

8 La saldatura

8.1 Definizione

La saldatura è un collegamento di parti solide che realizza la continuità del materiale fra le parti che vengono unite. La saldatura, in genere, presuppone la fusione delle parti che vengono unite, a differenza della brasatura, in cui viene fuso unicamente il materiale d'apporto. Con la saldatura viene garantita quindi anche la continuità delle caratteristiche del materiale delle parti così unite.

Da quanto sopra consegue che la saldatura è un collegamento permanente che si differenzia anche da altri collegamenti permanenti (es. chiodatura o incollatura) che non realizzano la continuità metallica.

8.2 Sviluppo della saldatura

Fin dal Medio Evo si univano parti in ferro riscaldandole al calor giallo-bianco sulla forgia e successivamente martellandole fino a renderle omogenee. Tuttavia, per avere dei procedimenti di saldatura con caratteristiche omogenee e riproducibili, fu necessario arrivare al 1901 con la saldatura ossiacetilenica, in cui si univano le parti per fusione dei lembi. In questo procedimento di saldatura l'energia necessaria alla fusione dei pezzi era fornita dalla combustione di un gas (nel caso specifico acetilene) con ossigeno puro. Raggiungendo temperature sufficientemente elevate (e superiori alla temperatura di fusione del ferro) non era più necessaria l'operazione di martellatura per unire i pezzi, a tutto vantaggio della semplicità e della ripetibilità dell'operazione.

Agli inizi del XX secolo si svilupparono generatori elettrici sufficientemente potenti per generare un arco avente una potenza sufficiente alla fusione del ferro. Il primo procedimento di saldatura che fu sviluppato utilizzando l'energia dell'arco elettrico fu il procedimento ad elettrodo non protetto, attualmente completamente abbandonato a favore del procedimento a elettrodo rivestito, in cui il rivestimento svolge tutta una serie di funzioni fondamentali per la produzione di un giunto di buone caratteristiche. A tutt'oggi (2006) la saldatura a elettrodo rivestito è il procedimento più diffuso nel mondo.

Nel 1925 veniva messo a punto il procedimento di saldatura a resistenza, oggi utilizzato ampiamente in ambito industriale per produzioni di grande serie.

Nel corso della Seconda Guerra Mondiale fu sentita l'esigenza di produrre giunti saldati di buona qualità con una produttività molto maggiore di quella che poteva essere data dall'elettrodo rivestito, quindi negli Stati Uniti fu iniziato lo studio dei procedimenti a filo continuo, ed in particolare dell'arco sommerso, che permetteva una produttività ed una riproducibilità assolutamente maggiori di quelle dei procedimenti ad elettrodo rivestito.

Nel dopoguerra furono sviluppati (anni cinquanta) i procedimenti MIG e MAG per avere una produttività confrontabile con quella dell'arco sommerso, pur con una maggiore flessibilità di impiego. In parallelo fu sviluppato il procedimento TIG, che permetteva un controllo molto preciso delle caratteristiche della saldatura ed una lavorazione continua, che non era permessa dall'elettrodo rivestito.

Infine negli anni settanta furono sviluppati i procedimenti ad energia concentrata, cioè electron beam e laser, che permettono di limitare la zona di materiale modificata dalla saldatura.

Attualmente sono in corso studi per la saldatura per diffusione, in cui non si porta a fusione il materiale da saldare, ma si sottopone a pressione ad una temperatura sufficientemente elevata perché gli atomi del reticolo cristallino diffondano attraverso la superficie di separazione dei pezzi, in modo da realizzare giunti a temperature relativamente basse.

8.3 Principali procedimenti di saldatura

Nella tabella 8.1 sono indicati principali procedimenti di saldatura, con la denominazione italiana, quella dell'AWS (American Welding Society) e la sigla usata dall'AWS. Per i particolari del singolo procedimento ci si può riferire alla voce relativa.

Denominazione italiana	Denominazione AWS	Sigla
Ossiacetilenica	Oxyfuel Gas Welding	OFW
Elettrodo rivestito	Shielded Metal Arc Welding	SMAW
Arco sommerso	Submerged Arc Welding	SAW
MIG/MAG	Gas Metal Arc Welding	GMAW
TIG	Gas Tungsten Arc Welding	GTAW
Saldatura a plasma	Plasma Arc Welding	PAW
Elettroscoria	Electroslag Welding	ESW
Elettrogas	Electro gas Welding	EGW
Saldatura laser	Laser Beam Welding	LBW
Electron beam	Electron Beam Welding	EBW
Saldatura a resistenza	Resistance Welding	
Saldatura per attrito	Friction Stir Welding	FSW

Tabella 8.1: Principali procedimenti di saldatura

La **saldatura a fiamma ossiacetilenica** è un tipo di saldatura manuale molto semplice, utilizzato prevalentemente in officine e cantieri. Il gas utilizzato per la saldatura è una miscela di acetilene e ossigeno che permette di raggiungere una temperatura molto elevata.

La **saldatura con elettrodo rivestito** è un metodo di saldatura utilizzato per la saldatura di quasi tutte le leghe metalliche ferrose e non ferrose ad eccezione delle leghe di alluminio. Il procedimento di saldatura avviene tramite la creazione di un arco elettrico tra un elettrodo "consumabile" rivestito ed il pezzo da saldare.

La **saldatura a filo continuo**, o **saldatura MIG-MAG**, è quella che trova maggiore applicazione nei sistemi di automazione. Questa tecnica di saldatura semiautomatica o automatica consiste nel mantenere acceso un arco elettrico tra il filo pieno e il pezzo da saldare.

La saldatura a filo animato è simile alla saldatura MIG-MAG, ma il filo continuo non è pieno ma è un tubicino che contiene all'interno un flusso granulato che protegge il bagno di fusione e stabilizza l'arco elettrico.

