

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 3	AÑO 1971

04.71.12

PMM/A-65

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

SEPTIMO CURSO PANAMERICANO DE METALURGIA

Dentro del Programa Multinacional de Metalurgia  
(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico-OEA)

SOLDADURA

Ing. L. de Vedia

Departamento de Metalurgia  
Buenos Aires - Argentina  
1971

PMM/A-65

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

SEPTIMO CURSO PANAMERICANO DE METALURGIA

Dentro del Programa Multinacional de Metalurgia  
(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico-OEA)

SOLDADURA

Ing. L. de Vedia

Departamento de Metalurgia  
Buenos Aires - Argentina

1971

# SOLDADURA

Ing. L. de Vedia\*

## 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### 1.1. La soldadura como unión metalúrgica

El primer paso hacia la comprensión de los procesos de soldadura, lo constituye el análisis de los fenómenos que intervienen cuando se produce el contacto de dos superficies sólidas metálicas. Para ello recordemos que los metales están constituidos por cristales. Cada uno de estos cristales es a su vez un arreglo periódico espacial de átomos o grupos de átomos que dan origen a lo que conocemos como retículo cristalino. El diámetro medio de estos cristales es de aproximadamente 50 micrones y cada cristal está separado de sus vecinos por una superficie ideal que conocemos como borde de grano. El borde de grano es entonces el lugar en el cual la orientación de los ejes cristalinicos cambia para dar lugar a las que corresponden a los granos vecinos.

Los bordes de grano desempeñan un papel importante en la determinación de las propiedades mecánicas de un metal. En este sentido se ha comprobado que a bajas temperaturas los bordes de grano son en general por lo menos tan resistentes como los granos mismos, es decir no son causa de debilitamiento del material. Esto se comprueba mediante el análisis microscópicos de piezas cuya rotura no se haya producido a temperaturas elevadas. En las mismas se observa que la superficie de fractura no sigue la de bordes de grano sino que pasa por los granos mismos, es decir transcristalina.

Si consideramos ahora un átomo cualquiera en el interior de un cristal, el mismo se halla ligado a sus vecinos por las fuerzas de enlace que caracterizan a los sólidos. Sin embargo resulta evidente que los átomos metálicos que se encuentran en la superficie libre no podrán completar estos enlaces. Si en estas condiciones ponemos en adecuado contacto dos superficies de este tipo, se establecerán dichos enlaces constituyendo la interfase así formada algo equivalente a un borde de grano. Es la posibilidad de reproducir en forma controlada este fenómeno lo que dá origen a los procesos de soldadura.

### 1.2. Naturaleza de las superficies

En la exposición anterior hemos considerado dos superficies metálicas perfectamente limpias y lo suficientemente lisas como para que se establezca

---

\* Comisión Nacional de Energía Atómica

un efectivo contacto entre las mismas. Sin embargo, las superficies metálicas raramente se encuentran en ese estado. Las mismas se encuentran en general con gran rugosidad y cubiertas por capas de óxido y humedad.

Estos factores son suficientes para impedir la unión metalúrgica de dos piezas y los recursos que se emplean para lograrlo nos permitirán hacer una clasificación de los procesos de soldadura.

### 1.3. Clasificación de los procesos

Una forma de lograr el contacto íntimo de dos superficies necesario para la producción de una soldadura es someter a las mismas a una presión recíproca. Si ésta es de magnitud adecuada será capaz de romper las capas de óxido y humedad y deformar las superficies de forma de lograr el contacto necesario. Esto da origen a lo que se conoce como soldadura por presión o más generalmente como soldadura en fase sólida.

Otro camino para lograr el mismo fin es emplear energía térmica para fundir localmente las piezas que se desea unir y de esta manera lograr la eliminación de las capas mencionadas y el íntimo contacto de dichas piezas. Esto se conoce en general como soldadura por fusión.

## 2. LOS PROCESOS DE SOLDADURA POR FUSION

### 2.1. Soldadura por arco

De los métodos mencionados en los párrafos anteriores, se destaca entre los procesos por fusión, la soldadura por arco. La misma consiste en emplear la energía térmica que provee un arco voltaico cuando éste se produce entre la pieza a soldar y un electrodo de características adecuadas.

#### 2.1.1. Introducción histórica

La factibilidad del método mencionado surge del descubrimiento efectuado en el año 1808 por Sir Humphry Davy, según el cual la electricidad puede ser conducida a través del aire entre dos electrodos de carbón, conformando lo que hoy conocemos como descarga gaseosa. En la misma se observa una gran elevación local de la temperatura y una gran cantidad de calor disipada por los electrodos.

Más tarde, en el año 1885, Bernados observó que era posible reproducir este fenómeno entre un electrodo de carbón y una pieza de metal. Como consecuencia del calor generado, es posible lograr una fusión localizada que puede emplearse para unir piezas. Durante estas experiencias la corriente era provista por baterías de acumuladores o generadores de corriente continua.

El método resultó en general satisfactorio para efectuar soldaduras de ace-

ros dulces pero de ninguna manera apto para materiales más complejos.

### 2.1.2. Proceso de electrodo revestido

El proceso de electrodo revestido surge como necesidad de mejorar la calidad de las soldaduras tal como se las obtiene con el proceso anteriormente descripto.

Las temperaturas que alcanza el arco son del orden de 20.000°C, de modo que las reacciones entre los gases presentes (tales como H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del aire y humedad ambiente) y el metal fundido son muy intensas. Dada la acción perjudicial de estos gases sobre las propiedades mecánicas resultantes, es evidente la conveniencia de proveer sobre la zona donde se efectúa la soldadura de una atmósfera protectora que evite o al menos minimice dichas reacciones. Al mismo tiempo es posible aprovechar las altas temperaturas generadas por el arco empleando un electrodo metálico que al fundirse progresivamente sirva como material de aporte.

La técnica usual para obtener la atmósfera protectora consiste en revestir la varilla metálica empleada como electrodo con sustancias que al ser sometidas al calor del arco produzcan vapores que sirvan al fin mencionado. Las sustancias que se empleen como revestimiento deben, además de proveer una atmósfera protectora, actuar como fundentes para los óxidos metálicos que inevitablemente están presentes en toda pieza a soldar. El revestimiento suele emplearse también para introducir en el metal fundido, vfa escoria, elementos de aleación, así como facilitar el arranque y mantenimiento del arco.

Los revestimientos son en general de base mineral con óxidos y silicatos metálicos, junto con elementos con gran afinidad por el oxígeno de modo de eliminar al mismo del metal fundido. Es por lo tanto frecuente el uso de óxido de hierro (FeO) u otros desoxidantes tales como Silicio y Manganeso. Revestimientos de este tipo son generalmente denominados ácidos y presentan el inconveniente de formar una escoria pesada y viscosa que no es adecuada cuando se desea soldar en posición vertical o sobre cabeza.

Para evitar esta dificultad se han desarrollado electrodos con revestimientos a base de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) o rutilo que proveen una escoria más fluída apta para todas las posiciones de soldadura.

Cuando se requieren altas calidades de soldadura, se recurre a recubrimientos que contienen una elevada proporción de carbonato de calcio y fluoruro de calcio. Estos electrodos, conocidos como básicos o de bajo hidrógeno, proveen una atmósfera de CO/CO<sub>2</sub> reductora y son elaborados y almacenados de modo de minimizar el contenido de hidrógeno, que como veremos, es un elemento altamente perjudicial en las soldaduras.

Por último podemos mencionar el tipo de revestimiento denominado celulósico. Este fué el tipo primeramente empleado y presenta algunas característi-

cas que hace que todavía se recurra a su utilización. El recubrimiento está confeccionado con un contenido de un 15 a 30% de celulosa que al ser sometida a la acción del arco provoca con el oxígeno del aire la siguiente reacción:



que constituye una atmósfera reductora. Con electrodos de este tipo se logra una gran penetración y son adecuados para soldar en todas las posiciones.

#### 2.1.4. Procesos de electrodo continuo

Los electrodos revestidos comúnmente empleados en soldadura manual son de unos 35 cm. de longitud. A medida que se van consumiendo es necesario reponerlos lo que conspira contra la eficiencia del proceso.

El electrodo continuo surge entonces como una necesidad natural de mejorar los regímenes de producción. En este proceso el electrodo es un alambre continuo alimentando automáticamente desde una bobina, revestido o no según el caso. Cuando el electrodo es revestido, el mismo está constituido en la forma que indica la figura 1. El contacto eléctrico es asegurado por los espirales de alambre que bobinados sobre el electrodo sobresalen de la superficie del revestimiento y permiten establecer un contacto deslizante en la pistola de soldadura. El revestimiento debe además ser lo suficientemente flexible y tenaz para cumplir adecuadamente sus funciones sin deteriorarse mecánicamente.

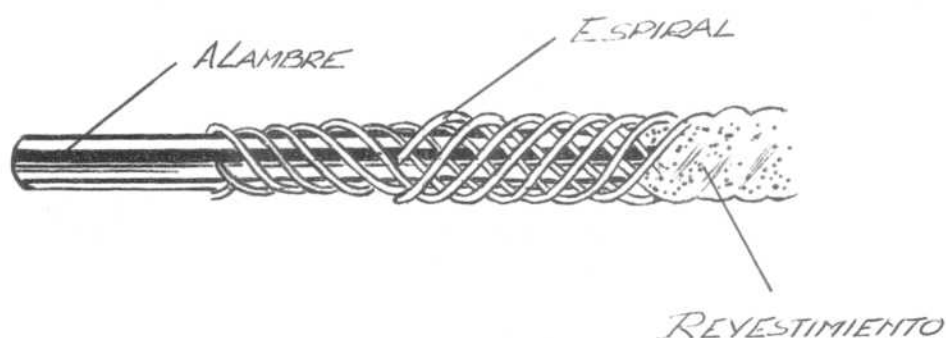


Figura 1

Es evidente que en este método debe emplearse un dispositivo adecuado para alimentar el alambre en forma automática . Cuando el desplazamiento de la pistola de soldadura o torcha se realiza también en forma automática, el proceso se denomina automático, reservándose la designación de semiautomático para aquellos casos en que el desplazamiento de la pistola se realiza en forma manual.

En lo visto anteriormente no hemos mencionado si la corriente empleada es continua o alternada, ni hemos hecho referencia a la polaridad de la misma. En general, no puede definirse a priori la polaridad o el tipo de corriente a emplearse en un proceso dado, ya que la tendencia actual es elegir las mismas de acuerdo a cada caso particular dada la creciente complejidad metalúrgica de los materiales modernos. A medida que vayamos analizando los distintos aspectos de cada uno de los procesos de soldadura, irán quedando esclarecidos estos aspectos.

### Arco sumergido

De los métodos de soldadura que emplean electrodo continuo, el proceso de arco sumergido desarrollado simultáneamente en EE.UU. y Rusia a mediados de la década del 30, es uno de los más difundidos universalmente .

El mismo es un proceso automático en el cual según lo indica la figura 2 un alambre desnudo es alimentado hacia la pieza. Este proceso tiene la característica de que el arco se mantiene sumergido en una masa de fundente que es provisto desde una tolva que se desplaza delante del electrodo. De esta manera el arco resulta invisible, lo que constituye una ventaja pues evita el empleo de elementos de protección contra la radiación infraroja y ultravioleta, que son imprescindibles en otros casos.

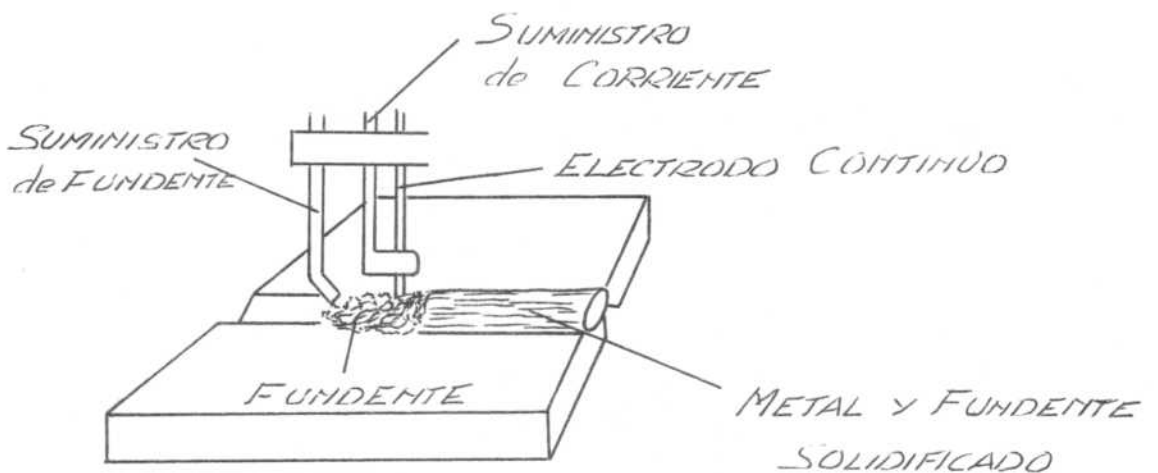


Figura 2

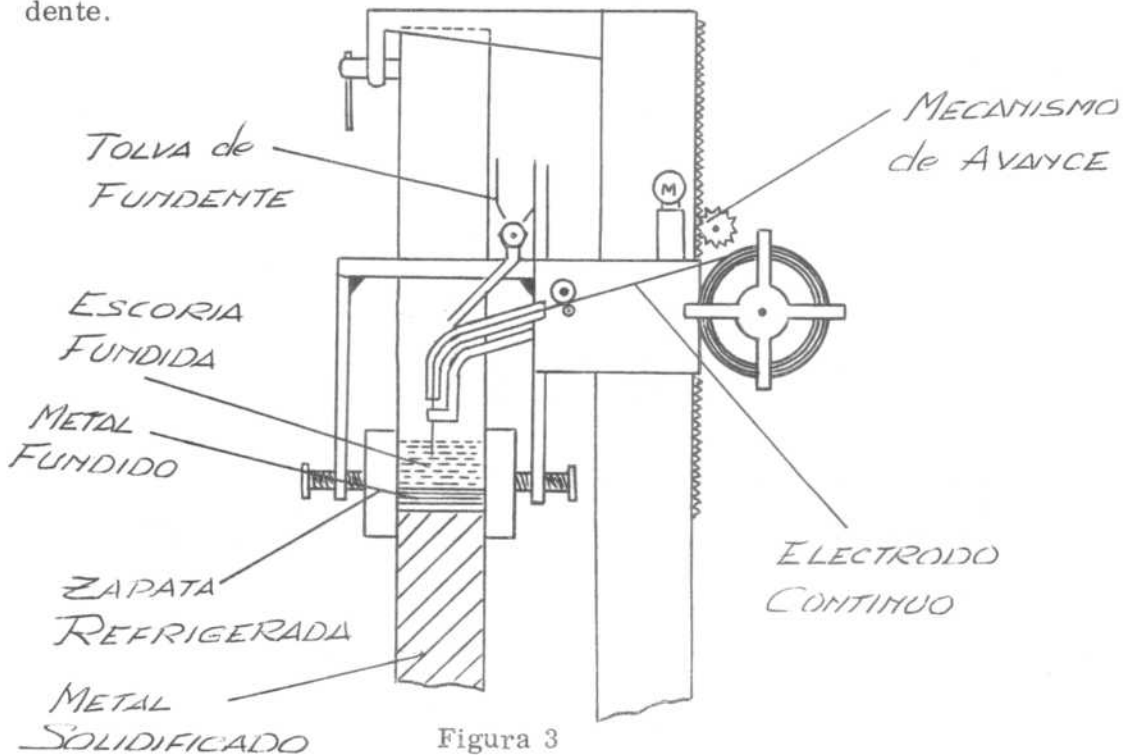
Las corrientes utilizadas en este proceso varían en un rango que va desde los 200 hasta los 2000 Amperios, y los espesores que es posible soldar varían entre 5 mm y hasta más de 40 mm en una sola pasada. Sin embargo por razones que veremos más adelante, cuando se trata de soldar grandes espesores se recurre a varias pasadas de no más de 20 mm de espesor cada una.

Usualmente se utiliza corriente continua con electrodo positivo cuando se trata de intensidades inferiores a los 1000 Amperios, reservándose el uso de corriente alterna para intensidades mayores a fin de evitar el fenómeno conocido como sopló magnético.

El proceso se caracteriza por sus elevados regímenes de deposición y es normalmente empleado cuando se trata de soldar grandes espesores de aceros al carbono o de baja aleación. También ha demostrado ser un método sumamente apto para plaqear los aceros mencionados con otros de diferentes características tales como inoxidables austeníticos, etc.

### Soldadura electroslag

El proceso electroslag que muestra la figura 3 fué desarrollado en Rusia como una modificación del método de arco sumergido descrito anteriormente. Este no es estrictamente un proceso de soldadura por arco ya que la energía térmica empleada para fundir el electrodo continuo de alambre y la pieza proviene de la alta temperatura del baño de escoria fundida que por vía electrolítica conduce la corriente de soldadura. De este modo el arco sólo se hace presente en el instante del arranque y durante el tiempo necesario para fundir las sales que cumplen el doble papel de electrolito y fundente.



Mediante este método, y recurriendo al uso simultáneo de varios alambres, es posible soldar en una sola pasada espesores de acero al carbono o de baja aleación de más de 30 cm de espesor. La corriente utilizada en este proceso es continua y varía entre 300 y 850 Amperios por alambre. Este método tiene la ventaja de permitir soldar piezas sin necesidad de preparación de bordes, ya que el mismo es semejante a una colada continua en el cual el molde lo constituyen las zapatas deslizantes de Cu refrigeradas y las propias piezas a soldar.

#### 2.1.5. Procesos bajo gas protector

En los métodos vistos hasta ahora, la atmósfera protectora necesaria para evitar la contaminación de la soldadura con gases nocivos, se logra empleando fundentes, ya sea en forma de revestimiento o de polvos. Otra manera de lograr eficientemente el mismo resultado es efectuar el proceso de soldadura bajo un gas que provea la protección adecuada.

#### Proceso MIG (Metal inert gas)

Este es un método automático o semiautomático en el cual se emplea un electrodo continuo de alambre desnudo, alimentado hacia la pistola desde una bobina tal como lo indica la figura 4.

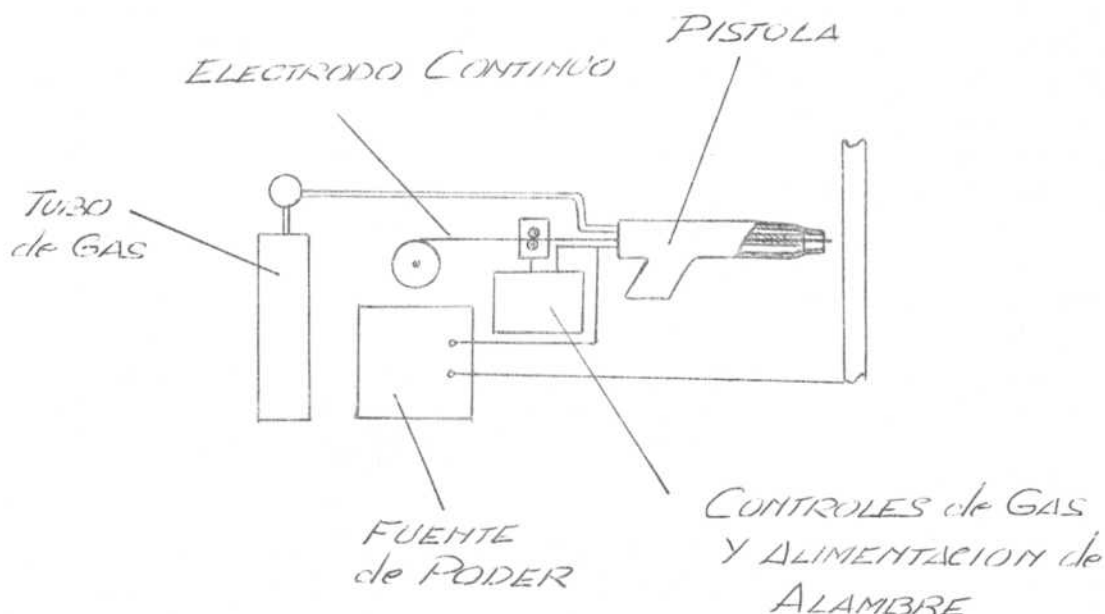


Figura 4

Los diámetros de alambre empleados en este proceso no son en general superiores a 2,5 mm, siendo la tendencia actual a emplear diámetros inferiores a 1 mm.

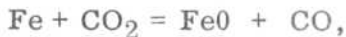
La pistola posee una conexión por la cual llega hasta el punto donde se efectúa la soldadura un chorro de gas inerte, normalmente helio o argón,

que protege al arco y al metal fundido.

En este proceso se emplea en general corriente continua con electrodo positivo por razones que se verán más adelante. El empleo de un gas protector tiene la ventaja que al no formar escoria es posible efectuar una pasada sobre la otra sin necesidad de desescoriado intermedio. Este factor sumado al elevado régimen de deposición que se puede lograr con el método MIG, han hecho de éste uno de los más difundidos industrialmente.

