

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



*Finito di scrivere il giorno 28 marzo 2011 utilizzando L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>*

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—  
DIPARTIMENTO DI INNOVAZIONE MECCANICA E GESTIONALE

—  
TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA  
DELL'AUTOMAZIONE

IMPIANTI AUTOMATICI PER LA  
SALDATURA: SOLUZIONI E  
TENDENZE

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: RICCARDO MURARO

ANNO ACCADEMICO 2010-2011



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>IX</b>
<b>Introduzione</b>	<b>XI</b>
<b>1 Generalità</b>	<b>1</b>
1.1 Definizione di saldatura . . . . .	1
1.2 Termini generali . . . . .	2
1.3 Tipi di giunti saldati . . . . .	3
1.4 Confronto con altri tipi di giunzione . . . . .	5
1.5 Cenni storici . . . . .	7
1.6 Rilevanza della saldatura nell'automazione . . . . .	8
<b>2 Tecnologie di Saldatura</b>	<b>11</b>
2.1 Classificazione delle Tecnologie di Saldatura . . . . .	11
2.2 Processi di Saldatura Termochimici . . . . .	13
2.2.1 Saldatura Ossiacetilenica . . . . .	13
2.2.2 Saldatura Ossidrica . . . . .	15
2.2.3 Difetti nelle Saldature a Gas . . . . .	16
2.2.4 Saldatura Alluminotermica . . . . .	17
2.3 Saldature ad Arco Elettrico . . . . .	18
2.3.1 Saldatura TIG – Elettrodo Infusibile in Atmosfera Gassosa	19
2.3.2 Saldatura al Plasma . . . . .	22
2.3.3 Saldatura MIG/MAG – Filo Continuo in Atmosfera Gassosa	25
2.3.4 Saldatura ad Arco con Elettrodo Rivestito . . . . .	28
2.3.5 Saldatura Flux-Cored . . . . .	30

2.3.6	Saldatura ad Arco Sommerso . . . . .	31
2.3.7	Saldatura ad Elettro-gas . . . . .	33
2.3.8	Saldatura ad Elettro-Scoria . . . . .	34
2.3.9	Saldatura dei Prigionieri . . . . .	36
2.3.10	Saldatura in Idrogeno atomico . . . . .	36
2.3.11	Difetti nelle Saldature ad Arco . . . . .	38
2.4	Saldature per Resistenza . . . . .	40
2.4.1	Saldatura per Resistenza Elettrica a Punti . . . . .	42
2.4.2	Saldatura per Resistenza Elettrica a Rulli . . . . .	45
2.4.3	Saldatura per Resistenza Elettrica a Punti Rilevati . . . . .	47
2.4.4	Saldatura Elettrica di Testa per Scintillio . . . . .	48
2.4.5	Saldatura Elettrica di Testa per Resistenza . . . . .	49
2.4.6	Saldatura Elettrica per Induzione . . . . .	50
2.5	Saldature ad alta Intensità Energetica . . . . .	51
2.5.1	Saldatura con il Fascio Elettronico . . . . .	52
2.5.2	Saldatura al Laser . . . . .	53
2.6	Saldature allo Stato Solido . . . . .	55
2.6.1	Saldatura a Freddo . . . . .	55
2.6.2	Saldatura per Pressione a Caldo . . . . .	56
2.6.3	Saldatura a Rulli . . . . .	58
2.6.4	Saldatura mediante Esplosivo . . . . .	58
2.6.5	Saldatura per attrito . . . . .	59
2.6.6	Saldatura ad ultrasuoni . . . . .	61
2.7	Brasature e Saldobrasature . . . . .	62
2.7.1	Saldobrasatura . . . . .	63
2.7.2	Brasatura Capillare . . . . .	65
2.8	Controlli delle saldature . . . . .	72
<b>3</b>	<b>Impianti Automatizzati per la Saldatura</b>	<b>75</b>
3.1	Classificazione degli Impianti Automatici di Saldatura . . . . .	77
3.2	Macchine Automatiche per Saldatura . . . . .	78
3.2.1	Macchine Automatiche di Saldatura per Pressione . . . . .	80

3.2.2	Macchine Automatiche per Saldatura ad Ultrasuoni . . . . .	82
3.2.3	Macchine Automatiche per Saldatura ad Arco . . . . .	83
3.2.4	Macchine Automatiche Speciali . . . . .	86
3.3	Celle Robotizzate per Saldatura . . . . .	87
3.3.1	Robot Industriale di Saldatura . . . . .	88
3.3.2	Attrezzature per Saldatura . . . . .	90
3.4	Architettura di una Linea per Saldatura . . . . .	93
3.5	Attrezzi Portanti del Pezzo . . . . .	94
3.6	Sistemi di Trasporto e Movimentazione . . . . .	96
3.7	Sistemi di Alimentazione dei Pezzi da Saldare . . . . .	97
3.8	Impianti di Servizio . . . . .	97
3.9	Sistema di Controllo della saldatura . . . . .	99
<b>4</b>	<b>Un caso studio: Brasatura Automatica di Batterie Alettate</b>	<b>103</b>
4.1	Caratteristiche dei materiali impiegati . . . . .	104
4.1.1	Batterie in rame . . . . .	104
4.1.2	Batterie in alluminio . . . . .	105
4.1.3	Piastra . . . . .	106
4.2	Configurazione del giunto . . . . .	107
4.3	Architettura e metodi di brasatura attuali . . . . .	107
4.3.1	Brasatura al cannello manuale . . . . .	108
4.3.2	Brasatura automatica con bruciatore . . . . .	110
4.4	Analisi della procedura . . . . .	111
4.4.1	Brasatura per Resistenza Elettrica . . . . .	114
4.4.2	Brasatura ad Induzione . . . . .	116
4.5	Risultati ottenuti . . . . .	117
	<b>Conclusioni</b>	<b>121</b>
	<b>Glossario</b>	<b>123</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>127</b>



# Sommario

La tesi riguarda un'analisi sull'attuale stato dell'arte per le tecnologie di saldatura e gli impianti automatizzati che le realizzano. Comprende considerazioni basate su dati statistici che evidenziano la rilevanza di tale processo di giunzione nell'automazione. Inoltre si propone un'indagine completa e dettagliata sulle varie tecnologie di saldatura esistenti e le tendenze innovative di tali processi. Viene proposta poi una classificazione di impianti automatici di saldatura ed un'analisi dei vari sottosistemi che li costituiscono. Le fonti di ricerca utilizzate per sviluppare questo lavoro di tesi sono state: libri di testo, articoli scientifici, siti internet e catalogi di aziende costruttrici. Usando tutte le conoscenze acquisite si è analizzato infine il processo di saldatura in un caso studio, ricercando altre tecnologie alternative e proponendo delle soluzioni per automatizzare il processo.



# Introduzione

La saldatura è il processo di assemblaggio più diversificato e complesso. Un numero preciso di metodi di saldatura è difficilmente identificabile a causa soprattutto del costante sviluppo del settore, che introduce nuovi metodi o propone parziali modifiche a quelli esistenti. Approssimativamente esistono una cinquantina di metodi per la saldatura, a ognuno dei quali potrebbe essere dedicata una singola trattazione di tesi. In questo contesto si intende fornire gli elementi principali, attraverso una trattazione completa e sintetica, che riguardano le singole tecnologie di saldatura.

Inoltre, si presentano gli impianti automatici che realizzano le operazioni di saldatura. La fonte principale sarà data da cataloghi di aziende costruttrici che si occupano di automazione della saldatura, al fine di analizzare i vari aspetti e sottosistemi che costituiscono questi impianti. È necessario quindi applicare tutte le conoscenze apprese attraverso lo studio di diverse discipline dell'ingegneria industriale quali logistica, automazione, robotica, controllo, elettronica, che congiuntamente allo studio sulle tecnologie di saldatura permettano di ricercare gli elementi che caratterizzano un impianto automatizzato di saldatura.

La trattazione comprende, oltre che uno stato dell'arte su tecnologie consolidate, anche l'innovazione e tendenze future di questo settore, attraverso l'utilizzo di basi statistiche e fonti di attualità.

Le competenze acquisite servono poi per poter studiare ed analizzare i diversi aspetti che riguardano un'applicazione pratica di saldatura, presentando proposte di soluzione al problema.

La tesi sarà composta da quattro capitoli principali; di seguito si dà una breve descrizione del loro contenuto:

- **CAP1. Generalità:** vengono analizzati gli aspetti preliminari e generali riguardanti la saldatura. In primo luogo viene fornita una definizione generale di saldatura, successivamente vengono analizzati i principali tipi di giunti saldati con le varie posizioni di saldatura. Inoltre sono analizzate le differenze rispetto ad altri tipi di giunzione evidenziandone i vantaggi e poi viene sottolineata la rilevanza della saldatura automatizzata nei processi automatici. Il capitolo infine presenta dei brevi cenni storici sul processo di saldatura.
- **CAP2. Tecnologie di Saldatura:** in questo capitolo viene fornita inizialmente una classificazione completa delle tipologie di saldatura. Per ogni tecnica di saldatura è proposta una sintetica descrizione tecnologica, le attrezzature utilizzate, campi d'impiego, limiti, vantaggi rispetto a metodi di saldatura analoghi. La trattazione è esposta presentando gli schemi di funzionamento ed evidenziando alcuni esempi applicativi che ne presentano il grado di automazione.
- **CAP3. Impianti Automatizzati per la Saldatura:** l'automazione della saldatura viene affrontata attraverso le varie caratteristiche che riguardano un'analisi strutturale degli impianti di saldatura. Dapprima si valuta il contesto di automazione della saldatura in una breve introduzione, analizzando anche i vari aspetti che devono concorrere nella realizzazione di un sistema di saldatura moderno. Successivamente viene fornita una classificazione in base ai possibili impianti di saldatura, ricercando le caratteristiche e componenti per le varie tecnologie.
- **CAP4. Caso Studio: Brasatura di Batterie Alettate:** in base alle conoscenze fornite dai capitoli precedenti, si propone una soluzione per automatizzare il processo di brasatura per batterie alettate, scegliendo, tra le tecnologie possibili, quella più adatta e fornendo una bozza di layout dell'impianto automatizzato.

Nelle ultime pagine della tesi viene fornito un **glossario** che raccoglie le parole chiave utilizzate nella trattazione, in italiano ed in lingua inglese, riguardanti la saldatura, l'automazione e l'elettronica di potenza, fornendone una breve descrizione.

Infine si riporta la **bibliografia** riguardante tutti i testi, articoli e siti internet utilizzati per sviluppare la tesi, oltre ad una raccolta delle aziende produttrici consultate, delle quali verranno fornite le principali referenze.



# Capitolo 1

## Generalità

### 1.1 Definizione di saldatura

In un ampio contesto, la saldatura è:

un processo nel quale materiali dello stesso tipo o classe sono messi insieme, causandone la giunzione attraverso la formazione di un legame chimico, sotto l'azione combinata di riscaldamento e pressione. [1]

In letteratura esistono molteplici definizioni di saldatura leggermente differenti, ma simili nella loro essenzialità. Alcune fonti di ambiguità nella definizione di saldatura possono essere:

1. *Molteplici entità diventano una stabilendo la continuità.* Per "continuità" nella giunzione si intende la continuazione della struttura atomica delle componenti impiegate e non implica necessariamente l'omogeneità della composizione chimica. È quindi essenziale che i pezzi da saldare abbiano la stessa struttura atomica, ovvero appartengano alla stesso tipo o classe di materiale.
2. *La saldatura non si applica solo per metalli.* La saldatura è spesso applicata con certi materiali termoplastici, ceramiche, composti intermetallici e vetro. Per questi materiali non sempre questo processo viene chiamato saldatura bensì incollaggio termico o incollaggio per fusione o fusione, ma si tratta pur sempre di saldatura.

3. *La saldatura è il risultato dell'azione combinata o singola di calore e pressione.*
4. *Potrebbe essere richiesto un materiale di apporto con la stessa struttura atomica del metallo base.*

## 1.2 Termini generali

Di seguito una rassegna delle principali terminologie ricorrenti nella saldatura:

1. **Metallo base:** è il metallo che costituisce i pezzi da saldare;
2. **Lembi:** superfici affacciate dei pezzi da unire, la cui geometria determina la forma del giunto;
3. **Passata:** è la traslazione dell'operazione di saldatura lungo il giunto. Risultato di un passata è la deposizione di un cordone di saldatura (weld bead) (passata e cordone sono utilizzati come sinonimi)
4. **Bagno di fusione:** è quella porzione di metallo che si trova allo stato liquido durante l'esecuzione della saldatura;
5. **Giunto saldato:** è il risultato dell'operazione di saldatura ed è caratterizzato dalla continuità metallica. Un giunto saldato può essere ottenuto in una sola od in più passate;
6. **Metallo d'apporto:** è il metallo che sotto forma di bacchette, di fili o di elettrodi si deposita fuso fra i lembi da unire. Esso è necessario in molti procedimenti ma non in tutti;
7. **Protezione:** in alcuni casi è necessaria la protezione del bagno di fusione dall'ossigeno e dall'azoto per impedire ossidazioni e nitrurazioni dannose alla saldatura; allo scopo si utilizzano determinati gas oppure opportune sostanze che fondendo ricoprono il metallo fuso impedendone il contatto con l'aria;

8. **Fonte di calore:** per la fusione del metallo d'apporto e/o riscaldamento dei lembi da collegare; può essere di origine chimica od elettrica.

I processi di saldatura possono essere identificati come saldature **autogene** nelle quali l'eventuale metallo d'apporto e della stessa natura dei pezzi da collegare (anch'essi della stesso materiale) oppure saldature **eterogene** che operano con materiali metallici di natura diversa ed il materiale d'apporto deve avere un punto di fusione più basso rispetto al metallo base.

### 1.3 Tipi di giunti saldati

Le tipologie e la geometria della giunzione, è determinata fondamentalmente dalla richieste geometriche, dalle restrizioni della struttura e dal tipo di carico.

A seconda del posizionamento reciproco dei pezzi da saldare, si distinguono sei tipologie di giunti saldati, rappresentati in figura 1.1.

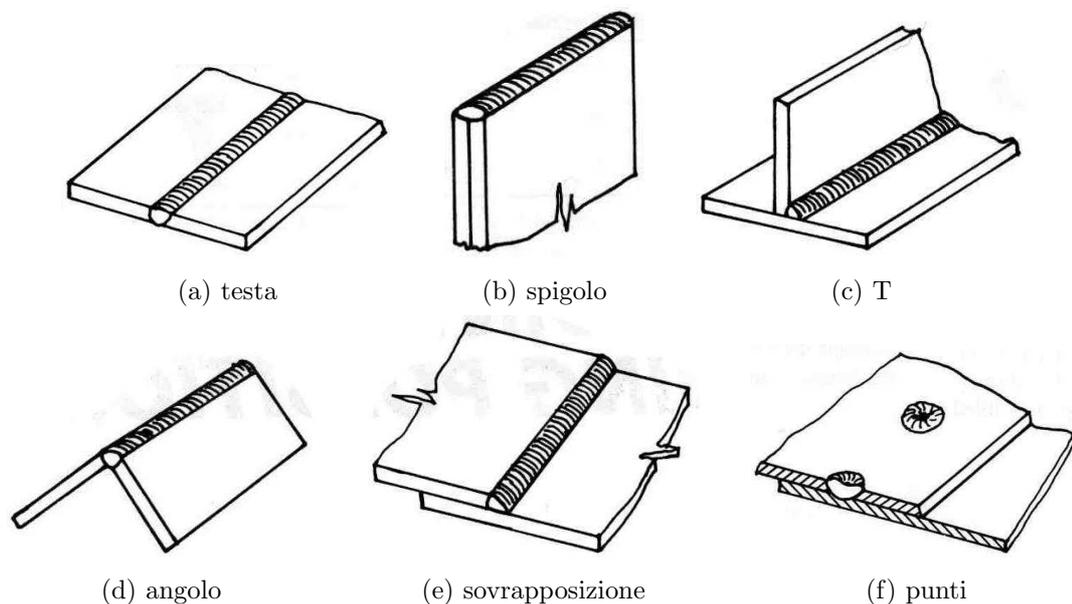


Figura 1.1: Tipologie di giunzione.

Le giunzioni a T, a sovrapposizione e ad angolo comportano lo stesso tipo di giunto saldato che si presenta triangolare nella sezione trasversale. Particolare è la saldatura slot<sup>1</sup> che è utilizzata per attaccare un pezzo di lavoro ad un'altro

<sup>1</sup>Detto anche plug se la fessura ha forma tondeggiate invece che allungata.

attraverso la penetrazione sulla superficie superiore. Essa può ricoprire completamente o meno il foro e differisce leggermente dalla saldatura a punti ottenuta con una saldatura per resistenza.

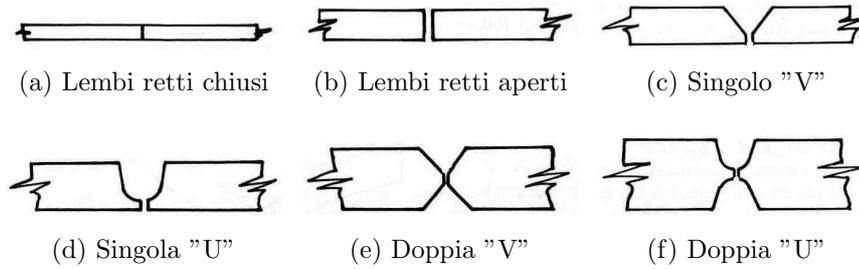


Figura 1.2: Principali preparazioni dei lembi per giunti di testa al crescere dello spessore dei pezzi da saldare.

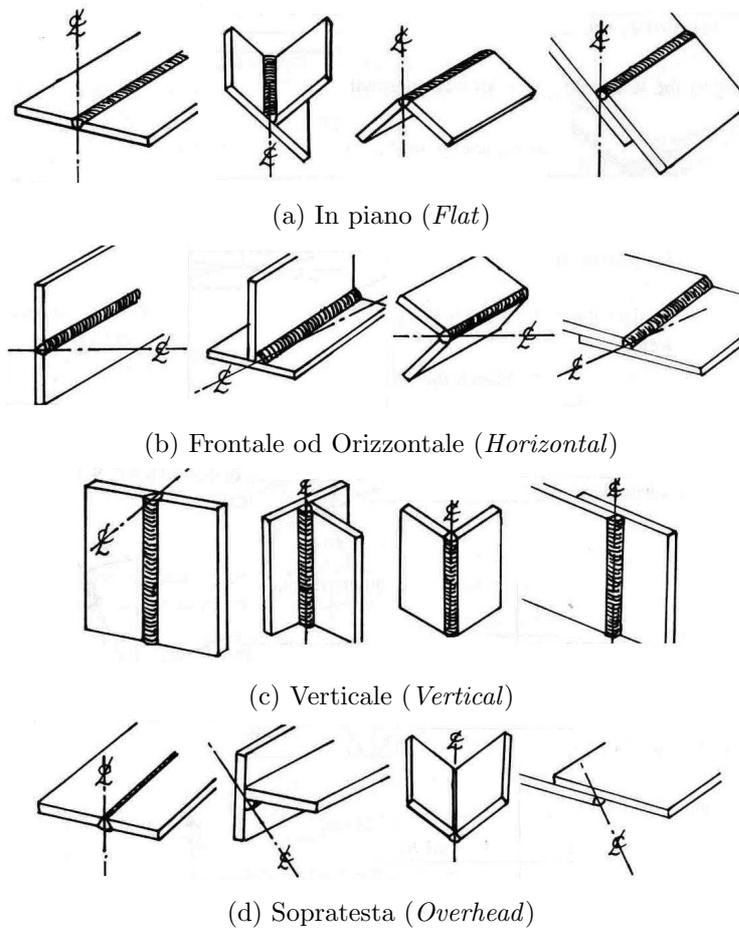


Figura 1.3: Posizioni di saldatura per diverse configurazioni dei giunti.

Affinché la saldatura interessi totalmente lo spessore dei pezzi, nelle saldature di maggior impegno si rischiede normalmente una preparazione dei lembi, smusso o cianfrino, entro il quale depositare più cordoni in passate successive<sup>2</sup>.

In linea generale, un giunto saldato può occupare, in seno alla costruzione, qualunque posizione. Le posizioni più frequenti con relativa nomenclatura, sono riportate in figura 1.3. Nella terminologia corrente ci suole spesso dire "saldatura in posizione" quando ci si riferisce a qualunque posizione diversa dal piano.

In definitiva, la configurazione, il numero e la posizione della giunzione da saldare determina la facilità della lavorazione, costi e l'integrità strutturale compreso la robustezza contro la distorsione indotta dalla saldatura.

## 1.4 Confronto con altri tipi di giunzione

Esistono numerosi metodi di giunzione in alternativa alla saldatura; le tecnologie più comuni riguardano:

- **Incollaggio adesivo:** disponibile in diverse tipologie ed in varie forme come liquidi, paste, soluzioni, film, nastri viene largamente utilizzato per applicazioni che richiedono robustezza, sigillatura, isolamento, smorzamento di vibrazioni e resistenza alla corrosione, fra materiali anche dissimili (soprattutto termoplastici). I principali svantaggi riguardano i tempi di attesa che possono essere lunghi oltre che il possibile degrado per calore ed altri agenti esterni.
- **Fissaggio meccanico:** possono essere bulloni, dadi, viti, chiodi, rivetti e simili; richiedono la realizzazione di un buco attraverso le componenti da unire indebolendo la struttura (figura 1.4b).
- **Strutture fuse o stampaggio:** anche se non corrisponde ad un vero e proprio metodo di giunzione, permette l'ottenimento di strutture utilizzando stampi (necessita del modello della struttura) mediante complicate operazioni di fusione (figura 1.4a).

---

<sup>2</sup>Quando un giunto consta di più cordoni, si hanno nel contempo più "strati" (*layer* che, a loro volta, possono comprendere una o più passate.



(a) Accoppiamento a flange per tubi ad alta pressione.



(b) Sportello di automobile ottenuto tramite stampaggio dell'acciaio.

Figura 1.4: Esempi di tecniche di giunzione.

Tabella 1.1: Vantaggi e svantaggi della saldatura come processo di giunzione.

Vantaggi	Svantaggi
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. L'integrità ed efficienza del giunto non sarà accidentalmente persa o disassemblata;</li> <li>2. Grande varietà di processi e metodologie;</li> <li>3. Applicabile a moltissimi materiali (di stessa classe);</li> <li>4. Operazione manuale, semiautomatica o completamente automatica;</li> <li>5. Può essere portatile per usi indoor od outdoor;</li> <li>6. Fissaggio ermetico con la saldatura continua;</li> <li>7. Costi sono solitamente ragionevoli.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Impossibile disassemblare una saldatura senza distruggere le parti;</li> <li>2. Il calore della saldatura degrada, in generale, le caratteristiche base dei materiali;</li> <li>3. Calore sbilanciato porta alla distorsione o l'introduzione di sollecitazioni residue;</li> <li>4. Richiede una considerevole abilità e conoscenze;</li> <li>5. Può adoperare equipaggiamenti e materiali molto costosi.</li> </ol>

La tabella 1.1 raccoglie le caratteristiche principali della saldatura come metodo di giunzione. In generale, il vantaggio più significativo della saldatura, rispetto ad altri tipi di giunzione, è senza dubbio la possibilità di fornire una eccezionale **integrità strutturale** (robustezza), producendo giunzioni di elevata efficienza. Tale peculiarità in alcuni casi può essere visto come uno svantaggio, se occorre disassemblare le parti saldate.

La scelta del metodo di giunzione più adatto ricade sull'analisi di importanti caratteristiche, come i materiali interessati, la forma del giunto, grandezza e forma delle parti da unire, robustezza ed affidabilità del giunto, costi e manutenzione dell'equipaggiamento, e livello di abilità richiesto per la giunzione.

## 1.5 Cenni storici

L'unione dei metalli risale a diversi millenni, con i primi esempi di saldatura nell'Età del Bronzo e nell'Età del Ferro in Europa e il Medio Oriente.

Il Medioevo ha fatto avanzare la **saldatura per forgiatura**, nella quale i fabbri martellavano il metallo riscaldato più volte fino all'avvenuta giunzione. Nel Rinascimento gli artigiani erano abili nel processo, e l'industria ha continuato a crescere nel corso dei secoli seguenti.

Nel 1802, lo scienziato russo Vasily Petrov scoprì l'arco elettrico proponendo le sue possibili applicazioni pratiche, compresa la saldatura. Nel 1881-1882 l'inventore russo Nikolai Benardos creò il primo metodo di saldatura ad arco elettrico noto come **saldatura ad arco in carbonio**, usando elettrodi di carbonio.

Anche la **saldatura a resistenza** è stata sviluppata durante gli ultimi decenni del 19° secolo, con i primi brevetti di Elihu Thomson nel 1885, che ha prodotto ulteriori passi avanti nei prossimi 15 anni.

L'**acetilene** è stato scoperto nel 1836 da Edmund Davy, ma il suo uso non era pratico di saldatura fino a 1900 circa, quando è stata sviluppata un'adeguata fiamma ossidrica diventando uno dei più popolari metodi di saldatura per il costo relativamente basso e la sua portabilità. Mentre il 20° secolo progrediva, però, cadde in disgrazia per le applicazioni industriali, in gran parte sostituito con saldatura ad arco.

Durante il 1920, importanti progressi riguardarono l'introduzione della **saldatura automatica**, nelle quali il filo dell'elettrodo venne alimentato continuamente.

I **gas di protezione** divenne un ambito trattato con molta attenzione, in quanto scienziati tentarono di proteggere le saldature dagli effetti di ossigeno e azoto dell'atmosfera sviluppando l'uso di idrogeno, argon e elio come atmosfere di saldatura.

Il 1930 vide la pubblicazione della **saldatura ad arco sommerso** che continua ad essere popolare tutt'oggi. La saldatura ad arco con elettrodo in tungsteno (**TIG**), dopo decenni di sviluppo, è stata finalmente messa a punto nel 1941, mentre la **saldatura MIG/MAG** seguì nel 1948, consentendo la saldatura veloce di materiali non-ferrosi ma che richiedono costosi gas di protezione.

La saldatura ad arco con **elettrodo rivestito** è stato sviluppato nel corso del 1950 e divenne presto il più popolare processo di saldatura ad arco manuale. Nel 1957, ha debuttato il processo di saldatura con flusso animato (*flux-cored*), ampliandone l'utilizzo con apparecchiature automatiche con conseguente aumento della velocità di saldatura. Nello stesso anno fu inventata la **saldatura al plasma**, mentre la saldatura ad elettro-scoria fu introdotta nel 1958, seguita dalla saldatura elettrogas nel 1961.

Altri sviluppi recenti nella saldatura sono del 1958 con la svolta della **saldatura a fascio elettronico** e, dopo l'invenzione del laser nel 1960, la **saldatura a fascio laser** ha debuttato alcuni decenni più tardi dimostrando di essere particolarmente utile nella saldatura robotizzata. Infine, nel 1991 è stata inventata in Inghilterra la **saldatura per frizione** trovando applicazioni di alta qualità in tutto il mondo.

## 1.6 Rilevanza della saldatura nell'automazione

L'industria dell'automobile è stato uno dei primi a comprendere pienamente l'utilizzo di *robot per saldatura*. Si adottarono una serie di robot con il compito di completare tutte le sequenze di saldatura necessarie per creare un'automobile. Successivamente, una maggiore enfasi è stata posta automatizzando il processo di

saldatura ad arco in modo tale che il costruttore può ottenere il massimo beneficio dalla natura flessibile di questa tecnologia.

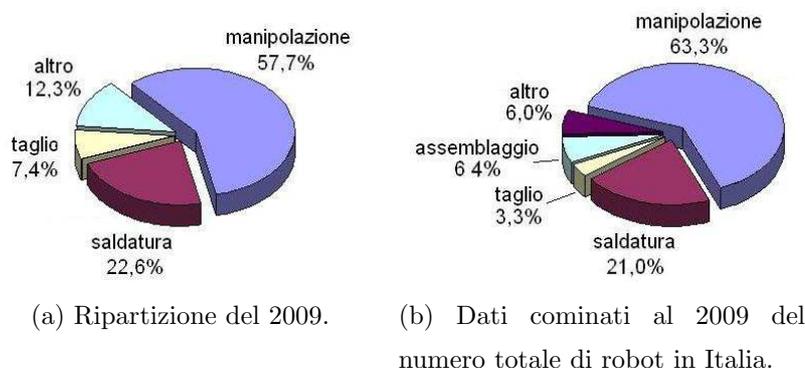


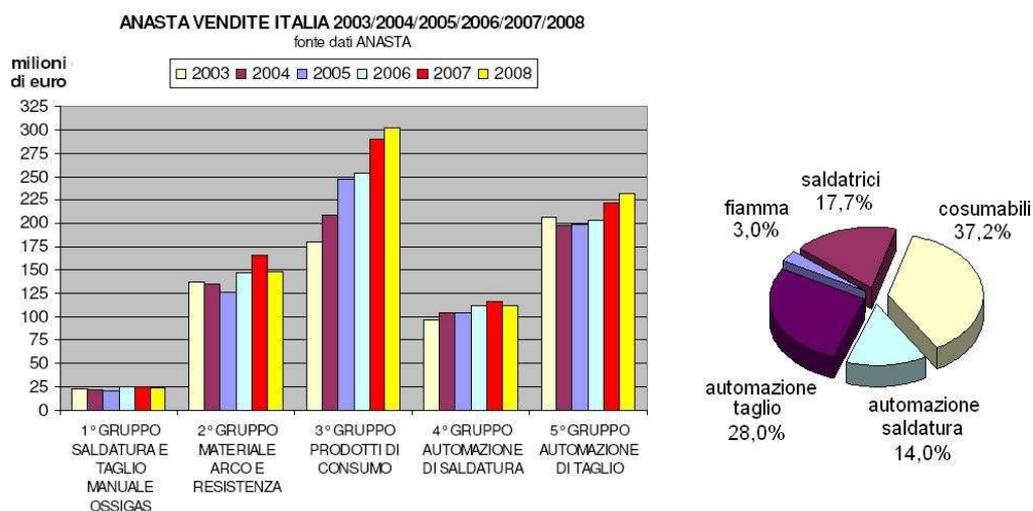
Figura 1.5: Parco robot in Italia per tipologia di prodotto (fonte UCIMU [2]).

I grafici di figura 1.5 rappresentano il parco robot in Italia prodotti nel 2009 e nella totalità di installazioni. La saldatura robotizzata rappresenta in entrambi i casi la seconda area applicativa, preceduta dalla manipolazione. Nel 2009 sono stati prodotti 387 robot di saldatura, pari al 22,6% della produzione nazionale. La maggior parte delle unità di questi robot è destinato alla saldatura a punti. Considerando la tipologia di robot, il segmento è rappresentato quasi interamente da robot di tipo articolato a traiettoria controllata. Il numero totale di robot per saldatura installati in Italia fino al 2009 ammontava a 16.108, pari al 21% sul totale, in linea con la produzione del 2009 e degli anni precedenti, dimostrando l'importanza della saldatura automatizzata.

Per l'analisi del parco robot nei principali paesi, occorre far riferimento ai rilievi, aggiornati al 2008, resi disponibili dall'IFR (International Federation of Robotics) [2]. Il parco mondiale dei robot operativi è ammontato<sup>3</sup>, a fine 2008, a 1.036.000 unità, rispetto ai quali la saldatura, con una quota del 30,5%, occupa il secondo campo di applicazione dietro alla manipolazione con una quota del 41% sul totale mondiale. La saldatura tuttavia è l'area predominante per molti paesi, soprattutto per quelli produttori di veicoli.

Per avere un'indicazione sulle macchine automatiche per saldatura, e non solo su robot, si può parzialmente far riferimento ai grafici di figura 1.6 relativi a

<sup>3</sup>Tenuto conto delle macchine eliminate dal processo produttivo e sostituite.



(a) Vendite dei vari comparti di saldatura dal 2003 al 2008. (b) Ripartizione del mercato della saldatura nel 2008.

Figura 1.6: Quote di mercato in Italia dei vari settori della saldatura [3].

dati ANASTA (Associazione Nazionale Aziende per Saldatura Taglio e Tecniche Affini). Essi illustrano un'altro aspetto della saldatura: la rilevanza della saldatura automatizzata nella saldatura.

Secondo ANASTA, il volume di vendite a fine 2008 sul mercato nazionale per tutti i settori di saldatura ammonta a 820 milioni di euro, dei quali solo il 14% riguarda la saldatura automatizzata (circa 115 milioni di euro).

Da notare come le applicazioni del taglio automatizzato in questo caso superino le applicazioni di saldatura, a conferma del fatto che i dati ANASTA considerano anche le macchine automatiche e non solo sistemi robotizzati.

# Capitolo 2

## Tecnologie di Saldatura

### 2.1 Classificazione delle Tecnologie di Saldatura

La *American Welding Society* (AWS) ha sviluppato una propria classificazione delle tecnologie di saldatura (tabella 2.1) definendo degli acronimi di uso comune.

