

5. Collegamenti saldati.

Per saldatura si intende il processo mediante il quale si uniscono in modo fisso e continuo due pezzi, in genere metallici, mediante riscaldamento, con o senza l'azione combinata della pressione, con o senza apporto di materiale metallico.

Il primo oggetto saldato noto risale al 1350 a.C. circa: è un poggiatesta di ferro appartenente al corredo funerario del faraone Tutankhamon. Al di là delle curiosità storiche, è stata la bollitura l'unico processo di saldatura disponibile fino alla fine del XIX secolo, quando nel 1895 il chimico francese Charles Picard inventò il cannello ossiacetilenico. Si fa risalire al 1929 la costruzione di una struttura importante completamente saldata: un ponte sul fiume Sludwie, in Polonia.

L'impiego della saldatura comporta in genere la riduzione del costo globale, imputabile sia ad una maggiore rapidità di esecuzione, sia ad una maggiore leggerezza del manufatto; ad esempio, la carpenteria metallica saldata risulta più leggera di quella chiodata, fino al 20%. Inoltre, per l'esecuzione delle giunzioni saldate è spesso sufficiente che la struttura sia accessibile da un solo lato, mentre per le chiodature deve essere garantita l'accessibilità da entrambi i lati; ancora, le operazioni di saldatura si prestano all'impiego di procedure automatiche e all'adozione di tecniche di prefabbricazione. Tali pregi hanno fatto sì che la saldatura sostituisse la chiodatura in molti tipi di costruzioni, come ponti, carpenterie metalliche, navi, carrozzerie di autoveicoli, caldaie, ecc.

Per altro aspetto, il controllo delle saldature è più difficile di quello delle chiodature; per un attendibile esame dei cordoni di saldatura bisogna infatti ricorrere a specifiche prove quali l'esame radiografico o quello ultrasonoro.

Lo specifico processo di saldatura dipende dalle proprietà fisiche dei metalli, dal loro campo di utilizzazione e dagli impianti produttivi disponibili. Per quanto concerne la saldabilità, gli acciai a basso tenore di carbonio si saldano con facilità, mentre quelli con elevato tenore di carbonio e quelli legati sono meno facilmente saldabili e sono maggiormente soggetti alle cricche causate dalle tensioni interne originate dalla saldatura stessa; la saldatura della ghisa, come quella dei materiali non ferrosi, richiede particolari accorgimenti e non sempre è soddisfacente.

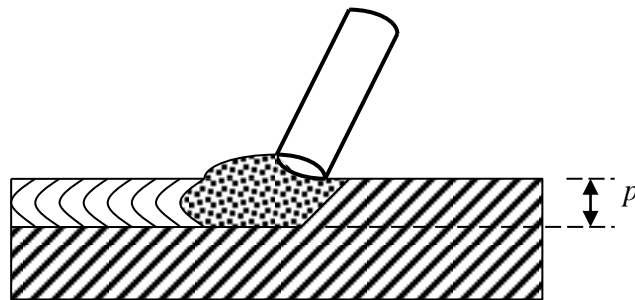
Classificazione dei processi di saldatura.

I processi di saldatura sono tradizionalmente classificati come indicato di seguito.

Processi di saldatura		
Saldatura autogena	Saldatura per fusione	A gas (o al cannello)
		All'arco
		All'idrogeno atomico
		Alla termite (o alluminotermica)
		Con fascio laser
	Saldatura a pressione (senza metallo d'apporto)	A fuoco o bollitura
		Elettrica a resistenza
Elettrica a scintillio		
Saldatura eterogena	Saldobrasatura	
	Brasatura	Forte
		Dolce

Saldatura per fusione.

Si realizza per apporto di calore, che fonde i lembi accostati dei pezzi da collegare ed il materiale d'apporto, dello stesso tipo di quello base, che viene depositato tra i bordi; il metallo fuso, solidificando, forma il cosiddetto cordone di saldatura. Dal punto di vista metallurgico, si distinguono tre zone: quella fusa, quella alterata termicamente, adiacente alla precedente, e quella che non è stata alterata dal processo di saldatura. Quando gli spessori in gioco sono piccoli, orientativamente inferiori ai 4 mm, i bordi possono essere accostati senza alcuna preparazione, altrimenti bisogna eseguire uno smusso su uno o su entrambi i lembi da collegare. Importante a tal proposito è la penetrazione p , cioè la profondità del bagno di fusione all'interno del metallo base.



Definizione della penetrazione

La saldatura a gas, detta anche al cannello dal nome dello strumento impiegato, utilizza il calore generato da una fiamma prodotta dalla combustione di ossigeno con un gas combustibile; tra questi, i più diffusi sono l'acetilene e l'idrogeno; sono pure usati il gas illuminante, il metano, il propano, il butano, l'etilene. Si raggiungono temperature elevate all'interno della fiamma: 3120°C per quella ossiacetilenica, 2480°C per quella ossidrica, 2730°C per quelle ossimetanica ed ossipropanica, 2800°C per quella ossi-gas illuminante, 2830°C per quella ossibutanica, 2850°C per quella ossietilenica. Questo procedimento di saldatura è molto diffuso per la sua versatilità in quanto può essere effettuato con una

attrezzatura portatile, non richiede alcuna sorgente di energia elettrica e può essere applicato con buoni risultati a tutti i metalli.

La saldatura all'arco sfrutta il calore generato dall'arco elettrico che si stabilisce fra due elettrodi, di cui generalmente uno è il materiale base e l'altro è il metallo d'apporto. Quello all'arco è il procedimento più diffuso per la saldatura dell'acciaio.

La saldatura all'idrogeno atomico utilizza il calore dell'arco elettrico innescato tra due elettrodi refrattari di tungsteno per dissociare in atomi le molecole dell'idrogeno soffiato da appositi ugelli; gli atomi, a poca distanza dall'arco, si ricompongono e producono il calore che fonde il materiale di apporto addotto in forma di filo continuo o di bacchetta. L'arco in questione è detto indiretto perché il metallo base non funge da elettrodo. Il procedimento è applicato agli acciai e alle leghe leggere.

La saldatura alla termite, messa a punto nel 1903, utilizza il calore prodotto dalla reazione chimica ($8 \text{ Al} + 3 \text{ Fe}_3\text{O}_4 = 9 \text{ Fe} + 4 \text{ Al}_2\text{O}_3$) fortemente esotermica che si innesca fra i componenti della termite (miscela di ossidi di ferro e polvere di alluminio) quando viene riscaldata in un punto a circa 1000°C con uno speciale innesco. La termite quindi raggiunge alte temperature, tra 2500 e 3000°C , e risulta costituita da ferro fuso su cui galleggia l'ossido di alluminio di minore densità; essa, fatta colare dal crogiuolo in una forma disposta intorno ai pezzi da unire, li salda grazie all'elevata temperatura ed al ferro fuso che funge da materiale di apporto. Questo processo è utilizzato soprattutto per la saldatura sul posto di barre massicce di acciaio, tipicamente delle rotaie ferroviarie.

Saldatura a pressione.

Nelle saldature per pressione i lembi vengono riscaldati fino al punto di pastosità, cioè di incipiente fusione, e quindi pressati tra loro.

La bollitura, praticata per secoli dai fabbri, è oggi in disuso. I pezzi vengono riscaldati alla temperatura di rammollimento, circa 1200°C nel caso dell'acciaio dolce e 1100°C per quello duro, in una fornace o con il cannello ossiacetilenico, e poi sovrapposti e martellati sull'incudine o pressati, senza apporto di materiale.

Nella saldatura elettrica a resistenza il calore è prodotto da una corrente elettrica per effetto Joule, secondo l'espressione $Q = kRI^2t$, ove è R la resistenza, I l'intensità di corrente, t il tempo di passaggio della corrente e k un fattore riduttivo per le perdite di calore disperse nell'ambiente. I due pezzi sono pressati l'uno contro l'altro da elettrodi in rame raffreddati con circolazione d'acqua: sui bordi a contatto si crea una resistenza elettrica molto grande, per cui al passaggio della corrente si sviluppa una quantità di calore sufficiente a provocare una fusione locale. Questo procedimento è usato soprattutto per la realizzazione di lamierati sottili di acciaio e di alluminio, ad esempio per la costruzione di carrozzerie di automobili e di carcasse di elettrodomestici, e laddove siano richieste saldature ripetitive effettuate da macchine automatiche o semiautomatiche.

Nella saldatura elettrica a scintillio il calore è prodotto da molti piccoli archi elettrici che si formano tra le asperità superficiali dei due pezzi, che fungono da elettrodi e sono posti

a contatto e compressi tra loro. Il procedimento è usato, ad esempio, per il collegamento di tubi.

Nella saldatura per attrito il calore è generato dallo sfregamento dei due lembi posti in moto relativo e pressati l'un contro l'altro. Il processo è utilizzato per unire le estremità di barre e tubi tra loro o con lamiere.

Si riporta talvolta tra le saldature a pressione quella per esplosione, che consente di ottenere l'unione di due metalli, ad esempio in una placcatura, utilizzando la pressione provocata da un'esplosione; in tal caso l'unico calore che entra in gioco è quello dovuto alle forze che, al momento dell'esplosione, premono le superfici da saldare l'una contro l'altra.

Saldobrasatura.

Nella saldobrasatura il collegamento avviene con metodo simile a quello della saldatura autogena a gas, senza però che il materiale base, che pure è riscaldato, venga portato a fusione. Si fa colare un materiale d'apporto ad alto punto di fusione (circa 900°C), ma inferiore a quello del metallo base, tra i lembi preventivamente smussati ed accostati; il preriscaldamento dei lembi e la fusione del materiale d'apporto si ottiene a mezzo del cannello a gas. L'unione tra il metallo d'apporto, che svolge la funzione di legante, e quello base si verifica perché tra essi vengono a formarsi leghe di transizione. Il tipo di metallo d'apporto dipende dai materiali delle parti da collegare; uno tipico è l'ottone con modeste aggiunte di altri elementi quali silicio, manganese, nichel, stagno, argento. Il processo è usato per saldare ghisa ed acciaio dolce, quando sia da evitare il riscaldamento eccessivo dei pezzi, e pezzi di metalli differenti; è poco adatto invece per le leghe di alluminio.

Brasatura.

La brasatura, o brasatura capillare, si esegue infiltrando per capillarità fra le superfici sovrapposte dei pezzi da collegare, non cianfrinati, una lega brasante. A seconda che il punto di fusione del materiale di apporto, comunque inferiore a quelli dei materiali base, sia più o meno elevato, la brasatura si dice forte (tipicamente tra 850 e 900°C per l'ottone o 600°C per le leghe di Cu e Ag) o dolce (tipicamente tra 150 e 300°C per lo stagno). Con la brasatura forte si realizzano giunti caratterizzati da elevata resistenza meccanica; con quella dolce si realizzano invece giunti che possono essere facilmente rimossi quando occorra effettuare riparazioni. Una tipica applicazione della brasatura dolce è l'assemblaggio di componenti elettronici.

