

Politecnico di Torino

Facoltà di ingegneria

Corso di laurea magistrale in ingegneria meccanica

Indirizzo Automazione



**Politecnico
di Torino**

**Monitoraggio e ottimizzazione delle
performance di una macchina
saldatrice robotizzata**

Relatore

Prof. Graziano Ubertalli

Candidato

Alessandro Camperi

Tutor aziendale

Ing. Alessandro Macario

Anno accademico 2022/2023

Sommario

1. Introduzione	3
1.1. Prodotto dell'azienda	3
1.1.1. Manitowoc	4
1.1.2. Grove	4
1.1.3. Potain	5
1.1.4. National Crane	6
1.1.5. Shuttlelift	6
2. Saldatura	7
2.1. Evoluzione storica	8
2.2. Tecnologie di saldatura	9
2.2.1. Ossiacetilenica	10
2.2.2. Ad arco elettrico	12
2.2.2.1. Elettrodo rivestito (MMA – SMAW)	13
2.2.2.2. Arco sommerso (SAW)	17
2.2.2.3. TIG	19
2.2.2.4. MIG/MAG	20
2.2.3. Laser	22
2.2.4. A resistenza	23
2.2.5. Allo stato solido	24
2.2.5.1. Forge Welding	24
2.2.5.2. Roll Welding	24
2.2.5.3. Friction Welding	25
2.2.5.4. Friction Stir Welding	26
2.2.5.5. Explosion Welding	26
2.3. Saldabilità degli acciai	27
2.3.1. Acciai a basso tenore di carbonio	28
2.3.2. Acciai microlegati	29
2.3.2.1. Acciai utilizzati in Manitowoc	31
2.4. Difetti di saldatura	33
2.4.1. Cricche	34
2.4.1.1. A freddo	34
2.4.1.2. A caldo	35
2.4.2. Inclusioni	36
2.4.2.1. Solide	36

2.4.2.2.	Gassose	36
2.4.3.	Mancanza di fusione o di penetrazione	37
2.4.4.	Incollature	38
2.4.5.	Forma e dimensione	38
3.	Robot	39
3.1.	Elementi costitutivi.....	40
3.1.1.	Struttura meccanica	40
3.1.1.1.	Cartesiana	40
3.1.1.2.	Cilindrica.....	42
3.1.1.3.	Sferica.....	43
3.1.1.4.	Antropomorfa	44
3.1.1.5.	SCARA	46
3.1.2.	Polso, mano e organi di presa.....	47
3.1.3.	Sistema di azionamento	48
3.1.4.	Unità di governo	49
3.1.5.	Sensori	50
3.2.	Caratteristiche	51
3.3.	Co-bot	53
3.4.	Robot per saldatura utilizzati in Manitowoc	56
3.4.1.	Caratteristiche tecniche	57
3.4.1.1.	Robot 1 e 2.....	59
3.4.1.2.	Robot 3 e 4.....	62
3.4.2.	Pulsantiera di programmazione.....	65
3.4.3.	Armadio di comando.....	69
4.	Gestione, analisi e ottimizzazione.....	73
4.1.	Manitowoc web app e Manitowoc app	73
4.2.	Monitoraggio delle performance dei robot	80
4.2.1.	Analisi dati	81
4.2.2.	Confronto tra modalità manuale/automatico	83
4.3.	Ottimizzazione robot 3	89
5.	Conclusioni.....	101
	Bibliografia e sitografia	102

1. Introduzione

L'obiettivo della seguente trattazione consiste nel monitoraggio e perfezionamento del processo di saldatura robotizzata, eseguita da robot antropomorfi per la realizzazione di basamenti e travi stabilizzatori, componenti fondamentali per la fabbricazione di gru.

Al fine di poter rendere più chiara e fruibile l'analisi, verrà definito il concetto di saldatura e delineata la distinzione esistente tra le varie tecnologie di saldatura impiegate. Saranno oggetto di analisi diverse tipologie di acciai, con l'obiettivo di valutarne l'effettiva saldabilità. Inoltre, sarà approfondito il tema legato ai difetti che possono svilupparsi ed interessare il giunto di saldatura.

A seguire, verranno descritti i "robot" e gli elementi costitutivi che li compongono, ossia la struttura meccanica, i sistemi di azionamento e controllo, i sensori impiegati. Per confronto, sarà condotta una breve panoramica sui co-bot, i robot collaborativi concepiti per interagire fisicamente con l'uomo all'interno di un definito spazio di lavoro. In tale scenario, saranno presentati i robot per saldatura utilizzati in Manitowoc, con approfondimento relativo alle caratteristiche tecniche che li contraddistinguono, alla pulsantiera di programmazione di cui sono dotati e ai dispositivi di sicurezza situati all'interno degli armadi di comando.

Successivamente, si procederà con l'analisi e la presentazione della sperimentazione condotta, al fine di stabilire se sia produttivamente ed economicamente più conveniente far lavorare i robot in modalità "manuale" piuttosto che "automatica" ed implementando uno studio volto ad ottimizzare la produttività quotidiana di un particolare robot, identificato in stabilimento con il numero tre.

La tesi si concluderà illustrando i miglioramenti apportati, che si riflettono in termini di incremento di produttività, mostrando gli ulteriori margini di perfezionamento che sarà possibile perseguire con studi futuri.

1.1. Prodotto dell'azienda

Il presente elaborato è il prodotto dello studio condotto presso Manitowoc Crane Group Italy, un'azienda stabilita nel comune di Niella Tanaro (CN). Si tratta di uno degli otto siti produttivi di The Manitowoc Company, fondata nel 1902 da Charles West ed Elias Gunnell nel Wisconsin, USA. È considerata la più rinomata azienda produttrice di gru cingolate al mondo e realizza cinque differenti marchi di gru: Manitowoc, Grove, Potain, National Crane e Shuttlelift. [1]

Nel seguito, verrà posta maggiore attenzione nei confronti dei prodotti realizzati all'interno dello stabilimento di Niella Tanaro, ossia le gru fuoristrada a marchio Grove e le gru a torre automontanti a marchio Potain.

1.1.1. Manitowoc

Il marchio Manitowoc è riconosciuto come il più grande produttore di gru cingolate al mondo. La peculiarità risiede nella continua ricerca volta ad innovare tecnologicamente il prodotto, migliorando il trasporto, i diagrammi di carico, facilitando il montaggio e incrementandone l'efficienza.

- Gru cingolate con braccio a traliccio: la linea include sedici differenti prodotti e due attrezzature per il potenziamento della capacità. Le proprietà principali comprendono innovazione e velocità, che consentono grande adattabilità durante l'utilizzo in cantiere.

1.1.2. Grove

Il marchio Grove è identificato come il leader mondiale nella produzione di gru mobili e gode di un'ottima reputazione dal punto di vista dell'affidabilità e della qualità, grazie a procedure di collaudo meticolose. Le gru mobili così realizzate si dividono in: tuttoterreno, fuoristrada, autocarrate, a ponte e cingolate telescopiche.

- Gru tuttoterreno: sono sottoposte a processi di ottimizzazione continui, al fine di assicurare una crescente affidabilità e durata. Inoltre, garantiscono importanti prestazioni in termini di sollevamento, mobilità fuoristrada e in autostrada;
- Gru fuoristrada: sono progettate per poter performare anche in cantieri con condizioni di lavoro poco agevoli. Si distinguono principalmente in termini di prestazioni, affidabilità, produttività e comfort dell'operatore. In aggiunta, sono dotate di caratteristiche singolari, come i martinetti a stabilizzatori invertiti, i freni a disco idraulici ed il sistema di controllo che, impostato in modalità ECO, consente di ridurre gli interventi necessari di manutenzione, abbattendo i costi operativi.



Figura 1 - Gru fuoristrada RT530E-2

Le caratteristiche tecniche sono riportate in seguito:

- Portata massima: 30 ÷ 150 t;
- Peso lordo totale del veicolo: 27555 ÷ 86550 kg;
- Lunghezza del braccio principale: 8,8 ÷ 62,5 m;
- Altezza massima in punta: 44,5 ÷ 91,1 m.

- Gru autocarrate: sono dotate di un lungo sbraccio, possono spostarsi rapidamente in autostrada ed essere allestite velocemente;
- Gru a ponte: si tratta di gru industriali di facile utilizzo, dotate di piattaforme di trasporto e sterzo multimodale che ne permettono l'impiego in spazi ristretti. Grazie a dimensioni compatte, ottima manovrabilità e capacità di presa e trasporto, sono ideali per la movimentazione di materiale o per svolgere operazioni di manutenzione degli impianti;

- Gru cingolate telescopiche: sono in grado di superare pendenze considerevoli garantendo all'operatore buona manovrabilità, capacità di sollevamento, presa e trasporto. Inoltre, i robusti cingoli ed il braccio telescopico assicurano un'ottimale ergonomia che consente l'impiego anche in situazioni piuttosto onerose.

1.1.3. Potain

Il marchio Potain è leader mondiale nella produzione di gru a torre e automontanti. Le gru a rotazione alta sono utilizzate per lavori infrastrutturali, le automontanti Hup per l'edilizia residenziale, mentre le gru a braccio impennabile sono impiegate nella costruzione di grattacieli. Si tratta di gru molto diffuse ed i meriti sono da attribuire principalmente alla facilità di trasporto, montaggio e utilizzo. Ulteriori punti di forza sono l'affidabilità, la capacità di sollevamento ed il design innovativo.

- Gru a rotazione alta: si dividono in gru toplless, a braccio impennabile o a testa di martello e sono personalizzabili a seconda delle esigenze. Permettono un'ampia movimentazione di carichi per la realizzazione di grandi infrastrutture, in vasti cantieri aperti o con molti piani;
- Gru automontanti: essendo semplici da montare, smontare e movimentare sono le più idonee all'utilizzo in cantieri di dimensioni contenute. Racchiudono una vasta gamma di prodotti, denominati Hup, Hup M, Igo, Igo M e Igo T.

Nelle figure sottostanti vengono presentati i modelli sui quali è incentrata l'analisi condotta nell'elaborato, ossia Hup M 28-22, Hup 32-27 e Hup 40-30:



Figura 2 - Gru automontante Hup M 28-22

Caratteristiche tecniche Hup M 28-22:

- Portata massima: 2,2t;
- Raggio massimo: 28m;
- Portata massima in punta: 0,7 ÷ 0,85 m;
- Altezza gancio per base: 19,6m.



Figura 3 - Gru automontante Hup 32-27

Caratteristiche tecniche Hup 32-27:

- Portata massima: 4t;
- Raggio massimo: 32m;
- Portata massima in punta: 1t;
- Altezza gancio per base: 27m.



Figura 4 - Gru automontante Hup 40-30

Caratteristiche tecniche Hup 40-30:

- Portata massima: 4t;
- Raggio massimo: 40m;
- Portata massima in punta: 1t;
- Altezza gancio per base: 30m.

1.1.4. National Crane

National Crane definisce lo standard mondiale per le gru idrauliche montate su autocarro, dotate di uno sbraccio ottimale, telaio compatto e sistemi di stabilizzazione avanzati. L'unione di tutte queste componenti favorisce un'elevata efficienza durante le fasi di montaggio e smontaggio. Le due classi di gru su autocarro si differenziano in base alla tipologia di braccio, che può essere verticale oppure oscillante.

- Autocarri con braccio verticale: sono disponibili in 8 differenti versioni, con portate massime che variano da 9,1t a 29,9t e sbracci verticali massimi da 17m a 50,9m;
- Autocarri con braccio oscillante: a differenza dei precedenti, sono dotati di una cabina chiusa, dettaglio non di poco conto in termini di comodità dell'operatore. I 14 diversi modelli sono caratterizzati da portate massime comprese tra 27,2t e 54,4t e sbraccio verticale massimo da 49,7m a 62,9m.

1.1.5. Shuttlelift

Le gru Shuttlelift sono caratterizzate da un design compatto e godono di grande versatilità e durabilità. Sono facilmente manovrabili e gli ampi piani di carico consentono di movimentare semplicemente varie tipologie di materiali. Inoltre, le ottime capacità di pick-and-carry e lo sterzo multimodale fanno delle gru Shuttlelift le più utilizzate tra le gru industriali compatte per interventi di manutenzione.

- Shuttlelift Carrydeck gru: sono ideali per cantieri sia interni che esterni poiché manovrabili con estrema semplicità. Vengono impiegate per movimentare materiali servendosi di bracci telescopici e ampi piani di carico. [2]

2. Saldatura

La saldatura è una tecnica di giunzione che realizza l'unione permanente di due pezzi metallici con o senza apporto di materiale, detto "metallo d'apporto", e sotto l'azione del calore. Talvolta le saldature sono realizzate con passate successive, durante le quali si registra un apporto sia di calore che di ulteriore materiale. Quest'ultimo, solitamente, non coincide con il materiale base ma è una lega molto simile ad esso.