Tabella 2.1: Classificazione AWS (American Welding Society)

<b>Saldatura a gas</b> ( <i>Oxyfuel Gas Welding</i> ) <b>OFW</b>	Aeroacetilenica	( <i>Air Acetylene Welding</i> )	<b>AAW</b>
	Ossiacetilenica	( <i>Oxyacetylene Welding</i> )	<b>OAW</b>
	Ossidrica	( <i>Oxyhydrogen Welding</i> )	<b>OHW</b>
	Pressione a Gas	( <i>Pressure Gas Welding</i> )	<b>PGW</b>
<b>Saldatura a resistenza</b> ( <i>Resistance Welding</i> ) <b>RW</b>	a Scintillio	( <i>Flash Welding</i> )	<b>FW</b>
	a Proiezione	( <i>Projection Welding</i> )	<b>PW</b>
	Continua a Rulli	( <i>Resistance Seam Welding</i> )	<b>RSEW</b>
	a Punti	( <i>Resistance Spot Welding</i> )	<b>RSW</b>
	di Testa per Resistenza	( <i>Upset Welding</i> )	<b>UW</b>
<b>Saldatura allo stato solido</b> ( <i>Solid-State Welding</i> ) <b>SSW</b>	per Coestrusione	( <i>Coextrusion Welding</i> )	<b>CEW</b>
	a Freddo	( <i>Cold Welding</i> )	<b>CW</b>
	a Diffusione	( <i>Diffusion Welding</i> )	<b>DFW</b>
	ad Esplosione	( <i>Explosion Welding</i> )	<b>EXW</b>
	per Forgiatura	( <i>Forge Welding</i> )	<b>FOW</b>
	ad Attrito	( <i>Friction Welding</i> )	<b>FRW</b>
	per Pressione a Caldo	( <i>Hot Pressure Welding</i> )	<b>PW</b>
	a Rulli	( <i>Roll Welding</i> )	<b>ROW</b>
ad Ultrasuoni	( <i>Ultrasonic Welding</i> )	<b>USW</b>	

<b>Saldatura ad arco</b> <i>(Arc Welding)</i> <b>AW</b>	all'Idrogeno Atomico	<i>(Atomic Hydrogen Welding)</i>	<b>AHW</b>
	con Filo Nudo	<i>(Bare Metal Arc Welding)</i>	<b>BMAW</b>
	al Carbone	<i>(Carbon Arc Welding)</i>	<b>CAW</b>
	Elettrogas	<i>(Electrogas Welding)</i>	<b>EGW</b>
	Flux-Cored	<i>(Flux Cored Arc Welding)</i>	<b>FCAW</b>
	MIG/MAG	<i>(Gas Metal Arc Welding)</i>	<b>GMAW</b>
	TIG	<i>(Gas Tungsten Arc Welding)</i>	<b>GTAW</b>
	al Plasma	<i>(Plasma Arc Welding)</i>	<b>PAW</b>
	ad Elettrodo Rivestito	<i>(Shielded Metal Arc Welding)</i>	<b>SMAW</b>
	di Prigionieri	<i>(Stud Arc Welding)</i>	<b>SW</b>
	ad Arco Sommerso	<i>(Submerged Arc Welding)</i>	<b>SAW</b>
<b>Saldature non tradizionali</b>	Fascio Elettronico	<i>(Electron Beam Welding)</i>	<b>EBW</b>
	ad Elettroscoria	<i>(Electroslag Welding)</i>	<b>ESW</b>
	ad Induzione	<i>(Induction Welding)</i>	<b>IW</b>
	Fascio Laser	<i>(Laser Beam Welding)</i>	<b>LBW</b>
	a Percussione	<i>(Percussion Welding)</i>	<b>PEW</b>
	Alluminotermica	<i>(Thermit Welding)</i>	<b>TW</b>
<b>Brasatura Forte</b> <i>(Brazing)</i> <b>B</b>	ad Arco	<i>(Arc Brazing)</i>	<b>AB</b>
	a Diffusione	<i>(Diffusion Brazing)</i>	<b>DFB</b>
	per Immersione	<i>(Dip Brazing)</i>	<b>DB</b>
	al Forno	<i>(Furnace Brazing)</i>	<b>FB</b>
	ad Induzione	<i>(Induction Brazing)</i>	<b>IB</b>
	ad Infrarossi	<i>(Infrared Brazing)</i>	<b>IRB</b>
	a Resistenza	<i>(Resistance Brazing)</i>	<b>RB</b>
	al Cannello	<i>(Torch Brazing)</i>	<b>TB</b>
<b>Brasatura Dolce</b> <i>(Soldering)</i> <b>S</b>	per Immersione	<i>(Dip Soldering)</i>	<b>DS</b>
	al Forno	<i>(Furnace Soldering)</i>	<b>FS</b>
	ad Induzione	<i>(Induction Soldering)</i>	<b>IS</b>
	ad Infrarossi	<i>(Infrared Soldering)</i>	<b>IRS</b>
	a Resistenza	<i>(Resistance Soldering)</i>	<b>RS</b>
	al Cannello	<i>(Torch Soldering)</i>	<b>TS</b>
	ad Onde	<i>(Wave Soldering)</i>	<b>WS</b>

Tabella 2.1: Classificazione AWS (American Welding Society)

Lo schema AWS fornisce una nomenclatura completa delle tecniche di saldatura includendo metodi passati di saldatura praticamente in disuso, saldature di uso

contemporaneo ed in via di sviluppo oltre che processi affini come la brasatura. Si identificano quindi sei categorie principali di processi di saldatura:

- Processi di Saldatura Termochimici;
- Saldature ad Arco Elettrico;
- Saldature per Resistenza;
- Saldature ad Alta Intensità Energetica;
- Saldature allo Stato Solido;
- Brasatura e Saldobrasatura.

## 2.2 Processi di Saldatura Termochimici

L'energia chimica immagazzinata in varie forme può essere utilizzata per produrre calore. In queste saldature per fusione, il processo avviene per mezzo di una reazione chimica esotermica ed esistono due tipologie:

1. **Saldatura per fusione a gas** (OFW) nel quale il calore è ottenuto mediante una fiamma prodotta dalla reazione esotermica di un gas combustibile (acetilene, propano, butano, metano e altri idrocarburi od anche idrogeno) con l'ossigeno. La saldatura a gas attualmente più diffusa è quella effettuata con l'acetilene (saldatura ossiacetilenica) e quella con l'idrogeno (saldatura ossidrica). Le saldature con altri gas possono ritenersi ormai abbandonate.
2. Saldature per reazione allumitermica che impiegano un'elevatissima reazione chimica esotermica fra particelle di materiale allo stato solido oppure tra particelle solide e un gas.

### 2.2.1 Saldatura Ossiacetilenica

La saldatura ossiacetilenica utilizza il calore che si sviluppa nella combustione esotermica data dall'acetilene che reagisce con l'ossigeno proveniente da una bombola pressurizzata per formare monossido di carbonio ed idrogeno.

$C_2H_2$	+	$O_2$	→	$2CO$	+	$H_2$	+	$446kJ/mole$
acetilene	+	ossigeno	→	monossido di carbonio	+	idrogeno	+	CALORE

L'acetilene possiede una temperatura di combustione maggiore rispetto ad altri gas ed è facilmente riproducibile anche se non presente in natura. Esistono tre procedimenti per la sua produzione: quello generalmente usato per la saldatura e ottenuto mediante reazione tra carburo di calcio ed acqua.



Figura 2.1: Postazione mobile per saldatura manuale ossiacetilenica.

Con riferimento alla figura figura 2.1, la saldatura ossiacetilenica necessita di una postazione di lavoro (fissa o mobile su carrello) composta da:

- Due bombole ad alta pressione: una di ossigeno e una di acetilene;
- Organi di collegamento: tubazioni (2), riduttori di pressione (1), valvole, misuratori di pressione, raccordi rapidi (3);
- Cannello (5): apparecchio nel quale vengono miscelati con le giuste proporzioni ossigeno e acetilene per produrre la fiamma.
- Dispositivi di sicurezza: dispositivi di arresto dei ritorni di fiamma (4).

La combustione avviene all'estremità di un'apposito cannello e produce una fiamma di forma conica (dardo) ad elevata temperatura. Con una fiamma ossiacetilenica di tipo neutro<sup>1</sup> si possono raggiungere temperature di circa  $3300^{\circ}C$ .

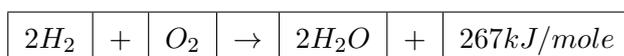
<sup>1</sup>La fiamma neutra si ottiene quando acetilene e ossigeno sono miscelati nella quantità prossima a 52% di acetilene e 48% di ossigeno.

Tabella 2.2: Vantaggi e svantaggi della saldatura ossiacetilenica

Vantaggi	Svantaggi
1. Fiamma con temperatura più elevata 2. Stabilità della reazione esotermica	1. può essere più costoso di altri combustibili a gas
1. Processo semplice 2. Portabilità 3. Versatilità (tagliare materiali, riscaldamento) 4. Equipaggiamento economico	1. Limitata fonte di calore 2. Processo lento 3. Elevata distorsione termica nelle zone adiacenti (soprattutto per metalli sottili) 4. Difficile applicazione (per materiali grosso spessore) 5. Necessita manualità e buone competenze

### 2.2.2 Saldatura Ossidrica

La saldatura ossidrica differisce da quella ossiacetilenica per l'uso dell'idrogeno, anziché dell'acetilene, secondo la reazione esotermica seguente:

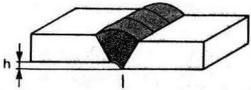
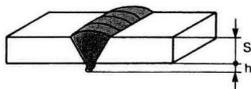
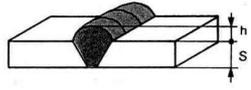


L'idrogeno viene ottenuto per elettrolisi dell'acqua oppure metano. L'idrogeno viene contenuto compresso in bombole di acciaio. I cannelli ossidrici sono come quelli ossiacetilenici ad alta pressione. La temperatura della fiamma ossidrica è di  $2300 \div 2370^\circ\text{C}$ ; data questa temperatura non molto elevata la saldatura ossidrica, molto diffusa in passato, è attualmente è utilizzata per saldare metalli e leghe a bassa temperatura di fusione (e.g., piombo) oppure per il taglio di materiali metallici immersi nell'acqua.

### 2.2.3 Difetti nelle Saldature a Gas

Come riassunto in tabella 2.3, il procedimenti per fusione a gas possono presentare numerosi difetti di saldatura, quasi tutti causati da un saldatore poco esperto.

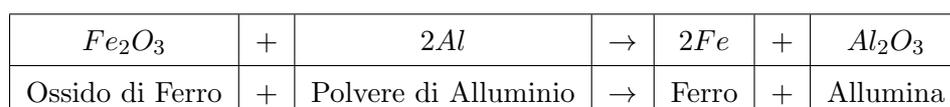
Tabella 2.3: Difetti della saldatura ossiacetilenica

<b>Slivellamento dei lembi</b>		
<b>Cause:</b>	Scarsa cura nel disporre i lembi Bloccaggio insufficiente	
<b>Tolleranze:</b>	$h \leq 1mm$	
<b>Rimedi:</b>	Martellatura dei lembi	
<b>Mancanza di penetrazione</b>		
<b>Cause:</b>	Scarsa preparazione Velocità di avanzamento eccessiva Fiamma di potenza insufficiente Scarsa abilità del saldatore Eccessiva vicinanza dei lembi da unire	
<b>Rimedi:</b>	La saldatura deve essere ripresa a rovescio	
<b>Eccesso di penetrazione (Burn Through)</b>		
<b>Cause:</b>	Scarsa preparazione Scarsa velocità di avanzamento	
<b>Tolleranze:</b>	$h \leq s/2$	
<b>Rimedi:</b>	Molatura a rovescio	
<b>Sovrappessore eccessivo (Excessive Convexity)</b>		
<b>Cause:</b>	Scarsa velocità di avanzamento Scarsa abilità del saldatore	
<b>Tolleranze:</b>	$h \leq s/2$	
<b>Rimedi:</b>	Molatura	
<b>Soffiature (Gas Cavities)</b>		
<b>Cause:</b>	Fiamma del cannello mal regolata (eccesso di acetilene) Acciaio non calmato	
<b>Tolleranze:</b>	Le soffiature contengono ossido di carbonio	
<b>Rimedi:</b>	Nessun rimedio	
<b>Maglia irregolare (Poor Surface Appearance)</b>		
<b>Cause:</b>	Scarsa abilità de saldatore	
<b>Rimedi:</b>	Nessun rimedio	
<b>Incollatura (Incomplete Fusion)</b>		
<b>Cause:</b>	Potenza del cannello insufficiente Scarsa abilità del saldatore Cattiva preparazione dei lembi da saldare Errata scelta del diametro della bacchetta	
<b>Rimedi:</b>	Nessun rimedio	

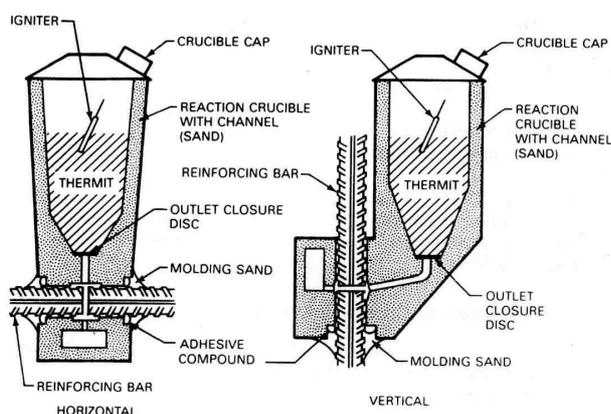
### 2.2.4 Saldatura Alluminotermica

La saldatura alluminotermica è comunemente conosciuta come "Saldatura alla Termite" (*Thermit Welding* - TW).

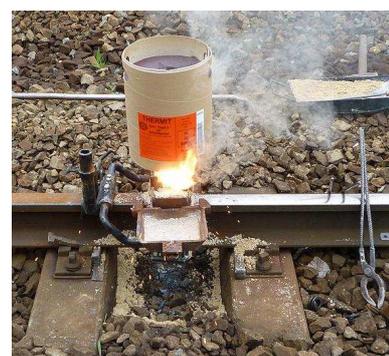
Questo procedimento è basato sulla reazione rapidissima ( $10 \div 20$  s), ideata dal chimico Hans Goldsmith, tra polvere di alluminio e ossido di ferro, miscuglio denominato "termite", espressa da:



La reazione è fortemente esotermica per cui ferro e allumina si ottengono allo stato fuso (ad una temperatura di  $2800^\circ C$ ) e, data la differenza di massa volumica, l'allumina galleggia sopra il ferro proteggendolo dall'ossigeno e azoto dell'aria. Nella saldatura alla termite, la reazione solitamente avviene all'interno di un crogiolo (*vassel*) posizionato sopra lo stampo attorno al confine degli elementi da collegare. Una volta che la reazione ha avuto luogo, il metallo fuso prodotto cade sotto influenza della gravità nello stampo e si distribuisce formando la saldatura.



(a) Schematizzazione per saldatura barre di acciaio rinforzato (orizzontale e verticale)



(b) Saldatura di rotaie.

Figura 2.2: Applicazioni per saldatura alla termite.

## 2.3 Saldature ad Arco Elettrico

I processi di saldatura per fusione che implementano un *arco elettrico* come fonte di calore sono chiamati AW (*Arc Welding*). Questo metodo, oltre ad essere uno dei più antichi e diffusi metodi di saldatura, corrisponde al procedimento di saldatura che si presta ad essere maggiormente automatizzato.

Le caratteristiche comuni sono relative a:

1. **Calore:** fornito dall'arco voltaico che scocca tra un elettrodo e i lembi dei pezzi da saldare oppure tra due elettrodi;
2. **Metallo d'apporto:** costituito dell'elettrodo stesso oppure da una bacchetta o filo metallico a parte;
3. **Protezione del bagno di fusione:** è realizzata da una sostanza che, fondendo, si dispone in modo da impedire il contatto tra l'aria ed il bagno di fusione, oppure, da un gas opportunamente inviato sui lembi da saldare che non reagisce con il bagno di fusione e lo isola dal contatto con l'aria.

I processi che utilizzano l'arco elettrico possono essere adoperati con diverse modalità di corrente (corrente continua o alternata) e polarità di elettrodo, provocando distinte caratteristiche di saldatura.



(a) Principio di funzionamento generale.



(b) Accessori: morsetti, spazzola metallica, maschera, pinza porta-elettrodo.



(c) Generatore ad inverter.

Figura 2.3: Saldatura ad arco elettrico.

### 2.3.1 Saldatura TIG – Elettrodo Infusibile in Atmosfera Gassosa

La saldatura TIG<sup>2</sup> (*Tungsten Inert Gas*) viene denominato talvolta anche "Argon-arc" oppure "Heli-arc" in base al gas di protezione utilizzato.

Il procedimento GTAW (*Gas-tungsten Arc Welding*) utilizza un **elettrodo di tungsteno** (permanente e non consumibile) per creare un arco con il pezzo da saldare. Per prevenire la sua degradazione, questo elettrodo è protetto da un *gas inerte* che può essere:

- **Argon**: offre una migliore protezione dato che è più pesante e tende a rimanere nella zona di fusione. Anche l'inizio dell'arco è migliore entro certi potenziali di lavoro.
- **Elio**: produce un arco più caldo, dovuto dalla possibilità di avere potenziale di lavoro più elevati rispetto all'argon.
- **Entrambi**: si ottengono caratteristiche miste.

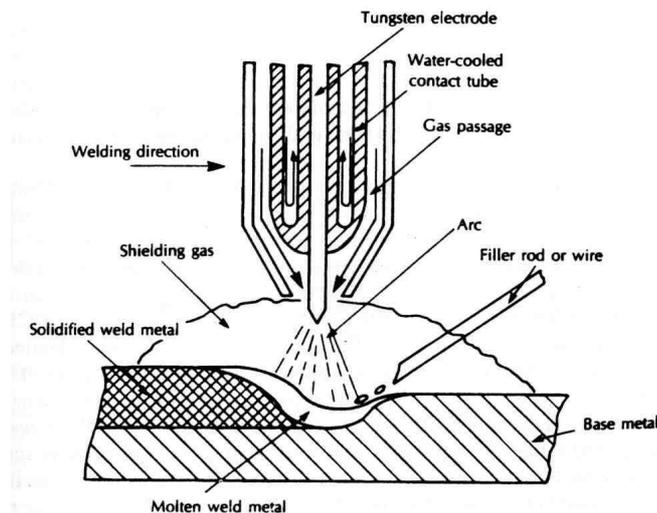


Figura 2.4: Schematizzazione del processo di saldatura ad arco con elettrodo infusibile di tungsteno in atmosfera gassosa, incluso il collegamento elettrico

Come mostrato in figura 2.4, la corrente fornita dal generatore viene passata all'elettrodo di tungsteno in una torcia attraverso il tubo di contatto. Questo

<sup>2</sup>"TIG" è stato coniato dalla Linde Company (multinazionale tedesca di gas industriali e prodotti metalmeccanici).

tubo è usualmente (ma potrebbe non esserlo) raffreddato ad acqua per prevenire il surriscaldamento.

Il processo GTAW potrebbe essere eseguito con o senza materiale d'apporto. Quando l'apporto di materiale non è impegnato, la giunzione deve essere sottile ed avere una configurazione a testa chiusa.

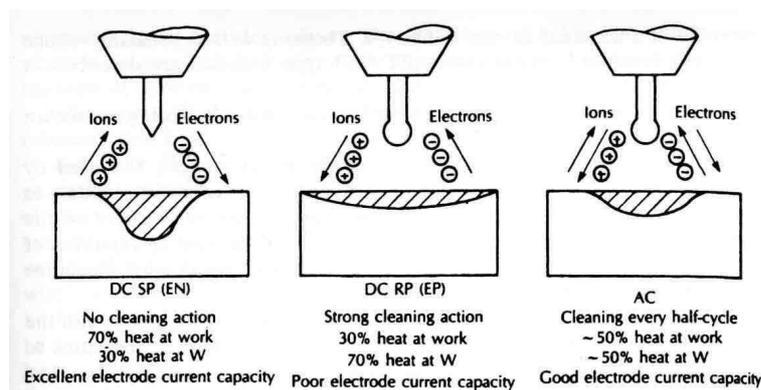


Figura 2.5: Modalità operative per la saldatura ad arco elettrico (particolarmente più evidente nel procedimento GTAW)

Come schematizzato in figura 2.5, i modi operativi per la saldatura TIG sono:

1. DC–SP(EN): *Direct Current–Straight Polarity (Electrode Negative)*:

Con la modalità a **corrente continua a polarità diretta**, il pezzo di lavoro è connesso al terminale positivo (+) mentre l'elettrodo è polarizzato negativamente.

2. DC–RP(EP): *Direct Current–Reverse Polarity (Electrode Positive)*:

Con la modalità a **corrente continua a polarità inversa**, il pezzo di lavoro è connesso al terminale negativo (-) mentre l'elettrodo è polarizzato positivamente.

3. AC: *Alternate Current*: la terza modalità riguarda la **corrente alternata**.

Molti di questi effetti sono molto meno evidenti in altri tipi di saldatura ad arco sviluppati con elettrodo fusibile (in particolare tra DCSP e DCRP). Questo è dovuto dalla parte di calore nel processo che dev'essere impiegata per consumare l'elettrodo.

La tabella 2.7 riassume i principali vantaggi e svantaggi della saldatura a elettrodo infusibile in atmosfera gassosa. Per ovviare alla limitato tasso di deposizione, una variante è quella di utilizzare il "filo caldo" nel quale il filo d'apporto è preriscaldato oppure utilizzare una maggiore intensità di corrente, con un miglior raffreddamento ad acqua, ma il processo deve essere necessariamente automatizzato.

Tabella 2.4: Vantaggi e svantaggi del procedimento GTAW

Vantaggi	Svantaggi
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Buono per materiali sottili (specialmente nella modalità DCRP)</li> <li>2. Miglior controllo nell'apporto di materiale</li> <li>3. Eccellente pulizia ed affidabilità della saldatura</li> <li>4. Processo automatizzabile</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Scarso calore in ingresso</li> <li>2. Processo molto lento (circa <math>0,5 \div 1kg</math> all'ora)</li> <li>3. Necessita buone competenze</li> </ol>



(a) Componenti per turbine di aerei con 10 assi interpolati.



(b) Manipolazione e saldatura di raccordi in acciaio inox con carico e scarico automatico mediante combinazione di torcia e pinza.

Figura 2.6: Impianti robotizzati per saldatura TIG.

La saldatura TIG presenta un'esteso grado di automazione: oltre ad essere impiegata molto spesso manualmente, può essere integrata in un impianto di saldatura robotizzata (figura 2.6) ad alta precisione e qualità di saldatura per prodotti anche di medie dimensioni.

### 2.3.2 Saldatura al Plasma

La saldatura al plasma è molto simile al procedimento GTAW in quanto essi utilizzano entrambi un **elettrodo di tungsteno** infusibile per produrre l'arco con il pezzo di lavoro.

La differenza è che nella saldatura al plasma è presente l'azione convergente dei gas inerti nell'orifizio dell'ugello della torcia provocando il restringimento dell'arco (figura 2.7).

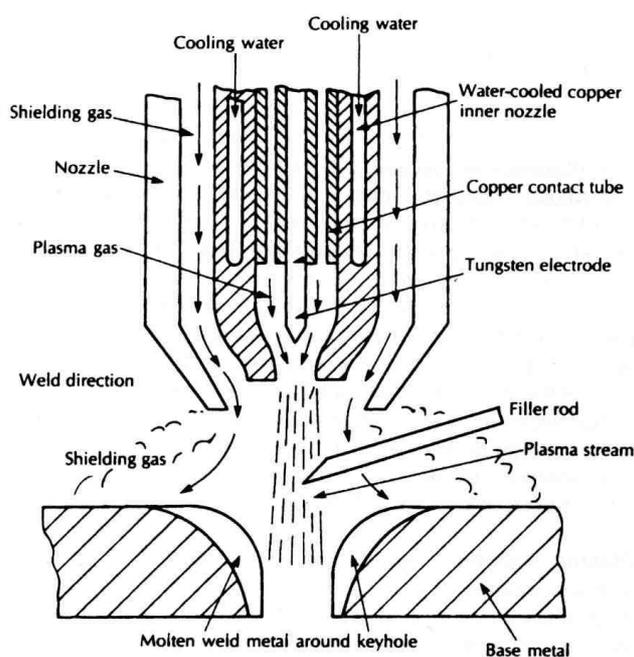


Figura 2.7: Schematizzazione della torcia per saldatura al plasma

Il plasma è creato da un flusso di piccolo volume di argon attraverso un'orifizio interno nella torcia per PAW. In un ugello esterno e concentrico ad esso proviene un'altro gas inerte che fornisce la protezione all'arco e alla saldatura. Questo gas di protezione può essere indifferentemente (cioè non provoca nessuna caratteristica particolare) argon, elio, argon con elio oppure idrogeno.

Esistono due diverse metodologie di saldatura al plasma, raffigurate in 2.8:

1. **Modalità in conduzione** (*Conduction mode o melt-in*)
2. **Modalità Keyhole** (*Keyhole mode*)

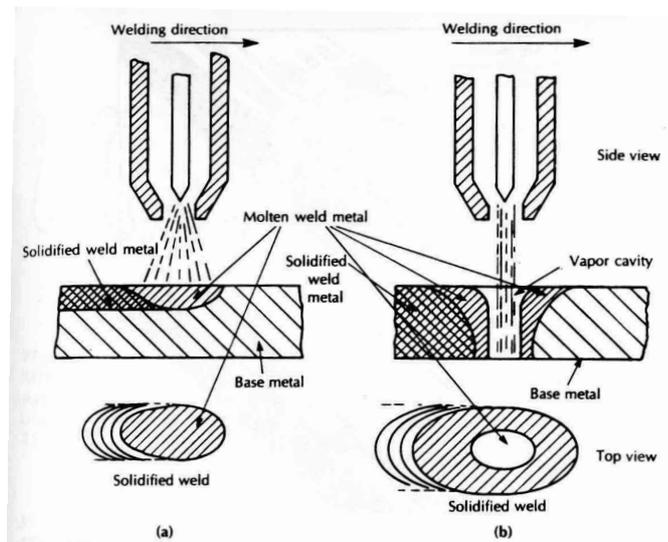


Figura 2.8: Schematizzazione della due modalità per saldatura al plasma: (a) conduzione e (b) keyhole.

La modalità keyhole è particolarmente importante nei processi con fascio ad alta intensità energetica, mentre la modalità melt-in corrisponde alle tradizionali saldature ad arco.

L'unico grosso limite della saldatura al plasma è l'equipaggiamento richiesto che risulta molto più complesso e costoso rispetto alla saldatura GTAW. Soprattutto la torcia tende ad essere particolarmente grande rendendola difficilmente maneggiabile durante la saldatura manuale.

I vantaggi e svantaggi di questa metodologia PAW sono riassunti nella tabella 2.5.

L'applicazione tipica che riguarda il plasma è il taglio dei materiali su attrezzature dedicate (figura 2.9). Tuttavia, il procedimento riguarda anche la saldatura robotizzata, allo stesso modo di altre tecniche ad arco.

La saldatura al plasma è comunemente utilizzato nel settore aerospaziale, nelle applicazioni la costruzione di condotte, ed anche per la fabbricazione di prodotti commerciali di qualità.

Tabella 2.5: Vantaggi e svantaggi del procedimento PAW

Vantaggi	Svantaggi
1. Maggiore concentrazione di energia (i.e., maggiore densità di energia)	1. Equipaggiamento molto costoso, complicato ed ingombrante
2. Maggior quantità di calore	2. Necessita buone competenze
3. Miglior stabilità dell'arco	
4. Penetrazione della saldatura più profonda	
5. Velocità di saldatura più elevata	
6. La punta di tungsteno non può toccare il pezzo di lavoro causandone la contaminazione	
7. Versatilità utilizzando diverse punte della torcia	



(a) Macchine CNC di taglio al plasma.



(b) Testa manipolatore per torcia di saldatura al plasma.

Figura 2.9: Esempi di applicazioni al plasma.

### 2.3.3 Saldatura MIG/MAG – Filo Continuo in Atmosfera Gassosa

In questo metodo di saldatura viene usato, come nel procedimento TIG, un gas di protezione del bagno di fusione, l'elettrodo è invece un **filo continuo consumabile** in quanto costituisce il metallo d'apporto. Una schematizzazione del processo è raffigurato in figura 2.10.

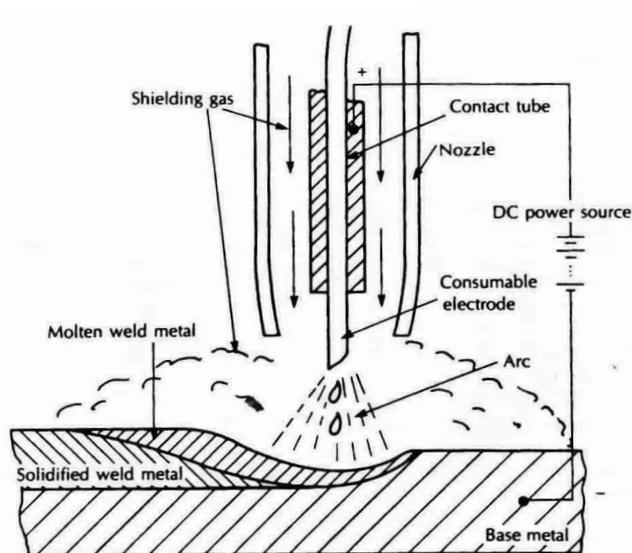


Figura 2.10: Schematizzazione del processo GMAW in modalità corrente continua - polarizzazione inversa (DCSP)

Il gas di protezione nella procedura GMAW (*Gas-Metal Arc Welding*) gioca due ruoli fondamentali:

1. proteggere dall'aria esterna l'arco ed il metallo fuso che cola dal filo;
2. fornisce una desiderata caratteristica all'arco attraverso il suo effetto ionizzante.

A seconda del tipo di gas di protezione utilizzato, che dipende dal tipo di metallo da saldare, dalla forma della giunzione e dalle specifiche caratteristiche desiderate, il procedimento si distingue in due tipi<sup>3</sup>:

<sup>3</sup>le sigle derivano dalla letteratura tecnica Usa dove questi metodi di saldatura sono stati messi a punto verso il 1940.

- **Procedimento MIG** (*Metal Inert Gas*): quando si impiega, come gas di protezione, elio o argon (e loro miscele) i quali non hanno alcuna attività chimica nemmeno alle alte temperature dell'arco voltaico;
- **Procedimento MAG** (*Metal Active Gas*): il gas di protezione ha un'attività chimica ossidante, seppure modesta, nel bagno di fusione. In tal caso i gas usati sono: anidride carbonica, miscele di aria e anidride carbonica, miscele di aria ed ossigeno ecc.

La saldatura con procedimento MAG è più economica ma di qualità inferiore e sta avendo un'applicazione crescente nei sistemi robotizzati.

Un considerevole beneficio del procedimento GMAW sono le modalità di trasferimento con cui il metallo fuso viene trasferito dall'elettrodo consumabile che può essere intenzionalmente variato e controllato. Esistono quattro modi predominanti per trasferire il metallo:

1. **Procedimento Spray-arc**: trasferimento assiale di piccole e discrete particelle o goccioline fuse dall'elettrodo consumabile al pezzo al bagno di fusione, con un tasso di alcune centinaia al secondo. Questo metodo di trasferimento è molto stabile, direzionato ed essenzialmente senza schizzi (*spatter*). Il procedimento spray-arc si ottiene con un elevato amperaggio e voltaggio (in genere superiore a 200A di corrente e 25V di tensione).
2. **Procedimento Globular-arc**: formazione di grossi globuli di metallo fuso nella punta dell'elettrodo-filo consumabile. Essi vengono rilasciati e trasportati nella zona di fusione fondamentalmente per effetto della gravità e, per causa minore, dalla forza esercitata dall'arco. Il tasso di gocce trasferite è basso, tipicamente circa da 1 a 10 gocce al secondo e gli schizzi di metallo fuso sono generalmente da considerare nel procedimento globular-arc.
3. **Procedimento Short-arc**: corrente e voltaggio della saldatrice sono tenuti bassi con conseguente formazione di lente gocce di metallo fuso all'estremità dell'elettrodo che sono periodicamente immersi (tipicamente 50 volte al

secondo) con il bagno di fusione. Con tensioni di  $15 \div 20V$  si ottengono archi molto corti, da cui l'origine il nome "Shot arc".

4. **Procedimento Puls-arc:** è possibile imporre una corrente intermittente fatta di impulsi di grande ampiezza nella corrente costante di base. In questo caso si uniscono i vantaggi delle altre procedure, ovvero permette lo trasferimento spray-arc utilizzando seppur bassi livelli di correnti tipico dello shot-arc. È essenziale un'intensa atmosfera di argon di protezione ed una sorgente di energia programmabile.

La tabella 2.6 riassume le caratteristiche della saldatura MIG/MAG.