La **saldatura ad arco sommerso** è utilizzato per la giunzione di pezzi di grande spessore come serbatoi ad alta pressione, componenti di centrali termiche e tubazioni di acquedotti e metanodotti. E' una tipologia di saldatura automatizzata.

Lezione n° 10: **Saldatura e tecnologie non convenzionali**

La **saldatura TIG** è processo di saldatura per fusione che usa un elettrodo non fusibile in tungsteno. E' un metodo di saldatura utilizzato per piccoli spessori che può essere manuale, semiautomatico o automatico e permette di ottenere saldature di qualità su acciai, leghe di rame e leghe leggere e viene utilizzato nell'industria nucleare, chimica, aeronautica e alimentare.

La **saldatura al plasma** è simile al processo di saldatura TIG, utilizza due afflussi indipendenti di gas e consente di saldare 10 mm di spessore con un'unica passata.

La tecnologia di **saldatura laser** è, tra i procedimenti di saldatura, è quella che consente la saldatura di spessori superiori ai 150mm con una singola passata.

Con la tecnica di **saldatura a resistenza** i metalli vengono saldati a pressione, senza l'ausilio di alcun materiale d'apporto. E' un tipo di saldatura autogena usata nel settore dell'automotive, ferroviario, e della componentistica elettronica. Si suddivide in ulteriori metodi di saldatura: saldatura a punti, saldatura a rilievi, saldatura a rulli, saldatura per scintillio.

8.3.1 Saldatura ossiacetilenica

La Saldatura ossiacetilenica (OFW - OxiFuel gas Welding nella terminologia generica AWS, indicata anche come OAW - OxyAcetylene Welding) è un procedimento di saldatura in cui l'energia viene fornita dalla combustione di acetilene in ambiente fortemente ossidante. Questo procedimento, non richiedendo energia elettrica, è stato fra i primi ad essere studiato per la saldatura (1895) e fu utilizzato fin dagli inizi del XX secolo. Nella saldatura ossiacetilenica è quasi sempre richiesto che sia fornito materiale d'apporto, di solito sotto forma di bacchette, fondenti sotto la fiamma. Date le sue caratteristiche non tutti i materiali sono saldabili con questa tecnologia.

Nei primi decenni del XX secolo il processo di saldatura ossiacetilenico è stato il più diffuso nel mondo, per essere gradualmente sostituito, a partire dalla quarta decade di quel secolo, dalla saldatura ad arco.

Attualmente l'equipaggiamento per la saldatura ossiacetilenica è mantenuto in officine che lo utilizzino anche per altri scopi (imburraggio o ossitaglio). La saldatura ossiacetilenica può essere utile per riparazioni in ambienti in cui non sia possibile far arrivare una potenza elettrica (per esempio per motivi di sicurezza).

I materiali che possono essere saldati con questo tipo di procedimento sono:

- acciai al carbonio o basso-legati
- ghise malleabili (con particolari precauzioni)
- acciai inossidabili al Cr-Ni e acciai al Cr (utilizzando un disossidante per evitare la passivazione superficiale)
- alluminio e relative leghe, tuttavia è richiesto un disossidante ed una notevole abilità del saldatore
- rame, per cui sono richieste particolari precauzioni per il raffreddamento

I difetti tipici di questo tipo di saldatura possono essere mancanze di penetrazione o incollature.

Più raramente è possibile trovare inclusioni di ossidi o addirittura denaturazione del metallo (cioè un'alterazione chimica del metallo base ad opera della fiamma) dovute principalmente ad una regolazione di fiamma che porta a fiamma ossidante.

Difetti di esecuzione, comuni anche ad altre tipologie di saldatura, sono i profili del cordone errati (eccesso di sovrassessore, mancanza di spessore, incisioni marginali), questi difetti in genere provengono da un'errata velocità di saldatura.

8.3.2 Saldatura ad elettrodo rivestito

Il procedimento a elettrodo rivestito deriva dai primi procedimenti ad arco sviluppati fra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX secolo. In questi procedimenti inizialmente l'elettrodo (dello stesso tipo di materiale di quello da saldare) non era protetto, quindi si ossidava molto rapidamente e, cosa molto più grave, introduceva ossidi e altre impurità nel bagno di saldatura. Ben presto si vide che aggiungendo al materiale dell'elettrodo disossidanti si ottenevano risultati migliori, inizialmente questi disossidanti erano dentro l'elettrodo (che praticamente era un tubo contenente la polvere disossidante), ma gli sviluppi successivi mostrarono l'utilità di avere una rivestimento esternamente al materiale metallico di cui è composto l'interno.

Attualmente gli elettrodi rivestiti sono prodotti in varie forme con differenti funzioni (vedi tipi di elettrodi in questa voce), a seconda delle esigenze sia di sicurezza sia di operabilità sia estetiche della saldatura.

Quando si porta l'elettrodo ad una distanza opportuna dal pezzo scocca l'arco elettrico, che fonde il materiale metallico dell'elettrodo, il rivestimento ed il metallo del pezzo che deve essere saldato. Il saldatore sposta manualmente la pinza, gestendo in tal modo il bagno di saldatura. Al termine dell'operazione il

Lezione n° 10: **Saldatura e tecnologie non convenzionali**

saldatore deve scalpellare la crosta (scoria) che si è formata sopra la saldatura, avente la funzione di proteggere il metallo nel corso del raffreddamento. Dato che gli elettrodi hanno una lunghezza di qualche decina di centimetri devono essere sostituiti nel corso delle operazioni di saldatura. Sia la necessità di sostituire gli elettrodi, sia quella di scalpellare la scoria dopo aver effettuato la saldatura riducono la produttività del procedimento, riducendone quindi l'economicità.