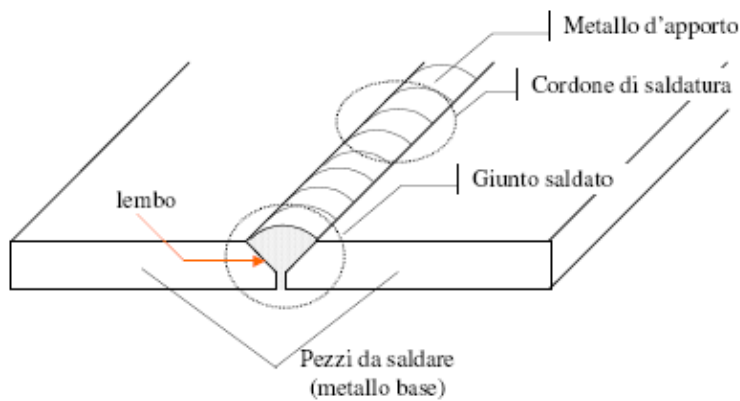


Figura 5 - Struttura del giunto saldato

Il metallo d'apporto è distribuito tra i lembi dei pezzi da unire allo stato fuso. Come si evince dalla figura 5, i lembi sono le porzioni di materiale base interessate dal processo di saldatura, che vengono preparate opportunamente al fine di agevolare il processo stesso. Con l'espressione "bagno di fusione" si intende il metallo che viene portato allo

stato liquido durante la fusione. L'insieme costituito dai metalli, sia di base che d'apporto, che solidificano per raffreddamento in seguito ad essere stati portati a fusione è detto cordone di saldatura. Si tratta dell'unità fondamentale del giunto saldato, che può essere utilizzato per determinare la tecnica di saldatura impiegata, a seconda della procedura con cui è stata effettuata la sua deposizione. [3]

In base alla posizione relativa dei pezzi da saldare, è possibile definire varie tipologie di giunto saldato, come illustrato in figura:

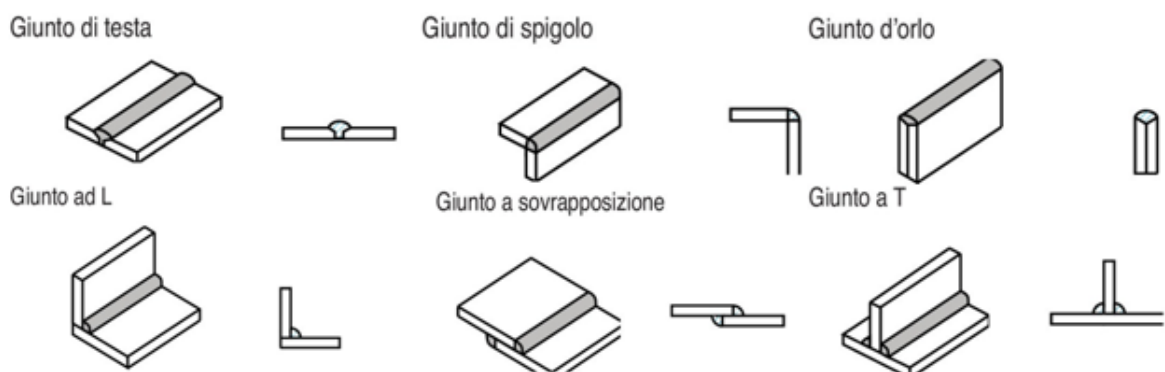


Figura 6 - Tipologie di giunto saldato

Inoltre, prendendo come riferimento il giunto di testa e il giunto di spigolo/ad angolo, il relativo cordone di saldatura consente di discernere le possibili posizioni di saldatura, rappresentate nelle figure seguenti:



Figura 7 - Posizioni per saldatura di testa



Figura 8 - Posizioni per saldatura ad angolo

Dal punto di vista metallurgico è possibile distinguere, a distanza crescente dalla saldatura:

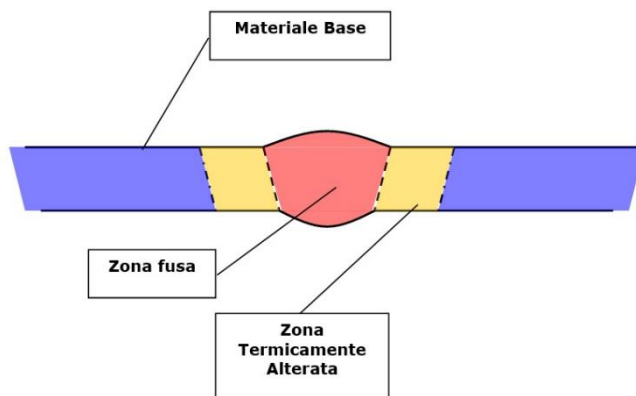


Figura 9 - Zone del giunto saldato

- La zona fusa e risolidificata;
- La zona termicamente alterata “ZTA”, nella quale il metallo è stato sottoposto a trasformazioni permanenti allo stato solido senza raggiungere la temperatura di fusione;
- Il metallo originario inalterato.

2.1. Evoluzione storica

I primi tentativi condotti per realizzare una saldatura furono eseguiti nel Medioevo. La tecnica impiegata prevedeva il riscaldamento su forgia dei pezzi e l'unione tramite successive martellate, con l'obiettivo di rendere omogenee le parti coinvolte.

Per poter ottenere processi di saldatura caratterizzati da omogeneità e riproducibilità, fu necessario attendere l'invenzione della saldatura ossiacetilenica, avvenuta nel 1901. La nuova procedura consentiva l'unione dei pezzi da saldare tramite fusione dei lembi, la cui energia era fornita dalla combustione di un gas chiamato “acetilene” con l'ossigeno. Il calore così sviluppatosi garantiva il raggiungimento di una temperatura tale da rendere superflua l'operazione di martellatura, assicurando maggior facilità di esecuzione e replicabilità.

Successivamente, nei primi anni del Novecento, vennero realizzati generatori elettrici in grado di sviluppare un arco che potesse portare a fusione il ferro. La prima tecnica che si serviva dell'energia creata tramite l'arco elettrico prevedeva l'utilizzo di elettrodi non protetti. Questi ultimi, ad oggi, sono stati completamente sostituiti dagli elettrodi rivestiti che svolgono svariati compiti per la realizzazione di un giunto affidabile, tra cui la protezione del bagno di saldatura da agenti indesiderati.

A seguire, precisamente nel 1925, venne introdotta la saldatura a resistenza, ancora oggi impiegata principalmente per produzioni di massa, ossia per la realizzazione di grandi volumi di prodotti standardizzati.

Negli anni Quaranta del Novecento nacque l'esigenza di dover incrementare la produttività ottenibile tramite elettrodo rivestito. Pertanto, soprattutto negli USA, iniziarono le ricerche volte a sviluppare una nuova metodologia di saldatura, ossia la saldatura a filo, in particolare ad arco sommerso.

Agli anni Cinquanta sono, invece, riconducibili le invenzioni dei processi di saldatura MIG e MAG, ideati per migliorare la flessibilità del procedimento di saldatura ad elettrodo rivestito a parità di produttività.

Il limite dovuto all'impossibilità di effettuare lavorazioni continue servendosi della saldatura ad elettrodo rivestito, venne superato introducendo la saldatura TIG, che consente di tenere sotto controllo le caratteristiche stesse di saldatura.

Infine, per poter contenere la porzione di materiale interessata dal processo di saldatura, furono elaborate negli anni Settanta del Novecento la saldatura a fascio elettronico e la saldatura laser, dette tecniche "ad energia concentrata".

Al giorno d'oggi, oggetto d'interesse e di analisi è la saldatura per diffusione, durante la quale i pezzi da unire non vengono portati a temperatura di fusione, ma sottoposti a condizioni di temperatura e pressione tali che gli atomi del reticolo siano indotti a diffondere verso la superficie di separazione, realizzando così buoni giunti di saldatura a temperature contenute. Si tratta di un procedimento di trasformazione allo stato solido impiegato principalmente nell'industria aeronautica, con l'obiettivo di unire materiali molto diversi tra loro. [4]

2.2. Tecnologie di saldatura

Come anticipato nel paragrafo precedente, nel corso della storia sono state introdotte differenti tipologie di saldatura in base alle esigenze e ai materiali da lavorare.

In generale, possono essere distinte tre differenti categorie:

- Saldature autogene, nelle quali il materiale base viene portato a temperatura di fusione. Un'ulteriore distinzione può essere fatta tra saldature autogene per fusione, in cui

l'apporto termico di una sorgente esterna consente di portare a fusione il materiale base e realizzare il giunto, e saldature autogene per pressione, in cui è anche necessario esercitare una pressione tra i lembi dei pezzi da unire, in aggiunta all'apporto termico. In questa grande famiglia di processi, non è strettamente richiesta la presenza di materiale d'apporto. Infatti, si potrebbe discernere tra "saldatura autogena propriamente detta", in cui il materiale d'apporto è assente, e "saldatura autogena", in cui invece è presente. Appartengono alla categoria di saldature autogene per fusione le seguenti: ossiacetilenica, al plasma, laser, a fascio elettronico, ad elettrodo rivestito, ad arco sommerso, TIG, MIG e MAG. Invece, le saldature a resistenza per punti e a rulli fanno parte delle saldature autogene per pressione;

- Saldature eterogene, nelle quali risulta necessario il ricorso a materiale d'apporto con temperatura di fusione inferiore a quella del materiale base, proprio perché quest'ultimo non viene mai portato a fusione. In questo caso si parla di brasature e saldobrasature;
- Saldature allo stato solido, spesso caratterizzate dall'assenza di materiale d'apporto, a causa del fatto che l'unione dei materiali base è dovuta ad un rimescolamento plastico per attrito, senza il raggiungimento della temperatura di fusione. Rientrano in questa categoria le saldature per diffusione, ad ultrasuoni e le cosiddette "friction welding" e "friction stir welding". [5]

Solitamente, i processi di saldatura necessitano di un apporto di calore esterno, che può essere sviluppato in vari modi:

- frizione dei materiali che vengono posti a contatto e sprigionano energia tramite attrito, scaldandosi;
- fiamma dovuta alla combustione di un gas con l'ossigeno;
- arco elettrico che scocca tra due elettrodi, uno dei quali è proprio il pezzo stesso;
- resistenza elettrica dovuta all'effetto Joule;
- laser.

L'obiettivo finale consiste nell'ottenimento di un giunto di saldatura con buone caratteristiche ed affidabile. Affinché ciò sia possibile, è necessario assicurarsi che il materiale di base sia privo di scorie e soprattutto proteggere la zona di fusione dall'ossidazione e da agenti indesiderati, lavorando in un'atmosfera inerte. Inoltre, la protezione del bagno di saldatura può essere rafforzata con l'aggiunta di gas protettivi.

Nel seguito della trattazione vengono presentate le principali tecniche di saldatura, nonché le più utilizzate, sviluppate nel tempo.

2.2.1. Ossiacetilenica

È una tecnologia di saldatura che sfrutta l'energia generata dalla combustione di un gas, l'acetilene, in ambiente ossidante. Si tratta di una delle tecniche più consolidate, oggetto di studio fin dai primi anni del Novecento. Principalmente impiegata nell'ambito della carpenteria metallica, è un metodo di saldatura manuale che solitamente richiede materiale

d'apporto sotto forma di bacchette. Pertanto, può essere utilizzata solamente per alcune tipologie di materiale base.

Questo processo di saldatura necessita di energia che viene fornita dalla fiamma di acetilene in ossigeno puro. Questi due elementi giungono separatamente all'interno del cannello ossiacetilenico, il quale è dotato di una forma tale da favorire la formazione di una miscela acetilene-ossigeno:

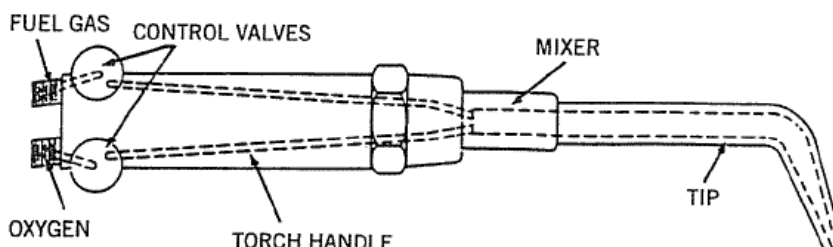


Figura 10 - Schema del cannello ossiacetilenico

In corrispondenza dell'uscita del cannello viene generata la fiamma, prodotta dalla combustione dei due gas, che svolge una duplice funzione: portare a fusione il metallo base e compiere un'azione protettiva nei confronti degli agenti esterni che potrebbero contaminare il bagno di fusione.

Si distinguono due zone principali della fiamma, una interna ed una esterna. La fiamma interna si presenta di colore bianco ed è dovuta alla combustione che avviene in corrispondenza del dardo, ossia di una superficie a forma di cono adiacente all'uscita del cannello. La reazione che si sviluppa è la seguente:



I prodotti di questa prima reazione, detta combustione primaria, sono ossido di carbonio, idrogeno e calore q' . Il fatto che in questa combustione non sia stata fornita una sufficiente quantità di ossigeno per bruciare totalmente l'acetilene, fa presagire che si verificherà una seconda reazione. Infatti, i prodotti della combustione primaria sono ulteriormente combustibili e si trovano ad una temperatura tale da portare spontaneamente a compimento la loro combustione, sfruttando l'ossigeno che viene prelevato dall'aria circostante. A valle del dardo si genera così una "zona riduttrice", in cui i prodotti della combustione primaria reagiscono col l'ossigeno dando vita alla fiamma esterna, di colore bluastro, e producendo ulteriore calore. Si concretizzano le seguenti reazioni:



La fiamma esterna risulta meno reattiva dell'aria che contiene ossigeno ed è utile per eseguire un'azione protettiva nei confronti del fenomeno ossidativo pre e post riscaldamento. Le temperature registrate con la combustione dell'acetilene in ossigeno puro raggiungono i 3000°C.

Per ottenere correttamente la fiamma ossiacetilenica, è bene regolare in maniera stechiometrica il rapporto tra acetilene C_2H_2 e ossigeno O_2 in ingresso al cannello. Nel regolare tale rapporto, si ricade in uno dei tre casi seguenti:

- Se si verifica un eccesso di C_2H_2 la fiamma è riducente e viene limitato l'assorbimento di O_2 , che reagisce tutto con l'acetilene;
- Se si verifica un eccesso di O_2 la fiamma è ossidante e può cedere O_2 , così che all'esterno ci sia più CO e meno CO_2 ;
- Se non ci sono eccessi, la fiamma è neutra.

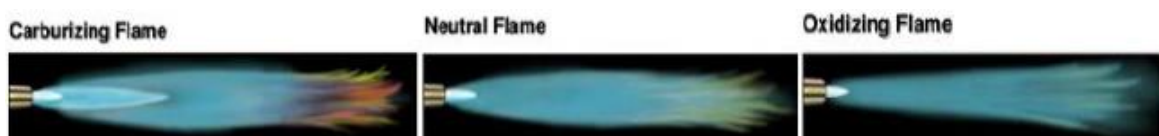


Figura 11 - Fiamma ossiacetilenica: riducente (sx); neutra; ossidante (dx).