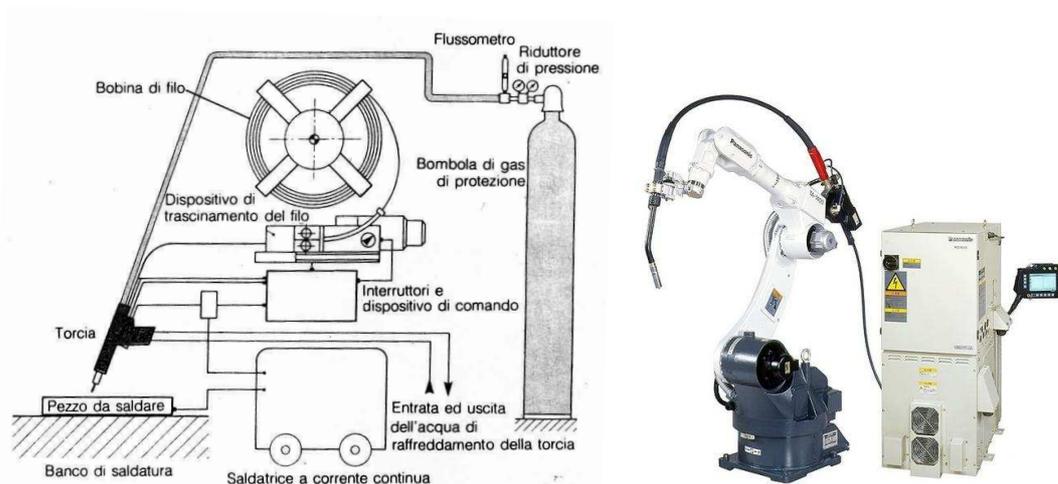
Tabella 2.6: Vantaggi e svantaggi del procedimento GMAW

Vantaggi	Svantaggi
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Processo flessibile e versatile</li> <li>2. Facilmente automatizzabile</li> <li>3. Richiede meno abilità manuali (rispetto procedimento TIG)</li> <li>4. Fornisce un'alto tasso di deposizione (<math>5 \div 20kg/h</math>)</li> <li>5. Efficienza nel trasferimento di calore</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Impiego di equipaggiamenti costosi (soprattutto la saldatrice)</li> </ol>

La saldatura manuale (figura 2.11a) a filo continuo in atmosfera di protezione comprende:

1. un generatore di corrente elettrica;
2. un rullo portafilo con un motorino per l'avanzamento automatico del filo stesso;
3. bombola contenente il gas di protezione;
4. impianto di raffreddamento ad acqua della torcia;
5. torcia porta-elettrodo generalmente a forma di pistola a cui proviene, oltre al filo, anche il gas di protezione, la corrente elettrica e l'acqua di raffreddamento.

Tuttavia, il procedimento di saldatura MIG/MAG presenta un completo grado di automazione: impianti di saldatura robotizzata (figura 2.11b), macchine automatiche inserite in linee di produzione, attrezzature dedicate per elevate cadenze produttive ecc.



(a) Postazione di lavoro manuale ed equipaggiamento.

(b) Robot di saldatura.

Figura 2.11: Esempi di applicazioni per procedimento MIG/MAG

### 2.3.4 Saldatura ad Arco con Elettrodo Rivestito

Il procedimento SMAW (*Shielded-Metal Arc Welding*) è anche conosciuto come *stick welding*. Come mostrato in figura 2.12, l'arco elettrico è formato tra l'estremità di una bacchetta-elettrodo (di lunghezza finita) consumabile e la superficie del metallo da saldare. Il calore raggiunto fa fondere anche l'estremità dell'elettrodo fornendo il metallo d'apporto alla giunzione.

Il rivestimento esterno (*flux*) dell'elettrodo interpreta diverse funzioni:

1. Genera un fumo di **gas di protezione** per schermare il bagno di fusione dal contatto con l'aria.
2. Fornisce **deossidanti** e **agenti riducenti** nel bagno di fusione come metallo fuso, per deossidare e pulire la saldatura. Una volta solidificata, la scoria (*slag*) protegge esternamente il metallo, anch'esso solidificato, ma ancora caldo e reattivo all'interno dei giunti da saldare.

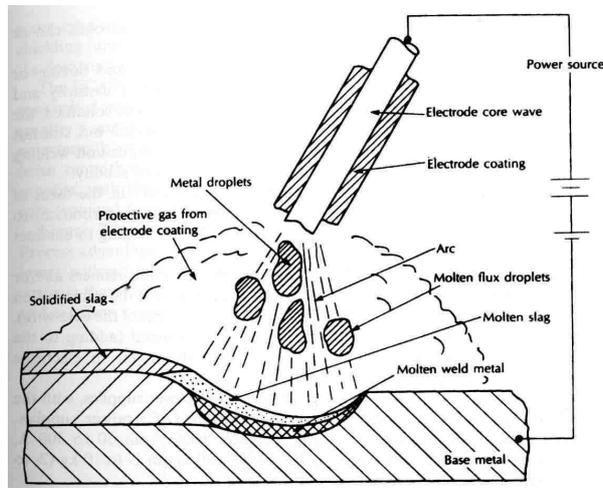


Figura 2.12: Schematizzazione del procedimento di saldatura ad arco con elettrodo rivestito (SMAW)

3. Provvede alla **stabilizzazione** dell'arco attraverso componenti facilmente ionizzanti (e.g., carbonato di litio) per aiutare l'inizio dell'arco elettrico e per mantenerlo costante e stabile nel tempo aiutando la conduzione di corrente.
4. Infine fornisce **elementi leganti** per raffinare, aiutare e controllare la composizione e microstruttura della saldatura, aumentando anche il tasso di deposizione di materiale d'apporto fornito dal cuore della bacchetta-elettrodo.

Il procedimento SMAW presenta alcuni vantaggi e svantaggi, riassunti nella tabella 2.7.

Tabella 2.7: Vantaggi e svantaggi del procedimento SMAW

Vantaggi	Svantaggi
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Semplice</li> <li>2. Portabile (poco ingombrante)</li> <li>3. Richiede un'equipaggiamento poco costoso</li> <li>4. Processo versatile (i.e., fabbricare, assemblare, mantenere, riparare per interni od all'aperto)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Offre una limitata protezione alla saldatura (confronto al TIG)</li> <li>2. Limitato tasso di deposizione (rispetto ad altre tecniche ad arco)</li> <li>3. Richiede buone competenze dell'operatore (ma non più di altre tecniche manuali)</li> </ol>



(a) Esempio di saldatura manuale SMAW.



(b) Saldatrice ad inverter con cavo di massa e pinza porta elettrodo.

Figura 2.13: Saldatura manuale ad arco con elettrodo rivestito.

La saldatura SMAW è la forma più comune di saldatura ad arco manuale. Tuttavia, la creazione di una buona saldatura non è sempre facile, soprattutto per un principiante. A differenza della saldatura MIG, essa richiede un livello di abilità superiore e una padronanza di alcune tecniche.

### 2.3.5 Saldatura Flux-Cored

La saldatura flux-cored è molto simile alla saldatura con elettrodo rivestito (SMAW) in quanto anch'essa è auto-protettiva; il rivestimento che nella SMAW occupava la parte esterna della bacchetta-elettrodo, nel caso della saldatura FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*) la generazione di gas e scoria di protezione è dovuto dalla fusione dal flusso animato del cuore della bacchetta-elettrodo (o filo).

La protezione fornita dalla generazione di gas dal cuore attraverso l'arco elettrico risulta migliore rispetto al caso del rivestimento esterno<sup>4</sup>. Questo è il motivo per il quale FCAW è una scelta eccellente per la saldatura all'aperto. In generale fornisce i seguenti vantaggi:

- Alto tasso di deposizione (e.g., 2 ÷ 15 kg/h) e quindi maggiore velocità;
- Minor pulizia preliminare dei lembi da saldare;

<sup>4</sup>In alcuni casi può essere adoperato un'ulteriore gas di protezione esterno all'elettrodo, tuttavia questa possibilità è relativa al processo MIG/MAG.

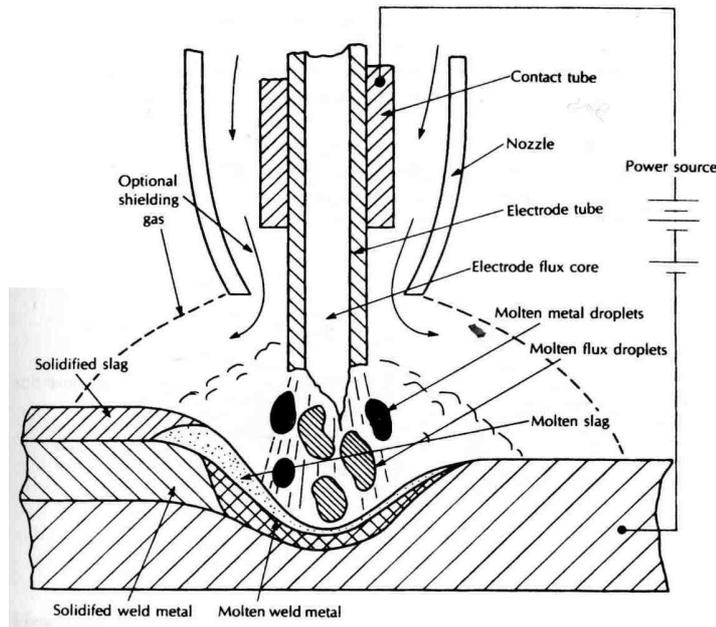


Figura 2.14: Schematizzazione del procedimento FCAW: il cuore del filo costituisce la protezione (*flux*) con le stesse funzioni del rivestimento nella SMAW, mentre il materiale d'apporto ricopre la bacchetta-elettrodo.

- Portabilità;
- Migliore per saldature all'aperto (dovuto ad una maggiore protezione del bagno di fusione); Possibilità di utilizzo in diverse posizioni.

La saldatura Flux-cored può utilizzare sia un generatore DC, con elettrodo polarizzato negativamente o positivamente dipendentemente dal particolare tipo di filo utilizzato e dalla formazione desiderata.

Questo procedimento può essere manuale oppure automatico o semi-automatico in alternativa alla saldatura MIG/MAG per saldature all'esterno.

### 2.3.6 Saldatura ad Arco Sommerso

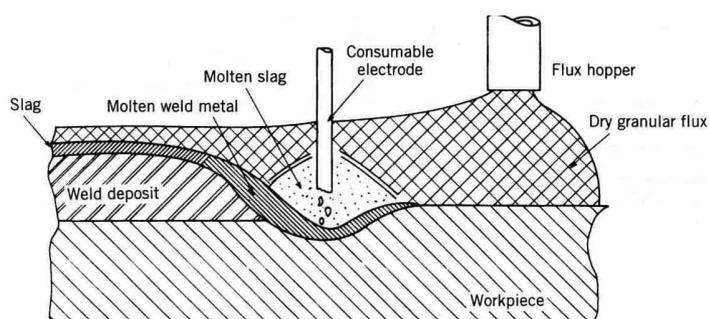


Figura 2.15: Schematizzazione della saldatura ad Arco Sommerso

Nella saldatura SAW (*Submerged Arc Welding*), mostrato in figura 2.15, l'arco ed il bagno di fusione sono protetti da:

- Un involucro di metallo fuso di protezione che solidificando si dispone sopra il cordone di saldatura (scoria);
- Una **polvere granulare** non-fusa, che viene fatta cadere con un'alimentazione in eccesso da apposita tamoggia di scarico sulla zona che precede la saldatura; in tal modo l'arco voltaico risulta completamente nascosto nella polvere granulare.

Il metallo d'apporto è un filo metallico che fonde e che, a mano a mano che si consuma, viene sostituito da un nuovo filo proveniente da un'apposita bobina.

Il nome del procedimento "ad arco sommerso" è giustificato dal fatto che effettivamente l'arco è nascosto dalla polvere granulare versata in eccesso, ma ciò non rappresenta un ostacolo dato che tutti i parametri del processo sono regolati automaticamente. Approssimativamente viene consumato un chilogrammo di materiale di protezione ogni chilogrammo di materiale d'apporto alla saldatura utilizzato (rapporto 1 a 1).

Il procedimento SAW è sempre automatizzato a causa delle elevate correnti utilizzate (da 500 fino a 3000 A) e dall'alto tasso di deposizione. Talvolta può utilizzare molteplici fili d'apporto con lo scopo di aumentare il tasso di deposizione.



Figura 2.16: Macchina automatica per saldatura ad arco sommerso.

Tabella 2.8: Vantaggi e svantaggi del procedimento SAW dovuto dall'applicazione della polvere granulare.

Vantaggi	Svantaggi
1. Elevato tasso di deposizione (e.g., $27 \div 45$ kg/h)	1. L'applicazione è ristretta per posizioni orizzontali o piatte
2. Alta affidabilità della saldatura	2. Equipaggiamento ingombrante e poco portatile
3. Elevata efficienza del trasferimento di calore (solitamente sopra 90%)	
4. Alta velocità di saldatura (sopra 500 cm/min per piccole sezioni)	
5. Perdita di piccole radiazioni e spatter (schizzi di metallo fuso) all'esterno	

### 2.3.7 Saldatura ad Elettro-gas

Il procedimento EGW (*ElectroGas Welding*) è una saldatura con pesante tasso di deposizione, spesso più che della saldatura ad arco sommerso.

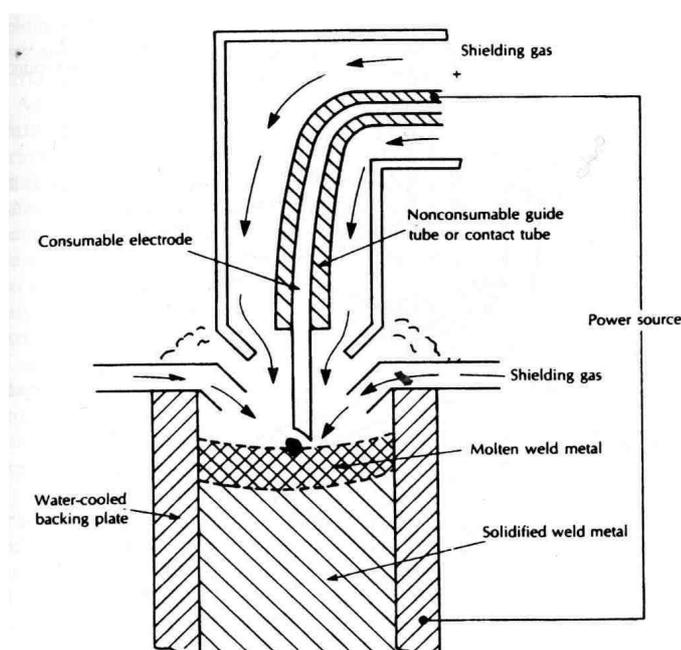


Figura 2.17: Schematizzazione della saldatura ad Elettro-Gas.

La saldatura si ottiene (figura 2.17) operando sotto protezione di gas inerti forniti attraverso tubi di flusso nella sommità della giunzione che rimane racchiusa tra due piatti o argini raffreddati ad acqua. Infatti, questo processo può essere svolto esclusivamente verticalmente, dal basso verso l'alto.

Tabella 2.9: Vantaggi e svantaggi del procedimento ad Elettro-Gas

Vantaggi	Svantaggi
1. Tasso di deposizione molto elevato (maggiore rispetto SAW)	1. L'applicazione è limitata per saldature verticali
2. Alta affidabilità e qualità della saldatura	
3. Richiede una minima preparazione dei giunti	

### 2.3.8 Saldatura ad Elettro-Scoria

La saldatura è prodotta in senso verticale, dal basso all'alto, come nel processo ad Elettro-Gas, ed occasionalmente per filettature orizzontali. Il metallo fuso è racchiuso nella giunzione attraverso l'utilizzo di **pattini** (o argini) **di rame raffreddati ad acqua**, come mostrato in figura 2.18, formando una lingotteria entro la quale va posto inizialmente uno strato di polvere granulare.

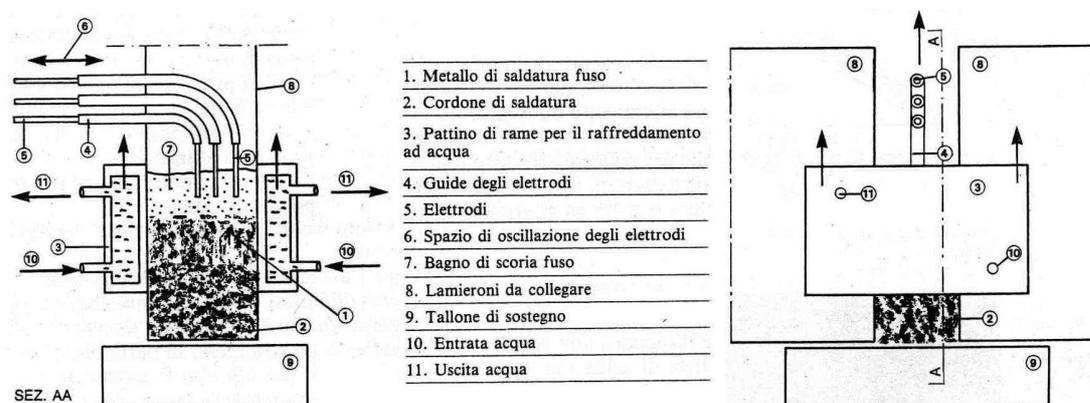


Figura 2.18: Schematizzazione della saldatura ESW (*ElectroSlag Welding*)

Annegati nel flusso vengono disposti da *uno a tre fili-elettrodi* sostenuti da apposite giude. L'arco elettrico è utilizzato solo inizialmente e scocca tra elettrodi e il tallone di sostegno, fondendo una parte di metallo di protezione (scoria) e la punta degli elettrodi che costituiscono il materiale d'apporto.

Una volta innescato il processo, l'arco si spegne dato che la corrente continua a passare attraverso la scoria conduttrice con l'estremità dei fili-elettrodo che continuano a fondere. Nel corso del procedimento i pattini di raffreddamento si alzano mentre il metallo fuso si solidifica realizzando il collegamento dei giunti. La scoria fusa (o ancora in polvere) rimane disposta sopra il metallo d'apporto data la sua minore massa volumica.

Il metodo è applicato soprattutto nell'industria pesante per la saldatura di pezzi di grande spessore (lamieroni superiori a 150 mm di sezione). La tabella 2.10 riassume i principali vantaggi/svantaggi di tale saldatura.

Tabella 2.10: Caratteristiche principali del procedimento ad Elettroscoria

Vantaggi	Svantaggi
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tasso di deposizione ottimo (circa <math>7 \div 13</math> kg/h per un solo elettrodo))</li> <li>2. Saldatura economica e veloce</li> <li>3. Richiede una minima preparazione dei giunti</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. L'applicazione è limitata per saldature di lamerioni spessi</li> <li>2. Saldature di medio-bassa qualità</li> </ol>



Figura 2.19: Esempio di macchina per la saldatura ad elettroscoria per la giunzione longitudinale di un cilindro.

### 2.3.9 Saldatura dei Prigionieri

La saldatura dei prigionieri o dei perni, meglio conosciuta come *stud arc welding* (SW), è un speciale procedimento all'arco elettrico destinato a saldare su una superficie metallica un gambo metallico quale più comunemente prigioniero. Il prigioniero sotto forma di barra filettata, bullone o gancio, ha la funzione di elettrodo e l'arco scocca fra l'estremità di esso e la superficie prospiciente del metallo base. Generalmente, per evitare spruzzi di metallo fuso si ricorre ad una scodellina refrattaria di porcellana denominata "ferrula", la quale viene rimpiazzata in ogni ciclo di saldatura rendendosi non riutilizzabile. La ferrula inoltre viene utilizzata per concentrare il calore e prevenire l'ossidazione del giunto. La figura 2.20 mostra le fasi con cui si svolge questa tecnologia di saldatura.

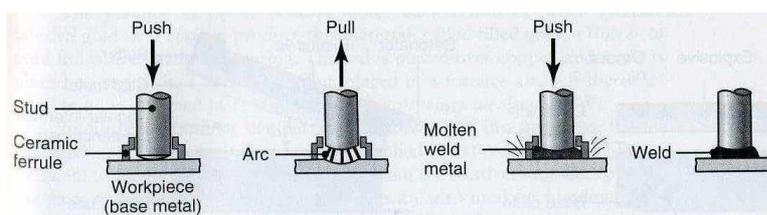


Figura 2.20: Fasi del procedimento stud arc welding [4].

L'equipaggiamento per la saldatura dei perni può essere automatizzato, con vari controlli dell'arco e della pressione applicata; disponibile anche un'equipaggiamento portatile.

Può essere utilizzato anche una scarica capacitiva anziché l'energia di una saldatrice. Il condensatore ha una capacità di circa 0,1 Farad e viene caricato dalla rete tramite un raddrizzatore. Il prigioniero presenta una punta centrale sporgente destinata a definire il contatto iniziale di destinazione. In questo caso non sono richiesti la ferrula e flussi protettivi in quanto il tempo di saldatura è molto breve (nell'ordine di  $1 \div 6$  millisecondi).

### 2.3.10 Saldatura in Idrogeno atomico

La saldatura in idrogeno atomico (o arcatom) è stato il primo procedimento di saldatura con l'impiego di un'atmosfera gassosa di protezione, ma oggi è pressoché abbandonato per il costo elevato dell'idrogeno (consuma  $1 \div 2 m^3/h$ ).

Il procedimento, rappresentato in figura 2.21, consiste in due elettrodi di tungsteno tra i quali scocca un arco voltaico (corrente da 20 a 80 A e tensione da 30 a 90 A).

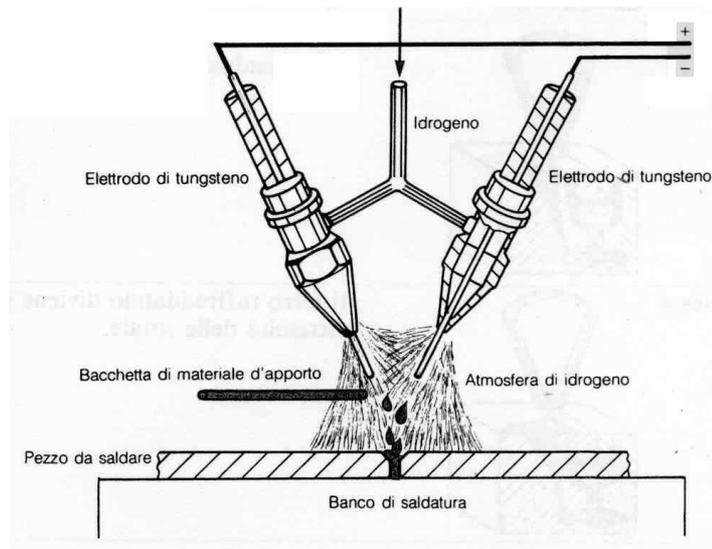


Figura 2.21: Schema della saldatura AHW (*Atomic Hydrogen Welding*)

La parte terminale degli elettrodi è investita ed avvolta da una corrente di idrogeno che ha due funzioni:

1. **Proteggere** la zona di saldatura dal contatto con l'aria
2. **Riscaldare** i giunti: le molecole di idrogeno attraversando l'arco si scindono nei rispettivi atomi assorbendo grandi quantità di calore; successivamente gli atomi restituiscono il calore quando vengono a contatto dei lembi dei pezzi da saldare ricomponendosi in molecole (i lembi raggiungono temperature di  $4000^{\circ}C$ ).

La bacchetta di metallo d'apporto viene introdotta nell'arco voltaico portandola a fusione e lasciando cadere le gocce di metallo tra i giunti da collegare.

Le saldature in idrogeno atomico sono ottime e veloci; consentono di saldare anche leghe "difficili", per esempio gli acciai inossidabili.

### 2.3.11 Difetti nelle Saldature ad Arco

I difetti delle saldature ad arco con elettrodo rivestito sono numerosi e dovuti essenzialmente ad un saldatore poco esperto (nei processi manuali ad arco) e a fenomeni di natura metallurgica. La tabella 2.11 raccoglie i principali difetti di saldatura.

Si possono distinguere due categorie di difetti:

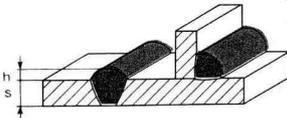
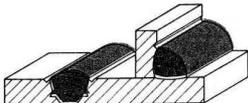
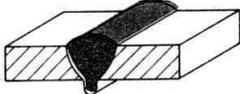
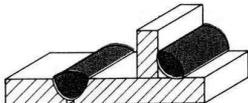
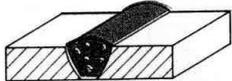
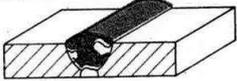
- **esterni:** quando interessano la superficie esterna del giunto e sono rilevabili per semplice osservazione diretta.
- **interni:** quando sono nascosti nello spessore del giunto e richiedono mezzi strumentali di rilevazione. Alcuni possono talvolta sfociare in superficie.

Fra i difetti esterni si possono riscontrare gli **spruzzi** (*spatters*) ovvero gocce calde proiettate fuori dai confini del giunto ed ancorate più o meno saldamente nella superficie dei pezzi dovute ad una corrente d'arco troppo intensa o eccessiva lunghezza d'arco.

Fra i difetti interni si distinguono:

- **Inclusioni di gas** (*Gas Cavities*): è un difetto molto diffuso e assume denominazioni diverse a seconda della loro geometria: soffiature, pori, porosità, tarli e nidi di tarli.
- **Cricche** (*Cracking*): costituiscono un gravissimo difetto di natura metallurgica. Possono essere a "caldo" se si formano in corso di esecuzione della saldatura durante i primi stadi della solidificazione della zona fusa. Diversamente le cricche a freddo sono minutissime incrinature che si formano sotto il cordone di saldatura nei primi strati del metallo base. Entrambe, in virtù della loro piccolezza e posizione, sfuggono al controllo radiografico.

Tabella 2.11: Difetti della saldatura ad arco con elettrodo rivestito

<b>Sovraspessore eccessivo</b> ( <i>Excessive Convexity</i> )		
<b>Cause:</b>	Avanzamento lento della passata Elettrodo di diametro eccessivo Corrente d'arco eccessiva	
<b>Tolleranze:</b>	$h \leq \frac{1}{10}s$	
<b>Incisioni marginali</b> ( <i>Undercuts</i> )		
<b>Cause:</b>	Eccesso di corrente Scarsa abilità del saldatore	
<b>Tolleranze:</b>	Profondità incisioni max $\leq 0,5\text{mm}$	
<b>Rimedi:</b>	Si eliminano, talvolta, con leggere passate di mola o ricoprendo le incisioni con elettrodo sottile	
<b>Eccesso di penetrazione o sgocciolamento</b>		
<b>Cause:</b>	Eccesso di corrente Esecuzione troppo lenta della passata Diametro dell'elettrodo piccolo	
<b>Rimedi:</b>	Scalpellare (se possibile)	
<b>Mancanza di penetrazione</b>		
<b>Cause:</b>	Lembi troppo vicini Avanzamento eccessivo Intensità di corrente insufficiente Elettrodo di diametro eccessivo	
<b>Rimedi:</b>	Scalpellare sul rovescio (nel caso disaldatura testa a testa) ed effettuare una passata di ripresa	
<b>Inclusioni gassose: Tarli</b> (forma allungata) o <b>Pori</b> (forma sferica)		
<b>Cause:</b>	Umidità del rivestimento dell'elettrodo Arco voltaico troppo lungo Intensità di corrente insufficiente	
<b>Tolleranze:</b>	I pori possono essere tollerati I tarli sono pericolosi ai fini della tenuta della saldatura	
<b>Inclusioni di scoria</b> ( <i>Slag Inclusions</i> )		
<b>Cause:</b>	Scarsa abilità del saldatore Corrente troppo debole Imperfetta pulitura dei cordoni Passate mal raccordate	
<b>Tolleranze:</b>	Tollerate se arrotondate e dimensione limitata Pericolose se di forma allungata perchè riducono la resistenza della saldatura	
<b>Cricche a Caldo</b> ( <i>Hot Cracking</i> )		
<b>Cause:</b>	Eccesso del metallo base di zolfo o fosforo o carbonio	
<b>Tolleranze:</b>	Non tollerate perchè pericolose per la resistenza della saldatura	
<b>Rimedi:</b>	Nessun rimedio	

## 2.4 Saldature per Resistenza

Questo gruppo di saldature, nella classificazione AWS dette *Resistance Welding* (RW), generano calore attraverso la resistenza incontrata dalla corrente elettrica che scorre tra le parti da saldare. I lembi da saldare generalmente costituiscono parte integrante di un circuito elettrico, nel quale il calore e la saldatura hanno luogo nel punto di contatto, sfruttando il **principio di Joule** che si esprime con la relazione seguente:

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

essendo:  $Q$  il calore prodotto dal passaggio di corrente elettrica (Joule),  $R$  la resistenza elettrica (Ohm),  $I$  la corrente elettrica (Ampère) e  $t$  il tempo (Secondi).

Una coppia di elettrodi con raffreddamento ad acqua, fatti di rame o leghe di rame e materiali refrattari (per impedire l'erosione), conducono la corrente nella giunzione, applicando una pressione a morsa per incrementare il contatto tra elettrodo-metallo e aiutare a racchiudere il materiale fuso nel punto di giunzione. Affinché il processo funzioni correttamente, la resistenza incontrata dalla corrente dev'essere maggiore nella regione di contatto rispetto alla zona circostante.

I generatori solitamente utilizzati possono essere DC, alimentati da una linea AC 440-480 V sia monofase che trifase, utilizzando trasformatori e raddrizzatori. In base alla (2.1), le saldatrici che effettuano questa lavorazione possiedono un basso voltaggio ed elevato amperaggio, dal momento che non appare la tensione nell'espressione di joule.

Le figure 2.22, 2.23 e 2.24 costituiscono i circuiti elettrici maggiormente utilizzati. Si rimanda al Glossario di pagina 123 per la spiegazione dei termini utilizzati.

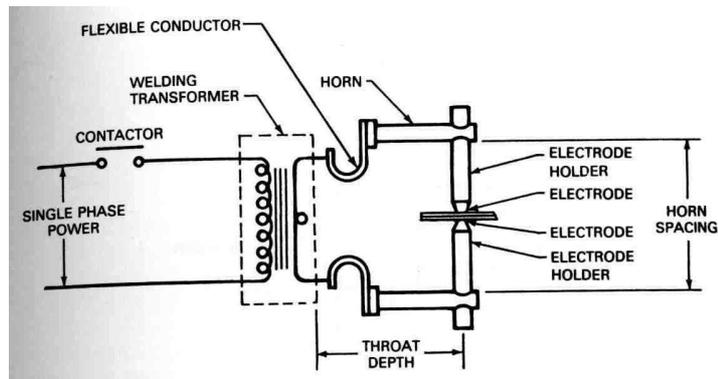


Figura 2.22: Schema di un tipico circuito AC monofase per RSW

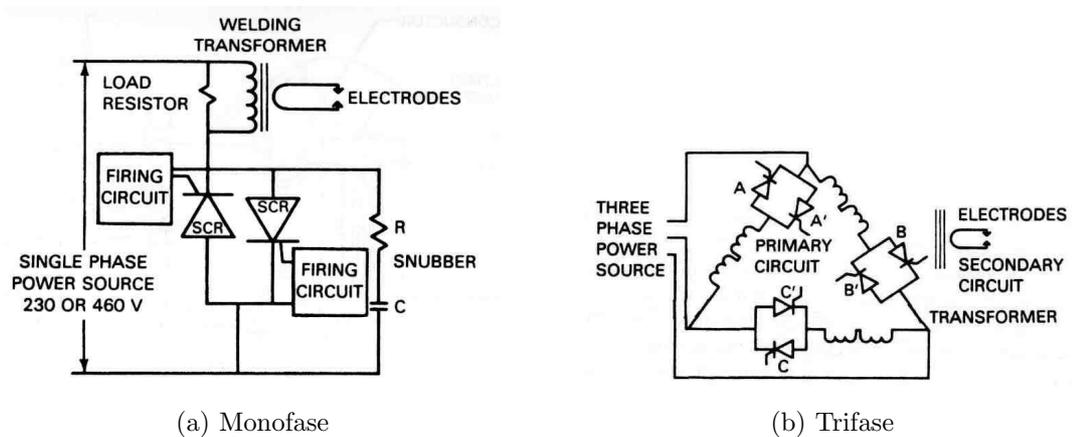


Figura 2.23: Schema elettrico di macchine per saldatura a resistenza con convertitori di frequenza utilizzando contatori SCR (tiristori)

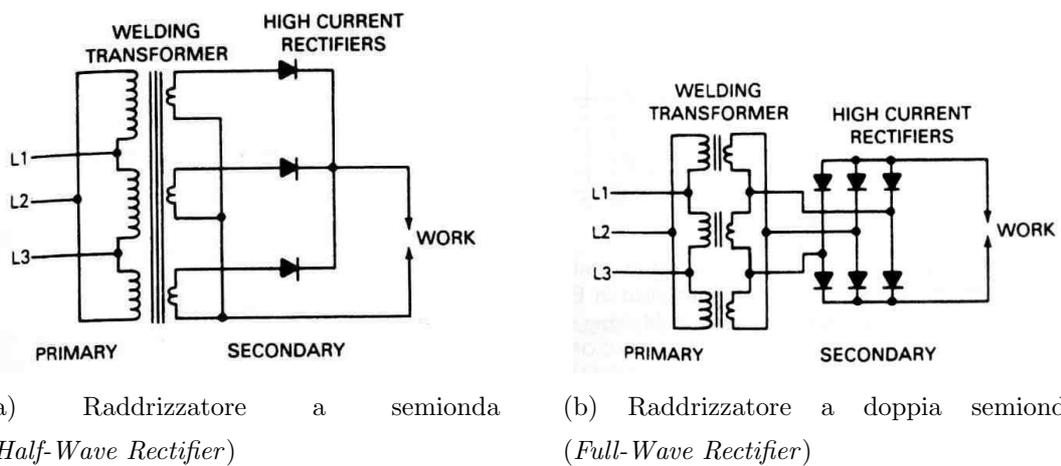


Figura 2.24: Schema elettrico di macchine per saldatura a resistenza in DC con raddrizzatore (o rettificatore)

### 2.4.1 Saldatura per Resistenza Elettrica a Punti

La saldatura per resistenza elettrica a punti o *Resistance Spot Welding* (RSW), corrisponde al metodo più classico di saldatura per resistenza e consiste in un numero finito di punti di saldatura distanziati tra di essi.