Tecniche di saldatura e taglio dei cantieri navali.

Fino all'avvento della saldatura, i giunti delle navi in acciaio erano realizzati mediante chiodatura. Questo sistema di collegamento consiste nel sovrapporre le due parti da collegare, preventivamente forate, nell'infilare il chiodo nelle forature e nel ribadire a caldo l'estremità sporgente del gambo del chiodo, in modo da formare una controtesta analoga all'altra propria del chiodo. La contrazione del gambo durante il raffreddamento fa sì che esso sia soggetto a trazione, mentre le lamiere restano compresse. Pertanto il collegamento è assicurato non dalla

resistenza a taglio del gambo del chiodo, ma dalle forze di attrito tra le superfici a contatto. Lo stagno del collegamento è poi assicurato dal calafataggio; questo consiste nel ricalcare mediante scalpello gli orli delle lamiere e le teste dei chiodi, comprese quelle ribadite. A tal fine gli orli delle lamiere da calafatare devono essere preventivamente smussati ed incisi.

La saldatura ha sostituito la chiodatura perché:

- richiede manodopera meno specializzata;
- si riducono i tempi di fabbricazione;
- si riduce sensibilmente il peso scafo, non essendo necessarie sovrapposizioni di lamiera, cantonali di collegamento, ali di attacco nei profilati;
- si ottiene automaticamente lo stagno;
- si ripristina la continuità del materiale.

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dal fatto che uno scafo saldato può subire gravi danni, senza per questo perdere l'impermeabilità; invece le chiodature, allentandosi, darebbero luogo ad una falla. Si ha pure che la carena saldata è più liscia ed offre minore resistenza all'avanzamento.

Le tecniche di saldatura più diffuse sono le seguenti.

- Saldatura ossiacetilenica.
- Saldatura ad arco con elettrodo rivestito.
- Saldatura ad arco sotto gas.
- Saldatura a gas-tungsteno.
- Saldatura al plasma.
- Saldatura ad arco sommerso.
- Saldatura ad elettro-scoria o elettro-gas.
- Arco-saldatura di prigionieri.
- Saldatura laser.
- Friction stir welding.

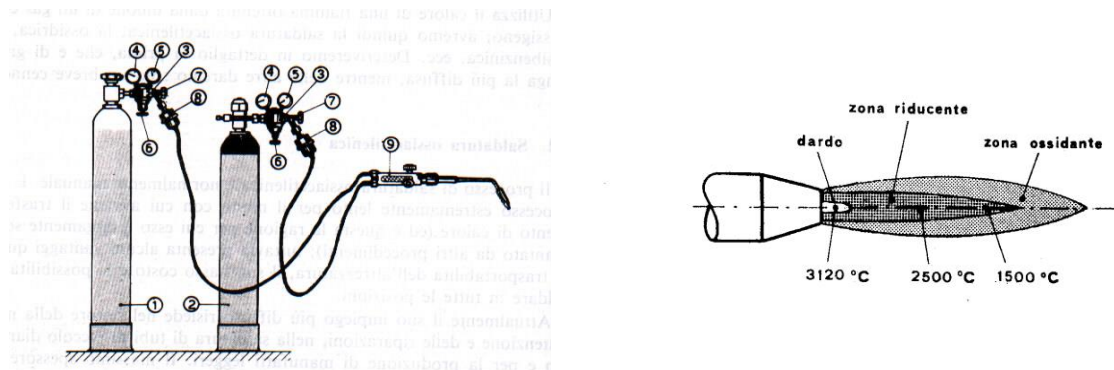
Saldatura (OAW, OxyAcetylene Welding) e taglio (oxygen cutting) ossiacetilenico.

La saldatura ossiacetilenica utilizza come sorgente di calore la fiamma ossiacetilenica, ottenuta bruciando acetilene con ossigeno. I due gas sono contenuti in due bombole separate, da cui vengono fatti affluire in un apposito cannello terminante in un ugello, all'uscita del quale si realizza la combustione. Il cannello è realizzato in modo da creare una fiamma con all'interno una zona conica molto luminosa, detta dardo, ove avviene la trasformazione: $C_2H_2 + O_2 = 2 CO + H_2 + 444 \text{ kJ}$; alla punta del dardo si raggiunge la temperatura massima di 3120°C. Le elevate temperature consentono la saldatura diretta, per fusione dei lembi da unire, o con materiale d'apporto, utilizzando apposite bacchette o filo metallico.

Per certi metalli, ad esempio l'alluminio e l'acciaio inossidabile, si impiegano pure polveri o paste solventi; esse reagiscono con gli ossidi del metallo base, che hanno temperature di fusione maggiori di quelle del metallo base stesso, trasformandoli in composti

fusibili alla temperatura di saldatura; questi solventi possono essere applicati, come rivestimento, sulle bacchette di materiale d'apporto.

Variando la composizione della miscela gassosa, è possibile regolare la fiamma: se il contenuto di ossigeno è superiore in volume a quello dell'acetilene, si ha una fiamma ossidante; se i contenuti sono gli stessi, si ha una fiamma neutra; se l'acetilene è prevalente, si ha una fiamma carburante, detta pure riducente. Per la saldatura dell'acciaio bisogna far ricorso alla fiamma neutra, altrimenti si avrebbe la decarburazione o la carburazione del bagno fluido ed altre alterazioni metallurgiche. La saldatura ossiacetilenica è più lenta di altri procedimenti, perché l'apporto di calore è relativamente modesto, ed inoltre non si presta a procedimenti semiautomatici od automatici; per tale motivo essa è poco utilizzata in cantiere per la costruzione dello scafo. Per altro aspetto, l'apparecchiatura è maneggevole e si presta alla messa in opera di componenti di allestimento, lamierini e tubi in piccolo spessore.



Schemi dell'impianto e della fiamma della saldatura ossiacetilenica.

La fiamma ossiacetilenica, talvolta anche quella ossigeno-propano, accoppiata con un getto di ossigeno sotto pressione, è applicata per il taglio termico dei metalli e la cianfrinatura dei giunti; queste operazioni sono ottenute non per fusione, ma per ossidazione del materiale, sfruttando la proprietà dei metalli di bruciare quando sono riscaldati ad elevata temperatura in un'atmosfera di ossigeno. Il procedimento consiste infatti nell'investire il pezzo, portato ad alta temperatura dalla fiamma ossiacetilenica, con un getto di ossigeno che, combinandosi con il metallo, forma un ossido che viene asportato dall'energia cinetica del getto di ossigeno stesso. Allo scopo si utilizza un cannello speciale che ha, all'interno di quello anulare della miscela combustibile, un condotto centrale da dove fuoriesce il getto di ossigeno, che è detto correntemente getto di taglio.

Perché il principio possa essere applicato, devono essere verificate le seguenti condizioni:

- la temperatura di innesco della reazione di ossidazione deve essere inferiore a quella di fusione del metallo;
- la reazione di ossidazione deve essere fortemente esotermica, per innalzare la temperatura del materiale e consentire così l'avanzamento del taglio;
- l'ossido che si forma deve fondere ad una temperatura inferiore a quella del metallo da tagliare.

Queste condizioni sono rispettate nel caso degli acciai al carbonio e debolmente legati, per cui la temperatura di innesco è di circa 1350°C e si ha la seguente reazione: $3 \text{ Fe} + 2 \text{ O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 1.121 \text{ MJ}$. Per questi materiali la tecnica è largamente applicata: in manuale è possibile tagliare fino a spessori di 50 mm con velocità di circa 30 cm/min, mentre in automatico si può arrivare fino a 350 mm con velocità di circa 10 cm/min. Per quanto riguarda altri materiali, l'ossitaglio può essere applicato agli acciai inossidabili ed alle ghise solo adottando speciali accorgimenti, mentre non può essere applicato all'alluminio, al rame ed ai metalli refrattari.

Saldatura ad arco.

Gran parte dei procedimenti di saldatura utilizzati nei cantieri navali sfrutta l'arco elettrico come sorgente di calore.

Con arco elettrico o voltaico si intende il fenomeno prodotto dal passaggio di elettricità in un gas divenuto conduttore a causa della ionizzazione delle particelle che lo compongono; per effetto degli urti tra le particelle cariche che migrano verso l'elettrodo di polarità opposta, si generano forti quantità di calore ed una intensa luminosità.

La colonna centrale intensamente luminosa di gas ionizzato che si forma tra i due elettrodi è detta fuso; in essa si raggiungono temperature elevate, dell'ordine di 5500 ÷ 5800°C nella tecnica con elettrodi rivestiti, di 7000°C in quella a filo continuo, di 15000°C in quella al plasma; il fuso è circondato da una aureola di gas a temperatura minore, sede di fenomeni di combustione. Elevate temperature si raggiungono pure alle estremità degli elettrodi. In particolare gli ioni positivi sono accelerati verso il polo negativo, si scontrano con gli elettroni emessi dal catodo, si neutralizzano e sviluppano notevoli quantità di calore: nella tecnica con elettrodi rivestiti la zona catodica raggiunge temperature comprese tra 2000 e 3200°C e temperature più elevate, comprese tra 2300 e 4000°C, si raggiungono all'anodo per effetto del bombardamento elettronico. Quando il metallo base è l'elettrodo positivo di un circuito a corrente continua, si parla di polarità diretta (ccpd), altrimenti di polarità inversa (ccpi). Comunque l'arco può essere alimentato anche con corrente alternata (ca).

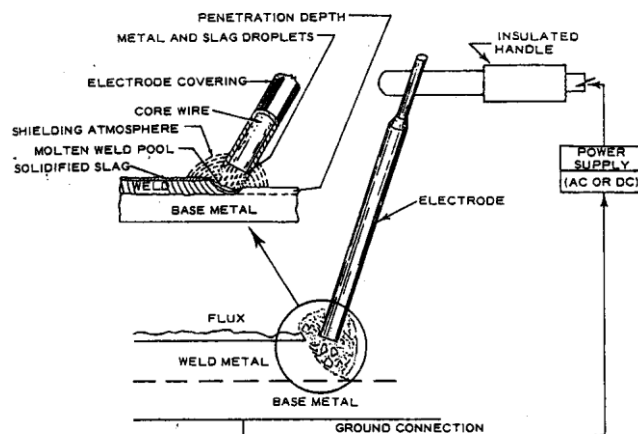
A regime, il catodo emette elettroni per effetto termoionico, date le elevate temperature che vi si raggiungono; sono perciò sufficienti differenze di potenziale di poche decine di volt, tipicamente tra 25 e 30V. A freddo sarebbe invece necessario un campo elettrico particolarmente intenso, con differenze di potenziale dell'ordine di svariate migliaia di volt; l'arco viene allora adescato innalzando la temperatura del catodo. Per ottenere ciò esistono varie tecniche, di cui la più semplice e diffusa consiste nel porre in corto circuito i due elettrodi e quindi generare il necessario apporto di calore per effetto Joule.