#### Proceso MAG (Metal active gas)

Este proceso sólo difiere del anterior en el tipo de gas empleado. Mientras que en el método MIG se emplea un gas inerte, en el método MAG el gas utilizado es  $\text{CO}_2$ . Este gas presenta el inconveniente de que reacciona con el acero fundido de acuerdo a:



a su vez el óxido de hierro en contacto con el metal fundido reacciona con el carbono del mismo según:



con la consiguiente decarburización del acero. Este problema se soluciona agregando al alambre cantidad suficiente de desoxidantes que permitan reducir el óxido de Fe. La cantidad de desoxidante necesaria no es elevada y valores típicos son 0,4% de Si y hasta 0,15% de Al, Ti o Zr. Es también frecuente el uso de mezclas de gases tales como Argón y  $\text{CO}_2$  en distintas proporciones lo que permite combinar la calidad de las soldaduras efectuadas bajo gas inerte con el bajo precio del  $\text{CO}_2$ .

#### Proceso TIG (Tungsten inert gas)

Este proceso es sin ninguna duda el más versátil de todos los métodos de soldadura, pero presenta el inconveniente de no brindar elevados regímenes de deposición, por lo cual no se halla difundida su aplicación a escala industrial.

Como lo indica la figura 5, este método consiste en soldar bajo una atmósfera de gas inerte empleando un electrodo no consumible de Tungsteno y agregando o no externamente material de aporte en forma de varilla o alambre según el caso.

La corriente empleada es en general continua con electrodo negativo, recurriéndose a la corriente alterna para algunas aplicaciones especiales tales como soldadura de aluminio. Puede asegurarse que con este proceso pueden obtenerse soldaduras de calidad superior a las que resultan con otros métodos. Es además el método adecuado para soldar metales tan reactivos como el zirconio, niobio, titanio, etc.

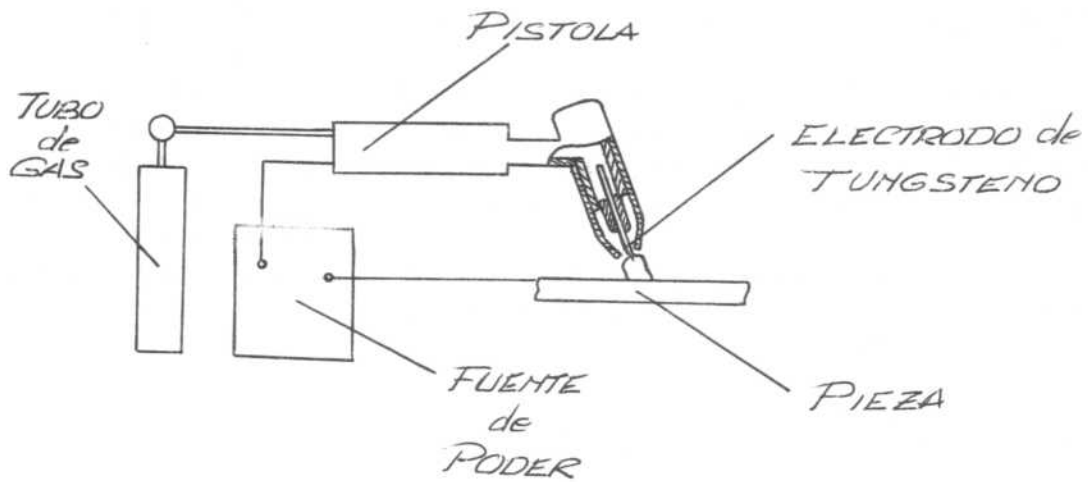


Figura 5

Soldadura por plasma

Este proceso es una modificación del método TIG en el cual según se indica en la figura 6, el arco es constreñido a pasar por una boquilla provista de un pequeño orificio con lo que se logra elevar sustancialmente la densidad de corriente.

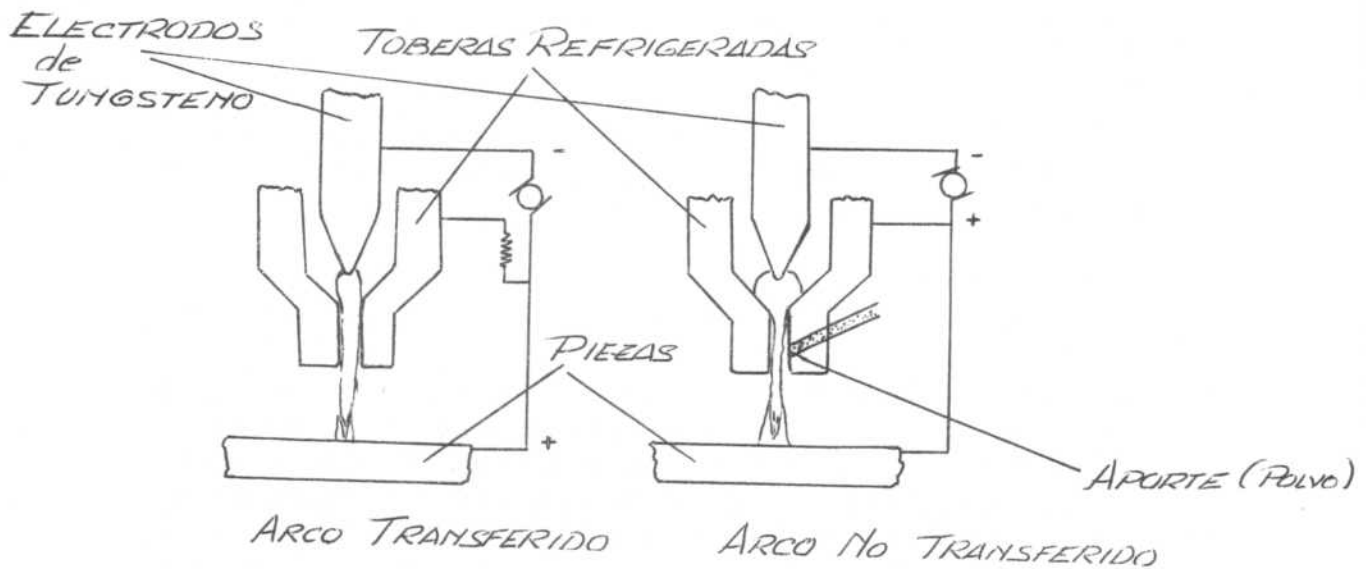


Figura 6

Existen dos técnicas para lograr esto. Una de ellas es la denominada de arco transferido y consiste en hacer saltar un arco piloto entre el electrodo de tungsteno y la boquilla metálica que debe ser refrigerada adecuadamente. En estas condiciones al acercar el electrodo a la pieza, el arco piloto se transfiere a la misma. Este sistema es apto para cortar acero inoxidable merced a la alta energía y velocidad del plasma.

El otro método, conocido como arco no transferido, consiste en establecer el arco entre el electrodo y la boquilla y forzar el plasma a través del orificio merced a la presión del gas. Con este proceso pueden emplearse corrientes sumamente bajas, lo que lo hace apto para soldar espesores muy delgados.

La corriente empleada es continua con electrodo negativo excepto en algunas aplicaciones especiales tales como soldadura de aluminio.

### Proceso de hidrógeno atómico

Si una corriente de hidrógeno se hace pasar por un arco establecido entre dos electrodos de tungsteno, la alta temperatura del mismo provoca la disociación del hidrógeno molecular en hidrógeno atómico según la reacción:

Cuando el hidrógeno atómico así formado se pone en contacto con la pieza, la temperatura más baja de ésta invierte el sentido de la reacción y el hidrógeno se recombina liberando la misma cantidad de calor que había absorbido al disociarse.

Este proceso tiene la ventaja de producir temperaturas moderadas (del orden del  $3.700^{\circ}\text{C}$ ) lo que permite un fácil control de la energía térmica puesta en juego. Resulta especialmente útil para soldar aceros inoxidables de bajo espesor así como para efectuar trabajos en aluminio o cuarzo.

La corriente empleada es alternada para mantener ambos electrodos a igual temperatura y la tensión de circuito abierto debe ser del orden de 300 voltios para permitir la ignición del arco en atmósfera de hidrógeno.

### Stud Welding

Este proceso es empleado comúnmente en construcciones metálicas para soldar espárragos en una operación automática. Se emplea para ello una pistola que como se indica en la figura 7, establece un pequeño arco entre el extremo del espárrago y la pieza. Este arco, que es iniciado separando el espárrago de la pieza unos milímetros, es mantenido durante un breve tiempo necesario como para fundir una pequeña porción de material. Una vez logrado esto, un mecanismo auto-

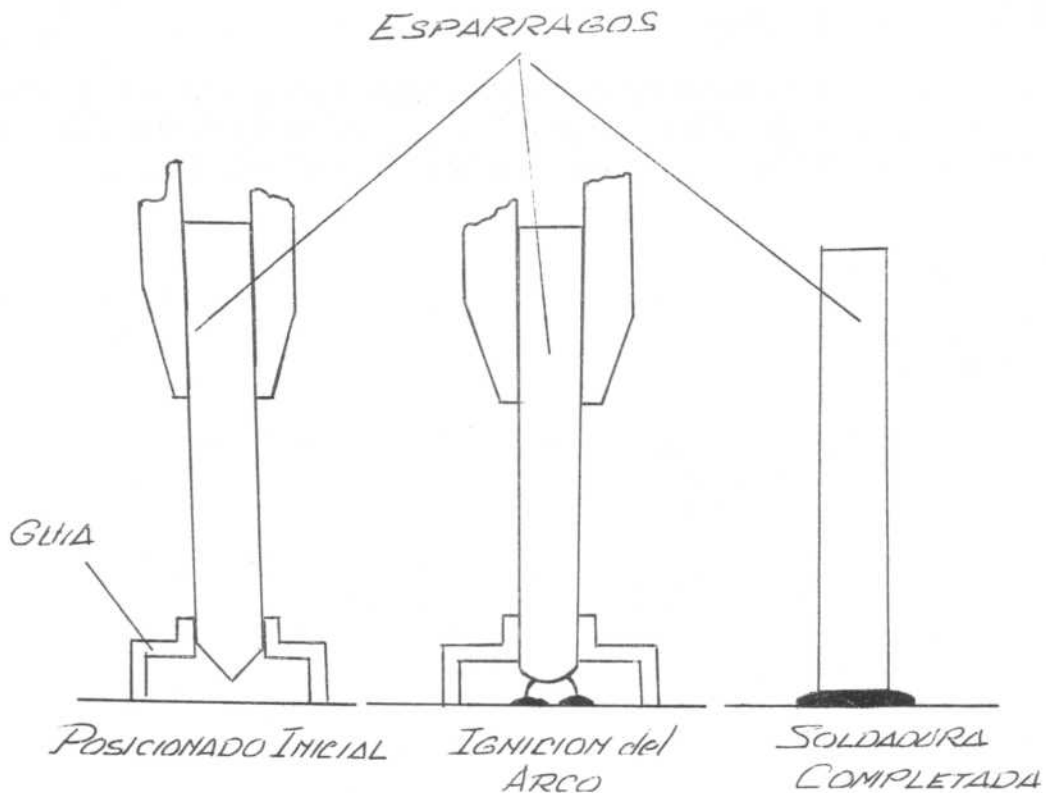


Fig. 7

mático fuerza el espárrago sobre la pieza completando así la soldadura. Todo el ciclo de operación tiene una duración inferior a un segundo, siendo frecuente el uso de capacitores como fuente de energía.

El corto tiempo involucrado en la operación hace supérfluo el empleo de una atmósfera protectora.

## 2.2. Soldadura por resistencia

Los métodos analizados hasta ahora producían la fusión del material empleando la energía eléctrica bajo la forma de un arco. Es posible lograr fusión localizada empleando en lugar de un arco el efecto Joule. Este recurso que es el fundamento de la soldadura por resistencia, hace uso de la que se pone de manifiesto en la interfase de dos cuerpos en contacto. De esta manera haciendo circular a través de dicha interfase una corriente de intensidad suficientemente elevada y aplicando una presión adecuada, es posible lograr una soldadura por fusión. Más adelante trataremos en detalle este proceso.

### 2.3. Soldadura Oxi-gas

En este proceso, la fusión del material se logra mediante la energía térmica proveniente de la combustión en oxígeno de alguna sustancia de alto poder calorífico. La sustancia más comúnmente empleada es el acetileno. Fig. 8.

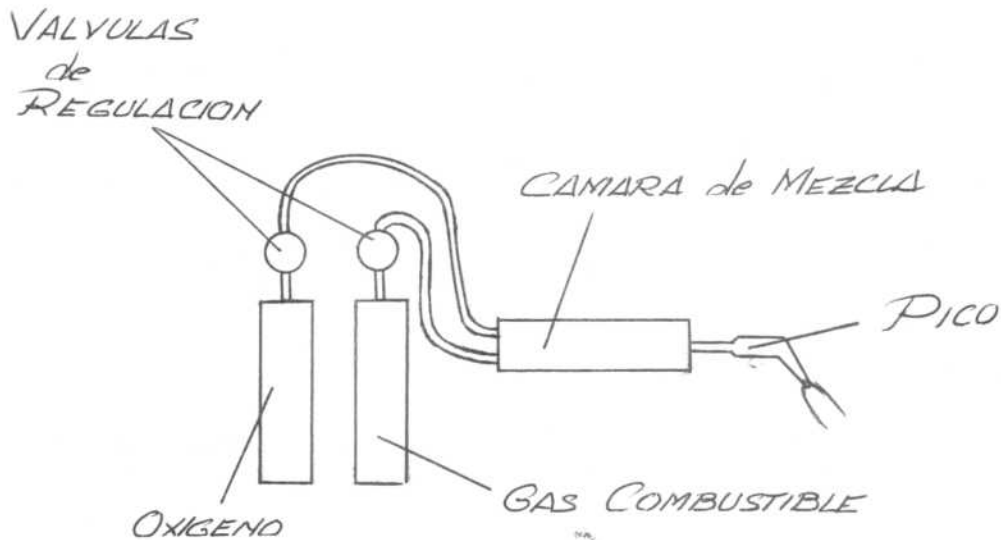
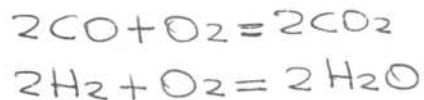


Fig. 8

La reacción de combustión en este caso es:



Esta reacción es altamente exotérmica y se desarrolla en el núcleo de la llama que alcanza una temperatura de  $3.500^{\circ}C$ . El CO y  $H_2$ , productos de combustión de esta reacción, son a su vez quemados por el oxígeno del aire de acuerdo a:



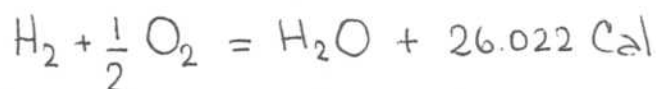
reacciones éstas que tienen

asiento en la zona de la llama conocida como "penacho"

Según que los volúmenes de acetileno estén en exceso o en defecto respecto de los volúmenes de Oxígeno que fija la relación estequiométrica, la llama tendrá un carácter carburante u oxidante respectivamente. En cambio una llama que quema iguales volúmenes de acetileno y oxígeno se denomina neutra.

El oxígeno y el acetileno se almacenan a presión en cilindros de acero. Sin embargo el acetileno comprimido es altamente explosivo por lo que se recurre a disolverlo en acetona que a presiones de servicio es capaz de disolver más de 550 volúmenes de acetileno.

Otro gas empleado con cierta frecuencia en este proceso es el hidrógeno. En este caso la reacción es:



lo que produce una temperatura de llama de aproximadamente  $2.650^{\circ}\text{C}$ .

El uso de hidrógeno es a veces preferido para la soldadura de aluminio y magnesio debido a su característica reductora.

#### 2.4. Haz electrónico

Este proceso se basa en el empleo de la energía de una corriente de electrones. La misma se genera en un cátodo térmico y es focalizada por medio de lentes magnéticas sobre la zona donde se desea efectuar la soldadura. Fig. 9. El haz electrónico es acelerado por un potencial adecuado que en algunos casos puede superar los 150 Kv. No obstante, el empleo de tan altas tensiones tiene el inconveniente de producir radiación X que resulta peligrosa para el operador si no se proveen las protecciones adecuadas.

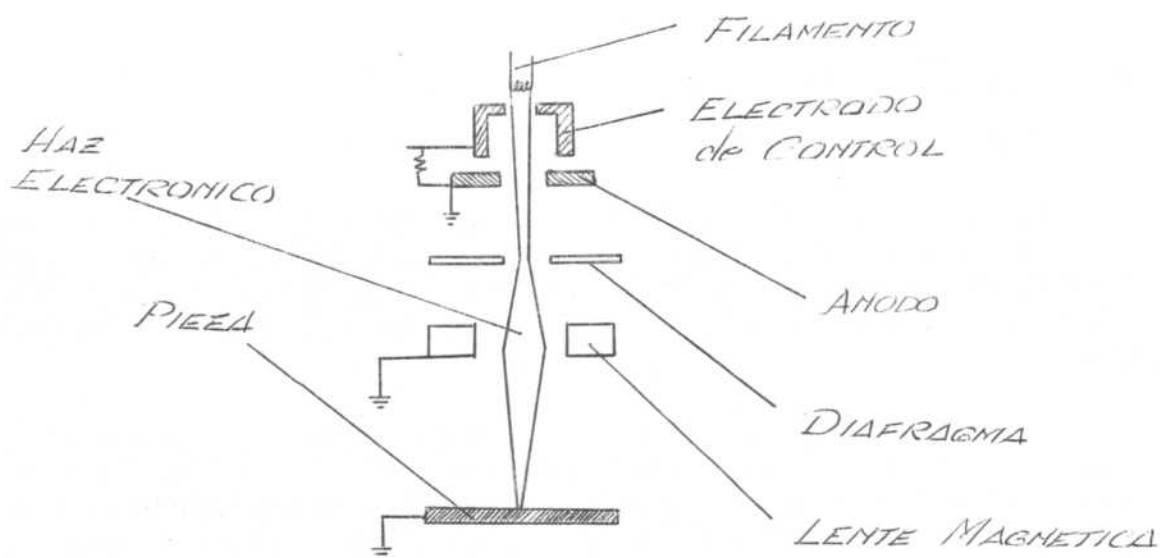


Fig. 9

La característica más sobresaliente de la soldadura por haz electrónico la constituye la alta densidad de energía puesta en juego, que es del orden de  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>, en comparación con los procesos por arco en los que esta densidad de energía es del orden de  $10^4$  W/cm<sup>2</sup>. Esto hace posible efectuar soldaduras de gran penetración (relación de profundidad a ancho de cordón del orden de 20:1). El inconveniente principal lo constituye el hecho de tener que efectuar la soldadura en vacío (del orden de  $10^{-6}$  mm de Hg), lo que obliga el empleo de una cámara adecuada.

## 2.5. Laser

La creciente sofisticación de las técnicas de soldadura ha llevado en los últimos tiempos al empleo del laser. Este método consiste en aprovechar la energía de un haz de luz coherente que se hace incidir sobre el punto a soldar. Las densidades de energía puestas en juego con este método son del orden de  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>, es decir similares a las que se obtienen con haz electrónico.

El uso del laser, que fue desarrollado en EE. UU. hacia el año 1960, está actualmente limitado a microsoldaduras, ya que en su forma actual la energía es liberada como pulsos de muy breve duración (algunos milisegundos). Este método se ha mostrado particularmente útil para la soldadura de componentes electrónicos.

## 3. PRINCIPIOS DE LA SOLDADURA POR ARCO

### 3.1. Fuentes de poder

Dos son los tipos de fuentes empleadas en soldadura por arco. Las denominadas estáticas o rectificadores que son transformadores provistos de una etapa de rectificación elaborada con diodos de selenio o silicio y las rotativas o generadores que proveen directamente corriente continua por conversión de energía mecánica.

La tendencia actual es ir hacia el uso de transformadores, ya que al no poseer elementos móviles, su vida es prácticamente ilimitada. No obstante, los generadores rotativos son aún empleados en aquellos lugares donde no hay facilidades de energía eléctrica. En cuanto a los transformadores, los mismos pueden ser monofásicos o trifásicos según los requerimientos de potencia y en especial de acuerdo a la capacidad de carga de las líneas.

No obstante que las tensiones de trabajo de un arco son de aproximadamente

10/20 voltios, la tensión de circuito abierto de las máquinas no debe ser inferior a los 80 V para permitir el arranque. Además las mismas deben tener una capacidad de corriente de 300 a 500 amperios que son los máximos valores empleados en soldadura manual. La forma en que la tensión en bornes de la máquina varía con la corriente, da lugar a los dos tipos de fuente empleadas actualmente: de corriente constante y de tensión constante.

### 3.2. Características de las fuentes

Tal como se menciona en el punto anterior, la característica externa de las fuentes define el tipo a que pertenecen. Así las llamadas de corriente constante poseen una característica como la que se indica en la Fig. 10, mientras que las de tensión constante poseen una característica como la que muestra la figura 11.