8.3.3 Saldatura ad arco sommerso

La Saldatura ad arco sommerso (SAW - Submerged Arc Welding nella terminologia AWS) è un procedimento di saldatura ad arco a filo continuo sotto protezione di scoria. La morfologia generale della zona di saldatura (cioè il fatto che l'arco scocchi sotto la scoria) permette di generare una grande quantità di calore che, essendo schermato dalla scoria, cattiva conduttrice termica, resta localizzato nel bagno di saldatura. Quindi la saldatura ad arco sommerso permette di operare con elevate velocità di saldatura e di deposito. La saldatura ad arco sommerso è un processo che può essere reso completamente automatico e può effettuare solo saldature longitudinali in posizione piana.

Nella saldatura ad arco sommerso l'elettrodo è un filo continuo, che opera immerso in un letto di flusso, cioè di materiale solido, granulare, che in parte fonde e lascia una scoria di protezione sul cordone di saldatura. Il filo viene alimentato a velocità costante e l'arco viene spostato in avanti sempre a velocità costante.

La denominazione arco sommerso viene dal fatto che l'arco, scoccando sotto il letto di flusso, non è visibile all'esterno. Questo processo, considerando le sue caratteristiche, è facilmente automatizzabile, ed anzi è stato sviluppato e si è diffuso proprio allo scopo di avere un sistema automatico di saldatura con forte penetrazione.

Dato che, man mano che la saldatura procede, la scoria (inizialmente liquida) solidifica sopra il cordone di saldatura, continuando a proteggerlo dal contatto con l'atmosfera, alla fine di ogni passata di saldatura è necessario rimuoverla per poter effettuare la passata successiva.

La presenza di un flusso granulare necessario a proteggere il bagno di saldatura limita le posizioni in cui può essere usata la saldatura ad arco sommerso, praticamente solo alla posizione in piano. In particolare, mentre non sussistono difficoltà ad effettuare giunti longitudinali (cioè lungo la generatrice di un cilindro), giunti circonferenziali possono essere realizzati con questa tecnologia solo in unione a macchine di posizionamento che operino collegate alla macchina saldatrice in modo tale che il segmento di giunto che viene saldato in quel momento sia in posizione piana.

8.3.4 Saldatura MIG/MAG

La saldatura MIG (Metal-arc Inert Gas) o MAG (Metal-arc Active Gas) (l'unica differenza fra le due è il gas che viene usato per la protezione del bagno di saldatura), indicate entrambe nella terminologia AWS come GMAW (Gas Metal Arc Welding - Saldatura ad arco con metallo sotto protezione di gas), è un procedimento di saldatura sviluppato dopo la Seconda Guerra Mondiale che ha assunto un peso, in termini di prodotto saldato per anno, sempre crescente. Uno dei principali motivi che hanno permesso questo sviluppo è stata la riduzione dei costi dei prodotti di elettronica, per cui sono state sviluppate macchine per saldatura semiautomatiche a costi accessibili anche per ditte di dimensioni medio-piccole (il costo attuale - 2006 - di una macchina MIG/MAG nuova per lavorazione ad alta produttività è poco meno di 10000 EUR). Una saldatrice MIG può essere acquistata a meno di 900 euro (140 ampere, con alimentazione monofase, portatili delle dimensioni di un forno microonde) o dai 1500 euro (trifase professionali, 200-250 ampere, integrate su carrello mobile).

Il procedimento di saldatura MIG/MAG è un procedimento a filo continuo in cui la protezione del bagno di saldatura è assicurata da un gas di copertura, che fluisce dalla torcia sul pezzo da saldare. Il fatto che sia un procedimento a filo continuo garantisce un'elevata produttività al procedimento stesso, e contemporaneamente la presenza di gas permette di operare senza scoria (entrambe queste caratteristiche aumentano l'economicità del procedimento nei confronti della saldatura a elettrodo).

La presenza di molti componenti nell'impianto aumenta notevolmente il prezzo di una macchina per saldatura MIG/MAG nei confronti di una macchina per saldatura a elettrodo (che, praticamente, è poco più di un generatore di tensione con caratteristica cadente).

La saldatura MIG/MAG, come tutti i procedimenti a filo continuo, è un procedimento derivato dall'arco sommerso, ma, nei confronti quest'ultimo, ha il vantaggio che l'operatore può tenere l'arco sotto osservazione diretta, quindi può controllare l'esecuzione della saldatura come nei procedimenti a elettrodo (elettrodo rivestito e TIG), altri vantaggi nei confronti dell'arco sommerso sono la mancata formazione di scoria e la possibilità di saldare anche in posizioni non piane.

8.3.5 Saldatura TIG

La Saldatura TIG (Tungsten Inert Gas) o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), secondo la terminologia AWS, è un procedimento di saldatura ad arco con elettrodo infusibile (di tungsteno), sotto protezione di gas inerte, che può essere eseguito con o senza metallo di apporto. La saldatura TIG è uno dei metodi più diffusi, fornisce giunti di elevata qualità, ma richiede operatori altamente specializzati. Questa tecnologia di saldatura fu sviluppata inizialmente per l'industria aeronautica nel corso della Seconda guerra mondiale per sostituire sugli aerei i rivetti con saldature (molto più leggere a parità di resistenza).

Il procedimento si basa su una torcia in cui è inserito l'elettrodo in tungsteno, attorno a cui fluisce il gas di protezione che, attraverso un bocchello di materiale ceramico, è portato sul bagno di fusione. L'operatore muove la torcia lungo il giunto per spostare il bagno di fusione, mentre, nel caso che sia richiesto materiale d'apporto, contemporaneamente sposta la bacchetta del materiale in modo tale da tenerla costantemente con l'estremità entro l'arco e comunque sotto la protezione del gas.

Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia è che l'apporto di materiale nel bagno di saldatura è indipendente dall'apporto termico nella saldatura, a differenza di quanto accade nelle saldature a filo o a elettrodo consumabile. Questo procedimento può essere automatizzato, sotto questo aspetto è largamente usato per la produzione di tubi saldati partendo da nastro metallico e per la saldatura dei tubi alle piastre tubiere degli scambiatori di calore.

Il procedimento TIG è particolarmente indicato quando devono essere saldati piccoli spessori di materiale, a partire da pochi decimi di mm, tuttavia non è possibile saldare spessori superiori a qualche mm (2-3 mm per gli acciai) con una singola passata (perciò, in generale, non si usa per saldare spessori superiori a 5-6 mm), quindi, considerando la bassa produttività, spesso viene usato per effettuare la prima passata di un giunto, mentre il riempimento viene effettuato successivamente con procedimenti a produttività più elevata. Date le sue caratteristiche il procedimento può essere utilizzato in qualsiasi posizione e può essere usato per saldature continue o per saldature a punti. Non è consigliabile l'uso di questo procedimento in luoghi aperti, dato che anche un vento leggero può disperdere il gas di protezione.

8.4 Applicazioni della saldatura

La saldatura è utilizzata principalmente per la costruzione di recipienti sottoposti a sforzi significativi (principalmente dovuti a pressione) (caldareria) o per costruzione di strutture di supporto più o meno complesse (carpenteria). Fuori da queste due applicazioni, che già coprono un'area estremamente vasta di impieghi, la saldatura è utilizzata nella costruzione di veicoli, sia marittimi, sia aerei sia terrestri. Lo sviluppo iniziale della saldatura venne proprio da questo campo di applicazioni, in particolare dalla necessità delle costruzioni navali, che richiedevano la giunzione di lamiere di spessore eccessivo per le chiodature con una notevole resistenza ed un peso, per quanto possibile, limitato. Esiste anche la saldatura a punti o chiodi di saldatura che funziona con una macchina complessa e abbastanza costosa che consiste nel far combaciare le parti di materiale da saldare e grazie ad una macchina i due pezzi vengono compressi e, grazie al passaggio di energia elettrica che scalda i corpi da saldare fino ad arrivare al punto di fusione in meno di 15 secondi, i due materiali vengono uniti da un CHIODO interno particolarmente resistente che dura nel tempo. La caratteristica principale della saldatura è di creare strutture monolitiche, cioè strutture che non presentano discontinuità di caratteristiche in presenza dei giunti. Questa particolarità della saldatura è di notevole importanza sia quando è richiesta una resistenza meccanica uniforme sia quando è richiesta una resistenza uniforme ad aggressioni esterne (per esempio a corrosione). Date queste caratteristiche la saldatura ha applicazioni notevoli in diversi campi dell'ingegneria:

- Ingegneria meccanica: costruzione di strutture meccaniche di forma complessa e sottoposte a sforzi significativi
- Ingegneria civile: costruzione di strutture metalliche di supporto a edifici o ponti
- Ingegneria chimica: costruzione di recipienti (a pressione o meno), di casse di pompe, di casse di valvole e di reti di tubazioni
- Ingegneria nucleare: recipienti a pressione per reattori, tubazioni, strutture di sicurezza e contenimento
- Ingegneria dei trasporti: costruzione di veicoli terrestri e navali
- Ingegneria aeronautica: strutture portanti per aeromobili

8.5 Saldabilità dei metalli

Nelle tabelle seguenti sono presentati i metalli più usati con un rating di saldabilità (da 0 - saldatura impossibile a 5 - buona saldabilità)

Tipo di acciaio	Saldabilità	Note
Acciai al C	5	
Acciai basso legati al Mn	4	
Acciai ad alto carbonio (>0.45%)	1	Usata solo per riparazione o per ricarica
Acciai bonificati	3	Possono essere saldati con molte precauzioni
Acciai al Cr Mo	3	Richiedono un preriscaldamento e, a volte, un trattamento termico dopo saldatura.
Acciai inossidabili austenitici	5	
Acciai inossidabili martensitici	2	Richiedono un forte preriscaldamento, e il trattamento termico di rinvenimento dopo saldatura è praticamente obbligatorio.
Ghise	0	È sconsigliabile la saldatura di ghise, può essere saldata solo ghisa sferoidale, con notevoli precauzioni

Tabella 8.2: Saldabilità degli acciai

Metallo o lega	Saldabilità	Note
Rame	4	
Leghe di Cu	2	In genere le leghe di rame sono saldabili solo con difficoltà, fanno eccezione i bronzi al Si, le leghe Cu Ni generalmente presentano la saldabilità delle leghe di Ni
Leghe di Nickel	5	
Alluminio	4	In genere è saldabile, se non ha caratteristiche meccaniche ottenute tramite lavorazione a freddo
Leghe di Al	3	
Piombo	4	Saldabile senza grosse difficoltà, ma solo OFW ed in piano
Titanio e leghe	4	
Metalli refrattari (Nb, Ta)	1	
Metalli refrattari (W e Mo)	0	