Il processo di saldatura dipende fortemente dall'apporto termico specifico, cioè per unità di lunghezza di cordone; esso è definito da: $q = hVI/v$, ove v è la velocità di saldatura, V ed I sono la tensione e l'intensità di corrente, h è la frazione dell'energia dell'arco trasferita agli elementi da collegare sotto forma di calore. In generale, all'aumentare di q cresce il volume del bagno di fusione, si riduce la velocità di raffreddamento e tende ad ingrossarsi la grana.

Per quanto riguarda la caratteristica interna dell'arco, cioè il legame tra la tensione e l'intensità di corrente, vale la legge di Ohm: $V = R I$; la resistenza si esprime, come per i conduttori metallici, con l'espressione $R = \rho l/s$, ove ρ , l ed s sono la resistività, la lunghezza e l'area della sezione del fuso; quest'ultima però, come pure la resistività, dipende anche dall'intensità di corrente, perché all'aumentare di questa aumenta il grado di ionizzazione, aumenta la sezione del fuso ed in definitiva si riduce la resistenza, finché per un certo valore dell'intensità di corrente, detta corrente di saturazione, il fenomeno si stabilizza. Pertanto per i valori inferiori di I , cioè in regime di arco libero, la caratteristica interna non è né lineare, né proporzionale, ma a tensione discendente. Per i valori superiori, cioè in regime di arco strozzato, la caratteristica è a tensione ascendente. Le densità di corrente, cioè per unità di superficie dell'elettrodo, sono dell'ordine di 15 A/mm^2 per gli elettrodi rivestiti, maggiori per le altre tecniche; le intensità di corrente sono dell'ordine delle centinaia di A.

Saldatura ad arco con elettrodo rivestito (SMA, Shielded Metal Arc welding).

L'elettrodo, innestato in una pinza porta-elettrodo, è una bacchetta costituita da un'anima metallica rivestita da una sostanza fondente, minerale od organica, che svolge molteplici funzioni, elettriche, chimiche, depuranti e soprattutto protettive, cioè la funzione di proteggere il metallo fuso e l'arco dalla contaminazione atmosferica. Bisogna infatti considerare che a temperature elevate l'ossigeno e l'azoto dell'atmosfera tendono a reagire col metallo, rendendolo più fragile. Sotto l'azione dell'arco, l'anima fonde e si deposita a gocce nel bagno di fusione; il rivestimento in parte fonde e, reagendo con le impurità del metallo quali fosforo e zolfo, forma una scoria, prima liquida, poi solida, sopra il bagno di fusione, che così risulta protetto, almeno in parte, dall'ossidazione e dalla nitrurazione; la rimanente parte del rivestimento volatilizza, creando un flusso di gas ionizzati che protegge le gocce di metallo d'apporto fuso, le proietta verso il giunto e stabilizza l'arco elettrico.



Schema di saldatura con elettrodo rivestito.

La tecnica è estremamente versatile, per cui è la più comunemente adottata per la saldatura manuale; ha però lo svantaggio di essere lenta, non foss'altro che per sostituire

frequentemente l'elettrodo, lungo tra 230 e 460 mm, e per rimuovere lo strato di scoria. Perciò si ricorre alla saldatura ad arco a filo continuo.

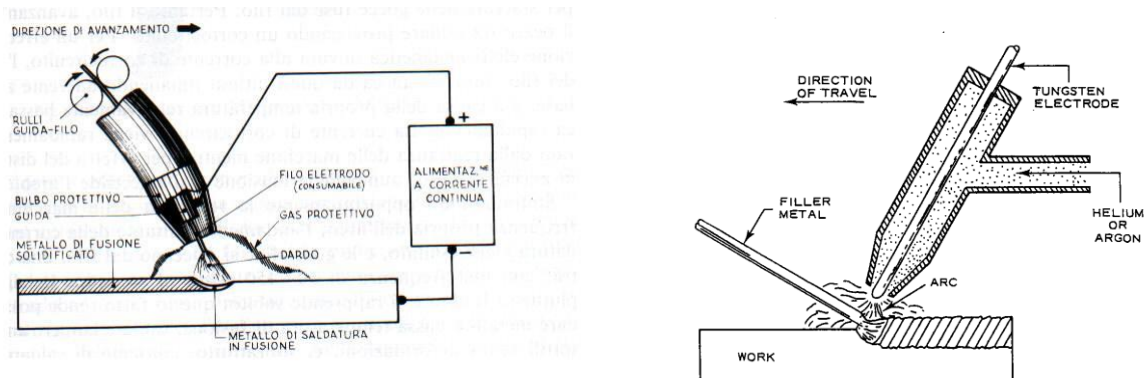
Saldatura ad arco sotto gas (MIG/MAG, Metal Inert Gas/Metal Active Gas welding).

In tale processo, detto anche a filo continuo, il filo nudo di metallo d'apporto si svolge con continuità da una bobina e funge da elettrodo; esso è manovrato tramite una speciale pistola, ove trova collocazione anche il condotto di adduzione del gas.

L'azione protettiva della saldatura è svolta da un flusso di gas attivo (MAG) od inerte (MIG). Nel procedimento MAG il gas, tipo CO₂, è economico, ma ad alta temperatura ha un'azione fortemente ossidante; esso si presta alla saldatura degli acciai dolci. Nel procedimento MIG il gas, tipicamente argo o elio, è inerte, ma costoso. La tecnica MIG è la più diffusa per saldare le leghe leggere, in quanto l'atmosfera inerte fornisce una efficace protezione dall'ossidazione, fenomeno cui l'alluminio è particolarmente sensibile; è pure indicata per altri materiali pregiati quali l'acciaio inossidabile, il rame, il nichel.

Il filo, invece che pieno, può essere animato, cioè cavo con un'anima fondente costituita da graniglia disossidante ed additivi; in tale versione la tecnica prende il nome di FCAW, da Flux-Cored Arc Welding, ed è utilizzata per la saldatura degli acciai dolci, anche in assenza di gas protettivo.

La saldatura sotto flusso gassoso è più efficiente di quella ad elettrodo rivestito per: l'alimentazione continua del metallo d'apporto; l'assenza di scorie; la visibilità del bagno di fusione; le maggiori intensità di corrente; per contro l'apparecchiatura è più complicata. La tecnica è per lo più realizzata con procedura automatica o semiautomatica. Quando la corrente dell'arco è elevata, le goccioline di metallo d'apporto fuso sono proiettate violentemente verso il pezzo ed in queste condizioni è possibile effettuare saldature sovratesta.



Schemi di saldature MIG/MAG e TIG.

Saldatura a gas-tungsteno (TIG, Tungsten Inert Gas, o GTA, Gas Tungsten Arc).

In questo procedimento sotto gas, l'arco è innescato tra il metallo base ed un elettrodo refrattario di tungsteno; l'elettrodo, che ovviamente non fonde, è posto in una torcia di saldatura insieme ai condotti per soffiare il gas inerte di protezione, di solito argo in area europea, elio in area americana, ed a quelli dell'acqua di raffreddamento. L'apporto di calore

è relativamente modesto, per cui si ottiene una struttura raffinata, anche per l'effetto refrigerante del flusso di gas. La tecnica è largamente usata in manuale, ma trova applicazione anche in semiautomatico; il metallo d'apporto è addotto separatamente, nel primo caso in forma di bacchetta, in forma di filo continuo nel secondo caso. Questo processo, per quanto lento, può essere usato con la maggior parte dei metalli e produce saldature di alta qualità per la facilità di controllo dell'arco e la regolarità del deposito. In cantiere è spesso utilizzato per la saldatura dell'alluminio e di lamiere e tubi di acciaio in piccolo spessore, in tal caso perché possono utilizzarsi basse intensità di corrente evitando sfondamenti; è pure utilizzato per la prima passata di un cordone a più passate.

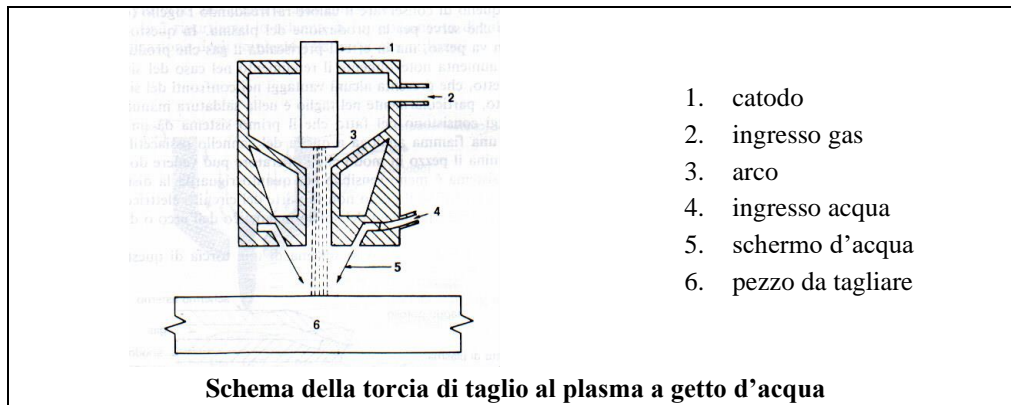
Saldatura e taglio al plasma (PAW, Plasma Arc Welding).

Questo procedimento costituisce una estensione di quello TIG. Un arco-pilota è mantenuto tra l'elettrodo di tungsteno ed una camera in rame (anodo) che lo circonda; sotto l'elettrodo vi è un ugello di piccolo diametro attraverso cui il gas plasmagenico è costretto a passare; l'arco-plasma risulta quindi strozzato e l'adduzione di calore è focalizzata nella zona da saldare, dove si raggiungono elevate densità di potenza. Ne risulta una elevata precisione ed una maggiore produttività rispetto alla tecnica TIG. Il gas protettivo è argo od elio ed è soffiato attraverso un condotto anulare.

L'arco-plasma è poco utilizzato in cantiere per operazioni di saldatura, ma molto per operazioni di taglio termico. Contrariamente al taglio ossiacetilenico, quello al plasma avviene per fusione e non per ossidazione; infatti la colonna di plasma, grazie alla sua densità di potenza ed alla velocità di uscita dall'ugello, genera un foro passante nel materiale, impedendone la successiva solidificazione.

