

## 5. SALDATURA

La saldatura è il procedimento con cui si realizza l'unione di pezzi metallici in modo tale da ottenere la continuità fisica delle parti da unire; i lembi dei pezzi da saldare vengono riscaldati a temperature superiori a quella di fusione e, solidificando, danno origine a un giunto saldato. Il riscaldamento può essere realizzato con mezzi

diversi. Insieme al materiale dei pezzi da unire (metallo base) può essere fuso anche materiale di composizione analoga, che prende il nome di metallo d'apporto. I giunti saldati sono di impiego molto comune per le loro caratteristiche di robustezza, economia, leggerezza, ermeticità.

### 5.1 ELEMENTI FONDAMENTALI DI UN GIUNTO SALDATO

- Giunto saldato: comunemente detto "saldatura", indica la zona di collegamento dei due pezzi. È originato dal processo di fusione-solidificazione dei lembi contigui dei pezzi e, se utilizzato, del metallo d'apporto.
- Metallo base (Mb): è il materiale di cui sono costituiti i pezzi da saldare.
- Metallo d'apporto (Ma): è il metallo che, fuso insieme al metallo base, concorre alla formazione del giunto.
- Cordone di saldatura (C): è costituito dal metallo base e da quello d'apporto (se presente), solidificati per raffreddamento dopo la fusione.
- Lembi (L): sono le superfici estreme dei pezzi interessate dalla saldatura.
- Energia termica (Et): è il calore necessario per la fusione del metallo base e di quello d'apporto. La fonte di calore

può essere di natura diversa (fiamma ossiacetilenica, arco elettrico, luce laser, ecc.) a seconda del tipo di saldatura e dei materiali da saldare.

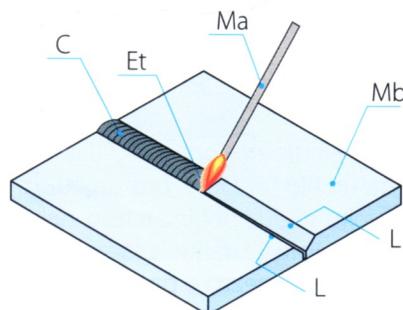


Figura 91  
Elementi fondamentali di un giunto saldato.

## 5.2 TIPI DI SALDATURA

Le saldature possono essere eseguite secondo tre procedimenti fondamentali:

- portando a fusione il metallo base senza utilizzare alcun metallo d'apporto;
- portando a fusione sia il metallo base sia il metallo d'apporto (uguale o diverso dal metallo base);
- portando a fusione il solo metallo d'apporto, che si interpone tra i pezzi da unire e, solidificando, li congiunge stabilmente.

Quest'ultimo procedimento prende il nome di brasatura e, diversamente dai primi due, non realizza la continuità fisi-

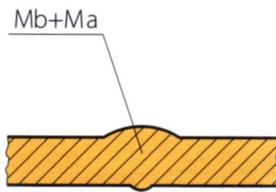


Figura 92  
Saldatura.

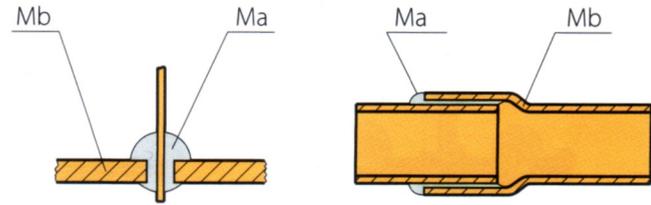


Figura 93  
Brasatura.

ca tra le parti da unire (fig. 93). È impiegato per giunzioni tra materiali diversi e nei casi in cui le caratteristiche meccaniche del giunto non sono un fattore determinante (ad esempio: saldature di componenti elettrici ed elettronici, collegamenti di tubazioni in rame, ecc.).

Una saldatura si definisce:

- autogena, quando il materiale base viene fuso e prende parte alla formazione del giunto saldato;
- eterogena, nel caso contrario, quando il giunto è costituito dal solo metallo d'apporto (le brasature sono saldature eterogene).

### Procedimenti di saldatura

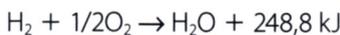
I procedimenti di saldatura sono numerosi e sfruttano tecniche molto diverse tra loro. I tipi più comuni sono le saldature per fusione, in particolare quelle alla fiamma ossiacetilenica, ad arco e per resistenza. Di seguito sono descritti i principali procedimenti di saldatura e brasatura.

## 5.3 SALDATURA OSSIACETILENICA

Il calore necessario alla fusione dei lembi da saldare è ottenuto dalla combustione di una miscela di ossigeno e acetilene ( $C_2H_2$ ). La fiamma ossiacetilenica è composta di tre zone (fig. 94): il dardo, la zona riducente e il fiocco. La zona di massima temperatura (circa  $3200\text{ }^\circ\text{C}$ ) è situata a qualche millimetro dalla punta del dardo (zona di saldatura). La reazione esotermica primaria avviene nel dardo e dà luogo alla formazione di monossido di carbonio e idrogeno:



Questi gas sottraggono ossigeno all'aria e danno luogo, nella zona riducente, alle reazioni secondarie:



Nella zona riducente la temperatura è di circa  $2600\text{ }^\circ\text{C}$ , mentre nel fiocco (zona ossidante) si ha una temperatura media di  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ .

Il tipo di fiamma ottimale si ottiene con una miscela composta per il 52% di ossigeno e per il 48% di acetilene.

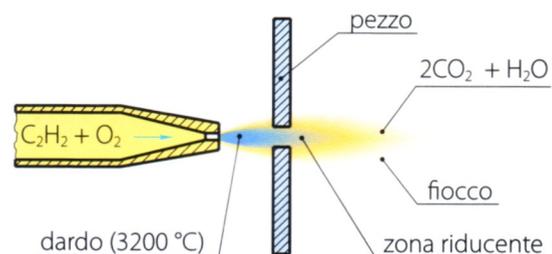


Figura 94  
Saldatura ossiacetilenica.

La miscelazione dei due gas avviene all'interno di un cannello dotato di due valvole di regolazione e costruito in modo da evitare rischi di esplosione. La quantità di gas miscelata nel cannello è molto piccola e, grazie alla conformazione interna del cannello stesso, ha una velocità di uscita superiore a quella di propagazione della fiamma. I cannelli ossiacetilenici più comuni sono quelli a bassa pressione (fig. 95); la portata può essere variata sostituendone la parte terminale. L'attrezzatura per la saldatura ossiacetilenica è composta dai seguenti elementi (fig. 96):

- una bombola di ossigeno, costruita in acciaio legato e contrassegnata da una fascia di colore bianco: può contenere 40 o 50 litri di ossigeno alla pressione di 14,71 MPa;
- una bombola di acetilene, costruita in acciaio al carbonio normalizzato e contrassegnata da una fascia di

colore arancione, della capacità di 35, 40 o 50 litri alla pressione di 147,1 kPa. Pressioni più elevate (fino a 1,5 MPa) possono essere impiegate solo con bombole speciali e sciogliendo l'acetilene nell'acetone;

- due riduttori di pressione con i relativi manometri, per regolare la pressione in uscita dei due gas e ridurla a quella di esercizio;
- valvole di sicurezza contro i ritorni di fiamma;
- tubazioni flessibili di raccordo;
- cannello ossiacetilenico.

La saldatura ossiacetilenica può essere eseguita con o senza metallo d'apporto (figg. 97, 98); è applicabile alla maggior parte dei materiali metallici in un'ampia gamma di spessori.



Figura 96  
 Attrezzatura portatile per saldatura ossiacetilenica e ossitaglio (FAIC).

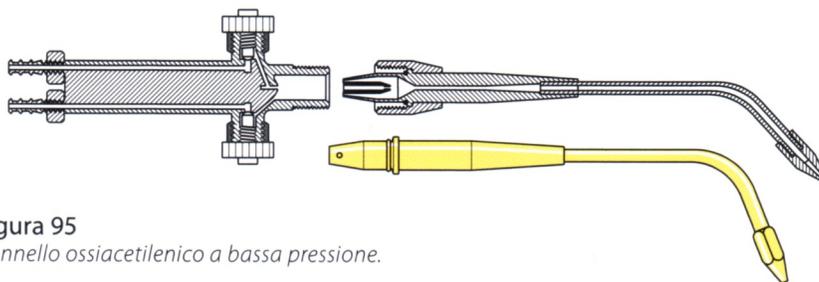


Figura 95  
 Cannello ossiacetilenico a bassa pressione.

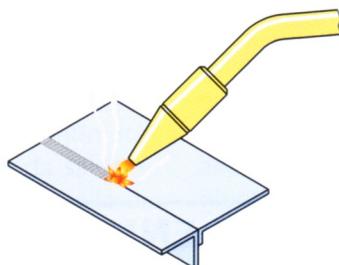


Figura 97  
 Saldatura ossiacetilenica senza metallo d'apporto.

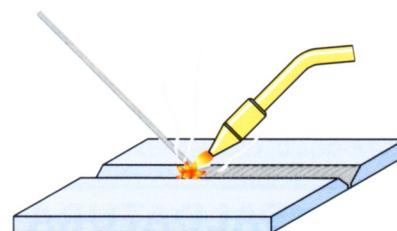


Figura 98  
 Saldatura ossiacetilenica con metallo d'apporto.

## 5.4 SALDATURA ELETTRICA AD ARCO

Il calore necessario per la fusione del metallo è ottenuto per mezzo di un arco voltaico che scocca tra un elettrodo e i pezzi da saldare. La temperatura dell'arco è di oltre 3200 °C e provoca la fusione sia del materiale base sia dell'elettrodo; quest'ultimo costituisce quindi il metallo d'apporto. In genere si utilizzano elettrodi rivestiti, costituiti da un filo metallico (anima) di diametro variabile tra 1 e 4 mm, e da un rivestimento che ricopre l'elettrodo per quasi tutta la sua lunghezza.