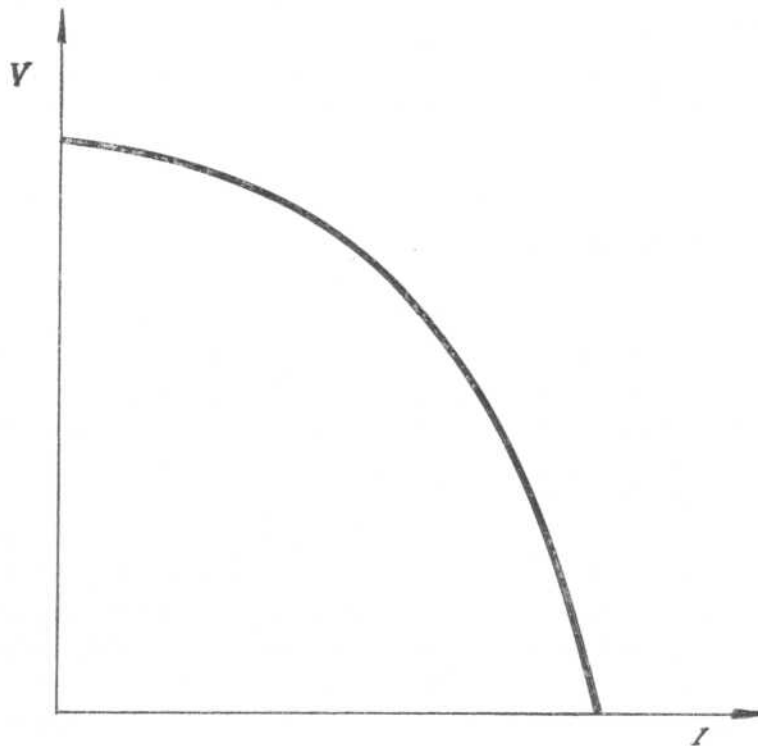


Fig. 10

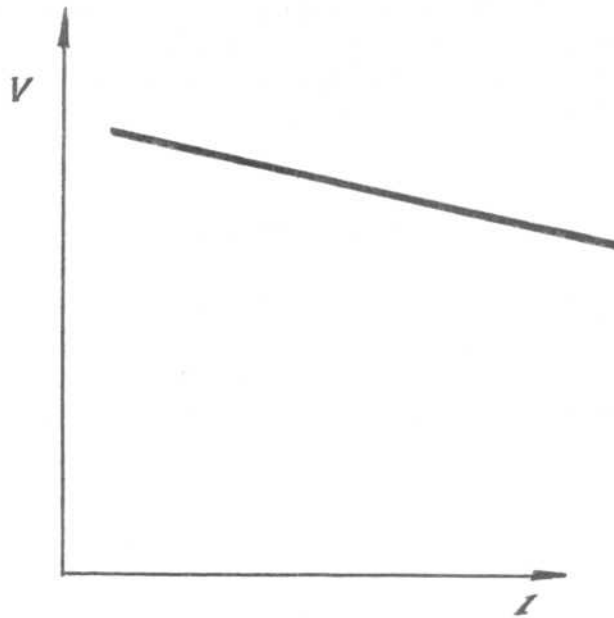


Fig. 11

### 3.3. Naturaleza del arco

Históricamente, los procesos de soldadura se han desarrollado sin tener en cuenta la naturaleza del arco. Sin embargo, en los últimos tiempos, la creciente sofisticación de los métodos empleados y la luz arrojada por las teorías físicas modernas, en especial la magnetohidrodinámica o estudio de plasmas, han mostrado la conveniencia de una mejor comprensión de la física del arco por parte de los técnicos en soldadura.

Para nuestro análisis consideraremos un arco de corriente continua establecido entre un electrodo no consumible (tungsteno por ejemplo), y una superficie metálica. Cuando no hagamos referencia a la polaridad se entenderá que la misma es directa, es decir electrodo negativo con respecto a la pieza positiva, consideraciones éstas que de ninguna manera restan generalidad al problema.

El arco constituye un mecanismo en el cual la corriente eléctrica es transmitida a través de un gas ionizado a alta temperatura. Es evidente que para que esta descarga se mantenga debe existir un suministro permanente de portadores de corriente, es decir de iones.

Los electrones son evaporados del cátodo por efecto termoeléctrico y ace-

lerados por el campo eléctrico hacia la masa de gas donde ceden parcialmente su energía cinética por colisión, manteniendo así la temperatura del gas y la ionización del mismo. Los iones positivos así producidos en el seno del gas son acelerados hacia el cátodo donde ceden su energía por colisión, elevando la temperatura del mismo y manteniendo la emisión termoelectrónica.

Si el gas que constituye el plasma es helio a presión atmosférica, el libre camino medio de los electrones es del orden de  $10^{-5}$  cm. De esta manera un electrón que parte del reposo (es decir  $0^{\circ}\text{K}$ ), tendrá en el momento de la primera colisión una energía cinética:

$$E.C = \frac{1}{2} m v^2 = F \cdot \bar{l} = e \cdot E \bar{l} = 4,8 \cdot 10^{-15} \cdot E \text{ ergios}$$

donde:

- F es la fuerza que solicita al electrón,
- $\bar{l}$  es el libre camino medio,
- m es la masa del electrón,
- e es la carga del electrón y
- E es el campo eléctrico

La energía así adquirida corresponde, de acuerdo a la teoría cinética de los gases a una temperatura absoluta T tal que:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} kT$$

donde k es la constante de Boltzmann.

De esta relación podemos obtener la elevación de temperatura del electrón entre colisiones:

$$\Delta T = \frac{\frac{1}{2} m v^2}{\frac{3}{2} k} = \frac{2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-15} \cdot E}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16}} = 23 E \text{ } ^{\circ}\text{K} = 2,3 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

ya que el valor de E para el arco de helio es aproximadamente 0,1 statvolt/cm.

Debe observarse que este análisis es válido para aquellos electrones que se muevan paralelamente y en sentido contrario al campo eléctrico, ya que los que lo hagan oblicuamente ganarán energía más lentamente (en general se cumple  $\frac{1}{2} m v_x^2 = \frac{1}{2} kT$ ) y los que se muevan en sentido del campo, serán frenados por éste, enfriándose. No obstante en promedio el campo cede energía a los electrones elevando su temperatura (o energía cinética lo que es equivalente).

Para analizar la forma en que esta energía es transferida al gas consideraremos la colisión elástica de un electrón con un átomo de helio. Sabemos que en un choque de este tipo se conserva la cantidad de movimiento y la energía cinética, de modo que:

$$mV = mu + MU \quad y$$

$$mV^2/2 = mu^2/2 + MU^2/2$$

donde  $u$  es la velocidad del electrón después del choque y  $U$  la del átomo de gas (considerado inicialmente en reposo) y  $M$  la masa del mismo. Resolviendo este sistema de ecuaciones obtenemos:

$$MU^2/2 = 4(m/M) mV^2/2 = 0,0006(mV^2/2)$$

de modo que sólo el 0,06 % de la energía acumulada por el electrón entre colisiones, es cedida a los átomos del gas, lo que representa una elevación de temperatura de los mismos de:

$$\Delta T = \frac{0,0006(mV^2/2)}{3/2 k} = \frac{2 \cdot 0,0006 \cdot 4,8 \cdot 10^{-16}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16}} = 0,001^\circ K$$

Si bien éste es un valor muy pequeño, debemos recordar que cada átomo choca  $10^{11}$  veces por segundo, lo que permite que la energía de los electrones sea rápidamente transmitida al gas con la consiguiente elevación de la temperatura.

Una vez que la misma llega a cierto valor, la energía térmica o cinética de los átomos de gas es tal, que al chocar estos entre sí se ionizan. (Dicha temperatura es del orden de  $6.000^\circ C$  para los gases y vapores más comunes a presión atmosférica). En estas condiciones los electrones son acelerados hacia el ánodo y los iones hacia el cátodo, al que bombardean elevando su temperatura y mateniendo la emisión termoelectrónica necesaria para mantener el proceso.

Los arcos empleados en soldadura operan en general con rangos de corriente de 10 a 2.000 Amperios y con tensiones de 10 a 50 Voltios. Pueden distinguirse en los mismos las siguientes zonas. Fig. 12.

Mancha catódica: es la zona del electrodo negativo que es asiento de la emisión termoelectrónica.

Zona de caída catódica: es la región inmediatamente adyacente al cátodo y que es asiento de una brusca caída de potencial.

Columna del arco: es la parte visible y brillante del arco, de muy alta temperatura y bajo gradiente de potencial. Constituye el plasma propiamente dicho, o sea gas altamente ionizado y conductor.

Zona de caída anódica: es la región inmediatamente adyacente al ánodo que es también asiento de una brusca caída de potencial.

Mancha anódica: es la zona del electrodo positivo que es bombardeada por los electrones.

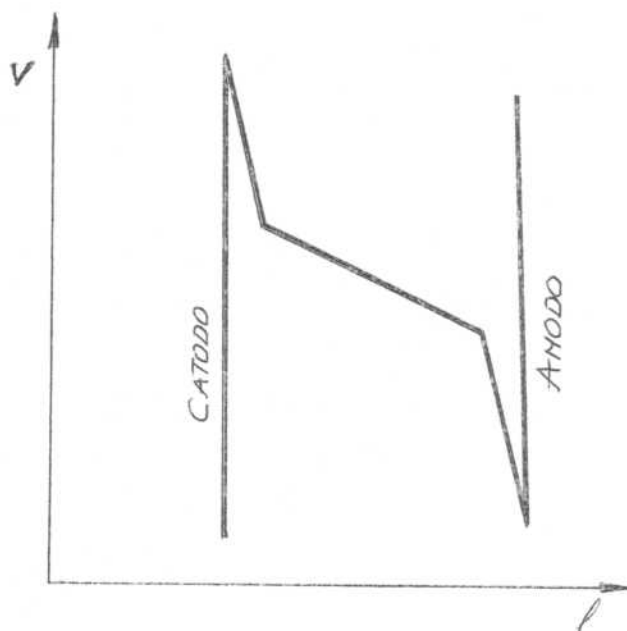


Fig. 12

La columna del arco es eléctricamente neutra, es decir en la misma es válida la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \phi = 0$$

No obstante, la movilidad de los iones positivos es muy inferior a la de los electrones en virtud de la diferencia de sus masas. Integrando la ecuación de Laplace observamos que el potencial de la columna del arco varía en forma lineal a lo largo del mismo. El gradiente de potencial es entonces constante en esa región y su valor es de 5 a 50 V/cm para arcos con electrodos de tungsteno y gas argón por ejemplo.

Los fenómenos que ocurren en las zonas catódicas y anódicas son poco conocidos y sólo mencionaremos que en las mismas no se cumple la neutralidad de carga espacial, lo que origina las bruscas caídas de potencial que las caracterizan. El espesor de dichas zonas es del orden de  $10^{-3}$  cm y el gradiente de potencial alcanza valores de  $10^4$  V/cm.

En cada zona del arco la potencia desarrollada es proporcional a la caída de tensión, ya que la energía desarrollada por segundo es  $V \cdot I$ . No obstante, como el

cátodo cede durante el proceso los electrones más energéticos (es decir aquellos cuya temperatura es tal que les permite ser emitidos), aquel se mantiene a una temperatura inferior al ánodo, que al no ser emisor no cuenta con este efecto refrigerante.

Es evidente que los electrodos recibirán también un aporte de calor por convección desde la columna del arco, cuya temperatura oscila normalmente entre 6.000°C para el arco de vapor de hierro a 2.000 para el argón con electrodo de tungsteno.

### 3.4. Características eléctricas del arco

Si se releva la característica tensión-corriente de un arco, se obtiene una relación que en general puede aproximarse a la función: (Fig. 13)

$$V = A + B/I^n$$

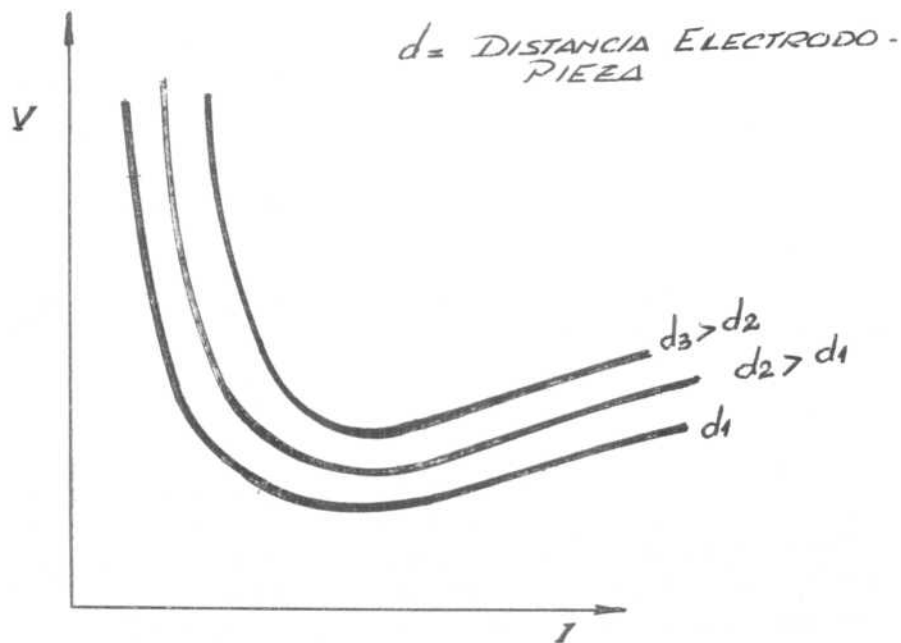


Fig. 13

Cualitativamente, el fenómeno puede interpretarse de la siguiente manera. (Fig. 14). Consideremos un arco cilíndrico entre electrodos también cilíndricos como indica la figura. La relación área/volumen para dicho arco es:

$$\frac{2\pi r^2 + 2\pi r l}{\pi r^2 l} = 2/l + 2/r$$

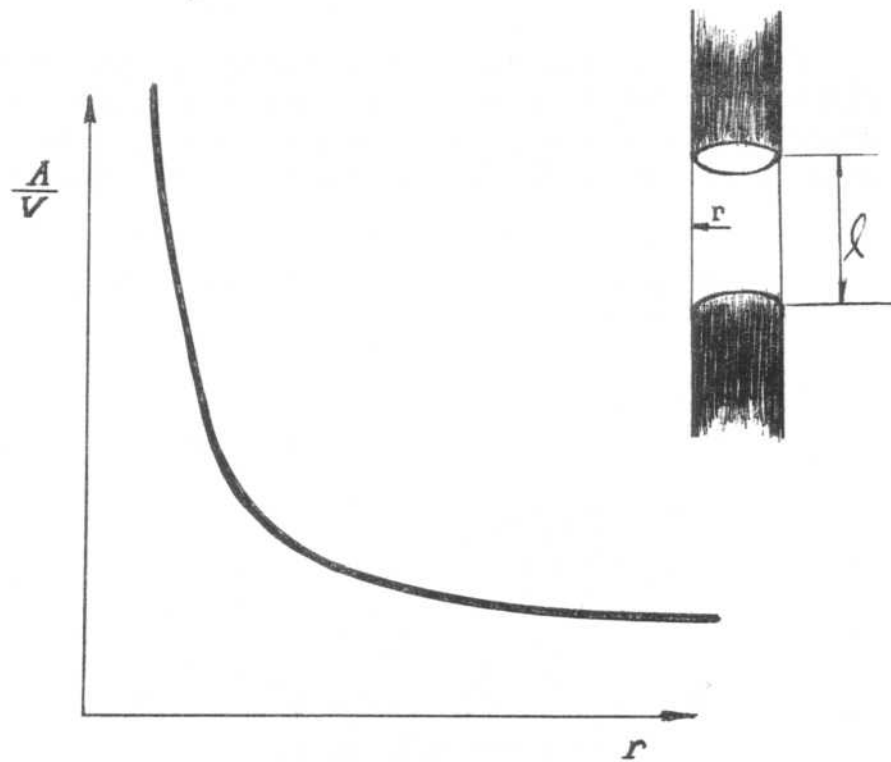


Fig. 14

De modo que a medida que se incrementa la corriente y el radio de la columna aumenta, las pérdidas térmicas que son proporcionales a la superficie radiante, disminuyen en relación a la energía desarrollada que es proporcional al volumen. De esta manera al aumentar la corriente, se eleva la temperatura y consecuentemente el grado de ionización del gas y por lo tanto la conductividad del mismo.

Pasado cierto calor de corriente la columna cilíndrica se deforma transformándose en un elipsoide de revolución. En esta caso, el aumento de conductividad por temperatura es compensado por el incremento en la longitud de las líneas de corriente, pudiendo incluso provocar un aumento de tensión para intensidades suficientemente elevadas.

### 3.5. Estabilidad del arco en relación a la característica de las máquinas

Hemos visto anteriormente la forma que adoptan las características externas de las máquinas de soldadura. Analizaremos ahora la relación que existe entre las mismas y la característica del arco.

Es evidente que cuando un arco es alimentado por una fuente, el punto de trabajo del sistema estará dado por la intersección de las curvas características que lo representan. De este modo, si consideramos una fuente de corriente constante, el punto de trabajo estará representado por el punto P de la figura 15. Si

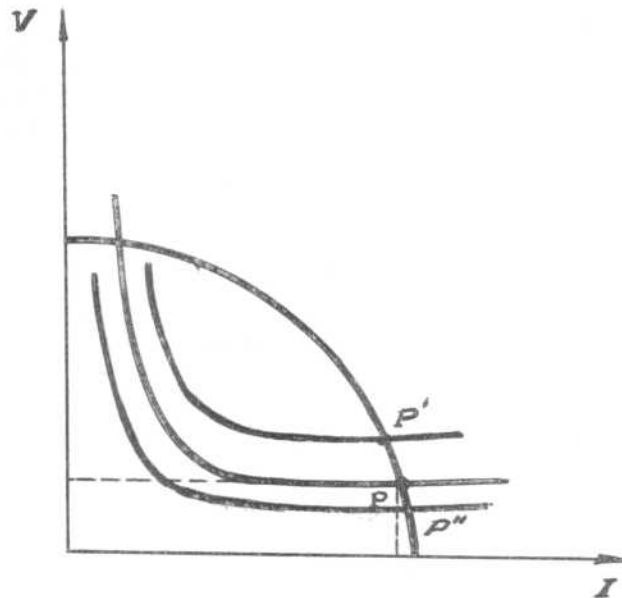


Fig. 15

en estas condiciones varía accidentalmente la longitud del arco, el punto de trabajo se trasladará a P' o P'' según que el arco se alargue o acorte respectivamente. En todo caso, la máxima variación de corriente es pequeña comparada con el valor de I, por lo que puede considerarse que cuando se emplean fuentes de corriente constante, el arco es insensible a variaciones pequeñas de longitud. Es por esta razón que se recurre a dicho tipo de fuentes en todos los casos excepto en aquellos en los que se utiliza electrodo continuo.

Considerando ahora una fuente de tensión constante, podemos ver en la figura 16, que el punto de trabajo está dado por el punto P. Ahora bien, si la longitud de arco varía, el punto de trabajo se trasladará a P' o P'' según que el arco se alargue o se acorte respectivamente. En estos casos la corriente disminuirá o aumentará sensiblemente por lo que la velocidad de fusión del electrodo también disminuirá o aumentará en forma respectiva. De esta manera, si el electrodo es continuo, cualquier variación en la longitud del arco ocasionada por alguna irregularidad de la pieza o alguna perturbación en el mecanismo de alimentación de alambre, será espontáneamente compensada por el efecto descrito, manteniendo una longitud de arco constante y un punto de trabajo estable durante toda la operación.

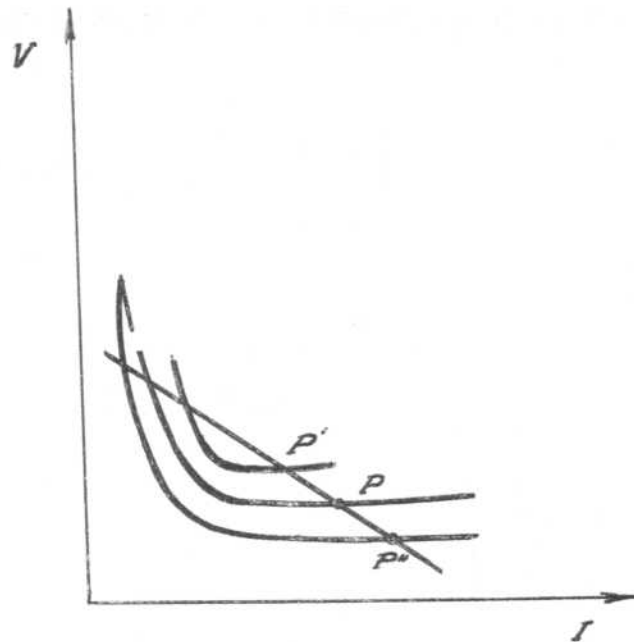


Fig. 16

### 3.6. Arranque del arco

Hasta ahora nada hemos dicho acerca del arranque de un arco. Para ello es necesario proveer una ionización inicial que permita originar la descarga. Dos son los métodos empleados con este propósito. Uno de ellos consiste en tocar la pieza con el electrodo de modo de provocar un corto circuito y un pico de corriente capaz de fundir localmente el metal. Si en estas condiciones se separa el electrodo de la pieza, parte del metal se vaporiza permitiendo la ignición del arco. Este método, que es empleado en general con electrodos consumibles, presenta el inconveniente de contaminar la pieza con el material que compone el electrodo. Debido a esto, cuando se emplean electrodos no consumibles, se recurre a arrancar el arco mediante una descarga auxiliar de alta tensión (aprox. 10.000 V) y alta frecuencia (aprox. 2 Mhz) de baja potencia, que provee la ionización inicial. Una vez producida la misma el arco se establece en menos de 1 milisegundo.