Tabella 8.3: Saldabilità dei metalli non ferrosi

Lezione n° 10: **Saldatura e tecnologie non convenzionali**

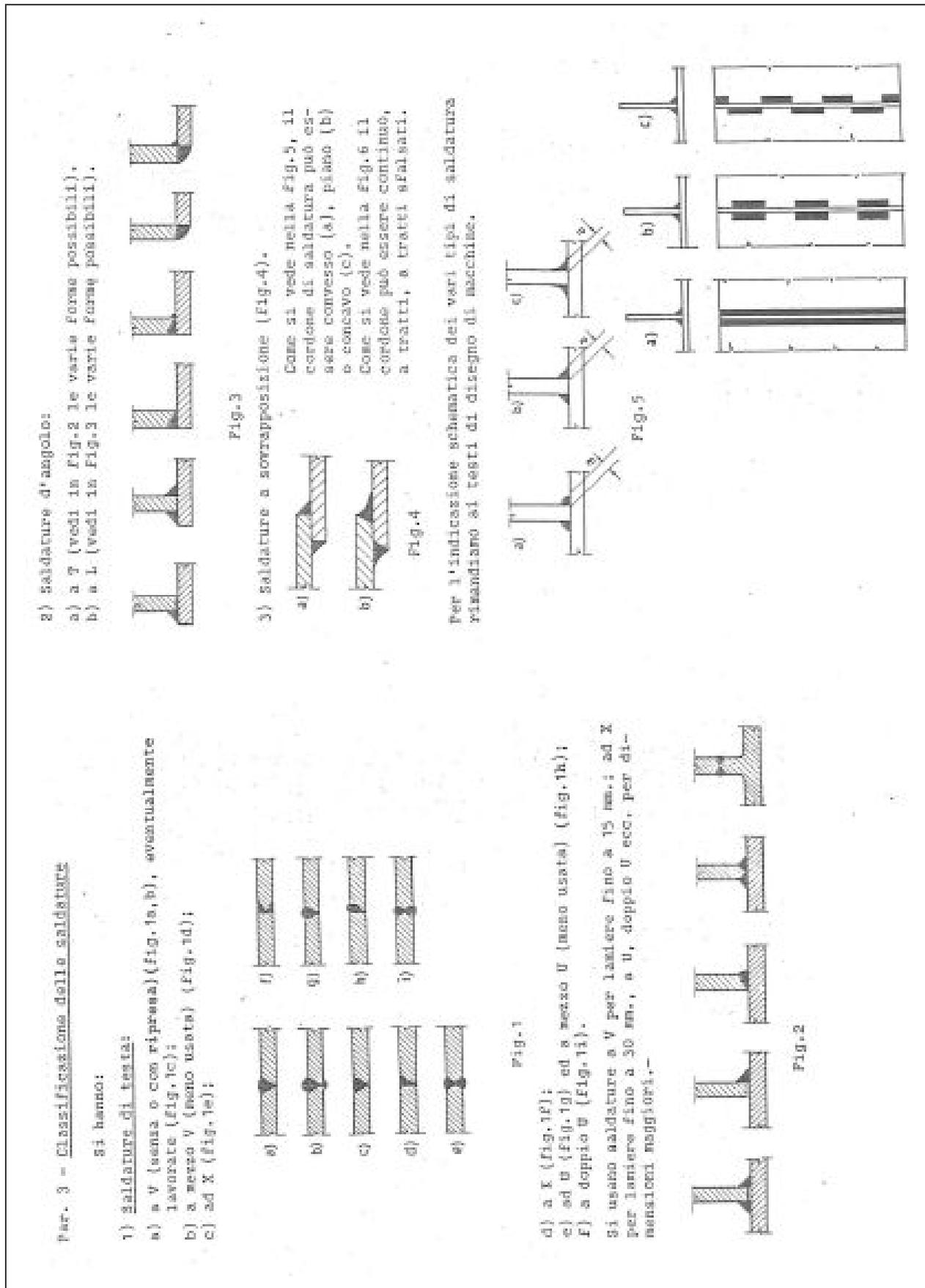


Figura 8-1: Giunti saldati

9 L'elettroerosione

9.1 Fondamenti

L'elettroerosione è una tecnologia di lavorazione ad asportazione di truciolo che utilizza le capacità erosive delle scariche elettriche. Per la particolarità del principio, questa tecnologia è in grado di lavorare solo materiali fortemente conduttori; essenzialmente i metalli.

Le macchine utensili realizzate per eseguire questo tipo di lavorazione vengono chiamate 'macchine per elettroerosione', o in inglese EDM (Electro Discharge Machining).

Inventata casualmente dai coniugi sovietici Lazarenko nel 1943, durante esperimenti sull'usura dei contatti elettrici. Immergendo i contatti per diminuirne l'usura in un bagno d'olio ottennero l'effetto contrario, l'elettroerosione ha subito un forte impulso solo con lo sviluppo dell'elettronica. Per le sue caratteristiche peculiari, oggi è una tecnologia di uso comune nell'industria, e addirittura necessaria nella produzione stampi (in particolar modo per componenti in plastica).

Una delle aziende che ha maggiormente contribuito nello sviluppo di questa tecnica è l'AGIE di Losone in Svizzera fondata nel 1954, con oltre 50 anni di storia nel settore e oltre un migliaio di brevetti. Ancor oggi leader nel settore.