Il rivestimento è composto da una miscela di sostanze che ha lo scopo di facilitare la saldatura, eliminare le impurez-

ze e proteggere il bagno di fusione dalle contaminazioni esterne e dall'ossidazione. Il rivestimento può anche contenere degli elementi di lega che, combinandosi con il metallo base, possono migliorare le proprietà chimiche e meccaniche del giunto saldato. Il materiale del rivestimento, più leggero del metallo fuso, galleggia sul bagno di fusione e dà luogo a uno strato protettivo (scoria) che viene facilmente eliminato dopo la solidificazione e il raffreddamento del cordone. Esiste in commercio una vasta gamma di elettrodi che si differenziano per le dimensioni e per il tipo di rivestimento.

Le saldatrici elettriche ad arco hanno il compito di innescare e mantenere stabile l'arco voltaico. L'intensità di corrente necessaria per la saldatura è piuttosto elevata (80 ÷ 150 A), ma la tensione a vuoto (prima dell'innesco dell'arco) è mantenuta per legge entro valori limitati (80 V in c.a. e 100 V in c.c.), in modo da evitare rischi per l'operatore. Le saldatrici possono funzionare sia in corrente continua che

in corrente alternata. I principali tipi di saldatrici elettriche ad arco sono:

- a corrente continua, statiche (a raddrizzatori) e rotanti (dinamo);
- a corrente alternata, statiche (trasformatori) e rotanti (alternatori).

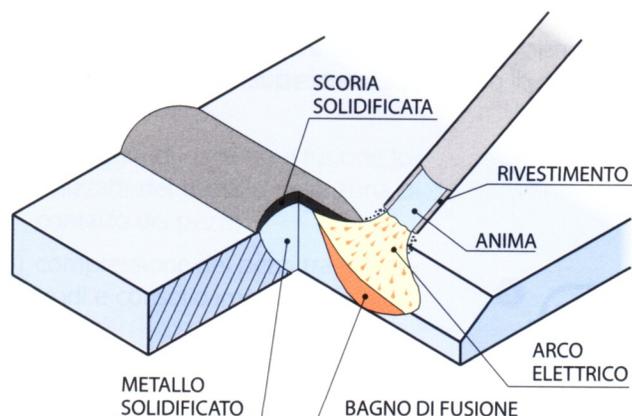


Figura 99  
Saldatura elettrica ad arco.

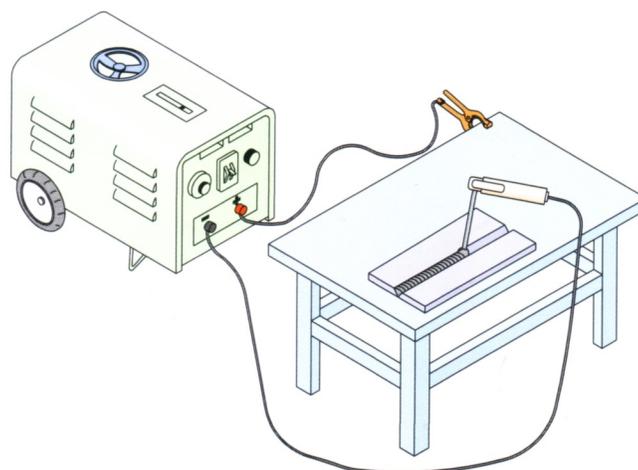


Figura 100  
Saldatrice elettrica ad arco.

## 5.5 SALDATURA AD ARCO IN ATMOSFERA CONTROLLATA

Nella saldatura in atmosfera controllata la protezione del bagno di fusione è affidata a un flusso di gas (inerte o attivo). Esso ha la funzione di favorire l'innesco e il mantenimento dell'arco; inoltre protegge il bagno di fusione da reazioni chimiche indesiderate (in particolare dall'ossidazione).

I principali procedimenti di saldatura ad arco in atmosfera controllata sono denominati:

- TIG (Tungsten Inert Gas);
- MIG (Metal Inert Gas);
- MAG (Metal Active Gas).

### Saldatura TIG

Nel procedimento TIG l'arco elettrico scocca tra un elettrodo non fusibile in tungsteno e i pezzi da saldare; il gas protettivo viene espulso dalla "torcia" di saldatura attraverso dei fori disposti intorno all'elettrodo (fig. 101). La saldatura può essere eseguita con o senza materiale d'apporto. La torcia viene raffreddata ad aria o ad acqua. I gas inerti più comunemente impiegati sono argon, elio, miscele di azoto e idrogeno. Con il procedimento TIG è possibile saldare qualsiasi tipo di materiale. I giunti saldati presentano ottime caratteristiche meccaniche ed estetiche.