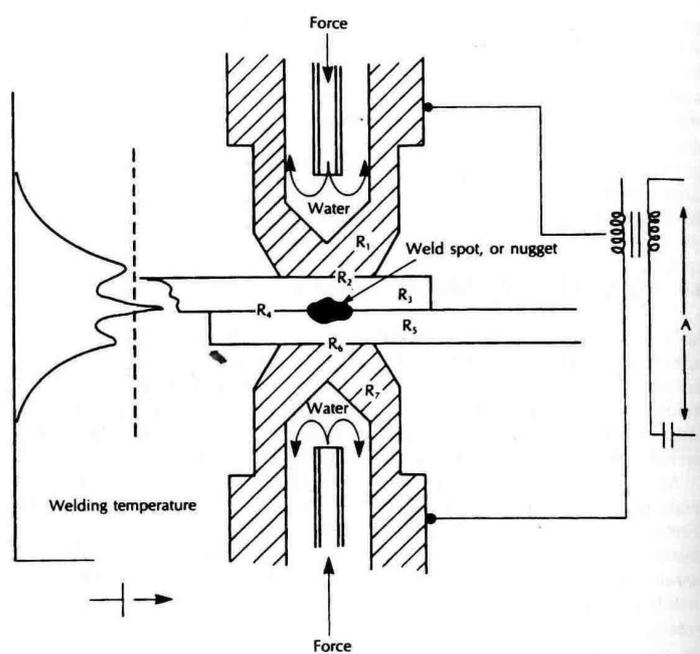


Figura 2.25: Schema del procedimento RSW (*Resistance Spot Welding*), mostrando come il circuito consiste in una serie di resistenze (da  $R_1$  a  $R_7$ ), con il calore maggiore raggiunto nella superficie interposta tra i due pezzi di lavoro per creare il punto di saldatura (nugget).

Come mostrato in figura 2.25, la resistenza di contatto nella superficie interna attraversata da corrente, riscalda l'area localmente fondendo il metallo in quel punto (*nugget*).

Questo processo è utilizzato principalmente per collegare lamiere sovrapposte che possono avere diversi spessori. Con riferimento alle figure 2.26 e 2.27, il procedimento si ripete ciclicamente, secondo le fasi:

1. **Preparazione** (*Off Time*): le lamiere poste una sull'altra, vengono poste tra i due robusti elettrodi della saldatrice.
2. **Pressione** (*Squeeze Time*): le lamiere vengono strette dai due elettrodi con una pressione ottenuta dall'operatore premendo con un piede su un apposito pedale oppure automaticamente, con un comando idraulico o pneumatico;
3. **Conduzione** (*Weld Time*): mantenendo la pressione, tra i due elettrodi inizia a circolare una corrente elettrica di fortissima intensità che incontra

la massima resistenza nel passaggio tra le due lamiera dove, per effetto joule, si sviluppa una grande quantità di calore che porta rapidamente alla temperatura di fusione. Tra elettrodo-lamiera il calore è compensato dal circuito di raffreddamento circolante negli elettrodi stessi creando un "guscio" di materiale allo stato pastoso;

4. **Mantenimento** (*Hold Time*): viene interrotto il passaggio della corrente mentre la pressione rimane costante affinché si solidifichi e si rafforzi il punto di saldatura;
5. **Allontanamento** (*Off Time*): gli elettrodi vengono allontanati in modo da effettuare un'altro punto di saldatura in una nuova posizione.

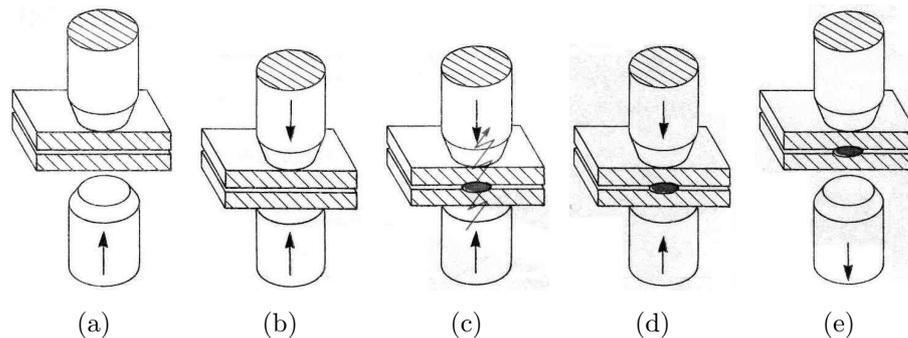


Figura 2.26: Fasi della saldatura per resistenza a punti: (a) preparazione; (b) pressione; (c) conduzione; (d) mantenimento; (e) allontanamento.

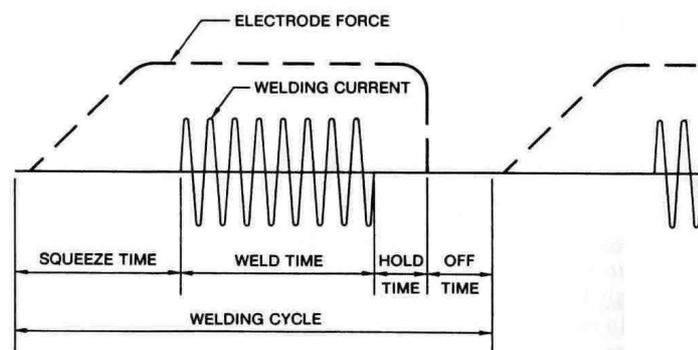


Figura 2.27: Ciclo di saldatura per singolo impulso della saldatura per resistenza a punti

Per quanto riguarda la saldabilità dei materiali metallici, la saldatura elettrica a punti è tanto più agevole quanto più grande è l'intervallo di temperatura in cui la lamiera si trova in uno stato "pastoso" prima di fondere.

Nel procedimento RSW occorre precisare:

1. **Intensità della corrente elettrica e tempo di passaggio:** La corrente, molto elevata, va da qualche decina sino a 20000 A; la tensione da 5 a 20 V. Il tempo di passaggio è molto breve:  $0,1 \div 0,8$  s.
2. **Dimensione degli elettrodi:** gli elettrodi devono avere una determinata area di contatto in relazione allo spessore delle lamiere da saldare. Per quelli a punta tronco-conica vale la relazione:

$$d = 5\sqrt{s} \quad (2.2)$$

essendo:

- $d$  = il diametro della superficie di contatto (in  $mm$ );
- $s$  = lo spessore della più sottile delle due lamiere (in  $mm$ ).

3. **Pulizia delle superfici:** deve essere molto accurata e si ottiene mediante dacappaggio chimico o meccanico.



(a) Catena di montaggio per automobili



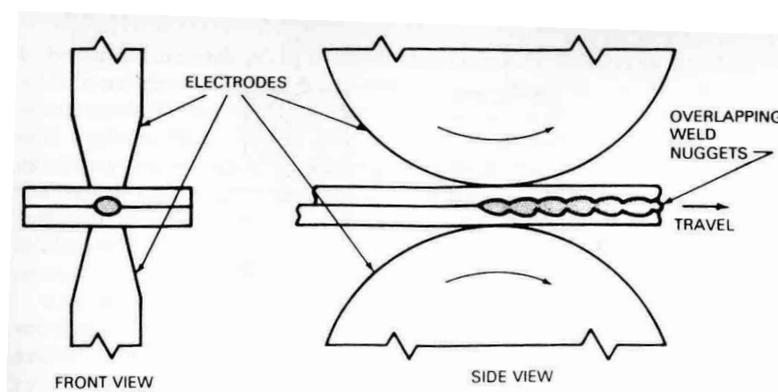
(b) Macchina per *spot welding*

Figura 2.28: Esempi di saldatura a punti automatizzata.

Come già detto in precedenza, la saldatura per resistenza a punti è stato il primo procedimento utilizzato nella saldatura robotizzata nelle catene di montaggio per automobili (figura 2.28a) e tutt'oggi ampiamente utilizzato. Non è raro tuttavia vedere questo metodo applicato su macchine automatiche dedicate (figura 2.28b) che solitamente possiedono un comando a pedale utilizzato dall'operatore per iniziare il processo.

### 2.4.2 Saldatura per Resistenza Elettrica a Rulli

*Resistance Seam Welding* (RSEW), dove *seam* significa "cucitura", consiste in una serie di punti saldati sovrapposti per produrre una saldatura apparentemente continua.



(a) Schema del procedimento (vista frontale e laterale)



(b) Dispositivo automatico

Figura 2.29: Saldatura per resistenza elettrica a rulli.

Gli elettrodi tronco-conici della saldatrice a punti sono sostituiti, in quella a rulli, da due dischi (denominati **rulli**) come appare nella figura 2.29a, tra i quali vengono strette le lamiere da collegare. I due dischi ruotando in senso contrario e facendo passare dall'una all'altro (attraverso le lamiere sovrapposte) a intervalli di tempo regolari, una corrente elettrica a fortissima intensità, si ottengono gli stessi effetti della saldatura a punti.

I due dischi, uno superiore di "trascinamento" e uno inferiore "folle" sono in lega

di rame con aggiunte di cromo e cadmio. Il procedimento avviene quasi esclusivamente mediante dispositivi automatici a comando elettronico (figura 2.29b) regolando il tempo di avvio della corrente, la velocità di rotazione dei rulli e la pressione dei rulli sulle lamiera, realizzando due tipi di saldatura (figura 2.30):

1. **Saldatura a punti spaziatati:** essa si ottiene regolando opportunamente la velocità di rotazione dei rulli e il tempo di pausa fra un punto e il successivo.
2. **Saldatura continua:** essa si ottiene prefissando un tempo di interruzione della corrente molto piccolo fra un punto di saldatura ed il successivo ottenendo punti di saldatura molto vicini ed in parte sovrapposti.

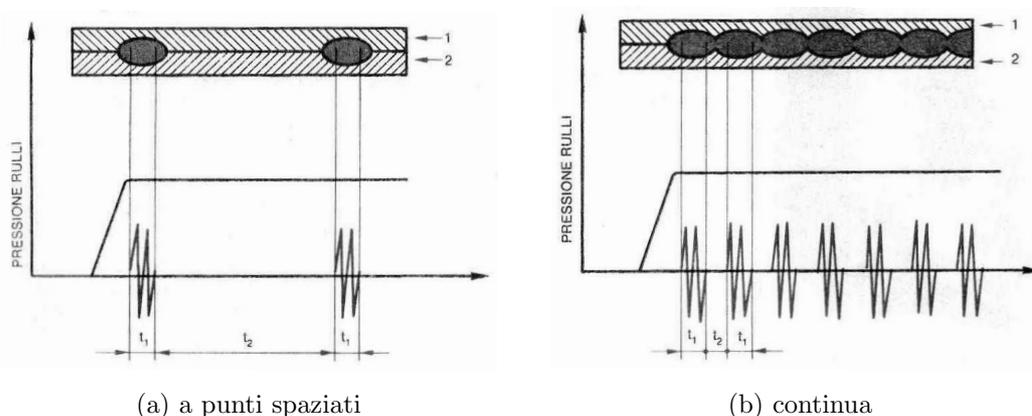


Figura 2.30: Tipi di saldatura per resistenza elettrica a rulli, in base alle variabili di saldatura impostate.

I principali dati tecnici del procedimento sono i seguenti:

- Spessore delle lamiera saldate: da 0,5 a 5 *mm*;
- Correnti di saldatura: da 5 a 25 *kA*;
- Velocità di avanzamento delle lamiera: da 0,4 a 10 *m/min*;
- Forza di compressione dei rulli: da 1 a 8 *kN*;
- Dimensione dei rulli: il diametro deve essere maggiore di 200 *mm* e la larghezza *L* della fascia di rotolamento sulle lamiera da saldare deve essere:

$$L = 5\sqrt{s} \quad (2.3)$$

essendo: *s* = lo spessore della lamiera.

### 2.4.3 Saldatura per Resistenza Elettrica a Punti Rilevati

Costituisce un miglioramento della saldatura elettrica a punti.

Nel procedimento PW (*Projection Welding*), denominato anche "saldatura a rilievi" oppure "saldatura a proiezione", una delle due lamiere viene preparata con pretuberanze o rilievi come mostrato in figura 2.31a; queste pretuberanze vengono eseguite per stampaggio (vale a dire con un apposito punzone e matrice) là dove si vogliono ottenere i punti di saldatura.

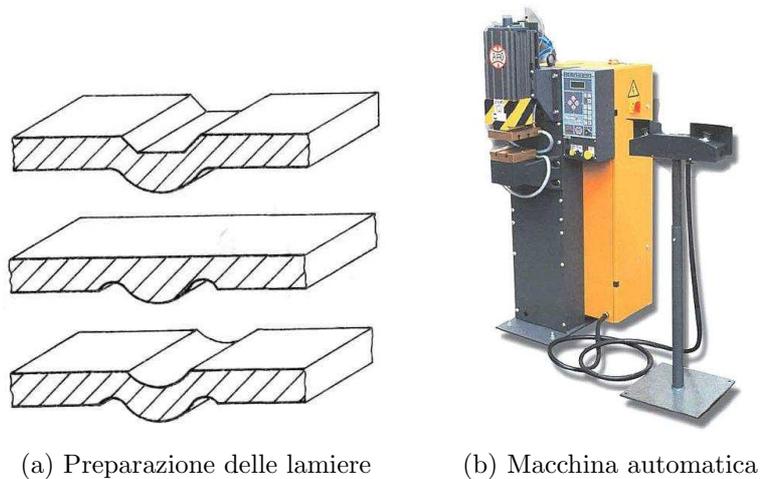


Figura 2.31: Saldatura per punti rilevati.

Il procedimento di saldatura è come quello a punti trattato nel paragrafo 2.4.1; la sola differenza riguarda il passaggio della corrente che è **localizzata** nella zona di contatto del rilievo con la lamiera sottostante. Dato che questo contatto interessa una zona limitata, la corrente elettrica che la attraversa è a densità elevatissima tale da provocare il riscaldamento in un tempo molto breve. La velocità di avanzamento (**pressione**) deve essere attentamente su misura per garantire che le proiezioni corrispondono con i tempi della corrente di saldatura che passa tra gli elettrodi.

I materiali idonei per il processo di saldatura a proiezione sono alluminio, acciaio (a basso carbonio) e acciaio inossidabile.

Un dispositivo automatico per saldatura a proiezione (figura 2.31b) presenta una coppia di elettrodi piatti.

Il settore delle costruzioni automobilistiche usa estremamente la saldatura a

proiezione nel montaggio della carrozzeria (punti di connettore come noci integrante e borchie utilizzate per fissare i sedili, cruscotti, cinture di sicurezza, materiali interni, ecc.).

#### 2.4.4 Saldatura Elettrica di Testa per Scintillio

*Flash Welding* (FW) è classificata come una saldatura a resistenza ma utilizza anche la combinazione di un arco elettrico per riscaldare le superfici da saldare.

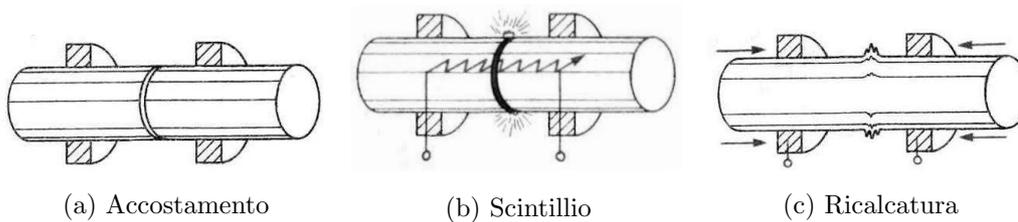


Figura 2.32: Fasi della saldatura elettrica di testa per scintillio.

Le due parti, a forma di barre cilindriche, strette nelle morse-elettrodi, non vengono sin dall'inizio pressate l'una contro l'altra ma solo accostate (*gap*). Con riferimento alla figura 2.32, le fasi del procedimento sono:

1. **Accostamento:** Le due barre vengono accostate con un leggero contatto tra le superfici che si vogliono collegare;
2. **Scintillio:** Viene fatta passare corrente ad elevatissima intensità per cui si formano dei piccoli archi voltaici tra le asperità delle superfici accostate. Gli archi voltaici e l'effetto joule riscaldano rapidamente le estremità accostate sino alla fusione. Piccole goccioline di metallo fuso vengono espulse sotto forma di scintille (da cui il nome *flash*);
3. **Ricalcatura:** Viene interrotto l'invio di corrente mentre le due barre vengono fortemente pressate l'una contro l'altra dalle due morse-elettrodi: espelle le parti fuse dalle barre ed eventualmente gli ossidi che si sono formati ottenendo un rigonfiamento da togliere nel successivo raffreddamento, quando le due barre risultano perfettamente saldate.

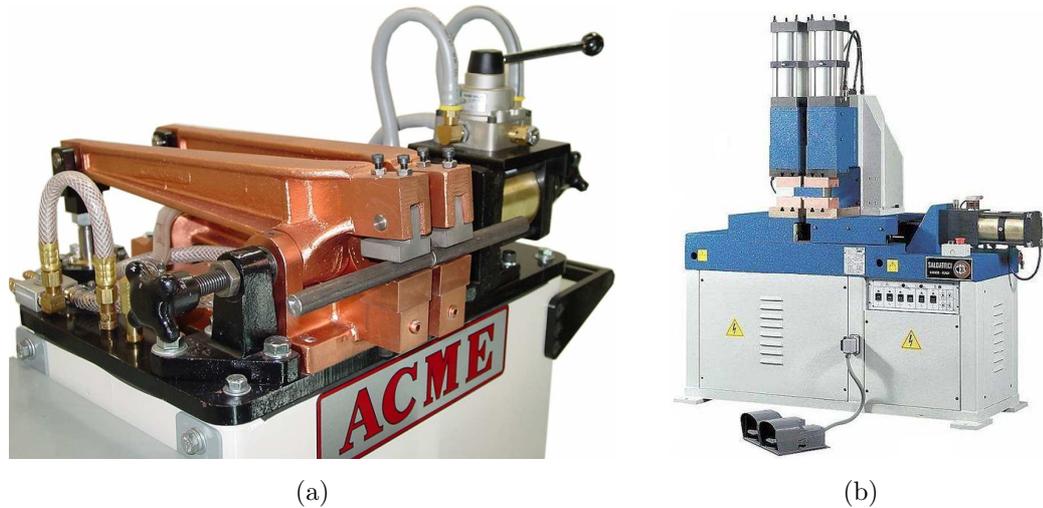


Figura 2.33: La saldatura elettrica di testa per scintillio oppure il procedimento *Upset Welding* per saldature di testa avvengono mediante macchine automatiche con attrezzature dedicate le quali richiedono l'intervento di un operatore per il carico/scarico pezzi.

### 2.4.5 Saldatura Elettrica di Testa per Resistenza

Questo procedimento, conosciuto come *Upset Welding* (UW) oppure "ricalcatura a resistenza", riguarda come per la tecnica FW, la saldatura soprattutto di barre cilindriche.

La differenza rispetto alla saldatura per scintillio è che le due parti vengono inizialmente premute l'una contro l'altra dalle due morse che funzionano anche da elettrodi.

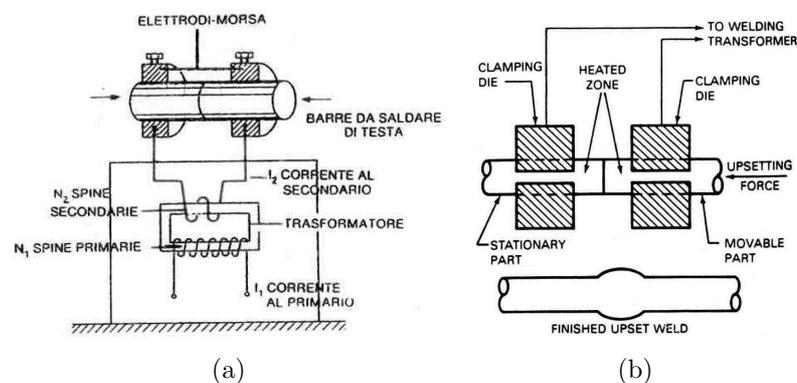


Figura 2.34: Schematizzazioni del procedimento UW (*Upset Welding*).

Quando viene fatta passare la corrente ad elevata intensità, si sviluppa calore nella zona di contatto delle due barre dato che le irregolarità del contatto stesso (con la presenza di un pò d'aria interposta) provocano una resistenza elettrica elevata.

Dopo un tempo limitato le parti in contatto raggiungono la temperatura di pastosità (*upsetting*): a questo punto un dispositivo meccanico spinge assialmente le due barre una contro l'altra ed in tal modo si ottiene la saldatura. Le figure 2.34a e 2.34b rappresentano due schematizzazioni del procedimento UW.

I principali dati tecnici della saldatura sono:

- corrente al secondario del trasformatore (collegato con le morse-elettrodi): da 10 a 30  $A$  per 1  $mm^2$  di superficie a contatto;
- forza di ricalcatura per barre di acciaio dolce: da 80 a 150  $N$  per 1  $mm^2$  di sezione;
- tempo di saldatura di due tondini di 10  $mm$  di diametro: 2  $s$ .

### 2.4.6 Saldatura Elettrica per Induzione

Nel caso in cui si debbano saldare dei tubi di testa, viene usato anche il riscaldamento esclusivamente per induzione. Secondo questo procedimento intorno alle teste accostate dei due tubi da saldare viene disposta una bobina percorsa da una corrente alternata ad una frequenza da 5 a 10  $kHz$  che induce nelle due teste dei tubi delle forti correnti indotte che innalzano rapidamente, per effetto joule, la temperatura sino a valori elevati. A questo riscaldamento segue una compressione reciproca delle teste dei tubi che porta, come nei procedimenti FW e UW, alla loro saldatura.

Spesso in questo procedimento le teste da saldare vengono avvolte da un'atmosfera di idrogeno oppure argon avendo lo scopo di impedire l'ossidazione da parte dell'ossigeno dell'aria.

Per determinati materiali metallici, inoltre, una volta avvenuta la saldatura viene inviata nella bobina induttrice una corrente di opportuna frequenza e intensità

in modo da ritardare il raffreddamento che porterebbe ad una tempra delle parti saldate.

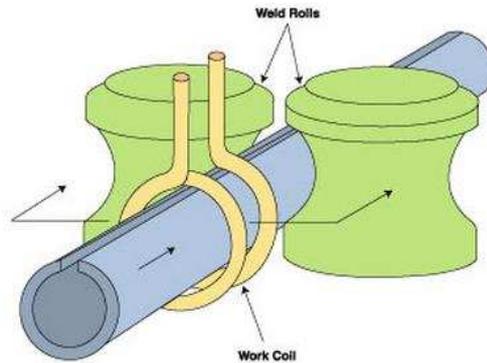


Figura 2.35: Schema di applicazione per saldatura elettrica ad induzione per la saldatura longitudinale di un tubo. La bobina di lavoro non viene a contatto con il tubo; la corrente elettrica è indotta nel materiale attraverso i campi magnetici che circondano il tubo.

## 2.5 Saldature ad alta Intensità Energetica

Questo gruppo di saldature implementano una sorgente di radiazioni elettromagnetiche ad alta intensità per causare la fusione e produrre la saldatura.

I più diffusi riguardano fasci ad alta densità energetica quali fascio elettronico e fascio laser. Per entrambi i processi, i principali vantaggi che si possono ottenere sono:

1. Potenza di fusione (virtualmente) illimitata: dovuto dalla variabilità della densità di energia nel processo;
2. Collocamento preciso dell'energia: agendo sull'accuratezza e finezza del fascio;
3. Controllo preciso dell'energia necessaria.

Entrambi i processi sono **autogeni** in modo tale che il giunto ottenuto, usualmente di testa o ad angolo retto, può essere eccellente. Può essere impiegato anche un filo di metallo d'apporto per limitare la penetrazione eccessiva nel giunto.

Meno impiegati sono i processi che impiegano la concentrazione di energia di irradiazione nel punto da saldare; essi includono la saldatura ad infrarossi e la saldatura a microne.

### 2.5.1 Saldatura con il Fascio Elettronico

La saldatura per F.E. (fascio elettronico), nella classificazione AWS detto EBW (*Electron beam Welding*), è costituito essenzialmente da un fascio molto concentrato di elettroni dotati di elevatissima velocità che colpiscono il pezzo sulla zona dove deve essere saldato portandolo istantaneamente a fusione.

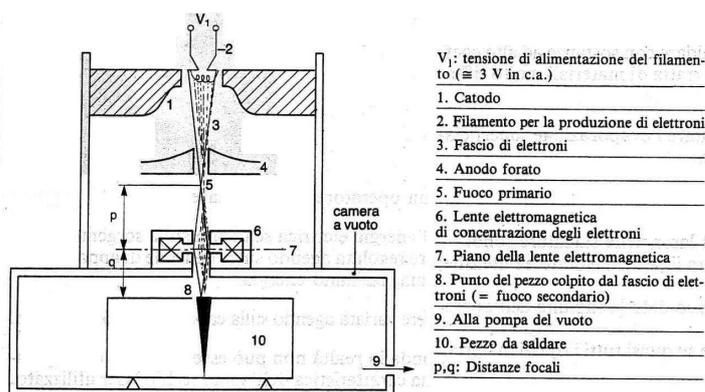


Figura 2.36: Sezione di un fascio elettronico nella fase di saldatura con fascio elettronico di un pezzo posto inferiormente.

Come si può rilevare dalla figura 2.36, il principio di funzionamento e le varie parti sono:

- il filamento (2) alimentato con una tensione molto bassa ( $\cong 3V$ ) in corrente alternata emette elettroni;
- tra il catodo (1) e l'anodo forato (4) esiste una differenza di potenziale di alcune decine di kilovolt che impartiscono agli elettroni enormi velocità ( $50000 \div 200000$  km/s) verso l'anodo;
- il fascio di elettroni passa per il foro dell'anodo (4) e successivamente viene focalizzato da una lente elettromagnetica (6) che riduce il diametro del fascio ad alcuni centesimi di millimetro (nel punto 8);
- il materiale del pezzo colpito dal fascio di elettroni quasi istantaneamente fonde; il calore così concentrato è  $1000 \div 5000$  volte maggiore che nelle saldature tradizionali.

La saldatura elettronica è attuata sotto vuoto parziale (circa  $1$  mPa). Nell'impiego del fascio elettronico devono essere fissati i seguenti parametri:

- la differenza di potenziale fra anodo e catodo;

- la densità di corrente di elettroni;
- la velocità di saldatura da adottare;
- la corrente della bobina della lente elettromagnetica che regola la messa a fuoco.

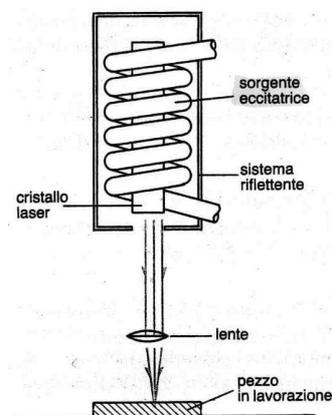
La fonte di calore è dovuta all'arresto degli elettroni sul pezzo: in tal modo l'energia cinetica perduta dagli elettroni si trasforma per il 99% in calore e per il restante 1% in raggi X (e ciò necessita l'installazione di schermi per proteggere adeguatamente l'operatore).

La centratura del punto da saldare avviene per mezzo di un impianto televisivo a circuito chiuso.

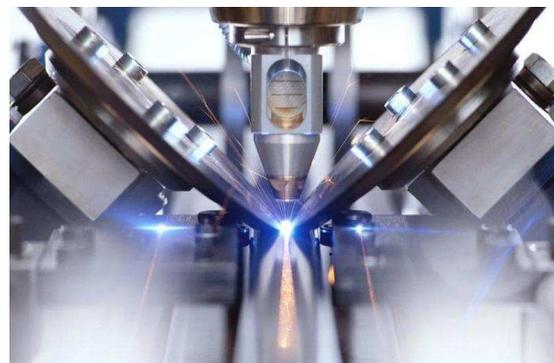
### 2.5.2 Saldatura al Laser

Il procedimento LBW (*Laser Beam Welding*) utilizza l'energia cinetica immagazzinata nei fotoni (non gli elettroni come nel processo EBW) per fondere il materiale e creare la saldatura.

Il laser è un insieme di intense radiazioni elettromagnetiche a frequenza ottica. In altre parole, è un raggio luminoso a elevatissima energia capace di fondere qualsiasi materiale.



(a) Disegno schematico



(b) Processo automatico di saldatura laser

Figura 2.37: Saldatura al laser.

L'unità saldatrice laser comprende (figura 2.37a): una sorgente eccitatrice, un sistema riflettente per dirigere le radiazioni dalla sorgente eccitatrice sul cristallo laser, un materiale capace di produrre un'azione laser, un sistema per la concentrazione del fascio emesso.

I parametri che un operatore deve valutare sono:

- **Energia d'impulso:** dipende dall'energia elettrica scaricata sulla sorgente eccitatrice che può essere regolata agendo sul potenziale di appositi condensatori.
- **Durata dell'impulso:** può essere variata agendo sulla capacità dei condensatori.
- **Lunghezza d'onda:** non può essere modificata perchè è una caratteristica dell'apparecchio laser utilizzato
- **Preparazione:** la superficie dei pezzi da saldare deve essere ricoperta con sostanze ad alto coefficiente di assorbimento quando si trattano materiali molto riflettenti.
- **Atmosfera:** un'atmosfera di gas inerte può evitare l'evaporazione superficiale; può essere anche impiegato il vuoto.

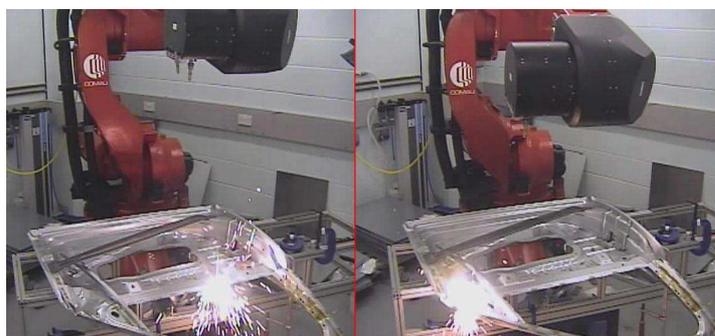


Figura 2.38: Portiera di un'auto in acciaio saldato con telecomando saldatura laser. Il raggio laser è generato esternamente ed introdotto nel robot tramite il cavo giallo dietro e a sinistra del robot. Lenti e specchi nel braccio robot servono per la focalizzazione del fascio in un punto di destinazione.

A differenza dal fascio elettronico, in questo caso non è presente nessuna dispersione di dannosi raggi X nell'atmosfera.

Come detto, alcuni materiali riflettono fotoni (o luce laser) così l'efficienza di trasmissione di energia può variare da un minimo di circa il 10% per materiali molto riflettenti (e.g., Alluminio) fino al 90% per materiali come grafite che non riflettono ed assorbono il fascio.

## 2.6 Saldature allo Stato Solido

*La saldatura può essere prodotta senza il bisogno della fusione dei materiali.*

Infatti con l'acronimo di SSW (*Solid-State Welding*) si intendono tutti quei processi che *non coinvolgono* nella fusione dei materiali, ma la giunzione è ottenuta dalla deformazione plastica dovuta dall'applicazione di pressione ad una temperatura inferiore a quella di fusione del metallo/i base e senza l'introduzione di alcun metallo d'apporto che fonde.

I processi per "non-fusione" sono la scelta ideale per collegare materiali differenti, anche di diverse classe base o totalmente differenti come tipologia base, che sarebbero chimicamente incompatibili. Il principale esempio è la giunzione ceramica-metallo, che talvolta è incorrettamente chiamata "saldatura".

### 2.6.1 Saldatura a Freddo

In accordo con la classificazione AWS, "la saldatura a freddo (*CW Cold Welding*) è un processo di saldatura allo stato solido nel quale la **pressione** è utilizzata alla **temperatura ambiente** per produrre la coalescenza del metallo con una sostanziale **deformazione plastica** nella saldatura".