Nel corso degli anni i processi si sdoppiarono tra elettroerosione a tuffo (EDM) e elettroerosione a filo (WEDM)

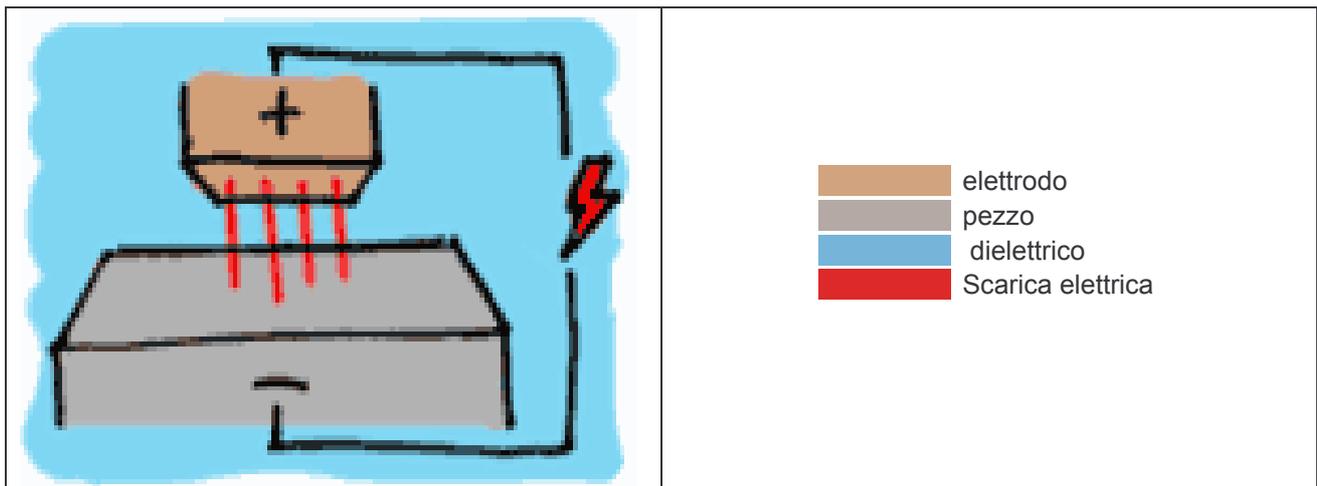


Figura 9-1: Elementi principali del processo elettroerosivo

Il compito del dielettrico (acqua o idrocarburo) è quello di ridurre la temperatura nella zona di lavorazione, di togliere le particelle di metallo residue e di consentire la creazione della scintilla.

9.2 Caratteristiche della lavorazione

Le principali caratteristiche della lavorazione per elettroerosione sono:

- **Possibilità di lavorare metalli molto duri** (acciai speciali, acciai rapidi, metalli duri, ecc...), o induriti con trattamenti termici o chimici (temprati, carburati, ecc...). Infatti, la durezza del materiale da lavorare ha un'influenza secondaria per quanto riguarda la velocità d'asportazione o l'energia da utilizzare nella lavorazione.
- **Possibilità di lavorare il pezzo creandovi qualsiasi figura geometrica o volumetrica.** Ciò è dovuto alla particolarità che l'elettroerosione non necessita di un utensile rotante. È possibile ottenere spigoli netti, creare nervature e cavità con forme o profili impossibili da realizzare con altre tecnologie.

Lezione n° 10: **Saldatura e tecnologie non convenzionali**

- **Velocità di lavorazione lenta** rispetto alle altre tecnologie ad asportazione di truciolo.
- Elevata usura relativa dell'utensile. Un valore tipico può essere 1-5%; cioè l'usura di 1-5 mm-cubi di utensile ogni 100 mm-cubi di materiale asportato.
- **Le superfici lavorate presentano sempre un certo grado di rugosità** (più o meno pronunciato, a seconda del grado di finitura). Questo è dovuto alla creazione di micro-crateri che sono il risultato dell'azione elettroerosiva (vedi sotto principio fisico).

9.3 Lavorazione per elettroerosione

Prodotte da un generatore di scintille, queste ultime, ad intervalli regolari, vanno a creare una successione di crateri nel pezzo. Ogni scintilla genera una temperatura compresa tra 8000 e 12000°C. La grandezza del cratere dipende dall'energia regolata dal generatore di scintille. La dimensione della scintilla varia tra qualche micron e un millimetro.

L'azione di lavorazione si attua avvicinando un utensile (definito elettrodo) al materiale da lavorare (definito pezzo), il tutto in un ambiente riempito da un dielettrico liquido. L'elettrodo viene alimentato con polarità positiva rispetto al pezzo, in quanto il materiale caricato negativamente subisce un'erosione superiore. Quando elettrodo e pezzo sono sufficientemente vicini, tra i due si innescano delle scariche che erodono il pezzo in modo complementare rispetto alla forma dell'elettrodo. La scelta del materiale

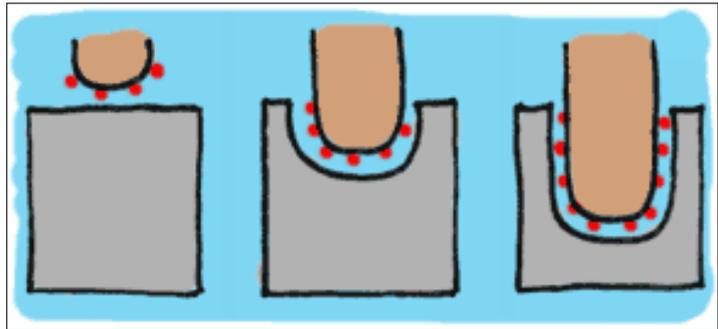


Figura 9-2

dell'elettrodo e il controllo delle caratteristiche delle scariche permettono di ottenere un forte squilibrio tra l'erosione dell'elettrodo (usura dell'utensile) e erosione del pezzo (lavorazione), a favore di quest'ultimo. Man mano che il pezzo viene eroso, l'elettrodo viene fatto avanzare, fino al completamento della lavorazione. Durante la lavorazione, l'elettrodo non entra mai in contatto con il pezzo, in quanto una cosa simile crea un cortocircuito che impedisce la creazione della scintilla.

Eccezionalmente, può essere applicata una polarità invertita rispetto a quanto precedentemente detto: ovvero applicare all'elettrodo una polarità negativa rispetto al pezzo. Questo avviene per lavorazioni particolari, come accoppiamenti di semistampi (dove l'erosione viene equipartita tra i due elementi) o forature tramite elettroerosione (dove l'elettrodo viene totalmente consumato).