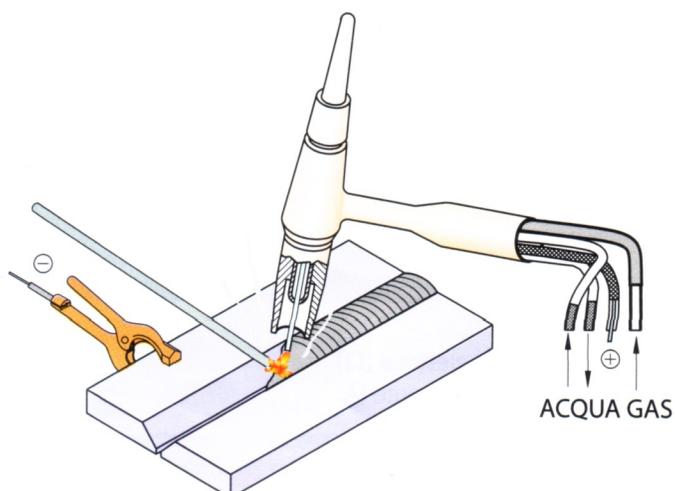


Figura 101  
Saldatura TIG.

## Saldatura MIG

Nel procedimento MIG l'elettrodo è costituito da un filo metallico fusibile che fuoriesce in modo continuo dalla torcia. Il filo viene prelevato da una matassa e inviato alla torcia da un sistema motorizzato di trascinamento (fig. 102). La velocità di uscita del filo e l'intensità di corrente sono regolate elettronicamente. Nella saldatura MIG il filo metallico svolge la duplice funzione di elettrodo e metallo d'apporto. Come nel sistema TIG, la torcia è dotata di una serie di ugelli dai quali fuoriesce il gas protettivo (azoto puro, miscele di azoto e argon, elio o miscele di elio,

CO<sub>2</sub>, argon e idrogeno). Il procedimento MIG, detto anche "a filo continuo" può essere realizzato con due modalità di funzionamento:

- il sistema spray-arc, che utilizza forti intensità di corrente e dà origine a un bagno di fusione di grandi dimensioni. È adatto alla saldatura in piano di grandi spessori;
- il sistema short-arc (arco corto), che impiega bassi valori di tensione e corrente, ed è indicato per la saldatura di lamiere di piccolo spessore in qualunque posizione.

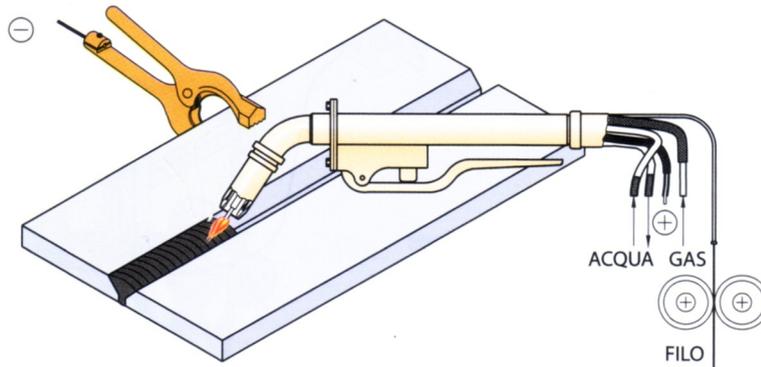


Figura 102  
Saldatura MIG (a filo continuo).

## Saldatura MAG

Il procedimento è analogo a quello della saldatura MIG, ma in questo caso i gas inerti sono sostituiti da un gas attivo, generalmente anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Durante la saldatura, il gas si dissocia in CO e O<sub>2</sub>, i quali interagiscono attivamente con il metallo fuso. Al CO<sub>2</sub> possono essere aggiunti anche

ossigeno e azoto. I vantaggi di questo procedimento rispetto ai sistemi TIG e MIG consistono nella maggiore penetrazione e nel minor costo del gas protettivo. Il sistema MAG è però utilizzabile solo per la saldatura di acciai al carbonio e di alcuni acciai inossidabili.

## 5.6 SALDATURA ELETTRICA A RESISTENZA

La saldatura si realizza per l'azione combinata del calore e della compressione dei pezzi da unire. I procedimenti di saldatura a resistenza sono di esecuzione semplice, rapida ed economica; producono giunti di buon aspetto estetico e permettono la saldatura tra materiali diversi. Il calore necessario per la fusione localizzata del metallo è ottenuto facendo attraversare la zona di giunzione da una corrente elettrica di forte intensità. Per effetto Joule si produce una quantità di calore:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [J]$$

dove:

R = resistenza elettrica [Ω]

I = intensità di corrente [A]

t = tempo [s]

Il riscaldamento interessa una zona limitata ed è massimo nel punto di contatto dei pezzi; è infatti in questo punto che si ha la massima resistenza al passaggio della corrente. Ciò è dovuto, oltre che alla presenza di aria tra le due superfici,

al fatto che gli elettrodi sono di rame (ottimo conduttore), per cui la resistenza nel punto di contatto elettrodo-pezzo è minima. Gli elettrodi in rame sono raffreddati ad acqua, per evitarne il surriscaldamento e la fusione. Nel seguito sono illustrati alcuni procedimenti di saldatura a resistenza.

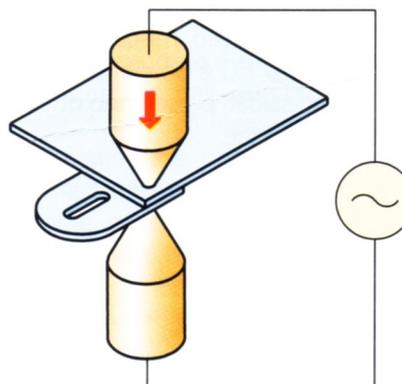


Figura 103  
Saldatura a resistenza.