La torcia di taglio possiede due condotti coassiali; in quello centrale è soffiato il gas, aria od ossigeno, che genera il plasma; in quello anulare è soffiato gas inerte, come argo o azoto, a protezione del materiale tagliato, se reattivo, altrimenti lo stesso gas plasma-genico, come nel caso degli acciai comuni. Nel condotto anulare può essere iniettata anche acqua; questa restringe viepiù la colonna di plasma e contribuisce al raffreddamento del materiale tagliato; con questa tecnica, detta a schermo d'acqua, si ottengono tagli più netti e puliti. Inoltre il pezzo è spesso immerso in acqua durante il taglio; si evitano così rumori, fumi e schizzi di materiale incandescente.

La velocità di taglio può superare, anche di tre volte, quella del cannello ossiacetilenico, ma si riduce con lo spessore, sicché spessori di acciaio superiori a 50 mm vengono tagliati più economicamente col cannello e già per spessori di 20 mm le due tecniche sono concorrenziali. Caratteristiche del taglio al plasma sono la buona qualità del taglio, per cui i bordi possono essere smussati più agevolmente che con l'ossitaglio, ed i costi contenuti, generalmente inferiori a quelli del taglio laser.



Taglio all'arco con elettrodo di carbone (air carbon arc cutting).

Anche il taglio all'arco avviene per fusione, ed un getto molto veloce di aria compressa provvede alla rimozione del metallo fuso. Questo taglio è rumoroso, poco preciso e costoso, per cui è utilizzato occasionalmente per lavorazioni speciali, su ghise e metalli non ferrosi.

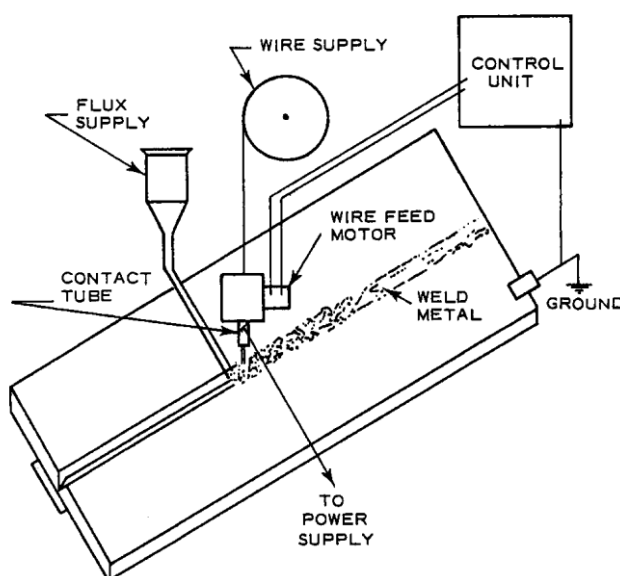
Saldatura ad arco sommerso (SAW, Submerged Arc Welding).

In questo processo l'arco, la punta dell'elettrodo ed il bagno di fusione sono protetti da un flusso di materiale granulare fondente, del tipo di quello utilizzato nei fili animati delle saldature sotto gas, alimentato da una tramoggia; questo flusso sommerge l'arco e lo rende invisibile.

L'elettrodo è un filo continuo, ramato o nichelato per protezione, ad alimentazione continua; talvolta se ne utilizzano due o tre contemporaneamente. Il flusso, costituito da silicati di manganese o da silicati di calcio, in parte fonde, e lo si ritrova come scoria vetrificata sul cordone; la parte residua può essere utilmente recuperata.

Si hanno elevati rapporti di diluizione, tra il 60 ed il 70% a fronte del 20% della tecnica ad elettrodi rivestiti, e quindi grandi volumi del bagno di fusione; per questo motivo e per le esigenze connesse con la deposizione del flusso è necessario che la saldatura avvenga in piano.

Con la saldatura ad arco sommerso si realizzano grandi velocità di saldatura, perché possono impiegarsi elevate intensità di corrente e quindi alti gradi di fusione, sia del metallo d'apporto, sia del metallo base, e profonde penetrazioni; perciò è la tecnica più diffusamente applicata per la saldatura automatica dell'acciaio. Il procedimento semiautomatico è invece poco usato, anche perché l'arco è nascosto. La tecnica è pure utilizzata per le cosiddette saldature one-side, cioè saldature senza ripresa che evitano i costi necessari per il ribaltamento dei pezzi e per l'esecuzione della ripresa. Inoltre il procedimento non produce irraggiamenti o fumi, grazie al flusso granulare che protegge l'arco. Per altro aspetto, l'elevato apporto di calore dà luogo ad una solidificazione lenta e di conseguenza ad una granulometria grossolana; aumenta inoltre il rischio di formazione di cricche a caldo.



Schema di saldatura ad arco sommerso.

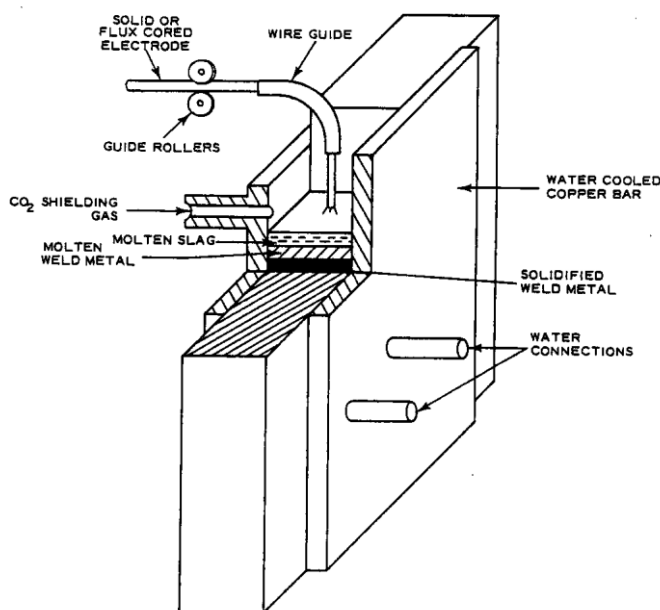
Saldature ad elettroscoria ed elettrogas (ES/EG, ElectroSlag/ElectroGas welding).

Sono processi analoghi a quelli ad arco sommerso ed all'arco sotto gas, rispettivamente, salvo che il bagno di fusione è confinato, come in un crogiolo, all'interno di una coppia di pattini di rame mobili posti a cavallo del giunto, che deve essere verticale.

Nel procedimento ad elettroscoria l'arco elettrico svolge la sua funzione solo inizialmente, per la formazione di un bagno di scoria fusa ottenuta dal fondente granulare, che poi rimane sempre lo stesso, salvo modesti reintegri per mantenere il livello del bagno. A regime l'elettrodo è annegato nel bagno ed il necessario apporto di calore è assicurato per effetto Joule dal passaggio della corrente attraverso il bagno di scoria, che perciò deve possedere la giusta resistività; questo apporto di calore mantiene il bagno ad una temperatura tale da fondere il metallo base e l'elettrodo di metallo d'apporto, che può essere pieno od animato; possono utilizzarsi contemporaneamente anche due o tre elettrodi. Possono così saldarsi con un'unica passata fortissimi spessore, oltre i 50 mm.

Nel procedimento ad elettrogas, adatto per spessori tra 12 e 35 mm, l'arco è sempre in azione ed il bagno di fusione è protetto da un'atmosfera costituita tipicamente da CO₂ o una miscela di CO₂ ed argo.

Sono questi processi automatici con cui possono realizzarsi elevate velocità di saldatura, ma nella zona di saldatura si generano sensibili variazioni della struttura metallurgica per effetto degli elevati apporti di calore; in particolare ne risulta una struttura a grana grossa, ancor più che nel caso della saldatura ad arco sommerso.



Schema di saldature ad elettroscoria ed elettrogas.

Arco-saldatura di prigionieri (SW, Stud Welding).

È questa una tecnica semiautomatica per fissare rapidamente ad una lamiera prigionieri, quali perni, spinotti, bulloni, piastrine, con diametri fino a 25 cm. Il prigioniero è applicato all'estremità di una pistola saldante e funge da elettrodo. Dopo la fusione della sua estremità e dell'area di fissaggio sulla lamiera, il prigioniero è spinto da una molla contro la lamiera ed avviene la saldatura. Il prigioniero è spesso coronato da una ghiera in ceramica che concentra il calore nella zona di attacco ed evita lo spandersi del metallo fuso.

Saldatura (LBW, Laser Beam Welding) e taglio (laser beam cutting) laser.

Il laser è un dispositivo che permette di ottenere fasci di luce monocromatica e coerente, cioè fasci composti da onde con piccolissima dispersione intorno ad una lunghezza d'onda, tutte con la stessa fase.

Il principio di funzionamento del laser risiede nella natura quantistica del legame tra la materia e le radiazioni elettromagnetiche: $E_2 - E_1 = h f$, ove E_1 ed E_2 sono due livelli energetici di un atomo o di una molecola, f è la frequenza della radiazione e h è la costante di Planck.

Una particella col livello superiore E_2 può portarsi al livello inferiore E_1 secondo due modalità:

- per emissione spontanea, emettendo spontaneamente un fotone di frequenza f ;
- per emissione stimolata quando, stimolata da un fotone con frequenza f , ne emette un secondo identico, cioè con la stessa frequenza e la stessa fase di quello incidente, amplificando così il fascio di luce.

Su tale seconda modalità si basa il funzionamento del laser, che perciò prende nome dall'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Un materiale con caratteristiche tali da permettere l'amplificazione è detto mezzo attivo; esso può essere un cristallo, un gas, una soluzione. Comunque, perché il fenomeno sia stabile, è necessario che un sistema di pompaggio produca l'inversione di popolazione del mezzo attivo, cioè deve essere fornita sufficiente energia perché la maggior parte degli atomi o delle molecole sia eccitata a livelli energetici più elevati di quello di riposo.

Il mezzo attivo è posto all'interno di una cavità risonante confinata tra due specchi piani e paralleli, di cui uno completamente riflettente e l'altro solo parzialmente; in tal modo i fotoni rimbalzano ripetutamente tra gli specchi e stimolano l'emissione di altri fotoni prima di fuoriuscire dallo specchio semiriflettente e dar luogo al fascio di luce laser. Siccome poi i fotoni sono emessi tutti nella stessa direzione, il fascio è fortemente collimato; esso può essere focalizzato, ad esempio da lenti, su superfici molto piccole, realizzando elevate densità di potenza.