La fonte di energia per produrre la deformazione potrebbe avvenire attraverso la pressione meccanica od idraulica, a rulli (come la saldatura a rulli, paragrafo 2.6.3) od equipaggiamenti speciali.

Potrebbe anche essere implementato un impulso da una sorgente idraulica o elettrica (e.g., scarica condensatore) per forzare i materiali insieme.

Il procedimento richiede la *pulizia delle superfici* a contatto per permettere la continuità metallica nella saldatura. La pulizia può essere ottenuta meccanicamente usando pazzole o strumenti abrasivi oppure chimicamente usando acidi o soluzioni adatte.

Per ottenere la deformazione plastica richiesta, i metalli da saldare devono avere un'alta *duttilità* (ovvero la capacità di sopportare deformazioni plastiche) ed in ogni caso non essere estremamente difficili da lavorare. Esempi di materiali facili da saldare a freddo sono Alluminio, Rame e Piombo; meno utilizzati sono il Nickel e leghe dolci di ottoni, bronzi, stagni e peltro. I metalli preziosi come Oro, Argento, Palladio e Platino sono anch'essi adatti per questo procedimento.

### 2.6.2 Saldatura per Pressione a Caldo

*Hot pressure welding* (HPW) riguarda i processi di saldatura allo stato solido che utilizzano l'azione combinata di calore e pressione.

Può essere implementato il vuoto o altri gas di protezione per prevenire la contaminazione degli ossidi, che potrebbero interferire con la buona riuscita della saldatura.

I due principali procedimenti di saldatura per pressione a caldo sono:

#### 1. Saldatura per Pressione a Gas - PGW (*Pressure Gas Welding*)

Il procedimento riguarda essenzialmente giunzioni di testa nel quale viene utilizzata la combustione a gas per scaldare le superfici affacciate e nello stesso tempo è applicata una pressione per conguingere insieme le due parti producendo una saldatura allo stato solido.

Si possono identificare due sotto-metodologie:

- (a) *Giunti chiusi*: le due parti sono saldamente confinanti, mentre il calore e pressione vengono applicati simultaneamente creando la saldatura;
- (b) *Giunti aperti*: in questo caso i lembi dei pezzi da saldare sono prima riscaldati separatamente e poi congiunti attraverso la pressione per creare la saldatura.

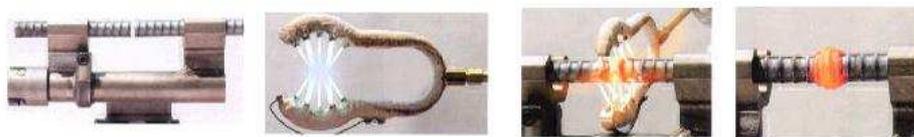


Figura 2.39: Fasi della saldatura per pressione a gas di un giunto di testa (chiusi) con apparecchiatura semi-automatica per il controllo della pressione.

Per ottenere il giusto livello e consistenza di calore alla giunzione, sotto la pressione necessaria per congiungere le parti, il procedimento PGW è spesso automatizzato o, più propriamente, meccanizzato.

I metalli utilizzati includono acciai a basso o alto contenuto di carbonio, acciai inossidabili e leghe nickel-rame.

## 2. Saldatura per Forgiatura - FOW (*Forge Welding*)

Il procedimento consiste nel riscaldare in una forgia a carbone i lembi dei pezzi da unire, dopo averli adeguatamente preparati (figura 2.40a), sino alla temperatura del bianco saldante; successivamente le parti vengono sovrapposte e martellate dapprima rapidamente con colpi leggeri e poi con colpi di intensità crescente.



(a) Preparazione tipica dei lembi



(b) Forno per fabbro

Figura 2.40: Saldatura alla forgia.

Questo metodo di saldatura è utilizzato principalmente per acciai a bassa percentuale di carbonio ( $< 1\%$ ) e da un operaio abbastanza esperto. Oggi-giorno il procedimento è utilizzato essenzialmente nei lavori artigianali del "ferro battuto".

### 2.6.3 Saldatura a Rulli

Nella saldatura a rulli (*ROW Roll Welding*) due piatti o lamine di metallo sono congiunti insieme attraverso la spremitura simultanea di due rulli, come mostrato in figura 2.41.

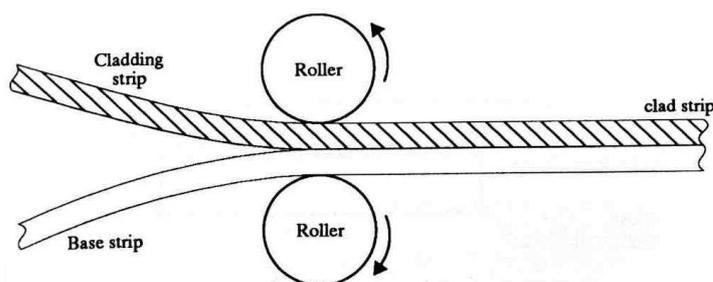


Figura 2.41: Schematizzazione di un tipico processo di saldatura a rulli per rivestimento di lamiera.

Il processo può avvenire sia a freddo che a caldo; tuttavia nel secondo caso, il più utilizzato, è possibile ridurre la potenza richiesta per consentire la giunzione delle lamine e produrre una saldatura di alta qualità.

L'uso più comune di questo procedimento riguarda la produzione del rivestimento (*clad*) di metalli come pentole e padelle in rame con fondo in acciaio inossidabile. Altre applicazioni riguardano il rivestimento di metalli per ottenere determinate proprietà; un esempio comune riguarda il rivestimento in rame puro di una struttura di acciaio per la produzione di serbatoi utilizzati nei processi elettrochimici.

### 2.6.4 Saldatura mediante Esplosivo

Con il procedimento EXW (*Explosion Welding*), talvolta denominato "saldatura per compressione a freddo", è possibile realizzare la placcatura fra pezzi di uno stesso materiale o di materiali differenti.

Il principio della saldatura ad esplosione è schematicamente illustrato in figura 2.42: l'esplosione di una carica di esplosivo proietta a grandissima velocità una lastra metallica sulla seconda lastra predisposta sopra un'apposita incudine.

Il meccanismo secondo il quale avviene l'unione delle due lamine è il seguente:

1. Durante l'avvicinarsi della lamiera mobile a quella fissa, si forma un getto di minuti frammenti metallici dotati di elevata velocità e temperatura che es-

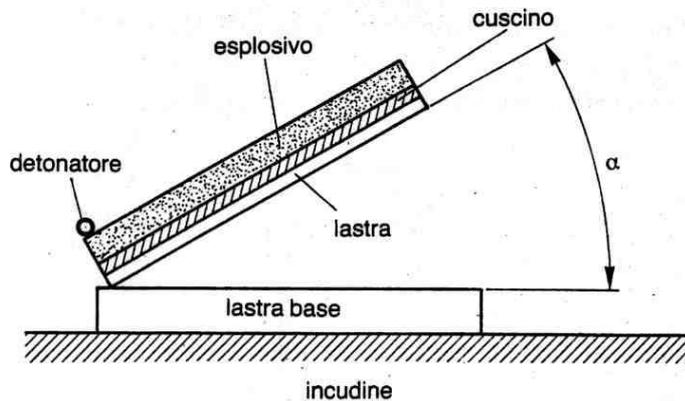


Figura 2.42: Saldatura di due lastre mediante esplosivo.

ercitano un'azione di **pulizia** sulla superfici delle lamiere da congiungere; in particolare vengono asportati gli ossidi superficiali per cui non è necessario un decappaggio.

2. Gli strati superficiali delle lastre, per effetto delle enormi pressioni in giuoco e dall'innalzamento della temperatura, diventano plastici e facilmente deformabili, per cui i cristalli di una lamiera penetrano, secondo un andamento ondulato, tra i cristalli della seconda lamiera realizzando l'unione delle due superfici.

Il metodo è applicabile per collegare tra loro materiali della stessa natura oppure di natura diversa. Spesso è usato per la placcatura, per esempio, per fissare una lastra di acciaio inossidabile o di alluminio a una lastra di acciaio.

### 2.6.5 Saldaure per attrito

I procedimenti *friction welding* (FRW) utilizzano appositi macchinari per convertire l'energia meccanica nel calore attraverso l'attrito tra le due superfici in contatto dei pezzi da congiungere, premuti l'uno contro l'altro e dotati di moto relativo.

Con riferimento alla figura 2.43, questo procedimento si compone in tre fasi:

- (a): il pezzo A viene portato in rotazione alla velocità prestabilita.
- (b): il pezzo B viene premuto contro il pezzo A. Per attrito le due superfici di contatto iniziano a riscaldarsi sino a una temperatura leggermente inferiore a

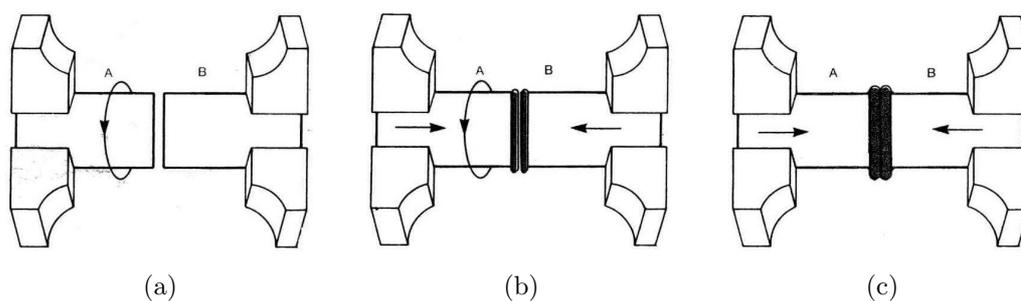
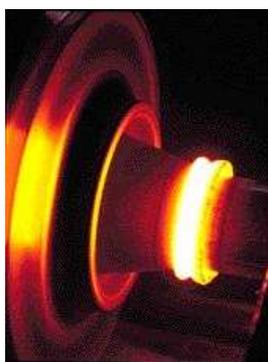


Figura 2.43: Fasi di saldatura per attrito di due spezzoni cilindrici.

quella di fusione (stato plastico); il pezzo B viene spostato a sinistra mentre si va formando un collare di materiale intorno alla superficie di contatto.

- (c): con l'arresto brusco della rotazione del pezzo A, nel tempo di  $0,2 \div 0,5$  s, cessa la generazione di calore. I due pezzi ancor più fortemente premuti l'uno contro l'altro, si ricalcano e si saldano nella zona a contatto e successivamente si raffreddano. Il collare che si è formato durante la ricalcatura viene poi asportato da un utensile rotante.

Di solito si tratta di una saldatura di testa ottenuta montando i due pezzi su macchine che assomigliano a torni (figura 2.44c) in cui un pezzo rimane fermo e il secondo viene fatto ruotare e premuto contro il primo. È quindi necessario che almeno uno dei due pezzi sia simmetrico rispetto all'asse di rotazione.



(a) Fase di ricalcatura



(b) Prodotto finale



(c) Macchina automatica

Figura 2.44: Il procedimento di saldatura per attrito presenta versatilità (anche diversi materiali e varie forme), velocità ed economicità.

### 2.6.6 Saldatura ad ultrasuoni

La sorgente nelle saldature per attrito può essere anche una vibrazione meccanica indotta da onde ultrasonore, in questo caso il procedimento è chiamato *ultrasonic welding* (USW). L'unica reale differenza rispetto alle convenzionale saldatura per attrito è l'**ampiezza** delle vibrazioni bassa (frazioni di millimetro) e la **frequenza** del movimento elevata (maggiore di  $30\text{ kHz}$ ).

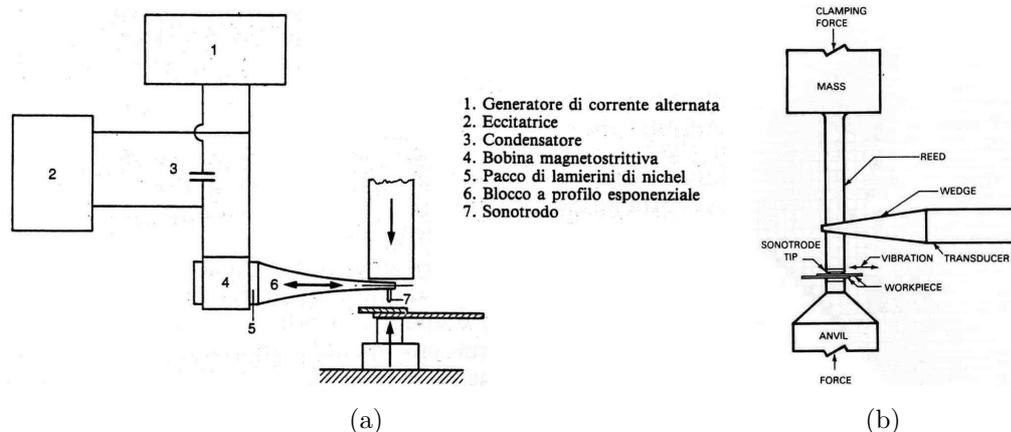


Figura 2.45: Due disegni di schemi per apparecchi di saldatura ad ultrasuoni.

Con riferimento alla figura 2.45a, l'apparecchio dispone del generatore di corrente alternata (1), adeguata alle saldature da eseguire, che viene inviata alla bobina magnetostrittiva (4) che avvolge il pacco di lamierini (5) in cui si generano le onde sonore o ultrasuoni; questi vengono poi trasformati ed esaltati dal blocco a profilo esponenziale (6), al quale è rigidamente fissato il puntale di contatto (7), denominato "sonotrodo" che è l'organo che esegue materialmente il lavoro di saldatura. La saldatura si ottiene premendo i due pezzi da saldare, tramite un cilindro pneumatico o idraulico, contro il sonotrodo (7).

L'utilizzo degli ultrasuoni come mezzo di saldatura trova impiego in molti materiali, compresi tutti i termoplastici, diversi metalli e nei moderni materiali compositi a matrice metallica e ceramici rinforzati con fibre. Nelle materie plastiche entra in gioco anche l'elevata temperatura, sia pure per una frazione di secondo, fra i punti di contatto dei pezzi da saldare, portando il materiale allo stato pastoso favorendo l'unione dei due pezzi.

## 2.7 Brasature e Saldobrasature

La brasatura è un processo che permette la giunzione di materiali metallici (e non) che si realizza attraverso la **sola fusione del metallo di apporto**, mentre nel frattempo i materiali di base raggiungono una temperatura inferiore alla temperatura di fusione, ma sufficiente per determinare un legame metallurgico. In questo modo i lembi metallici del giunto da collegare restano integri, ovvero si determina una giunzione *eterogenea* dato l'impiego di metalli d'apporto diversi dal metallo base.

Tabella 2.12: Vantaggi e svantaggi della brasatura rispetto alla saldatura

Vantaggi	Svantaggi
1. La preparazione alla brasatura è semplice e, seguendo le corrette procedure di brasatura, si otterranno buoni risultati	1. Il giunto può assumere colorazioni molto diverse dal metallo base, a causa della diversa struttura del metallo d'apporto utilizzato
2. Si possono unire spessori molto diversi tra loro	2. Possibile formazione di composti intermetallici che portano alla fragilità della struttura
3. Si possono unire giunti dalle forme molto complesse	3. É necessario riscaldare in modo omogeneo le parti, quindi possono esserci delle difficoltà nel realizzare grandi assemblaggi e giunti di grandi dimensioni
4. I metalli base rimangono inalterati data la bassa temperatura che si raggiunge nel processo	
5. Le deformazioni dei metalli rimangono minime	
6. Si possono unire metalli molto diversi tra loro	
7. Non sono richieste operazioni di finitura dopo il processo	
8. Generalmente un miglior aspetto estetico del giunto	
9. Economicità del procedimento	

Si possono identificare due tipologie di brasatura:

- **Brasatura capillare:** permette la realizzazione di giunti saldati per infiltrazione capillare del metallo d'apporto fuso, fra i lembi accostati e non fusi del metallo base.
- **Saldobrasatura:** il riscaldamento del metallo d'apporto sui lembi da unire, preparati come per i processi di fusione, raggiunge e supera gli 800 °C utilizzando il principio della "bagnabilità".

I principali vantaggi e svantaggi delle brasature sono raccolti in tabella 2.12.

### 2.7.1 Saldobrasatura

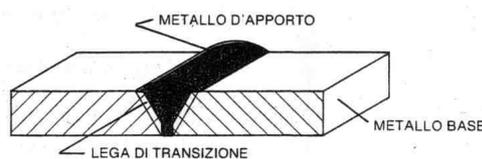


Figura 2.46: Saldobrasatura di un giunto di testa.

La saldobrasatura prevede, a differenza della brasatura capillare, la **preparazione del giunto** tipica della saldatura autogena per fusione ed il deposito avviene per passate successive. In relazione allo spessore da saldobrasare, i lembi vengono preparati con smusso a V o ad X (doppia V) con angoli di 90°.

Inoltre, usando leghe di apporto a temperature relativamente elevate, la saldobrasatura non può sfruttare a pieno il fenomeno della capillarità tipico della brasatura.

La temperatura alla quale si opera in saldobrasatura deve essere di poco superiore a quella di fusione del metallo d'apporto che, per gli ottoni, si situa attorno ai 900 °C.

La giunzione tra i due materiali base si realizza attraverso vari fenomeni fisici, il più importante è la **diffusione** (o bagnabilità) della lega d'apporto sui lembi del metallo base conseguendo elevati valori di resistenza nella struttura della giunzione.

Il verificarsi di una corretta diffusione comporta alcune azioni preliminari:

- *Preriscaldamento della superficie* da saldobrasare ad una determinata temperatura che dipende dal metallo d'apporto;

- I lembi debbono essere puliti accuratamente;
- *Impedire la formazione di ossidi a caldo* con l'impiego di "flussi disossidanti" spalmati sia sui lembi che sulla bacchetta o piastrina del metallo d'apporto. La composizione dei flussi deve assicurare per via chimica la riduzione degli ossidi con la formazione di scorie leggere che si portino a galla senza lasciare inclusioni nel giunto. Questi "flussi" sono in commercio sotto forma di polveri, paste o bacchette d'apporto già rivestite.

Un'altro aspetto importante è la formazione di una **lega di transizione** (figura 2.46) ottenuta con la mescolanza del metallo d'apporto (allo stato fuso) con il metallo base (solo riscaldato).

Il metallo d'apporto deve essere portato ad una temperatura di poco superiore a quella di fusione. A tale scopo si usano le seguenti fonti di calore:

- la **fiamma del cannello ossiacetilenico**: è il procedimento più usato ma che richiedi operai abbastanza bravi;
- **immersione** in un bagno metallico;
- riscaldamento con un **forno** con, o senza, atmosfera protettiva;
- riscaldamento per **induzione**;
- **resistenza elettrica** (vale a dire con il calore che si sviluppa per effetto joule);
- per mezzo dell'**arco voltaico** ecc.

Le applicazioni più frequenti della saldobrasatura si riferiscono alla riparazione di pezzi in ghisa o in acciaio fuso. Si hanno anche applicazioni sui bronzi e sulle lamiere zincate, nonché sui metalli dissimili (e.g., rame con acciaio). Un esempio è schematizzato in figura metalli d'apporto utilizzati sono solitamente leghe a base di rame quali:

- **Ottone al Silicio**: Cu 60%, Zn 39,8%, Si 0.1 ÷ 0.2%, intervallo di fusione 875 ÷ 895°C;

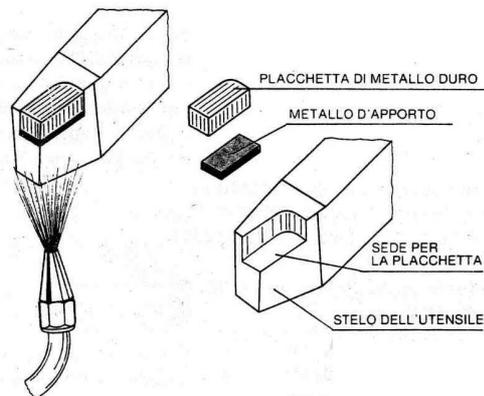


Figura 2.47: Fissaggio si saldobrasatura di una placchetta di metallo duro sullo stelo di un utensile da tornio.

- **Ottone al Nickel:** Cu 50%, Zn 39,8%, Ni 10%, Si 0.1 ÷ 0.2%, intervallo di fusione 890 ÷ 920°C;
- **Rame, Argento:** usati raramente;
- **Leghe speciali.**

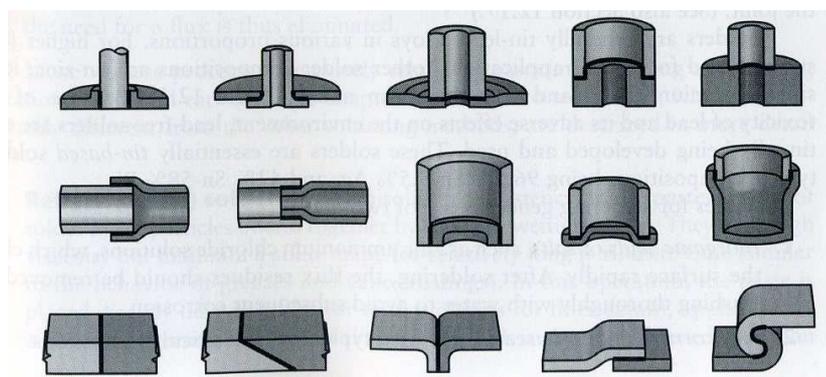
Scopo del silicio (0,2%) in entrambe gli ottoni indicati è di formare in superficie al bagno un sottile e continuo strato di silice ( $SiO_2$ ) che impedisca l'evaporazione dello zinco (soffiature nel giunto e vapori tossici).

### 2.7.2 Brasatura Capillare

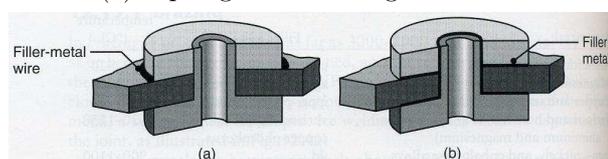
La brasatura capillare, o semplicemente "brasatura", è un procedimento che permette la realizzazione di giunti saldati per **infiltrazione capillare** del metallo d'apporto fuso, fra i lembi quasi accostati e non fusi del metallo base (figura 2.48b). Anche per la brasatura capillare, come per la saldaobrasatura, la temperatura di fusione del metallo d'apporto deve essere inferiore a quella del metallo base (processo eterogeneo). In funzione della temperatura di fusione del metallo d'apporto, inferiore o superiore a 450°C, si distinguono convenzionalmente:

- **Brasatura forte** (nota come *Brazing*): oltre i 450°C;
- **Brasatura dolce** (nota come *Soldering*): fino a 450°C.

Com'è mostrato dalle configurazioni tipiche di giunti in figura 2.48a, bisogna tenere un *giuoco molto piccolo* dell'ordine di qualche centesimo di millimetro



(a) Tipologie comuni di giunti usati.



(b) Esempio di brasatura con anello d'apporto indicato in colore: (a) prima e (b) dopo.

Figura 2.48: Brasatura capillare [4].

fra superfici affacciate che devono essere il più estese possibile: entro questo spazio il metallo d'apporto, avente ottime proprietà di "bagnatura", si infiltra spontaneamente per attrazione capillare (da cui il nome "brasatura capillare").

Nell'operazione di brasatura si hanno, pertanto, le seguenti fasi:

1. Fusione, per riscaldamento, del metallo d'apporto;
2. Riscaldamento, senza però pervenire alla fusione, dei giunti da collegare;
3. Diffusione, per capillarità, del metallo d'apporto tra i giunti da collegare;
4. Formazione locale di una lega di composizione gradualmente variabile per la progressiva diffusione del metallo d'apporto nei giunti (e viceversa).

La temperatura più corretta di brasatura si situa circa  $50^{\circ}\text{C}$  sopra la temperatura di fine fusione (liquidus) del metallo d'apporto. I metalli d'apporto per brasatura capillare sono in commercio in varie forme quali: fili, anelli, nastri, polveri, paste, fili rivestiti etc (figura 2.49).

Affinchè la brasatura dia buoni risultati è necessaria una *perfetta pulizia* e *disossidazione* dei lembi dei giunti e che le superfici da collegare presentino una



Figura 2.49: Tipologie di metalli d'apporto usati nelle brasature capillari.

certa *rugosità*.

Ad ogni metallo d'apporto deve essere abbinato un flusso disossidante corrispondente il quale "attacca" la superficie rendendola più ruvida, impedisce la formazione dell'ossido superficiale durante il procedimento e, infine, diminuisce la tensione superficiale del metallo d'apporto aumentandone lo scorrimento e la bagnatura.

I fusti sono in commercio sotto forma di polveri, di paste, di liquidi e di bacchette rivestite. Certi metalli d'apporto contengono direttamente il disossidante come elemento di lega (e.g., leghe Cu/P),

Ovvio che i flussi, oltre a non corrodere a caldo il metallo base, non dovranno avere una temperatura di fusione superiore a quella del metallo d'apporto per cui, qualunque sia lo stato originale del flusso, questi sarà sempre liquido alla temperatura di brasatura.

Il più frequente campo di applicazione concerne pezzi di piccole dimensione o di spessore sottile, sui quali non sarebbe pensabile l'intervento con i tradizionali processi per fusione.

### Brasatura Dolce

La brasatura dolce è una saldatura di resistenza meccanica limitata.

Le leghe più usate in brasatura dolce sono:

- **Leghe Piombo-Stagno:** temperatura minima di fusione di 183°C con lega eutettica (63/37-Sn/Pb), contro i 327°C del Piombo puro e 232°C dello Stagno puro.
- **Leghe Piombo-Stagno-Antimonio:** aggiunta 3 ÷ 6% di Antimonio per migliorare le proprietà meccaniche della lega (resistenza meccanica). Tem-

peratura di fusione di  $200 \div 250^\circ\text{C}$ .

- Altre leghe a base di stagno e piombo come: Stagno-Zinco per la brasatura dolce dell'Alluminio, Stagno-Antimonio, Stagno-Argento, Piombo-Argento, etc.

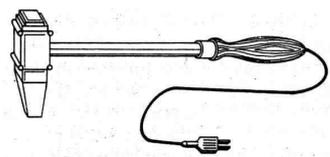


Figura 2.50: Saldatore per brasatura dolce.

La fusione della lega brasante è quasi sempre effettuata per mezzo del "saldatore" che è un blocco di rame unito ad un manico isolante con un'asta metallica (figura 2.50); esso viene riscaldato per effetto joule di una resistenza elettrica disposta nel blocco. Il metallo d'apporto fonde e, sotto forma di goccia, viene fatto scivolare tra i giunti da collegare.

In certe applicazioni si usa immergere il particolare da brasare in un crogiolo ove il metallo d'apporto è allo stato fuso. Si può anche operare per induzione.

Infine, si possono usare fiamme ossi-gas quali ossimetanica, l'ossidrica, la ossipropanica, l'ossiacetilenica.

### Brasatura Forte

In generale con le brasature forti si conferisce una maggiore resistenza meccanica ai pezzi saldati. Di solito si applica a pezzi di discreto spessore e di materiali di maggior resistenza meccanica (e.g., acciai).

Le possibili leghe d'apporto per la brasatura forte sono molto più numerose:

- **Leghe Alluminio-Silicio:** per brasare l'Alluminio e leghe leggere con tenore di Silicio del  $5 \div 12\%$ . Temperatura di fusione di  $450 \div 650^\circ\text{C}$  (vicina a quella delle leghe leggere).
- **Leghe Rame-Fosforo:** per brasare il Rame<sup>5</sup> e le sue leghe con capacità autodisossidante e quindi non richiede l'impiego di flussi. Sono da evitare per le leghe contenenti Nickel che, col Fosforo, formano fasi fragili.

<sup>5</sup>Il Rame puro fonde a  $1083^\circ\text{C}$  e può essere utilizzato come metallo d'apporto per la saldatura di acciai.

- **Leghe Rame-Zinco:** per metalli ferrosi nonché delle leghe contenenti Nickel. Temperatura di fusione di  $890 \div 900^{\circ}\text{C}$  e necessita di un fondente.
- **Leghe Rame-Argento:** tutti i metalli ferrosi e non ferrosi con l'esclusione dell'Alluminio e sue leghe. Temperatura di fusione di  $700 \div 820^{\circ}\text{C}$  a seconda della composizione. L'argento ha lo scopo di migliorare la fluidità giovando al fenomeno della capillarità.

In funzione della composizione, queste leghe variano: il colore, la fluidità, l'intervallo di solidificazione, la resistenza alla corrosione, prezzo, etc.

Le fonti di calore per portare a fusione il metallo d'apporto sono di diversi tipi; le più diffuse sono:

- **Brasature al cannello** (*Torch Brazing*):  
questa fonte è realizzata riscaldando i pezzi da brasare sui quali è disposto il metallo d'apporto con un cannello a gas. Poiché tutta la zona da saldare deve essere portata alla temperatura di bagnatura, più che la concentrata fiamma ossiacetilenica, meglio si prestano altre fiamme ossigas ad azione termica più blanda ma più estesa. Il procedimento può essere anche realizzato attraverso macchine automatiche, come l'esempio di figura 2.51.
- **In forno** (*Furnace Brazing*):  
specie per produzioni in serie si utilizzano forni elettrici a resistenza (figura 2.52). L'impianto può comprendere: una camera di preriscaldamento, una camera di saldatura ed un raffreddamento lento. Solitamente i pezzi, con il metallo d'apporto già disposto tra i giunti da saldare, vengono caricati su un nastro trasportatore che attraversa successivamente le tre camere, accompagnandoli fino alla zona di scarico ove escono già a temperatura sufficientemente bassa e tale da evitare le ossidazioni.  
È consuetudine prevedere un disossidante a meno che non si operi nelle varie camere con una particolare atmosfera protettiva controllata.
- **Ad induzione** (*Induction Brazing*):  
con questo procedimento il calore è ottenuto per effetto joule conseguente

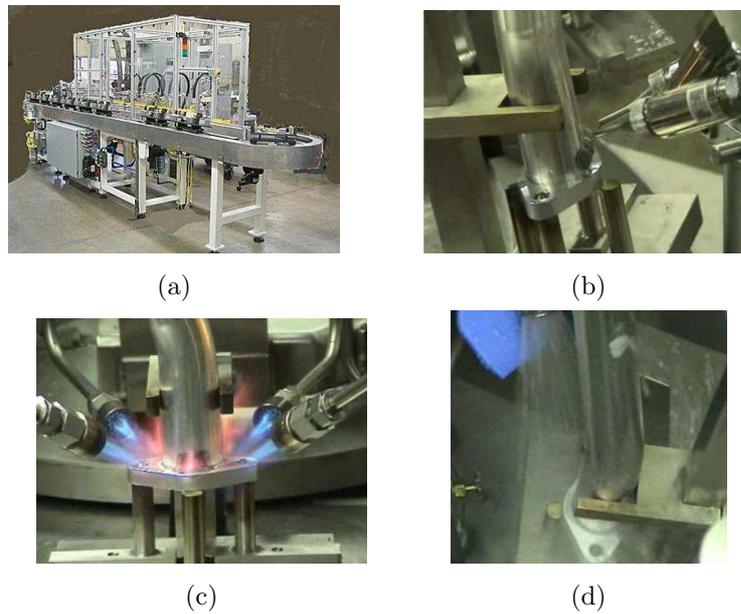


Figura 2.51: (a) Macchina automatica per brasatura dolce o forte. (b) Il materiale d'apporto ed il flusso sono calcolati ed inseriti automaticamente; (c) Controllo del calore mediante quattro cannelli a gas; (d) Raffreddamento ad acqua della zona interessata.



Figura 2.52: Forno per brasature e saldabrasature che opera fino a 1150°C con atmosfera controllata.



Figura 2.53: Brasatura ad induzione utilizzando una pasta con flusso protettivo.

alle correnti elettriche alternate ad alta frequenza che alimenta in corto circuito una bobina con più spire esterne. I pezzi da brasare vengono inseriti nella bobina e così, per induzione, si ottiene un riscaldamento quasi immediato che porta a fusione il metallo d'apporto previamente sistemato fra le superfici da unire con un determinato disossidante (figura 2.53). La rapidità del riscaldamento determina la fusione quasi istantanea anche di leghe ad ampio intervallo di solidificazione evitando così i fenomeni di liquazione. Inoltre la qualità della brasature è buona e la produzione elevata.

- **A resistenza** (*Resistance Brazing*):

il principio si ispira alla saldatura a resistenza per punti facendo passare la corrente elettrica tra i giunti da saldare ottenendo, per effetto joule, la fusione del metallo d'apporto.

- **Brasatura a bagno** (*Dip Brazing*):

esistono due metodi di brasatura a bagno o per immersione: in bagno di sali oppure in bagno di metallo fuso.

Nella brasatura a bagno, il metallo d'apporto viene disposto tra i giunti da saldare nel modo più opportuno e l'insieme viene poi immerso in un bagno di sali oppure di un metallo allo stato fuso.

- **Brasatura a raggi infrarossi** (*Infrared Brazing*):

utilizza lampade al quarzo sistemate in una camera nella quale viene fatto il vuoto o viene mantenuta un'atmosfera di gas neutro.