## Saldatura per punti

Questo tipo di saldatura è idoneo alla saldatura di lamiere di spessore limitato; si realizza per mezzo di apposite saldatrici che prendono il nome di puntatrici.

Il procedimento di saldatura avviene in tre fasi (fig. 104):

- 1) sovrapposizione dei lembi da saldare e accostamento degli elettrodi;
- 2) passaggio di corrente e fusione localizzata del metallo nella zona di contatto dei pezzi;
- 3) compressione dei pezzi tra gli elettrodi e consolidamento della giunzione.

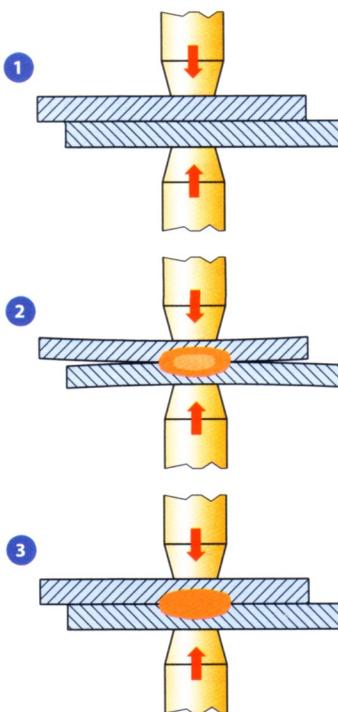


Figura 104  
Saldatura per punti.



Figura 105  
Puntatrice (Telwin).

## Saldatura a rulli

Il principio di funzionamento è analogo a quello della saldatura per punti, ma in questo caso gli elettrodi sono costituiti da rulli. La corrente viene inviata a intervalli regolari, mentre i

rulli rotolano sui pezzi esercitando contemporaneamente la pressione necessaria alla saldatura. Le lamiere, di piccolo spessore, devono essere decapate prima della saldatura.

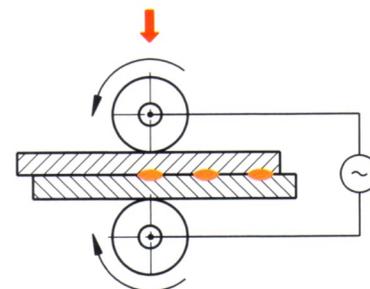


Figura 106  
Saldatura a rulli.

## Saldatura di testa a resistenza pura

È impiegata per la saldatura di testa di pezzi cilindrici e tubi. I pezzi sono serrati su morsetti collegati al circuito elettrico della saldatrice (fig. 107); accostando i pezzi (1), il circuito elettrico si chiude e le zone dei pezzi prossime alle superfici di contatto si surriscaldano fino alla fusione per effetto Joule (2). A questo punto i pezzi vengono compressi l'uno contro l'altro fino ad ottenerne la saldatura (3). Le superfici da unire devono essere lisce e pulite, per cui è necessaria una preparazione preventiva.



Figura 108  
Saldatura di una catena per ancora (ESAB).

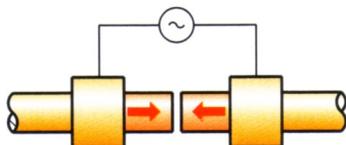
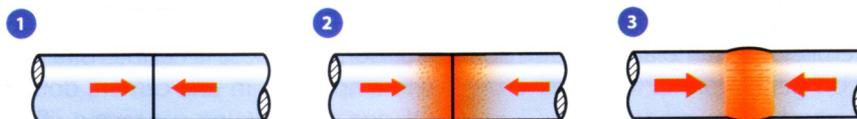


Figura 107  
Esempio di saldatura di testa a resistenza pura.



## Saldatura di testa a scintillio

È analogo al precedente, ma in questo caso i pezzi non vengono preparati, anzi le loro superfici di contatto devono essere rugose. I due pezzi vengono accostati, ma non compressi (1): il passaggio di corrente provoca un surriscaldamento concentrato nei punti di contatto delle superfici, che dà luogo a fusioni localizzate evidenziate dalla forte produzione di scintille (da qui il

nome del procedimento). Per un determinato intervallo di tempo i pezzi vengono lentamente accostati, in modo da mantenere un leggero contatto (2). Portato il materiale allo stato pastoso, si comprimono i pezzi, completando la saldatura (3). Questo procedimento è più economico di quello a resistenza pura e produce giunti saldati esenti da inclusioni e impurezze.

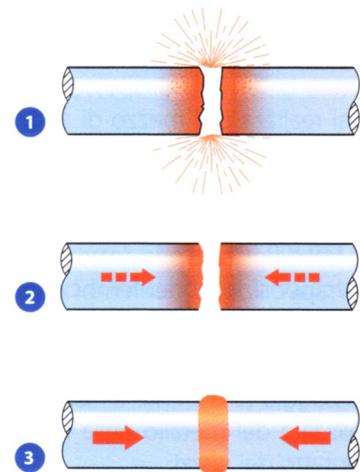


Figura 109  
Saldatura di testa a scintillio.