E' questo il fattore fondamentale che rende il laser ad alta potenza uno strumento preciso ed accurato per eseguire lavorazioni su materiali metallici, e non solo, quali saldature, marcature, forature, tagli, trattamenti superficiali, senza peraltro che sia richiesto il contatto diretto col pezzo da lavorare. I laser utilizzati nei cantieri navali sono quelli a CO₂ e quelli a Nd in YAG, indicando quest'ultima dizione una barra di cristallo granato di ittrio e alluminio drogato con ioni di neodimio utilizzata come mezzo attivo.

Nel laser ad anidride carbonica il mezzo attivo è costituito da una miscela a bassa pressione di anidride carbonica, azoto ed elio, svolgendo questi ultimi due gas la sola funzione di migliorare il rendimento del processo. Il pompaggio è realizzato inducendo scariche elettriche tra due elettrodi, che generano l'emissione di elettroni ad alta energia. La frequenza del fascio emesso è pari a 10.6 μm e le potenze variano tra 0.1 e 45 kW; in cantiere si sono utilizzate sorgenti di 12 e 17 kW per la saldatura, fino a 5 kW per il taglio.

I laser Nd in YAG a stato solido sono più costosi e meno potenti; commercialmente ci si limita a 5 kW, 2 kW per il taglio. La lunghezza d'onda è di 1.06 μm; ciò consente di guidare il fascio laser con fibre ottiche flessibili, per cui il sistema è più versatile di quello a CO₂, che richiede l'uso di specchi riflettenti; si può far ricorso ad esempio a robot per realizzare giunti di difficile accesso.

Il laser è un ottimo strumento per eseguire saldature perché: non è necessario metallo d'apporto; non è necessario in genere cianfrinare i pezzi per la grande penetrazione del metodo; la zona alterata termicamente è ristretta, per cui tensioni residue e distorsioni sono minime; le operazioni avvengono senza contatto diretto coi pezzi; possono realizzarsi saldature di precisione; la velocità di saldatura è elevata; il procedimento può essere facilmente automatizzato, anche perché il sistema è privo di inerzia. D'altro canto l'accostamento dei lembi di giunzione deve essere accurato e le regolazioni dei parametri di processo devono essere precise, per cui è indispensabile ricorrere ad un sistema di automazione e le attrezzature risultano molto costose; inoltre devono essere adottate le misure di sicurezza atte a salvaguardare gli operatori dalla pericolosità del fascio laser.

Il laser è un efficiente utensile di taglio perché non richiede il contatto col pezzo e l'energia è focalizzata in una zona ristretta, dell'ordine di 0.1 ÷ 0.8 mm; è quindi possibile

realizzare: bordi di taglio stretti e paralleli; zone alterate termicamente molto ridotte; basse distorsioni termiche; profili complessi e spigoli vivi. La buona qualità di taglio, ed anche la sua velocità, decadono però al crescere dello spessore, per cui il laser è utilizzato a tal fine fino a spessori di circa 20 mm.

Il taglio col fascio laser può avvenire con meccanismi diversi; i più importanti sono per sublimazione, per fusione e per ossidazione.

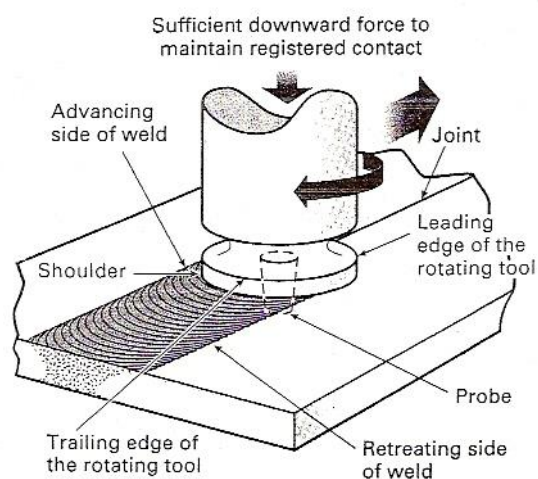
Nel taglio per sublimazione il materiale viene vaporizzato; è utilizzato, ad esempio, per i materiali che non fondono, quali il legno e certe plastiche. Il pezzo deve essere protetto dalle bruciature con un flusso di gas.

Nel taglio per fusione, questa avviene in tutto lo spessore; il materiale fuso è espulso da un getto di gas inerte che fuoriesce da un ugello insieme al fascio di luce. La tecnica è utilizzata per materiali plastici, acciai legati, materiali non ferrosi.

Nel taglio per ossidazione si sfrutta un getto di ossigeno per provocare l'ossidazione del metallo ed espellere il materiale combusto. La tecnica è utilizzata per tagliare materiali ferrosi perché il taglio è più veloce e di migliore qualità di quello ottenuto per fusione.

Friction Stir Welding, FSW.

E' questo un processo allo stato solido, brevettato recentemente, nel 1991, da The Welding Institute, per la saldatura dell'alluminio; sono peraltro in corso sperimentazioni per la sua applicazione ad altri materiali quali le leghe di Ti e gli acciai inossidabili.



Schema di saldatura FSW

Si utilizza uno speciale utensile rotante che per attrito riscalda il materiale e lo plasticizza, senza portarlo a fusione. Come illustrato in figura, l'utensile consta di un perno troncoconico sottoposto ad un disco; l'utensile, dopo essere stato appoggiato sulla linea di contatto tra i due pezzi, è posto in rotazione e lentamente spinto in basso in modo da far penetrare il perno all'interno del materiale; quindi è spostato lungo la linea di contatto ed il materiale plasticizzato, confinato superiormente dal disco ed inferiormente da una piastra di

sostegno, è forzato a scorrere dal bordo di entrata a quello di uscita, dove si compenetra, si raffredda e forma il cordone di saldatura.

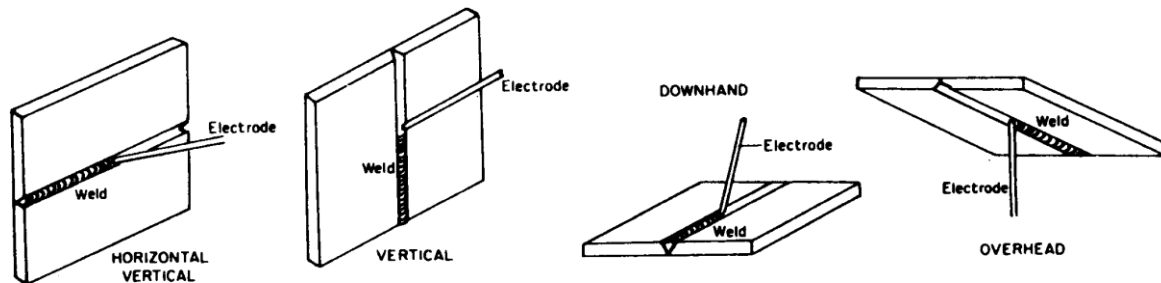
I due pezzi devono essere solidamente serrati perché non si allontanino durante l'operazione; questa esigenza limita la versatilità della tecnica, perché i pezzi devono essere necessariamente lavorati con una apposita macchina.

Si realizzano con questa tecnica giunti robusti e privi di distorsioni, senza dover ricorrere a materiale di apporto e gas di protezione. Con saldature ad un vertice si arriva a spessori di 15 mm, al doppio con vertici contrapposti.

Tipologie e designazioni delle saldature.

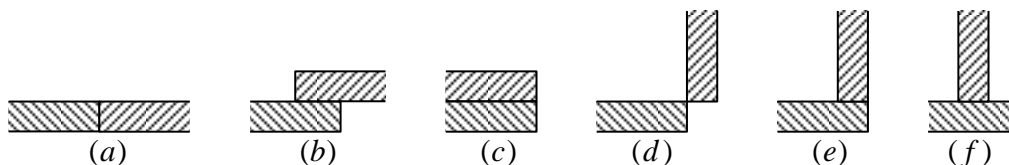
I giunti saldati si distinguono per posizione di saldatura, tipo di giunto, sezione del cordone, forma della superficie esterna, continuità del cordone.

Dal punto di vista operativo, è importante la posizione della saldatura; la definizione delle possibili tipologie si evince dalla figura di seguito. Si osserva in merito che nella saldatura in piano l'elettrodo è orientato verso il cordone già formato, così il soffio dell'arco favorisce il galleggiamento della scoria sul bagno; l'angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale è tra 60 e 70°. Nella saldatura verticale si procede dal basso verso l'alto, di modo che il metallo già depositato serva da sostegno a quello successivo. La saldatura sovratesta è la più difficoltosa ad eseguirsi e richiede specifici accorgimenti.



Saldature orizzontale o frontale, verticale o montante, in piano e sovratesta (da Eyres)

I giunti si distinguono per la posizione relativa dei pezzi, come di seguito illustrato.



Giunti: (a) di testa, (b) a sovrapposizione, (c) d'orlo, (d) di spigolo, (e) a L, (f) a T

La sezione tipica delle saldature per fusione può essere:

- su orli rilevati;

- ad I, o a lembi retti, cioè senza preparazione degli orli intestati, che possono essere posti a contatto o tenuti staccati; la saldatura può essere o semplice o con ripresa a rovescio o sostenuta;
- ad un vertice, con preparazione a semplice smusso di un solo orlo (a mezzo V o a J) o di entrambi (a V o ad U); la saldatura può essere o semplice o con ripresa a rovescio o sostenuta;
- a vertici contrapposti, con preparazione a doppio smusso di un solo orlo (a K o a doppio J) o di entrambi (ad X o a doppio U);
- d'angolo, da un solo lato o simmetrica; la prima può essere o semplice o con ripresa a rovescio o sostenuta;
- entro asole, a fianchi diritti o svasati; questa preparazione è indispensabile per saldare pezzi altrimenti inaccessibili, ad esempio i diaframmi all'interno di un timone.

Si dice sostenuta una sezione il cui vertice sia delimitato da uno scontro, quale una piastrina di acciaio o di materiale ceramico o di flusso granulare; in tal modo si ottiene un soddisfacente profilo del cordone anche dal lato opposto a quello di esecuzione della saldatura, senza dover ricorrere alla ripresa a rovescio.

Salvo casi particolari, gli smussi sono praticati su entrambi i pezzi nei giunti di testa, necessariamente su un solo pezzo nei giunti a T. Nel caso dei giunti di testa, i cordoni a vertici contrapposti richiedono minore materiale d'apporto dei cordoni ad un vertice, ma diventa necessario operare da entrambe i lati del collegamento. Orientativamente, con la tecnica ad elettrodi rivestiti i giunti di testa sono: a lembi diritti fino a 3 mm con passate da un solo lato, fino a 6 mm con passate contrapposte; a V fino a 15 mm; a X oltre i 15 mm.

La superficie esterna può essere o piana o concava o convessa.

Per quanto riguarda la continuità, la saldatura può essere o continua o su lembi dentellati o intermittente (detta anche a tratti); in quest'ultimo caso i tratti sono o contrapposti o sfalsati.