Di norma, è bene che il saldatore si assicuri di lavorare con una fiamma neutra o riducente, poiché un eccesso di ossigeno determinerebbe la nascita di difetti di saldatura come inclusioni di ossidi o incollature, rilevabili tramite controlli volumetrici. Altri difetti tipici che possono verificarsi ricorrendo a questa tecnologia di saldatura sono la mancanza di penetrazione, individuabile semplicemente con un esame visivo, la mancanza di spessore oppure il sovrasspessore, dovuti ad un'errata velocità di movimentazione del cannello da parte del saldatore. [3]

2.2.2. Ad arco elettrico

Si tratta di un metodo di saldatura molto diffuso, che si presta in particolar modo ad essere automatizzato. In generale, per arco elettrico si intende la corrente che, a causa di un campo elettrico, fluisce tra due elettrodi attraverso un gas ionizzato. La corrente è costituita da elettroni e ioni che scorrono in direzione opposta. Nel caso della saldatura l'arco elettrico scocca tra il pezzo da saldare, a cui viene collegata la macchina saldatrice mediante un morsetto, e una bacchetta, che può essere consumabile o inerte. Nel primo caso, tale bacchetta svolge anche la funzione di materiale d'apporto ed è composta da un'anima centrale in acciaio dolce ed un rivestimento esterno, utile per garantire stabilità all'arco e fornire protezione al bagno di saldatura nei confronti di ossigeno, fosforo e zolfo.

Per poter eseguire una saldatura ad arco elettrico è necessario munirsi di:

- Un generatore di corrente, ossia una saldatrice elettrica in grado di fornire corrente elettrica all'arco. Si tratta di un apparecchio mobile o fisso a seconda dell'impiego, che deve consentire la regolazione di corrente e tensione continua/alternata;
- Una pinza porta elettrodo, manovrata dall'operatore e collegata alla macchina saldatrice tramite cavo. All'estremità della pinza è serrato l'elettrodo, tipicamente una bacchetta di materiale consumabile, per cui è fondamentale garantirne una rapida sostituzione;

- Un morsetto, da un lato collegato alla macchina saldatrice e dall'altro al banco su cui è posizionato il componente da saldare.

Nella figura seguente sono riportati, in forma schematica, gli elementi essenziali per poter eseguire una saldatura ad arco elettrico:

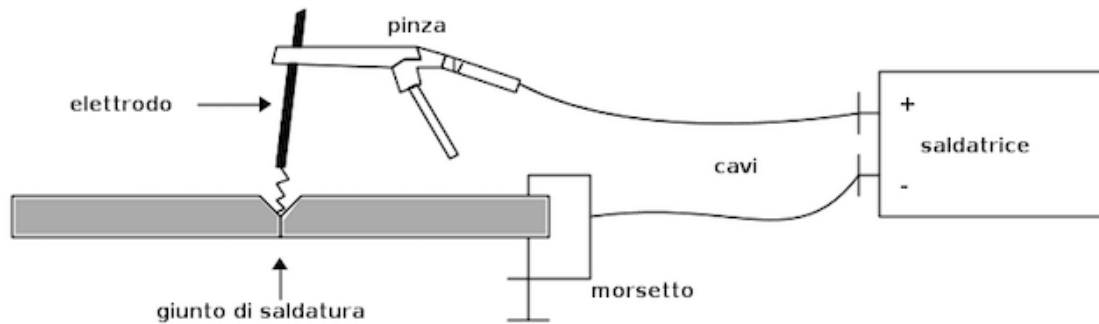


Figura 12 - Impianto per saldatura ad arco elettrico

All'interno della famiglia delle saldature ad arco elettrico rientrano la saldatura manuale ad elettrodo rivestito (SMAW), ad arco sommerso (SAW), a filo continuo sotto protezione gassosa (MIG/MAG), sotto protezione gassosa e con elettrodo infusibile (TIG). Sono tutte accomunate dai seguenti principi:

- Calore fornito dall'arco elettrico che scocca tra i due elettrodi oppure tra un elettrodo ed il pezzo da saldare;
- Metallo d'apporto introdotto tramite elettrodo fusibile oppure da un'ulteriore bacchetta di filo metallico;
- Protezione del bagno di fusione garantita dal rivestimento della bacchetta di materiale d'apporto, una sostanza che inibisce il contatto tra il bagno stesso e l'aria circostante.

Nei paragrafi successivi sono presentate le quattro tipologie di saldatura ad arco elencate precedentemente. [6]

2.2.2.1. Elettrodo rivestito (MMA – SMAW)

È una tipologia di saldatura molto antica e largamente diffusa, che sfrutta l'arco elettrico che scocca tra un elettrodo consumabile ed il materiale base per generare calore utile alla fusione del materiale stesso. L'elettrodo è maneggiato dall'operatore tramite una pinza porta elettrodo isolata elettricamente ed è costituito da un'anima centrale, di materiale simile a quello del pezzo da saldare, ed un rivestimento esterno. L'anima viene fusa e agisce da materiale d'apporto entrando nel bagno di fusione. Il rivestimento, invece, è composto da diverse sostanze organiche, come collanti e cellulose, e sostanze minerali, come silicati, carbonati, ossidi e ferroleghie, amalgamate con acqua e leganti in modo tale da risultare una sostanza omogenea.

In figura 13 è riportato lo schema di base per la realizzazione di una saldatura ad arco ad elettrodo rivestito:

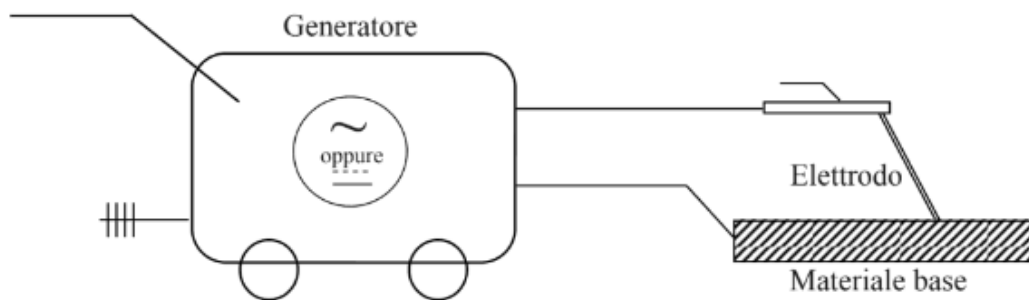


Figura 13 - Impianto per saldatura ad arco ad elettrodo rivestito

Il rivestimento dell'elettrodo è di fondamentale importanza poiché adibito allo svolgimento di vari compiti. Esso è costituito da una componente gassosa inerte che isola il bagno di fusione dall'atmosfera circostante ed una parte liquida che, portata a fusione, si deposita sulla superficie del bagno rafforzando la protezione nei confronti degli agenti esterni. Inoltre, l'estremità dell'elettrodo presenta un profilo concavo dovuto alla sporgenza del rivestimento esterno rispetto all'anima, creando le condizioni favorevoli per la salvaguardia dell'atmosfera protettiva di gas inerte e della componente liquida superficiale del bagno di fusione.

Oltre alla protezione nei confronti degli agenti contaminanti presenti in atmosfera, il rivestimento dell'elettrodo svolge funzioni altrettanto rilevanti:

- Depurazione del bagno di fusione, compiuta da sostanze come carbonato di calcio e magnesio presenti all'interno del rivestimento. Queste sostanze, raggiungendo la temperatura di fusione, si sciolgono e si combinano con elementi quali il fosforo e lo zolfo derivanti dal processo produttivo dell'acciaio, producendo scorie che si separano sulla superficie del bagno di fusione. In questo modo, è possibile sottrarre al bagno stesso elementi che potrebbero introdurre fragilità se non controllati;
- Disossidazione del bagno. Nonostante il ricorso ad atmosfere inerti che isolano, per quanto possibile, la fase liquida, una limitata parte di ossigeno penetrerà intaccando il bagno di fusione e generando ossidi indesiderati. Per evitare questo inconveniente è possibile ricorrere a rivestimenti che introducono ferroleghie di magnesio e silicio. Questi elementi, legandosi con l'ossigeno che si trova nel bagno, creano una scoria di ossidi non solubile nel metallo fuso che si separerà in superficie compiendo un'azione disossidante;
- Introduzione di elementi di lega come molibdeno, cromo, nichel nel bagno di fusione, rilasciati in soluzione dal rivestimento. Si tratta di elementi capaci di variare le caratteristiche del giunto di saldatura, introdotti in quantità variabili a seconda delle esigenze;
- Influenza nei confronti della stabilità dell'arco di saldatura, dovuta ad elementi alcalini quali il potassio, il litio e il sodio presenti nel rivestimento. Sono specialmente utili nel caso in cui si ricorra a corrente alternata, che richiede una continua inversione di polarità con conseguente possibile perdita di stabilità. Gli elementi sopracitati, grazie alla loro tendenza ad essere ionizzabili, contribuiscono al mantenimento della stabilità dell'arco;
- Creazione di una scoria solida che condiziona sia il profilo del cordone di saldatura che la rapidità di solidificazione del giunto. In particolare, un rallentamento della fase di

raffreddamento consente di ridurre la probabilità che si formino cricche a freddo in determinate tipologie di materiali.

Nella figura sottostante sono riportati gli elementi rilevanti per la realizzazione di una saldatura ad arco ad elettrodo rivestito:



Figura 14 - Schema per la saldatura manuale ad elettrodo rivestito

Dopo aver ampiamente discusso le diverse funzioni svolte dal rivestimento dell'elettrodo, è bene presentare le varie tipologie a cui si può ricorrere:

- Il rivestimento acido deve il suo nome al fatto che genera una scoria di carattere acido, che risulta porosa e agevolmente eliminabile. Per evitare la generazione di inclusioni solide, è buona norma asportare la scoria che si forma dopo ciascuna passata. Il rivestimento è composto da silice, ossidi e silicati di ferro, che garantiscono una solida stabilità dell'arco elettrico, grazie alla quale si può ricorrere all'impiego di corrente continua o corrente alternata. Inoltre, sono presenti elementi come silicio e manganese che svolgono una funzione disossidante. Per scongiurare il rischio di formazione di cricche a caldo, i rivestimenti acidi vanno evitati nel trattare materiali base ricchi di fosforo e zolfo. In aggiunta, il fatto che favoriscano bagni di fusione caldi limita l'esecuzione del processo di saldatura alla sola posizione orizzontale. Infine, è necessario essiccare completamente i rivestimenti acidi prima dell'utilizzo per evitare una possibile reazione con l'idrogeno, riducendo così la probabilità che si verifichino cricche a freddo. In generale, è la categoria di rivestimenti meno impiegata;
- Il rivestimento rutilico ha caratteristiche simili a quello acido, tuttavia contiene ossidi di titanio come il rutilio, ossia il biossido di titanio, che attribuisce al cordone di saldatura un eccellente aspetto superficiale. Per questa ragione, viene impiegato nei casi in cui risulti molto rilevante l'estetica. Talvolta, per associare le caratteristiche estetiche a quelle meccaniche, il rivestimento rutilico contiene sostanze organiche come la cellulosa o i carbonati di calcio e magnesio. I vantaggi principali consistono in una buona stabilità dell'arco, nella semplicità di eliminazione della scoria e nella possibilità di saldare in tutte le posizioni previste. D'altro canto, la marcata igroscopicità e la limitata capacità di depurare il bagno di fusione espongono l'utilizzo di rivestimenti rutilici al rischio che si sviluppino cricche a caldo e a freddo. Pertanto, è necessario restringerne l'impiego relativamente agli acciai a basso contenuto di carbonio e carenti di impurezze;

- Il rivestimento cellulosico è composto principalmente da materiale organico, cellulosa, ed elementi di lega disossidanti, come il silicio e il manganese. Analogamente a quanto visto per il rivestimento acido, anche in questo caso va evitata la saldatura di materiali base contenenti fosforo e zolfo, per ridurre il rischio di formazione di cricche a caldo. In aggiunta, la proprietà igroscopica aumenta la probabilità di reagire con l'idrogeno presente nell'aria, potenzialmente pericoloso per lo sviluppo di cricche a freddo. Un aspetto positivo di tale rivestimento è dovuto alle caratteristiche chimiche, che consentono di minimizzare la quantità di scorie prodotte in favore di una pressoché totale gassificazione. Ciò determina un duplice risvolto favorevole: da un lato viene incentivato l'impiego del rivestimento cellulosico nei casi di saldatura multi-pass, per la quale è prevista l'eliminazione della scoria tra le passate, un'azione che determinerebbe un notevole incremento del tempo ciclo; dall'altro, un'ulteriore applicazione che beneficia della gassificazione è la saldatura all'aria aperta, poiché è richiesta una protezione del bagno più efficace. Il rivestimento in questione fonde grandi quantità di materiale base garantendo un'ottima penetrazione e consente la saldatura in svariate posizioni, compresa la verticale discendente. A differenza dell'elettrodo acido, però, in questo caso la stabilità dell'arco risulta precaria. Perciò, si prediligono applicazioni in corrente continua su acciai a basso tenore di carbonio e con poche impurezze;
- Il rivestimento basico contiene ferroleghie di manganese, ossidi di ferro e carbonati di calcio e magnesio. I carbonati, durante la fusione, si combinano con fosforo e zolfo depurando il bagno di saldatura e incrementando la temperatura di fusione del rivestimento. Per ovviare a questo problema, viene introdotta nel bagno la fluorite, ossia fluoruro di calcio, che però aumenta l'energia di ionizzazione necessaria per l'arco elettrico e tende a renderlo instabile. Per questa ragione, è richiesto l'impiego di corrente continua con questa tipologia di elettrodi. Inoltre, è prevista una completa rimozione della scoria prodotta, in particolare nel caso di saldature multiple, poiché eventuali residui potrebbero portare alla formazione di porosità solide e inclusioni. Un'altra peculiarità è il ricorso ad archi corti in fase di saldatura, necessari per evitare la nascita di porosità allungate, comunemente dette "tarli". Gli aspetti positivi dei rivestimenti basici sono la possibilità di saldare in qualsiasi posizione, compresa quella sopratesta, e la notevole quantità di elementi depuranti presenti, che li rende adatti alla saldatura di materiali contaminati da zolfo o fosforo ottenendo comunque cordoni con buone caratteristiche meccaniche. Ancora una volta, l'igroscopicità potrebbe comportare problemi in termini di criccabilità a freddo, rendendo così indispensabile l'utilizzo di elettrodi perfettamente deumidificati.