## 5.7 SALDATURA AL PLASMA

Il plasma viene spesso definito come "il quarto stato della materia". Quando un gas viene riscaldato a temperature molto alte, l'energia cinetica dei suoi atomi e delle sue molecole aumenta notevolmente; le collisioni che avvengono tra gli atomi ne provocano la loro scissione in ioni, dotati di cariche elettriche positive e negative. La presenza di elettroni liberi in moto disordinato produce un'enorme quantità di calore, che può essere sfruttata per la saldatura. Il riscaldamento e la ionizzazione del gas sono ottenuti per mezzo di un arco elettrico. Il plasma viene proiettato sui pezzi da saldare per mezzo di una "torcia" dotata di un ugello calibrato e di un elettrodo infusibile di tungsteno. Le torce per saldatura al plasma sono di due tipi:

- ad arco trasferito (fig. 110): l'arco scocca tra l'elettrodo centrale e i pezzi da saldare. Si ottengono temperature di circa 30.000 °C, utiliz-

zabili per la saldatura e il taglio dei metalli;

- ad arco non trasferito: l'arco scocca tra l'elettrodo e il bordo dell'ugello. La temperatura è di circa 15.000 °C, ideale per procedimenti di metallizzazione a spruzzo.

Le torce, costruite in materiale refrattario, devono essere raffreddate ad acqua. I gas più usati per la produzione del plasma sono costituiti da miscele di argon e idrogeno. Nella saldatura al plasma, la torcia è provvista anche di ugelli anulari per l'emissione di un gas inerte che circonda il getto di plasma e protegge il bagno di fusione. La saldatura al plasma è applicabile a tutti i materiali ed è particolarmente adatta alla saldatura di acciai inossidabili, nichel, rame, ottone, alluminio e leghe leggere, titanio. Risulta più veloce rispetto al sistema TIG e consente la saldatura di pezzi di grande spessore, riducendo

contemporaneamente le deformazioni del materiale. Per saldature di componenti elettronici o di spessori molto ridotti (da 0,05 a 1,5 mm) si usano le torce al microplasma, di dimensioni più ridotte e dotate di ugelli di diametro molto piccolo.

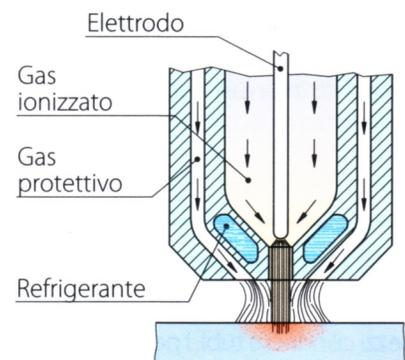


Figura 110  
Torcia al plasma ad arco trasferito.

## 5.8 SALDATURA LASER

La parola LASER deriva dall'espressione inglese "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazioni). Un generatore di luce laser è un apparecchio in grado di produrre un fascio di luce concentrata e coerente (tutte le onde luminose si muo-

vono nella stessa direzione). Un gas (generalmente CO<sub>2</sub>) viene eccitato elettricamente a livello molecolare, dando luogo all'emissione di una radiazione luminosa la cui intensità viene amplificata in una camera dotata di due specchi: uno concavo e riflettente, l'altro piano e semiriflettente. Parte della radiazione luminosa così

ottenuta viene fatta passare dallo specchio semiriflettente e inviata sulla zona da riscaldare. Con questo sistema è possibile concentrare una grande quantità di energia su superfici molto piccole (il fascio luminoso può avere un diametro variabile da pochi centesimi di millimetro a circa 2 mm).

Il laser può essere impiegato per operazioni di saldatura e taglio dei metalli. I generatori laser comunemente impiegati sono di due tipi:

- a corpi solidi (rubino, neodimio) per potenze di alcune centinaia di watt. Sono idonei alla microsaldatura di lamiera dello spessore massimo di 1 mm;
- al CO<sub>2</sub> per potenze maggiori (dell'ordine delle decine di kW). Sono in grado di saldare ad alta velocità le lamiera di spessore maggiore di 1 mm (fig. 111).

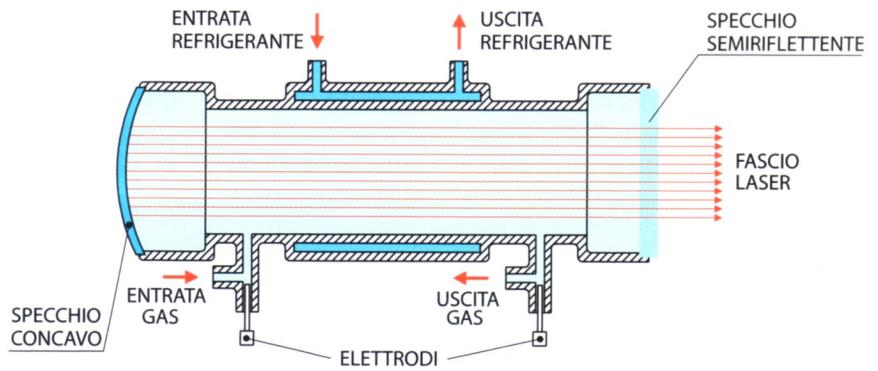


Figura 111  
Generatore laser al CO<sub>2</sub>.