I simboli grafici utilizzati per la rappresentazione della forma della sezione e della superficie esterna sono dati nella tavola di seguito.

SIMBOLI GRAFICI DELLE SALDATURE PER FUSIONE

DENOMINAZIONE		Rappresentazione illustrativa	Simbolo grafico				
			fondamentale	per forma convessa	per forma piana	per forma concava	
Saldati su orli rilevati)			
Saldature a un vertice	Saldatura a I	semplice)))	
		con ripresa a rovescio)))	
	Saldatura a V	semplice	^	^)	^)		
		con ripresa a rovescio		^)	^)		
	Saldatura a U	semplice	u	u)	u)		
		con ripresa a rovescio		u)	u)		
	Saldatura a mezzo V	semplice	^	^)	^)	^)	
		con ripresa a rovescio		^)	^)	^)	
	Saldatura a J	semplice	r	r)	r)	r)	
		con ripresa a rovescio		r)	r)	r)	
	Saldature a vertici contrapposti	Saldatura a X		X	X)	X)	
		Saldatura a doppio U		X	X)	X)	
Saldatura a K		X	X)	X)	X)		
Saldatura a doppio J		X	X)	X)	X)		
Saldatura su tre lamiere			U	U)	U)		
Saldatura d'angolo	semplice		L	L)	L)	L)	
	con ripresa a rovescio			L)	L)	L)	
Saldatura ad angolo simmetrica			T	T)	T)	T)	
Saldatura entro fori o entro intagli	a fianchi dritti		±				
	a fianchi svasati		±				

Insieme alla rappresentazione della forma, bisogna pure dare le dimensioni del cordone di saldatura. Secondo la simbologia convenzionale, la quotatura di una saldatura continua è del tipo

$$a - L$$

ove a è la profondità ed L la lunghezza totale del cordone di saldatura, in mm. Per la saldatura a tratti è

$$a - n \times L / e$$

ove a è la profondità del cordone in mm, n è il numero di tratti, L è la lunghezza di ciascun tratto in mm ed e è il passo in mm. Nel caso di saldature con cianfrino asimmetrico, al posto di un unico valore si hanno due valori della profondità, con la seguente indicazione

$$a_1 + a_2 - L$$

Nel caso poi di saldature d'angolo, analogamente si ha

$$h_1 \times h_2 - L$$

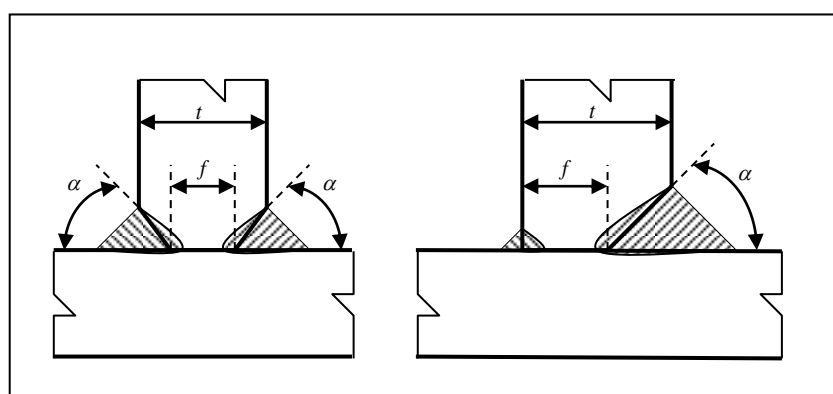
nel caso di saldatura continua, e

$$h_1 \times h_2 - n \times L / e; \quad h_1 \times h_2 - n \times L \mathbf{Z} e$$

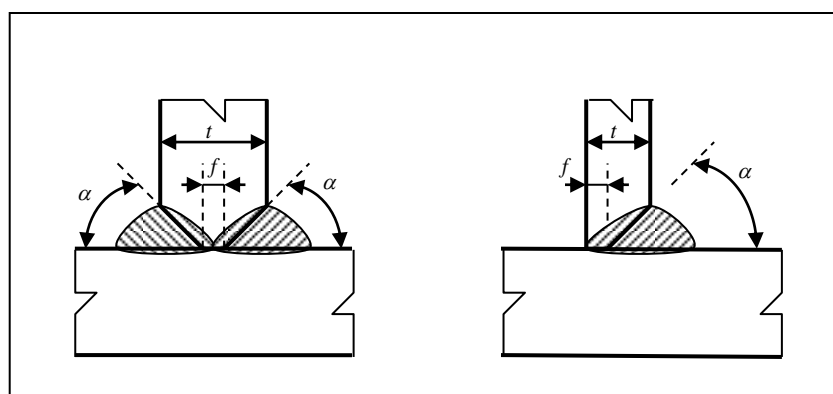
nel caso di saldatura a tratti, contrapposti e sfalsati; con h_1 ed h_2 si sono indicate le lunghezze dei lati del cordone. Esempi tipici di tali designazioni sono riportati di seguito.

<i>Esempi di rappresentazioni di saldature (in vista e sezione, illustrative e schematiche)</i>			
Saldatura a V, convessa			
Saldatura a X asimmetrica, convessa			
Saldatura a I a tratti, convessa			
Saldatura d'angolo			
Saldatura d'angolo simmetrica			
Saldatura d'angolo simmetrica a tratti sfalsati			

Nella cantieristica, i giunti più comuni sono quelli di testa, tipici per il collegamento dei fasciami, quelli a T, tipici per il collegamento dei rinforzi al fasciame, e quelli cruciformi, tipici per il collegamento delle anime di travi rinforzate intersecantisi. Per quanto riguarda i giunti a T, essi sono realizzati generalmente con cordoni d'angolo; ove sia necessario un giunto più robusto, esso può essere a penetrazione parziale o a piena penetrazione, previa apposita cianfrinatura, secondo quanto di seguito illustrato. Per quanto riguarda il cianfrino, il RINA prescrive un angolo di apertura α tra 45 e 60° ed una spalla f tra i vertici degli smussi compresa tra 3 mm e $t/3$ nel caso della penetrazione parziale ed inferiore a 3 mm nel caso della piena penetrazione. Nel caso di giunti a croce, è necessario in genere ripristinare la continuità strutturale e quindi essi devono essere a piena penetrazione.

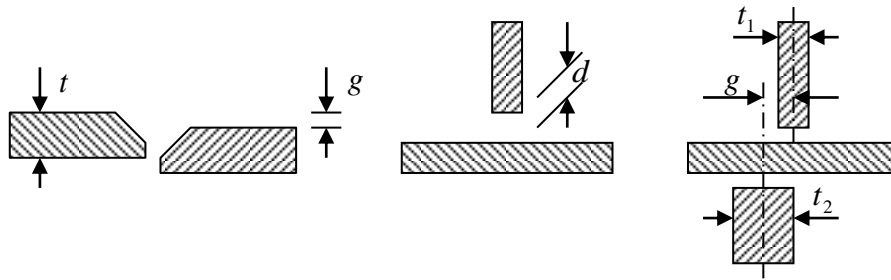


Saldatura a penetrazione parziale di un giunto a T



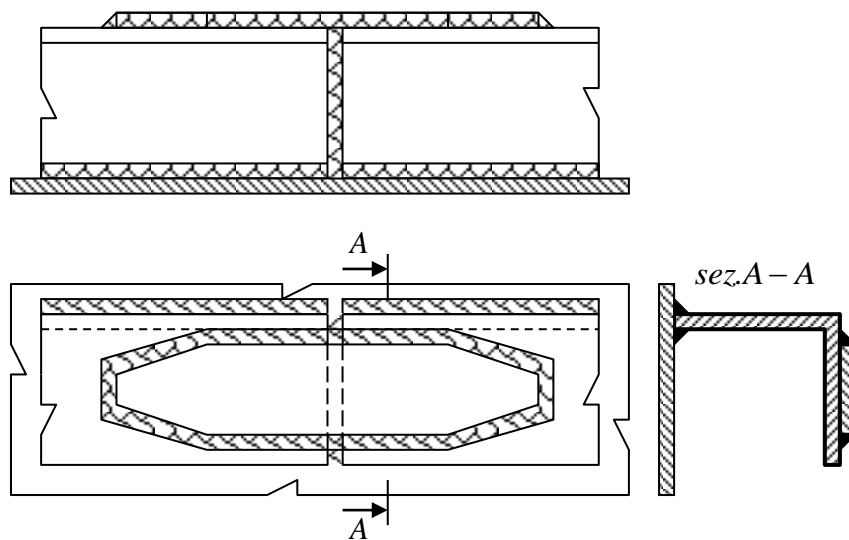
Saldatura a piena penetrazione di un giunto a T

Il Registro prescrive inoltre le tolleranze ammesse per il posizionamento dei pezzi da saldare: l'eccentricità g dei giunti di testa deve essere inferiore al 15% dello spessore e comunque meno di 3 mm; la luce d tra i due pezzi di un giunto a T deve essere di norma inferiore a 2 mm, o al più 4 mm, ma con maggiorazione della gola; l'eccentricità g di un giunto a croce, salvo casi particolari, non deve essere superiore alla metà dello spessore più piccolo tra quelli dei due pezzi da collegare. Il significato delle grandezze di cui sopra è chiarito dallo schizzo che segue.



Difetti di posizionamento di giunti di testa, a T e cruciformi

I collegamenti a coprigiunto possono risultare utili per rinforzare il delicato giunto di testa dei rinforzi, come nell'esempio riportato in figura.



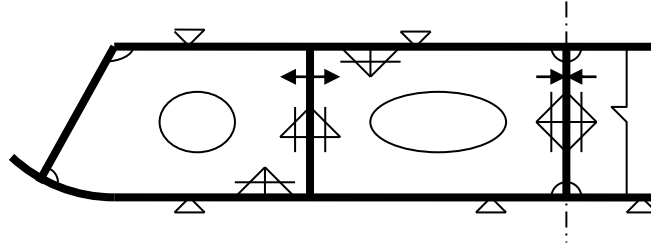
Esempio di giunzione di testa di un profilato con coprigiunto di rinforzo

Nella pratica, i collegamenti sono indicati con la simbologia illustrata in tabella, cioè con i simboli delle saldature a V e d'angolo, che in tal modo finiscono per rappresentare talvolta più il tipo di giunto che non la forma del cordone, la cui definizione dettagliata è rimandata ad apposite tavole in scala maggiore. La diversa rappresentazione adottata per il giunto cruciforme rende conto nel primo caso della discontinuità della lamiera in vista, nel secondo caso della sua continuità, che nasconde i cordoni d'angolo che la collegano alla lamiera di taglio retrostante.