In sintesi, a seconda del tipo di rivestimento impiegato, con la saldatura ad elettrodo rivestito è possibile effettuare saldature in ambienti con ridotta accessibilità, eseguire riparazioni sul posto, eventualmente all'aria aperta, su materiali contaminati da elementi che introducono impurezze e sfruttando strumenti semplici e poco costosi. Nonostante ciò, i maggiori limiti in cui si imbatte questa tecnologia di saldatura sono: produttività limitata, dovuta al consumo degli elettrodi; applicabilità unicamente relativa agli acciai; possibilità di saldare spessori intermedi, da 1,5 a 10 mm. [5]

2.2.2.2. Arco sommerso (SAW)

La saldatura ad arco sommerso è un procedimento di saldatura ad arco a filo continuo effettuato sotto la protezione di scoria. È particolarmente diffuso per la produzione in serie, poiché consente di limitare i tempi di saldatura operando con velocità elevate. L'arco, che scocca sotto la scoria, produce calore in misura considerevole e la scarsa conducibilità termica della scoria stessa fa sì che il calore si concentri nel bagno di fusione, incrementandone notevolmente la temperatura. Inoltre, è possibile eseguire sia la saldatura longitudinale in posizione piana che quella circonferenziale.

In questo procedimento gli elettrodi utilizzati sono fili continui simili al metallo base dal punto di vista metallurgico, con un diametro variabile dipendente dallo spessore che dev'essere saldato. Talvolta, si ricorre all'impiego di fili ramati per incrementare la conducibilità elettrica e fornire protezione nei confronti dello sfregamento degli organi di alimentazione coinvolti. Il filo, avvolto su un aspo, fornisce metallo d'apporto e viene fatto avanzare a velocità costante tramite appositi rulli di trascinamento. Esso è immerso in un flusso, ossia una sostanza granulare distribuita tramite una tramoggia, che fonde parzialmente prestando protezione al cordone di saldatura. Pertanto, una macchina utilizzata per eseguire la saldatura ad arco sommerso dev'essere costituita da vari elementi, come riportato in figura 15:

- Un generatore di corrente;
- Un aspo su cui è avvolto il filo;
- Un dispositivo per l'avanzamento del filo, movimentato a velocità costante;
- Una tramoggia, all'interno della quale è contenuto il flusso;
- Un recuperatore della porzione di flusso che non è stata portata a fusione;
- Un cofano di controllo per la regolazione.

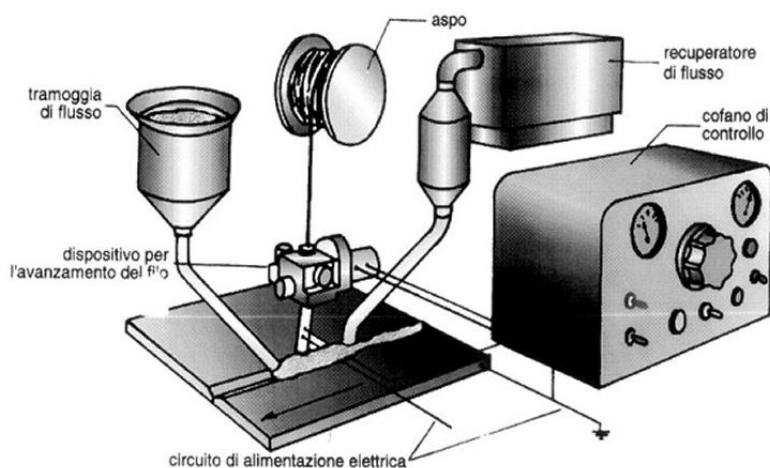


Figura 15 - Dispositivi per saldatura ad arco sommerso

Per poter eseguire la saldatura, l'arco elettrico viene fatto scoccare sotto il flusso, risultando così invisibile dall'esterno. Per questa ragione la procedura viene definita "ad arco sommerso". L'aspetto maggiormente limitante è dovuto al fatto che sia sempre necessaria la presenza di flusso granulare per proteggere il bagno di fusione. Ciò riduce l'applicazione di questa tecnologia quasi unicamente alla saldatura eseguita in posizione piana o ad angolo.

Inoltre, dal momento che il flusso solidifica sul cordone di saldatura, è necessario rimuovere la scoria prodotta dopo ciascuna passata per poter effettuare quelle successive. La parte di flusso che non solidifica, invece, viene aspirata tramite un recuperatore di flusso e riutilizzata. L'importanza del flusso nella saldatura ad arco sommerso lo rende un elemento imprescindibile, capace di assolvere molteplici compiti:

- Proteggere il bagno di fusione dalla possibile contaminazione dell'atmosfera circostante, in particolare dall'ossidazione;
- Migliorare la stabilità dell'arco;
- Disossidare il bagno di fusione privandolo di elementi come il fosforo e lo zolfo, trasformandoli in scoria;
- Ridurre la velocità di raffreddamento del cordone di saldatura, modificandone la composizione.

Queste funzioni sono compiute da specifici elementi contenuti all'interno del flusso, costituito principalmente da:

- Composti di manganese e silicio, che si occupano di disossidare il bagno;
- Silicati, che contribuiscono a rendere più stabile l'arco elettrico;
- Composti di calcio e magnesio, che reagiscono con fosforo e zolfo depurando il bagno;
- Ferroleghie.

In aggiunta, è richiesto che il flusso abbia un'importante viscosità per proteggere il bagno di fusione, che sia conduttivo allo stato fuso, isolante allo stato solido per evitare dispersione termica e che generi una scoria facilmente asportabile in seguito alla saldatura.

Il risultato finale di questa procedura di saldatura automatizzata fornisce cordoni regolari, uniformi e realizzati con apprezzabile qualità. I pezzi appaiono limitatamente deformati a causa dell'ingente velocità di saldatura, che consente anche la realizzazione di spessori significativi in tempi contenuti, con elevata penetrazione e deposizione oraria.

Tipicamente, la saldatura ad arco sommerso viene utilizzata per effettuare giunti in recipienti soggetti ad alta pressione oppure per saldare tubi, spaziando dall'ambito navale alla carpenteria.

Nonostante il ricorso ad una tecnologia automatizzabile, che consente la produzione di saldature qualitativamente migliori rispetto ad un procedimento manuale, esistono difetti riconducibili a svariate cause. In primis, è possibile riscontrare inclusioni di scoria, generalmente dovute ad un'inadeguata rimozione della scoria stessa, che dev'essere sempre effettuata tra una passata e quella successiva. Nel caso in cui l'apporto termico sia insufficiente oppure l'arco risulti instabile, si rischia di incorrere in mancate fusioni. Le porosità, invece, sono riconducibili ad un bagno di fusione inquinato da parte di agenti indesiderati oppure ad un flusso di materiale granulare eccessivamente umido. Infine, non è raro individuare cricche a caldo, causate dalla presenza di fosforo e zolfo nel bagno, e cricche a freddo, dovute ad un flusso deumidificato in modo inopportuno con conseguente intervento dannoso dell'idrogeno. [3]

2.2.2.3. TIG

Con l'acronimo TIG si indica la cosiddetta "Tungsten Inert Gas", ossia la tecnologia di saldatura eseguita in atmosfera inerte con un elettrodo infusibile in tungsteno. L'arco elettrico, che scocca tra l'elettrodo ed il materiale base, è protetto da un gas solitamente costituito da argon, elio o una miscela di essi. Spesso, è richiesta l'aggiunta di metallo d'apporto sotto forma di bacchette, nel caso di saldatura manuale, o filo continuo, per la saldatura automatica. Il metallo d'apporto consente di riempire lo spazio tra i lembi di metallo base realizzando cordoni di saldatura più spessi, ottenere una composizione chimica della zona fusa diversa da quella del metallo base ed evitare la formazione di seconde fasi indesiderate. L'arco è generato da una scintilla con cui si ionizza l'atmosfera inerte, rendendola conduttrice. Quest'ultima è imprescindibile ai fini della saldatura poiché svolge una funzione protettiva nei confronti dell'ossidazione, che può essere provocata dalle particelle di ossigeno presenti nell'ambiente. Inoltre, l'utilizzo di un materiale come il tungsteno, con temperatura di fusione molto elevata, consente all'elettrodo di non prendere parte alla fusione.

Per poter eseguire una saldatura TIG, è necessario disporre della seguente attrezzatura:

- Torcia di saldatura;
- Elettrodo in tungsteno;
- Condotta per il passaggio del gas;
- Circuito di raffreddamento ad acqua;
- Guaina isolante;
- Conduttore elettrico;
- Supporto per l'elettrodo;
- Bombola contenente gas di protezione;
- Bacchetta di metallo d'apporto.

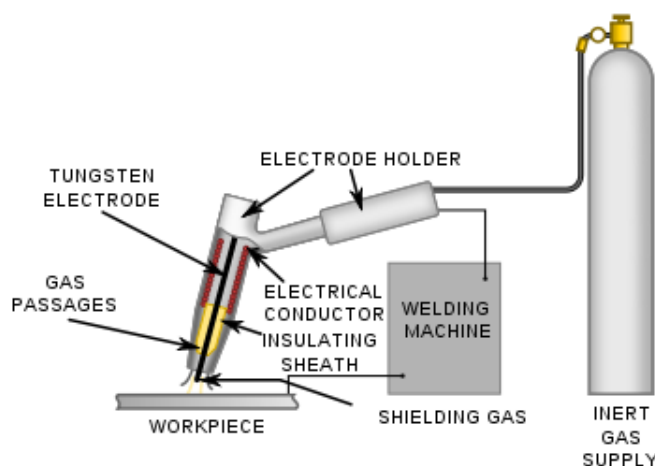


Figura 16 - Attrezzatura per saldatura TIG

A seconda delle esigenze, l'elettrodo infusibile è composto da:

- Tungsteno puro, nel caso in cui viene preventivata la possibilità che il cordone di saldatura subisca contaminazione;
- Lega di tungsteno con ridotte percentuali (1 ÷ 2 %) di torio, per la saldatura effettuata con corrente alternata;
- Lega di tungsteno e piccole percentuali (0.15 ÷ 0.4 %) di zirconio impiegata per eseguire saldature di piccolo spessore, laddove sia richiesta una buona stabilità dell'arco e corrente elettrica più bassa.

L'elettrodo più diffuso ed economicamente conveniente è il primo citato, costituito da tungsteno puro. Inizialmente venivano utilizzati anche elettrodi in grafite, che sono stati successivamente soppiantati da quelli in tungsteno a causa delle migliori proprietà termiche,

meccaniche e della capacità di tale elemento di emettere grandi quantità di elettroni ad alta temperatura, favorendo così la stabilità dell'arco elettrico.

Come accennato in precedenza, i gas di protezione impiegati sono costituiti da elio o argon, usati separatamente oppure combinati tra loro. Tendenzialmente, è più vantaggioso utilizzare argon puro per varie ragioni: migliorare la stabilità dell'arco; sostenere costi più contenuti; a parità di protezione, è necessaria una minor quantità di gas; nelle saldature di spessore ridotto garantisce una penetrazione inferiore. Al contrario, l'elio è impiegato per eseguire saldature più spesse, fornendo maggior penetrazione. Un caso a parte è rappresentato dagli acciai austenitici, per i quali è possibile servirsi di una miscela di argon e idrogeno incrementando l'energia trasmessa dall'arco al cordone di saldatura e impedendo l'ossidazione sulle superfici di saldatura, senza correre il rischio che si generino cricche a freddo.

Eseguire una saldatura TIG è economicamente dispendioso in termini di attrezzature richieste, compresi gli elettrodi in tungsteno ed il gas di protezione. Per questo motivo, si tratta di un processo impiegato per eseguire saldature sottili di materiali di buona qualità. Per cordoni di saldatura con spessore di maggiore entità è preferibile ricorrere ad altre tecnologie, come la saldatura ad arco sommerso o quella MIG, per le quali devono essere sostenuti costi inferiori. In generale, la procedura TIG consente di realizzare saldature pregevoli su differenti tipologie di materiali. È specificatamente consigliata per leghe di alluminio, magnesio, titanio e zirconio, ma va evitata per materiali basso fondenti come stagno, piombo e zinco.

Analogamente a quanto visto per gli altri metodi, anche in questo caso è possibile incorrere in difetti di saldatura. Il più diffuso è l'inclusione di tungsteno, che si verifica quando l'elettrodo entra in contatto col bagno di fusione. La diretta conseguenza è la rottura dell'elettrodo stesso in frammenti di diametro inferiore al millimetro, che costituiscono possibili siti dai quali si genera frattura fragile. Un altro potenziale difetto è dovuto alla mancanza di protezione fornita dal gas, che espone il materiale al rischio di ossidazione. Infine, sono molto comuni cricche, porosità e mancanze di fusione. [7]

2.2.2.4. MIG/MAG

Per saldatura MIG si intende "Metal Inert Gas", mentre con saldatura MAG "Metal Active Gas" ed entrambe sono denominate con l'acronimo GMAW, ossia "Gas Metal Arc Welding". Si tratta di saldature ad arco con metallo d'apporto effettuate sotto protezione di gas. La differenza sostanziale è dovuta alla tipologia di gas utilizzato: infatti, la saldatura MIG sfrutta un gas inerte come l'argon o l'elio, che garantisce un'azione protettiva senza scatenare reazioni chimiche. Il processo MAG, invece, impiega gas attivi che svolgono un'azione ossidante nei confronti del bagno di fusione. Negli ultimi anni, tipicamente nel settore della saldatura robotizzata, si sta principalmente diffondendo il processo MAG a causa della maggiore convenienza economica.