### 3.7. El plasma jet

Cuando un arco es establecido entre un electrodo cilíndrico delgado y una superficie metálica, aquél se presenta constreñido sobre el electrodo y abriéndose

sobre la superficie en forma de campana como lo indica la figura 17, independien-

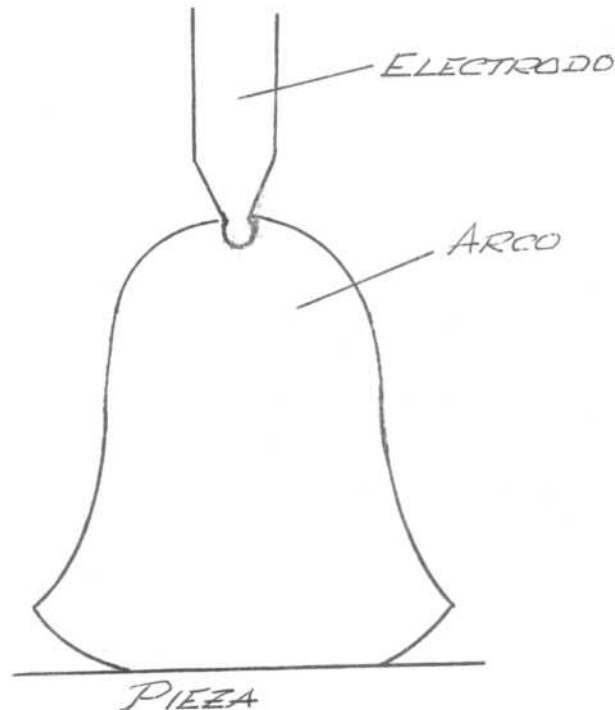


Fig. 17

temente de la polaridad empleada. Para analizar las consecuencias de este efecto, debemos considerar previamente el comportamiento electromagnético de un arco que supondremos cilíndrico.

Sabemos que la corriente creará un campo magnético circular cuya intensidad está dada por la relación: (Fig. 18)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_{\Omega} \vec{J} \cdot d\vec{s}$$

$$2\pi r \vec{B} = \mu_0 J \pi r^2$$

$$\vec{B} = \mu_0 J r / 2$$

DONDE  $B$  ES EL VECTOR  
INDUCCION MAGNETICA,  
 $\mu_0$  LA PERMEABILIDAD  
Y  $J$  LA DENSIDAD DE  
CORRIENTE

y cuyo sentido lo determina la regla del tirabuzón de Maxwell.

Por otra parte de acuerdo a la ley de Ampere este campo actuará sobre las cargas en movimiento produciendo una fuerza por unidad de volumen:

$$\vec{F} = \rho \vec{v} \times \vec{B}$$

donde  $\rho$  es la densidad de carga espacial en movimiento. Ahora bien, como  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$

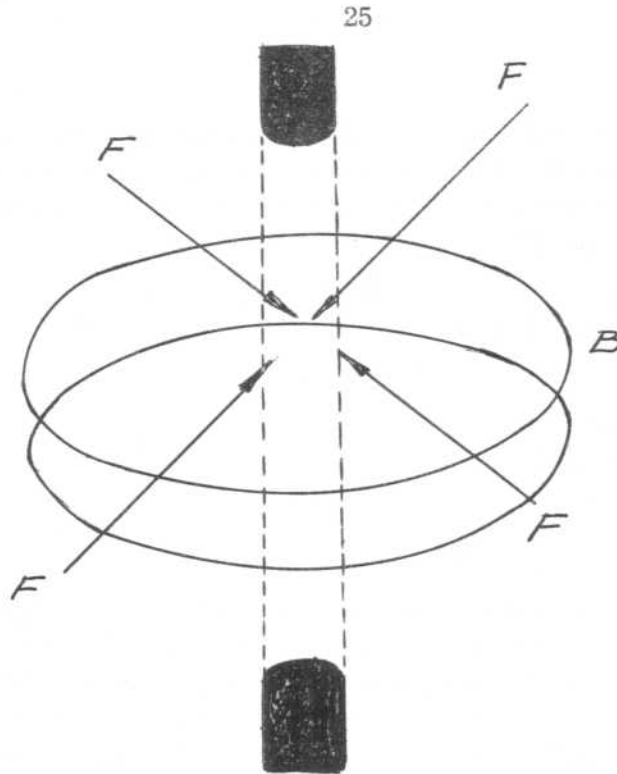


Fig. 18

son en este caso perpendiculares,  $F$  estará dirigida hacia adentro de acuerdo a la regla de los dedos de la mano izquierda. De este modo la fuerza resulta:

$$F = \rho \cdot v \cdot B = J \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot J \cdot r = \frac{\mu_0}{2} J^2 r \quad (\text{RECORDEMOS QUE } \rho \cdot v = J)$$

y si consideramos una cáscara cilíndrica de espesor  $dr$  y altura unitaria, la fuerza sobre la misma por unidad de área será:

$$df = -\frac{\mu_0}{2} \cdot J^2 \cdot r \cdot dr$$

El signo negativo obedece a que  $df$  es de sentido contrario a  $dr$ . De modo que:

$$f = -\frac{\mu_0}{2} J^2 \int r \cdot dr = \frac{\mu_0}{2} J^2 \frac{(R^2 - r^2)}{2}$$

o bien

$$f = \frac{\mu_0 I J}{4\pi} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

donde  $R$  es el radio exterior de la columna del arco.

Esto quiere decir que sobre el arco actúan fuerzas radiales, llamadas de Lorenz, que tienden a constreñirlo sobre su eje hasta que el incremento de presión debido a esto compense las fuerzas de origen electromagnético. Cuando esto ocurre se puede plantear la ecuación de equilibrio como:

$$p + \frac{\delta v^2}{2} = \frac{\mu_0 I J}{4\pi} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

donde  $v$  es la velocidad del fluido

$p$  la presión relativa, y

$\delta$  la densidad de fluido

Ahora bien, si consideramos que las fuerzas de Lorenz son proporcionales a la densidad de corriente, refiriéndonos ahora a un arco en forma de campana, resultará que dichas fuerzas serán mayores en la zona donde el arco está constreñido, ya que allí es mayor la densidad de corriente. En este caso podemos admitir en el extremo del electrodo un exceso de presión importante, que podemos calcular en forma aproximada suponiendo la velocidad del fluido nula en dicho punto, es decir:

$$p \approx \frac{\mu_0 I J}{4\pi} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

Dada la forma del arco, este exceso de presión no está compensado en el resto de la columna de modo que habrá una fuerza neta de valor

$$\begin{aligned} F_M &= \int_0^R 2\pi r p dr = \frac{\mu_0 I J}{4\pi} \int_0^R \left(r - \frac{r^3}{R^2}\right) dr = \\ &= \frac{\mu_0 I J}{8} R^2 = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \end{aligned}$$

Esto dá origen a un gradiente de presión que fuerza un flujo de gas denominado plasma jet con velocidades del orden de  $10^4$  cm/seg, es decir superiores a la del sonido.

### 3.8. Teorías de la transferencia metálica

Las fuerzas puestas en juego sobre una gota de metal fundido en el extremo de un electrodo son las siguientes:

a) Tensión superficial. Esta es una fuerza que se opone al desprendimiento

de la gota cuyo valor está dado por la expresión:

$$F_s = 2\pi \gamma a \psi\left(\frac{a}{c}\right)$$

donde

- a es el radio del electrodo,
- $\gamma$  la tensión superficial,
- $c^2$  es la constante de capilaridad del metal ( $\frac{15}{g\delta}$ )
- g es la aceleración de la gravedad y
- $\delta$  la densidad del metal fundido

$\psi\left(\frac{a}{c}\right)$  es una función cuyo valor yace generalmente entre 0,6 y 1 y puede ser calculada aproximadamente por las expresiones:

$$\psi\left(\frac{a}{c}\right) = 1 - 2,5a \quad \text{para } a < 0,15 \text{ cm}$$

$$\psi\left(\frac{a}{c}\right) = 0,625 \quad \text{" } 0,15 < a < 1 \text{ cm}$$

b) Gravedad. Esta es una fuerza que se opone o favorece el desprendimiento de la gota según que el electrodo se dirija hacia arriba o hacia abajo. Su valor es:

$$F_g = g \delta V$$

donde V es el volumen de la gota.

c) Fuerzas de origen electromagnético. Ya las hemos analizado y sabemos que su valor es:

$$F_M = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi}$$

d) Fuerzas de evaporación. Este tipo de fuerzas se manifiesta en general para densidades de corriente elevadas en el extremo del electrodo. Las mismas son originadas por la violenta evaporación del material que en forma volumétrica puede expresarse como:

$$F_e = V_e \cdot I / H_e \cdot \delta$$

donde  $V_e$  es la cantidad de calor disipada en el electrodo por evaporación por unidad de intensidad de corriente (cal/Amper),

$H_e$  es el calor latente de evaporación del material del electrodo, y la densidad del vapor.

De esta manera, si  $A$  es el área de la mancha catódica o anódica según el caso, la velocidad con que será emitido el vapor es:

$$v = \dot{Q}/A = v_E \cdot I/H_E \cdot \delta \cdot A = v_E J/H_E \cdot \delta$$

lo que origina una presión dinámica:

$$p = v^2 \delta / 2 \Rightarrow v_E^2 J^2 / 2 H_E^2 \cdot \delta$$

lo que representa una fuerza

$$F_E = pA = v_E^2 \cdot I \cdot J / 2 H_E^2 \cdot \delta$$

Debemos observar que los dos tipos de fuerzas consideradas en último término (c y d) dependen del cuadrado de la intensidad de corriente una de ellas (la de origen electromagnético), y del producto de la intensidad por la densidad de corriente la otra (la de evaporación). En cambio las dos primeras fuerzas (a y b) sólo dependen de las características físicas del metal fundido y de la geometría del electrodo.

La transferencia metálica del electrodo a la pieza estará gobernada entonces de acuerdo a la forma en que todas estas fuerzas interactúen entre sí. Dichos regímenes de transferencia pueden ser en general clasificados en tres tipos:

Rocío. Cuando la transferencia se efectúa en forma de muy pequeñas gotas.

Globular. Cuando la transferencia se efectúa en forma de gotas grandes.

Cortocircuito. (también conocido como dip-transfer). Cuando la transferencia se efectúa en condiciones de **globular** pero el arco es lo suficientemente corto como para que la gota toque la pieza y se desprenda antes de alcanzar su tamaño máximo.

Todos estos tipos de transferencia están indicados en la figura 19.

Habrá rocío cuando la corriente sea lo suficientemente elevada como para que la fuerza electromagnética ayudada o no por la gravedad según el caso, supere las fuerzas de evaporación y de tensión superficial cuando aún la gota es pequeña, provocando el desprendimiento de la misma. En este sentido es importante observar que aunque la corriente sea elevada, si la configuración del arco es tal que produce una constricción de las líneas de corriente sobre la gota, tal como lo indica la figura 20, la densidad de corriente aumenta y con ella el producto  $I \cdot J$ , por lo que se generará una importante fuerza antagónica de evaporación.

Habrá transferencia globular cuando las fuerzas antagónicas sean importantes frente a las que favorecen el desprendimiento. Tal es el caso de soldaduras con corrientes moderadas. Si en estas condiciones la gota toca la pieza, se origi-

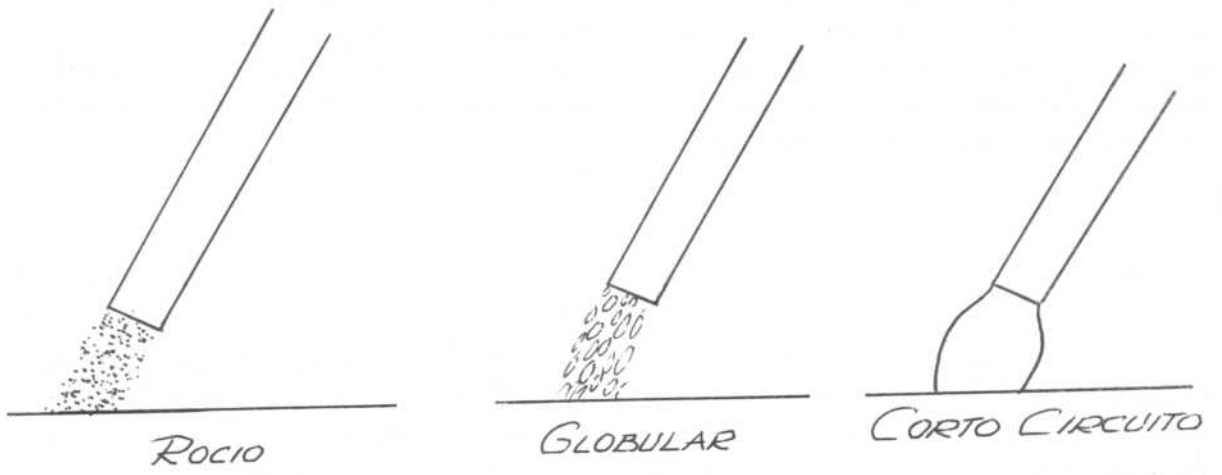


Fig. 19

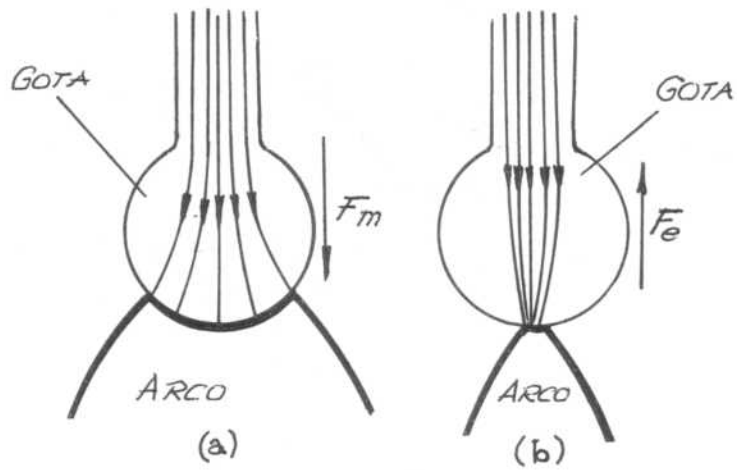


Fig. 20

nará una fuerza de tensión superficial que provocará el desprendimiento. Además el cortocircuito provocará un pico de corriente que aumentará la fuerza electromagnética favoreciendo también el desprendimiento. Este último tipo de transferencia es el conocido como de cortocircuito.

Existe otra teoría acerca de los mecanismos de transferencia que se basa en la acción del plasma jet. Cálculos teóricos demuestran que el arrastre que ejerce la vena fluída es suficiente para lograr el desprendimiento de la gota del extremo del electrodo. Es probable que el proceso real obedezca a una combinación de todos los efectos mencionados.

### 3.9. Flujo térmico

Si bien el análisis matemático del flujo térmico en los procesos de soldadura permite una mayor comprensión de los efectos de la energía puesta en juego durante los mismos y en especial de los regímenes de enfriamiento, poca ha sido la aplicación práctica de estos conceptos a casos concretos. Esto es sin duda debido a la complejidad que resulta en la formulación matemática de los problemas que no puedan aproximarse con configuraciones sencillas.

Una de dichas configuraciones la constituye el caso de una placa delgada indefinida (Fig. 21), en la que puede suponerse una distribución de temperaturas bi-

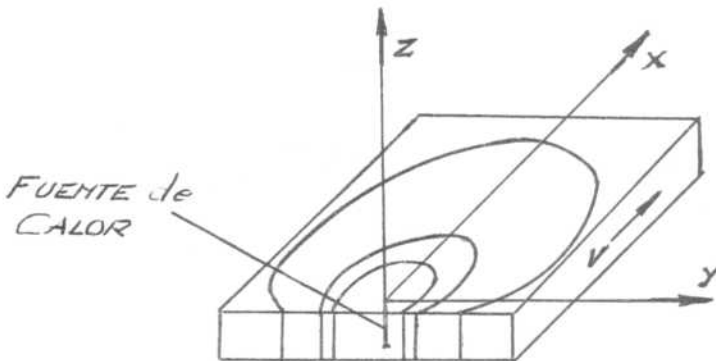


Fig. 21

dimensional, es decir sólo función de  $x$  y de  $y$ . Las condiciones del problema son tales que se supone la fuente de calor como una línea según el eje  $z$  que libera uniformemente  $q$  calorías por segundo y por unidad de longitud en todo el espesor de la chapa. La fuente se desplaza con movimiento rectilíneo uniforme con velocidad  $v$  respecto a la chapa en la dirección  $x$ . Estas condiciones están reproducidas con bastante aproximación en la soldadura a tope de dos chapas delgadas. En este caso la distribución de temperaturas está dada por la función:

$$\Theta = \frac{q}{2\pi k} e^{-\sqrt{x}/2\alpha} \cdot k_0\left(\frac{\sqrt{r}}{2\alpha}\right)$$

donde  $\Theta$  es la temperatura relativa a la de la chapa base alejada de la zona de soldadura,  
 $k$  es la conductividad térmica del material,  
 $\alpha$  es la difusividad térmica (cociente de la conductividad térmica y el producto  $c\delta$ , donde  $c$  es el calor específico y  $\delta$  la densidad)  
 $r$  es la distancia a la fuente desde el punto considerado, y  
 $k_0(z)$  es una función de Bessel de orden 0 cuyo valor está dado en forma aproximada por:

$$k_0(z) \approx -(0.5772 + \log(z/2)) \quad \text{para } z \text{ pequeño y}$$

$$k_0(z) \approx (\pi/2z)^{1/2} \cdot e^{-z} \quad \text{para } z \text{ grande}$$

Las fuentes reales son extensas, de modo que esta ecuación da resultados aceptables sólo para puntos que no se hallen dentro de la zona de fusión. El borde del cordón constituye un registro permanente de la isoterma correspondiente a la temperatura de fusión y puede ser empleado para verificar la expresión anterior. A este fin es útil la aproximación siguiente aplicable a dicha isoterma:

$$q = 8k\Theta_M \left( \frac{1}{5} + \sqrt{d/4\alpha} \right)$$

donde  $\Theta_M$  es la temperatura relativa de fusión, y  
 $d$  el ancho del cordón.

Esta ecuación vincula el ancho del cordón con la energía térmica necesaria para realizarlo a la velocidad  $v$ . Cuando esta energía es insuficiente se produce el defecto conocido como falta de fusión lateral.

Si la placa es gruesa se puede idealizar el proceso considerando una fuente puntual sobre la superficie de un cuerpo semiinfinito limitado por el plano  $z = 0$  (Fig. 22).

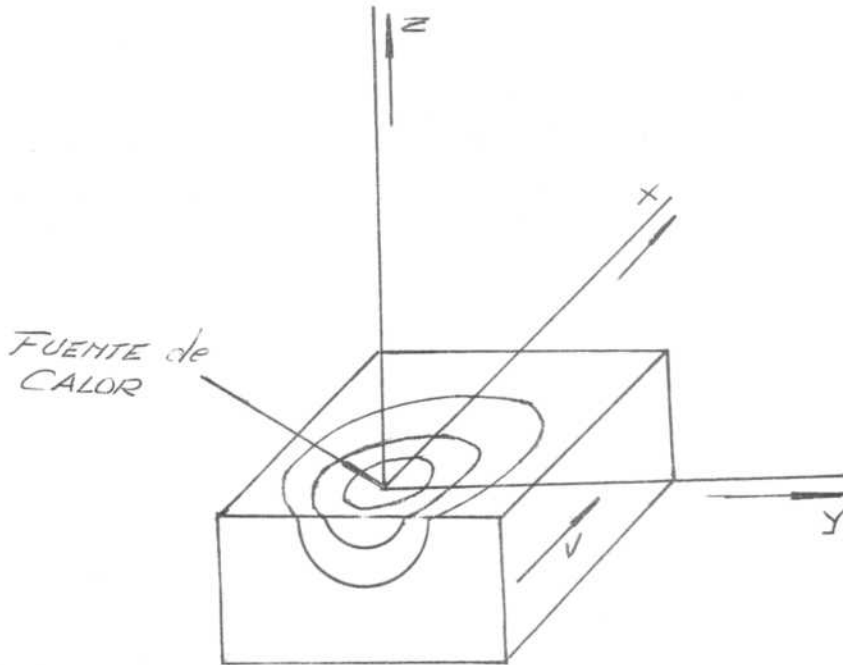


Fig. 22

La distribución de temperaturas resulta en este caso:

$$\theta = \frac{q}{2\pi k r} \cdot e^{-\frac{\sqrt{r-x}}{2\alpha}}$$

donde  $q$  es ahora la energía térmica emitida por la fuente por unidad de tiempo. Esta ecuación da una buena aproximación a la distribución de temperaturas resultantes cuando se realiza un cordón sobre una chapa gruesa. En este caso la relación entre el ancho del cordón y la energía puesta en juego está dada por la expresión simplificada:

$$q = \pi d k \theta_m \left( 1 + \frac{4}{5} \cdot \frac{\sqrt{d}}{4\alpha} \right)$$

Uno de los parámetros más importantes en soldadura por fusión lo constituye el régimen de enfriamiento. El mismo se obtiene derivando respecto del tiempo las expresiones que dan la distribución de temperaturas en la chapa. Resulta así:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\sigma \Theta}{r} \left[ \frac{x}{r} - \frac{\sqrt{r}}{2\alpha} \left( 1 - \frac{x}{r} \right) \right]$$

para el caso tridimensional, y

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\sigma^2 \Theta}{2\alpha} \left[ \frac{(x/r) k_1(\sqrt{r}/2\alpha)}{k_0(\sqrt{r}/2\alpha)} - 1 \right]$$

para el caso bidimensional,

donde  $k_1(z)$  es una función de Bessel de orden 1 cuyo valor aproximado está dado por:

$$k_1(z) \approx 1/z \quad \text{para } z \text{ pequeño, y}$$

$$k_1(z) \approx k_0(z) \quad \text{para } z \text{ grande.}$$

Mediante estas ecuaciones es posible calcular, por ejemplo, la velocidad de enfriamiento para los puntos situados sobre el eje del cordón que van solidificándose detrás de la zona de fusión. En este caso: (Figs. 23 y 24)

$$r = x = x_1$$

$$\Theta = \Theta_M$$

de modo que:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\sigma \Theta_M}{x_1}$$

para el caso tridimensional o placa gruesa, y

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\sigma^2 \Theta_M}{2\alpha} \left[ \frac{k_1\left(\frac{\sqrt{x_1}}{2\alpha}\right)}{k_0\left(\frac{\sqrt{x_1}}{2\alpha}\right)} - 1 \right]$$

para el caso bidimensional.