Rappresentazioni tipiche di giunti navali (in vista e sezione, illustrative e schematiche)	
Giunto di testa	
Giunti a T	
Giunti a croce	

Una applicazione è illustrata dal disegno di doppio fondo riportato di seguito; i simboli di saldatura segnalano: gli orli dei corsi di fasciame del fondo e del cielo del doppio fondo; i giunti a T, simmetrici e continui, con cui il madiere si collega ai fasciami ed ai paramezzali; che il paramezzale centrale è continuo, mentre quello laterale è intercostale. Quest'ultima indicazione costruttiva può essere data, probabilmente in modo più chiaro, attraverso l'uso di doppie frecce, convergenti sull'elemento sezionato quando l'elemento in vista è discontinuo,

divergenti nel caso contrario; tale simbologia, anche se ridondante nella rappresentazione specifica, è comunque riportata a titolo illustrativo.

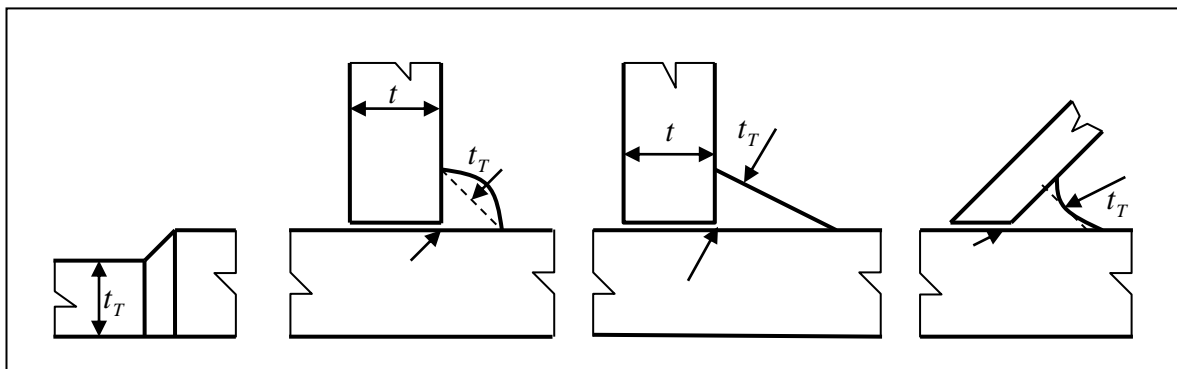


Rappresentazione del doppio fondo in corrispondenza di un madiere pieno

Dimensionamento delle saldature.

Per il calcolo delle saldature si ricorre a schemi approssimati e convenzionali, convalidati da verifiche sperimentali; rappresentazioni più aderenti ai principi della Scienza delle Costruzioni risultano pur esse approssimate per gli inevitabili difetti di geometria e materiale generati dall'operazione di saldatura.

Come sezione resistente si fa riferimento alla sezione di gola, il cui spessore è definito secondo quanto appresso illustrato. L'area della sezione di gola è data dal prodotto della lunghezza utile del cordone per lo spessore della gola; essa deve essere proporzionata in funzione degli sforzi trasmessi dal collegamento.



Definizione dello spessore di gola t_T di giunti di testa e di cordoni d'angolo.

Nel caso semplice, ma significativo, di un giunto a T realizzato con cordoni d'angolo continui disposti su entrambi i lati, che debba trasmettere uno sforzo di scorrimento T , deve essere:

$$2 \times 1.10 t_T l \tau_{av} \geq T$$

ove si è maggiorata l'area della sezione retta del 10% per tener conto di una certa penetrazione della saldatura nel metallo base. Il taglio non può evidentemente superare quello ammissibile per l'anima di spessore t , pari a $T_a = t l \tau_a$. Assumendo in sicurezza tale valore e considerando uguali sforzi di taglio ammissibili per il metallo base e per il cordone, si ottiene:

$$t_T = 0.45t$$

In campo navale si applica un calcolo di tipo tabulare che trova la sua giustificazione nell'esperienza accumulata con le costruzioni di svariati decenni.

Bisogna preliminarmente distinguere tra i giunti di testa e quelli a T degli elementi posti di taglio. I primi devono assicurare la continuità strutturale e lo stagno della superficie e pertanto i cordoni devono essere continui ed a completa penetrazione. Inoltre, se gli spessori delle lamiere da collegare differiscono per più di 3 mm, o 4 mm quando lo spessore del pezzo più spesso è maggiore di 10 mm, quella di spessore maggiore deve essere smussata con la pendenza di $\frac{1}{4}$ per sforzi perpendicolari alla giunzione e quella di $\frac{1}{3}$ per sforzi paralleli.

Nel caso di giunti a T si può ricorrere a cordoni d'angolo, senza preparazione dei bordi, continui od interrotti; questi ultimi possono essere a tratti contrapposti o a tratti alterni o su lembi dentellati. La soluzione tradizionale prevede tratti lunghi 75 mm; il passo p_l varia, come il tipo di discontinuità ammesso, in funzione del tipo di giunto, mentre lo spessore della gola è dato in funzione dello spessore t dell'anima del T; evidentemente il tipo di giunto e lo spessore t sono indicativi del carico agente. Si può ricorrere a dimensioni diverse da quelle tradizionali, in particolare a tratti saldati di lunghezza d maggiore di 75 mm, purché il passo p non sia eccessivo e sia rispettato il legame:

$$t_T = w_F t \frac{p}{d}$$

ove w_F è detto fattore di saldatura. La precedente si applica anche a cordoni continui ponendo $p/d = 1$. Restano così definiti i seguenti tipi di cordoni, cui si associano i giunti tipici dello scafo. Per quelli particolarmente sollecitati, bisogna poi ricorrere a penetrazioni parziali o complete.

<i>Cordoni d'angolo senza preparazione previsti dal RINA 2005</i>				
w_F	Valori massimi di p/d			Passo p_l per $d = 75$ mm
	CH	SC	ST	
0.13	3.5	3.0	4.6	ST 260
0.13				
0.15	3.0	3.0		CH/SC 210
0.20	2.2	2.2		CH/SC 160
0.20	2.2			CH 160
0.20		2.2		SC 160
0.20				
0.25	1.8	1.8		CH/SC 130
0.25	1.8			CH 130
0.35				
0.45				

CH (chain): a tratti contrapposti; SC (scallop): su lembi dentellati; ST (staggered): a tratti alterni.

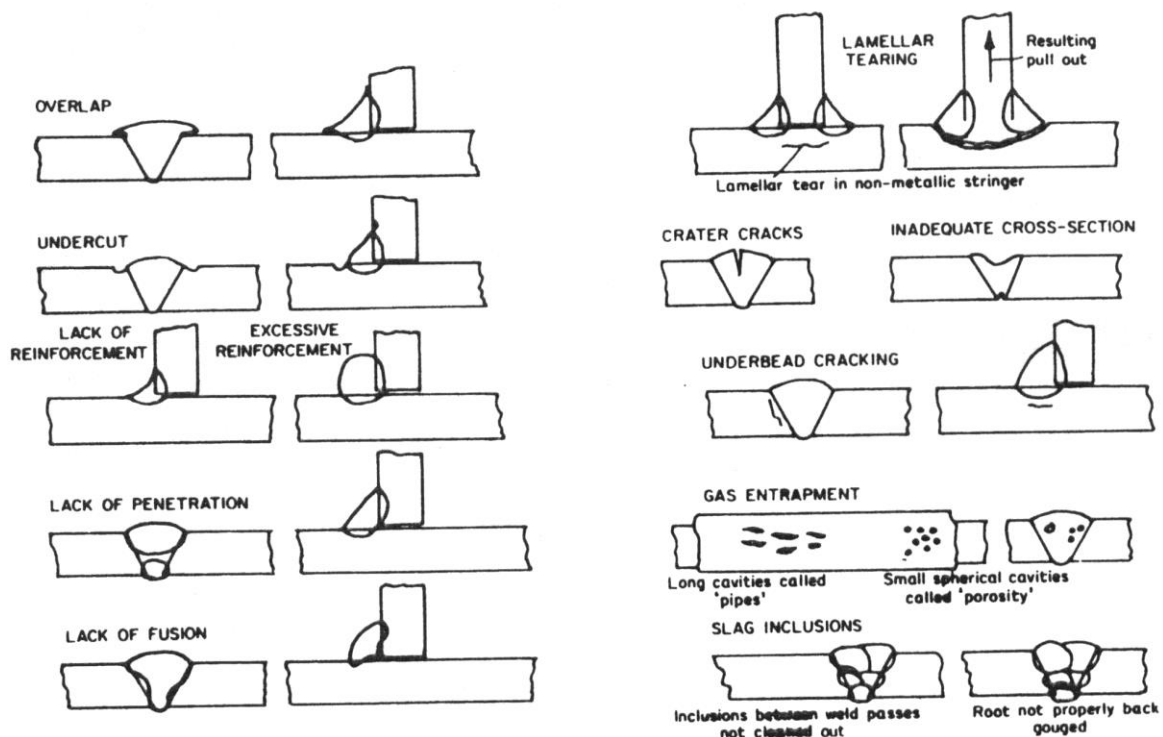
<i>Spessore di gola per cordoni discontinui con tratti di 75 mm.</i>										
t (mm)	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16
t_T (mm)	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.0	6.5	6.5
t (mm)	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
t_T (mm)	7.0	7.0	7.5	7.5	8.5	8.5	9.0	9.0	10.0	10.0
Per t minore di 8 mm, il passo p_I può essere aumentato di 10 mm, per tratti contrapposti e lembi dentellati, o di 20 mm per tratti alterni.										
Per t maggiore di 16 mm, il passo p_I deve essere ridotto di 10 mm, per tratti contrapposti e lembi dentellati, o di 20 mm per tratti alterni.										

Difetti e controlli dei cordoni di saldatura.

