25 mm la preparación en X es la más interesante. Para 50 mm la X y doble U son análogas y de valor mitad a la V. Para 100 mm ya es más interesante la doble U que ninguna.

Efectividad de los procesos de soldeo:

Esta efectividad se puede definir como el área de metal que puede ser soldado en la unidad de tiempo. A efectos comparativos, de forma aproximada tenemos:

<u>1 a 15 cm<sup>2</sup>/min:</u>	Oxiacetilénica, manual con electrodo y TIG.
<u>15 a 25 cm<sup>2</sup>/min:</u>	MIG, electroescoria con una varilla.
<u>25 a 100 cm<sup>2</sup>/min:</u>	Arco sumergido, resistencia por puntos, electroescoria con dos o tres varillas.
<u>100 a 200 cm<sup>2</sup>/min:</u>	Bombardeo electrónico.
<u>Más de 200 cm<sup>2</sup>/min:</u>	Resistencia con alta frecuencia.

Consideraciones de interés:

- Coste de preparación: (de menor a mayor) bordes Rectos—V—X—U—doble U.
- Comportamiento frente a cargas: (peor a mejor): V—U—X y doble U.

Posiciones de soldadura:

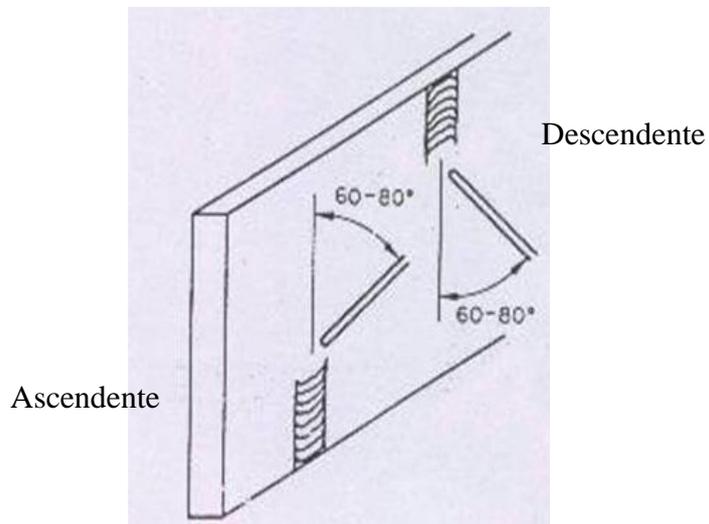
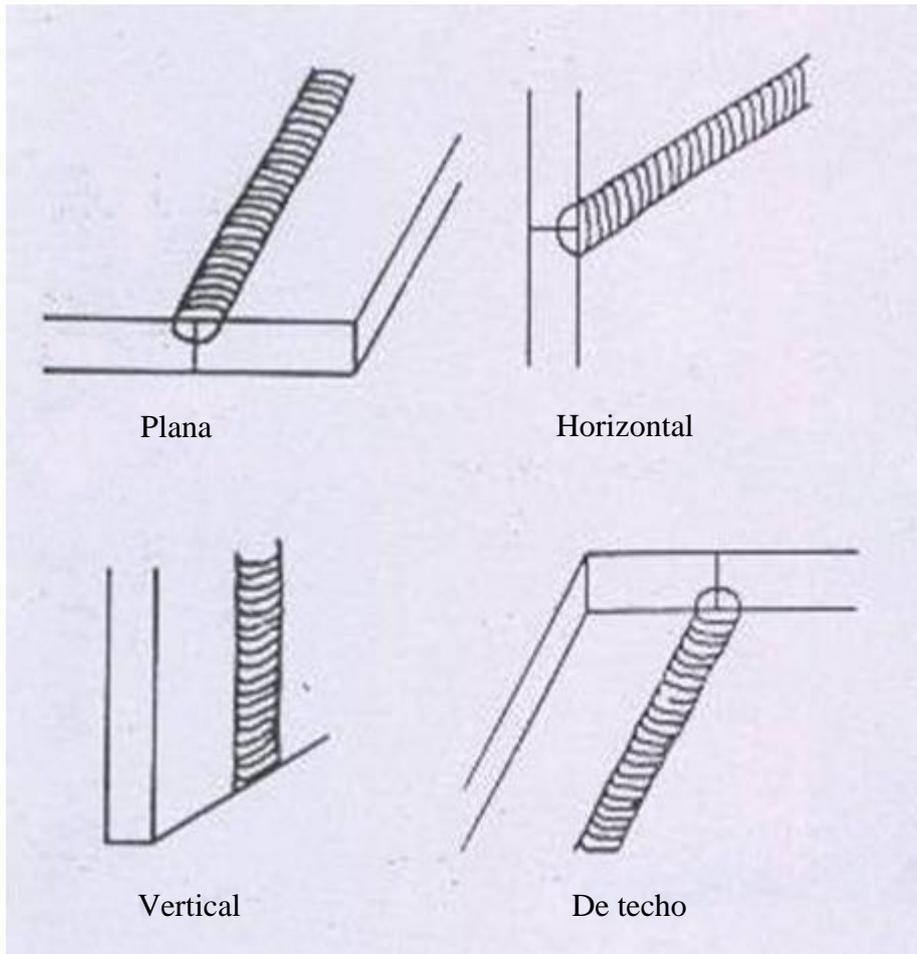
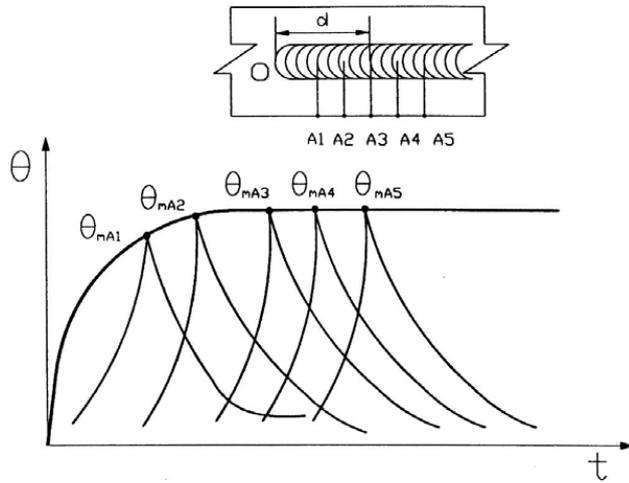


Figura 4, posiciones de soldadura.

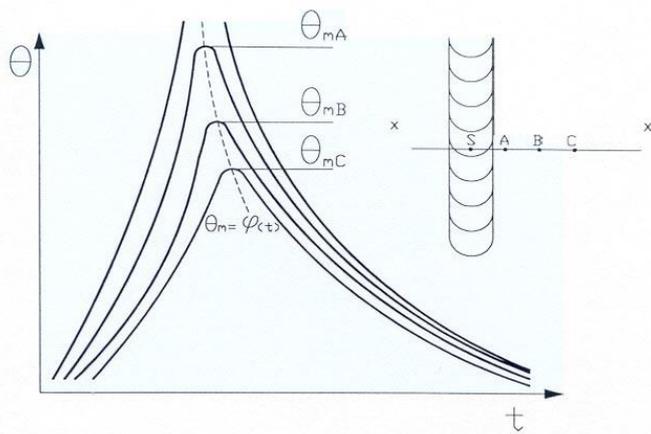
Ciclos térmicos de la soldadura:



- Ciclos térmicos a lo largo del cordón de soldadura.

θ: Temperatura,  
t: tiempo.

Figura 5, ciclos térmicos de la soldadura.

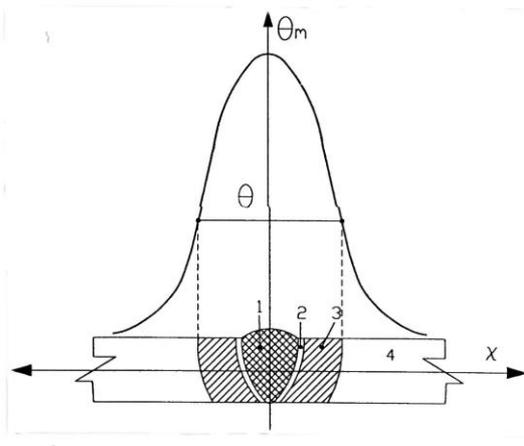


- Ciclos térmicos en una sección perpendicular al cordón de soldadura.

θ: Temperatura,  
t: tiempo.

Figura 6, ciclo térmico perpendicular al cordón de soldadura.

Zonas Metalúrgicas:



- Distribución térmica en una sección perpendicular al cordón de soldadura.

θ: Temperatura.

Figura 7, zonas metalúrgicas en la sección perpendicular del cordón.

1. Zona de Fusión: Se produce la fusión del metal base y la deposición del metal de aportación fundido.
2. Zona Parcialmente Fundida: El material base no funde, pero pueden existir fusiones en el límite del grano.
3. Zona Afectada Térmicamente (ZAT): Se producen transformaciones en estado sólido en el metal base.
4. Material Base no Afectado: El material no sufre ningún cambio metalúrgico, pero puede estar sometido a altos esfuerzos residuales de contracción, transversales y longitudinales.

Ciclo térmico de la soldadura - Dilución:

- Es la proporción en la que el metal base, o de soldadura previamente depositada, participa a través de su propia fusión en la composición química de la zona fundida.
- Es el peso con el que el metal base contribuye a la composición del cordón.
- La dilución influye en la composición química del cordón de soldadura.
- Depende de: tipo de junta, preparación de bordes y del proceso utilizado. Es máxima para soldaduras en una pasada en secciones delgadas con preparación en ángulo recto y con técnicas de alta energía neta aportada.

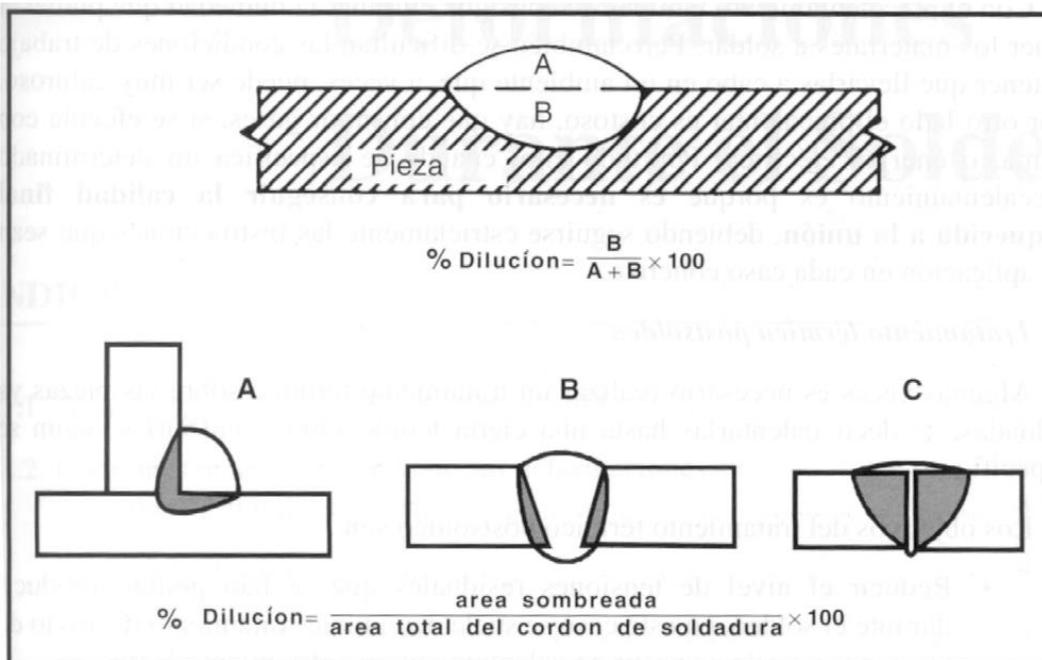


Figura 8, dilución de la soldadura.

Ciclo térmico de la soldadura – Aporte Térmico:

Su valor neto en procesos de soldadura al arco se calcula mediante:

$$\text{Energía Neta Aportada (J/mm)} = \mu \frac{\text{tensión (V)} \times \text{intensidad (A)}}{\text{Velocidad de soldeo (mm/s)}}$$

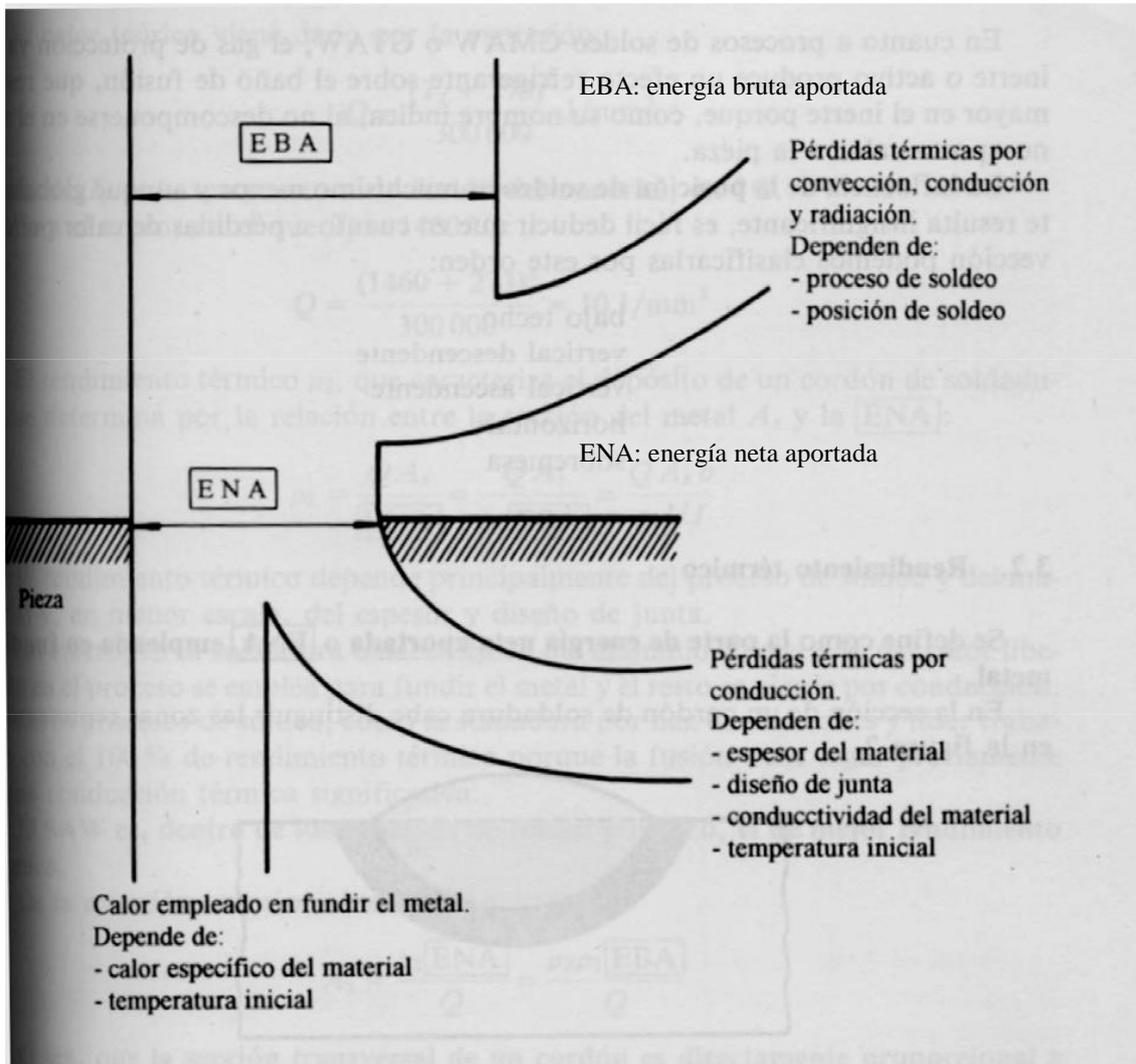


Figura 9, relación del aporte térmico en la soldadura.