Debemos observar que siendo las temperaturas consideradas relativas a la inicial del material, si el mismo se precalienta, disminuirán los valores de  $\Theta$  y por lo tanto también lo harán los regímenes de enfriamiento. Esto constituye un recurso generalizado cuando se desea evitar transformaciones de fase perjudiciales en la estructura metalúrgica de un dado material.

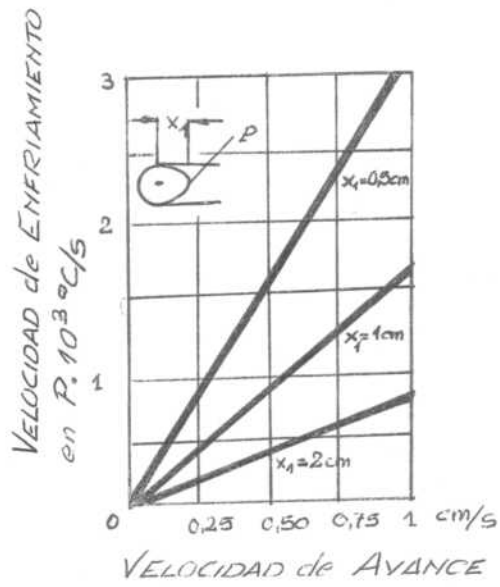


Fig. 23

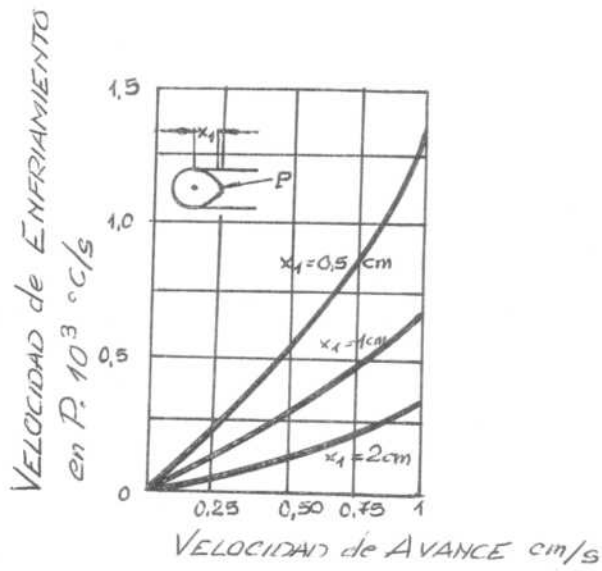


Fig. 24

### 3.10. Reacciones gas-metal

Las reacciones entre los gases presentes en un proceso de soldadura y el metal a alta temperatura, merecen especial atención ya que son en gran parte determinantes de las propiedades mecánicas resultantes del proceso. Dichas reacciones son de dos tipos diferentes según que los gases se combinen químicamente con el metal o bien entre en solución en el mismo.

El primer caso se presenta por ejemplo cuando el oxígeno y nitrógeno del aire se combinan con el hierro formando óxidos y nitruros. Mientras que el óxido de hierro no afecta sensiblemente las propiedades mecánicas, el nitruro de hierro, que adopta una morfología acicular, ejerce un marcado efecto de fragilización.

Un ejemplo importante del segundo tipo de reacciones lo constituye la absorción de hidrógeno por la mayoría de los metales.

En general, los tres componentes principales del aire atmosférico, oxígeno, nitrógeno y vapor de agua, tienen efectos perniciosos sobre las soldaduras. De éstos, el que presenta las reacciones más complejas es el vapor de agua, cuya característica más importante la constituye el hecho de descomponerse en el arco generando hidrógeno naciente. La solubilidad de este gas aumenta con la temperatura con un pico en el punto de fusión, debido al incremento de la solubilidad en el líquido. (Fig. 25). A medida que el arco progresa y el metal se vá enfriando, la

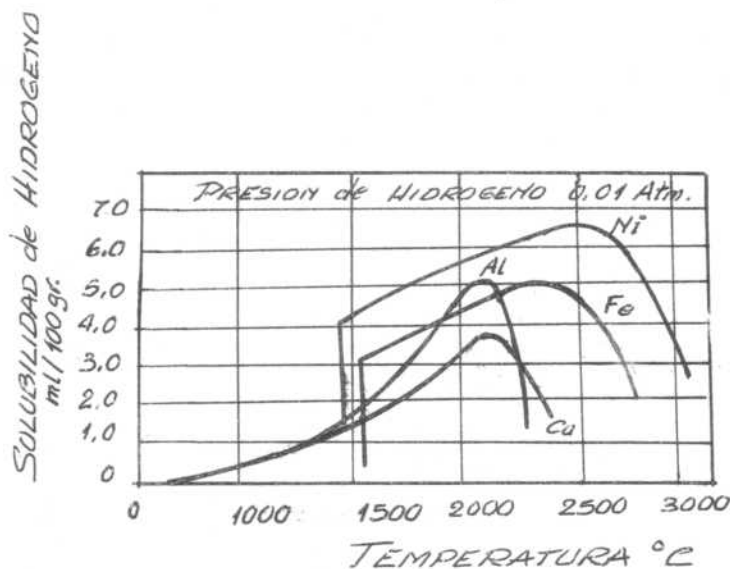


Fig. 25

solubilidad disminuye rápidamente lo que puede dar lugar a burbujas que son causa de porosidad. Puede también ocurrir que los átomos de hidrógeno, queden atrapados en la red cristalina, donde debido a su alta movilidad, difunden hacia microfibras u otras fallas de la estructura donde se recombinan generando presiones lo suficientemente elevadas para generar o hacer progresar grietas.

En lo referente al oxígeno, se presenta en los aceros un fenómeno de diferente naturaleza debido a la presencia del carbono. Sabemos que éste reacciona con el  $O_2$  de acuerdo a:



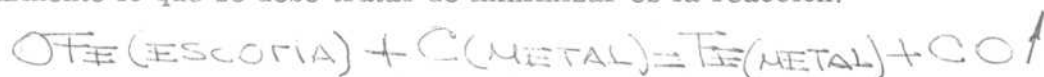
de manera que a medida que el oxígeno difunde hacia el interior, va formando burbujas de CO que además de provocar porosidad, empobrece el contenido de carbono del acero. Esto demuestra la conveniencia de minimizar dicha reacción, lo que puede lograrse eliminando el oxígeno en el arco de soldadura (caso de los procesos con protección de gas inerte), o bien por reacciones adecuadas entre el metal y la escoria (caso de los procesos con empleo de fundente).

### 3.11. Reacciones escoria-metal

En los aceros, además del carbono, también hay presentes silicio y manganeso, y sus óxidos pasan a formar parte de la escoria junto con el óxido de hierro. La forma en que el oxígeno se reparte entre estos óxidos está determinada por las constantes de equilibrio.

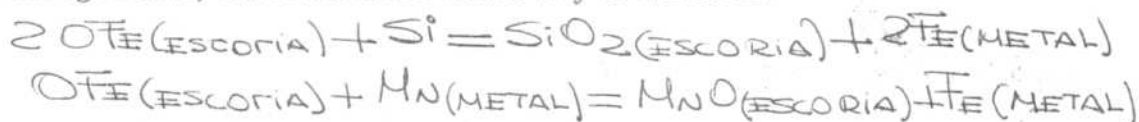
Las reacciones metal-escoria en las soldaduras se analizan en base a las que ocurren en siderurgia. Esto está justificado en parte por la evidencia experimental de que la partición del manganeso entre el metal y la escoria es la correspondiente al estado de equilibrio.

Principalmente lo que se debe tratar de minimizar es la reacción:



Reacción ésta que, como ya hemos mencionado, resulta en una soldadura porosa y empobrecida en carbono.

Análogamente, las reacciones con el Si y el Mn serán



El equilibrio de estas reacciones está gobernado en forma general por la ley de acción de masas, que puede enunciarse de la siguiente manera: La velocidad de una reacción a una dada temperatura es proporcional al producto de las masas activas de las sustancias reaccionantes. De aquí surge entonces que para aumentar el contenido de un elemento de aleación, basta con proveer la escoria de una cantidad suficiente de óxido de dicho elemento. Por ejemplo, en la última de las ecuaciones, aumentando el contenido de MnO en la escoria, aumenta el producto (MnO) (Fe) y la reacción se desplazará hacia la izquierda con lo que también aumentará la cantidad de Mn en el metal.

### 3.11. Zona de fusión

La zona de fusión cobra especial importancia ya que la misma además de ser asiento de los fenómenos anteriormente estudiados, determina, luego de la solidificación, la estructura general del cordón soldado. Dicha estructura es en general, para un dado material, función del régimen de enfriamiento, que como hemos visto, depende a su vez de la velocidad de soldadura, de la temperatura inicial y otras características del sistema.

A medida que la zona de fusión progresa, también lo hace la isoterma correspondiente a la zona de fusión del material. El metal entonces solidifica formando cristales orientados normalmente a dicha isoterma (Fig. 26), lo que da

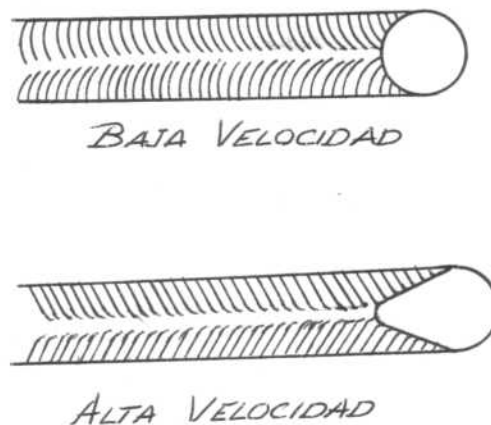


Fig. 26

origen a lo que se conoce como estructura dendrítica. Ahora bien, durante todo el proceso, los cristales se generan a expensas del material proveniente de la zona de fusión, de modo que si la velocidad de enfriamiento es muy elevada, puede ocurrir que el metal solidifique sin poder alimentar totalmente los espacios inter cristalinos que van quedando detrás de la zona fundida, lo que da origen a fisuras. Esto suele ocurrir al finalizar la pasada, ya que al extinguirse el arco, la velocidad de enfriamiento aumenta bruscamente. Es por ello que resulta siempre conveniente disminuir en forma gradual la corriente antes de extinguir el arco, lo que reduce el efecto mencionado. Este es el recurso conocido como "eliminación de cráter".

El régimen de enfriamiento es además determinante del tamaño de grano final de la estructura y éste a su vez tiene influencia sobre las propiedades mecánicas resultantes, siendo en general deseables estructuras de grano fino. Para lograr esto es necesario que la velocidad de enfriamiento sea lo más elevada posible, lo que puede a su vez traer aparejado, además del inconveniente mencionado más arriba, transformaciones metalúrgicas conducentes a estructuras frágiles, tal como veremos más adelante. Es entonces necesario determinar las condiciones del proceso de modo de ajustarlas a cada caso particular.

### 3.12. Dilución

El concepto de dilución cobra particular importancia en aquellos casos en los que el metal de aporte es de composición diferente a la del metal base.

En general, la dilución definida como:

$$D = \frac{\text{Peso del metal base fundido}}{\text{Peso total del metal fundido}}$$

depende del tipo de junta, de la preparación de bordes y del proceso empleado. La figura 27 muestra algunas juntas típicas con los valores de dilución estimados.

### 3.13. Zona afectada por el calor

Debido a la enérgica convección que existe en la zona fundida durante la soldadura, la composición de la misma al solidificar es relativamente homogénea. De esta manera, la transición entre el cordón y la zona que no ha fundido es en general muy marcada. Esta zona de transición, que puede tener un ancho de 50 a 100 micrones, junto con lo que se denomina zona afectada por el calor (cuyo ancho depende de las condiciones de enfriamiento), son en general asiento de cambios estructurales importantes que en muchos casos comprometen el comportamiento de la unión soldada.

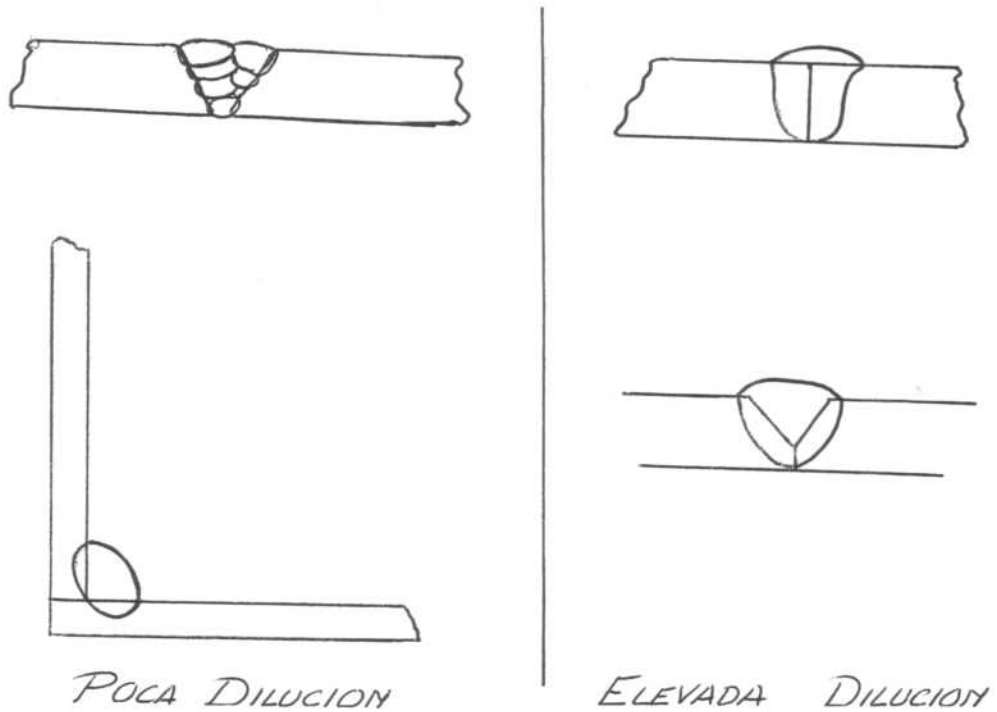


Fig. 27

### 3.14. Preparación de juntas

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta cuando se debe efectuar una soldadura, es el adecuado diseño de las juntas. Esto tiene por objeto lograr en la soldadura la penetración correcta y al mismo tiempo minimizar la distorsión.

La figura 28 muestra algunas de las juntas más comúnmente empleadas en la práctica corriente.

### 3.15. Tensiones residuales

Las tensiones residuales originadas por los procesos de fusión obedecen a la contracción del cordón cuando solidifica. Si el mismo no se hallara restringido, la magnitud de dicha contracción sería  $\alpha \Theta_M$ , donde  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica.

Ahora bien, como el cordón no es libre, sino que se encuentra restringido por el resto de la pieza, se generarán tensiones residuales, que si asumimos sólo de-

formación elástica, serán de valor  $E \cdot \alpha \cdot \Theta_m$ , donde E es el módulo de elasticidad de material. En general este valor supera el de fluencia, de modo que excepto en aquellos materiales de bajo punto de fusión, habrá siempre asociada una zona de deformación plástica (fig. 29)

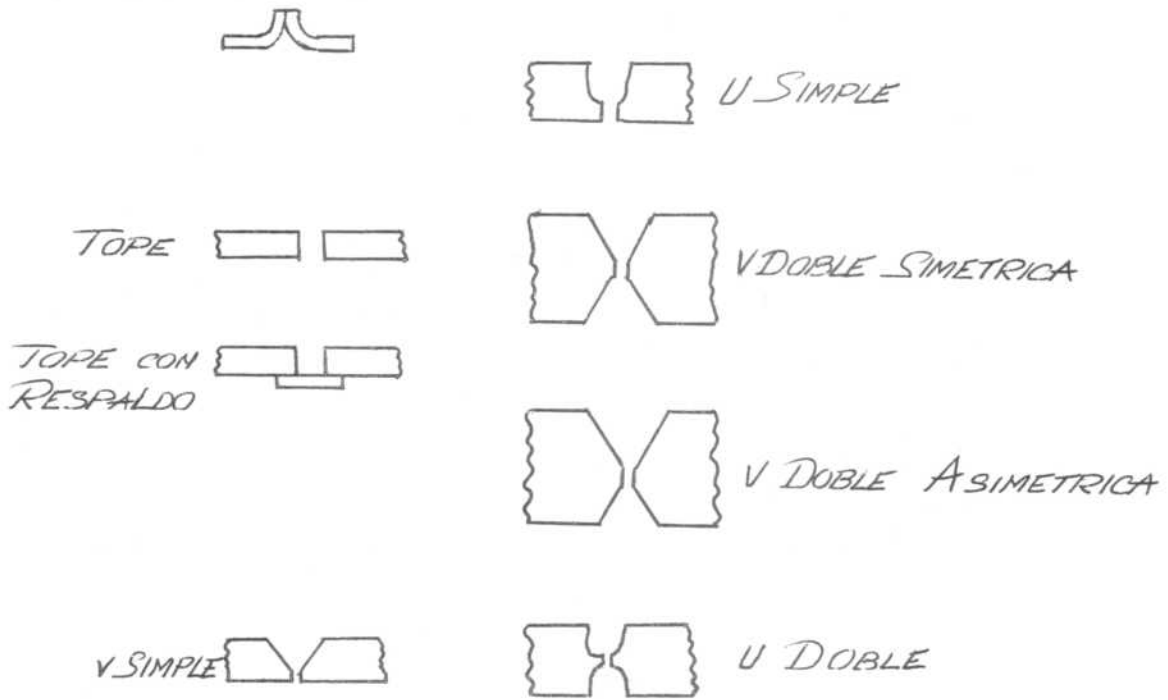


Fig. 28

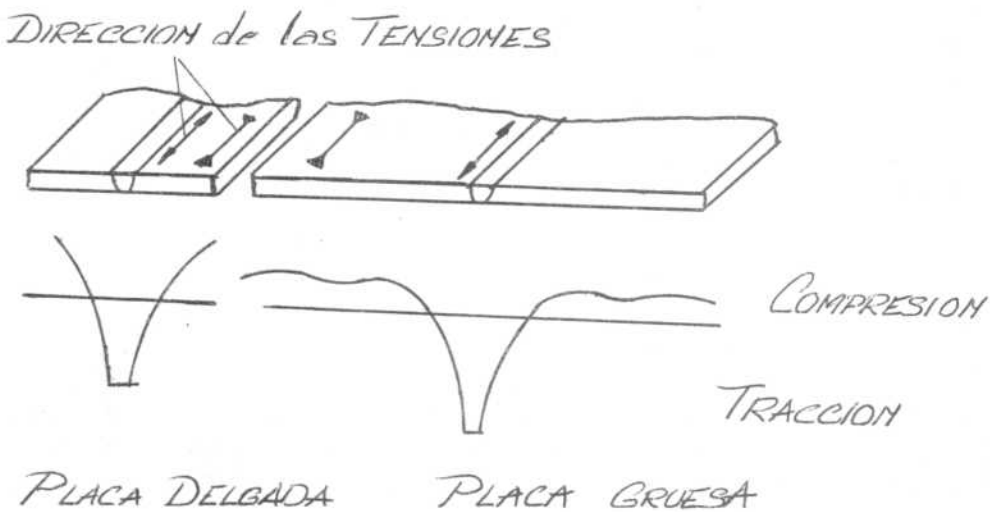


Fig. 29

Un efecto similar ocurre en el sentido transversal a un cordón en V si se restringe el movimiento de las piezas mediante algún dispositivo de sujeción. Esto se debe a que siendo el cordón más ancho en la parte superior, allí será mayor la tendencia a la contracción que en la raíz por lo que se generarán tensiones de tracción arriba y de compresión abajo.

### 3.16. Distorsión

La distorsión es uno de los problemas más graves que debe enfrentar el técnico en soldadura. La misma surge como consecuencia de las tensiones residuales analizadas anteriormente.

En general cuanto menos restringida esté una pieza durante la soldadura, mayor será la distorsión. No obstante, la restricción completa no elimina en forma total el problema, sino que además genera tensiones residuales capaces a veces de provocar fisuras.