Una saldatura può presentare svariati tipi di difetti metallurgici e geometrici; questi difetti possono essere interni ed esterni. I difetti principali delle saldature all'arco elettrico sono:

- profilo insufficiente (ad esempio, in un giunto di testa un cordone profondo meno dello spessore delle lamiera) o sovrappessore eccessivo (in un giunto di testa, quando è maggiore dello spessore delle lamiera di circa il 10%);
- sovrappessore incollato, per un eccesso di materiale fuso che si è disteso sulla superficie della lamiera relativamente fredda;
- incisioni marginali, cioè solchi al margine del cordone;
- mancanza di penetrazione, esterna nei bordi a semplice smusso, interna nei bordi bisellati; è dovuta, ad esempio, ad un cianfrino troppo stretto o ad una intensità di corrente insufficiente;
- inclusioni gassose; le porosità sono quelle di piccole dimensioni, orientativamente inferiori ad un mm; soffiature e tarli sono quelle di maggiori dimensioni, le seconde di forma allungata e di circa 10 mm di lunghezza; questi difetti sono originati dal gas, proveniente dall'ambiente o dal flusso di protezione, che prima si scioglie nella zona fusa e poi non riesce a sfuggire durante la solidificazione, soprattutto quando la velocità di raffreddamento è elevata; un'altra fonte di tali difetti è la contaminazione superficiale da sporco, ruggine, vernice, umidità;
- inclusioni di scorie o ossidi;
- incollature; si verificano quando le gocce di metallo d'apporto cadono su superfici non portate a fusione, e ciò può avvenire soprattutto con le saldature sotto gas ed ossiacetileniche in cui l'apporto termico è basso;
- cricche a caldo; sono dette così perché si verificano alle elevate temperature di solidificazione, tra 900 e 1400°C; sono generate da elevate tensioni da ritiro, eventualmente esaltate da una scorretta geometria del cordone di saldatura; sono lesioni che si verificano tipicamente nelle zone fuse, ai bordi dei grani resi deboli dallo zolfo che lì si concentra in forma di solfuri, liquidi fino a 900°C; si riscontrano soprattutto nei processi con elevati apporti di calore.

- cricche a freddo, dette anche da idrogeno o sotto cordone; si verificano in genere al di sotto od al margine del cordone di saldatura, nella zona alterata termicamente, ma non portata a fusione; meno frequentemente si verificano nella zona fusa; sono dovute alla inclusione di idrogeno atomico, prodottosi dalla dissociazione delle molecole di idrogeno provocata dall'arco, nel metallo riscaldato a temperature superiori a 900°C e quindi in fase austenitica; difatti lo H è molto solubile nell'austenite e nel metallo fuso; non lo è invece nelle fasi che si ottengono dalla trasformazione dell'austenite, per cui al raffreddarsi del pezzo lo H viene rilasciato; quando la velocità di raffreddamento è elevata, parte dello H non riesce a sfuggire e causa l'infragilimento del materiale che si incrina a temperature relativamente basse, dell'ordine di 300 ÷ 600°C, dal che il nome di questo tipo di cricche; in presenza di stati di tensione residua o di intagli possono prodursi fessurazioni anche a distanza di tempo (rottura differita o fatica statica), fenomeno questo particolarmente pericoloso; il difetto colpisce soprattutto gli acciai ad elevata resistenza, più fragili per la formazione di locali strutture martensitiche; perciò bisogna adottare per questi materiali rivestimenti basici a basso contenuto di idrogeno ed eventualmente preriscaldare il giunto al fine di limitare le tensioni residue generate dal raffreddamento disuniforme; le cricche a freddo si riscontrano soprattutto nei processi con ridotti apporti termici;
- lesioni lamellari o sfogliamenti; sono caratteristiche di giunti, ad esempio quelli a T, quando sono soggetti a sforzi di trazione nella direzione dello spessore.



Difetti delle saldature

Il tipo e l'entità dei difetti tollerati definisce la qualità di una saldatura, che è scelta alla luce delle condizioni di impiego e dell'importanza dell'organo. I difetti più pericolosi sono le incrinature, le incollature e le mancanze di penetrazione, perché costituiscono intagli acuti all'interno del materiale che possono provocare rotture sotto carico; per tale motivo non sono accettabili e vanno rimosse mediante solcatura e ripresa di saldatura. Le inclusioni gassose o di scoria rappresentano pur esse discontinuità, ma meno pericolose perché di forma tondeggianti; sono perciò ammesse, purché in numero e dimensioni limitate. Analogamente i difetti superficiali sono accettati entro limiti assegnati, altrimenti vanno rimossi mediante molatura o scalpellatura ed eventualmente passate di riempimento.

Il conseguimento e l'accertamento della qualità delle saldature richiede sia preventivi controlli indiretti, specificatamente la qualificazione delle procedure e dei saldatori, sia successivi controlli diretti, a mezzo di prove non distruttive. Queste possono suddividersi in due gruppi:

- controlli superficiali, cioè gli esami visivo, magnetoscopico e con liquidi penetranti;
- controlli interni, cioè gli esami radiografico ed ultrasonoro.

Nella cantieristica navale la gran parte delle saldature è ispezionata solo visivamente; poco utilizzati sono gli esami magnetoscopico e con liquidi penetranti, mentre trovano largo impiego quelli radiografico ed ultrasonoro. Quest'ultimo, al di là del controllo della qualità delle saldature, è utile per la misura degli spessori.

Esame visivo.

Si basa sull'ispezione ad occhio nudo, eventualmente con l'ausilio di lenti (metodo diretto); quando l'ispezione diretta è difficoltosa, ad esempio nel caso delle superfici esterne di grandi strutture o di superfici interne di difficile accesso, si ricorre al metodo indiretto, cioè all'ausilio di macchine fotografiche, telecamere, binocoli, endoscopi a fibre ottiche. L'esame, oltre a permettere il rilievo dell'irregolarità della maglia del cordone, cioè della larghezza, del sovrappessore e del disegno del cordone, e dei difetti affioranti, fornisce indicazioni utili per la corretta programmazione di ulteriori indagini. Prima della saldatura, l'esame evita di procedere su giunti puliti o preparati o posizionati malamente.

Esame magnetoscopico.

E' basato sul principio secondo il quale le linee di flusso del campo magnetico indotto in un materiale ferromagnetico dal passaggio di una corrente impressa subiscono delle deviazioni in presenza di una discontinuità. In particolare, se la discontinuità affiora in superficie o vi è prossima, l'anomalia può essere rilevata cospargendo la superficie con polvere magnetica, asciutta o in sospensione liquida, che si addensa in corrispondenza della discontinuità. La tecnica è fortemente direzionale: l'attrazione delle particelle magnetiche è massima quando la discontinuità è parallela alla direzione della corrente, cioè ortogonale alle linee di flusso magnetico, mentre è circa nulla nella direzione ortogonale; per tale motivo si effettuano più prove, orientando diversamente le linee di flusso. Dopo l'indagine permane un leggero magnetismo residuo che deve essere rimosso se può generare fastidi nelle lavorazioni

successive. La tecnica ovviamente non può essere applicata ai materiali che non sono ferromagnetici come gli acciai austenitici, le leghe leggere, ecc.

Esame con liquidi penetranti.

Si basa sul fenomeno della capillarità, ossia la tendenza di un liquido a penetrare in una fessura sottile; le caratteristiche fisiche dei liquidi penetranti, quali la viscosità e la tensione superficiale, ne determinano il potere penetrante, fondamentale per la sensibilità del metodo. E' un metodo di controllo, semplice ed economico, per rilevare difetti affioranti di qualunque tipo. Le fasi dell'esame possono così riassumersi: dopo l'accurata pulizia del pezzo, si applica il liquido penetrante; si lascia penetrare nel pezzo tale liquido per parecchi minuti; si asporta il liquido in eccesso con un abbondante lavaggio, generalmente con acqua, quando necessario con solvente; dopo l'accurata asciugatura della superficie, si applica il rivelatore, generalmente costituito da una soluzione liquida molto volatile, che asciuga rapidamente, lasciando sul pezzo un deposito bianco polverulento, simile al talco; tale deposito assorbe il liquido penetrante ancora presente nell'eventuale cricca, denunciando quindi la sua presenza con una macchia, tipicamente rossa, su sfondo bianco nel caso di penetranti a contrasto di colore, o per fluorescenza, nel caso di penetranti fluorescenti, tramite una lampada a raggi ultravioletti azionata in camera oscura.

Esame radiografico.

L'indagine radiografica è impiegata per la ricerca dei difetti interni; il metodo si basa sul fenomeno dell'attenuazione delle radiazioni elettromagnetiche (raggi X o γ) nel loro percorso attraverso il materiale esaminato, più o meno marcata a seconda dello spessore e della natura del materiale. Se si esegue pertanto un esame radiografico su due pezzi, di cui uno presenta una cavità all'interno, la pellicola radiografica in un caso sarà uniformemente impressionata, nell'altro presenterà una macchia più scura in corrispondenza del difetto, in conseguenza del minor assorbimento di radiazioni nella cavità. In concreto, difetti quali incisioni marginali, penetrazioni incomplete, inclusioni gassose o di scoria, incollature, incrinature, appariranno come macchie scure, mentre difetti di sovrasspessore saranno rivelati da ombre chiare; il tipo di difetto potrà essere individuato dalla forma e dalla posizione di tali ombre e, soprattutto, dall'esperienza dell'operatore; bisogna tener presente che le incollature e le incrinature sfuggono facilmente all'indagine radiografica in quanto sono discontinuità piane senza spessore, per cui devono essere parallele ai raggi incidenti per poter essere rivelate. I raggi X sono generati da appositi tubi a raggi X; i raggi γ sono emessi da sorgenti di radioisotopi, quali il cesio, l'iridio, il cobalto, ecc., e sono meno penetranti di quelli X; entrambi i raggi comportano rischi per gli operatori, per cui nel loro impiego vanno adottate le cautele del caso.

Esame ad ultrasuoni.

Questo metodo è basato sul fenomeno della riflessione che un'onda acustica subisce quando incontra un ostacolo alla sua propagazione; se l'ostacolo è posto normalmente alla

direzione d'incidenza, l'onda è riflessa verso la sorgente generatrice. Gli ultrasuoni sono onde elastiche con frequenza superiore a 20 kHz, cioè al di sopra del campo di udibilità, che va da 16 Hz a 20 kHz; la loro velocità dipende dal mezzo attraversato: nell'alluminio è di 6320 m/s, nell'acciaio di 5900 m/s, nel rame di 4700 m/s, nella ghisa di 3500 m/s, nell'acqua di 1483 m/s, nell'aria di 330 m/s; il fenomeno della riflessione degli ultrasuoni è utilizzato, ad esempio, dai sonar. In concreto, un trasduttore, che sfrutta l'effetto piezoelettrico di alcuni materiali come il quarzo, emette un fascio di ultrasuoni, che attraversa il materiale in esame con velocità e direzione note; una parte delle onde può essere riflessa da un difetto di saldatura e ritornare al trasduttore, ora con funzioni di microfono; il difetto è quindi rivelato da un eco compreso tra quello di partenza e quello di fondo; tali segnali, opportunamente amplificati, possono essere resi visibili da un oscilloscopio. Nota la velocità, la direzione ed il tempo impiegato dal fascio per tornare al trasduttore, si risale alla distanza e quindi alla posizione del difetto. Il metodo è diffuso perché semplice, rapido e privo di radiazioni dannose; l'interpretazione dei risultati richiede però personale di provata esperienza e deve essere immediata perché, a differenza dell'esame radiografico, non si dispone di una documentazione fotografica.