Diferencias de los procesos de soldadura con los procesos de la metalurgia clásica (colada en molde de pequeño tamaño):

El baño fundido debe soldarse con el metal base, cosa que no ocurre durante la colada. Como consecuencia puede producirse una dilución parcial del metal base.

- Durante la soldadura hay un aporte continuo de calor. Como consecuencia en el baño de soldadura existe un fuerte gradiente térmico que no existe en la colada en moldes.
- La nucleación de embriones en la soldadura se produce siempre de forma epitaxial, a partir de la estructura del metal base. En los moldes, la nucleación de embriones suele tener lugar de forma heterogénea. Como consecuencia, la nucleación en las soldaduras requiere un menor grado de subenfriamiento.
- La velocidad de enfriamiento en la soldadura es mucho mayor que en moldes.
- En los moldes, la masa y geometría del baño disminuyen con el tiempo. En soldadura, a velocidad constante y con aporte de calor constante, la geometría del baño fundido se mantiene uniforme conforme avanza el cordón.
- Debido al efecto de agitación del arco y al flujo Marangoni, el grado de homogeneidad del cordón de soldadura es más elevado que en la solidificación en moldes.

Microestructura del cordón:

a) Crecimiento Epitaxial:

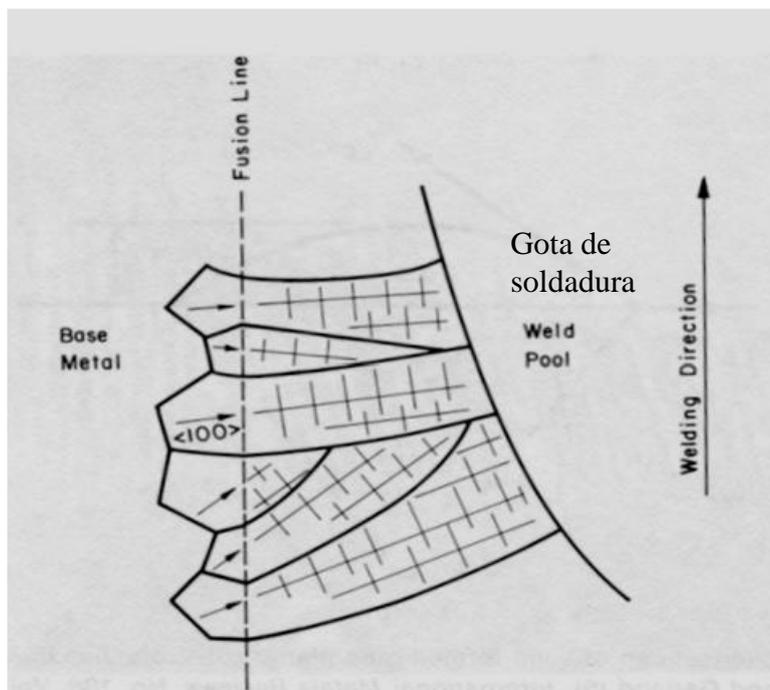
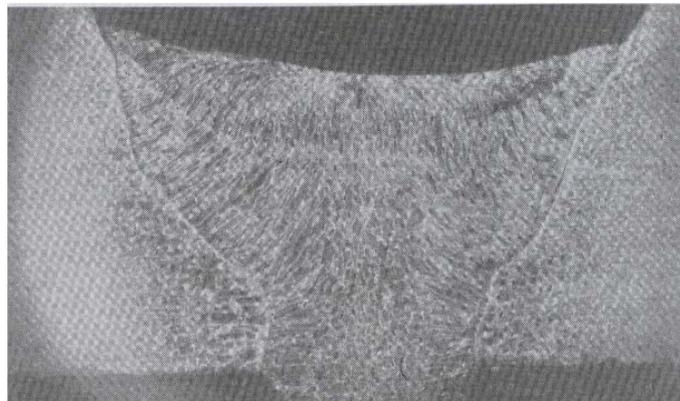


Figura 10, Crecimiento epitaxial de la soldadura.

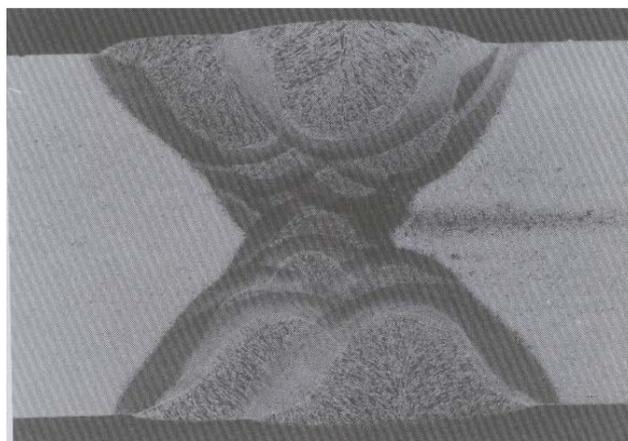
En las soldaduras, la estructura resultante de la solidificación tiene su origen en una nucleación de tipo epitaxial, es decir, cada grano se forma como una continuación del metal base en la zona límite de separación líquido-sólido.

b) Crecimiento Competitivo:

La estructura granular en la zona del límite de la fusión de una soldadura se rige por el mecanismo de crecimiento epitaxial. Pero en el resto del cordón la estructura granular está gobernada por un mecanismo diferente denominado crecimiento competitivo; durante la solidificación los granos tienden a crecer en la dirección perpendicular a la entre-cara sólido/líquido, ya que ésta es la dirección del máximo gradiente térmico y en consecuencia de máxima fuerza inductora en la solidificación. Dado que los granos tienen su propia dirección preferente de crecimiento ( $\langle 100 \rangle$  en las redes cúbicas), los granos con su dirección de fácil crecimiento paralela a la del máximo gradiente crecerán más fácilmente que aquellos cuyas direcciones de fácil crecimiento se separan de la dirección del máximo gradiente.



*Figura 11, Crecimiento orientado y transformación en el metal base.*



*Figura 12, Normalización de la estructura (zonas claras) por el efecto térmico de pasadas sucesivas.*

c) Desplazamiento del foco térmico:

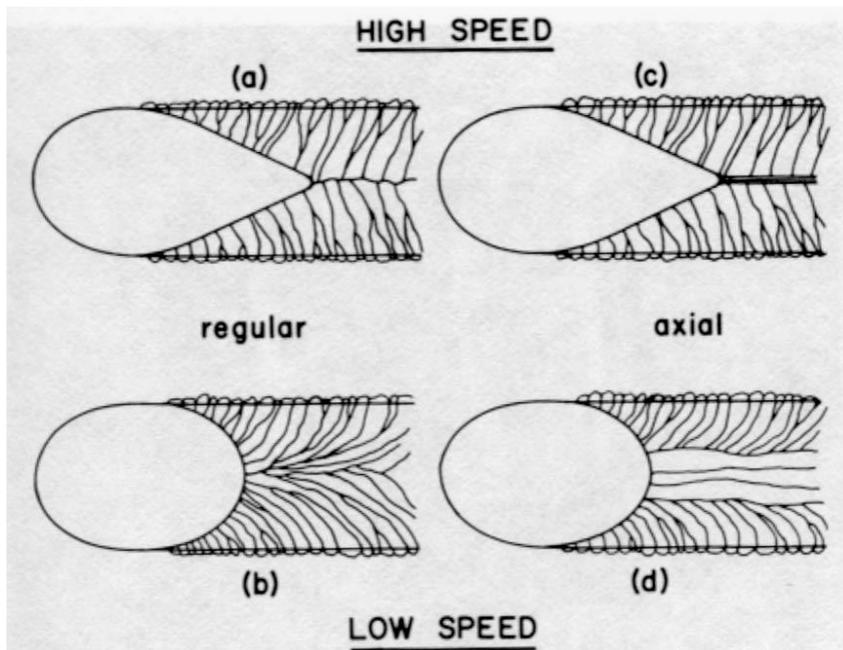


Figura 13, Desplazamiento del foco térmico.

La estructura columnar varía en función del baño de soldadura. Conforme la velocidad de soldadura es menor los granos giran en su crecimiento hacia la dirección del máximo gradiente térmico. Para altas velocidades de soldeo los granos giran menos. Pueden existir, en cualquiera de los casos, granos axiales, que se forman inducidos por la solidificación inicial del cordón (c y d).

d) Subestructuras de solidificación:

Cada grano del cordón puede contener una determinada subestructura en base al modo de crecimiento de grano. Las subestructuras que pueden presentarse dependen del gradiente de temperatura ( $G$ ) del líquido en la entre-cara sólido/líquido y de la velocidad de crecimiento o de avance de la entre-cara ( $R$ ). A mayor relación  $G/R$  la estructura será planar; conforme descende la relación  $G/R$  tendremos subestructuras celulares, celulares dendríticas, dendríticas columnares y dendríticas equiaxiales para los valores más bajos de dicha relación.

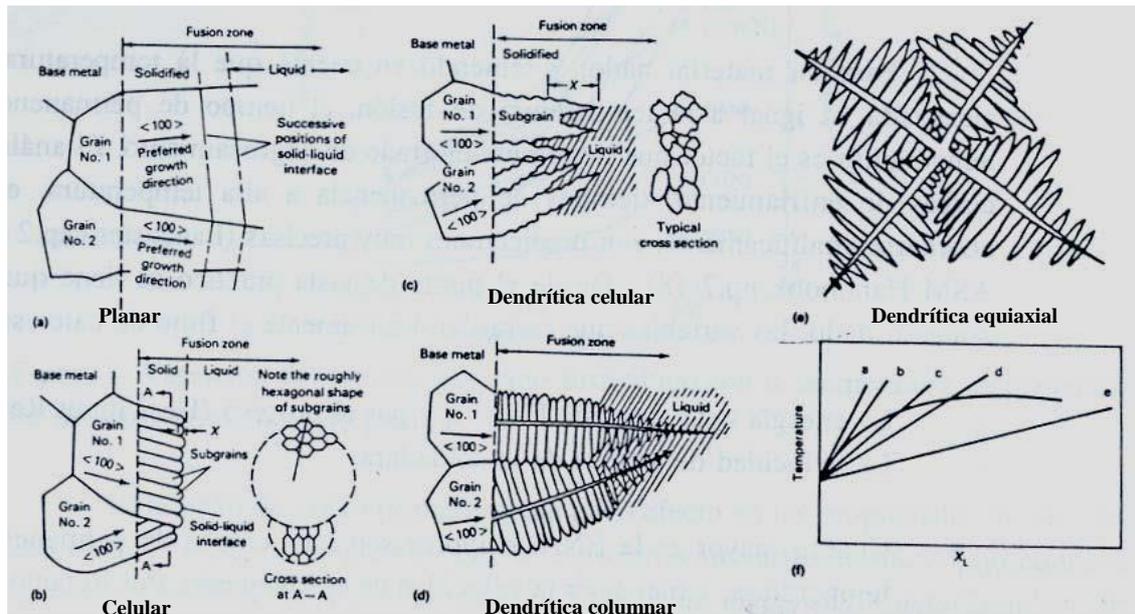


Figura 14, tipos de subestructuras de solidificación.

Control del tamaño de grano:

- Cuanto mayor es la ENA, mayores son los tiempos de permanencia a alta temperatura, y menor es la velocidad de enfriamiento. Por tanto, mayor es el engrosamiento de grano. El uso de técnicas con baja ENA (LASER o Haz de electrones) tiene la ventaja de hacer mínima la afección térmica del metal base.
- Cuanto mayor es la velocidad de avance de la soldadura, mayores son las velocidades de enfriamiento y menor riesgo existe de engrosamiento de grano.
- Efecto del número de pasadas. La soldadura en varias pasadas (en lugar de una pasada de gran espesor) permite el afino de grano por:
  - Al ser menor la sección depositada en cada pasada, el aporte energético a la pieza y el sobrecalentamiento son menores.
  - El calor aportado por un nuevo cordón logra la austenización de los inferiores, que recristalizan al pasar a ferrita-perlita dando estructuras de grano fino y alta tenacidad (en caso de aceros).
- Se puede controlar el tamaño de grano siguiendo los principios básicos de la nucleación heterogénea (fragmentación dendrítica, empleo de afinadores...). El empleo de arco pulsado, arco oscilante, etc. favorecen la fragmentación dendrítica y, por tanto, el afino de grano.

Factores que afectan a la composición del metal fundido:

- Composición del metal de aporte (en su caso).
- Grado de dilución: Cuando la composición del metal de aporte y el metal base son similares, la dilución no tiene consecuencias. En otros casos, la dilución genera un cambio importante de la composición y debe tenerse en cuenta.
- Reacciones con los gases o con la escoria.

Modificaciones metalúrgicas en la ZAT:

- En general: engrosamiento del grano.
- En aleaciones endurecidas por acritud (aleaciones de cobre o de aluminio): recristalización, con pérdidas de las propiedades mecánicas.
- En aleaciones endurecidas por precipitación (aleaciones de aluminio): Sobre envejecimiento por engrosamiento y coalescencia de partículas que tiendan a la fragilización del metal.
- En aceros: formación de martensita frágil, tanto en el metal de soldadura como en el metal base.
- En aceros inoxidables: precipitación de carburos de cromo en borde de grano, con sensibilización a la corrosión ínter granular.