Para minimizar la distorsión sólo pueden darse algunas normas generales tales como:

Las preparaciones de bordes en doble V o doble U son preferibles porque distribuyen las tensiones simétricamente. Además la simple U es más favorable que la simple V por la misma razón.

En general, la dirección de soldadura debe ser desde el extremo restringido hacia el no restringido. Además, debe procurarse que la fusión sea lo más localizada posible evitando cordones gruesos que requieran gran cantidad de aporte y calor.

Otra posibilidad para minimizar la distorsión se presenta disponiendo las piezas a soldar de modo que la misma distorsión las lleve a su ubicación correcta. Esto exige una previsión adecuada de la magnitud de la distorsión, pero tiene la ventaja de reducir el mínimo las tensiones residuales.

### 3.17. Defectos

La figura 30 muestra los distintos tipos de defectos que aparecen en soldadura. De todos ellos los más graves son indudablemente las fisuras. Las burbujas pequeñas o poros, no revisten en general mayor gravedad, a menos que adopten formas elongadas que puedan dar origen a concentración de tensiones en los vértices pudiéndose entonces comportar como verdaderas fisuras.

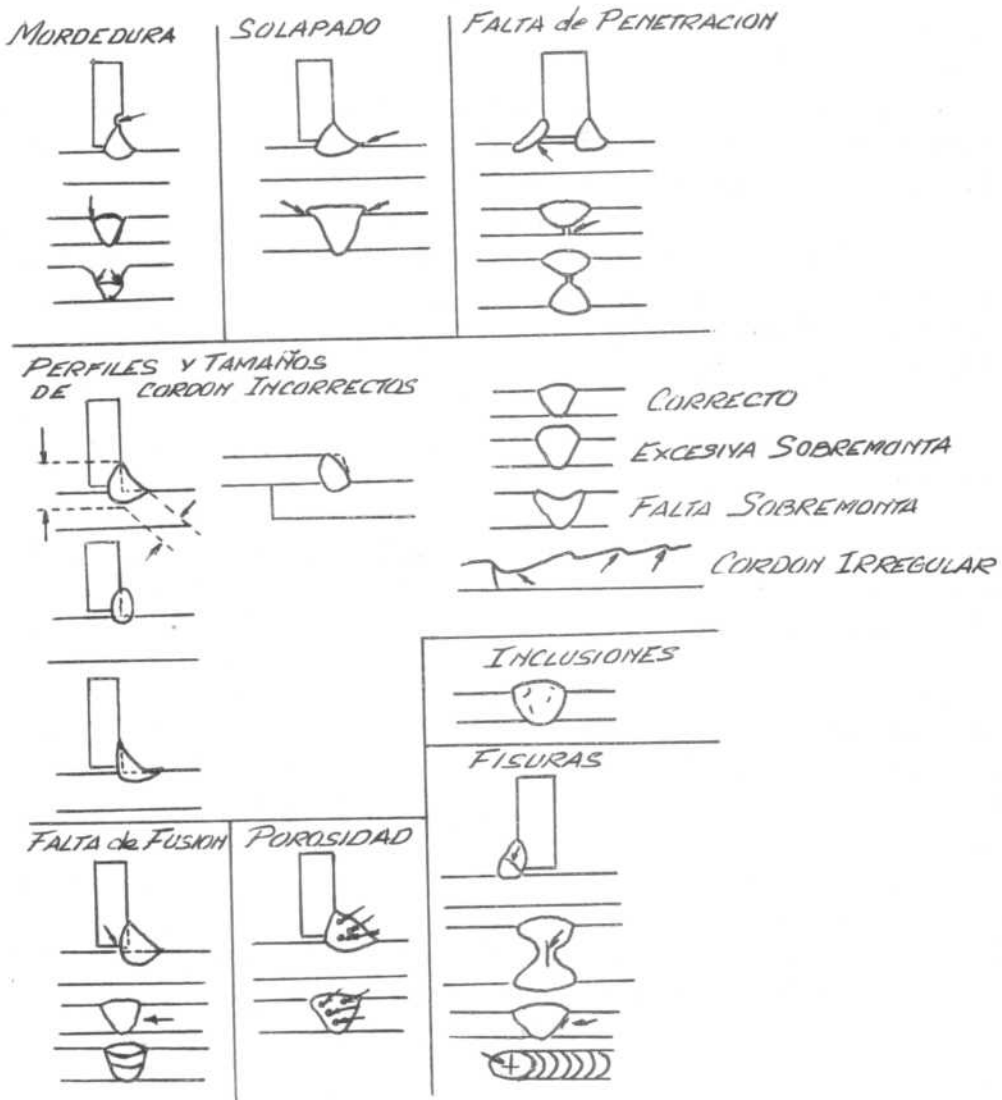


Fig. 30

#### 4. PRINCIPIOS DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA

##### 4.1. Naturaleza de la resistencia de contacto

Ya hemos analizado anteriormente la naturaleza de dos superficies reales en contacto. Profundizaremos ahora el concepto de modo de calcular el valor del área que se pone realmente en contacto cuando se fuerza una superficie sobre otra.

Si la presión ejercida es  $p$ , es evidente que la fuerza mutua entre las dos superficies es  $F = p \cdot A$ , donde  $A$  es el área total de contacto aparente de las superficies. Ahora bien, al establecerse dicho contacto el mismo se efectuará a través de algunas zonas y no del área total  $A$ . Dichas zonas se deformarán plásticamente hasta que a través de las mismas se transfiera la carga total  $F$ . De esta manera dicha fuerza  $F$  debe ser igual a:

$$F = \sigma_f \cdot a$$

donde  $\sigma_f$  es la tensión de fluencia del material y  $a$  el área realmente en contacto.

Igualando las expresiones anteriores resulta:

$$a/A = p/\sigma_f$$

que es la fracción de área en contacto real en relación al área total de contacto aparente.

No obstante, debemos recordar que alrededor de cada zona deformada plásticamente, existirá también una zona en compresión elástica. Puede demostrarse experimentalmente que para tensiones aplicadas de hasta un 10 % de la tensión de fluencia, el valor de  $a/A$  es igual a  $2p/\sigma_f$ .

Hemos visto que asociada a una superficie metálica existe siempre una capa de óxido, de modo que el área de contacto calculada no representa área de contacto metálico, ya que éste se producirá solamente en aquellos puntos en que se destruya dicha capa de óxido.

Los óxidos metálicos a temperatura ambiente no son conductores de la electricidad, de modo que si se hace circular una corriente a través de una superficie de contacto, la misma presentará una alta resistencia a su pasaje excepto en aquellos puntos en que se halla establecido un verdadero contacto metálico.

En la figura 31 puede observarse la forma de las líneas de corriente al atravesar una interfase.

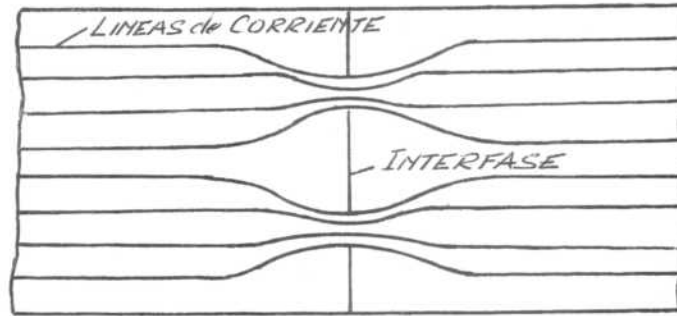


Fig. 31

#### 4.2. Magnitud de la resistencia de contacto

Para analizar matemáticamente el problema, idealizaremos la geometría de las líneas de corriente a través de una interfase en la forma que indica la figura 32. En la misma suponemos que los puntos de contacto metálico son pequeñas esferas de radio  $r$  ubicadas a una distancia de  $2B$  entre sí. El efecto de constricción está a su vez representado por las esferas de radio  $B$ .

La resistencia de un material conductor de resistividad  $\rho$  está expresada por:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

donde  $l$  es la longitud media del conductor y  $S$  la sección media del mismo. Analizando ahora uno de los hemisferios de los indicados en la figura 32, la longitud a considerar es evidentemente  $B-r$ , ya que suponemos que la resistencia de contacto metálico así como la del material fuera de la zona de constricción es despreciable. Por otra parte el área geométrica media correspondiente será:

$$\sqrt{2\pi B^2 - 2\pi r^2}$$

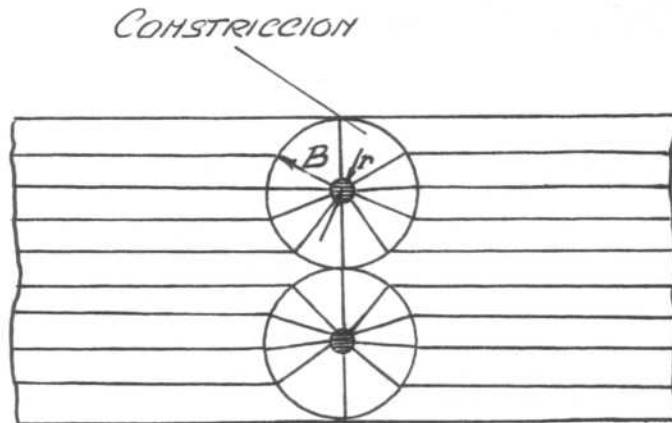


Fig. 32

de modo que nos queda:

$$R_h = \rho \frac{B-r}{2\pi Br}$$

además como es  $B \gg r$ , resulta:

$$R_h = \rho / 2\pi r$$

Como cada zona de constricción consiste en dos hemisferios en serie, si suponemos que hay  $n$  puntos de contacto metálico por unidad de área, la resistencia total de contacto será entonces:

$$R = 2R_h/n = \rho / \pi \cdot n \cdot r$$

Se ha podido comprobar experimentalmente que esta expresión introduce un error en exceso del 5 % por lo que se la corrige escribiendo:

$$R = 0,85 \rho / \pi \cdot n \cdot r$$

De acuerdo a lo visto precedentemente el área real de contacto metálico la podemos expresar como:

$$c \cdot p / \sigma_p = \pi \cdot r^2 \cdot n$$

de modo que

$$R = \frac{0,85 p \cdot R \cdot \sigma_p}{c \cdot p}$$

o bien eliminando r:

$$R = \frac{0,85 p \sqrt{\sigma_p}}{\sqrt{\pi \cdot n \cdot c \cdot p}}$$

Puede observarse que estas dos ecuaciones interpretan dos modos diferentes de variación de Resistencia de contacto con la presión. La primera supone que el diámetro  $r$  permanece constant y lo que aumenta es  $n$ , es decir el número de contactos metálicos, mientras que la segunda supone a  $n$  constante y que lo que aumenta con la presión es el valor  $r$ , es decir el tamaño del contacto.

Se ha comprobado que la primera ecuación se cumple para los metales pesados en el rango de 0,3 a  $0,7 \sigma_p$  así como para el caso de alambres cruzados. A presiones cercanas o mayores que  $\sigma_p$ , la segunda ecuación interpreta más correctamente el fenómeno. Para el aluminio ninguna de las dos ecuaciones es correcta, debido quizás al gran espesor de la capa de alúmina.

La figura 33 muestra algunas curvas obtenidas experimentalmente.

#### 4.3. Efecto de la temperatura sobre la resistencia de contacto

Las curvas representadas en la figura 33 fueron obtenidas empleando corrientes del orden de 10 Amperios. Ahora bien, las soldaduras por resistencia se efectúan con corrientes del orden de 100.000 Amperios, por lo que habrá un efecto térmico importante que modificará en forma sustancial los valores anteriores.

En el caso de una soldadura por resistencia, en los primeros instantes del proceso la elevación brusca de temperatura en la interfase tiende a aumentar la resistencia de contacto, pero como al mismo tiempo baja la tensión de fluencia del material, el área de contacto metálico aumenta disminuyendo rápidamente la resistencia total. Se ha podido comprobar que en un proceso de soldadura por resistencia, la misma baja en el primer milisegundo a aproximadamente 1/10 del

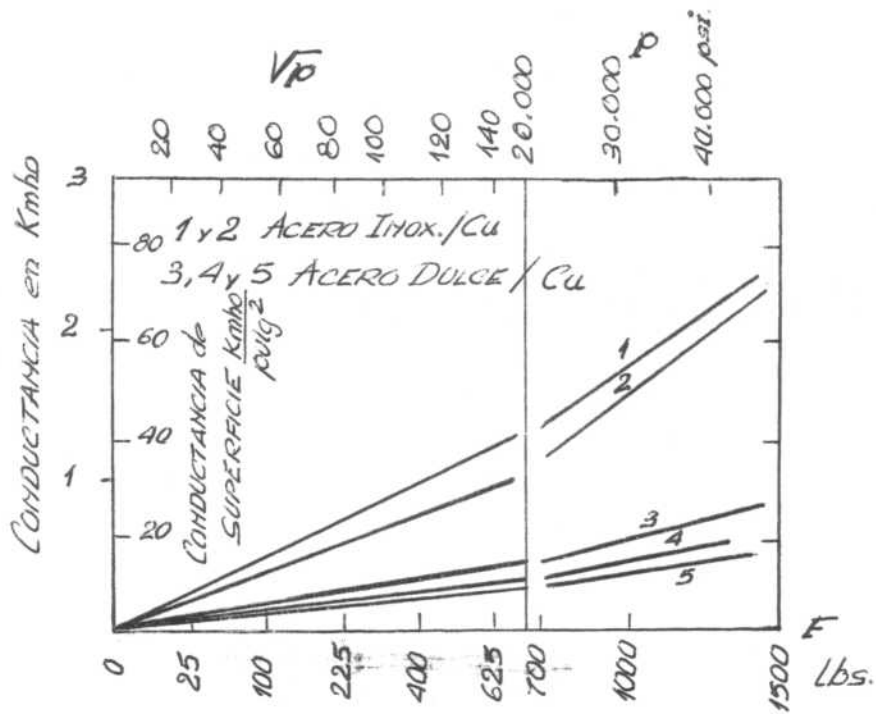


Fig. 33

valor correspondiente a temperatura ambiente. Consecuentemente aumenta la corriente y el efecto térmico de la misma, lográndose la casi instantánea fusión de la interfase.

#### 4.4. Soldadura de punto

Este método es ampliamente empleado para la unión de chapas. Como lo indica la figura 34, el mismo consiste en ubicar las piezas a soldar sobrepuestas entre dos electrodos de cobre refrigerados y hacer circular un pulso de corriente capaz de fundir una porción de la interfase.

En los procesos de soldadura por resistencia, tan importante como el ciclo de corriente, lo es el de presión. Es así como las máquinas modernas proveen en general ciclos de presión variables de modo de ajustarlos a las necesidades de cada caso. Un ciclo de corriente y presión típico en la soldadura de punto está indicado en la figura 35.

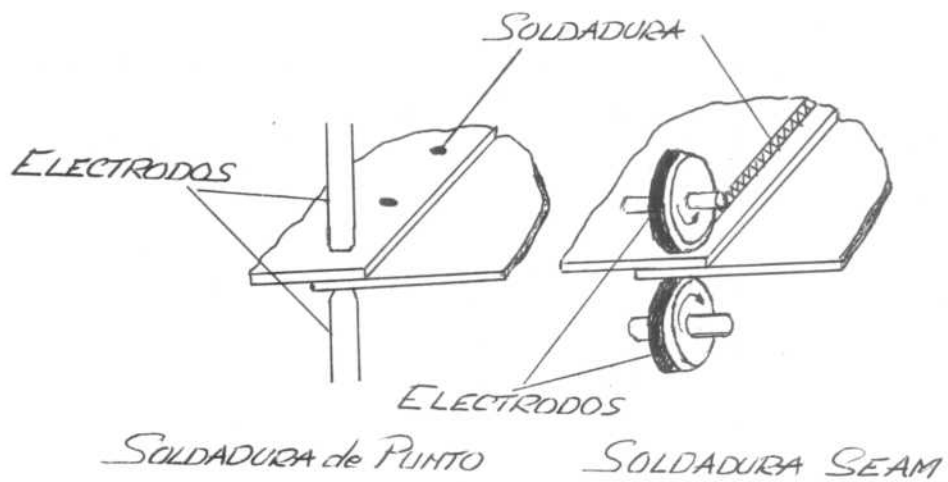


Fig. 34

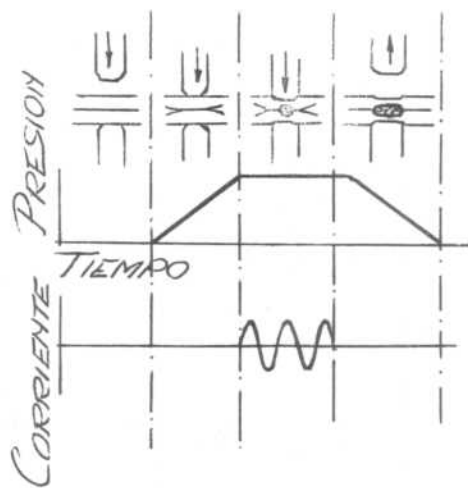


Fig. 35

#### 4.5. Soldadura "seam"

Este método es una variante del anterior, en el cual como electrodos se utilizan un par de ruedas o moletas que permiten efectuar mediante una serie de disparos de corriente, intermitentes, una secuencia de soldaduras superpuestas parcialmente, logrando así una unión continua y estanca.

Ciclos de presión y corriente típicos para este proceso se indican en la figura 36.

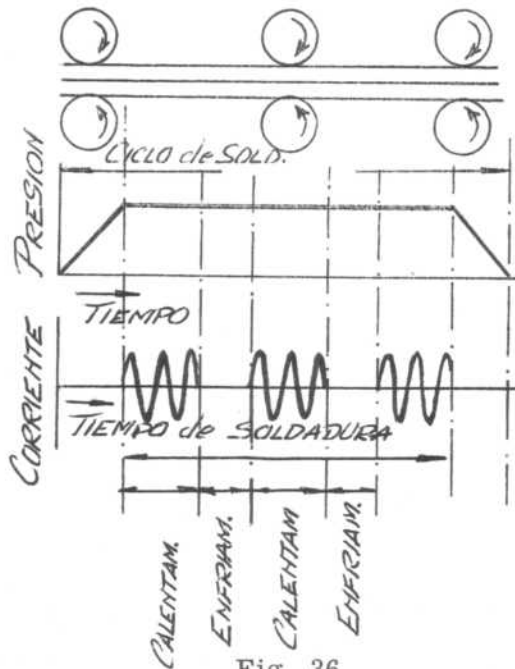


Fig. 36

#### 4.6. Soldadura por proyección

En este método se efectúa una proyección sobre la superficie de una de las partes a soldar, tal como lo indica la figura 37. La misma tiene por objeto restringir el flujo de corriente a la zona determinada por la proyección, lo que en general hace al proceso más controlable, en especial en lo que se refiere a la geometría resultante de la soldadura. Tiene además la ventaja de permitir electrodos de gran sección y por lo tanto más durables. Esto a su vez se traduce en una menor indentación sobre las piezas soldadas.

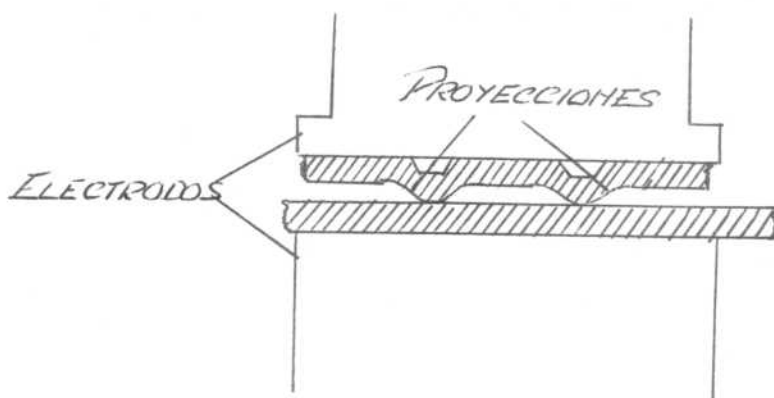


Fig. 37

#### 4.7. Control de fuerza y corriente

La eficiencia de una soldadura por resistencia depende en gran parte del control que se efectúe sobre los parámetros del proceso. En la soldadura de punto o la "seam" del acero por ejemplo, hay que aplicar presiones del orden de 1000 Kg/cm<sup>2</sup>, con una regulación de aproximadamente un 10 %. Además el equipo debe ser capaz de efectuar un seguimiento de la expansión y contracción del material que se produce en el breve lapso de una soldadura, sin que varíe la presión aplicada. Esta capacidad de seguimiento es particularmente importante en soldaduras por proyección para mantener la presión durante el colapso de la misma.

En las máquinas modernas la fuerza es aplicada por medio de un pistón comandado neumáticamente, lo que permite altas velocidades de respuesta. Actualmente se han desarrollado dispositivos en los que se reemplaza el pistón por un diafragma con la consiguiente disminución de la inercia del sistema y elevación de la velocidad de respuesta.