Nella lavorazione non vengono creati normali trucioli: i residui della lavorazione vengono chiamati sfridi e assumono l'aspetto di microscopiche palline di metallo che si disperdono nel dielettrico.

La presenza di un dielettrico è fondamentale per la funzionalità della tecnologia, ed assolve vari scopi:

- permette il controllo della localizzazione della scintilla;
- fornisce ioni per la generazione della scarica;
- rimuove gli sfridi di lavorazione;
- raffredda elettrodo e pezzo.

Lezione n° 10: **Saldatura e tecnologie non convenzionali**

Perché la tecnologia possa funzionare correttamente, è necessario il controllo delle caratteristiche delle scintille. Infatti la scarica non è generata in maniera continua, ma consiste in una successione di micro-scariche prodotte da appositi dispositivi elettronici in grado di generare treni di impulsi controllati. I principali parametri elettrici controllati sono riportati in tab. 9.1.

Parametro	Valori tipici
Tensione d'innesco	alcune centinaia di volt.
Polarità	elettrodo positivo e pezzo negativo.
Corrente massima della scintilla	compresa tra 1 A e 500 A.
Durata della scintilla	compresa tra 10^{-6} s e $2 \cdot 10^{-3}$ s
Pausa tra una scintilla e la successiva	compresa tra 10^{-3} s e $30 \cdot 10^{-3}$ s

Tabella 9.1

9.4 Principio fisico

L'elettroerosione lavora sulla capacità termomeccanica delle scariche elettriche di erodere i materiali. L'azione erosiva delle scariche si può dividere in fasi:

1. Avvicinamento dell'elettrodo verso il pezzo
2. Applicazione tra elettrodo e pezzo di una forte tensione. In questa fase si crea un forte campo elettrico tra i due punti a minor distanza relativa (a minor distanza elettrodo/pezzo).
3. Rottura del dielettrico e apertura di un canale di scarica. In questa fase il forte campo elettrico accelera alcuni elettroni del pezzo che attraversano il dielettrico, questo genera un effetto valanga che rompe l'isolamento del dielettrico proprio in corrispondenza del punto dove il campo elettrico è più elevato. Si crea così un canale a bassa resistenza dove la corrente elettrica può passare.
4. Allargamento del canale di scarica e fusione del materiale. L'urto degli elettroni accelerati con le molecole di dielettrico, generano ulteriori elettroni liberi e ioni positivi che fungono da portatori di carica e vengono accelerati dal campo elettrico; conseguentemente si crea un canale di plasma ad altissima temperatura (migliaia di gradi) in grado di condurre molta corrente elettrica. Con il persistere della corrente di scarica, il canale tende ad allargarsi intorno al punto iniziale. Le aree dell'elettrodo e del pezzo a diretto contatto con il canale di plasma, sottoposte al bombardamento dei portatori di carica e alle alte temperature del canale, si fondono, creando dei piccoli crateri di materiale fuso.
5. Interruzione della scarica e implosione del canale di scarica. Interrompendo la corrente, il canale di plasma, non più alimentato da fonti di energia esterne, implode.
6. Espulsione del materiale dal cratere. Venendo improvvisamente a mancare la pressione sulla superficie del cratere, il materiale fuso viene risucchiato fuori, lasciando il cratere vuoto. Il materiale fuoriuscito si raffredda, solidificandosi in minuscole palline (sfridi).

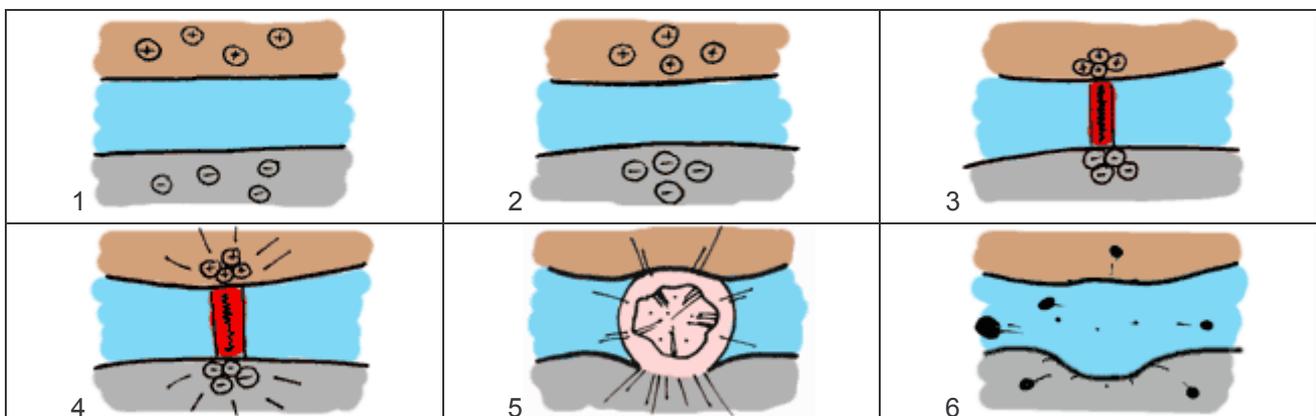


Figura 9-3

9.5 *Gli stati superficiali e la velocità di lavorazione.*

Gli stati superficiali dipendono dalla dimensione delle scintille. Se esse sono energiche, lo stato superficiale sarà grossolano ma la velocità di lavorazione sarà più rapida. Se esse sono più deboli, lo stato superficiale sarà fine ma la velocità di lavorazione sarà più lenta (Fig. 9-4).

Gli stati superficiali più fini possono raggiungere un Ra di 0.10. L'effetto visivo è quello della lappatura a specchio. Gli stati superficiali standard, facili da ottenere, sono equivalenti a un Ra 0.8/1 (N5 - N6).