## 2.8 Controlli delle saldature

La buona riuscita di una saldatura dipende da molti parametri tra i quali soprattutto:

- attitudine alla saldatura dei pezzi collegati;
- qualità adeguata del metallo d'apporto;
- abilità del saldatore.

Il controllo delle saldature si può effettuare con prove meccaniche (**controlli distruttivi**) come: prove di resistenza a trazione, prove di durezza, di resilienza etc.

I vari difetti che si possono avere nelle saldature possono essere rilevati anche con uno dei seguenti **controlli non distruttivi** che non si escludono a vicenda ma piuttosto si integrano.

- **Visivi**: i difetti si possono vedere ad occhio nudo o con una lente di ingrandimento.
- **Con liquidi penetranti coloranti**: i liquidi applicati al cordone di saldatura entrano in eventuali difetti costituiti da fessure anche microscopiche purchè affioranti in superficie. Dopo qualche minuto il cordone di saldatura viene pulito e su di esso viene cosparsa una speciale polvere bianca che assorbe il liquido rimasto nelle fessure il quale forma una macchia che indirittamente riela la presenza del difetto.
- **Magnetici**: il metodo consiste nel produrre un campo magnetico in cui viene immerso il pezzo da esaminare sul quale è stata disposta della limatura di ferro. Eventuali difetti occulti vengono rilevati dalle deviazioni delle linee di forza del campo rese visibili dall'accumulo della limatura di ferro sopra il difetto.
- **Radiografici**: questi controlli vengono effettuati con apparecchi a raggi X che eseguono delle radiografie costituenti anche una documentazione di eventuali difetti occulti.

- **Ultrasuoni:** i difetti vengono rivelati dalla riflessione, resa visibile con un oscilloscopio, delle onde ultrasonore lanciate nel pezzo da controllare. Come mostrato in figura 2.54a, se non è presente nessun difetto, si registra solo l'eco di partenza (l'eco di ritorno avviene con troppo ritardo per essere visibile sullo schermo).

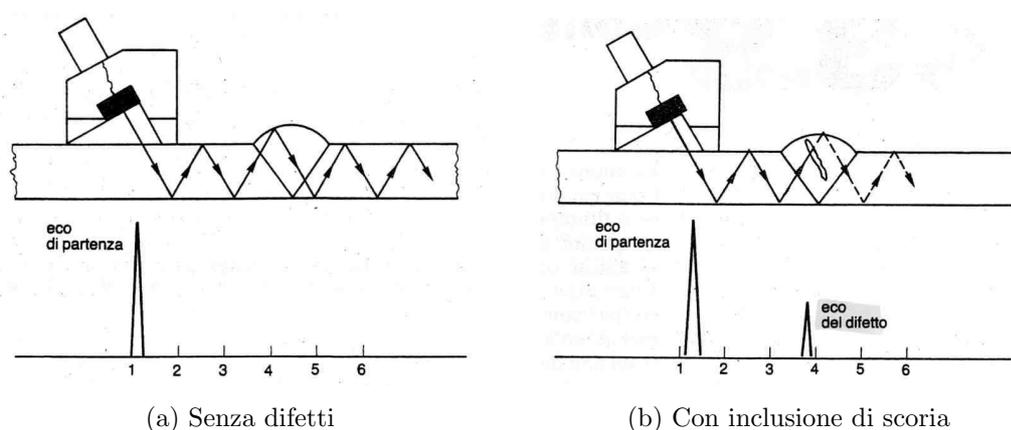


Figura 2.54: Schema del controllo delle saldature con ultrasuoni.

Il difetto, se presente, riflette una parte delle onde ultrasonore evidenziato sullo schermo da un picco (figura 2.54b). Si può notare che se il fascio ultrasonore fosse passato sopra oppure sotto il difetto, di esso non si sarebbe registrata l'eco relativa: ciò significa che bisogna spostare la sonda in senso trasversale al cordone di saldatura in modo che il fascio di onde ultrasonore esplori tutto il cordone.



## Capitolo 3

# Impianti Automatizzati per la Saldatura

Molti processi di saldatura tradizionali richiedono un lavoro intenso ed un'analisi puramente qualitativa dei costi di saldatura (figura 3.1) dimostra che il costo totale può essere attribuito in gran parte ad elementi di esecuzione della saldatura.

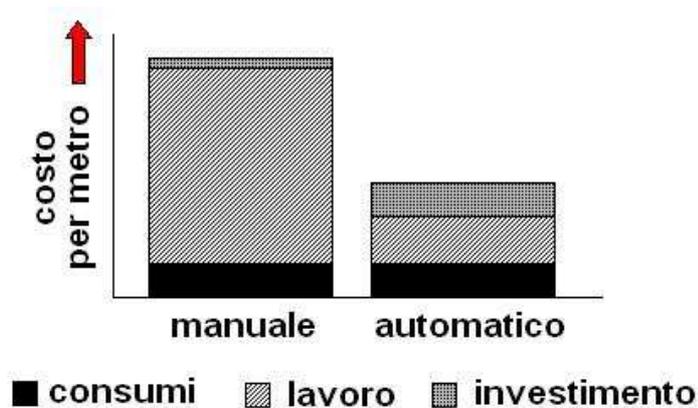


Figura 3.1: Confronto del costo di lavoro per metro di una saldatura di testa in acciaio [5].

L'automazione della saldatura è focalizzata in primo luogo a ridurre il costo globale delle operazioni di saldatura rimpiazzando alcuni o tutti gli interventi manuali con sistemi meccanizzati.

L'introduzione dell'automazione tuttavia ha diversi altri significati oltre al primo effetto di ridurre i costi di lavoro; i principali vantaggi sono:

**Qualità** : considera l'integrità della saldatura attraverso controllori elettronici dei parametri di saldatura offrendo una maggiore qualità rispetto alla con-

troparte manuale, oltre che il controllo istantaneo della qualità integrati in sistemi con prove di tenuta e sistemi di visione completamente automatizzati per fornire un ulteriore controllo di qualità.

**Ripetibilità** : è una funzione della qualità responsabile nel controllo del processo di saldatura e dell'ingegneria dei movimenti della macchina riducendo od eliminando il fattore umano dal processo di saldatura.

**Prudittività** : con il tempo di setup minimo e velocità di saldatura generalmente più alte, un sistema di saldatura automatico può facilmente sorpassare un saldatore esperto manuale. Si riducono i tempi di ispezione e dei costi legati a saldature scartate oltre che una pianificazione del costo del lavoro.

**Sicurezza ed igiene** : molti processi di saldatura sono potenzialmente pericolosi; essi generano particolari fumi, gas tossici, rumore ed una varietà di radiazioni elettromagnetiche che variano da radiazioni ultraviolette per saldature ad arco fino ai raggi X nella saldatura con fascio elettronico. L'automazione offre un modo per togliere l'operatore dai processi ed applicazioni relativamente pericolosi con l'aggiunta di offrire un miglior controllo dell'ambiente di saldatura;

In alcuni casi semplicemente la saldatura dev'essere automatizzata. La tabella 3.1 riassume i processi di saldatura visti nel capitolo 2 evidenziando, per ogni tecnologia, i possibili campi di applicazione scelti fra: operazioni manuali, attrezzature dedicate meccanizzate, macchine automatiche, sistemi robotizzati e impianti speciali.

Non ogni tipologia di saldatura è una buona candidata per l'automazione: le saldature ad arco e resistenza, oltre ad essere notoriamente le tecniche di saldatura più utilizzate e diffuse, risultano essere le tecnologie che presentano un grado di automazione maggiormente esteso, sulle quali è opportuno focalizzare l'analisi sugli impianti di saldatura. Esistono tuttavia tecnologie di saldatura che si prestano ad essere impiegate su apparecchiature dedicate o per applicazioni particolari costituendo significative alternative agli impianti "tradizionali" per saldatura.

Tabella 3.1: Grado di automazione delle tecnologie di saldatura

Tecnologie di saldatura	Manuale	Attrezzature dedicate	Macchine Automatiche	Robotizzate	Impianti speciali
Saldature a Gas	X				
TIG, MIG/MAG, Plasma, Flux-cored	X	X	X	X	
Elettrodo rivestito, Idrogeno atomico, Elettrodo carbone	X				
Arco sommerso			X		X
Elettroscoria, Elettrogas, alla Termite		X			X
Resistenza a punti, proiezione, rulli		X	X	X	
Fascio Laser				X	X
Fascio elettronico					X
Ultrasuoni		X	X		
Esplosione					X
Frizione, Scintillio, MIAB Pressione freddo		X	X		

### 3.1 Classificazione degli Impianti Automatici di Saldatura

Un impianto di saldatura costituisce un insieme più o meno articolato di macchine, apparecchiature, congegni, dispositivi costituenti un'unità organica di saldatura, nella quale viene realizzato il ciclo tecnologico di saldatura.

Gli impianti di saldatura possono essere classificati secondo due categorie:

- **Macchine automatiche;**
- **Celle robotizzate.**

Macchine automatiche e celle robotizzate si differenziano, in primo luogo, per quanto riguarda il campo di applicazione (figura 3.2): se i prodotti devono essere eseguiti in grande quantità con saldature ripetitive effettuate su elementi simili e di agevole assemblaggio, si predilige l'approccio basato su macchine automatiche

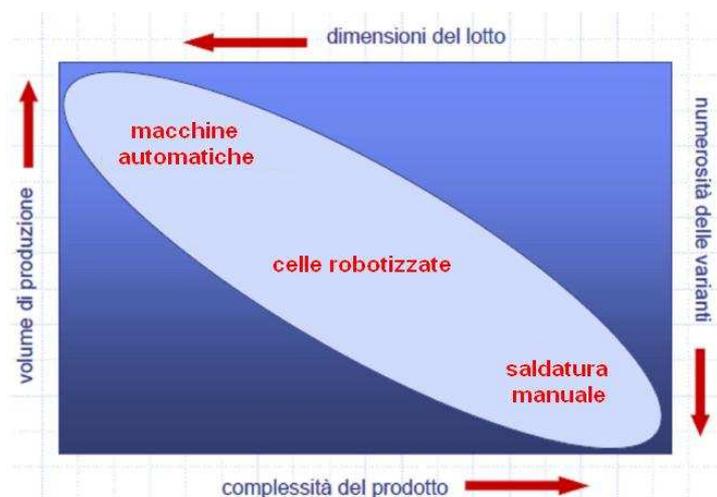


Figura 3.2: Campi di applicazione delle tecnologie di assemblaggio.

ottimizzando quindi i tempi della produzione. Viceversa, con l'aumentare della complessità delle saldature e della flessibilità richiesta si prediligono celle robotizzate per prodotti con dimensioni minori del lotto ma con maggior numerosità delle varianti costruttive. L'impiego di tecniche manuali è giustificato solo per lotti modesti con grado di destrezza non raggiungibili con l'automazione.

## 3.2 Macchine Automatiche per Saldatura

Una macchina automatica per la saldatura è un dispositivo meccatronico che esegue operazioni automatiche di saldatura attraverso l'uso di sistemi di movimento meccanici progettati per svolgere un determinato compito e non facilmente modificabile.

Occorre precisare che, quando si parla di macchina automatica di saldatura, ci si riferisce all'intero impianto industriale all'interno del quale è presente una macchina automatica di saldatura, definita sopra, come elemento principale dell'impianto.

Detto questo, la caratteristica generale che caratterizzano tutte le macchine automatiche di saldatura essa potrebbe essere la *non presenza di robot* che partecipi attivamente all'attività di saldatura, diversamente da quanto accade per le celle robotizzate.

Le macchine automatiche si prestano ad essere impiegate in sistemi di produzione per un particolare tipo di prodotto, per grandi volumi di produzione con un'estesa vita produttiva, utilizzando una disposizione fissa di equipaggiamenti non facilmente modificabili.

La tendenza attuale è quella di costruire una macchina automatica con una maggiore flessibilità, seppure limitata, per rispondere a variazioni dimensionali o meccaniche della stessa gamma di prodotti.

In una macchina automatica per saldatura, intesa quindi come impianto industriale, si possono identificare dei sottosistemi che la compongono; un elenco con breve descrizione di tali sottosistemi è presentato di seguito:

- **Stazione di saldatura** o unità saldante o saldatrice: corrisponde alla parte operativa, la stazione di lavoro, che esegue la saldatura differenziata in base alla tecnologia di saldatura che implementa.
- **Attrezzi portanti del pezzo**: il prodotto da saldare dovrà essere fissato su dei dispositivi per realizzare il centraggio e l'allineamento;
- **Sistemi di trasporto dei pezzi**: riguarda il trasferimento dei pezzi o dell'attrezzo portante all'interno dell'impianto di saldatura dimensionato in base ai pesi e alle dimensioni del prodotto.
- **Sistemi di alimentazione dei pezzi da saldare**: per questi esistono esigenze di riferimento, ordine e singolarizzazione delle componenti per alimentare la stazione di saldatura.
- **Impianti di servizio**: sistemi ausiliari presenti in un impianto automatizzato.
- **Generatore di potenza**: fornisce la potenza alla stazione di saldatura per eseguire la saldatura;
- **Sistema di controllo**: oltre alla supervisione dell'impianto, gestisce e regola i parametri di saldatura;
- **Sistema di sicurezza**: delimita lo spazio di lavoro dell'impianto oltre che fornire le adeguate sicurezze agli operatori;

Un esempio che rappresenta una macchina automatica di saldatura è mostrato in figura 3.3. Esso consiste in un impianto automatizzato per la produzione di pannelli di rete elettrosaldata in formato standard o standardizzato per elevati lotti di produzione e per utilizzo giornaliero di 24 ore.

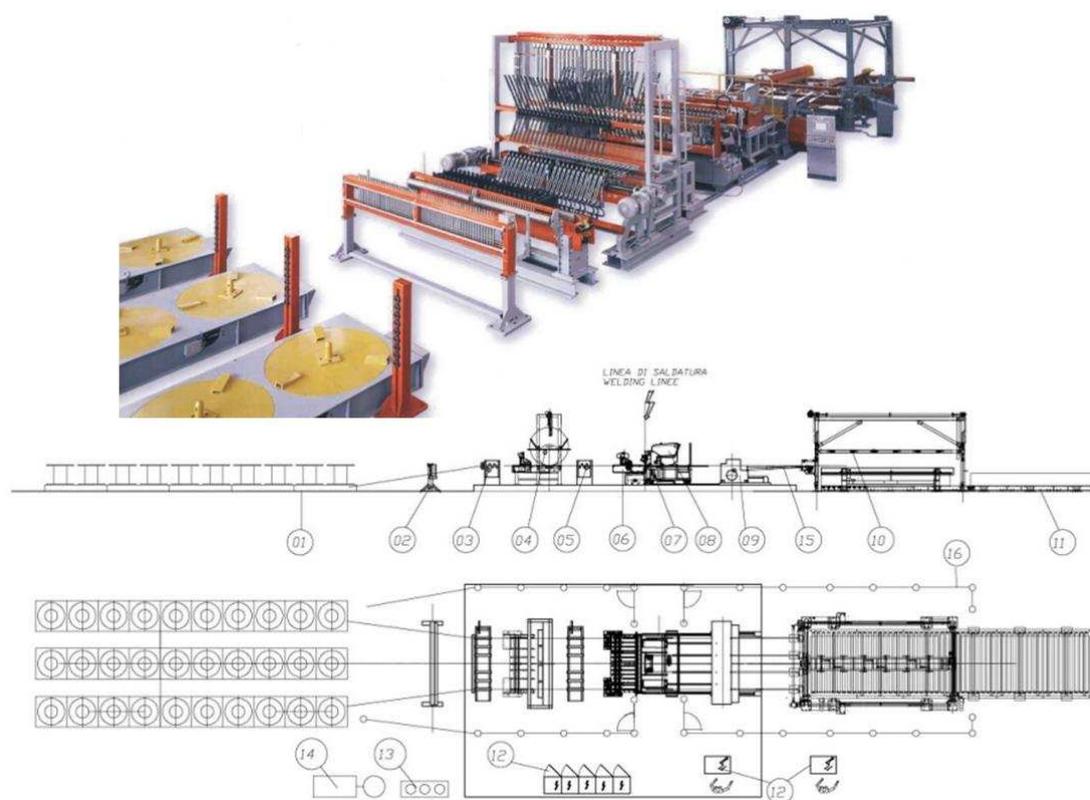


Figura 3.3: Linea di saldatura automatica per griglie elettrosaldate con schema progettuale (COM.IT).

Quest'esempio di impianto sarà utilizzato per individuare i sottosistemi che compongono un impianto di saldatura.

### 3.2.1 Macchine Automatiche di Saldatura per Pressione

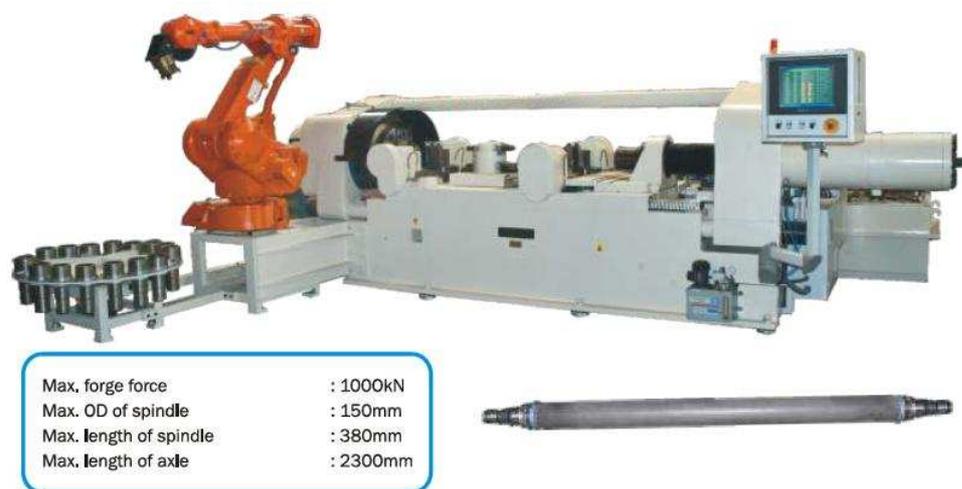
La stazione di saldatura costituisce l'elemento caratteristico in una macchina automatica per saldatura. Ogni tecnologia di saldatura per macchine automatiche (vedi tabella 3.1) comporta una diversa composizione dell'unità saldante. Le più diffuse riguardano la cosiddette saldature per pressione, che comprendono la saldatura per resistenza e le saldature per frizione.



(a) Saldatrice a resistenza per la produzione di griglie elettrosaldate (particolare 7 dell'esempio proposto).



(b) Impianto a teste multiple in linea per saldatura di a punti di pannelli in lamiera (TRS).



(c) Saldatrice per rotofrizione (Manufacturing Technology, Inc.).

Figura 3.4: Esempi di unità saldanti di saldature per pressione.

Negli esempi di figura 3.4a e 3.4b, la saldatrice consiste in una struttura robusta in acciaio con più teste di saldatura a resistenza disposte in parallelo. L'esempio riguarda la saldatura per resistenza, pertanto saranno presenti i trasformatori, elettrodi inferiori, elettrodi superiori e le presse di saldatura azionate da cilindri pneumatici.

Nelle saldature per frizione, generalmente la saldatura è orizzontale, nella quale una parte da saldare viene mantenuta fissa, mentre l'altra viene messa in movimento dal mandrino attraverso il movimento relativo e pressione verso la prima. La figura 3.4c mostra una macchina automatica per la fabbricazione di alberi

motori, dotata di alimentazione automatica dei due mandrin mediante robot per asservimento, prelevando i pezzi da un'apposito vassoio portapezzo circolare. Il sistema è continuamente monitorato attraverso un pannello di controllo che raffigura i parametri di saldatura in un grafico. L'esempio evidenzia una caratteristica che assume grande rilevanza in tutte le tipologie di macchine automatiche per saldatura: un elaborato sistema di *alimentazione dei pezzi da saldare*. Un robot per asservimento, come in questo caso, rappresenta la soluzione più flessibile.

### 3.2.2 Macchine Automatiche per Saldatura ad Ultrasuoni

Le caratteristiche che distinguono una macchina per saldatura a ultrasuoni sono:

- **Generatore di ultrasuoni:** fornisce un'onda elettrica di forma sinusoidale, con frequenza compresa tra i 20 ed i 50 kHz.
- **Gruppo vibrante** formato dal trasduttore, dal booster alla cui estremità è avvitato il sonotrodo: il trasduttore converte gli impulsi elettrici in movimento meccanico, il booster amplifica questo movimento e lo trasferisce al sonotrodo che viene portato a contatto con il pezzo da saldare (figura 3.5a).



(a) Gruppo vibrante.



(b) Saldatrice ad ultrasuoni.

Figura 3.5: Saldatura ad ultrasuoni.

L'attuatore (gruppo vibrante) di tipo pneumatico è particolarmente adatto per automazione e per la costruzione di linee automatiche. Il movimento avviene

su guide prismatiche solitamente dotate di un fermo meccanico per il controllo della corsa del cilindro.

L'esempio di figura 3.5b mostra una macchina automatica "da banco" con possibilità di inserimento in linee automatiche, dotata di microprocessore per il controllo del ciclo e un pannello frontale dotato di tastiera numerica con tasti funzione e display retroilluminato. Esistono ampie possibilità di regolazioni meccaniche ed elettriche, adattando così la saldatrice ai più svariati problemi di saldatura.

### 3.2.3 Macchine Automatiche per Saldatura ad Arco

La natura intrinseca di questa tecnologia richiede che queste macchine devono essere dotate di un qualche meccanismo automatico per trasportare la testa di saldatura lungo un *giunto da saldare che può modificarsi solo in un range di dimensione dei componenti* (lunghezza del giunto, spessore dei pezzi da saldare, diametro della circonferenza ecc) e non per quanto riguarda la forma del giunto stesso. Questa caratteristica giustifica l'utilizzo di macchine automatiche al cospetto di sistemi robotizzati flessibili, oltre che il grado di ripetitività dall'operazione.

Ciò non implica comunque che il sistema in questione sia "poco intelligente" in quanto in alcuni casi deve far fronte, come detto, a variazioni dimensionali delle componenti.

La saldatura ad arco trova impiego in macchine automatiche secondo tre diverse tipologie di apparecchiature:

- Carrelli motorizzati;
- Postazioni fisse di saldatura;
- Saldatura orbitale.

### Carrelli motorizzati

Sono basati sulla movimentazione di un carrello motorizzato (o trattore), tipicamente con quattro ruote gommate, per la saldatura in posizione piana giunti lineari caratterizzati da un'elevata lunghezza. La testa di saldatura è montata direttamente sul trattore, così come tutto l'equipaggiamento necessario per la saldatura come mostrato in figura 3.6.

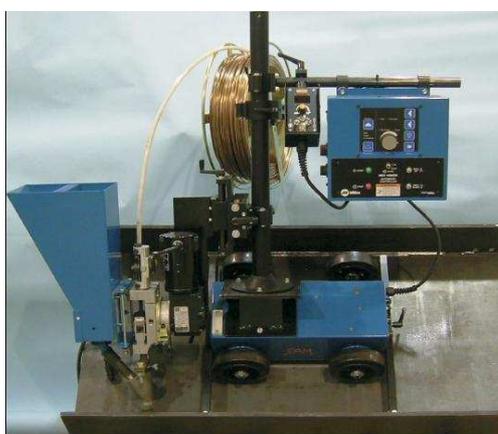


Figura 3.6: Carrello motorizzato per saldatura ad arco sommerso.

Sistemi di trasporto di questo tipo sono usualmente attribuiti alla saldatura ad arco sommerso, con eccezioni per i processi MIG/MAG e flux-core.

### Postazioni di Saldatura Fisse

Semplici posizionatori a tavole rotanti possono essere utilizzate per muovere le componenti da saldare sotto una testa di saldatura fissa. È particolarmente adatto per saldature circolari di componenti di piccole dimensioni e peso limitati quali bombole e componenti di oleodinamica (figura 3.7a).

Questi sistemi sono caratterizzati da posizionatore rotante inclinabile a controllo numerico con due assi (rotazione tavola ed inclinazione) completo di contropunta pneumatica con svincolo radiale per agevolare le operazioni di carico e scarico del pezzo. L'impianto di figura 3.7b, ha una luce utile di 1500 mm, può effettuare contemporaneamente due differenti saldature evitando una movimentazione laboriosa.



Figura 3.7: Postazioni di saldatura ad arco fisse.

### Saldatura Orbitale

Il sistema di saldatura è montato su un carrello che orbita attorno alla giunzione di testa di due tubi per effettuare la saldatura. La tipologia di saldatura ad arco deve prevedere anche la saldatura sopratesta, quindi la tecnologia maggiormente impiegata in questo ambito è MIG/MAG con procedimento spray-arc mentre la saldatura SAW è pregiudicata.

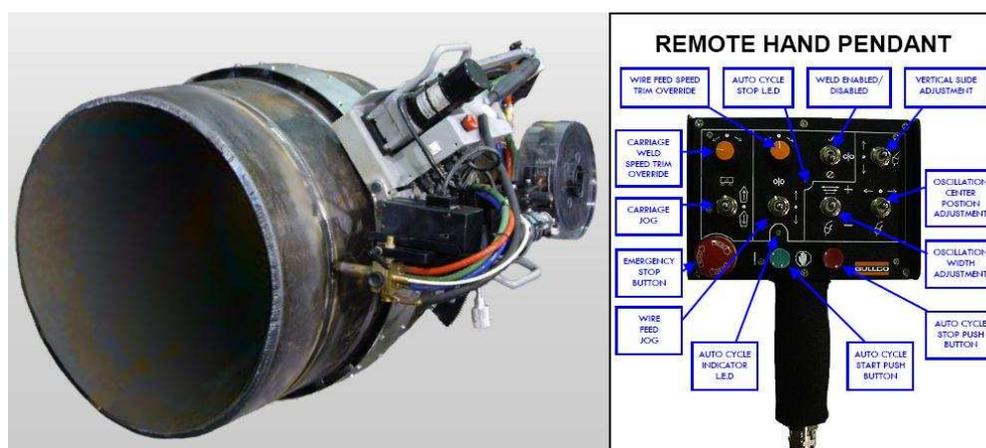


Figura 3.8: Saldatura orbitale con particolare del telecomando remoto di controllo.

Nell'esempio di figura 3.8, l'unità di saldatura è montata sul tubo per mezzo di una guida con montaggio rapido, disponibile per tutti i diametri standard e personalizzati. La torcia di saldatura è montato su un lato, fornendo un acces-

so completamente libero nella zona del giunto da saldare. Il sistema è dotato di un telecomando remoto per la regolazione motorizzata di diverse funzioni di saldatura.

### 3.2.4 Macchine Automatiche Speciali

Le tecnologie di saldature ad alta intensità di energia, quali laser e fascio elettronico, trovano impiego in strutture "speciali" di macchine automatiche per saldatura. Le caratteristiche che accomunano queste macchine sono un complesso sistema di controllo (diversi parametri di saldatura da controllare), un'adeguata camera/schermo protettivo, un sistema di trasmissione interno delle componenti con accurato sistema di serraggio dei pezzi.

Un'impianto per saldatura laser è mostrato in figura 3.9. Il sistema è equipaggiato per saldatura laser  $CO_2$  con tasso di potenza massimo di 8kW per componenti circolari. Si può notare un complesso sistema di movimentazione interno per l'assemblaggio dei pezzi ed un deflettore del fascio per lavorare contemporaneamente su due postazioni di lavoro dotati di porta pezzo rotante.



Figura 3.9: Impianto di saldatura al fascio laser.

La saldatura EBW necessita solitamente del vuoto per limitare le dissipazioni dovute alla collisione del fascio con l'atmosfera; l'impianto di saldatura deve comprendere anche sistemi per la formazione del vuoto nella zona di saldatura e un sistema per il carico/scarico pezzi con queste condizioni.

### 3.3 Celle Robotizzate per Saldatura

Una cella robotizzata (o isola di lavoro robotizzata) per la saldatura può essere definita come un sistema organizzato in modo efficiente per l'automazione flessibile e programmabile caratterizzata da un **robot di saldatura** come elemento principale in cooperazione con altri macchinari automatici o semiautomatici.

Secondo le norme<sup>1</sup> il termine robot (industriale), con riferimento per la saldatura, "designa un manipolatore multiscopo, programmabile, a tre o più assi, sotto comando automatico per uso di automazione industriale" [6].

Le caratteristiche quindi di **riprogrammabilità**, **autonomia** e **versatilità** sono quelle che differenziano un robot dalla macchina automatica.

Le saldature che interessano questo tipo di struttura sono limitate essenzialmente per: saldatura ad arco (TIG, MIG/MAG, plasma, flux-cored), saldatura per resistenza (a punti, proiezione) e saldatura fascio laser.

Una isola di lavoro robotizzata per saldatura dev'essere corredata da tutto l'equipaggiamento (hardware e software) necessario al suo funzionamento. Si possono individuare i seguenti sottosistemi:

- **Robot industriale:** robot che ricopre un ruolo attivo per l'esecuzione della saldatura nella cella robotizzata
- **Attrezzature di saldatura:** equipaggiamento necessario al robot industriale per eseguire il compito di saldatura
- **Sistema di gestione utensili:** l'insieme dei dispositivi necessari per la gestione della testa di saldatura
- **Attrezzi portanti;**
- **Sistema di trasporto dei pezzi;**
- **Sistema di alimentazione dei pezzi;**

---

<sup>1</sup>Nome tecniche italiane UNI 9919:1992.

- **Impianti di servizio;**
- **Sistema di controllo;**
- **Sensoristica:** sensori e dispositivi di interfacciamento con il robot industriale
- **Sistemi di sicurezza;**

Alcuni di questi elementi che compongono una cella robotizzata sono comunemente utilizzati anche nelle macchine automatiche. I sistemi che caratterizzano una cella robotizzata si limitano ad il robot industriale ed il sistema di gestione degli utensili. Le attrezzature per la saldatura nei robot industriali comportano un'equipaggiamento piuttosto standard, facilmente identificabili rispetto alle macchine automatiche per saldatura che sostanzialmente tendono a variare le proprie attrezzature a seconda della tipologia di prodotto, diversificandosi anche per tecnologie di saldatura simili.

### 3.3.1 Robot Industriale di Saldatura

Il robot o manipolatore industriale è l'elemento principale di una cella robotizzata. Tuttavia ciò che caratterizza completamente una cella robotizzata per saldatura è l'insieme del robot con le attrezzature per saldatura.

In linea di principio i robot di saldatura possono assumere tutte le conformazioni dettate dalla robotica; tuttavia le principali configurazioni riguardano:

- **Robot antropomorfo;**
- **Robot rettilineo** (o cartesiano);

La configurazione più comune per i robot di saldatura è il robot antropomorfo (o braccio articolato), generalmente con sei o più assi di movimento, con il vantaggio della sua flessibilità e l'abilità di accedere in aree difficili. Le case costruttrici di robot per saldatura adottano il proprio modello costruttivo (figura 3.10a): nel primo caso la posa del fascio di tubi di saldatura viene inclusa nel braccio del robot per proteggerli da effetti meccanici, ma anche per evitare il movimento di frusta indesiderato durante il cambio di posizione del robot.



(a) Robot antropomorfi.

(b) Robot cartesiano (TSR).

Figura 3.10: Conformazioni comuni di robot industriali per saldatura.

La figura 3.10b mostra un'isola di lavoro programmabile a 4 assi che utilizza un robot cartesiano per saldatura a resistenza, dotato di magazzino utensili con diverse conformazioni della testa di saldatura.

I robot industriali inoltre possono essere di due tipologie in base all'operazione che svolgono, ricoprendo sempre un ruolo attivo per la realizzazione della saldatura; esse quindi riguardano:

- **Robot operante:** i componenti del prodotto da assemblare mediante saldatura sono fissati su maschere di fissaggio, mentre il manipolatore industriale opera, mediante una testa di saldatura, l'unione;
- **Robot asservitore:** il polso del robot gestisce il pezzo di lavoro, fissato su un'apposita maschera di fissaggio, fornendolo ad una postazione di saldatura fissa; l'end effector del robot non costituisce quindi l'utensile di saldatura.

Mentre la prima tipologia di robot è molto comune, i robot per asservimento sono molto meno frequenti in quanto richiedono una procedura "inversa": la testa del manipolatore deve essere in grado di trattenere opportunamente le componenti preassemblate del prodotto su una maschera di fissaggio, e questo può essere di difficile applicazione.

Per quanto riguarda l'azionamento del robot, i bracci possono essere movimentati da attuatori pneumatici, idraulici od elettrici. Sistemi idraulici sono applicati

per applicazioni che richiedono un'elevata capacità di carico (indicativamente superiore a 35 kg) e per limitate velocità di movimento. Il sistema largamente più utilizzato riguarda servomotori *brushless* retroazionati in posizione. Motori step-per sono utilizzati generalmente per piccole lavorazioni di precisione; essi hanno il vantaggio di avere un riferimento di posizione in uscita costituendo un feedback inerente.

### 3.3.2 Attrezzature per Saldatura

Per identificare e caratterizzare l'equipaggiamento di saldatura per la saldatura robotizzata bisognerà ovviamente diversificare l'analisi per la tipologia di saldatura usata.