La saldatura laser può essere eseguita con o senza materiale d'apporto; permette di realizzare saldature di metalli diversi o difficilmente saldabili, con spessori variabili da 50 µm a 2,5 mm. La zona interessata dalla saldatura è molto piccola, per cui i pezzi sono sottoposti a ridottissime sollecitazioni termiche, grazie anche all'elevata velocità di esecuzione: un punto di saldatura si realizza in pochi millisecondi. I giunti saldati al laser hanno ottime caratteristiche tecniche ed estetiche. La tecnologia laser è impiegata nella saldatura di piccoli componenti meccanici, componenti e microcircuiti elettronici, coppie bimetalliche e nella saldatura di metalli ad alto punto di fusione.



Figura 112  
Testa per saldatura laser (Prima).

## 5.9 SALDATURA DI TESTA PER ATTRITO

In questo procedimento il calore è prodotto dall'attrito di strisciamento tra le superfici dei pezzi da saldare. Mentre uno dei pezzi è fermo, l'altro viene fatto ruotare velocemente a contatto con il primo. Quando il materiale ha raggiunto lo stato plastico, la rotazione si arresta e i due pezzi vengono spinti l'uno contro l'altro fino a ottenerne la saldatura (fig. 113). La saldatura per attrito è un procedimento rapido, economico e permette la saldatura di pezzi costituiti da materiali diversi; produce giunti saldati dotati di ottime caratteristiche meccaniche ed estetiche.

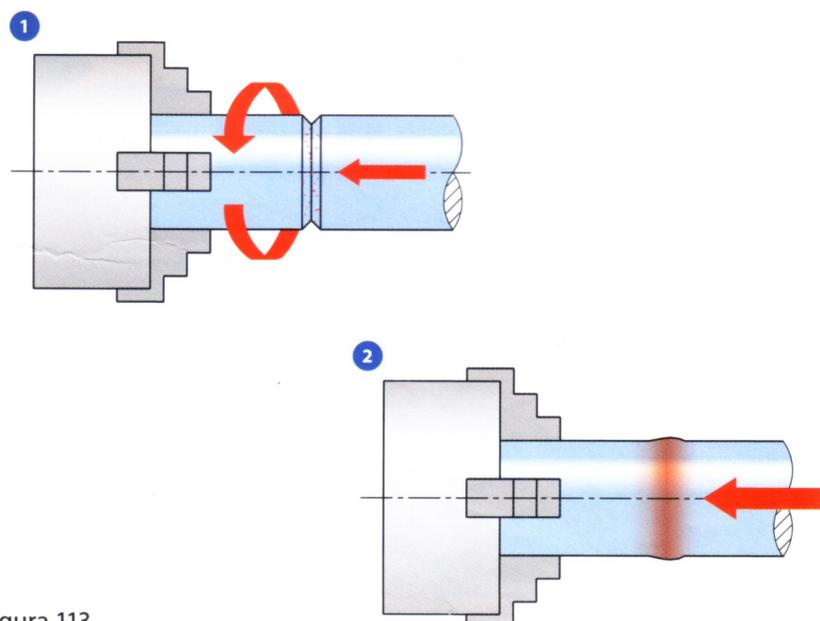


Figura 113  
Saldatura per attrito.

## 5.10 BRASATURE

Sono procedimenti di saldatura eterogeni nei quali la giunzione si realizza per mezzo di un metallo d'apporto che, allo stato fuso, "bagna" le parti da saldare (cioè si interpone tra di esse per capillarità) e le congiunge in modo stabile solidificando (fig. 114). Il punto di fusione del metallo d'apporto è sensibilmente più basso di quello del metallo base, pertanto quest'ultimo non prende parte alla fusione né alla formazione del giunto. Esistono tre tipi fondamentali di brasature, definite rispettivamente:

- brasatura dolce, quando il materiale d'apporto ha una temperatura di fusione inferiore a 450 °C;
- brasatura forte, quando il materiale d'apporto ha una temperatura di fusione superiore a 450 °C;
- ✦ *FIAMMA* saldobrasatura, quando il materiale d'apporto ha una temperatura di fusione superiore a 450 °C e la brasatura viene eseguita con tecniche simili a quelle impiegate nella saldatura (ad esempio con una fiamma ossiacetilenica).