In generale, MIG e MAG possono essere definiti come procedimenti di saldatura a filo continuo con protezione gassosa del bagno di fusione, in grado di assicurare elevata produttività e assenza di scoria prodotta. L'attrezzatura necessaria per questa tipologia di procedimenti è la seguente, riportata in figura 17:

- Torcia di saldatura, necessaria per far scoccare l'arco tra il materiale base ed il filo e per trasferire il gas protettivo sul bagno di fusione (1);
- Massa (2);
- Saldatrice/generatore in corrente continua (3);
- Dispositivo di trascinamento del filo (4);
- Bobina su cui è avvolto il filo (5);
- Bombola di gas di protezione (6). [8]

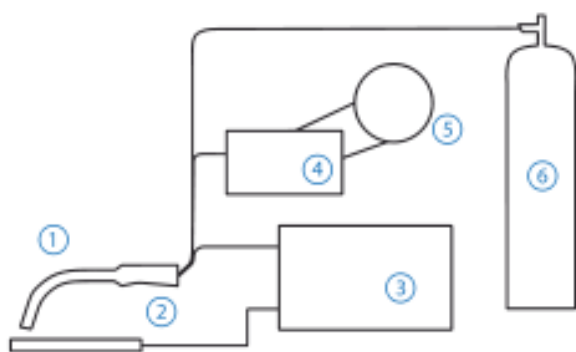


Figura 17 - Attrezzatura per saldatura MIG/MAG

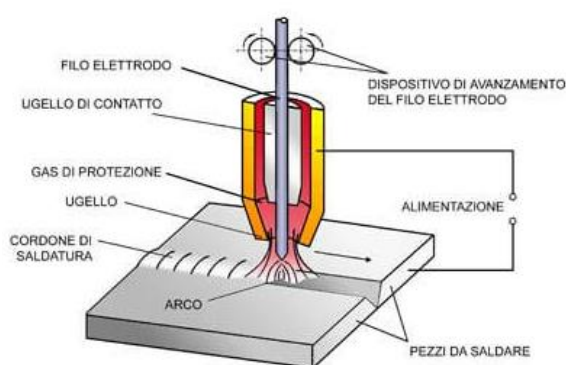


Figura 18 - Torcia per saldatura MIG/MAG

Come anticipato precedentemente, la funzione del gas è quella di proteggere il bagno di fusione dall'atmosfera circostante. La saldatura MIG prevede l'utilizzo di argon o elio: il primo assicura una protezione più efficace a causa del maggior peso, che ne determina una stagnazione nell'intorno del bagno di fusione; il secondo, al contrario, essendo più leggero garantisce prestazioni inferiori, ma l'elevata conduttività termica determina una maggior penetrazione della saldatura. Il procedimento MAG, invece, sfrutta gas attivi costituiti da miscele di argon ed anidride carbonica. Quest'ultima comporta vantaggi e svantaggi: da un lato consente una maggior penetrazione e una riduzione dei costi; dall'altro riduce la stabilità dell'arco elettrico e richiede una corrente elettrica più elevata durante il trasferimento di metallo. Esistono tre differenti tipologie di trasferimento del metallo d'apporto:

- “Short arc” o per cortocircuito. In questo caso la corrente elettrica che attraversa il filo non è sufficientemente alta da portarlo a fusione, perciò il filo stesso va a contatto con il bagno generando un cortocircuito. Viene così incrementato il valore nominale di corrente che percorre il filo, portandone a fusione l'estremità. Il trasferimento di materiale avviene quindi per effetto Joule, generando piccoli bagni di fusione con una frequenza di 20÷200 cortocircuiti al secondo. A causa delle basse tensioni d'arco, i bagni si raffreddano velocemente senza che il giunto raggiunga temperature elevate. Questo limitato contributo termico potrebbe portare ad una mancata fusione del metallo base oppure alla generazione di porosità dovute all'elevata velocità di solidificazione. Per evitare che si verifichino problematiche di questo genere, si predilige il trasferimento di

metallo d'apporto per cortocircuito nel caso di saldature di piccoli spessori e di metalli con basse temperature di fusione;

- “Drop arc” o globulare, ossia a gocce grosse. Quando l'alimentazione fornita all'arco elettrico non consente lo sviluppo di forze elettromagnetiche sufficienti a deporre le gocce nel bagno di fusione, il trasferimento è realizzato dalla forza gravitazionale. Pertanto, bisogna ricorrere ad un arco sufficientemente lungo, in modo che la goccia possa cadere nel bagno di fusione senza generare cortocircuiti che la farebbero esplodere, provocando spruzzi sul metallo circostante. Per tale ragione, questa tecnica di trasferimento è applicabile unicamente nei casi di saldatura in posizione piana;
- “Spray arc” o a spruzzo. Le correnti indotte con questa procedura consentono di innescare l'arco elettrico e mantenerlo attivo e particolarmente stabile. Esiste un valore limite, detto “corrente di transizione spray”, al di sotto del quale si passa ad un trasferimento di metallo di tipo globulare. Per lo “spray arc” il metallo d'apporto viene continuamente portato a fusione e, sotto forma di gocce di piccole dimensioni, trasferito al pezzo da saldare. In questo caso, il ridotto peso delle gocce fa sì che la forza gravitazionale venga vinta dalle forze elettromagnetiche, consentendo la saldatura in svariate posizioni mediante opportuni accorgimenti. Inoltre, a causa delle elevate correnti e tensioni richieste, si predilige la saldatura di spessori grossi. Rispetto ai metodi precedenti, il vantaggio principale è riconducibile ad una penetrazione più profonda e a migliori caratteristiche estetiche.

La saldatura MIG/MAG consente di saldare varie tipologie di acciai e leghe ed è particolarmente indicata per le lavorazioni in cui siano richieste flessibilità ed elevata produttività. Però, a causa di un'eccessiva esposizione dell'indispensabile atmosfera di gas protettivo, questa metodologia va evitata in caso di saldatura all'aria aperta. Rispetto ad una saldatura con elettrodo rivestito, nonostante il costo delle attrezzature sia superiore, la saldatura MAG risulta favorevole poiché garantisce maggior penetrazione, assenza di scoria e velocità di esecuzione più elevata.

I principali difetti di saldatura riscontrabili sono i seguenti:

- Porosità, dovuta ad un'inefficace protezione del gas;
- Penetrazione eccessiva o intagli, riconducibili ad un eccessivo apporto termico;
- Mancanza di fusione, correlata al problema inverso, ossia scarso apporto termico;
- Cricche a caldo, causate da agenti contaminanti ed elevato calore.

Per evitare la formazione di cricche a caldo è bene lavorare con materiali base puliti e poveri di elementi quali zolfo e fosforo. Le cricche a freddo, invece, sono poco frequenti se viene adottata la giusta contromisura, ossia la completa eliminazione dell'umidità che tenderebbe ad introdurre nel bagno un elemento potenzialmente pericoloso come l'idrogeno. [5]

2.2.3. Laser

Il processo di saldatura laser è impiegato per unire tra loro pezzi di metallo mediante l'utilizzo di una fonte capace di produrre un raggio laser di elevata potenza. Comunemente

non è previsto l'impiego di materiale d'apporto, ma è richiesta un'atmosfera protettiva per inibire un'eventuale ossidazione del bagno. Sono previste due differenti modalità di funzionamento:

- Saldatura per conduzione termica, nella quale il raggio laser incide direttamente sul metallo solido, portandolo alla temperatura di fusione;
- Saldatura con foro di penetrazione. In questo caso, aumentando la potenza o riducendo la velocità il laser scalda la superficie del metallo fino a formare dei vapori e, penetrando in profondità, genera un foro di penetrazione. Il vantaggio è qui riconducibile ad una maggior profondità di penetrazione ed una maggiore efficienza.



Figura 19 - Saldatura laser per conduzione (sx) e con foro di penetrazione (dx)

Rispetto alla saldatura ad arco, con la tecnologia laser è possibile concentrare una potenza più elevata su una superficie più piccola, riducendo così la zona termicamente alterata. Inoltre, nonostante l'investimento iniziale piuttosto oneroso, la saldatura laser consente di ridurre i tempi di lavorazione incrementando la produttività. Un ulteriore vantaggio è dovuto all'accuratezza che può garantire un raggio laser. Infatti, la possibilità di controllarlo e concentrarlo su ridotte superfici assicura elevata precisione, al punto da rendere questa tipologia di saldatura ideale per metalli sottili e pregiati. [7]

2.2.4. A resistenza

La saldatura a resistenza per punti è utilizzata soprattutto nell'industria dell'auto e viene impiegata per saldare tra loro da due a quattro lamiere sovrapposte, che possono essere costituite anche da due diverse tipologie di acciai. Per eseguire la saldatura due elettrodi di rame vengono accostati alle lamiere, sulle quali è esercitata una certa forza. Successivamente, attraverso gli elettrodi viene fatta scorrere corrente e, all'interfaccia delle lamiere, si

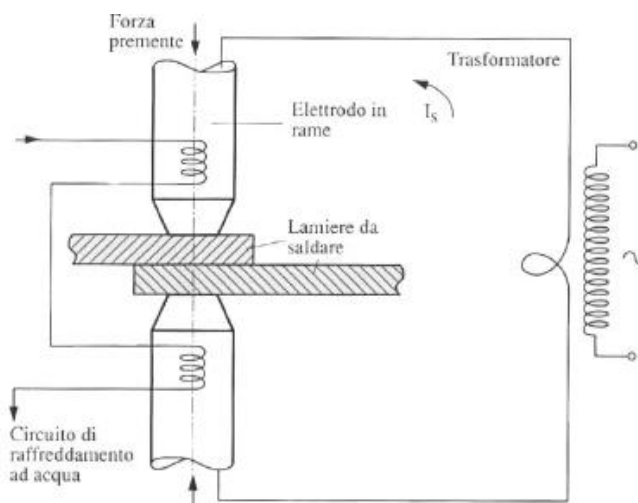


Figura 20 - Schema della saldatura a resistenza per punti

sviluppa calore per effetto Joule. Questo calore determina la formazione di un nocciolo liquido. Una volta interrotto il passaggio di corrente, si continua a premere e raffreddare per facilitare la saldatura tramite una forza di compressione che consente di evitare porosità da ritiro, ma determina una minima deformazione locale sulle lastre. Infine, si discostano gli elettrodi dalle lamiere, che risulteranno saldate senza il coinvolgimento di ulteriore metallo d'apporto.

Una variante della saldatura a resistenza per punti è la saldatura a rulli, nella quale gli elettrodi puntiformi di rame sono rimpiazzati con rulli che, girando, fanno procedere le lamiere. Si ottengono così saldature continue, impiegate per la realizzazione di cisterne o boiler. [9]

2.2.5. Allo stato solido

Per poter realizzare una saldatura, non è indispensabile ricorrere ad una fase liquida. Infatti, applicando la giusta pressione a temperature elevate, è possibile ottenere giunti saldati. Le lavorazioni devono essere eseguite in condizioni ottimali, impiegando lamiere prive di rugosità ed esenti da contaminazioni superficiali, come gli ossidi. In questo gioca un ruolo fondamentale proprio la pressione che dev'essere applicata. Esistono varie tipologie di saldature allo stato solido che sono state sviluppate nel corso degli anni: “forge welding”; “roll welding”; “friction welding”; “friction stir welding” ed “explosion welding”.

2.2.5.1. Forge Welding

Si tratta della più antica forma di saldatura, sviluppata agli albori della lavorazione del ferro. Consiste sostanzialmente nell'unione di due lembi di materiale tramite la combinazione di riscaldamento e successive martellate. Talvolta, è possibile ricorrere all'utilizzo di un flussante, ossia un elemento che determina la formazione di un ossido liquido facilmente rimovibile. In questo modo, la superficie del metallo viene protetta dal fenomeno dell'ossidazione. [10]



Figura 21 - Forge welding

2.2.5.2. Roll Welding

La saldatura a rulli è una metodologia di saldatura allo stato solido che prevede l'applicazione di una pressione tale da causare coalescenza tra lamiere. Solitamente, esse vengono scaldate ad una temperatura di circa 1000°C e fatte passare in un laminatoio, dal

quale fuoriescono saldate. Le lastre, durante la fase di preparazione, devono presentare superfici pulite e prive di incrudimento. Inoltre, come nel caso della forgiatura, è possibile ricorrere ad un fluxante per evitare che si verifichi il fenomeno ossidativo.

I vantaggi principali della saldatura a rulli sono:

- possibilità di giuntare metalli diversi;
- facilità di esecuzione;
- assenza di metallo d'apporto;
- pulizia del processo e assenza di gas;
- tempo richiesto ridotto.

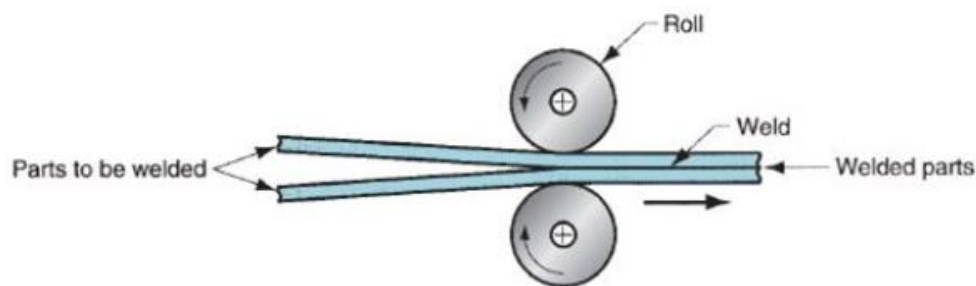


Figura 22 - Roll welding

Nonostante i già citati aspetti positivi, esistono alcuni evidenti limiti relativamente al processo. Infatti, sono richieste attrezzature costose in grado di esercitare un'elevatissima pressione, ma il risultato finale è qualitativamente peggiore rispetto ad una saldatura ottenuta per fusione.

2.2.5.3. Friction Welding

La saldatura per attrito è descrivibile mediante quattro fasi consecutive, riportate nell'immagine sottostante.