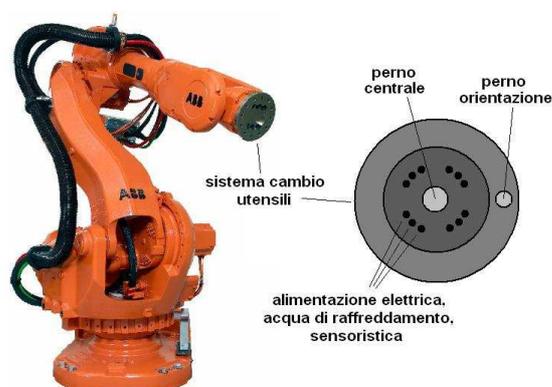
#### Attrezzature per Saldatura a Resistenza

L'end effector (detto anche *gun*) dovrà trasportare una testa di saldatura per resistenza che può essere vista come una tipica applicazione pick and place. È importante in questo caso che lo strumento sia robusto per assicurare operazioni ripetibili, ma dev'essere anche compatto e maneggevole nel trasportare il peso di una normale testa di saldatura a resistenza con i relativi cablaggi. Inevitabilmente questo porta ad un compromesso nel suo design: il *trasformatore potrebbe essere collocato separatamente dalla testa di saldatura* ma questo comporterebbe l'utilizzo di cavi secondari con potenziale perdita di potenza. Un'isola robotizzata per saldatura a resistenza prevede inoltre un sistema di gestione degli utensili composto da:

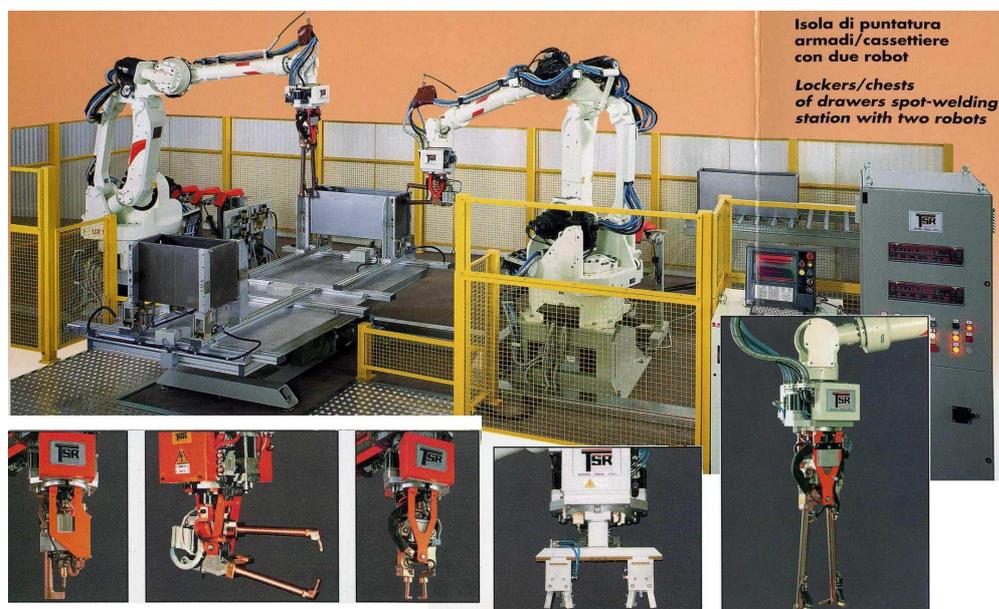
- **Magazzino utensili:** raccoglie un'insieme di gun a disposizione del robot per effettuare diverse operazioni durante il ciclo di lavoro del robot qualora l'applicazione richieda l'accesso a diverse parti della fabbricazione, eventualmente per operazioni di pick & place di movimentazione dei pezzi;
- **Sistema per cambio utensili:** se presente un magazzino utensili, l'end effector dovrà prevedere un sistema efficace e veloce per permetta il cambio della testa di saldatura;

- **Attrezzature anti-usura degli elettrodi:** provvedono al mantenimento di standard qualitativi degli elettrodi effettuando una lavorazione meccanica sulla punta di saldatura.

Il sistema cambio utensili generalmente possiede due perni per centraggio e orientazione della testa di saldatura, oltre fornire l'insieme dei cablaggi necessari per eseguire la saldatura (figura 3.11a). L'impianto di figura 3.11b prevede due robot di saldatura a resistenza che operano anche lo scarico del prodotto finito in una postazione di scarico.



(a) Schema qualitativo di un sistema per cambio utensili.



(b) Isola di lavoro robotizzata per saldatura di armadi/cassettiere con due robot (TSR).

Figura 3.11: Attrezzature per robot industriali di saldatura per resistenza.

### Attrezzature per Saldatura ad Arco

La figura 3.12 riassume tutte le attrezzature che concorrono in un robot per saldatura ad arco; in particolare il sistema dovrà prevedere postazioni per il taglio filo e pulizia torcia dette anche stazioni di manutenzione.



Figura 3.12: Attrezzature per saldatura ad arco.

Nella saldatura GTAW il robot dovrà semplicemente trasportare equamente una leggera torcia e cavi mentre nella applicazioni GTAW e FCAW dovrà essere fornito il metallo d'apporto nella testa di saldatura.

É vantaggioso inoltre utilizzare pacchi con elevata capacità di fili elettrodi con bassa curvatura per incrementare la facilità di alimentazione.

### Attrezzature per Saldatura Laser

Nella saldatura laser il fascio deve essere condotto lungo il braccio robotico fino alla stazione di lavoro utilizzando una serie di specchi nel caso di laser  $CO_2$  o mediante un cavo in fibra ottica nel caso del laser Nd:YAG. Il secondo caso è la metodologia più utilizzata per la semplicità e flessibilità data dall'utilizzo di un cavo rispetto ad un'elaborato sistema di specchi.

## 3.4 Architettura di una Linea per Saldatura

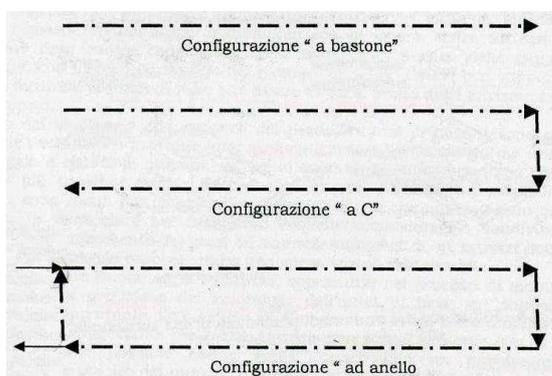
Le linee automatizzate costituite da macchine automatiche o celle robotizzate per saldatura, così come per qualsiasi linea di assemblaggio di componenti, hanno fondamentalmente due architetture principali:

- **Configurazione rettilinea;**
- **Configurazione circolare.**

Una o più stazioni sono identificate da un'unità saldante che effettua la saldatura, altre potrebbero riguardare diverse lavorazioni meccaniche sul pezzo (pressatura, stampaggi, deformazioni etc) o l'alimentazione di componenti da saldare sulla struttura base del pezzo. Sempre presente una o più stazioni dedicate al carico/scarico del pezzo, che può avvenire tramite un'operatore o mediante un sistema automatizzato.

In particolare, nella filosofia rettilinea le stazioni di lavoro sono allineate, unite fra loro da un sistema di trasporto tipo transfer. In relazione al numero di stazioni e quindi agli ingombri si possono avere schemi a bastone, a C o ad anello, schematizzati in figura 3.13a. Un'esempio di impianto tipo transfer è mostrato in figura 3.13c per l'assemblaggio e saldatura a resistenza di cassette (produzione 300 pz/h), nel quale è evidente la configurazione a C.

Per quanto concerne la configurazione circolare, il sistema di trasferimento dei pezzi fra le stazioni è rappresentato da una "tavola rotante". I particolari sono solidali a questa tavola che avanza di un passo ad intervalli di tempo, trasferendo così i pezzi da una stazione a quella seguente. L'esempio di figura 3.13b, riguarda



(a) Schemi di configurazioni rettilinee.



(b) Saldatrice ad ultrasuoni con configurazione circolare (Sirius electric).



(c) Macchina automatica con configurazione lineare (TSR).

Figura 3.13: Architetture di una linea di saldatura.

una linea di saldatura ad ultrasuoni con tavola rotante di tipo pneumatico oppure elettromeccanica, con sistema di espulsione automatica dei pezzi.

Lo schema circolare a parità di stazioni ha minor ingombro ed è più compatto; quando i prodotti sono di notevole dimensione oppure il numero delle operazioni da eseguire è molto elevato allora si preferisce la configurazione rettilinea.

### 3.5 Attrezzi Portanti del Pezzo

I dispositivi portanti del pezzo da saldare sono senza dubbio la componente che riveste una notevole importanza negli impianti di saldatura: essi devono assicurare il **centraggio** e **riferimento preciso** in tutte le fasi di lavorazione. Il sistema di trasporto si occuperà della movimentazione di tali attrezzi portanti.

Le principali categorie di attrezzi portanti utilizzate nella saldatura sono:

- **Supporti e dime ad angolo:** permette la saldatura di angoli aventi angoli di apertura diversi fra loro. Inoltre operando un attrezzaggio meccanico è possibile utilizzarla anche per differenti altezze del bordo.
- **Maschere di fissaggio:** Le quattro unità di lavoro sono montate su delle slitte guidate e possono essere spostate e bloccate su diverse posizioni per poter gestire la grande diversità di dimensioni (variabilità sulle tre dimensioni).
- **Banchi di bloccaggio:** sono realizzati per la saldatura longitudinale di lamiere calandrate o piane con giunti testa a testa.
- **Posizionatori roto-basculanti:** constano di un basamento che sostiene una tavola suscettibile di ruotare e di inclinarsi. La tavola presenta delle fenditure attraverso le quali, con bloccaggi passanti, si può fissare il pezzo. Esistono modelli diversi (orbitale, a L, con contropunta) a seconda della portata che può variare da 100 kg fino a più tonnellate.
- **Posizionatori a tavola rotante:** una navetta rotante a due posizioni (detta anche shuttle) "scambia" con il robot industriale il pezzo grezzo (eventualmente fissato su una maschera di fissaggio) con il prodotto saldato.
- **Doppio tornio rotante:** simile alla tavola rotante per pezzi cilindrici;
- **Posizionatori a rulli:** consta di due coppie di rulli, normalmente rivestiti di gomma, sui quali viene appoggiato il corpi cilindrici di grosse dimensioni (serbatoi in genere). Una delle coppie di rulli è motrice e la velocità di rotazione è regolabile con continuità.

Alcuni esempi di attrezzi portanti sono presentati in figura 3.14.

Ogni categoria può essere realizzata mediante bloccaggi meccanici, pneumatici od oleodinamici che possono gestire anche complesse operazioni quali roto-traslazioni idrauliche o elettriche, gestite dall'operatore o da CN, con eventuale gestione automatica dei posizionamenti e dei parametri a seconda del modello da produrre.



(a) Dima ad angolo.



(b) Maschera di fissaggio.



(c) Banco di bloccaggio.



(d) Posizionatori roto-basculanti.



(e) Posizionatori a tavola rotante.



(f) Doppio tornio rotante.

Figura 3.14: Esempi di attrezzi portanti per saldatura.

### 3.6 Sistemi di Trasporto e Movimentazione

Gli attrezzi portanti, quali tavola rotante, torni ed in generale che implementano un sistema di movimentazione, possono essere considerati egualmente dei sistemi di trasporto dei pezzi da saldare.

Tuttavia l'impianto di saldatura comprende sistemi di trasporto modulari e carrellabili che permettono facili riconfigurazioni (figura 3.15a) così come sistemi speciali di movimentazione (figura 3.15b). Il pezzo base deve essere trasferito fra le stazioni di lavoro in modo da "crescere" tramite le successive saldature e montaggi delle parti componenti fino a diventare il prodotto finito.



(a) Esempio di rulleria con formazione della lamiera prima dell'isola di puntatura di armadi per spogliatoio (TSR).



(b) Traino fili longitudinali per il controllo ed allineamento dei fili longitudinali utilizzato nell'impianto per reti elettrosaldate (pagina 80, 4).

Figura 3.15: Esempi sistemi di trasporto e movimentazione.

### 3.7 Sistemi di Alimentazione dei Pezzi da Saldare

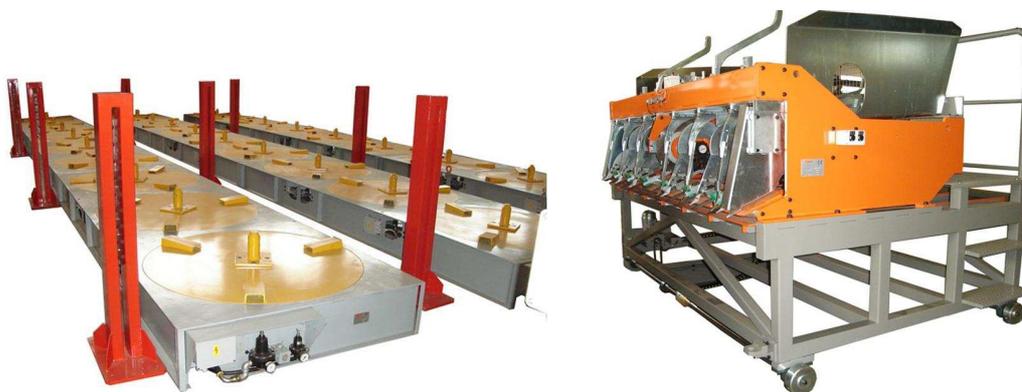
Molto frequentemente in un impianto di saldatura, è necessario implementare dei sistemi che forniscano alla testa saldante le componenti da saldare sul pezzo base.

Con un sistema automatizzato di alimentazione è auspicabile che il materiale sia fornito in modo **ordinato**, **singularizzato** e con il **giusto riferimento** (qual'ora presenti un'orientabilità).

La soluzione più comunemente usata prevede l'utilizzo di caricatori (piani, a contenitore o vibroalimentatori orbitali) che prelevano i pezzi grezzi da un'apposito **magazzino** contenitore.

### 3.8 Impianti di Servizio

Sono impianti complementari, inseriti nel sistema di saldatura ma non direttamente partecipanti alla produzione, necessari in un sistema automatizzato; essi comprendono:



(a) Alimentazione fili longitudinali (1).

(b) Alimentatore del filo trasversale per il carico sotto le presse di saldatura (8).

**Figura 3.16:** Esempi di sistemi per alimentazione. Impianto di produzione reti elettrosaldate (pagina 80): l'alimentazione dei fili longitudinali avviene in continuo da bobine mentre quello dei fili trasversali da barre pre-raddrizzate.

- **Impianto elettrico:** si riferisce a quell'insieme di apparecchiature elettriche, meccaniche e fisiche atte alla trasmissione e all'utilizzo di energia elettrica per l'alimentazione di servomeccanismi (di natura elettrica o parzialmente elettronica) per la generazione di una forza meccanica.
- **Impianto pneumatico:** la finalità di tale impianto è quella di fornire ad una serie di utenze aria a pressione controllata prelevata da un motore apposito. Esso comprende, oltre che una serie di valvole (di prelevamento, regolatrici di pressione, di non ritorno, di sicurezza, di isolamento) anche una rete di distribuzione, composta da un circuito di tubazioni, attraverso la quale viene fornita energia meccanica nelle zone remote dell'impianto.
- **Impianto oleodinamico:** si occupa della trasmissione dell'energia tramite fluidi in pressione, in particolare l'olio idraulico. Ha la capacità di gestire notevoli potenze tramite componentistica di dimensioni e pesi ridotti rispetto a tecnologie alternative.
- **Sistemi di raffreddamento:** tali impianto risultano indispensabili in alcune tipologie di saldatura per il mantenimento di condizioni termiche idonee al corretto funzionamento e di prevenzione all'usura. Esso riguarda quasi esclusivamente l'utilizzo di acqua come fluido di raffreddamento.

Gli impianti di servizio si differenziano per le diverse colorazioni delle tubazioni cosicché sia possibile identificarli in un impianto automatizzato. La convenzione più utilizzata prevede cavi verdi per la condotta di acqua, cavo blu per l'aria compressa e cavo marrone per tubi contenenti olio.

### 3.9 Sistema di Controllo della saldatura

La struttura modulare di una macchina automatica di saldatura favorisce un sistema di controllo che si sviluppa secondo uno schema gerarchico, sostenuto da un'adeguato sistema di gestione delle informazioni.



Figura 3.17: Armadio elettrico completamente sigillato e condizionato termicamente, contenente tutti i componenti necessari per il funzionamento ed il controllo della linea.

Mostrato in figura 3.17, l'armadio elettrico o unità di governo, rappresenta il sistema centralizzato per la gestione dell'intero impianto di saldatura, costituito da una base hardware composta da PLC (Programmable Logic Control) e calcolatori elettronici con particolari funzioni specificatamente studiate per acquisire i segnali dai sensori dal campo e fornire segnali di comando agli attuatori che si trovano nelle parti operative dell'impianto.

Fra le risorse locali di controllo, quella che più caratterizza un impianto di saldatura, è il **controllo dei parametri di saldatura**.

La figura 3.18 mostra lo schema di controllo a retroazione utilizzato per controllare la corrente di saldatura nella tecnologia di saldatura per resistenza. Infatti, in questa tecnologia, il calore necessario per formare la saldatura è dato dalla formula di Joule, il parametro da controllare è la corrente di conduzione.

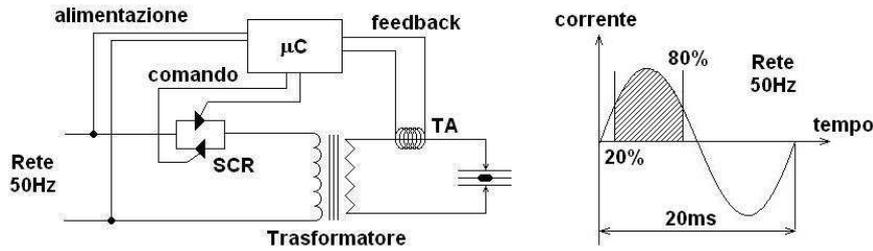


Figura 3.18: Schema di controllo a retroazione dei parametri di saldatura per la tecnologia di saldatura a resistenza (controllo di corrente), con particolare dell'area di conduzione regolata dagli SCR per la rete a 50Hz.

Per misurare la corrente sul secondario del trasformatore e realizzare il feedback si usa un **trasformatore amperometrico** (TA). Si presenta come un induttore toroidale eseguito con un normalissimo spezzone di filo inguainato che avvolge il cavo in rame di conduzione dell'elevata corrente necessaria alla saldatura. La tensione indotta (nell'ordine di decine di mV), proporzionale alla corrente di conduzione, costituisce il segnale di feedback al microcontrollore.

Gli SCR (Silicon-Controlled Silicon) consistono in un diodo che può essere regolato in corrente tramite un segnale di controllo proveniente dal microcontrollore. Collegati "back to back" alla rete monofase a 50Hz, uno conduce la mezza semionda positiva mentre l'altro conduce nel semiperiodo negativo.

L'area di conduzione determina l'energia sul primario del trasformatore che commuta il segnale da alta tensione e bassa corrente ad un segnale con alta corrente ( $10000 \div 20000$  A) e bassa tensione ( $4 \div 5$  V). Va osservato che l'area di conduzione, regolata dagli SCR, in generale è compresa fra il 20% l'80% della semionda a causa della piccola variazione di energia che si registra all'esterno di quest'area.

In questo caso si è considerata una rete a bassa frequenza (50Hz) ma sarebbe più opportuno lavorare a **media frequenza** (1kHz) così come avviene nella maggior parte dei casi. Il vantaggio che si ottiene a media frequenza è anzitutto il tempo di commutazione più breve ottenendo un sistema più pronto, oltre che ad avere un trasformatore di dimensione più modeste rispetto alla bassa frequenza. Tuttavia, non si può salire troppo con la frequenza perchè i circuiti di commutazione diventano troppo costosi per stare dietro alle commutazioni e l'efficienza

tende a calare perchè l'energia viene dissipata durante le commutazioni.

Regolata la corrente al valore di riferimento si dovrà determinare anche il tempo di pressione. Va osservato che la corrente non può assumere un valore troppo elevato perchè agirebbe sulla prima resistenza di contatto fra l'elettrodo e la lamiera, non fra le due lamiere, generando spruzzi di materiale fuso.

La resistenza che compare nelle formula di Joule è funzione inversa dalla pressione degli elettrodi sulle lamiere da saldare: più alta è la pressione e minore sarà la resistenza di contatto.

Il principio che regola i parametri di saldatura di altre tecnologie seguono un sistema a retrazione simile a quello appena descritto, seppure con schemi più complessi in virtù di parametri di saldatura più elaborati da controllare. Per esempio nella saldatura ad arco oltre a regolare la corrente (200÷400 A) è necessario regolare anche la velocità di avanzamento della torcia, così come la velocità di avanzamento del filo. La tensione è legata all'intensità di corrente ed alla distanza dell'arco elettrico dal bagno di fusione.



# Capitolo 4

## Un caso studio: Brasatura Automatica di Batterie Alettate



(a) Batterie alettate



(b) Curvetta da brasare.

Figura 4.1: Caso studio.

Le aziende produttrici di scambiatori di calore a pacco alettato e apparecchiature di scambio termico non dispongono, o dispongono parzialmente, di un impianto automatico per il processo di brasatura della curvette disposte sulla sommità dei tubi del pacco alettato. Un impegno verso questa direzione è già stato intrapreso da alcune aziende, ma una soluzione definitiva non è ancora stata trovata.

Con le basi apprese si cercherà di indagare tra le tecnologie di brasatura esistenti, trovando quella che si presta meglio ad essere automatizzata, in modo

da innovare il processo produttivo, rispettando i tempi cicli richiesti. A tal scopo si approfondiranno alcuni aspetti trattati nei capitoli precedenti.

## 4.1 Caratteristiche dei materiali impiegati

Le batterie alettate sono attualmente fabbricate principalmente con rame quale materiale per le tubazioni del circuito dove scorre il liquido primario. L'attuale tendenza è quella di passare alla produzione di batterie in alluminio, meno costose, per le quali le tecnologie di brasatura mediante impianti automatici è in fase di sviluppo.

I primi aspetti da tenere in considerazione sono relativi alle tipologie e caratteristiche chimico-fisiche dei materiali impiegati, nelle due tipologie di batteria alettata. Si terrà presente perciò il metallo base, con cui sono costituite le forcine e cuvette, e il corrispondente materiale d'apporto utilizzato.

### 4.1.1 Batterie in rame

I materiali che costituiscono le batterie in rame sono:

- **Rame tipo Cu-DHP** che costituisce il metallo con cui sono fabbricate forcine e cuvette. È il metallo base;
- **Rame EN 1044 CP202<sup>1</sup>** che costituisce il metallo d'apporto.

Le principali caratteristiche chimico-fisiche di questi due materiali sono raccolte nella tabella 4.1.

Questa coppia di materiali è molto utilizzata per la brasatura soprattutto per l'elevata differenza di temperatura di fusione fra le due tipologie di rame, circa 300°C, che si traduce in un minore esigenza di controllo della temperatura di brasatura. La temperatura di brasatura ottimale si aggira attorno ai 730°C.

Il rame Cu-DHP (Deoxidized High residual Phosphorus) è un rame pressoché puro e totalmente privo di ossigeno, nel quale viene mantenuto a garanzia della

---

<sup>1</sup>Costituisce la designazione europea. Altre designazioni sono: tedesca DIN 8513 L-CuP7 e americana AWS A5.8-04 BCuP-2.

Tabella 4.1: Principali caratteristiche chimico-fisiche dei materiali impiegati per la batteria in rame.

Caratteristiche	<b>Metallo base</b>	<b>Lega brasante</b>
	<b>Rame Cu-DHP</b>	<b>Rame EN 1044 CP202</b>
Composizione chimica	Rame 99,85 %	Rame 93%
	Fosforo 0,15 %	Fosforo 6,6 ÷ 7,4 %
Temperatura di fusione	1083 °C	Solidus 710 °C
		Liquidus 820 °C
Densità	8.94 g/cm <sup>3</sup>	8.1 g/cm <sup>3</sup>
Carico di rottura	220 N/mm <sup>2</sup>	58 Kg/mm <sup>2</sup>

disossidazione, un tenore di fosforo relativamente alto, compreso tra lo 0,015 e lo 0,04%. La presenza del fosforo permette di eliminare fenomeni di fragilità in ambiente riducente, migliorare la deformabilità plastica a freddo e soprattutto incrementare l'attitudine alla brasatura. Il fosforo, al contrario dell'ossigeno, riduce notevolmente la conduttività elettrica.

La lega, utilizzata come materiale d'apporto, può essere sotto forma di bacchetta od di anello direttamente montato sulla curvetta. In generale, le leghe in rame, contenenti fosforo, sono di costo contenuto e si caratterizzano per non richiedere l'utilizzo di disossidante quando sono usate per brasare rame, come nel caso in esame.

#### 4.1.2 Batterie in alluminio

Il metallo base e la lega brasante impiegati in questo caso sono indicati nella tabella 4.2, con relative temperature di fusione.

Tabella 4.2: Materiali impiegati per la batteria in alluminio.

	<b>Metallo base</b>	<b>Lega brasante</b>
	<b>Alluminio EN AW-3103</b>	<b>Alluminio EN 10204 - AL 104</b>
Temperatura di fusione	Solidus 643 °C	Solidus 575 °C
		Liquidus 585 °C

Si può constatare che le temperature di fusione sono molto inferiori rispetto al rame, oltre che presentare una minima differenza fra il metallo base e il materiale d'apporto. Di questo se ne dovrà tener conto nella scelta della tecnologia di brasatura adatta. Fatta eccezione per quanto riguarda l'apporto di silicio, la composizione di queste leghe in alluminio è molto simile.

La lega EN AW-3103 utilizzata per le curvette, è un **alluminio da estrusione** con buone caratteristiche di resistenza alla corrosione. È utilizzato dove si vuole ridurre la reazione tra il metallo e fluidi o l'atmosfera.

Il metallo d'apporto è utilizzato in bacchetta e presenta uno **strato di disossidante sintetizzato** che serve ad aggredire lo strato di ossido dei tubi, forcine e curvette in alluminio, permettendo la brasatura.

### 4.1.3 Piastra

La piastra contenente i tubi e il pacco alettato può presentare una spalla laterale per eventuali montaggi. Essendo vicina al giunto da saldare, è necessario conoscere le sue caratteristiche per evitare distorsioni o la sua fusione durante la brasatura.



Figura 4.2: Pacco alettato completo di spalla.

Essa è costituita in **alluminio EN AW-3015** con punto di fusione inferiore pari a 643 °C. Essa quindi presenta lo stesso punto di fusione del metallo base per le batteria in alluminio, mentre è molto inferiore rispetto alla batteria con le curvette in rame. Sarà necessario tener conto di queste considerazioni in fase di progetto.

## 4.2 Configurazione del giunto

L'accoppiamento della curvetta sul tubo di testa avviene come raffigurato qualitativamente in figura 4.3.

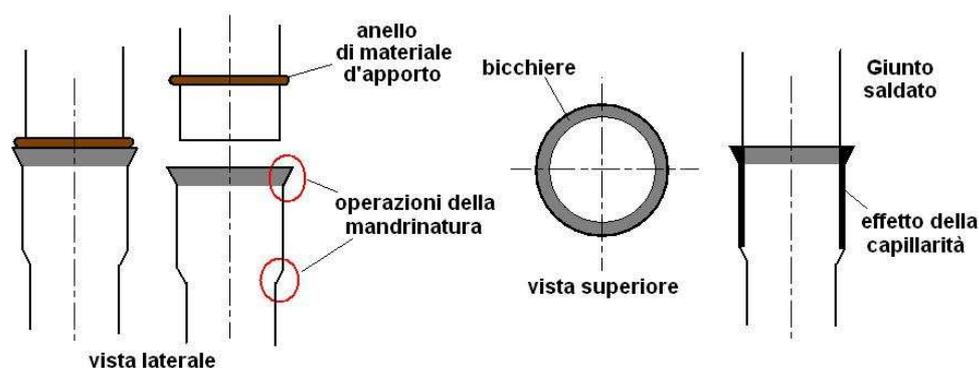


Figura 4.3: Configurazione del giunto: operazione di mandrinatura sul tubo e giunto saldato.

Si rende necessaria sul tubo una **mandrinatura** preventiva per creare un vano sul quale verrà inserita agevolmente la curvetta. Quest'operazione è utilizzata per creare un "bicchiere" con relativa svasatura attorno il giunto da saldare per permettere di raccogliere il metallo fuso attorno al tubo. Il fenomeno di capillarità infatti non avviene istantaneamente e questo accorgimento pratico è necessario affinché il metallo d'apporto allo stato fuso resti in corrispondenza del giunto e non fuoriesca dalla zona da brasare.

## 4.3 Architettura e metodi di brasatura attuali

La linea di produzione di tipo sincrono, è attualmente costituita da un sistema a **nastro trasportatore** che permette l'avanzamento della batteria nelle diverse stazioni di lavoro. La stazione di saldatura detiene un spazio di lavoro limitato in lunghezza, all'interno del quale avverrà la brasatura delle curvette sul pacco alettato.

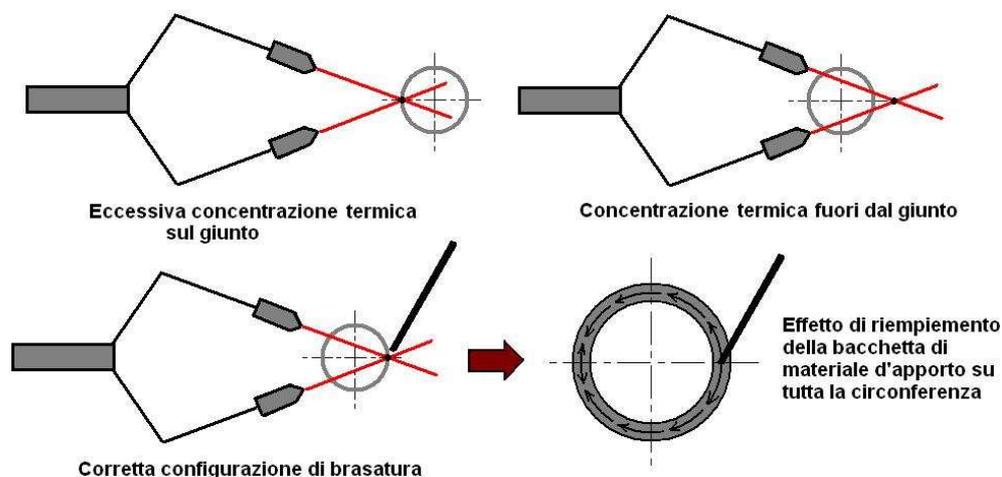
Le attuali tecnologie di brasatura utilizzate sono la brasatura manuale al cannello oppure l'utilizzo di bruciatori per la brasatura automatica delle batterie. I due metodi saranno descritti di seguito.

### 4.3.1 Brasatura al cannello manuale

La brasatura manuale al cannello viene effettuata sia sulle batterie in rame che per quelle in alluminio. Il metallo d'apporto è composto da una **bacchetta rigida** mentre la fiamma è ottenuta utilizzando una miscela di **propano e ossigeno**. L'operatore dovrà portare la fiamma del cannello in corrispondenza del giunto di saldatura, utilizzando una **lancia biforcuta** per saldare in modo omogeneo il giunto e far "girare" il materiale d'apporto nel bicchiere. L'immagine 4.4a mostra un operatore che utilizza queste apparecchiature per la brasature di batterie alettate.



(a) Esempio di brasatura delle curvette con lancia biforcuta.



(b) Configurazioni della lancia per una corretta brasatura.

Figura 4.4: Brasatura al cannello manuale.

I difetti della brasatura con questo sistema possono essere dovuti per lo più a una cattiva preparazione del giunto, oltre che un'utilizzo sbagliato del cannello. La figura 4.4b mostra le configurazioni del cannello per il riscaldamento del giunto. Un'errata configurazione può portare ad un'eccessiva concentrazione di calore che tende a bucare il tubo; per contro una potenza termica fuori dal giunto comporterebbe una presenza disomogenea di materiale d'apporto fuso attorno al giunto creando delle fessurazioni.

Il centro termico delle fiamme dev'essere posizionato sull'estremità opposta del giunto mentre la bacchetta di materiale d'apporto, posizionata in qualsiasi punto del giunto, si fonde e il materiale riempie adeguatamente il bicchiere su tutta la circonferenza creando la saldatura.

La regolazione della fiamma avviene manualmente dall'operatore fino ad ottenere una **fiamma di tipo neutro** con pressioni massime di 5 bar per l'ossigeno e 1 bar per il propano. La fiamma neutra lascia il giunto "pulito", cioè l'effetto chimico sul metallo è neutro. Una fiamma di tipo ossidante tenderebbe a tagliare il giunto oltre ad essere rumorosa; una fiamma carburante impiegnerebbe troppo a riscaldare il giunto, oltre che "sporcare" chimicamente il giunto. Le tre tipologie di fiamma sono facilmente individuate da un'operatore esperto che opera la regolazione manualmente.