Para el control de corriente se recurre en los equipos actuales al empleo del ignitrón. La disposición de los mismos en un circuito monofásico está indicada en la figura 38. El control del ángulo de disparo de los ignitrones es comandado

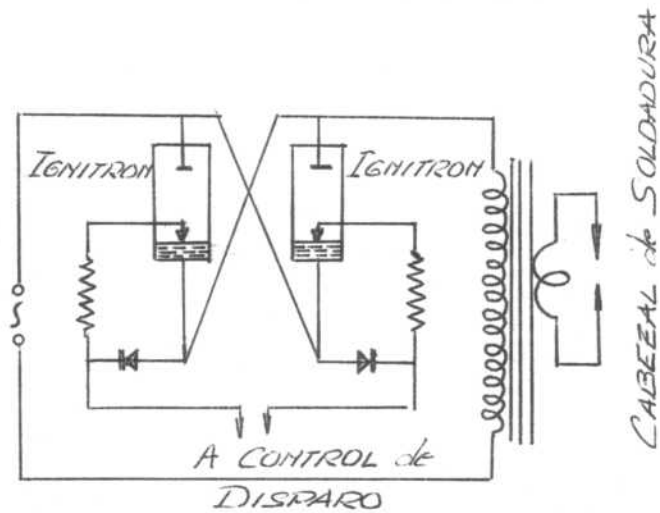


Fig. 38

por tiratrones o, más modernamente, por tiristores que son a su vez comandados por un timer electrónico. Mediante este sistema es posible efectuar el control de los pulsos de corriente en lapsos tan breves como fracciones de ciclo.

#### 4.8. Flujo térmico

En todo proceso de soldadura por resistencia la cantidad de calor generada por la corriente está dada por la expresión:

$$Q = \int_0^{\tau} i^2(t) R(t) dt$$

De esta cantidad, sólo una parte es empleada para efectuar la soldadura y el resto se pierde por conducción en la pieza y los electrodos. Resulta evidente que para una dada cantidad de calor generado, cuanto más lento sea el proceso de generación, mayor será la fracción de pérdidas. Esto da origen al concepto de eficiencia como la relación entre el volumen de metal realmente fundido y el que la misma cantidad de calor podría fundir de no haber pérdidas.

La figura 39 muestra cómo varía la eficiencia con el tiempo de soldadura.

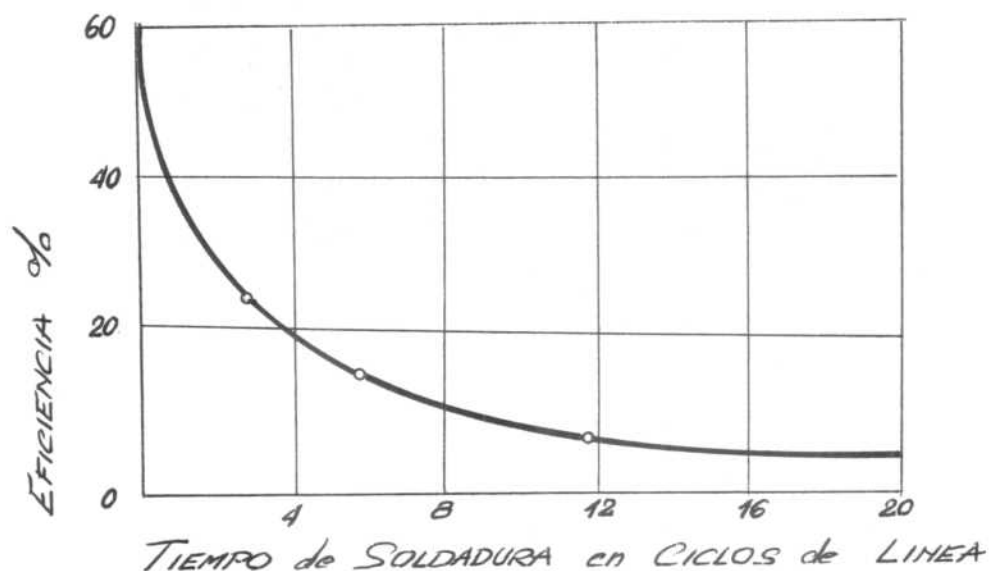


Fig. 39

El análisis térmico para la obtención de esta curva se efectúa a partir de la ecuación:

$$\theta = \frac{Q}{8k\delta(\pi\alpha t)^{3/2}} e^{-r^2/4\alpha t}$$

que da la distribución de temperaturas en un cuerpo infinito alrededor de un punto donde se han generado  $Q$  calorías en forma instantánea. Mediante dicha expresión es posible calcular el radio de la zona de fusión de la siguiente manera: interesa conocer las máximas temperaturas alcanzadas a distintas distancias del origen y en particular aquella para la cual la máxima temperatura alcanzada es la de fusión del material. De modo que:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_r = \frac{Q}{8k\delta(\pi\alpha t)^{3/2}} e^{-r^2/4\alpha t} \left(\frac{r^2}{4\alpha t^2} - \frac{3}{2t}\right) = 0$$

Para un tiempo finito y un radio distinto de cero, la relación anterior se cum-

ple si:

$$\theta = \theta_{m\acute{a}x} \text{ y } \frac{r^2}{4\alpha t} - \frac{3}{2t} = 0 \therefore t = \frac{r^2}{6\alpha}$$

de modo que:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{8k\pi e r^3} \left(\frac{\pi e}{6}\right)^{-3/2}$$

Haciendo ahora:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \theta_m$$

conociendo  $Q$  obtenemos  $r_m$ , el radio de la zona fundida. Por ejemplo, para el acero, donde  $\theta_m = 1,500^\circ\text{C}$  y suponiendo  $Q = 300$  calorías se obtiene un valor de  $r_m = 0,25$  cm.

#### 4.9. Defectos

Los defectos más comúnmente encontrados en soldadura por resistencia están indicados en la figura 40.

En general no puede eliminarse totalmente la indentación de la superficie, pero es deseable limitarla a no más del 10 % del espesor de las piezas.

En cuanto a la expulsión de la interfase, está asociada a un exceso de potencia y a un deficiente ciclo de fuerza.

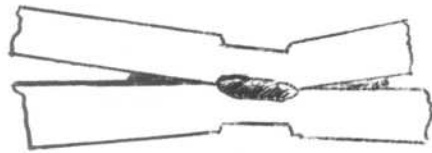
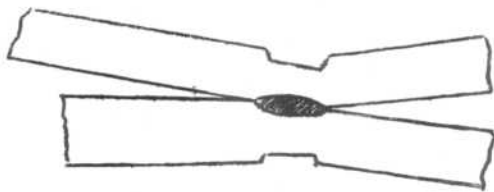
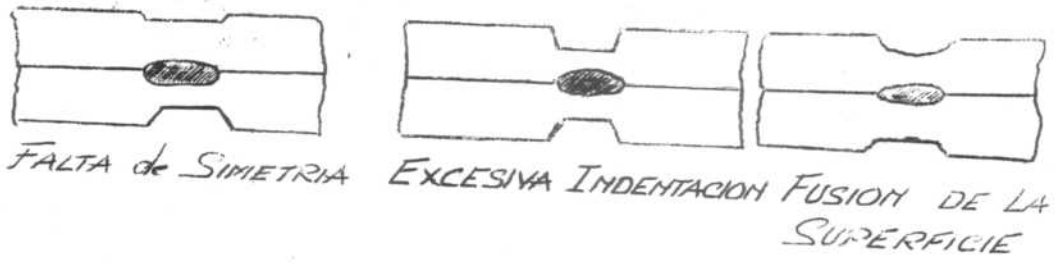


Fig. 40

## 5. SOLDADURA EN FASE SOLIDA

### 5.1. Fundamentos

Ya hemos analizado anteriormente los fenómenos que se presentan cuando dos superficies metálicas son puestas en contacto bajo cierta presión. El hecho más importante a tener en cuenta lo constituye la fragmentación de las capas de óxido y humedad y el establecimiento de pequeños contactos metálicos que constituyen verdaderas soldaduras. Esto da origen a los procesos de soldadura en fase sólida.

Es evidente que la eficacia del método será mayor si de alguna manera se incrementa la fracción de área que establece contacto metálico, ya que las uniones que se logran sólo por aplicación de presión, son difíciles de realizar y de comportamiento errático. Las técnicas empleadas actualmente para lograr aquel objetivo son dos. La primera consiste en el desplazamiento lateral relativo de las superficies en contacto, de modo que las asperezas de las mismas produzcan un efecto de "barrido" y destruyan las capas de óxido y humedad que se oponen al contacto metálico. El otro método se basa en el hecho que si una superficie es obligada a fluir lateralmente, las capas frágiles adheridas a aquella se fragmentarán, presentándose en su lugar superficies metálicas limpias.

El primero de los recursos es el empleado en soldadura por ultrasonido y por fricción, mientras que al segundo se recurre en la soldadura por presión y en la soldadura por explosión.

### 5.2. Efecto de la temperatura

Dos son los efectos de la temperatura sobre los procesos de unión en fase sólida. Por una parte elimina la humedad, aceite, etc., que pueda haber adheridos a la superficie en cuestión.

En segundo término, la temperatura hace bajar la tensión de fluencia, de modo que si recordamos que la fracción de área en contacto metálico puede expresarse como  $c. p/\sigma_f$ , al disminuir  $\sigma_f$  aumentará aquel valor, lo que favorece la soldadura.

### 5.3. Soldadura por presión

Dentro de esta denominación podemos encuadrar los procesos conocidos como soldadura a tope, forja y "flash welding".

Todos ellos son efectuados a temperaturas elevadas y la forma de entregar

calor a las piezas es lo que en realidad caracteriza el proceso. De esta manera, en la soldadura a tope se logra el calentamiento de la interfase haciendo circular una corriente eléctrica y luego las piezas son forzadas entre sí. Este método difiere de la soldadura por resistencia convencional en que no involucra la fusión de la interfase. Es usado habitualmente en la industria para unir barras o alambres a tope, así como en la fabricación de tubos.

La soldadura por forja emplea como fuente de calor una fragua o un horno donde se colocan las piezas a soldar. Una vez que las mismas alcanzan la temperatura de forja, que para los aceros es de  $1200^{\circ}\text{C}$  a  $1400^{\circ}\text{C}$ , aquellas son retiradas del horno y expolvoreadas con algún fundente, que para los aceros de alto carbono puede ser borax, o bien arena ( $\text{SiO}_2$ ) para los de medio carbono. (Los aceros de bajo carbono no requieren fundente). Luego se efectúa la forja propiamente dicha por medio de martillo o martinete.

En "flash welding", en cambio, el calentamiento se logra haciendo circular corriente por la interfase que se forma poniendo las piezas en contacto bajo muy baja presión. De esta manera la corriente pasa sólo por algunos puntos aislados, lo que conduce a la rápida fusión de los mismos. Esto produce una violenta expulsión del material que se conoce como "flashing". En estas condiciones las piezas son forzadas violentamente entre sí, lo que produce la completa estrusión del metal fundido que arrastra consigo las capas de óxido. De esta manera se logra una soldadura en fase sólida, ya que el metal fundido es expulsado de la interfase antes de completarse el proceso y sólo se lo emplea como vehículo en la limpieza de la superficie.

Por último podemos mencionar la soldadura por presión en frío. Este es el proceso de unión en fase sólida más ampliamente usado, especialmente en chapa delgada de aluminio. Para ello se emplean matrices de indentación que producen deformaciones del orden de 50-95 %. Cuando la soldadura se efectúa adecuadamente, se logran altos valores de resistencia mecánica. No obstante, las altas deformaciones involucradas se traducen en uniones poco dúctiles.

#### 5.4. Soldadura por ultrasonido

El dispositivo empleado para efectuar soldaduras por ultrasonido está representado en la figura 41. El mismo se basa en el empleo de un transductor magnetostrictivo que transmite una vibración mecánica de frecuencia ultrasónica a las piezas a soldar. El sentido de la oscilación es lateral de modo que con una adecuada combinación de presión normal se logra una soldadura de punto con muy baja deformación (del orden de 5 %). Debido a la fricción puesta en juego, la interfase se calienta localmente sin llegar a fusión. La unión resulta en general tan resistente como el metal base y se han efectuado soldaduras mediante este método en metales ferrosos, aluminio, cobre, níquel, titanio y circonio, siendo sólo aplicable a chapa de bajos espesores.

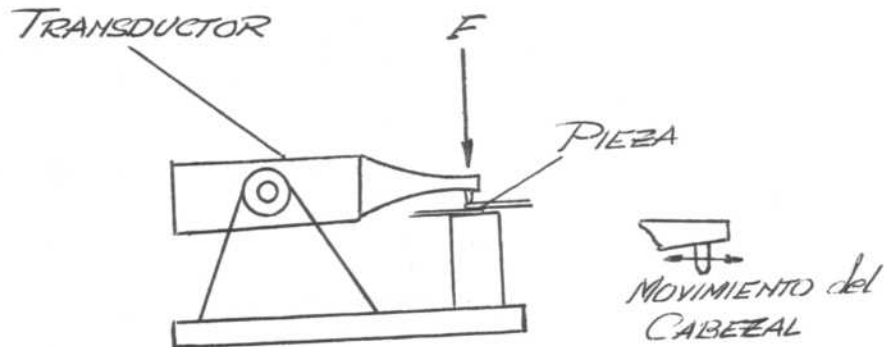


Fig. 41

### 5.5. Soldadura por fricción

El proceso de soldadura por fricción es en principio el más simple de todos. Consiste en hacer girar las piezas una sobre la otra con las superficies en contacto, de manera que se genere calor por rozamiento. Luego se aplica una fuerza que completa la soldadura al tiempo que un freno detiene el movimiento de las piezas.

Las superficies no llegan a fundir ya que si se produjera durante el proceso una fusión incipiente se reduciría el esfuerzo de fricción y en consecuencia la generación del calor, lo que hace al proceso auto-regulable. Una limitación evidente de este método es que las partes deben poseer simetría radial, por lo que su aplicación más frecuente es la unión de barras donde ha sido usado para unir metales ferrosos y no ferrosos, incluso combinaciones tales como acero al carbono con aluminio.

### 5.6. Soldadura por explosión

Este método está aún en etapa de desarrollo. El dispositivo empleado para hacer los ensayos es el que se muestra en la figura 42. En el mismo las placas

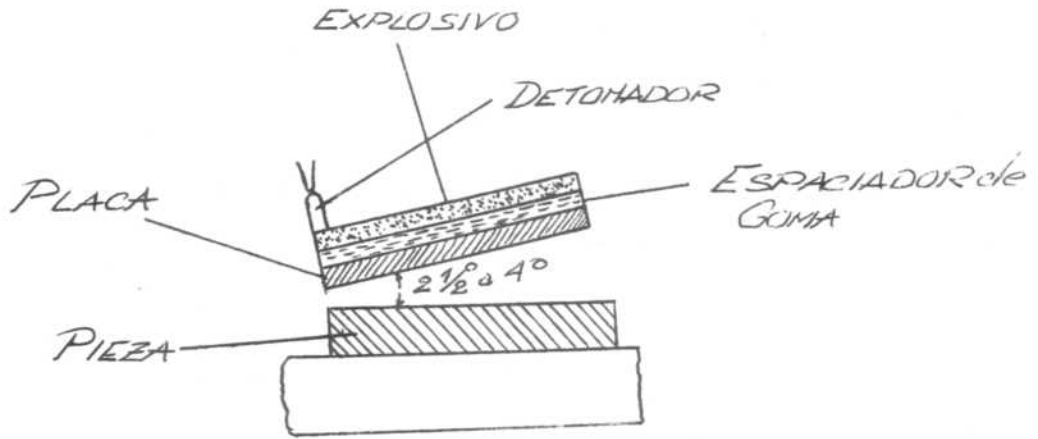


Fig. 42

están separadas angularmente en la forma indicada para evitar el contacto simultáneo de toda la superficie, efectuándose además la detonación en el borde para el cual la separación de las piezas es menor. El espaciador de goma tiene por objeto evitar el daño a la pieza que es impulsada por el explosivo. Este método es de particular interés para efectuar plaquedo de aceros al carbono o de baja aleación con otros de distintas características. Las uniones obtenidas presentan alta resistencia mecánica debido a las deformaciones introducidas habiéndose logrado también uniones exitosas en aluminio, cobre y aleaciones de titanio.

## 6. METALURGIA DE LA SOLDADURA POR FUSION

### 6.1. Aceros al carbono

Este es indudablemente el material más ampliamente utilizado en construcciones soldadas. Cuando el contenido de carbono de estos aceros está limitado a 0,30 % (aceros de bajo carbono), tienen la ventaja que para espesores de hasta una pulgada pueden ser soldados sin calentamiento previo ni tratamiento térmico posterior. Para espesores mayores o contenidos de carbono más elevados, la práctica usual es el empleo de electrodos de bajo hidrógeno y/o calentamiento previo de las partes para minimizar la tendencia a la fragilización que presentan estos materiales.

En general, los procesos de soldadura por fusión involucran elevados regímenes de calentamiento y de enfriamiento. (La excepción a esto la constituyen los procesos de electroslag y oxi-gas). Consecuentemente, las microestructuras resultantes de aquellos procesos no corresponden a las de equilibrio. Sin embargo, es útil comenzar el análisis de estos temas, considerando el diagrama de equilibrio hierro-carbono que se indica en la figura 43.

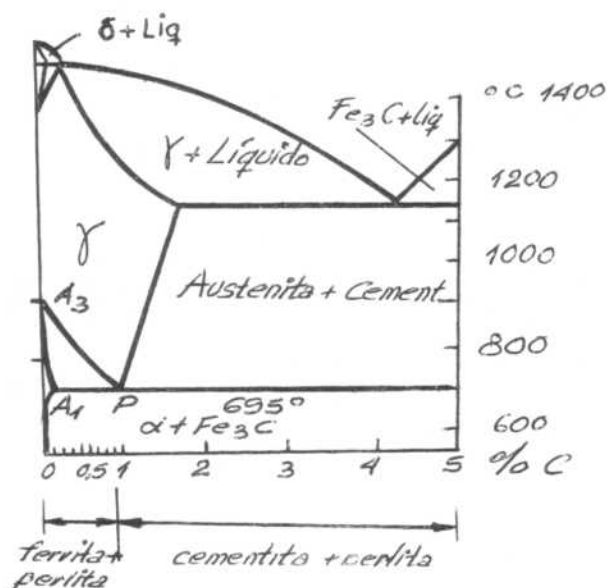


Fig. 43

Las transformaciones más importantes a considerarse, que pueden afectar las propiedades mecánicas son las siguientes: La transición de fase gama o austenita (cúbica de caras centradas) a ferrita alfa (cúbica de cuerpo centrado), que en el hierro puro ocurre a aproximadamente 900°C (punto A<sub>3</sub> de la figura). La segunda consiste en la precipitación de carburos cuya solubilidad decrece con la temperatura.

Considerando sólo aceros de bajo carbono, por encima de la línea A<sub>3</sub>P los mismos son austeníticos. Al enfriarse lentamente, comienza la transformación en el instante en que la temperatura cruza la línea mencionada en el punto correspondiente al contenido de carbono del acero que se trate. Esta transformación consiste en la precipitación de ferrita con pequeñas cantidades de carbono en solución, quedando granos de austenita que se van enriqueciendo paulatinamente en carbono a medida que desciende la temperatura. A 695°C, la austenita residual, que ahora posee un contenido de 0,85 % de carbono, se transforma en perlita que es una estructura laminar compuesta por ferrita y cementita, (Fe<sub>3</sub>C). De esta manera la estructura final estará formada por una mezcla de granos de ferrita y perlita.

Aumentando la velocidad de enfriamiento las temperaturas a las que se produce la transformación gama-alfa disminuyen. Ahora bien, a medida que las temperaturas de transformación bajan, la distancia que los átomos de carbono pueden recorrer por difusión disminuyen, ya que éste es un proceso activado térmicamente, de modo que se manifiesta una tendencia a la formación de estructuras metaestables que involucren una menor migración de átomos de carbono. Mientras que con enfriamientos lentos, el carbono puede distribuirse uniformemente en los granos de austenita, con enfriamientos rápidos los carburos precipitan alrededor o dentro de la ferrita que ahora se presenta en forma de agujas o placas más bien que como granos equiaxiales, lo que constituye la estructura denominada bainita. (Fig. 44).

A velocidades de enfriamiento aún mayores, se presenta un nuevo tipo de transformación conocida como martensítica que tiene la característica de no involucrar difusión de carbono sino solamente una distorsión en el retículo cristalino. En términos generales puede decirse que las estructuras resultantes de estas transformaciones son tanto más duras y frágiles cuanto más elevadas sean las velocidades de enfriamiento y más altos los contenidos de carbono.