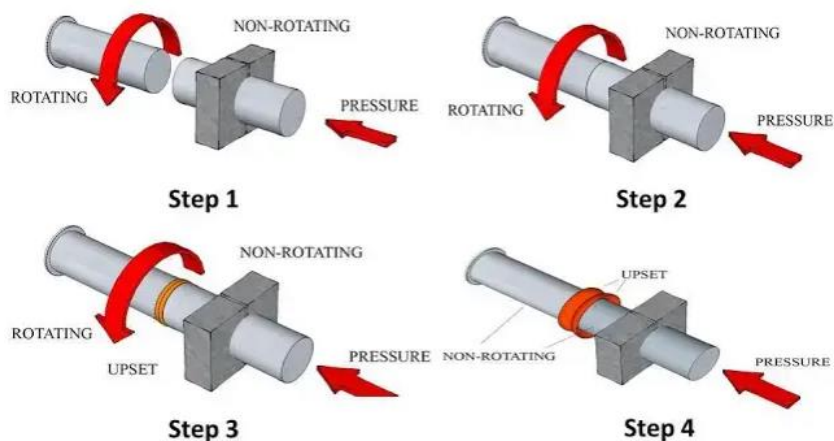


Figura 23 - Step successivi della saldatura per attrito

Durante la fase iniziale, i due cilindri da saldare si trovano a debita distanza ed uno dei due viene posto in rotazione. Successivamente, applicando una determinata pressione, l'altro

cilindro viene avvicinato e i due sono posti a contatto sfruttando l'attrito che si genera e la deformazione termica, senza ricorrere a materiale d'apporto. Le due facce, sfregandosi, si scaldano determinando un innalzamento di temperatura. Nel momento in cui viene raggiunta la plasticità prevista, la rotazione viene interrotta ed è incrementata la pressione esercitata. Il materiale che viene spinto verso l'esterno trascina via le impurezze presenti sulle due facce, le quali risulteranno così collegate insieme. [11]

2.2.5.4. Friction Stir Welding

La saldatura per attrito e mescolamento è una metodologia avanzata impiegata per congiungere due lastre di materiale metallico. Di fondamentale importanza è il terzo elemento coinvolto, un utensile cilindrico la cui punta penetra tra i due pezzi e viene fatta ruotare lungo la linea di giunzione. A causa dell'attrito originato tra i tre componenti, si genera calore che porta a fusione le due lastre. Tenzialmente, le lamine sottoposte a questo trattamento sono costituite da leghe di alluminio e utensili in acciaio. Il procedimento è schematizzato nell'immagine a fianco:

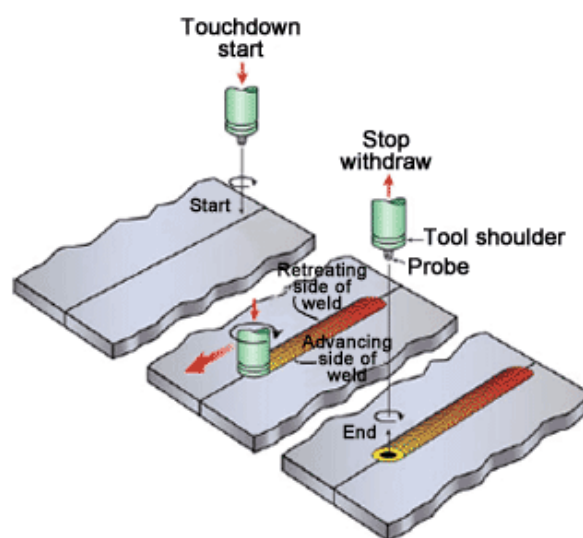


Figura 24 - Schema esemplificativo della Friction stir welding

In confronto ai metodi tradizionali, i vantaggi dovuti all'impiego della saldatura per attrito e mescolamento sono: incremento della produttività; possibilità di saldare materiali termoplastici; realizzazione di giunti esenti da sbavature e opportunità di ricorrere alla saldatura automatizzata, con conseguente incremento della qualità e riduzione delle difettosità. [11]

2.2.5.5. Explosion Welding

La saldatura per impatto sfrutta la detonazione controllata di materiale esplosivo per forzare il contatto tra metalli e realizzarne l'unione. Solitamente, è impiegata per il rivestimento di lastre di acciai al carbonio con uno strato sottile di acciaio inossidabile. Tra la lamiera e lo strato di rivestimento è presente un gap, mentre al di sopra del rivestimento stesso è posizionato l'esplosivo. Quest'ultimo, una volta detonato, genera un'onda d'urto che progredisce tra le superfici dei materiali coinvolti inducendoli a costituire un legame metallico.

Il beneficio maggiore è dato dalla possibilità di unire tra loro metalli che difficilmente potrebbero essere aggregati mediante saldatura per fusione. Inoltre, questa procedura è realizzabile in tempi brevi su ampie superfici. Però, per poter essere applicata, necessita di

studi approfonditi sulle varie tipologie di esplosivi, al fine di garantirne l'esecuzione in totale sicurezza. [12]

L'immagine seguente raffigura ciò che accade durante il processo:

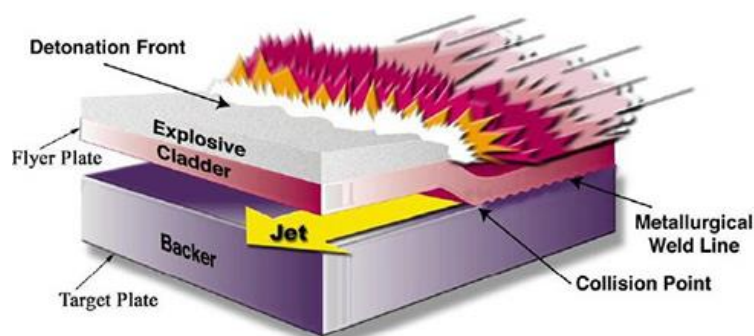


Figura 25 - Saldatura per esplosione

2.3. Saldabilità degli acciai

Per saldabilità di un materiale metallico si intende la possibilità di realizzare continuità metallica tramite una giunzione, ossia un'unione chimico-fisica, volta a soddisfare determinati requisiti, come la resistenza meccanica o la resistenza alla corrosione, previsti a seconda dell'impiego. Si tratta quindi di una caratteristica qualitativa, valutata in base all'utilizzo previsto per il giunto saldato. La saldabilità è determinata dalla struttura metallurgica della zona fusa e soprattutto della zona termicamente alterata, le cui proprietà definiscono la modalità di funzionamento del giunto di saldatura.

La saldabilità di un acciaio può essere espressa da un parametro detto "carbonio equivalente", determinato dalla seguente espressione, nella quale ciascun simbolo rappresenta la percentuale in massa del corrispondente elemento:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (2.4)$$

Una volta calcolato il carbonio equivalente sulla base della composizione chimica di un acciaio, esso risulterà facilmente saldabile se C_{eq} è inferiore al valore 0,25. Se, invece, si ottiene un valore superiore a 0,5, l'acciaio considerato è ritenuto non saldabile. Un esempio di categoria di acciai non saldabile è l'acciaio da bonifica. Quelli a basso tenore di carbonio, invece, hanno buona saldabilità e vengono impiegati per realizzare strutture saldate di dimensioni importanti. Nel caso in cui si debba saldare un materiale con C_{eq} superiore al valore limite di 0,5, è opportuno eseguire fasi di pre e post riscaldamento. Infatti, un riscaldamento precedente alla saldatura consente di ridurre la velocità di raffreddamento della ZTA, evitando quasi completamente la formazione di martensite, che comprometterebbe la saldabilità stessa. Il riscaldamento effettuato in seguito alla saldatura, invece, consente di rinvenire l'eventuale martensite che si è formata e diminuire le tensioni residue. [13]

2.3.1. Acciai a basso tenore di carbonio

Si tratta di acciai non legati impiegati senza ricorrere a particolari trattamenti termici. Costituiscono la categoria di acciai più diffusa e sono utilizzati in diversi ambiti, soprattutto nelle costruzioni.

Risultano facilmente saldabili con molte tipologie di processi, ma va sottolineata la necessità di eseguire trattamenti di degasaggio nel caso di saldatura laser o a fascio elettronico. Tenzialmente, la buona saldabilità è favorita dall'assenza di fasi eccessivamente dure nella ZTA.

Negli acciai a basso tenore di carbonio, durante la saldatura, è possibile incorrere in difetti vari:

- Cricche a caldo, che si verificano quando gli acciai presentano una significativa quantità di impurezze. Nel caso di saldatura ad elettrodo rivestito, è possibile ridurre il rischio di criccabilità a caldo ricorrendo a rivestimenti basici, con cui viene depurato il bagno di fusione. Se, invece, la tecnologia di saldatura impiegata non prevede il coinvolgimento di metallo d'apporto, è fondamentale eseguire un'attenta ispezione relativamente alla composizione del materiale trattato. Per esempio, se il tenore di carbonio è inferiore allo 0,1%, può succedere che lo zolfo presente venga dirottato a bordo grano, causando infragilimento e aumentando la probabilità di formazione di cricche a caldo. Altri parametri da tenere sotto osservazione sono i rapporti tra manganese e silicio e tra manganese e zolfo. Premettendo che il manganese svolge un'azione purificante e desolforante, mentre il silicio provoca infragilimento del bagno di fusione, ne scaturisce che l'effettiva saldabilità senza generazione di cricche è garantita quando il tenore di manganese è tre volte superiore a quello di silicio e venti volte superiore a quello di zolfo. Inoltre, si può valutare la tendenza di un materiale a sviluppare cicche a caldo sulla base degli elementi che lo compongono e delle loro quantità, secondo la seguente formulazione:

$$HCS = \frac{C \left[S + P + \frac{Si}{15} + \frac{Ni}{100} \right] 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V} \quad (2.5)$$

Dove "HCS" indica la "Sensibilità alla criccabilità a caldo". Se il valore risultante è inferiore a 2 per un giunto testa a testa o 2,5 per un giunto ad angolo, è possibile eseguire la saldatura in sicurezza, senza che si sviluppino cricche;

- Cricche a freddo, raramente riscontrabili in acciai a basso tenore di carbonio. La probabilità cresce nel caso in cui si saldino componenti caratterizzati da spessori rilevanti, per i quali aumenta la velocità di raffreddamento favorendo strutture di tempra. In questi casi è opportuno effettuare operazioni di preriscaldamento. L'ostacolo maggiore per la saldabilità degli acciai a basso tenore di carbonio è dovuto al fatto che molti processi di saldatura impiegati introducono l'idrogeno, che è responsabile della formazione di cricche a freddo;
- Strappi lamellari, anch'essi rilevabili durante la saldatura di componenti ad elevato spessore. Sono dovuti ad una commistione tra scarsa duttilità in direzione dello spessore

ed elevata sollecitazione. Inoltre, alcune inclusioni come i silicati di manganese, i silicati di alluminio e i solfuri contribuiscono alla generazione di strappi lamellari. Il rimedio più efficace consiste nell'utilizzare acciai con un ridotto numero di inclusioni. In particolare, è consigliabile limitare il tenore di zolfo oppure introdurre un elemento come il calcio, che determina l'indurimento dei solfuri riducendo il rischio di strappo. In aggiunta, è necessario tenere sotto osservazione la quantità di idrogeno presente, che costituisce un pericoloso fattore di infragilimento;

- Rotture fragili. Questa categoria di acciai non presenta elevati valori di tenacità. Infatti, nel caso di elevate sollecitazioni, in seguito alla saldatura è opportuno effettuare trattamenti termici di distensione e rinvenimento oppure normalizzazione, utile per ristabilire i valori iniziali di tenacità. [13]

2.3.2. Acciai microlegati

Questa categoria di acciai fu sviluppata negli anni Settanta con l'intento di combinare caratteristiche come saldabilità, tenacità e resistenza a fatica. La loro estesa diffusione è da attribuire principalmente alle buone proprietà e ai costi ridotti di realizzazione, dovuti ad una composizione chimica scarna. I campi di maggiore applicazione sono la fabbricazione di elementi portanti per automobili, costruzioni per l'edilizia e carpenteria.

Esistono sette differenti tipologie di acciai microlegati:

- Acciai perlitici, ossia acciai al carbonio contenenti quantità rilevanti di manganese a cui vengono sommati microleganti, per ottenere benefici in termini qualitativi;
- Acciai dual-phase, composti da due fasi differenti: matrice ferritica e martensite;
- Acciai resistenti alla corrosione atmosferica, caratterizzati dalla presenza di elementi di lega come fosforo e rame, utili ad incrementarne la resistenza;
- Acciai con controllo della forma delle inclusioni, contenenti elementi di lega come calcio, titanio e zirconio che trasformano da allungate a globulizzate le inclusioni di zolfo. Un ulteriore beneficio è l'incremento di tenacità e duttilità;
- Acciai a ferrite aciculare, contenenti tenori di carbonio inferiori allo 0,1%. Si tratta di acciai saldabili, tenaci e con snervamento molto elevato;
- Acciai microlegati a struttura ferritico-perlitica, caratterizzati da indurimento per precipitazione dovuto alla presenza di ridotti tenori di elementi formatori di carburi, nitruri e carbonitruri;
- Acciai resistenti all' "Hydrogen Induced Cracking", cioè al danneggiamento indotto dalla presenza di idrogeno. Sono caratterizzati da basso tenore di carbonio e zolfo, inclusioni globulizzate e ridotta segregazione del manganese.

In generale, è bene specificare che esistono acciai in grado di combinare caratteristiche appartenenti a categorie differenti, a seconda dell'applicazione prevista.

Dal punto di vista della saldabilità gli acciai microlegati, proprio come gli acciai al carbonio, possono essere sottoposti a qualsiasi tipologia di saldatura. Solitamente, vengono impiegati elettrodi che consentono di limitare la quantità di idrogeno presente e, per componenti di spessore superiore ai 25mm, è bene ricorrere ad un riscaldamento preventivo. L'obiettivo,

complessivamente, è quello di non apportare eccessive quantità di calore per evitare di stravolgere la struttura a grano fine degli acciai microlegati. Procedimenti di saldatura come l'arco sommerso, l'elettrogas o l'elettroscoria determinano una diminuzione delle prestazioni fornite in termini di tenacità, resistenza e carico di snervamento. Pertanto, a tali processi vanno preferite le saldature MIG e MAG, che introducono ridotte quantità di idrogeno. In alternativa, nel caso di produzioni in serie, possono essere impiegate procedure a fascio elettronico o laser, a seconda che lo spessore del componente da trattare sia più o meno importante. Per incrementare il valore della resistenza in zona fusa vanno evitati elettrodi al vanadio, per i quali l'apporto termico di passate successive determinerebbe la precipitazione di carburi. Al contrario, per il medesimo scopo, è possibile introdurre elementi di lega come cromo, nichel o molibdeno. Infine, dal momento che la temprabilità della zona fusa può apparire nettamente più alta di quella dell'acciaio microlegato, con conseguente possibilità di generare cricche a freddo, è preferibile ricorrere a procedimenti di saldatura che limitino l'introduzione di idrogeno in zona fusa. I più impiegati, come detto in precedenza, sono le saldature MIG, MAG, TIG, a fascio elettronico e laser.