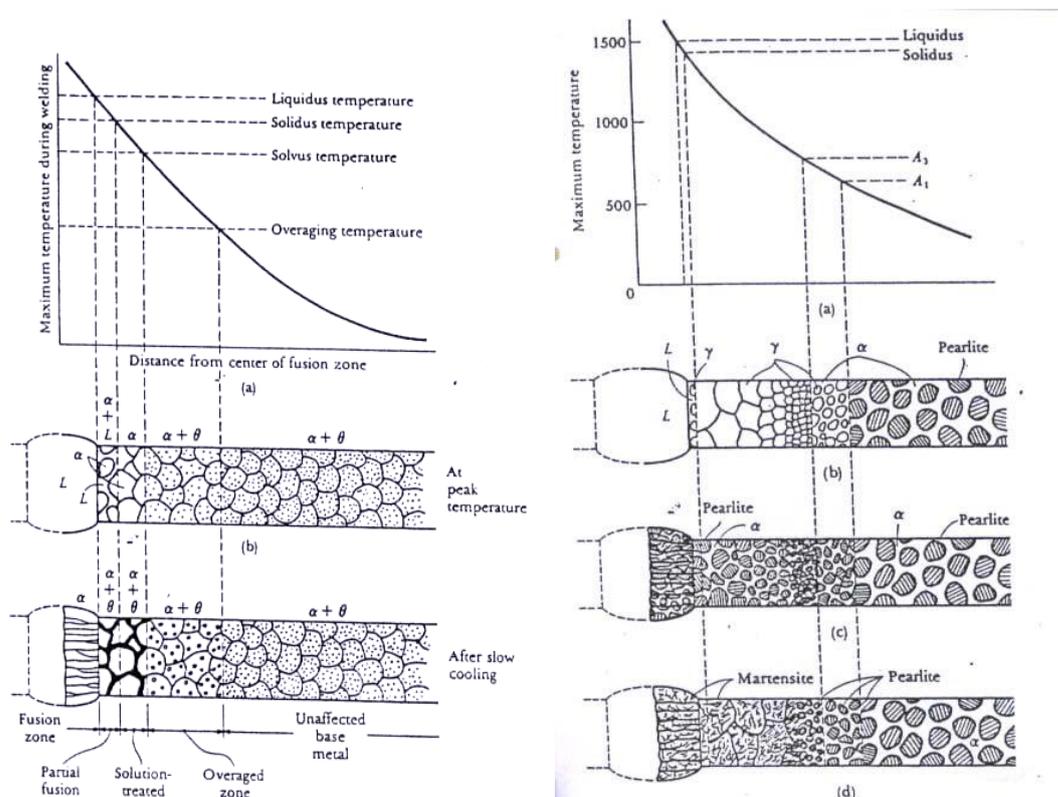


Figura 15, Modificaciones metalúrgicas en la ZAT.

Modificaciones metalúrgicas en la ZAT - Engrosamiento de grano:

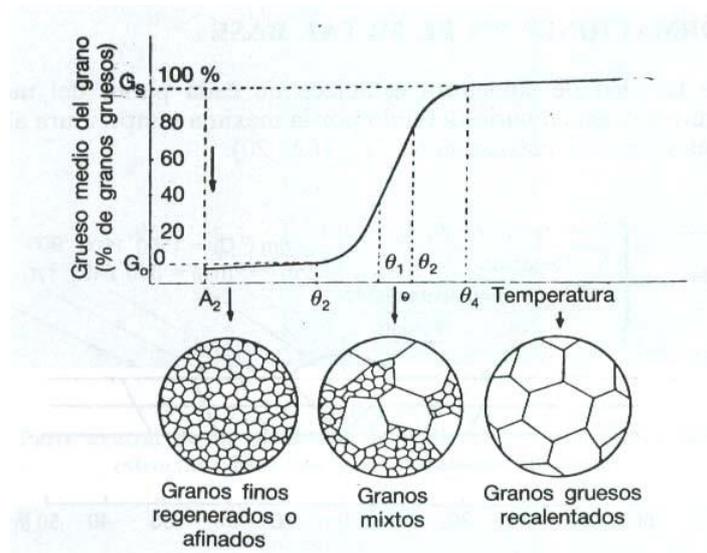


Figura 16, Modificaciones metalúrgicas en la ZAT, engrosamiento de grano.



Figura 17, Engrosamiento de grano, D y C.

Descripción de procesos empleados  
en soldadura de metales y aleaciones.

# Soldadura por Fusión

## Soldadura a la llama:

### Cualidades de las llamas para soldeo:

- Alta temperatura
- Reductora
- Rigidez de la llama: está relacionada con la velocidad de combustión.
- Extremos posibles: inestabilidad de la llama y retroceso de la llama.
- Flexibilidad: depende de los límites de inflamabilidad de la mezcla gaseosa.

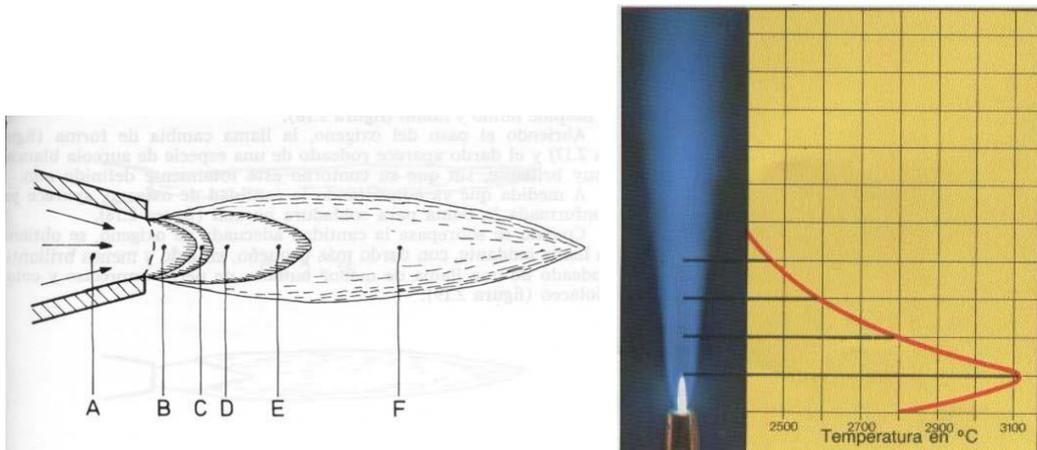


Figura 18, zonas de una llama para soldeo (oxiacetilénica) y temperaturas de la misma.

- A- Mezcla preliminar combustible-O<sub>2</sub>
- B- Dardo: la mezcla se calienta hasta la temperatura de inflamación.
- C- Dardo: elevación brusca de la temperatura por la inflamación.
- D- Zona de máxima temperatura (separada 3 a 5mm del extremo del dardo).
- E- Zona reductora: productos de la combustión primaria.
- F- Penacho: combustión secundaria; de carácter oxidante.

### *Llama oxiacetilénica:*

Combustión primaria:  $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + 106\,500 \text{ cal}$  (el carácter reductor del CO y H<sub>2</sub> descompone los óxidos metálicos en sus componentes, purificando el baño de fusión en la operación de soldeo),

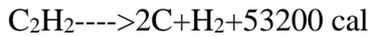
Combustión secundaria:  $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{N}_2 + 68000 \text{ cal}$

$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{N}_2 + 58000 \text{ cal}$

## ACETILENO

*Explosividad debido a:*

- Tendencia a la descomposición



- Tendencia a la polimerización



*Producción del acetileno:*



25600 cal/mol

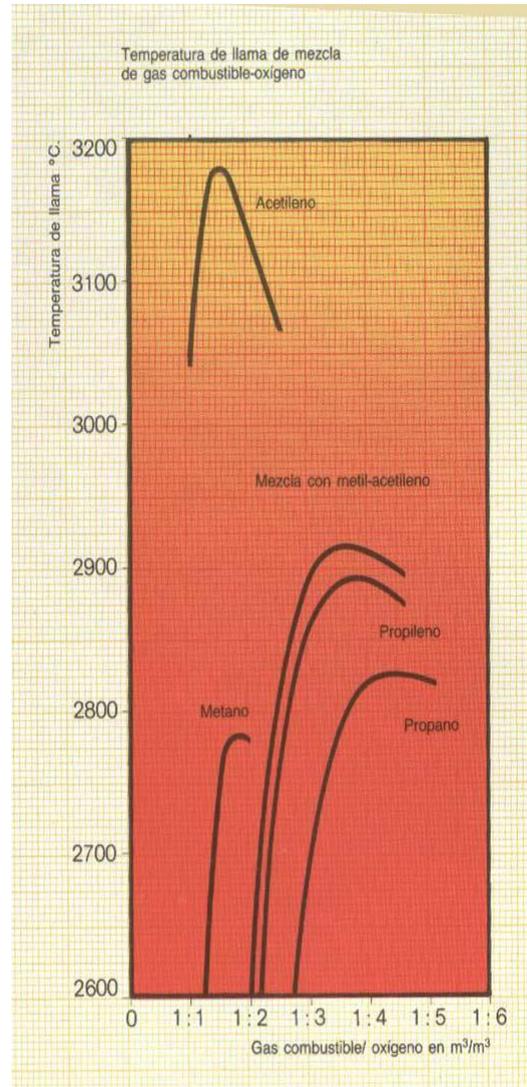
*Embotellado a 15 atmósferas a 15C°:*

- Acetonización: como el acetileno es inestable y peligroso a presiones superiores a 1,5kg, se disuelve en acetona para poder comprimirlo hasta los 15Kg/cm<sup>2</sup>.

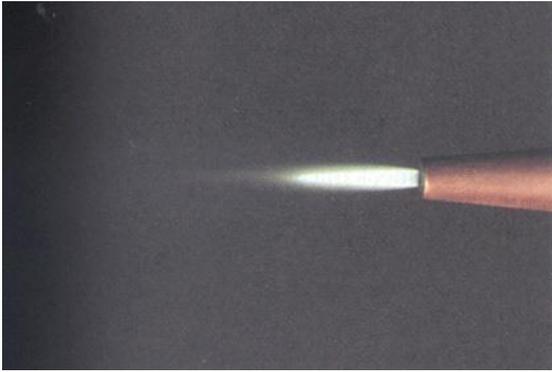
- Poroso: las botellas deben llenarse de una materia porosa (amianto, oxiclورو de cinc, carbón vegetal granulado, aglomerados con cemento).

- Contenido:

	<u>En volumen</u>	<u>En peso</u>
Masa porosa	25%	15 Kg
Acetona	40%	10.5 Kg
Acetileno disuelto	25%	4.5 Kg
Espacio	10%	

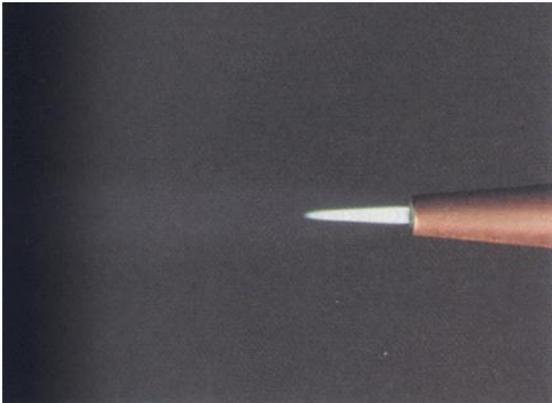


### *Tipos de llamas:*



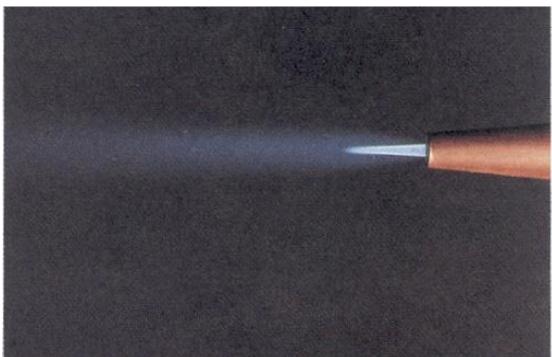
**Carburante:** Para recargues de piezas de acero. Para soldadura del aluminio y sus aleaciones por la menor temperatura de la llama.

Su dardo es el más largo.



**Neutra:** soldadura en general.

Su dardo es más corto que la llama carburante pero más largo que la oxidante.



**Oxidante:** Para cortar o abrir agujeros (mejor con oxicorte). Para la soldadura del cobre, para contrarrestar la gran difusión de calor. Cuando es necesario favorecer las condiciones de penetrabilidad.

### *Práctica de la soldadura oxiacetilénica:*

#### *1. Tipos de llama: aplicaciones y relación $O_2/C_2H_2$*

LLAMA NEUTRA: (la relación  $O_2/C_2H_2 = 1$ )

- Soldadura en general.

LLAMA OXIDANTE: (la relación  $O_2/C_2H_2 > 1$ )

- Operaciones de corte (mejor con oxicorte),

- Soldadura del cobre (mayor temperatura de la llama),
- En las operaciones donde la penetrabilidad alcanzada con llama neutra no es suficiente.

LLAMA CARBURANTE: (la relación  $O_2/C_2H_2 < 1$ )

- Recargues de piezas de acero,
- Soldadura de aluminio y sus aleaciones (menor temperatura de la llama).

## 2. Metales de aportación

Son adecuados aquéllos que tienen una constitución similar a la del metal base, pero enriquecidos con los elementos necesarios para compensar las alteraciones que se producen como consecuencia del proceso en el metal base y en el propio metal aportado.

*Soldadura de aceros al carbono:* para aceros al carbono se emplean aceros de mayor resistencia mecánica al magnesio o al níquel; para aceros aleados se utilizan varillas al CrV o al Cr-Mo; para aceros inoxidables, varillas enriquecidas en Ti, W ó Nb, que actúan como elementos estabilizadores.

*Soldadura del cobre y sus aleaciones:* Varillas de Cu, Ag (1%) ó Sn (2%); latones y bronces, varillas de composición similar.

*Aluminio y sus aleaciones:* Aluminio con un 10% de Si.

## 3. Fundentes

Se incorporan a la soldadura para disolver la película de óxido existente en los metales, quedando posteriormente flotando sobre el metal y lo protege de la corrosión atmosférica.

Son diferentes en función del metal a soldar: mezclas de bórax, espato flúor, mezclas de boratos de potasio y sodio...