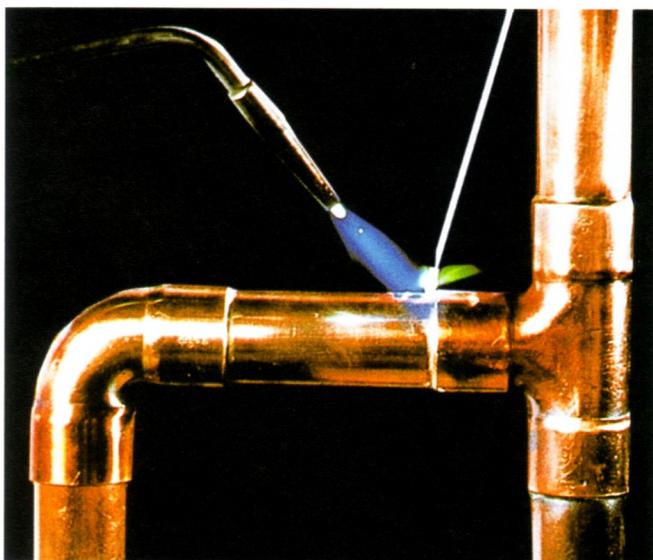


Figura 114  
Brasatura di un giunto tra tubazioni (Castolin).

Per l'esecuzione delle brasature si impiegano apposite leghe saldanti, e in particolare:

- leghe per brasature a basso punto di fusione (leghe stagno-piombo e stagno-argento);
- leghe per brasature all'argento (leghe argento-rame-zinco e argento-rame-zinco-cadmio);
- leghe per brasature forti (leghe rame-fosforo e rame-fosforo-argento).

Per proteggere i pezzi riscaldati dall'ossidazione, le brasature si eseguono con l'ausilio di prodotti protettivi (liquidi o in forma di pasta) detti appunto disossidanti. Il riscaldamento può essere ottenuto con mezzi diversi, a seconda del tipo di brasatura: fiamma ossiacetilenica o ossipropanica, saldatori elettrici, forni elettrici, sistemi a induzione o a resistenza, raggi infrarossi. Le brasature presentano una resistenza meccanica più limitata rispetto alle saldature autogene. Vengono impiegate per la saldatura di componenti elettrici ed elettronici, nel fissaggio di placchette per utensili, nelle giunzioni di tubature in rame, per riparazioni di pezzi in ghisa, per l'unione di pezzi di materiali diversi, quando non sia richiesta un'elevata resistenza meccanica del giunto.

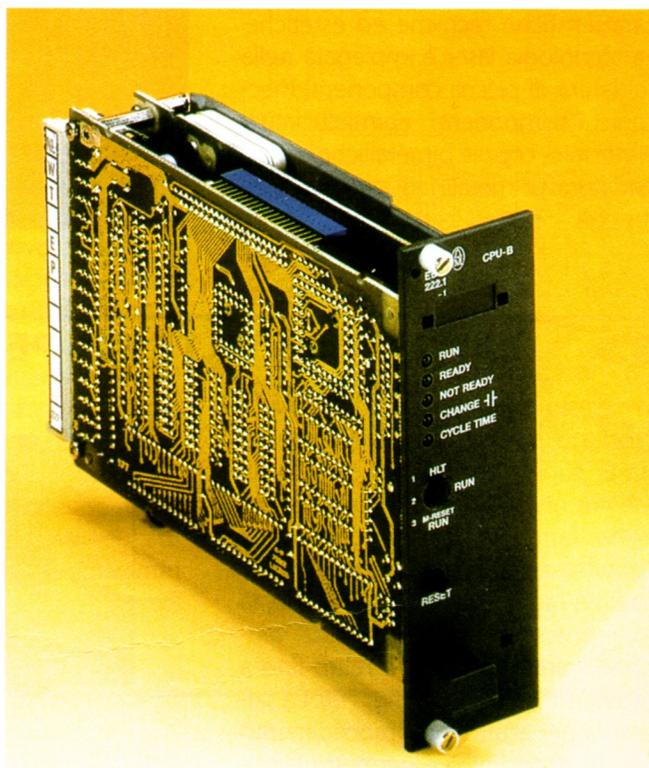


Figura 115  
Componenti elettronici di un PLC assemblati per brasatura (SIEI Peterlongo).

## 5.11 SCELTA DEL PROCEDIMENTO DI SALDATURA

La scelta del procedimento di saldatura dipende da numerosi fattori, tra i quali i più importanti sono il tipo di materiale da saldare, le caratteristiche fisiche, geometriche e meccaniche che si richiedono al giunto, la

posizione di saldatura. La tabella di figura 116 riporta delle indicazioni di massima per la scelta dei procedimenti di saldatura in relazione al materiale dei pezzi da saldare.

Procedimento di saldatura	Materiale							
	Acciai al carbonio	Acciai debolmente legati	Acciai inossidabili	Ghisa	Rame e sue leghe	Alluminio e leghe leggere	Magnesio e sue leghe	Titanio e sue leghe
Ossiacetilenica	O	B	B	O	B	B	S	N
Ad arco	O	O	O	B	S	B	N	N
A resistenza	O	O	B	N	B	O	B	B
A scintillio	O	O	B	S	B	B	S	B
TIG	B	B	O	B	O	O	O	O
MIG	B	B	B	S	O	O	B	B
MAG	O	B	B	S	S	S	S	S
Brasatura	O	B	B	S	B	O	S	B
Saldobrasatura	B	S	B	O	O	O	S	B

Legenda: O = ottimale, B = buono, S = sconsigliabile, N = non applicabile

**Figura 116**

*Scelta del procedimento di saldatura.*