Come per gli acciai a basso tenore di carbonio, anche per quelli microlegati è possibile incorrere in varie tipologie di difetti:

- Cricche a caldo, dovute ad elementi disossidanti come l'alluminio, che incrementano la solubilità delle inclusioni di zolfo. In generale, l'introduzione di elementi di lega non influenza la possibilità che si sviluppino cricche di questo tipo. Al fine di limitarne la presenza, soprattutto per gli acciai caratterizzati da elevata resistenza, è bene mantenere sempre sotto controllo il tenore di manganese. Infatti, il rapporto tra la quantità di manganese e quella di silicio non deve superare il valore 3,5, che causerebbe la generazione di silicati di ferro e manganese.

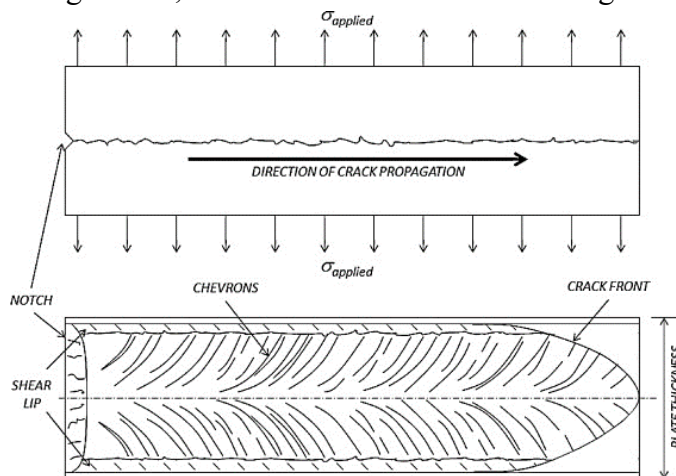


Figura 26 - Illustrazione schematica della frattura chevron

Questi ultimi si creano all'interfaccia delle dendriti durante la solidificazione della zona fusa, determinando la formazione di cricche a caldo, dette "chevron cracks" per la loro forma a V (figura 26);

- Cricche a freddo, sostanzialmente derivanti dalla composizione chimica dell'acciaio microlegato. Le cause principali sono la presenza di idrogeno, introdotto dalla maggior parte dei processi di saldatura impiegati, e le strutture che scaturiscono dalle trasformazioni indotte dal calore apportato durante la saldatura. Inoltre, i componenti di maggior spessore sono soggetti a velocità di raffreddamento più elevate, che accentuano ulteriormente il rischio di formazione di cricche a freddo. Un'altra aggravante è la presenza di tensioni residue, che crescono all'aumentare del limite elastico dell'acciaio considerato. Di conseguenza, è evidente che per evitare la formazione di cricche a

freddo sia necessario ridurre la velocità di raffreddamento ed il tenore di idrogeno. Controllare la velocità consente di ridurre la formazione di strutture dure, come la martensite, nella ZTA. Allo stesso tempo, però, va evitato un accrescimento del grano smisurato. Per inibire l'azione dell'idrogeno, invece, è necessario ricorrere ad operazioni come il preriscaldamento oppure l'incremento della temperatura di interpass o di post-riscaldamento. Più in generale, preriscaldamento, temperatura di interpass e post-riscaldamento hanno molteplici risvolti positivi. Oltre a favorire la diffusione dell'idrogeno, consentono di variare le tensioni residue dovute alla saldatura e manipolare la struttura finale rallentando il raffreddamento.

Per valutare la probabilità che si formino cricche a freddo, nel caso di acciai microlegati a basso tenore di carbonio, è stata definita la seguente equazione:

$$P_W = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40000} \quad (2.6)$$

Dove P_W indica il potenziale pericolo per lo sviluppo di cricche; P_{CM} è una grandezza fortemente legata alla composizione dell'acciaio; H è la quantità di idrogeno contenuta nella zona fusa; K è dipendente dalla tipologia di giunto saldato.

In particolare, P_{CM} è un parametro definibile con l'espressione:

$$P_{CM} = C + 5B + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn+Cr+Cu)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad (2.7)$$

Per gli acciai microlegati, P_{CM} è ritenuto più affidabile del parametro C_{eq} , ossia "carbonio equivalente", maggiormente utilizzato per gli acciai a basso contenuto di carbonio;

- Strappi lamellari, difficilmente riscontrabili negli acciai microlegati. Ciò è dovuto alla quantità limitata di inclusioni presenti, ulteriormente ridotta dall'aggiunta di calcio;
- Rotture fragili, anch'esse poco presenti a causa del grano fine che caratterizza questa classe di acciai. In questo senso, è sufficiente limitare gli apporti di calore per prevenire la formazione di grani grossi. Solamente nel caso di applicazioni a basse temperature la frattura fragile diventa un problema particolarmente rilevante;
- Diminuzione del limite di snervamento, dovuto alla coalescenza dei precipitati;
- Incremento/decremento del valore di tenacità, rispettivamente dovuto a riprecipitazioni/ricristallizzazioni.

Le ultime due tipologie di difetti sono da attribuire a trattamenti termici eseguiti su acciai microlegati ad elevata resistenza, le cui proprietà principali risultano strettamente dipendenti dal tenore di precipitati. Per esempio, effettuare una distensione comporta la coalescenza dei precipitati, con successivo incremento di duttilità, e la ricristallizzazione dei grani, a cui segue un decremento della tenacità. [13]

2.3.2.1. Acciai utilizzati in Manitowoc

Per la realizzazione di travi stabilizzatori, su cui è incentrato lo studio condotto, la Manitowoc S.r.l. si serve di lamiere di S500MC, un acciaio microlegato ottenuto per

laminazione a caldo. Si tratta di un acciaio strutturale ad alto limite di snervamento, impiegato per formatura, piegatura e imbutitura a freddo. Appartenendo alla categoria dei microlegati, è caratterizzato da grano fine. Pertanto, il tenore di zolfo e la quantità di inclusioni risultano limitate. Le lamiere utilizzate sono di vario spessore, ossia 5mm, 6mm, 10mm e 12mm.

Nella tabella seguente sono riportate le proprietà meccaniche previste da normativa per l'acciaio S500MC:

Carico di snervamento (Mpa)	≥ 500
Resistenza alla trazione (Mpa)	550-770
Allungamento A80% con spessore nominale < 3mm	≥ 12
Allungamento A5% con spessore nominale ≥ 3 mm	≥ 14
Prova di resilienza (J)	≥ 40

Tabella 1 - Proprietà meccaniche acciaio S500MC

La tabella 2 rappresenta, invece, la composizione chimica standard in percentuale dell'acciaio S500MC, ossia gli elementi presenti con le loro quantità minime o massime previste:

Elemento	Al	C	Mn	Nb	P	S	Si	Ti	V
% Min.	0.015								
% Max.		0.12	1.70	0.09	0.025	0.015	0.50	0.15	0.2

Tabella 2 - Composizione chimica dell'acciaio S500MC prevista da normativa

Dopo aver illustrato genericamente le proprietà dell'acciaio posto sotto analisi, a titolo esemplificativo vengono riportate le caratteristiche meccaniche e la composizione chimica di una lamiera di spessore pari a 6mm, i cui dati sono stati estrapolati da una certificazione fornita dalla Manitowoc S.r.l.:

Carico di snervamento (Mpa)	631
Resistenza alla trazione (Mpa)	668
Allungamento A% con spessore nominale ≥ 3 mm	21
Prova di resilienza (J)	92

Tabella 3 - Proprietà meccaniche dell'acciaio S500MC per una lamiera di spessore 6mm

Com'era auspicabile, tutti i valori presenti in tabella 3 sono conformi a quelli previsti da normativa e riportati in tabella 1. Analogamente, è possibile effettuare una verifica relativamente alla composizione chimica:

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr
%	0.059	1.566	0.009	0.001	0.028	0.031	0.008	0.020
Elemento	Ni	Mo	Nb	V	N	B	Ti	Sn
%	0.021	0.003	0.072	0.005	0.0030	0.0000	0.043	0.003

Tabella 4 - Composizione chimica in percentuale dell'acciaio S500MC per una lamiera di spessore 6mm

Anche in questo caso, osservando i componenti presenti e le rispettive percentuali riportate in tabella 4, si rientra nei limiti previsti da normativa (tabella 1).

Infine, ricordando la formulazione utilizzata per ricavare il carbonio equivalente, è possibile calcolarne il valore sulla base della composizione chimica di una lamiera di acciaio S500MC di spessore pari a 6mm:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} = \dots = 0,328 \quad (2.8)$$

La stessa analisi, non effettuata per ovvie ragioni, potrebbe essere condotta su lamiere di spessore 5mm, 10mm o 12mm.

2.4. Difetti di saldatura

I difetti di saldatura sono anomalie che comportano una diminuzione significativa dei valori di tenacità e resistenza del giunto e rappresentano la causa delle fratture. Tendenzialmente, le proprietà di un giunto saldato dipendono da molteplici variabili:

- Esperienza del saldatore, legata sia al procedimento che alla posizione di saldatura impiegati. Un'inadeguata preparazione potrebbe comportare la nascita di imperfezioni operative;
- Parametri di saldatura, anch'essi definiti in relazione al processo adottato e al giunto realizzato. Un errore in fase di scelta di tali parametri comporta la formazione di imperfezioni metallurgiche;
- Proprietà meccaniche, in termini di resistenza e tenacità, che devono essere garantite dal giunto.

I difetti possono essere suddivisi in due grandi categorie, ossia quelli che si sviluppano in fase di realizzazione del giunto e quelli che si generano durante il funzionamento. Alla prima tipologia appartengono porosità, inclusioni solide/gassose, mancanze di fusione/penetrazione e imprecisioni di forma/dimensione del profilo. Durante il servizio,

invece, i componenti possono subire tensocorrosione oppure fratture fragili o fratture da fatica generate da cricche a freddo oppure a caldo.

Ulteriori classificazioni dei difetti possono essere fatte:

- In funzione della posizione, in base alla quale si può distinguere tra superficiali o volumetrici;
- A seconda della forma, si dividono in difetti bidimensionali e tridimensionali;
- In base alle cause da cui scaturiscono, ossia difetti operativi oppure metallurgici.

Per ovviare a questo genere di problemi, è possibile ricorrere a controlli indiretti, diretti o in corso d'opera. Nei controlli indiretti rientrano la presa visione della documentazione, la qualifica dei processi di saldatura, la certificazione degli operatori e l'approvazione del materiale d'apporto utilizzato. I controlli in corso d'opera possono essere semidistruttivi, distruttivi oppure semplici accertamenti delle modalità di lavorazione. Infine, i metodi diretti prevedono l'implementazione di controlli non distruttivi superficiali o volumetrici. [13]

2.4.1. Cricche

Le cricche sono fenditure generate da autotensioni dovute ad improvvise variazioni di temperatura. Si verificano in corrispondenza dei giunti di saldatura durante il raffreddamento del bagno di fusione, quando le tensioni diventano maggiori della resistenza del componente. Possono essere classificate in base alla forma (trasversali, longitudinali o di cratere) oppure in base alla posizione (nel materiale base, in zona fusa o in zona termicamente alterata). Inoltre, è bene distinguere tra cricche a caldo e cricche a freddo.

2.4.1.1. A freddo

Le cricche a freddo sono lesioni che hanno origine nella ZTA e si diffondono successivamente anche nel materiale base. Si tratta di cricche di tipo transgranulare, caratterizzate da uno sviluppo trasversale rispetto al cordone di saldatura. A seconda della quantità di idrogeno presente, possono verificarsi appena è stata raggiunta una temperatura sufficientemente bassa durante la fase di raffreddamento o addirittura nelle 48 ore seguenti. Il fenomeno ha origine nel caso in cui si verifichi la contemporanea presenza di tre cause: idrogeno, introdotto tramite materiale d'apporto o tramite i rivestimenti degli elettrodi oppure dovuto all'umidità; tensioni residue, inesorabilmente scaturite dal processo di

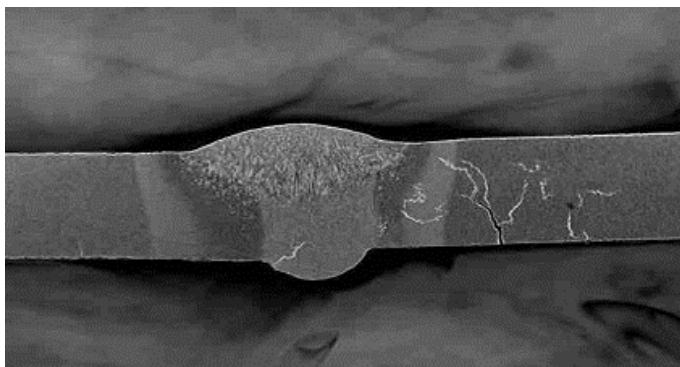


Figura 27 - Aspetto tipico di una cricca a freddo in ZTA

saldatura; strutture dure e fragili, generate da un raffreddamento eccessivamente rapido. I materiali maggiormente esposti a questo genere di difetto risultano essere gli acciai martensitici o ferritici, mentre non sono praticamente coinvolti quelli austenitici.

Esistono, però, differenti modalità con le quali prevenire o più in generale ridurre il rischio di formazione di cricche a freddo. Per limitare la quantità di idrogeno introdotta è possibile effettuare una completa essiccazione dei materiali d'apporto oppure compiere un riscaldamento preventivo. In alternativa, il ricorso a elettrodi basici garantisce una reazione con le particelle di idrogeno, di fatto inibendo l'effetto di infragilimento. Inoltre, il riscaldamento preventivo è utile anche per prolungare i tempi di raffreddamento, riducendo così le strutture dure e fragili che potrebbero rappresentare pericolosi siti di innesco. Infine, è vantaggioso ricorrere a procedure di distensione per ridimensionare le tensioni residue post-saldatura.