Le velocità di lavorazione nell'elettroerosione sono moderate. In funzione dell'energia delle scariche l'asportazione del materiale va da 1 a oltre 1000 mm³ al minuto.

Benché si utilizzino scariche elettriche, il procedimento non presenta alcun pericolo per l'utilizzatore e per l'ambiente.



Figura 9-4



Figura 9-5: Aspetto superficiale delle superfici elettroerose

9.6 L'elettroerosione a tuffo

L'elettroerosione a tuffo riproduce in un pezzo metallico la forma di un utensile chiamato elettrodo.

Gli stampi ad iniezione per i pezzi in plastica sono lavorati molto spesso a tuffo.

La forma data all'elettrodo è quella che avrà l'oggetto stampato.

Nella zona di lavorazione ogni scarica crea un cratere nel pezzo (asportazione di materiale) e un impatto sull'utensile (usura dell'utensile elettrodo).

Non c'è mai un contatto meccanico tra l'elettrodo e il pezzo.

L'elettrodo è molto spesso in rame o in grafite.

9.7 L'elettroerosione a filo

L'elettroerosione a filo taglia un contorno programmato tramite un filo metallico (elettrodo).

Le matrici di estrusione, i punzoni di taglio sono molto frequentemente lavorati a filo.

Il taglio è sempre passante.

Per cominciare una lavorazione occorre prima effettuare un foro nel pezzo o iniziare dal bordo.

Nella zona di lavorazione ogni scarica crea un cratere nel pezzo (asportazione di materiale) e un impatto sul filo (usura dell'utensile-elettrodo).

Il filo può inclinarsi consentendo così di creare pezzi con spoglie o con profili differenti nella parte superiore e inferiore del pezzo.

Non c'è mai un contatto meccanico tra il filo e il pezzo.

Il filo è molto spesso in rame ricoperto o in ottone. Il filo ha un diametro tra 0.02 e 0.3 mm.

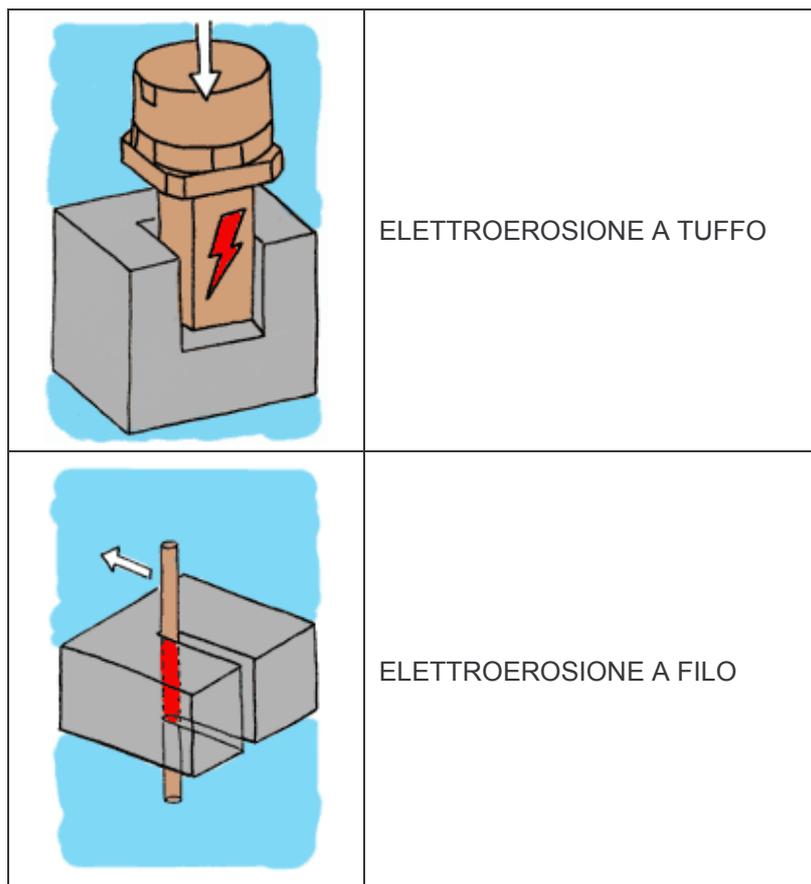


Figura 9-6

9.8 Bibliografia

F. GABRIELLI, Appunti dalle lezioni di Tecnologia Meccanica, Univ. Ancona – Facoltà di Ingegneria

AA. VV., *Manuale dello Stampista*, Tecniche Nuove, 2000

AGIE-CHARMILLES TECHNOLOGIES, Fondamenti dell'elettroerosione.

9.9 Argomenti della Lezione 10

8	La saldatura	124
8.1	Definizione	124
8.2	Sviluppo della saldatura	124
8.3	Principali procedimenti di saldatura	125
8.3.1	Saldatura ossiacetilenica	126
8.3.2	Saldatura ad elettrodo rivestito	126
8.3.3	Saldatura ad arco sommerso	127
8.3.4	Saldatura MIG/MAG	127
8.3.5	Saldatura TIG	128
8.4	Applicazioni della saldatura	128
8.5	Saldabilità dei metalli	129
9	L'elettroerosione	131
9.1	Fondamenti	131
9.2	Caratteristiche della lavorazione	131
9.3	Lavorazione per elettroerosione	132
9.4	Principio fisico	133
9.5	Gli stati superficiali e la velocità di lavorazione	134
9.6	L'elettroerosione a tuffo	135
9.7	L'elettroerosione a filo	135
9.8	Bibliografia	136
9.9	Argomenti della Lezione 10	136