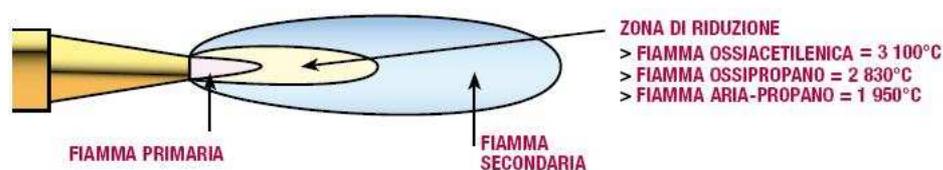


Figura 4.5: Temperature in zona riducente per fiamma neutra.

La figura 4.5 propone un confronto fra le temperature ottenute da una fiamma neutra per diverse tipologie di miscele gassose. A differenza della fiamma ossiacetilenica, la fiamma ossi-propano comporta temperature minori in zona riducente ( $2700 \div 2830$  °C) anche se il potere calorifero è pressoché doppio ( $24000 \text{ cal/m}^3$  contro  $14000$ ) [7]. Il propano fornisce una fiamma "meno calda" rispetto l'acetilene perché quest'ultimo brucia più in fretta rendendo disponibili nell'unità di tempo maggiori calorie. Nella fiamma ossi-propano inoltre il passaggio ad una

fiamma neutra non è altrettanto netto come avviene nell'ossiacetilenica.

Nella linea di produzione sono presenti cinque operatori: **tre saldatori** e due operatori per inserire le curvette e ribatterle con un marruolo.

### 4.3.2 Brasatura automatica con bruciatore

Per maggiori volumi produttivi solitamente si utilizza un metodo automatico di brasatura: questo vale per le sole **batterie alettate in rame**. Il metodo consiste nel far passare il pacco alettato sotto un **bruciatore** che fornisce una serie di fiamme orizzontali sopra lo scambiatore stesso. Il bruciatore può anche essere disposto lateralmente: in questo caso le fiamme riescono a operare la brasatura per una profondità di tre ranghi.



Figura 4.6: Esempi di bruciatori per brasatura automatica di batterie alettate.

A differenza del metodo manuale, il materiale d'apporto è montato preventivamente sulle curvette sotto forma di **anelli**. La miscela utilizzata per le fiamme è formata da **aria compressa e propano**, essendo l'aria compressa più economica e meno pericolosa rispetto alla fiamma manuale che utilizza all'ossigeno, permettendo l'utilizzo di bruciatori meno complessi.

Il riscaldamento progressivo delle batterie comporta un'**omogeneizzazione della temperatura**. Il riverbero del calore scalda tutta la sommità della batteria alettata e non avviene quindi una concentrazione di calore sui singoli giunti come viene fatto con il cannello manuale. Perciò il calore fornito alla batteria sarà maggiore del necessario per rispondere a questa dispersione. Esclusivamente per

questa applicazione inoltre, la struttura portante della batteria (la piastra) sarà costituita da una **lamiera in acciaio zincato**, e non in alluminio, in modo da resistere a questo apporto superiore di calore.

## 4.4 Analisi della procedura

Si propone di utilizzare esattamente l'architettura di tipo transfer per l'avanzamento della batteria alettata. L'analisi riguarda quindi la scelta del metodo di saldatura più opportuno per il montaggio della testa saldante su **robot cartesiano a portale** con 4 assi di movimento, come indicato nello schema di figura 4.7.

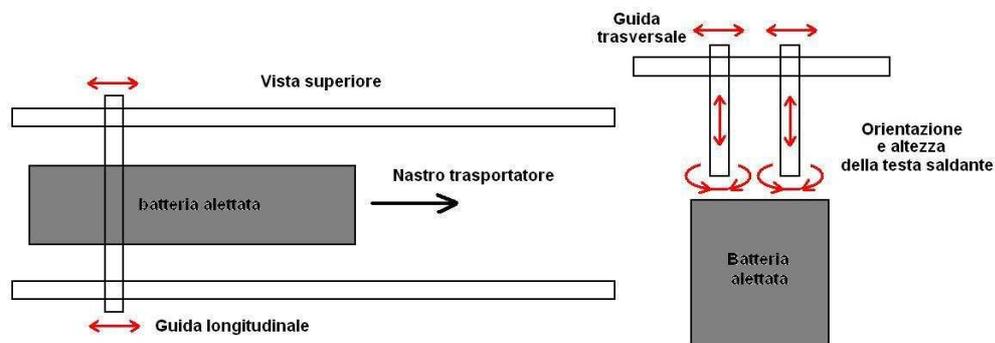


Figura 4.7: Schema di impianto automatizzato con robot cartesiano a portale.

La scelta di tale architettura è dovuta alla flessibilità richiesta nella realizzazione delle batterie le quali hanno diverse dimensioni e conformazioni del pacco alettato. Inoltre in questo modo sono premesse una certa rapidità e ripetibilità, ottenuto con un sistema di movimentazione semplice e relativamente economico. Si potrebbe anche utilizzare un robot antropomorfo, il quale tuttavia presenta costi maggiori e un sistema di movimentazione inultimente complesso a parità di flessibilità richiesta.

L'impianto inoltre dovrà presentare due teste saldanti che potranno essere implementate sulla stessa guida trasversale, come in figura, oppure su due diverse guide longitudinali. La scelta di due teste saldanti si rende necessaria per poter rimanere entro i valori di tempo imposti dalle linee.

La struttura dovrà eventualmente prevedere un sistema di riconoscimento della posizione e orientazione delle singole curvette, mediante sistema di visione, così

#### 1124. UN CASO STUDIO: BRASATURA AUTOMATICA DI BATTERIE ALETTATE

da poter posizionare ed orientare correttamente la testa di saldatura, oltre che seguire percorsi ottimali che minimizzino il tempo ciclo complessivo.

La tecnologia di brasatura da adottare dovrà essere scelta prendendo in considerazione principalmente due criteri di valutazione:

- **Tempi di brasatura:** competitivi, se non migliori delle tecnologie di brasatura utilizzate attualmente;
- **Affidabilità della brasatura:** possibilità di brasare automaticamente anche le batterie in alluminio;

La tabella 4.3 raccoglie i tempi per effettuare la brasatura di una curvetta (doppio giunto) di diametro 3/8" e passo 25 mm, rilevati presso linee di brasatura che utilizzano la tecnica manuale al cannello.

Tabella 4.3: Tempi di realizzazione per brasatura di una curvetta 3/8" p25 mm, in rame e alluminio, utilizzando il cannello manuale.

	Rame - Rame	Alluminio - Alluminio
Cannello manuale	6 sec	9 sec

Il tempo totale di ciclo impiegato per la brasatura di una batteria con metodo manuale è dato dal tempo per singola curvetta moltiplicato per il numero totale di curvette presenti nel pacco alettato:

$$t_{\text{ciclo}} = t_{\text{curvetta}} \times N_{\text{curvette}}$$

Ipotizzando che una batteria alettata contenga in media 40 curvette, un unico saldatore impiegerebbe 4 minuti per effettuare la brasatura di un'intera batteria in rame: troppo per la produzione in linea. Il numero adeguato di saldatori è dato da:

$$N_{\text{operatori}} = \frac{t_{\text{ciclo}}}{t_{\text{linea}}}$$

Se si considera un tempo di linea pari a 90 secondi, verosimile per un'applicazione di questo genere, sarebbero necessari 3 saldatori per bilanciare la linea: è esattamente quello che accade.

Il tempo di brasatura del bruciatore è legato alla velocità di avanzamento della batteria sul nastro trasportatore, oltre che alle caratteristiche dimensionali delle attrezzature.

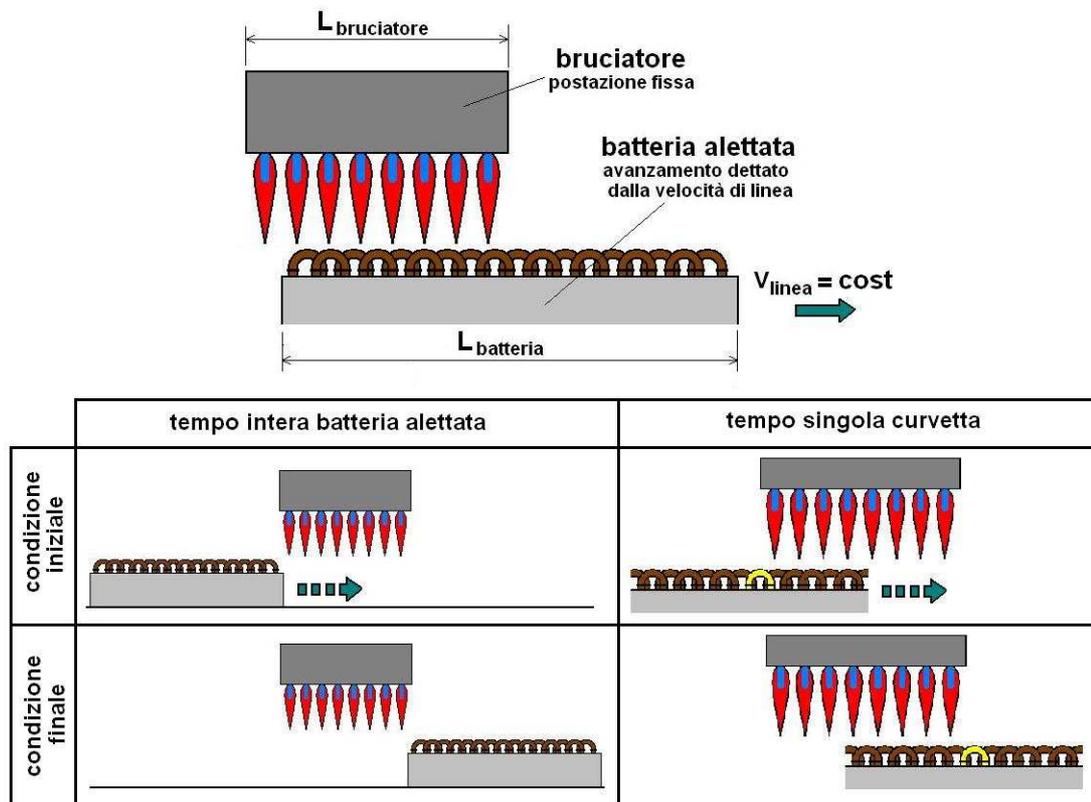


Figura 4.8: Caratteristiche dimensionali e tempi di brasatura per un sistema automatizzato con bruciatore.

Il calcolo del tempo di brasatura con bruciatore, che lega queste variabili, è dato dalla seguente legge:

$$t_{\text{batteria}} = \frac{L_{\text{bruciatore}}}{V_{\text{linea}}} + \frac{L_{\text{batteria}}}{V_{\text{linea}}}$$

Il primo termine additivo corrisponde al tempo necessario alla brasatura di una singola curvatura.

Considerando una batteria lunga 400 mm ed un bruciatore pari a 300 mm di

lunghezza, se la velocità di avanzamento della linea fosse di 100 mm/s, il tempo impiegato per la produzione di una singola curvetta sarebbe pari a 30 s: corrisponde ad un tempo mascherato, non confrontabile con i 6 s forniti nel caso manuale.

Per contro, la brasatura completa di una batteria sarebbe pari a 70 s. Questo tempo è inferiore del tempo di linea ipotizzato precedentemente per il caso manuale (90 s). Va osservato che il tempo di brasatura del bruciatore dipende soprattutto dal **bilanciamento della linea**. Infatti, è necessario non creare colli di bottiglia a valle della linea, nella quale si dovrà provvedere alla saldatura manuale del collettore sulla batteria alettata, che richiede un tempo di realizzazione che eccede quello della linea. Se viene bloccata la linea di produzione quindi, al tempo di esecuzione della batteria andrebbe sommato anche il tempo di fermo-produzione che dovrebbe essere opportunamente stimato.

Fatte queste considerazioni iniziali, le tecnologie alternative che vengono analizzare di seguito sono la brasatura a resistenza e la brasatura per induzione.

#### 4.4.1 Brasatura per Resistenza Elettrica

In linea teorica, questo metodo di brasatura può fornire un alto tasso di produzione attraverso un riscaldamento localizzato, controllato e veloce.

Per la sua realizzazione, ogni giunto da brasare dovrà provvedere un anello d'apporto, mentre una coppia di elettrodi saranno posti a contatto fra le due estremità del giunto formando quello che sarà un circuito elettrico.

Il riscaldamento del giunto e la fusione del metallo d'apporto sono ottenuti attraverso il verificarsi simultaneo di due condizioni nella zona da brasare:

- **Resistenza di contatto:** con il passaggio di corrente elettrica di conduzione si ottiene il riscaldamento per effetto joule;
- **Conduttività termica:** si sfrutta il calore prodotto dagli elettrodi.

Gli elettrodi dovranno essere costituiti da un materiale di *resistenza elettrica elevata e buona tenuta meccanica* alle alte temperature. La soluzione più utilizzata riguarda **elettrodi in carbonio grafitico**, che possono presentarsi con diverse

caratteristiche di resistività e conducibilità elettrica.

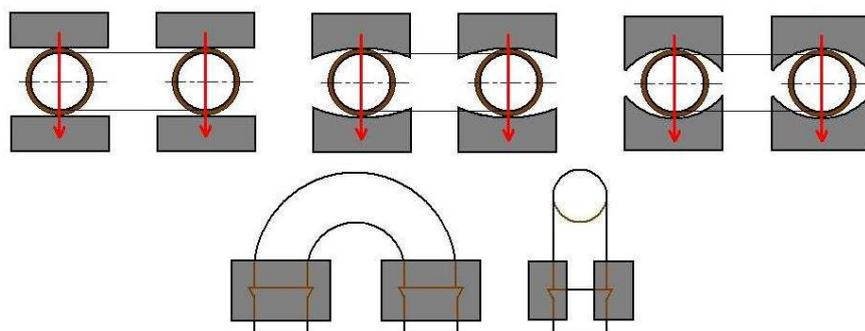
A tal proposito è stata ricercata un'azienda che potesse fornire questo tipo di materiale: **ATAL srl** (Trezzo sull'Adda - MI). La disponibilità del materiale riguarda:

- **Diverse composizioni:** % di carbone, % di grafite, resistività e conducibilità elettriche desiderate;
- **Conformazione elettrodi:** qualsiasi grandezza della piastra eventualmente da sagomare, oppure con possibilità di acquisire semilavorati con qualsiasi forma (previo progetto);

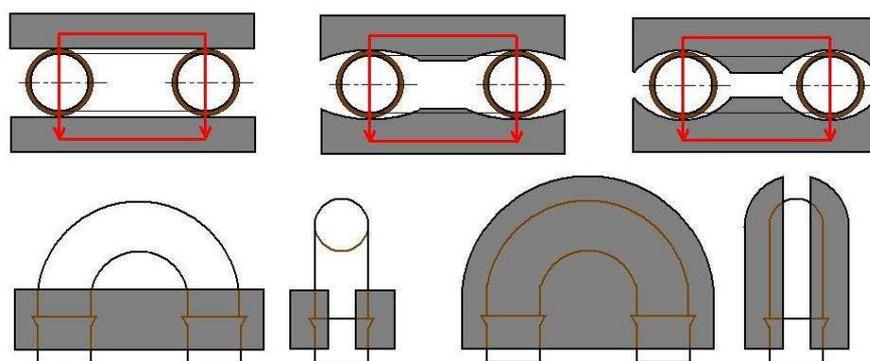
I parametri di un'operazione di brasatura per resistenza dipenderanno anche dalle proprietà elettro-chimiche dell'elettrodo in carbonio e riguardano, come per la saldatura elettrica per punti, l'intensità di corrente elettrica, il tempo di riscaldamento e la pressione degli elettrodi.

Tuttavia, l'aspetto primario sul quale focalizzare l'attenzione riguarda la conformazione degli elettrodi che dovranno ricoprire in maniera adeguata il giunto da brasare. La figura 4.9 presenta delle ipotetiche conformazioni degli elettrodi per la brasatura della curvetta.

La forma dell'elettrodo potrebbe presentare un diverso grado di avvolgimento sulla curvetta, utilizzando due coppie di elettrodi per ogni giunto, oppure una coppia di elettrodi per una singola curvetta. Sarebbe opportuno effettuare delle prove sperimentali per verificare la conducibilità elettrica sul giunto per un elettrodo piatto, quindi semplice da realizzare, e per un elettrodo con un lato concavo che racchiuda meglio la curvetta. Una seconda analisi deve risolvere il problema di dimensionamento degli elettrodi, che dovranno essere commisurati per permettere la loro apertura/chiusura sulla curvetta. Essi dovranno essere sufficientemente grandi per resistere alle elevate correnti di conduzione. L'elettrodo inoltre dovrà essere fissato con un conduttore, per esempio in rame, che conduca la corrente al suo interno. Infine c'è da considerare l'usura e la distorsione degli elettrodi al carbone, che sono sottoposti ad un continuo sforzo elettro-meccanico, da verificare anch'esso sperimentalmente.



(a) Coppia di elettrodi per ogni giunto.



(b) Coppia di elettrodi per curvatura (doppio giunto), con configurazione avvolgente.

Figura 4.9: Possibili conformazioni degli elettrodi in carbonio grafitico utilizzabili nella brasatura per resistenza, in base al grado di avvolgimento sulle curvette.

#### 4.4.2 Brasatura ad Induzione

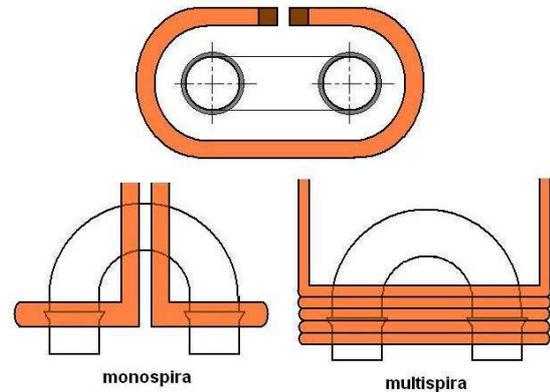
Con questo procedimento il calore è ottenuto per effetto Joule conseguente dalle correnti elettriche alternate indotte nelle parti da brasare mediante una bobina. Il materiale d'apporto viene posto tra i giunti da collegare sottoforma di anelli premontati sulle curvette.

La bobina induttrice, la cui geometria definisce le linee del campo elettromagnetico nella curvatura, è generalmente ottenuta da un tubo di rame elettrolitico, di forma circolare e diametro 3-5 mm, nel quale passa l'acqua di raffreddamento. La figura 4.10 rappresenta le possibili configurazioni dell'induttore e il suo utilizzo per la brasatura delle curvette.

La dimensione e la forma dell'induttore, con spira singola o multipla, deve racchiudere ad una distanza costante l'intera curvatura. Con una buona progettazione



(a) Esempio di brasatura ad induzione.



(b) Tipologie di bobina possibili: monospira o multispira.

Figura 4.10: Possibili conformazioni dell'induttore per la brasatura ad induzione delle curvette sul pacco alettato.

dell'induttore, si può ottenere un idoneo profilo di riscaldamento e massimizzare l'efficienza del generatore di frequenza, senza rendere difficoltoso l'inserimento e la rimozione della bobina. In generale, più l'induttore è vicino ai giunti, più corrente passa nella curvatura, e di conseguenza più calore viene prodotto.

Esiste una relazione tra la frequenza della corrente alternata e la sua **profondità di penetrazione** nel materiale: il cosiddetto effetto pelle. Le basse frequenze, da 5 a 30 kHz, sono adatte a materiali più spessi che richiedono una penetrazione profonda del calore, mentre frequenze più alte, da 100 a 400 kHz, sono adatte a parti piccole o a riscaldamenti superficiali. Più alta è la frequenza più alto è il calore prodotto.

In definitiva, sono parecchie le variabili che devono essere considerate per determinare la quantità di energia necessaria: la temperatura che deve essere raggiunta, la massa, il calore specifico e le proprietà elettriche del pezzo da riscaldare, l'efficienza di accoppiamento induttore-curvetta utilizzato.

## 4.5 Risultati ottenuti

Le caratteristiche che accomunano le due tecnologie di brasatura analizzate comprendono un riscaldamento localizzato ed il controllo preciso della temperatura

di brasatura. Entrambe sono quindi adatte per la **produzione automatizzata delle batterie in alluminio**.

La brasatura ad induzione, tuttavia consente altri vantaggi rispetto alla brasatura per resistenza con elettrodi in carbone grafiteo, quali:

- Conformazione semplice dell'induttore;
- Usura limitata delle attrezzature per alti volumi di produzione;
- Stazione multi-brasatura per un'unica sorgente di alimentazione.

Le considerazioni fatte per la brasatura a resistenza, riguardanti la conformazione degli elettrodi, consentono di dire che, nonostante le ipotetiche capacità brasanti, la tecnologia è di difficile attuazione per l'applicazione sul pacco alettato e sarebbe giustificata solo nel caso in cui tempi di brasatura, da verificare sperimentalmente, siano notevolmente contenuti e la deformazione meccanica abbinata all'usura degli elettrodi risulti limitata.

Per quanto riguarda i tempi di brasatura, sono state effettuate delle prove pratiche per la **brasatura ad induzione** per curvetta rame-rame 3/8" p25 mm, ottenendo indicativamente:

- Tempo di brasatura di **6 secondi**, sul quale aggiungere l'eventuale tempo di movimentazione;
- Spesa di 7,5 kW di potenza per curvetta;

Il tempo ottenuto è paragonabile con le tecniche di brasatura attualmente usate (vedi tabella 4.3 a pagina 4.3). Tuttavia, anche se il bruciatore permette tempi di produzione più ridotti, esso non può saldare le curvette in alluminio, a differenza della brasatura per induzione, che può essere implementata in un impianto automatizzato per brasare questo tipo di materiale. Inoltre il riscaldamento senza contatto e privo di fiamma riduce al minimo lo spreco di energia indirizzandola esclusivamente nella zona da brasare.

Un generatore, in grado di produrre una potenza di 10 kW, può essere adatto per l'applicazione. Un esempio è mostrato in figura 4.11: esso presenta dimensioni



Potenza (kW) 10.0  
Frequenza (kHz) 150-400  
Tensione linea CA (V~) 87-264/370-520, 3p  
Potenza di linea CA (kVA) 12.4

Figura 4.11: Caratteristiche tecniche di un generatore adeguato per brasatura ad induzione delle curvette (fonte Ambrell).

modeste, e permette la regolazione delle frequenze di lavoro entro un campo compreso da 150 a 400 kHz.

I metodi analizzati inoltre considerano una sistema di brasatura per singola curvetta. Un sistema che produca una **brasatura multi-curvetta** deve invece tener in considerazione il controllo preciso del riscaldamento di più giunti da brasare permettendo di raggiungere le corrette temperature, in particolare per saldare le batterie alettate con tubi in alluminio. Un impianto che permetta la brasatura contemporanea di più curvette può essere dotato di più robot in linea, oppure di un robot con teste saldanti multiple.



# Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata analizzata la saldatura, sia come processo di giunzione, sia come processo tecnologico all'interno della realtà industriale.

Le generalità di tale processo e le diverse tecnologie, sono il risultato di una ricerca su libri di testo e articoli scientifici di recente pubblicazione. In particolare è stata fornito lo schema AWS per classificare le tecnologie di saldatura. Questa scelta si è rilevata particolarmente onerosa nello descrivere attrezzature utilizzate, campi d'impiego, materiali, limiti, vantaggi, grado di automazione, per ogni processo di saldatura.

L'automazione della saldatura ha richiesto conoscenze proprie dell'ingegneria industriale, quali meccanismi e sistemi robotizzati. È stata proposta una classificazione di impianti automatizzati per la saldatura, composta da macchine automatiche e celle robotizzate. Per entrambe le tipologie, sono stati analizzati i campi di applicazione, oltre che l'identificazione e descrizione dei sottosistemi che li costituiscono.

Considerando i vasti campi applicativi, le molteplicità delle tecnologie di saldatura, oltre che ad un'analisi di dati statistici, si è constatato che la saldatura riveste una notevole importanza nei processi di fabbricazione. La saldatura è infatti il secondo campo applicativo nei sistemi robotizzati, dopo la manipolazione.

Infine, in base alle conoscenze acquisite, si è proposto un metodo di saldatura per un sistema robotizzato di fabbricazione di batterie alettate.

Gli sviluppi per questo lavoro di tesi potrebbero riguardare un'analisi più approfondita degli aspetti pratici della saldatura. Toccare con mano, risolvere, o solamente vedere, problemi pratici sarebbe il miglior modo per assimilare questo

settore che riguarda molti aspetti pratici. La deduzione di alcune caratteristiche riguardanti la saldatura non sono facilmente individuabili dalla letteratura disponibile, oppure vengono poco considerate quando si effettua solo uno studio astratto.

# Glossario

- **BAGNO DI FUSIONE** - *Puddle - Weld pool*

Quella parte di metallo che si trova durante la saldatura allo stato liquido.

- **CIANFRINATURA** - *chamfering*

Oltre un certo spessore dei lembi diviene necessario preparare fra i lembi da unire un vano (smusso o cianfrino) di forma opportuna, entro il quale si possono depositare più cordoni in passate successive.

- **CORDONE** - *Weld bead*

È il risultato della deposizione di un passata di saldatura (vedi passata).

- **FLESSIBILITA'** - *Flexibility*

Nella saldatura automatica flessibile l'obiettivo è quello di poter adeguare facilmente il sistema per renderlo in grado di elaborare efficacemente diverse giunzioni e la possibilità di adottare un maggior numero di tecniche di saldature automatiche. Tuttavia, il prezzo di questa flessibilità è un più elevato costo del sistema e una minore produttività, a causa dell'introduzione delle operazioni di saldatura cosiddetta di transizione.

- **METALLO BASE** - *Base Metal*

Rappresenta il metallo di lavoro dei pezzi da saldare.

- **METALLO D'APPORTO** - *Filler Metal*

Nuovo materiale metallico che (eventualmente) viene aggiunto, attraverso fusione, tra i pezzi da collegare; può essere uguale oppure diverso dal metallo base.

- **sistema MONOFASE** - *Single-Phase*  
è la nota distribuzione per usi domestici perché questo tipo di utenza è prevalentemente destinata all'illuminazione e ad altri utilizzi in cui una singola fase è sufficiente. Non si ha a che fare con grosse macchine rotanti come avviene nelle industrie, inoltre la potenza installata è modesta, limitata a pochi chilowatt.
  
- **PASSATA** - *pass*  
É la traslazione dell'operazione di saldatura lungo il giunto (sinonimo di cordone).
  
- **RADDRIZZATORE (o RETTIFICATORE)** - *Rectifier*  
Dispositivo che serve per raddrizzare un segnale bipolare (bidirezionale), e quindi a trasformarlo in un segnale unipolare (monodirezionale). Il raddrizzatore, collegato ad altri componenti, è usato per trasformare la corrente alternata in corrente continua.
  
- **TIRISTORE (o SCR)** - *Silicon Controlled Rectifier*  
Dal punto di vista elettrico è pressoché equivalente al diodo con la sola differenza che la conduzione diretta avviene solamente in seguito all'applicazione di un opportuno segnale di innesco su un terzo terminale denominato gate.
  
- **TRASFORMATORE** - *Transformer*  
è una macchina elettrica statica (perché non contiene parti in movimento). Con riferimento alla figura 4.12, il trasformatore consente di variare i parametri di tensione e corrente in ingresso rispetto a quelli in uscita, pur mantenendo costante la quantità di potenza elettrica apparente (a meno delle perdite per effetto dell'isteresi e delle correnti parassite). Il trasformatore è una macchina in grado di operare solo in corrente alternata, perché sfrutta i principi dell'elettromagnetismo legati ai flussi variabili.
  
- **sistema TRIFASE** - *Three-Phase System*  
si intende un particolare sistema di produzione, distribuzione e utilizzazione

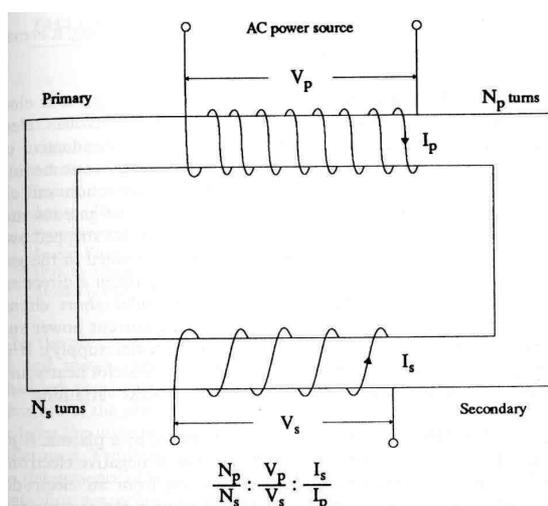


Figura 4.12: Principio di funzionamento di un trasformatore, mostrando la relazione tra primario e secondario

dell'energia elettrica basato su tre tensioni elettriche alternate aventi la stessa frequenza (isofrequenziali) e la stessa differenza di fase. La grande importanza del sistema trifase è dovuta a tre fondamentali vantaggi: creare facilmente un campo magnetico rotante (momento di rotazione); ottimizzazione dei conduttori; minori perdite di trasporto dell'energia elettrica (cavi alta tensione).



# Bibliografia

- [1] Robert W. Messler, Jr., *PRINCIPLE OF WELDING - Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY: John Wiley & Sons, inc., 1999.
- [2] UCIMU - SISTEMI PER PRODURRE, “Il settore della robotica in italia 2009,” *Fatti & Tendenze - Economia*, 2010, <http://www.ucimu.it/ucimu/ita/index.cfm?id=392>.
- [3] ANASTA, “Rilevazioni ANASTA del mercato SALDATURA & TAGLIO,” 2009, [http://www.anasta.it/Comunicazioni\\_Di\\_Settoare/Rilevazioni](http://www.anasta.it/Comunicazioni_Di_Settoare/Rilevazioni).
- [4] Kalpakjian Serope, Schmid Steven R., *MANUFACTURING PROCESSES for engineering materials - 5th ed.*, Prentice Hall, Ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2008.
- [5] Norrish John, *Advanced Welding Process - New manufacturing processes and materials series*, John Wood and Diran Apelian, Ed. Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia and New York: IOP Publishing Ltd, 1992.
- [6] Legnani Giovanni, *ROBOTICA INDUSTRIALE*, Casa ed. Ambrosiana, Ed., 2003.
- [7] Vallini Antonio, *La saldatura e i suoi problemi*, Del Bianco, Ed., 1981, vol. 1. I procedimenti e la tecnica esecutiva.
- [8] G. Grosso, *Corso di tecnologia meccanica, TOMO 1*, ch. 13.
- [9] Haynes Tom, *Basic Welding*, Canada, 1987.

- [10] Assembly Magazine, "The Pros and Cons of Automated Welding,"  
<http://www.assemblymag.com/Articles>.

## Aziende di produttori

- **T.S.R. COSTRUZIONE MACCHINE SPECIALI**

Via Tesina, 7  
35035 MESTRINO  
PADOVA - ITALIA  
<http://www.tsritalia.it>

- **Sierra S.p.a** - tutte le soluzioni per lo scambio termico

Isola della Scala (VR)  
<http://www.sierra.it/>

- **ATAL srl** - progettare e lavorare la grafite

Trezzo sull'Adda (MI)  
<http://www.atalgrafiti.com/>

- **ETA Technology Pvt. Ltd.**

– Specialized in design and manufacture of Friction Welding Machines  
Bangalore. 560 058, India  
<http://www.eta-technology.in>

- **Manufacturing Technology, Inc.**

– Solid-State joining & Welding solution, Equipement & Solution  
Kingswinford (England) e Nasik (India)  
<http://www.mtiwelding.com>

- **Sirius Electric** – Plastic Welding Systems

Vigevano (PV)  
<http://www.siriuselectric.it>

- **E.M.E. Commerciale Srl**

Montegrotto Terme (PD)  
<http://www.eme-weld.it>

- **EMAG Laser Tec**  
Heubach (Deutschland)  
<http://www.emag.com>
- **GULLCO International Limited**  
– Welding Carriages, Cutting Carriages and Beveling Machines for Automated Welding Cutting  
Ontario (Canada)  
<http://www.gullco.com>
- **Panasonic**  
[http://industrial.panasonic.com/ww/index\\_e.html](http://industrial.panasonic.com/ww/index_e.html)
- **KUKA Robotics**  
<http://www.kuka-robotics.com/italy/it/>
- **AIR LIQUID welding**  
<http://www.fro.it/file/otherelement/pj/catalogo%20automazione%2012210.pdf>
- **Lincoln electronic**  
<http://www.lincolnelectric.com/>
- **COM.IT** - machinery engineering know how for wire and mesh industry  
Monte San Pietro (Bologna)  
<http://www.comitengineering.it/index.php>
- **DELTACOILS** - scambiatori di calore  
<http://www.deltacoils.it/ITA/home.htm>
- **Ambrell** - Riscaldamento ad induzione di precisione  
<http://it.ambrell.com/index.html>