*Elementos necesarios en la soldadura a la llama:*

**SOPLETES DE SOLDADURA:**

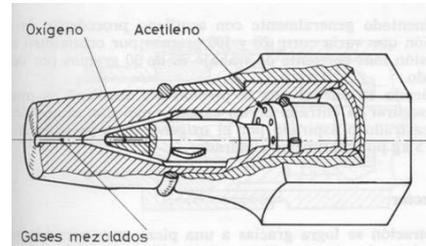
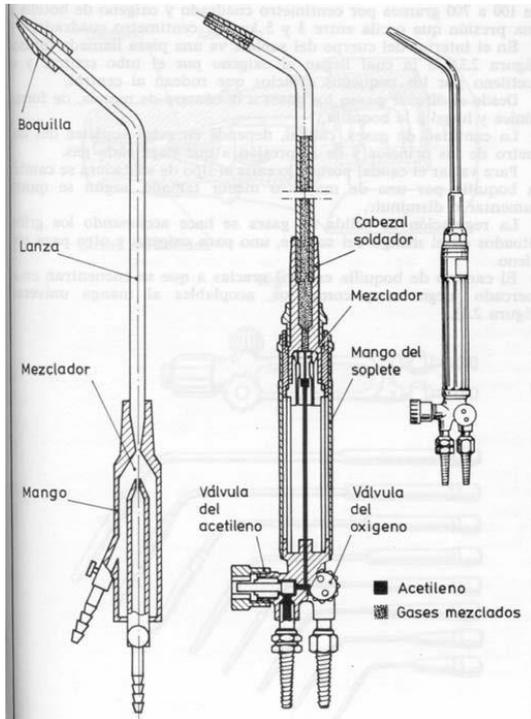


Fig. 2-3

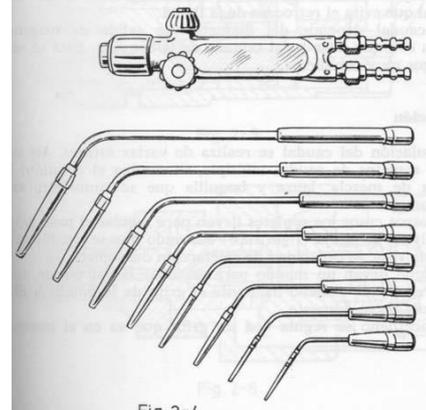
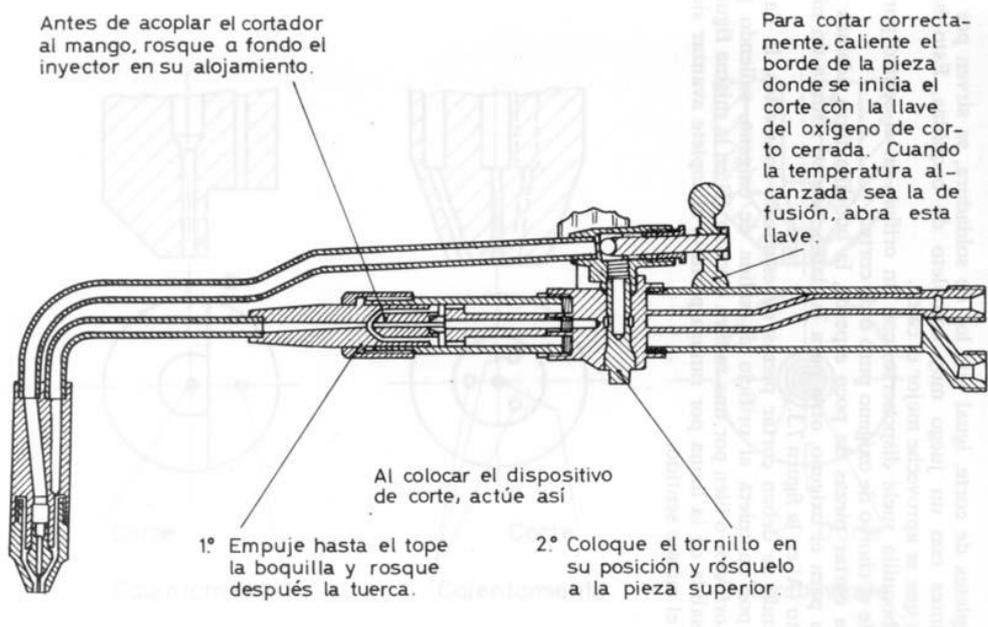
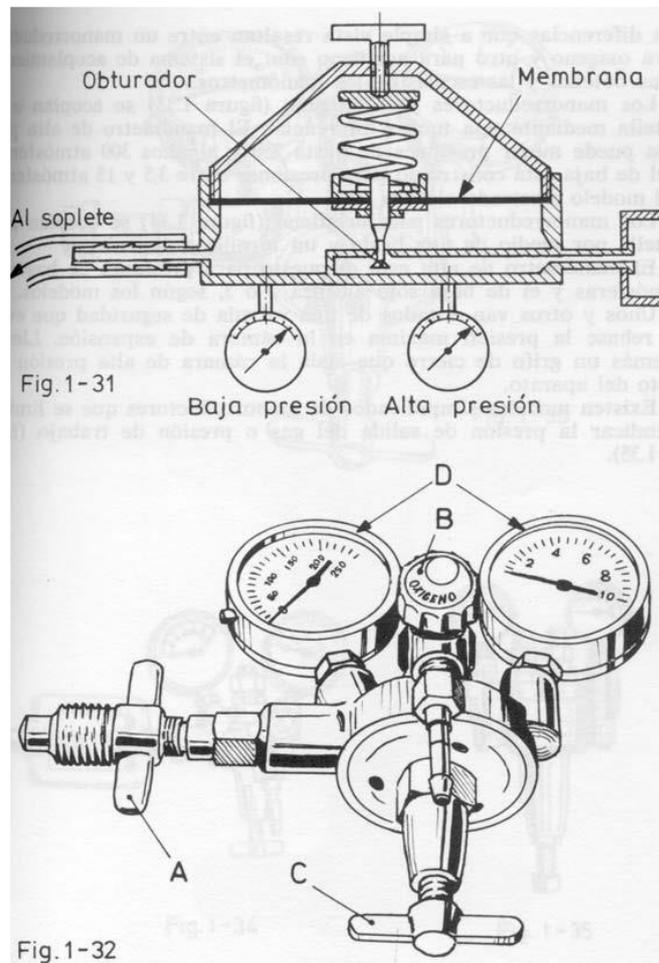


Fig 2-4

**SOPLETES DE CORTE:**



## MANORREDUCTORES:



### Presiones:

Oxígeno: Alta 0-250 Kg/cm<sup>2</sup>

Baja: 0-5 Kg/cm<sup>2</sup>

Acetileno: Alta 0-30 Kg/cm<sup>2</sup>

Baja: 0-3 Kg/cm<sup>2</sup>

### Propiedades:

- Mantener constante la presión de baja, aunque varíe la presión de alta al ir vaciándose las botellas e independientemente del consumo que se realice.
- Evitar en lo posible el golpe de ariete.
- Permitir una regulación fina de la presión de baja.
- No deben obstruirse cuando el consumo es grande por congelación del oxígeno debido a la expansión.
- Completamente estancos.

## FUNDAMENTO DEL OXICORTE:

Para que pueda realizarse el oxicorte deben cumplirse tres condiciones:

- La oxidación del metal debe ser suficientemente exotérmica para mantener la temperatura de corte.
- La temperatura de inflamación del metal debe ser inferior a la temperatura de fusión, para que se queme antes de fundirse.
- La temperatura de fusión del óxido debe ser inferior a la temperatura de fusión del metal.

### *Elementos fundamentales:*

Una fuente de calor capaz de elevar la temperatura del metal en la línea de corte hasta la temperatura de inflamación y de ayudar a mantener esta temperatura. Esto se realiza por medio de un soplete oxiacetilénico.

Un chorro de oxígeno dirigido sobre la línea de corte previamente puesta a la temperatura de inflamación para realizar la combustión del material en esa zona y separación de la escoria líquida formada.

La reacción que tiene lugar:  $3\text{Fe} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 1130\text{J/mol}$



### Aplicaciones del oxicorte:

Aceros al carbono hasta 0,25% de carbono no presentan ningún problema para ser oxicortados. Con porcentajes superiores al indicado puede endurecerse el material hasta un grado crítico en función del espesor.

Las fundiciones de hierro son difíciles de oxicortar debido al alto porcentaje de carbono existente en su composición que, en estado libre o combinado, favorece reacciones de tipo endotérmico ( $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{Fe} - 36 \text{ calorías}$ ).

Aceros aleados;

- Los óxidos de algunos elementos de aleación como el Cr y el Al tienen puntos de fusión mucho mayores que los correspondientes al Fe y a los óxidos de Fe. Aquellos óxidos pueden proteger el corte, de modo que no queda expuesto Fe nuevo a la corriente de oxígeno, dificultando o impidiendo el corte.
- El Mn, Ni y Cu no presentan dificultades apreciables actuando como aleantes en aceros.

El consumo de gas no es directamente proporcional al espesor a cortar. Resulta más económico aumentar el espesor con varias piezas que cortarlas por separado.

## Soldadura por arco eléctrico:

### Principios fundamentales:

#### 1. FÍSICA DEL ARCO

El arco de soldadura es una mezcla de electrones, iones, átomos y moléculas. Se comporta como un conductor gaseoso que transforma en calor la energía eléctrica suministrada por la fuente de alimentación correspondiente.

La corriente es llevada a través del arco por los electrones e iones que en número aproximadamente igual existen en el gas del arco una vez ionizado. El gas ionizado recibe el nombre de plasma y tiene propiedades características. La corriente es transportada esencialmente por los electrones que se mueven desde el terminal negativo (cátodo) hacia el positivo (ánodo). Junto con el plasma, en el arco de soldadura hay átomos, moléculas y material fundido.

Para que el arco se mantenga es necesario que el cátodo emita electrones suficientes y que se produzcan, por choque, los iones necesarios para dar un plasma neutro estable. La estabilidad del arco de soldadura es necesaria en los procesos de soldeo.

Existen tres zonas fundamentales en el arco de soldadura: zona catódica, columna de arco y zona anódica. Las dimensiones de las zonas catódica y anódica son muy pequeñas comparadas con la columna del arco, pero las caídas de tensiones son tales que aproximadamente se cumple  $V_1 + V_3 = 2/3V$ , donde  $V_1$  y  $V_3$  corresponden a las caídas de tensión en las zonas catódica y anódica respectivamente. En definitiva, en la columna sólo se produce  $1/3$  de la caída de potencial total del arco.

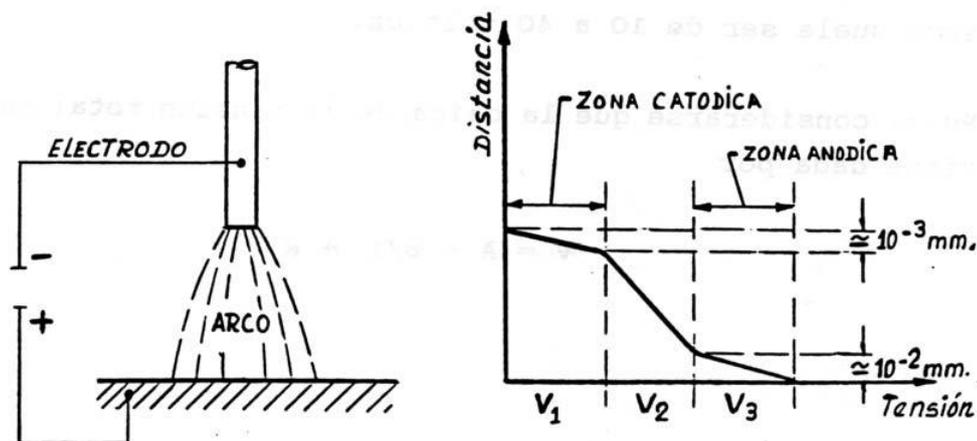


Figura referida a las regiones del arco.

La región catódica suministra a la columna del arco los electrones, por lo que la estabilidad del arco está determinada por las características de esta zona (material y dimensiones del cátodo, punta del electrodo, temperatura, diferencia de tensión, gas de protección, etc.).

Al aumentar la temperatura del cátodo, los electrones son arrancados por la diferencia de potencial existente en la zona. En consecuencia, la emisión de electrones está condicionada por un fenómeno térmico y otro relacionado con la diferencia de tensión, campo eléctrico, que se rigen por leyes diferentes. Los electrones una vez arrancados, son acelerados por el campo hacia la columna, chocando con las moléculas y átomos que ésta tenga y dando lugar a fenómenos de ionización. Estos iones son de masa mucho mayor que los electrones y se mueven lentamente hacia el cátodo o ánodo dependiendo de su carga. En los arcos de soldadura la caída total de potencial (V) en el arco suele ser de 10 a 40 voltios. Puede considerarse que dicha caída de tensión viene dada por  $V = A + B/I + RI$ . El sumando  $B/I$  indica que al aumentar la intensidad (I), la caída de tensión disminuye, lo que es contrario a la ley de Ohm, pero se debe a las características de las zonas catódicas y anódicas.

Así, podemos pensar que al aumentar la temperatura, los electrones salen más fácilmente del cátodo y pueden aumentar la corriente sin necesidad de subir la tensión; en efecto, al haber más intensidad hay más calor, la temperatura sube, la facilidad de emisión aumenta y la tensión puede disminuir. En cambio, el sumando  $RI$  refleja el comportamiento de la columna de arco como un conductor que satisface la ley de Joule.

Como resultado de lo anterior, el arco eléctrico de soldadura puede ser representado por una curva característica como la que se indica en la figura; para pequeñas intensidades el arco no sigue la ley de Ohm, existiendo una fase de iniciación con pendiente negativa hasta que el arco se estabiliza. En la práctica se trabaja en la zona de pendiente positiva.

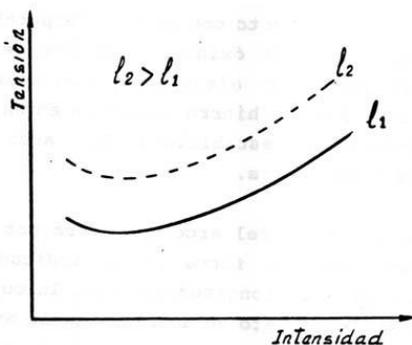


Figura referida a la Curva tensión-intensidad, típica del arco eléctrico ( $l$ ; representa la longitud del arco).