## 6.2. Curvas TTT

Cuando las velocidades de enfriamiento no son muy lentas, el diagrama de equilibrio no interpreta las transformaciones que se producen. Para ello es necesario recurrir a lo que se conoce como curvas TTT (Temperatura, tiempo, transformación). Las mismas permiten estimar el tiempo requerido y los productos de transformación a una dada temperatura. Si bien estas curvas están confeccionadas

para transformaciones isotérmicas pueden emplearse con bastante aproximación para enfriamientos continuos. Una de estas curvas está representada en la figura 45

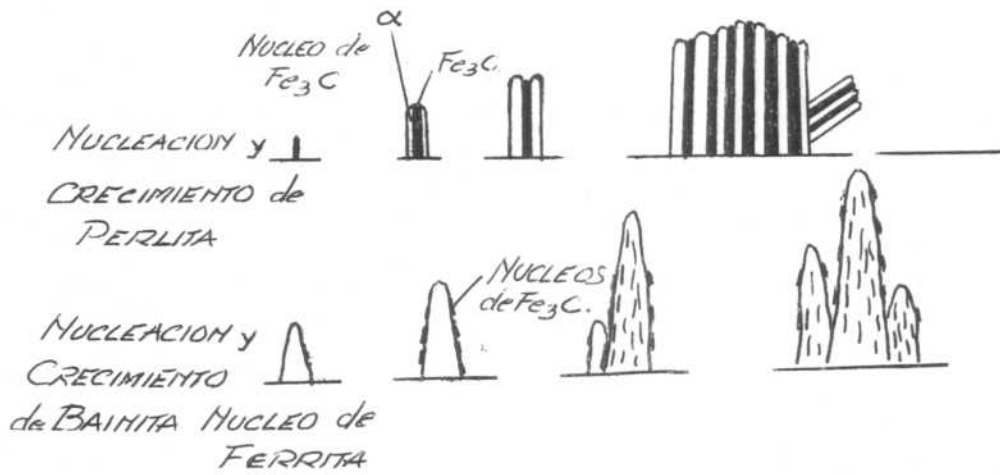


Fig. 44

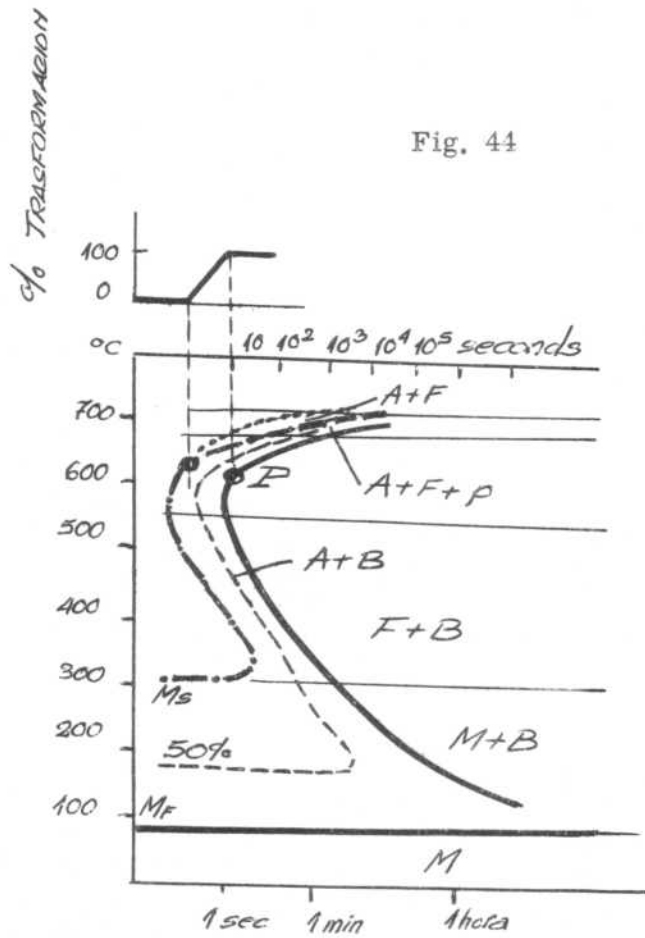


Fig. 45

para un acero con 0,6 % de carbono. En la misma pueden observarse las líneas que indican el comienzo, la mitad y el fin de la transformación, así como las estructuras resultantes.

### 6.3. Microestructuras

Para analizar las microestructuras resultantes de los procesos de soldadura por fusión es conveniente considerar separadamente la zona de fusión y la zona afectada por el calor. La primera se caracteriza en general por poseer una estructura homogénea que en los aceros de bajo contenido de carbono consiste fundamentalmente en granos pequeños de ferrita y carburos precipitados.

Cuando los contenidos de carbono son mayores, las microestructuras resultantes pueden incluir distintas proporciones de fases frágiles, por lo que se hace necesario el precalentamiento de las piezas para disminuir los regímenes de enfriamiento.

Más importante que la zona de fusión es la consideración de la zona afectada por el calor, ya que ella es asiento de transformaciones metalúrgicas que pueden comprometer seriamente el comportamiento mecánico de la soldadura.

En la zona inmediatamente adyacente a la de fusión, el metal base es llevado a temperaturas bien por encima de las correspondientes a la línea  $A_{3P}$  del diagrama. Por lo tanto, en esa zona el material transforma totalmente a austenita con un crecimiento de grano que depende de las condiciones de enfriamiento.

En una zona más alejada de la de fusión, la temperatura alcanza apenas a superar las de la línea  $A_{3P}$ , de modo que si bien habrá formación de granos de austenita, no habrá crecimiento de los mismos. Cuando la pieza se enfríe, quedará una estructura equiaxial de ferrita con carburos precipitados que es más refinada a medida que se aleja de la zona de fusión.

En una zona aún más alejada, el pico de temperatura alcanzado es sólo suficiente para superar la línea  $A_{1P}$  del diagrama, de manera que sólo parte de la estructura se transforma en austenita. Esta transformación comienza en el centro de los granos de ferrita donde se generan granos de austenita con un contenido de carbono cercano a 0,8 %. Al enfriarse dicha austenita, se transforma en martensita con carburos parcialmente disueltos.

### 6.4. Propiedades mecánicas

Del análisis precedente podemos inferir las propiedades mecánicas resultantes en las soldaduras de aceros al carbono. En lo que se refiere al cordón pro-

piamente dicho, la resistencia a la tracción es en general superior a la del metal base si este se encuentra en estado recocido, mientras que la ductilidad y resistencia a la fatiga no varían mucho con respecto a aquél. Sobre estos últimos aspectos, en particular lo que se refiere a fatiga, tiene gran influencia el perfil del cordón, siendo el más favorable aquél en que la sobremonta es eliminada totalmente.

Un aspecto importante a tener en cuenta es lo que se denomina fragilidad en caliente. Esta es una forma de agrietamiento que se produce a temperaturas elevadas como consecuencia de la presencia en los aceros de azufre y fósforo. La forma de eliminar este problema es limitar el contenido de esos elementos a valores muy bajos y agregar manganeso que contrarresta la acción perniciosa de aquellos.

Con respecto a la zona afectada por el calor, el contenido de estructuras frágiles, especialmente martensita, depende del régimen de enfriamiento y del contenido de elementos de aleación del acero. Por ejemplo, en aceros con contenidos de carbono inferiores a 0,35 % puede considerarse nula la formación de fases frágiles, pero un acero con sólo 0,15 % de carbono pero con contenidos de manganeso superiores a 1,5 % presenta un contenido importante de dichas fases para regímenes de enfriamiento normales de soldadura.

### 6.5. Aceros de baja aleación

Consideraremos como aceros de baja aleación aquellos que poseen un contenido total de elementos aleantes no superior al 20 %. La soldabilidad de estos aceros está sin duda determinada por la sensibilidad a la fisuración en frío o en caliente y está vinculada al contenido y tipo de aleantes del material.

La fisuración que se produce a temperaturas elevadas está vinculada al fenómeno de fragilidad en caliente antes mencionado. La fisuración en frío, en cambio, puede producirse en un período que va desde unos segundos luego de completada la solidificación hasta varios días más tarde. Los factores que determinan la aparición de fisuras en estas condiciones son: el contenido de hidrógeno del metal, las tensiones residuales y las características de transformación del material, es decir su curva TTT, que a su vez, queda determinada por la composición del mismo.

Las formas típicas que adoptan las fisuras que sobrevienen en frío se indican en la figura 46.

La fragilidad provocada por el hidrógeno se presenta en el rango de temperaturas  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ , tal como lo indica la figura 47.

La forma de evitar este problema consiste en el empleo de electrodos de

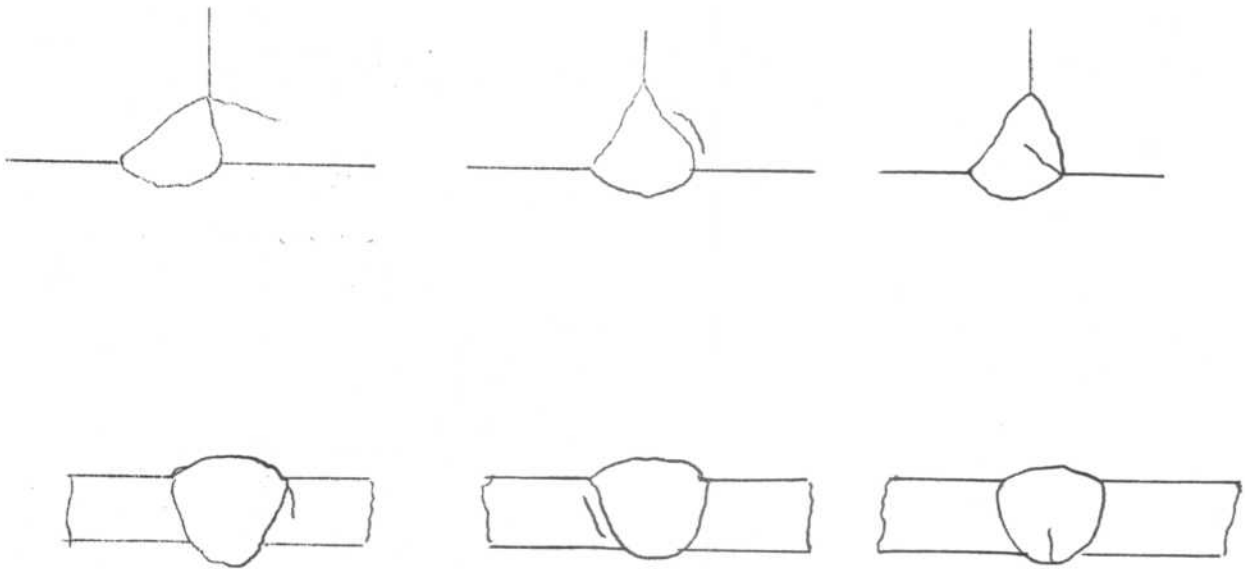


Fig. 46

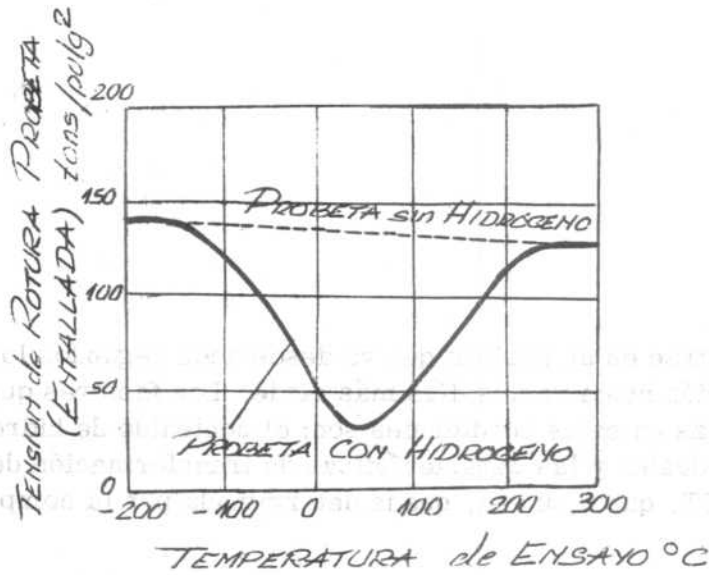


Fig. 47

bajo hidrógeno y/o aleados con elementos estabilizadores de la fase gama, ya que la difusividad del hidrógeno en ella es mucho menor que en la ferrita. Por ejemplo, una composición de electrodo que se ha mostrado particularmente útil en este aspecto es: 18 % Cr-10 % Ni y 3 % Mo.

Otro recurso habitualmente empleado para reducir la tendencia a fisuración en general es el precalentamiento para disminuir las velocidades de enfriamiento y/o un tratamiento térmico posterior de relevamiento de tensiones.

## 6.6. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son ampliamente usados en la fabricación de recipientes de presión, tuberías y dispositivos en los cuales es necesario una elevada resistencia a los agentes corrosivos. La aptitud de los aceros inoxidables para resistir la corrosión y oxidación es atribuible al contenido de cromo de los mismos. Cuando la cantidad de dicho elemento en un acero supera el 12 % puede observarse un mejoramiento substancial del comportamiento frente a la acción de medios oxidantes corrosivos.

Los aceros inoxidables pueden ser divididos en tres categorías:

**Aceros inoxidables martensíticos.** Poseen un contenido de cromo hasta 16 %. El carbono en estos aceros puede estar entre 0,35 y 0,60 %. El cromo es lo que les otorga la templabilidad que hace que puedan transformar martensíticamente aún cuando se enfrían en aire. Su uso principal es cuchillería y herramientas de corte.

**Aceros inoxidables ferríticos.** El contenido de cromo es en este caso de 16 % o más, mientras que el carbono se mantiene bajo (0,12-0,20 %). Prácticamente pueden considerarse como una aleación binaria de hierro y cromo, por lo que de acuerdo al diagrama de equilibrio indicado en la figura 48, la fase estable es ferrita hasta las temperaturas de fusión. Su uso principal es en dispositivos sujetos a medios corrosivos sulfurosos.

**Aceros inoxidables austeníticos.** Estos aceros se caracterizan por poseer níquel además de cromo en su composición. El más difundido es el llamado 18-8 (18 % Cr-8 % Ni). El níquel tiene la propiedad de estabilizar la fase gama, por lo que estos aceros son austeníticos incluso a temperatura ambiente.

El alto contenido de cromo de estos aceros presenta problemas en la soldadura por fusión. Al ser el cromo un elemento de gran afinidad con el oxígeno, es necesario eliminar a este del área de soldadura, por lo que los procesos óptimos para la soldadura de estos aceros son los que se efectúan bajo gas inerte.

Cuando se trata de soldar aceros martensíticos se presenta el problema de que no es posible evitar esta transformación. No obstante, puede recurrirse a un

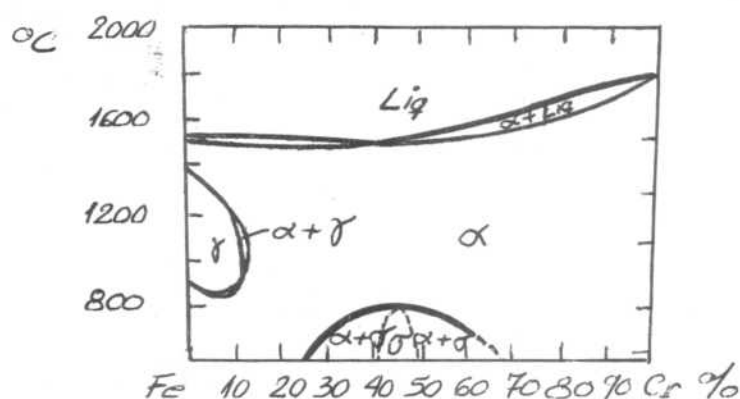


Fig. 48

precalentamiento entre 600 y 800 $^{\circ}\text{C}$  para disminuir la tendencia a la formación de fisuras. También es habitual efectuar un revenido entre 700 y 800 $^{\circ}\text{C}$ , inmediatamente de completada la soldadura. Cuando no se emplea alguno de los métodos con protección gaseosa, el uso de electrodos de bajo hidrógeno es indispensable.

La soldadura de los aceros ferríticos presenta un problema de distinta naturaleza. Este se origina en el hecho de que al no haber transformación de fase no existe refinamiento de grano por lo que tanto el cordón como la zona afectada por el calor resulta con una estructura gruesa que disminuye la ductilidad.

Los aceros ferríticos pueden soldarse con electrodos de la misma composición del metal base, pero para mejorar las propiedades mecánicas de la unión suelen emplearse electrodos austeníticos tales como 25-12 o 25-20.

Hasta ahora nada hemos mencionado respecto de la fase  $\sigma$  que aparece en el diagrama de equilibrio. Esta es una fase frágil que se presenta cuando estos aceros son mantenidos entre 450 y 850 $^{\circ}\text{C}$  o enfriados muy lentamente dentro de ese rango de temperaturas. En general las velocidades de enfriamiento habituales en soldadura impiden la formación de la fase  $\sigma$  por lo que la misma no representa un problema en servicios a bajas temperaturas, pero sí cuando la pieza cumple sus funciones dentro del rango mencionado. La fase  $\sigma$  puede redisolverse con un tratamiento entre 1050 y 1100 $^{\circ}\text{C}$  seguido de un enfriamiento rápido.

Un problema ulterior que se presenta en la soldadura de los aceros austeníticos es la precipitación de carburos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ). Estos constituyen un compuesto muy estable que se forma en los bordes de grano austeníticos en condiciones de enfriamiento lento alrededor de  $650^\circ\text{C}$ . Como consecuencia, los bordes de grano se empobrecen en cromo y el acero queda expuesto a corrosión intergranular. Una forma de evitar este problema es disminuir en lo posible el contenido de carbono de los aceros (menos de 0,03 %), los que se conocen como aceros ELC (extra low carbon). Otra manera de eliminar el problema la constituye el agregado de elementos tales como niobio o titanio que forman carburos con más facilidad que el cromo, dando origen a lo que se conoce como aceros estabilizados. Por último, queda aún un recurso para eliminar los carburos y consiste en redissolverlos en la matriz austenítica a  $1000-1100^\circ\text{C}$  y enfriando rápidamente para retenerlos.

#### 6.7. Diagrama de Schaeffler

La estructura resultante en los procesos de soldadura por fusión de los aceros inoxidables, varía con la composición y el régimen de enfriamiento. Para soldadura manual la velocidad de enfriamiento puede considerarse la misma en todos los casos por lo que sólo queda la composición como factor determinante. Los diversos elementos de aleación empleados pueden clasificarse en gamágenos o alfégenos según que estabilicen la austenita o la ferrita respectivamente. De esta manera la estructura final tendrá diversas proporciones de una u otra fase según el tipo de aleantes que entren en su composición. Así por ejemplo, Cr, Mo, Si, Nb y Al son elementos que favorecen la formación de ferrita, mientras que el Ni, C, N y Mn favorecen la formación de ferrita. El efecto combinado de todos estos elementos queda interpretado por el diagrama de Schaeffler indicado en la figura 49. Las expresiones en abscisas y ordenadas son lo que se conoce como Cr equivalente y Ni equivalente respectivamente. Mediante este diagrama es posible predecir la estructura metalúrgica resultante de una soldadura conociendo la composición del metal base, del aporte y la dilución que provoca el proceso. Para ello es necesario ubicar los puntos correspondientes al metal base y al aporte y unirlos mediante un segmento de recta que, dividido proporcionalmente a la dilución, determina el punto correspondiente a la composición del cordón.

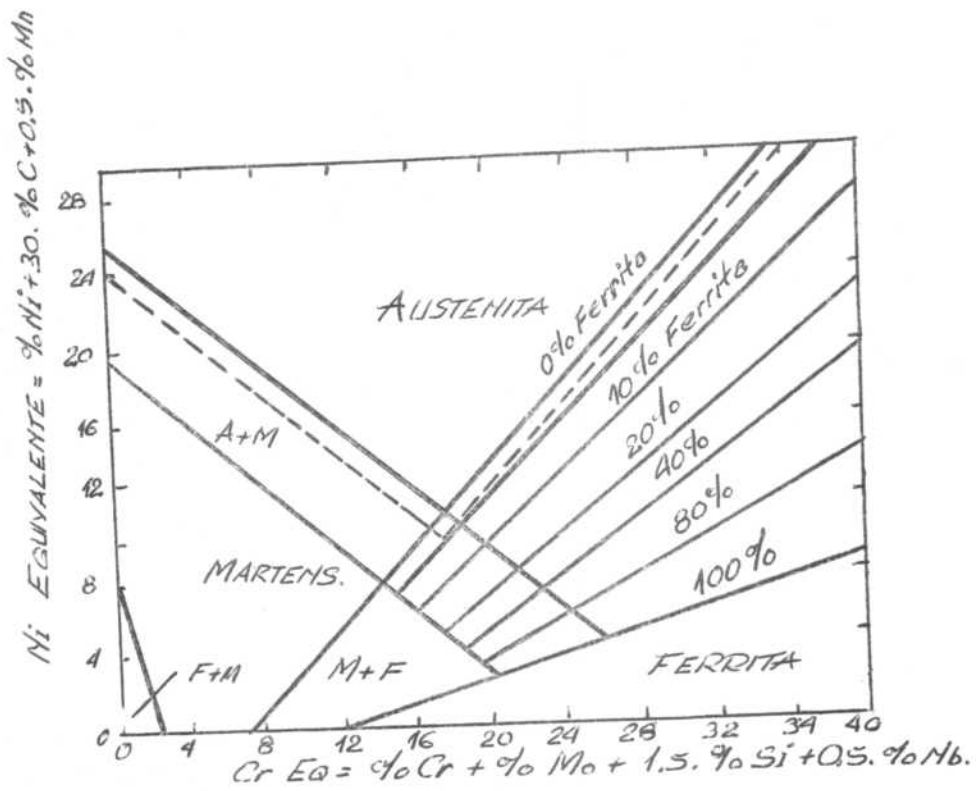


Fig. 49

## BIBLIOGRAFIA

Welding for engineers - UDIN-FUNK-WULF - John Wiley.

Introduction to welding and brazing - MILNER-APPS- The Commonwealth library.

Welding, brazing and soldering - LANCASTER - Institution of Metallurgists.

Metallurgie de la soudure - SEFERIAN - Dunod.