La iniciación del arco (cebado) y su estabilidad será tanto más fácil cuanto menos dificultad presente el cátodo para emitir electrones, y más fácil sea producir iones en el arco. Estas cuestiones se han de tener en cuenta para la confección de electrodos. Así, por ejemplo, los revestimientos de los electrodos manuales llevan compuestos con Na y K debido a la baja energía de ionización de sus gases comparado con el resto de gases metálicos. También se incluyen éstos en los fundentes que se usan para el proceso de arco sumergido.

La distribución de energía en un arco puede ser disimétrica. Así, al soldar cobre mediante el proceso TIG con argón, en el ánodo se concentra un 70-80% de la energía, en el cátodo del 15-5% y el resto en la columna del arco. De forma general, en los procesos bajo gas se concentra más energía en la zona anódica que en la catódica y, por tanto, el ánodo estará más caliente.

De este hecho pueden deducirse consecuencias en cuanto a la utilización de una u otra polaridad al soldar, teniendo en cuenta, además, la necesidad de que el cátodo tiene que alimentar la columna con electrones. La elección del tungsteno como electrodo en el proceso TIG es debida a la gran facilidad que presenta para emitir electrones junto con su alta temperatura de fusión. Por el contrario, algunos óxidos, como los refractarios que cubren el aluminio y sus aleaciones, son malos emisores de electrones; los óxidos de hierro se sitúan en un término medio a bajo, mejorándose la estabilidad del arco mediante los revestimientos y fundentes. También puede predecirse que la soldadura con electrodo de acero desnudo actuando como polo negativo será más difícil que cuando el electrodo lleve un revestimiento con materiales que faciliten la emisión de electrones (sales de sodio y potasio generalmente).

La estabilidad con electrodo desnudo al polo positivo dependerá de la capacidad de emisión de la pieza.

La mayor temperatura del ánodo puede ser ventajosa para aumentar la velocidad de fusión de un electrodo fusible si se utiliza como ánodo. En otros casos puede ser perjudicial (soldadura TIG).

## 2. TRANSPORTE DEL MATERIAL EN EL ARCO

Cuando se sueldan dos piezas colocadas en plano horizontal con un electrodo que está colocado sobre ellas, parece natural que el material fundido de la punta del electrodo caiga sobre los bordes a soldar, pues instintivamente se piensa en la acción de

la gravedad. Sin embargo, es posible soldar en todas las posiciones, incluida la de techo, y esto tanto con corriente alterna, como con corriente continua con una u otra polaridad.

Esto se justifica si se considera que han de producirse en el arco fenómenos que den como resultado una fuerza que actúe sobre la punta del electrodo, gota fundida, que sea capaz de vencer la acción de la gravedad y de la tensión superficial que tratará de mantener unida la gota al electrodo.

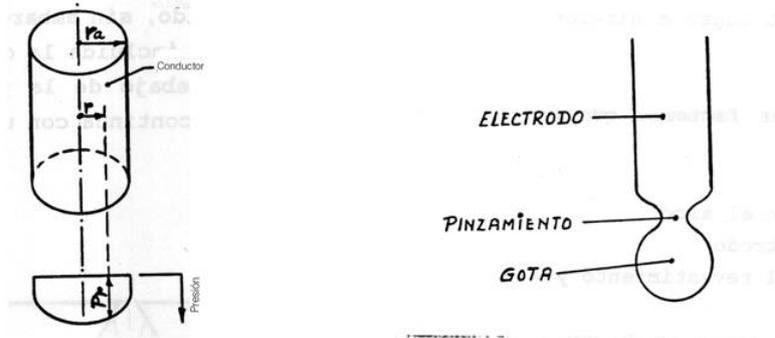


Figura Sobre presión en un conductor y efecto de pinzamiento.

En efecto, cuando por un conductor de radio  $r$ , circula una corriente de intensidad  $I$ , se produce en su interior una sobre presión, que crece al disminuir  $r$  y es nula en los extremos. Esta sobre presión llega a ser suficiente para separar la gota de la punta del electrodo cuando adquiere una temperatura y unas dimensiones determinadas.

Este fenómeno es conocido en electromagnetismo como pinch effect, efecto de pinzamiento.

En la zona estrecha que une la gota al electrodo se alcanza una densidad de corriente tan alta que hace que el material de esta zona se vaporice dando lugar a la separación de la gota del electrodo. La corriente de plasma tiende a arrastrar por fricción el material desde el electrodo a la pieza. También, en la punta del electrodo se produce un incremento de la presión de los gases que favorece el desprendimiento de la gota.

En general, estos y otros efectos actúan conjuntamente variando su influencia relativa según las características del procedimiento y dando lugar a diferentes condiciones de paso del material.

### 3. INSTALACIONES PARA LA SOLDADURA POR ARCO

La tensión que suministra la red es demasiado elevada para su uso directamente en el arco de soldadura. Por eso, el primer objetivo de la instalación de soldadura es reducir dicha tensión hasta el rango de valores aplicables (normalmente entre 20 y 80 voltios). Para este propósito pueden emplearse un transformador. Por otra parte, también es posible que una instalación para soldadura por arco se alimente de algún motor térmico, como por ejemplo un motor de combustión interna. Este tipo de instalaciones sólo es posible en generadores.

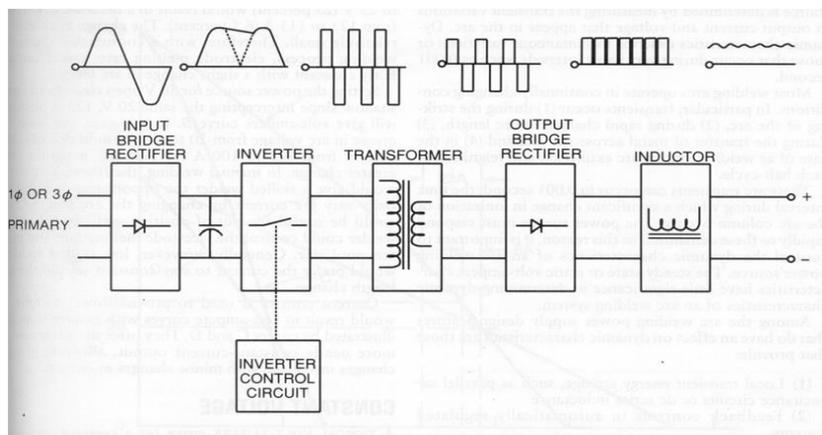
Esos mismos equipos han de ser capaces de suministrar una intensidad de corriente muy elevada, generalmente en un rango comprendido entre los 30 y los 1500 amperios. La corriente de salida del equipo (al arco) puede ser alterna, continua o ambas.

Algunas instalaciones proporcionan sólo cierto tipo de corriente. Así, los transformadores por sí solos proporcionan sólo corriente alterna. Los transformadores-rectificadores pueden suministrar corriente alterna y corriente continua.

Pueden emplearse dispositivos semiconductores de características especiales para la conversión de señal (AC/DC). Uno de esos dispositivos son los tiristores (Silicon controlled rectified, SCR).

Normalmente, los equipos de soldadura son transformadores que operan en el rango de 50 a 60 Hz. Si tenemos en cuenta que el tamaño de un transformador es inversamente proporcional a la frecuencia en la que trabajan, se pueden conseguir reducciones de un 75% de tamaño y peso con el empleo de circuitos inversores.

La figura inferior representa un diagrama de bloques de un inversor utilizado para un equipo de soldadura de corriente continua. El conjunto incorpora una inductancia de estabilización que mejora la estabilidad del arco.



*La figura representa un diagrama de bloques de un inversor utilizado para un equipo de soldadura de corriente continua (DC).*

#### 4. CONSTANTE Y MÁQUINAS DE CORRIENTE CONSTANTE.

Los equipos de soldadura deben estar contruidos de forma que entre los bornes de la máquina exista una diferencia de potencial suficiente para iniciar el arco. Esta tensión a circuito abierto es del orden de los 50 a 80 voltios. Al cebarse el arco, su valor cae hasta unos 20 a 30 voltios, pues la ionización disminuye la resistencia al paso de la corriente.

Si se registra los valores de tensión para las distintas intensidades, se obtiene lo que se denomina la CARACTERÍSTICA ESTÁTICA de la máquina.

Las características estáticas de una máquina se obtienen bajo condiciones estables, usando cargas resistivas, mediante medidas convencionales.

##### 4.1. Máquinas de corriente constante.

Son aquéllas que poseen medios para ajustar la intensidad de corriente y que presentan una curva tensión-intensidad que tiende a producir una corriente relativamente constante. El valor de tensión que corresponde a una intensidad seleccionada es la respuesta a la velocidad a la que un electrodo consumible es alimentado en el arco. Si el electrodo es no consumible, la tensión depende de la distancia del electrodo a la pieza.

Esta característica se traduce en que si la longitud del arco varía debido a influencias externas que conducen a ligeros cambios en la tensión, la intensidad de corriente permanece substancialmente constante. Este tipo de característica es muy apropiado para procesos de soldadura manual, tales como la soldadura por electrodos revestidos y la soldadura TIG, ya que las variaciones de la longitud del arco, inevitables por el factor humano, no alteran el arco.

La forma típica de las curvas tensión-intensidad correspondientes a una máquina de corriente constante se puede observar en la figura. Se suele denominar característica caída, debido a la notable pendiente negativa que presentan estas curvas. En general las máquinas tienen posibilidades de regulación que les permiten actuar con más de una curva. Las de la figura corresponden a una máquina con posibilidad de dos posiciones de tensión a circuito abierto (80 y 50 V). Las curvas A y B corresponden a las de intensidad máxima de la máquina para las tensiones en vacío correspondientes, y las curvas C y D corresponden a la intensidad mínima. Entre A y C y entre B y D habrá curvas que correspondan a valores intermedios del mando de la intensidad.

El efecto del valor de la pendiente en estas curvas puede observarse en la figura: el cambio en la intensidad de corriente es relativamente pequeño con la variación de tensión.

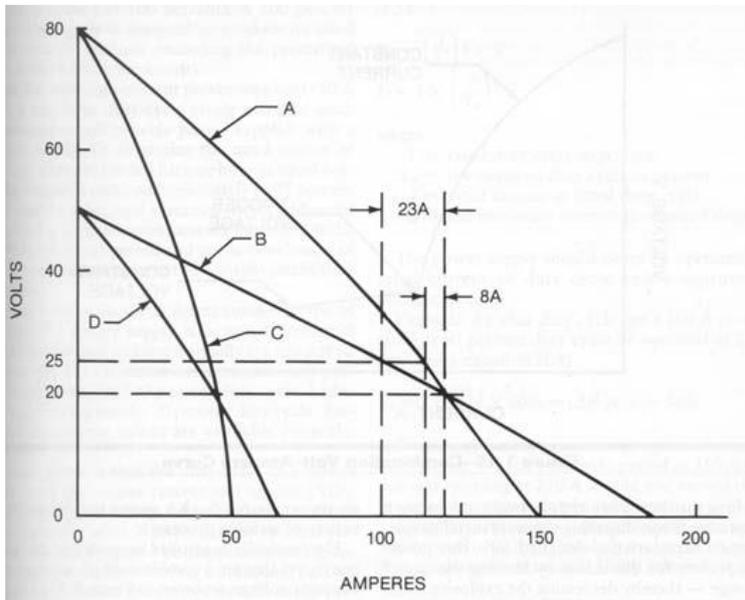


Figura representativa de la característica de caída típica de un equipo con distintas posibilidades de regulación.

#### 4.2. Máquinas de tensión constante.

Una máquina de tensión constante es aquella en la que se puede ajustar la tensión y que tiene una característica estática de modo que tiende a presentar una tensión constante. Aquí es la intensidad de corriente la que tiene que ver con la velocidad de alimentación del electrodo al arco.

En la figura siguiente se representa una curva típica correspondiente a un equipo de tensión constante. Este tipo de comportamiento recibe el nombre también de característica horizontal por el bajo valor de la pendiente que presenta la curva. En efecto, la pendiente es debida a que la tensión no permanece estrictamente constante.

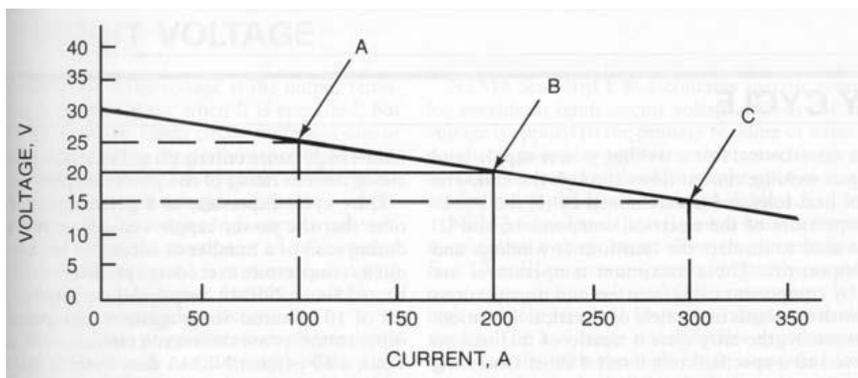


Figura representativa de la característica horizontal típica de un equipo de tensión constante.

Como se puede observar, un ligero cambio en la longitud del arco (variación de la tensión) conduce a una gran variación de la intensidad de corriente. Esto hará disminuir o aumentar la velocidad de fusión del electrodo hasta que de nuevo se recupera la longitud de arco (tensión). Por ello, un arco alimentado por un equipo de tensión constante, con electrodo consumible alimentado a una velocidad constante, es un sistema autorregulado. Esto es, tiende a estabilizar la longitud del arco a pesar de los cambios momentáneos en la posición de la antorcha. La corriente del arco es proporcional a la velocidad del alambre para todos los diámetros.

Los equipos con característica horizontal se suelen utilizar con procesos de soldadura que emplean electrodos consumibles de alimentación continua, generalmente en forma de alambre (MIG/MAG).

Se consideran equipos de tensión constante a aquéllos que poseen una característica con pendiente negativa de hasta 8 V por cada 100 A.

#### 4.3. Equipos con características estáticas combinadas.

Los actuales controles electrónicos pueden ser diseñados para proporcionar salidas de corriente constante o de tensión constante en un solo equipo. También es posible proporcionar curvas de salida que son una combinación de corriente constante y de tensión constante, tal y como se muestra en la figura siguiente.

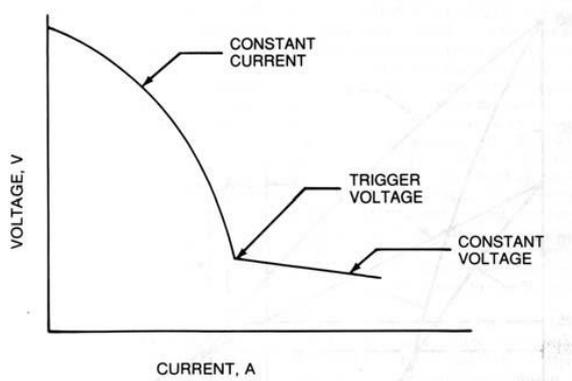
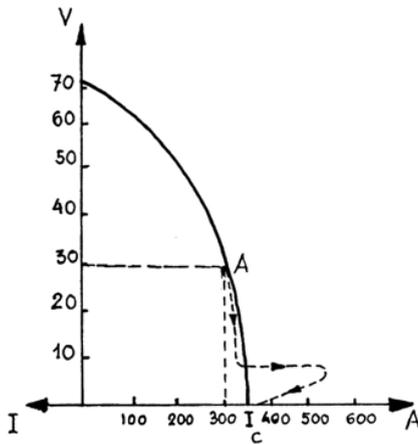


Figura sobre la característica combinada.

#### 4.4. Características dinámicas.

Las características estáticas reflejan, como se ha visto, los cambios que se producen en la relación U-I en intervalos de tiempo suficientemente grandes. Si se registra con un osciloscopio las variaciones de tensión e intensidad en el arco, se verá que existen fenómenos de duración muy pequeña, del orden del milisegundo. Estas variaciones

instantáneas de  $U$  e  $I$  están determinadas por las características dinámicas de la máquina y se producen en el arco de soldadura de forma inevitable durante los cebados y extinciones del arco, el paso de las gotas, la modificación de la distancia entre el electrodo y la pieza, etc.



*Figura sobre las características dinámicas de un equipo.*

Se puede mostrar la influencia del comportamiento dinámico de la máquina sobre el proceso de soldadura, de acuerdo con la figura anterior. En dicha figura se representa la característica estática de una máquina de corriente constante. A primera vista el equipo satisface todas las exigencias para un correcto funcionamiento.

La característica estática representa la relación tensión-intensidad para estados de equilibrio sucesivos, determinados por resistencias dadas incorporadas al circuito. Estos estados de equilibrio no se presentan en soldadura; las variaciones son, si no instantáneas, rapidísimas (del orden de 0.001 segundo). Es necesario, por tanto, que la tensión y la intensidad se desplacen muy rápidamente del punto A al punto C (corriente de cortocircuito cuando se produce la transferencia de material, por ejemplo). Si por ejemplo el tiempo necesario para que un equipo de soldadura reduzca su tensión de 30 a 0 voltios es de 0.1 segundo, dado que el cortocircuito dura entre 0.01 y 0.001 segundos, la caída de tensión se efectúa con retraso y no sigue la característica estática del equipo.

En el caso de bruscas variaciones, el paso del punto A al C no se efectúa a lo largo de la característica estática, sino por la curva de puntos. En el momento del cortocircuito, la tensión entre el electrodo y la pieza desciende bruscamente, ya que la resistencia se reduce a cero. Si, como consecuencia de la inercia magnética en el circuito, la tensión del aparato en ese momento no desciende con la rapidez debida,

permanece una tensión en el circuito que dará una punta de intensidad como la representada en la curva de trazos.

Inversamente, si después del paso de la gota la tensión requerida para el cebado del arco no es instantánea, éste no puede volverse a cebar y la corriente queda interrumpida. Así, cuanto más rápidamente reaccione la tensión del aparato en concordancia con las bruscas variaciones de tensión, tanto más uniforme será la intensidad de soldadura, fácil el cebado del arco y normal la fusión. Es pues, un elemento de gran importancia la velocidad de adaptación de la tensión del aparato; en relación a esto, en la normalización de equipos se define **el tiempo de restablecimiento como el que transcurre entre el instante de la ruptura del cortocircuito y aquél en que se obtiene la mitad de la tensión en vacío.**

## 5. CONSIDERACIONES SOBRE EL USO DE LA CORRIENTE CONTINUA Y DE LA CORRIENTE ALTERNA.

En general, cuanto mayor sea la tensión en circuito abierto de una máquina mayor será la estabilidad del arco al disponer de un campo de potencial mayor para arrancar los electrones del cátodo y para ionizar la columna del arco.

También es más fácil el cebado del arco cuanto mayor es la tensión a circuito abierto. En los equipos que suministran corriente alterna al arco de soldadura, la importancia de la tensión de vacío es aún mayor pues la corriente en el arco se anula (el arco se extingue 100 veces por segundo y debe reencenderse otras tantas veces). El encendido será tanto más fácil cuanto mayor sea el potencial disponible en ese momento en la máquina.

Un hecho que favorece el reencendido del arco en alterna es la existencia de desfase entre la tensión y la intensidad, lo que se logra colocando una impedancia de tipo inductivo o capacitivo. En la figura siguiente se representan las ondas de tensión a circuito abierto de dos fuentes monofásicas diferentes. Las ondas de intensidad corresponden a las intensidades correspondientes del arco. En el caso de que exista desfase, se observa que momentos antes de hacerse  $i=0$ , la intensidad va disminuyendo, el arco se enfría y la ionización disminuye con lo que el reencendido del arco ha de superar estas dificultades. Si el circuito tuviera una resistencia pura, no habría desfase con lo que el valor de la tensión valdría cero en el momento en que  $i=0$ , haciendo más difícil el reencendido del arco.

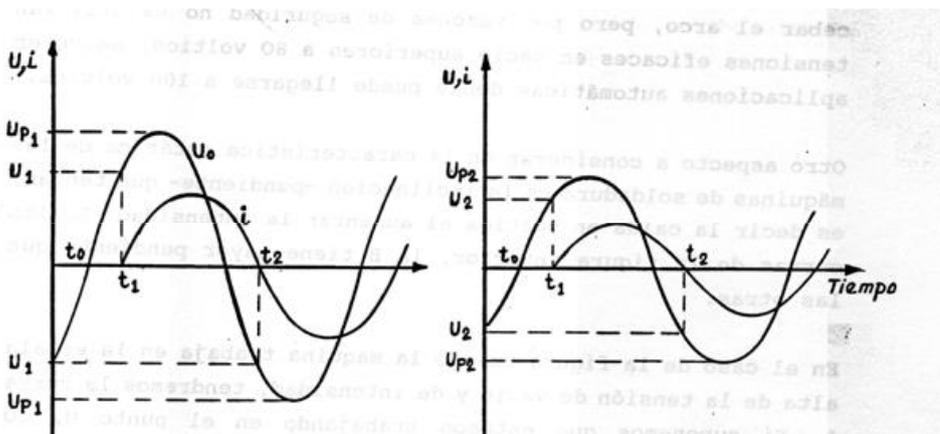


Figura referida a Ondas de tensión en vacío intensidad en el arco para dos fuentes monofásicas diferentes.

Los equipos de soldadura incorporan muchas configuraciones auxiliares con el objetivo de adaptar mejor la unidad a la aplicación específica o para operar de forma más conveniente.

Algunos equipos de corriente alterna incorporan un sistema para suministrar una corriente al arco mayor a la normal durante una fracción de segundo al inicio de la soldadura.

Otros equipos, en cambio, son equipados con un control que proporciona una reducción de corriente al principio para minimizar la transferencia de tungsteno desde el electrodo (proceso TIG). Los equipos TIG también incorporan electroválvulas y temporizadores para el control del flujo del gas y del refrigerante. Pueden incorporarse también unidades de alta frecuencia para el inicio y la estabilización del arco.

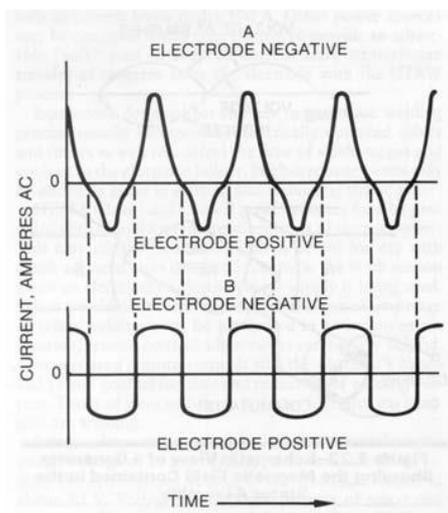


Figura referida al contraste de una onda típica de corriente alterna (modificada por la acción de cargas inductivas importantes) y una onda de tipo cuadrado.

Puede también mejorarse el reencendido del arco en corriente alterna modificando la forma de la onda de corriente a onda de tipo cuadrada (existen dispositivos adecuados para ello); de este modo el paso de corriente por el valor cero es muy rápido y no se produce el descebado del arco, o al menos no son necesarios dispositivos de alta frecuencia.

*Electrodos revestidos para soldadura por arco eléctrico manual:*

- ELECTRODOS DE ACEROS AL CARBONO
- ELECTRODOS DE ACEROS DE BAJA ALEACIÓN
- ELECTRODOS DE ACEROS RESISTENTES A LA CORROSIÓN
- ELECTRODOS DE NÍQUEL Y DE ALEACIONES DE NÍQUEL:

Composiciones similares a los del metal base; algunos tienen pequeños contenidos de elementos tales como el titanio y manganeso que actúan como desoxidantes.

- ELECTRODOS DE ALUMINIO Y DE ALEACIONES DE ALUMINIO: Básicamente son de dos tipos: aluminio puro comercial (1100) y aluminio con un 5% de silicio; la presencia de humedad en el recubrimiento es la mayor fuente de porosidad en el metal soldado. Se utilizan para soldaduras no críticas. No responden a tratamientos de endurecimiento por precipitación.

- ELECTRODOS DE COBRE Y DE ALEACIONES DE COBRE: Los electrodos de cobre se usan para soldadura de cobre sin alear y para reparación de recubrimientos de cobre sobre acero o fundición de hierro, así como para revestir superficies para resistencia a la corrosión. Las aleaciones se utilizan para soldadura de algunos tipos de bronce y aleaciones cobre-níquel.

- ELECTRODOS PARA FUNDICIÓN DE HIERRO: Se utilizan electrodos de níquel, hierro-níquel y níquel-cobre. La soldadura se suele hacer con baja corriente y polaridad directa con la finalidad de mantener bajos niveles de dilución con el metal base.

- ELECTRODOS PARA REVESTIR SUPERFICIES: Se utilizan para mejorar la resistencia al desgaste, a la corrosión, al impacto o al calor. Existen de diversos tipos como por ejemplo acero relleno de granulos de carburo de wolframio.

## COMPOSICIÓN DEL REVESTIMIENTO

- Función gas protector: celulosa, carbonato cálcico.
- Formadores de escoria: rutilo, feldespatos, sílice, óxido de hierro, espato flúor, arena de zirconio.
- Estabilizador de arco: titanato potásico, silicato potásico.
- Aglomerante: silicato sódico, talco.
- Aleante: ferromanganeso.
- Desoxidante: ferro-silicio.
- Velocidad de deposición: polvo de hierro.

## FUNCIONES DEL REVESTIMIENTO:

- Cebado del arco: Los silicatos, carbonatos, óxidos de hierro, óxidos de titanio, favorecen el cebado y mantenimiento del arco.
- Estabilidad del arco: La estabilidad del arco depende, entre otros factores, del estado de ionización de los gases. Para un arco en c.a. es imprescindible un medio fuertemente ionizado, por lo que se añaden sales de sodio y de potasio.
- Atmósfera protectora: evitar el contacto del metal fundido con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno del aire, por la formación de un gas protector y mediante la posterior formación de una escoria que flota encima del baño de fusión.
- Acción metalúrgica sobre el metal depositado: la escoria reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura por su efecto aislante; también realiza una acción desoxidante, desnitrurante, defosforante y desulfurante.
- El revestimiento contiene elementos aleantes que mejoran las características del baño.

## CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS ELECTRODOS PARA EL SOLDEO DE ACEROS:

- **ELECTRODOS ÁCIDOS:** Contienen una adecuada proporción de elementos desoxidantes en forma de ferroaleaciones. La reacción es ácida, es decir, disuelve los óxidos básicos. La escoria es abundante, de color negro y de estructura esponjosa.

Confieren al metal depositado un alto contenido de H<sub>2</sub> y de impurezas. También suelen introducir escoria en el metal aportado. ESTÁN EN DESUSO.

- **ELECTRODOS CELULÓSICOS:** El componente principal es la celulosa., que al descomponerse proporciona una atmósfera protectora que aísla y protege de la oxidación al manganeso y al resto de componentes del acero. Las reacciones de reducción se desarrollan en una atmósfera de hidrógeno que cubre el metal fundido.

Da una escoria poco voluminosa, ya que la protección del baño es esencialmente de tipo gaseoso. Produce gran penetración.

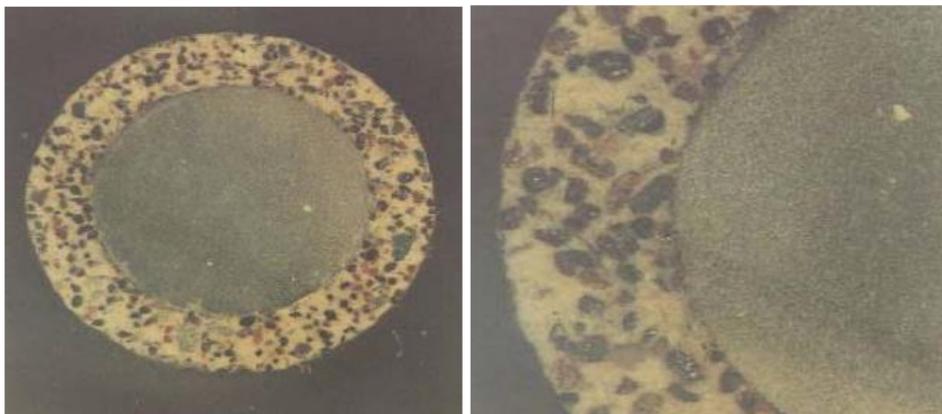
- **ELECTRODOS DE RUTILO:** El principal componente de estos electrodos es el rutilo (Ti O<sub>2</sub>). Las escorias son el resultado de titanatos de hierro y complejos. La escoria se elimina con facilidad. Son poco sensibles a la humedad, escasas salpicaduras y una velocidad de soldeo razonable. Son fáciles de usar en todas las posiciones e idóneos en todo tipo de soldaduras siempre que no se requiera una elevada tenacidad.

- **ELECTRODOS BÁSICOS:** Los componentes principales del revestimiento son el carbonato cálcico y el fluoruro cálcico; proporciona un gas protector a base de CO<sub>2</sub>.

Funden a temperatura muy elevada (2000°C) por lo que llevan un fundente en su composición (espato-flúor). Son fuertemente higroscópicos por lo que se requieren precauciones para evitar que una retención de humedad origine porosidades en el metal depositado y posibilidad de fisuración bajo el cordón.

- **ELECTRODOS DE GRAN RENDIMIENTO:** Se puede llegar a rendimientos del 240%. Esta clase de electrodos contienen polvo de hierro en el revestimiento.

Requieren altas intensidades de soldeo para lograr fundir, además del alma, el polvo de hierro del revestimiento.



*Figuras representativas del corte transversal de un electrodo con revestimiento de Rutilo ampliadas en 25X y 50X.*

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AWS  
 SOLDADURA DE ACEROS AL CARBONO  
 E XXXX

Los dos primeros dígitos indican la carga de rotura mínima del metal depositado en múltiplos de 1000 psi (0.7 kg/mm<sup>2</sup>). Toman los valores de 60 o 70.

Tercer dígito: indica las posiciones de soldeo en las que el electrodo puede ser utilizado satisfactoriamente, según; 1: en todas las posiciones de soldeo, 2: sólo en posición, 3: especialmente en vertical descendente.

Cuarto dígito: indica el tipo de revestimiento y las características de la corriente adecuada para su uso según:

Dígito	Revestimiento-Aglomerante	Corriente alterna	Corriente continua electrodo conectado a	
			polo (+)	polo (-)
0 { Si el tercer dígito es: } 1	Celulósico-Silicato sódico		X	
	Ácido	X	X	X
1	Celulósico-Silicato potásico	X	X	
2	Rutilo-Silicato sódico			X
3	Rutilo-Silicato potásico	X	X	X
4	Rutilo gran rendimiento	X	X	X
5	Básico-Silicato sódico		X	
6	Básico-Silicato potásico	X	X	
7	Ácido gran rendimiento	X	X	X
8	Básico gran rendimiento	X	X	

Cuadro de clasificación del cuarto dígito según tipo de revestimiento y corriente.

## FACTORES FUNDAMENTALES EN LA SOLDADURA POR ARCO:

- Elección del electrodo adecuado.

- Longitud de arco correcta:

Si el arco es demasiado largo, el metal pasa del electrodo a la pieza en forma de grandes glóbulos que se depositan de forma irregular, produciendo un cordón de mal aspecto, muy ancho, con excesivas proyecciones y sin suficiente ligazón con el metal base. Permite la incorporación de aire a la corriente gaseosa del arco (oxidaciones y nitruraciones). Provoca grandes pérdidas de calor a través del aire.

Si el arco es demasiado corto, no genera suficiente calor para fundir adecuadamente el metal base; el electrodo se pega con frecuencia y el cordón queda muy abultado, desigual con aguas muy irregulares. Para electrodos de pequeño diámetro deben utilizarse arcos más cortos que cuando se suelda con electrodos de gran diámetro (la longitud de arco debe tomarse aproximadamente igual al diámetro del electrodo; en los básicos  $l=d/2$ ).

En posición vertical o de techo deben llevarse arcos más cortos ya que permiten un mejor control del baño de fusión.

- Intensidad de corriente: Si la corriente es demasiado alta, el electrodo funde muy deprisa y el baño de fusión es muy grande e irregular. Si la corriente es muy baja, no hay suficiente calor de fusión; el cordón queda abombado y de forma irregular.

- Velocidad de avance: Cuando la velocidad es excesiva, el baño de fusión no permanece líquido el tiempo suficiente para desprenderse de todas las impurezas, quedando aprisionadas en el mismo (inclusiones).

## SELECCIÓN DEL ELECTRODO ADECUADO:

- Características del metal base: el electrodo debe depositar un material con las mismas características mecánicas que el metal base.

- Diámetro del electrodo:

- Como regla general no deben utilizarse diámetros superiores al espesor de las piezas a soldar.

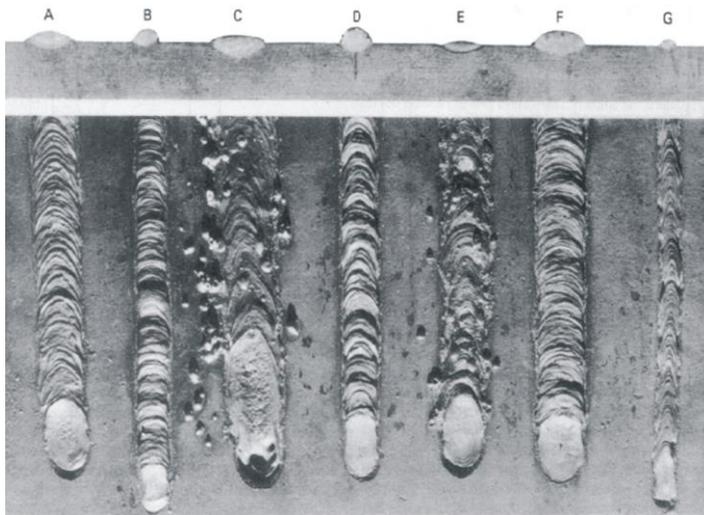
- Los mayores diámetros de electrodo conducen a mayores depósitos sin interrupción, lo que aumenta la velocidad de soldeo disminuyendo el número de paradas para cambiar el electrodo. Requieren mayor habilidad por parte del soldador.

- Para soldaduras en vertical o en techo, el mayor diámetro es de 4mm; los diámetros mayores hacen muy difícil el control del metal depositado.

- El tipo de preparación de junta y la separación de bordes condicionan el diámetro de electrodo a emplear: aberturas de chaflán insuficiente exigen electrodos de gran penetración, pequeños diámetros en las primeras pasadas.

- Posición de soldadura.
- Corriente de soldadura.
- Rendimiento en el trabajo.
- Condiciones de servicio: pueden demandarse soldaduras de características especiales (gran resistencia a la corrosión, gran ductilidad, elevada resistencia a la corrosión).

#### INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE, LONGITUD DE ARCO Y VELOCIDAD DE SOLDEO SOBRE LA FORMA DEL CORDÓN:



*Figura sobre los tipos de soldadura en función a la velocidad de soldeo y la intensidad.*

- A. Corriente, longitud de arco y velocidad adecuados.
- B. Corriente muy baja.
- C. Corriente muy alta.
- D. Longitud de arco demasiado corta.
- E. Longitud de arco demasiado larga.
- F. Velocidad de avance muy pequeña.
- G. Velocidad de avance muy alta.

## VENTAJAS E INCONVENIENTES DE ESTE PROCESO DE SOLDADURA:

- Baja tasa de deposición con necesidad de eliminar la escoria.
- Requiere habilidad por parte del soldador.
- No aplicable a metales de bajo punto de fusión ni a metales con gran sensibilidad a la oxidación (titanio y sus aleaciones).
- No aplicable a espesores inferiores a 1,5mm, ni resulta productivo para espesores mayores de 38 mm.
- Equipo barato y portátil.
- Menos sensible al aire que las técnicas con protección gaseosa.
- Aplicable a gran número de metales.

### **Soldadura al arco con protección gaseosa y electrodo consumible (MIG y MAG):**

#### PRINCIPIOS DEL PROCESO:

El arco se establece entre un electrodo de hilo continuo y la pieza a soldar, estando protegido de la atmósfera circundante por un gas inerte. Antiguamente el empleo de gases inertes o activos diferenciaba las técnicas MIG y MAG. En la actualidad, dado el empleo de mezclas gaseosas, se tiende a no diferenciar las técnicas, considerando aquéllas englobadas en procesos de *soldadura al arco con protección gaseosa y electrodo consumible*.

El proceso puede ser:

- Semiautomático: la tensión de arco, velocidad de alimentación del hilo, intensidad de soldadura y caudal de gas se regulan previamente.
- Automático: se regula también la velocidad de soldadura
- Robotizado: todos los parámetros de proceso, así como las coordenadas de localización de la junta a soldar se programan en una unidad destinada a este fin.

#### INSTALACIÓN:

- Fuente de corriente continua de tensión constante y elevado factor de marcha.
- Unidad de alimentación del hilo.
- Circuito de gas protector.
- Circuito refrigerador (opcional).

- Pistola de soldadura.

#### PARÁMETROS DE SOLDADURA:

- Polaridad: Normalmente se trabaja en polaridad inversa, lo que conduce a una mayor penetración del baño.
- Tensión de arco: Resulta determinante en el modo de transferencia del material. Bajas tensiones e intensidades conducen a arco corto y altas tensiones e intensidades conducen a arco spray.
- Velocidad de alimentación del hilo: regula la intensidad de soldadura.
- Naturaleza del gas.

#### MODALIDADES DE TRANSPORTE

##### ARCO SPRAY

Arco estable de gran penetración, transferencia de metal en forma de gotas muy finas, cono de proyección luminoso y zumbido característico.

Parámetros: polaridad inversa, alta densidad de corriente, tensión de arco relativamente alta, Ar, Ar + O<sub>2</sub>, Ar + CO<sub>2</sub>. El baño de fusión resulta relativamente grande y fluido, por lo que no se controla en posiciones difíciles.

##### ARCO GLOBULAR

Arco inestable de poca penetración, transferencia de metal en forma de gotas gruesas (de un diámetro hasta tres veces el diámetro del electrodo), produce numerosas proyecciones; la transferencia es dificultosa por la oscilación de las gotas.

Parámetros: polaridad directa, densidad de corriente inferior a la de arco spray.

##### ARCO PULSADO

Cada pulsación produce la proyección de una gota de metal fundido; esto ocurre sólo en el momento de la pulsación. La energía aportada a la pieza durante la soldadura es menor que con arco spray. Arco muy controlado en todo el rango de utilización con transferencia spray pulsada prácticamente sin proyecciones, obteniéndose soldaduras con penetración en todas las posiciones.

## ARCO CORTO O CORTOCIRCUITO

El extremo del hilo se funde formando una gota que se alarga hasta el metal base, momento en el que se corta por acción de la tensión superficial; se produce un cortocircuito y un posterior restablecimiento del arco.

Parámetros: polaridad inversa, densidad de corriente baja, CO<sub>2</sub> o mezclas Ar-CO<sub>2</sub>, tensión de arco relativamente baja. El baño de fusión resulta reducido y fácil de controlar. Ideal para soldadura fuera de posición.

## HILOS

Se emplean hilos de diámetros comerciales de 0.8, 1, 1.2 y 1.6 mm (en ocasiones 2.4). El hilo suele estar recubierto de cobre para favorecer el contacto eléctrico con la boquilla, disminuir rozamientos y protegerlo de la oxidación.

La composición del hilo suele ser similar a la del metal base, alterados ligeramente en los elementos que hayan de ser compensados por pérdidas en el arco de soldadura o en los que vayan a prestar su acción desoxidante al baño (Si, Mn, y Al en el caso de aceros; Ti y Si en aleaciones de níquel; Si, Ti y P en electrodos de cobre y sus aleaciones).

En algunas aplicaciones, sin embargo, la composición del electrodo es bastante diferente al metal base a soldar (soldadura de bronce al manganeso con electrodos de bronce al aluminio o con electrodos de aleación cobre-manganeso-níquel-aluminio; soldadura de algunas aleaciones de aluminio de alta resistencia como la 6061 o algunos aceros aleados).

Existen hilos tubulares rellenos normalmente con polvo metálico o con flux o ambos. Estos hilos se clasifican en básicos o rutilos según la naturaleza del flux.

## APLICACIONES

Soldadura de aceros al carbono, de baja aleación e inoxidables de las series 300 y 400, aleaciones de aluminio, de cobre, de níquel, titanio y magnesio.

Existe un procedimiento de soldadura por puntos (automoción, electrodomésticos...) que es una variante del procedimiento MIG; se requieren boquillas especiales que permitan la salida del gas conforme la antorcha presiona a las piezas; son necesarios también temporizadores y sistemas de control de alimentación de hilo particulares.

## GASES DE PROTECCIÓN

La naturaleza del gas de protección influye notablemente en:

- La cantidad de energía aportada
- El tipo de transferencia de metal
- La penetración
- La velocidad de soldeo
- El aspecto del cordón
- La posibilidad de proyecciones y mordeduras

## ARGÓN

El argón se ioniza fácilmente, de forma que la tensión del arco es relativamente baja (frente al helio, por ejemplo). Por la forma del cordón provoca faltas de penetración en la raíz de la junta. Aplicable en la soldadura de Al, Cu, Ni y Ti.

## ARGÓN + O<sub>2</sub>

El oxígeno actúa sobre la tensión superficial de la gota, mejorando la capacidad de mojado. La adición de oxígeno mejora la penetración, disminuye la tendencia a producir mordeduras. Se considera que la adición de O<sub>2</sub> hasta un 5% no modifica el carácter inerte de la mezcla.

## CO<sub>2</sub>

Es un gas activo de carácter oxidante. A la temperatura del arco se disocia según: el oxígeno resultante de la disociación es activo; se combina con el carbono del acero, dando CO, con el correspondiente empobrecimiento en carbono si no se utiliza un hilo con suficiente contenido de desoxidantes como Si y Mn y la cantidad adecuada de C.

Es un gas mucho más barato que el argón, con penetraciones más profundas y anchas, se reduce el riesgo de mordeduras y faltas de fusión. Para evitar las porosidades en el cordón se han de limitar los contenidos de hidrógeno y nitrógeno por debajo del 0.05 % cada uno, así como el empleo del gas con una pureza superior al 99.85%.

No aplicable a la soldadura de aceros al cromo y de aceros inoxidable.

Arco poco estable con gran cantidad de proyecciones.

## PROPIEDADES DE LOS GASES:

- Energía de ionización: Cuanto mayor es más difícil es el establecimiento del arco, menor su estabilidad y mayor la dificultad de cebado; no obstante, el arco es más energético.
- Densidad: Una mayor densidad del gas favorece la protección de la zona de soldeo.
- Conductividad térmica: Cuanto mayor es la conductividad la distribución de temperaturas en el arco es más homogénea (cordones más anchos y penetración más uniforme).

## FENÓMENOS QUE EXPERIMENTAN LOS GASES EN LOS PROCESOS DE SOLDEO:

- Ionización: es la separación, con carácter reversible, de los átomos ó moléculas de gases en iones y electrones.
- Disociación: es la separación, con carácter reversible, de los gases poli atómicos en sus átomos. Para conseguir esos fenómenos es necesario suministrar al gas la energía de ionización o de disociación respectivamente; esta energía la proporciona el arco de soldadura.

Cuando el gas ionizado o disociado entra en contacto con la pieza, se enfría y el plasma se recombina y se convierte de nuevo en gas, liberando la energía de ionización o de disociación, que transmite a la pieza.

## VENTAJAS DEL PROCESO

- Reducción de tiempos y costes: debido a la alimentación automática del hilo fundamentalmente.
- Alto rendimiento con buena calidad de soldadura:
  - \*Admite elevadas densidades de corriente lo que se traduce en altas velocidades de soldeo (disminuye la anchura de la ZAT, menos tendencia al tamaño de grano, menos deformaciones y transformaciones metalúrgicas).
  - \*No produce escoria, lo que permite visualizar el baño y el control de los defectos.
  - \*Evita impurezas en el baño fundido, porque el gas protector impide el contacto de gases de la atmósfera con el baño fundido; el hilo homogéneo, si está libre de impurezas y de humedad adherida, es capaz de aportar un metal con un contenido muy bajo de hidrógeno.

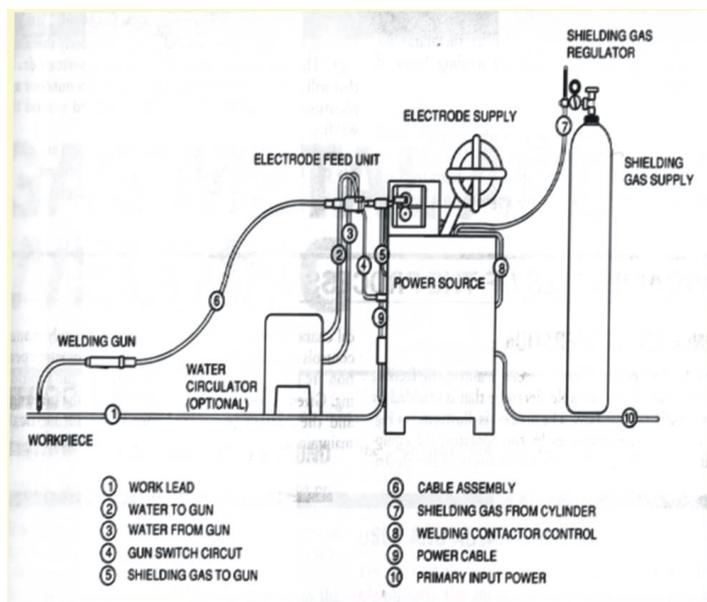
-Otros:

\*No requiere una pericia especial del operario.

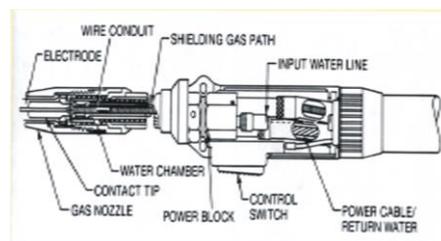
\*Versátil, por cuanto es aplicable a gran número de metales, posiciones de soldadura y espesores.

\*Buena seguridad e higiene (los arcos funcionan con bajas tensiones y no se producen las emisiones de humos o polvos procedentes de los revestimientos, aunque se requiere buena ventilación si se suelda bajo CO<sub>2</sub>).

### EQUIPO NECESARIO PARA ESTE PROCESO DE SOLDADURA:



*Equipo de soldadura MIG/MAG*



*Pistola de soldadura MIG/MAG*

### **Técnica de soldadura TIG:**

*Soldadura manual:* se controla manualmente la sujeción del electrodo, la velocidad de soldeo, la longitud del arco, la corriente de soldadura y la adición de metal de aporte, si procede.

*Soldadura semiautomática:* se controla automáticamente la alimentación de metal de aporte; sólo se utiliza en aplicaciones especiales.

*Soldadura automática:* todos los parámetros del proceso se controlan de forma automática o no manual. Los sistemas de lazo cerrado permiten corregir los parámetros si es preciso.

*Soldadura por puntos:* si el equipo incorpora un temporizador para el corte de la tensión eléctrica.

*Soldadura por arco pulsado.*

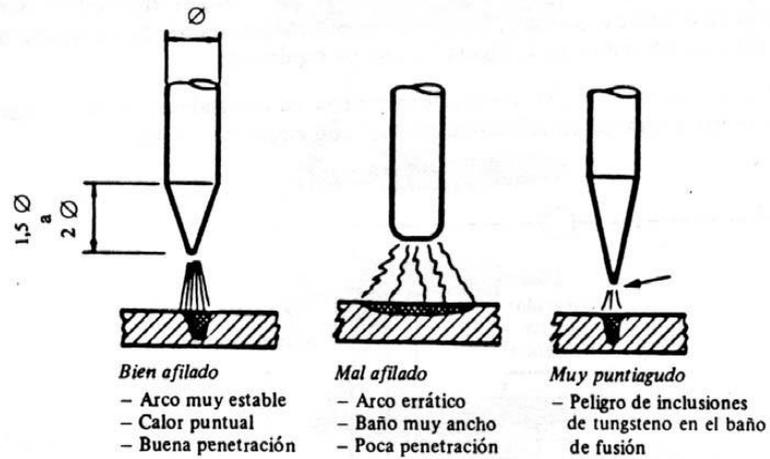
### **MÉTODOS DE INICIO DEL ARCO:**

- Por contacto del electrodo con la pieza. Tiene como ventaja su simplicidad, pero conduce a la contaminación del electrodo y la transferencia de tungsteno a la pieza.
- Por alta frecuencia. Los generadores de alta frecuencia poseen un dispositivo que superpone una alta tensión a frecuencia elevada que ioniza el gas existente entre el electrodo y la pieza; el gas ionizado conduce la corriente de soldadura iniciando el arco. Se utiliza tanto en corriente alterna como en continua.
- Inicio por pulso. Se produce por la existencia de un pulso de alta tensión que ioniza el gas existente entre el electrodo y la pieza. Se aplica generalmente con corriente continua en procesos automatizados.
- Inicio por arco piloto. Se produce un arco piloto entre el electrodo y la boquilla de la antorcha, ionizando el gas. Se utiliza en equipos de corriente continua y el arco piloto es generado por una fuente auxiliar de alta frecuencia.

### **ELECTRODOS:**

Al alear el tungsteno con torio o circonio aumenta la emisividad electrónica, se favorece el encendido y reencendido del arco y, por tanto, su estabilidad. También permiten el uso de mayores intensidades de corriente y se evita el fenómeno de desgaste del electrodo.

Figura sobre acabado del extremo del electrodo.



APLICACIONES:

*Tungsteno:* corriente alterna; soldadura de aluminio y de sus aleaciones.

*Tungsteno aleado con lantano:* corriente continua, soldadura de aceros al carbono y aleados, cobre, titanio.

*Tungsteno aleado con circonio:* corriente alterna y continua; soldadura de aleaciones de aluminio.

TIPOS DE CORRIENTES Y POLARIDADES:

CURRENT TYPE	DCEN	DCEP	AC (BALANCED)
ELECTRODE POLARITY	NEGATIVE	POSITIVE	
ELECTRON AND ION FLOW			
PENETRATION CHARACTERISTICS			
OXIDE CLEANING ACTION	NO	YES	YES-ONCE EVERY HALF CYCLE
HEAT BALANCE IN THE ARC (APPROX.)	70% AT WORK END 30% AT ELECTRODE END	30% AT WORK END 70% AT ELECTRODE END	50% AT WORK END 50% AT ELECTRODE END
PENETRATION	DEEP; NARROW	SHALLOW; WIDE	MEDIUM
ELECTRODE CAPACITY	EXCELLENT e.g., 1/8 in. (3.2 mm) 400 A	POOR e.g., 1/4 in. (6.4 mm) 120 A	GOOD e.g., 1/8 in. (3.2 mm) 225 A

Gráfica sobre tipos de corrientes y polaridades

## RECOMENDACIONES DE USO:

METAL	ESPEJOR	TIPO DE CORRIENTE	ELECTRODO	GAS DE PROTE.
Aluminio	Todos	Corriente alterna	W ó W-Zr	Argón
Cobre y sus aleaciones.	Todos	Polaridad directa	W-Th	Helio
Aleaciones de magnesio	Todos	Corriente alterna	W ó W-Zr	Argón
Níquel y sus aleaciones	Todos	Polaridad directa	W-Th	Argón
Aceros al carbono y de baja aleación	Todos	Polaridad directa	W-Th	Argón
Aceros inoxidables	Todos	Polaridad directa	W-Th	Argón
Titanio	Todos	Polaridad directa	W-Th	Argón

### **Soldadura por chorro plasmático (PAW):**

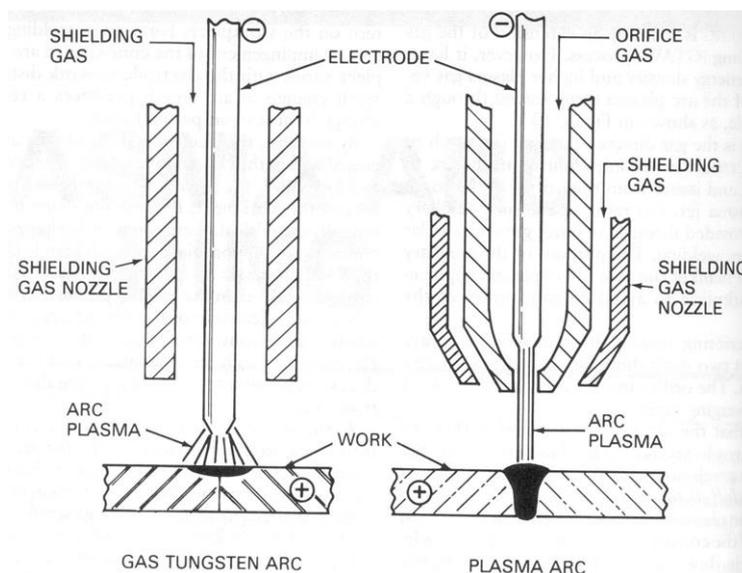
- Utiliza la misma técnica que el proceso TIG con mayor densidad energética y con temperaturas más elevadas.
- Un gas (argón) alcanza el estado de plasma (se calienta hasta que se ioniza, es decir, se separa en iones portadores de cargas positivas y electrones). El estado de plasma se alcanza al pasar el gas por el orificio de la boquilla que estrangula el arco.
- El plasma no es suficiente para proteger el baño de soldadura y al material expuesto a calentamiento, por lo que se requiere un segundo gas (gas de protección) que envuelve al conjunto.
- El arco puede ser “transferido” (entre un electrodo y el metal base) o “no transferido” (entre el electrodo y la boquilla).

### VENTAJAS (COMPARADO CON EL PROCESO TIG):

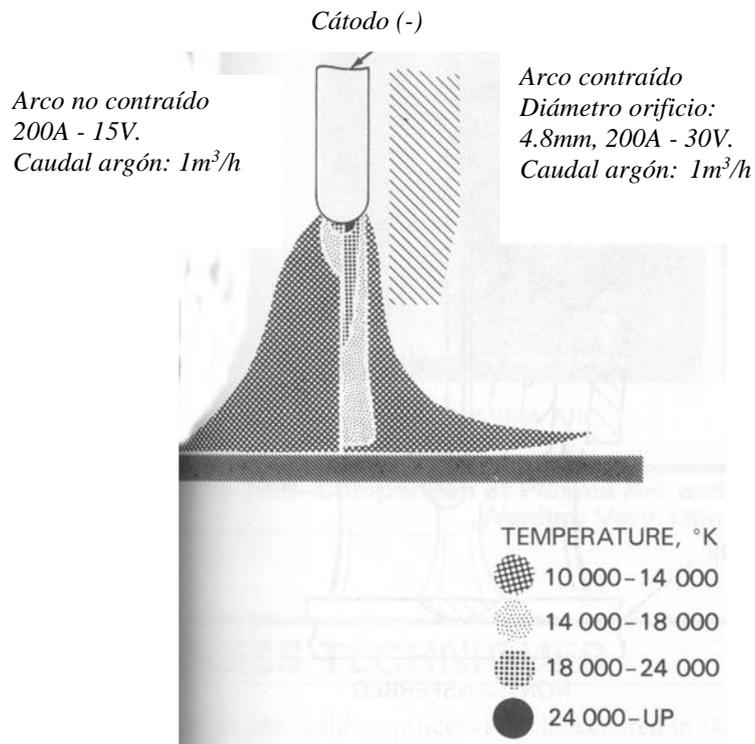
- Mayor concentración de energía, lo que implica posibilidad de mayores velocidades de soldeo en algunas aplicaciones, menor corriente para igualdad de condiciones de soldeo (menores distorsiones).
- Se puede controlar la penetración mediante la variación de variables de soldeo.
- Mayor estabilidad del arco y mayor estabilidad direccional.
- La distancia del electrodo a la pieza es mayor, lo que facilita el aporte de material, si es el caso. También el baño se contamina menos de W y se disminuyen los tiempos de reafilado.
- Las variaciones de la longitud del arco tienen poca influencia sobre la anchura del cordón o sobre la concentración de calor, por lo que la soldadura fuera de posición resulta más fácil.
- La mayor ventaja de este procedimiento se produce cuando se puede trabajar con espesores que permitan la técnica “key-hole” (ojo de cerradura).

### LIMITACIONES (COMPARADO CON EL PROCESO TIG)

- La soldadura manual precisa mayor habilidad.
- Precisa de bordes de unión bien alineados debido a que el arco está muy concentrado y existen poca tolerancia para el desalineamiento.



*Figura sobre soldadura TIG y arco plasmático.*



*Figura sobre arco contraído y no contraído.*

## Bibliografía

- Reina Gómez M: Soldadura de los aceros. Aplicaciones. Madrid, 1988.
- Juan Carlos Gil Espinosa, Enrique Berbós Almenara, Tomás Herránz Cortés; Manual de Mecánica Industrial. Soldadura y Materiales. Madrid, 1999.
- Manual del soldador 7ª ed.; G. Hernández Riesco; Cesol.
- Welding Handbook, Vol. 2: Welding Processes; 8ª Ed.; AWS; USA, 1991.
- Apuntes: Mechanical Engineering Department; Industrial Engineering School of Albacete; University of Castilla-La Mancha; Avda. España s/n, 02071, Albacete, Spain, 2010.
- Apuntes: Regional Development Institute: Material Science and Engineering; University of Castilla-La Mancha; Avda. España s/n, 02071, Albacete, Spain, 2010.