2.4.1.2. A caldo

Le cricche a caldo sono fenditure che si originano durante il raffreddamento del giunto saldato, in corrispondenza della zona fusa. Si sviluppano in direzione longitudinale rispetto al cordone ed il punto di innesco è proprio il centro di esso, poiché caratterizzato da tempi di raffreddamento più lunghi. Interessano indistintamente acciai martensitici, ferritici ed austenitici e sono riconducibili ad impurezze presenti nel bagno di fusione, come fosforo e zolfo. Questi elementi tendono a concentrarsi proprio nei siti caratterizzati da minor velocità di raffreddamento, ossia il centro del cordone. Inoltre, mentre il materiale circostante solidifica, le impurezze si trovano ancora allo stato fuso. La loro tardiva solidificazione comporta, quindi, la generazione di cavità da ritiro.

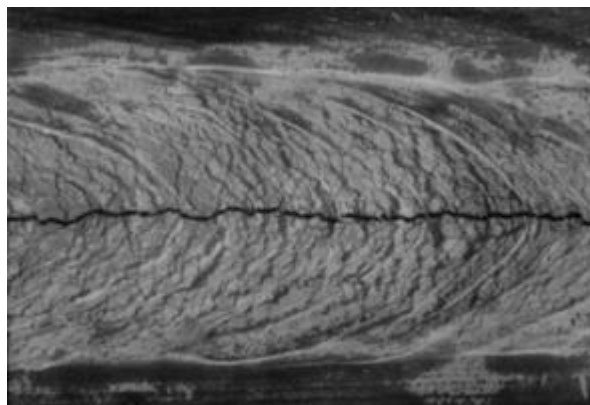


Figura 28 - Andamento caratteristico di una cricca a caldo

Anche le cricche a caldo possono essere limitate tramite opportuni accorgimenti. In primis, è bene ricorrere a materiali base con un ridotto tenore di carbonio e una limitata presenza di impurezze. In aggiunta, è necessario assicurare una modesta quantità di elementi contaminanti come zolfo e fosforo oppure introdurre nel bagno di fusione il manganese, in grado di reagire con gli elementi appena citati. Il risultato è la formazione di una scoria che viene portata in superficie, risultando facilmente rimovibile. Infine, è utile ricorrere a materiali con elevata velocità di raffreddamento, in modo tale da evitare che gli agenti contaminanti si addensino nella parte centrale del cordone di saldatura. In quest'ultimo caso, però, si incrementa la possibilità di formazione di cricche a freddo. [14]

2.4.2. Inclusioni

Si dividono in due categorie principali: solide o gassose.

2.4.2.1. Solide

Le inclusioni solide possono essere di natura metallica oppure no e si formano nel materiale saldato, ossia tra il metallo base e quello d'apporto. È possibile individuarne due tipologie: inclusioni di tungsteno e inclusioni di scoria.

Le prime si riscontrano solamente nel caso di saldatura TIG, a causa del fatto che l'elettrodo entra in contatto con il bagno di fusione depositando particelle di tungsteno, che daranno origine a inclusioni in seguito al raffreddamento del cordone di saldatura. Quelle di scoria, invece, si generano tendenzialmente durante l'esecuzione di saldature a passate multiple, ossia con elettrodi rivestiti o ad arco sommerso. Possono presentare aspetto allungato oppure irregolare. Nel primo caso si localizzano nella zona fusa, mentre nel secondo possono essere rilevate anche in altre aree interessate dal processo di saldatura.

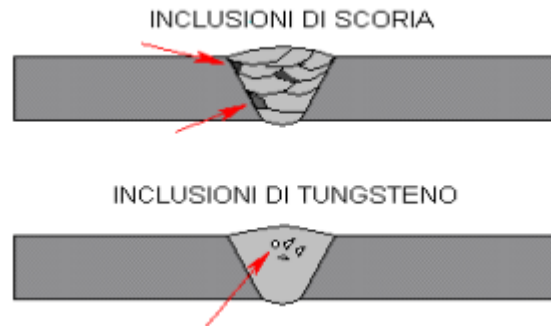


Figura 29 - Inclusioni solide

Le cause principali della formazione di inclusioni solide sono: un'inadeguata movimentazione dell'elettrodo rivestito, con il quale si depositano frammenti di tungsteno oppure materiale d'apporto sulla scoria, senza consentirne la separazione in superficie; un'imprecisa eliminazione della scoria tra passate successive, che ne determina l'intrappolamento nel materiale base. In generale questa tipologia di difetti, individuabile mediante controlli volumetrici, determina la realizzazione di un giunto non omogeneo. Per evitare tutto ciò, è sufficiente effettuare un'attenta rimozione della scoria tra le passate e monitorare l'azione protettiva del gas per scongiurare ulteriori contaminazioni esterne.

Le cause principali della formazione di inclusioni solide sono: un'inadeguata movimentazione dell'elettrodo rivestito, con il quale si depositano frammenti di tungsteno oppure materiale d'apporto sulla scoria, senza consentirne la separazione in superficie; un'imprecisa eliminazione della scoria tra passate successive, che ne determina l'intrappolamento nel materiale base. In generale questa tipologia di difetti, individuabile mediante controlli volumetrici, determina la realizzazione di un giunto non omogeneo. Per evitare tutto ciò, è sufficiente effettuare un'attenta rimozione della scoria tra le passate e monitorare l'azione protettiva del gas per scongiurare ulteriori contaminazioni esterne.

2.4.2.2. Gassose

Le inclusioni gassose sono delle cavità che hanno origine nella zona fusa e vengono classificate in base al loro aspetto e alla loro entità:

- Le porosità hanno dimensioni inferiori al mm e aspetto arrotondato;
- Le soffiature hanno estensione superiore al mm e aspetto arrotondato;
- I tarli sono caratterizzati da un aspetto allungato, riconducibile alla fuoriuscita di gas in fase di solidificazione del metallo saldato.

Le cause possono essere molteplici: sporcizia o ruggine individuabili sui lembi da saldare; umidità o erronea movimentazione degli elettrodi; eccessiva velocità di saldatura; gas sviluppati a causa di reazioni chimiche o di contaminanti.

Per ovviare alla generazione di inclusioni gassose è necessario eseguire un'attenta pulizia dei lembi da saldare, eventualmente riscaldandoli per asportarne l'umidità. Inoltre, vanno scelti accuratamente gli elettrodi da impiegare, dev'essere ridotta la velocità di deposizione del materiale d'apporto e garantita un'area protettiva nei confronti dell'atmosfera circostante.

Nella figura sottostante è riportato l'aspetto tipico di una saldatura soffiata, eseguita da un robot di saldatura presente nello stabilimento della Manitowoc a causa di un malfunzionamento dell'elettrovalvola, che non ha consentito il corretto flusso di gas protettivo:



Figura 31 - Aspetto tipico di una saldatura soffiata

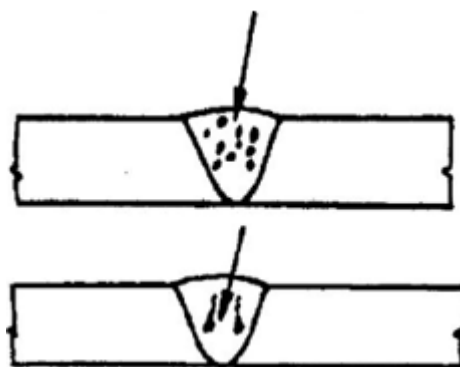


Figura 30 - Rappresentazione schematica di pori (in alto) e tarli (in basso)

2.4.3. Mancanza di fusione o di penetrazione

La mancanza di fusione consiste nella realizzazione di un collegamento difettoso tra i lembi di materiale da unire. Può essere causata da sporcizia o ossidazione dei lembi stessi, da un colpo d'arco, da un'errata inclinazione o un'eccessiva distanza dell'elettrodo, o da parametri di saldatura non corretti. In quest'ultimo caso, un'intensità di corrente insufficiente o una tensione ridotta determinano l'incompleta fusione dei materiali, con conseguenze pesanti sulle prestazioni garantite dal giunto saldato. Possibili azioni correttive possono essere implementate per ridurre il rischio che si verifichi questo problema. Tra queste rientrano la pulizia dei lembi, l'effettuazione di un riscaldamento preventivo e la corretta selezione dei parametri di saldatura e degli elettrodi da impiegare.



Figura 32 - Mancanza di fusione

La mancanza di penetrazione, invece, consiste nel riempimento parziale del gap presente tra i lembi da unire, a causa di una fusione incompleta di entrambi. Solitamente, è attribuibile ad un'eccessiva velocità di deposizione del metallo d'apporto oppure alla sporcizia dei lembi. I rimedi possibili sono analoghi a quelli illustrati per la mancata fusione. [14]

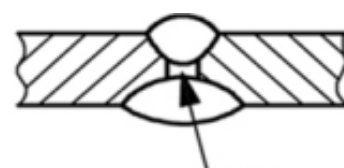


Figura 33 - Mancanza di penetrazione

2.4.4. Incollature

Le incollature sono dovute all'interposizione di un sottile strato di ossido tra la zona fusa ed il lembo da unire, come indicati in figura 34. Sono tipiche dei processi MIG/MAG o della saldatura ossiacetilenica e sono riconducibili a velocità troppo elevate o scarso apporto termico. La diretta conseguenza è una marcata diminuzione della resistenza del giunto saldato, con alte probabilità di generare fratture.

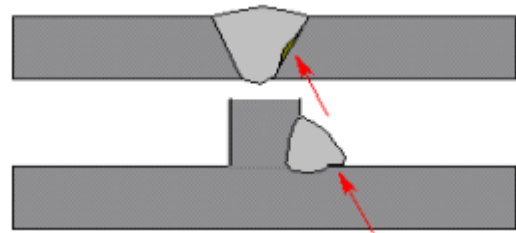


Figura 34 - Aspetto caratteristico dell'incollatura

2.4.5. Forma e dimensione

I difetti di forma e dimensione sono imprecisioni geometriche o superficiali determinate dalle modalità operative. Si distinguono in:

- Eccesso di sovrametallo, dovuto ad una quantità di materiale d'apporto superiore a quella richiesta. La causa è l'impiego di una corrente elettrica ad intensità troppo alta, che andrebbe regolata a seconda della necessità. In alternativa, nel caso in cui sia già stato realizzato il giunto saldato, è possibile procedere con una rasatura dello stesso;
- Incisioni marginali, anch'esse dovute a correnti elettriche di intensità troppo elevata oppure ad un incorretto maneggio della torcia di saldatura;
- Irregolarità superficiali, riconducibili ad una velocità troppo elevata o un arco troppo lungo;
- Riempimento incompleto, che si verifica nel caso in cui il materiale d'apporto non sia sufficiente a riempire il gap tra i lembi da unire;
- Slivellamento dei membri, ossia errori commessi in fase di montaggio che rischiano di portare a mancanze di fusione.

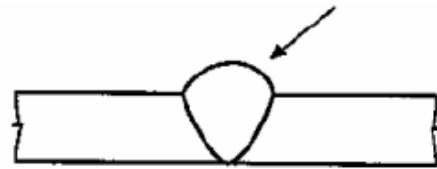


Figura 35 - Eccesso di sovrametallo



Figura 36 - Incisioni marginali



Figura 37 - Slivellamento dei membri

Infine, esistono anche altri tipi di difetti di saldatura che non sono stati menzionati. Per esempio, i colpi d'arco, gli spruzzi, gli strappi superficiali, i colpi di mola, la puntatura imprecisa o i residui di flusso/scoria. [15]

3. Robot

La parola robot deriva dal termine cecoslovacco “robota”, che significa *lavoratore*. Idealmente, si intende una macchina priva dei limiti che condizionano il genere umano, ma capace di svolgere proprio le mansioni desinate all’uomo. In modo più generale, un robot è descritto come “*un manipolatore multifunzionale riprogrammabile, progettato per movimentare materiali, pezzi, utensili o attrezzi speciali attraverso movimenti variabili programmati per l’esecuzione di una varietà di operazioni*”.

I motivi che hanno portato ad una vasta diffusione dei robot sono principalmente tre:

- Tecnici, poiché sono in grado di fornire prestazioni migliori di quelle dell’uomo a costi inferiori, garantendo la capacità di assolvere un numero sempre più alto di attività;
- Sociologici, sostanzialmente dovuti alla carenza della manodopera oppure ai costi troppo elevati o alla volontà delle persone di migliorare il proprio tenore di vita evitando attività strettamente manuali, che prevedano orari di lavoro piuttosto onerosi;
- Economici, scaturiti da un aumento globale della concorrenza.

La proprietà caratteristica dei robot è quella di poter maneggiare oggetti o strumenti per eseguire lavorazioni in modo flessibile. Ciò rende possibile l’esecuzione di vari compiti, come la realizzazione di saldature, verniciature, assemblaggi e manipolazioni. In questo scenario, le mansioni a cui è relegato l’uomo sono la programmazione, l’assistenza ed eventualmente la riparazione. [16]

I robot vengono suddivisi in due grandi famiglie:

- Robot non autonomi, ossia macchine impiegate per svolgere quelle mansioni che un tempo erano assegnate all’uomo. La peculiarità è dovuta al fatto che i robot sono in grado di eseguire le stesse attività con un’efficacia maggiore. Un tipico esempio sono i robot industriali, che garantiscono lavorazioni più rapide, meticolose, economiche e con un limitato intervento umano. In alternativa, sono classificati come “non autonomi” anche quei robot che operano in luoghi ostili o che maneggiano materiali pericolosi. In ogni caso, queste macchine possono essere direttamente controllate dall’uomo oppure governate da un software progettato per l’implementazione di azioni ripetitive, tipiche della produzione automatizzata;
- Robot autonomi, in grado di svolgere le attività per le quali sono stati programmati in modo indipendente, senza la supervisione dell’uomo. Ciò che maggiormente li differenzia dalla categoria precedente è la capacità di rispondere prontamente agli stimoli esterni, anche in occasioni impreviste. La programmazione alla base di questi dispositivi si serve di algoritmi avanzati, logica fuzzy e reti neurali. Ad oggi, i più diffusi sono impiegati per eseguire le pulizie in casa e tagliare l’erba in giardino. [17]

In generale, un robot è in grado di compiere movimenti analoghi a quelli del braccio di un uomo. Per questo motivo, quando si parla degli elementi che lo costituiscono, è possibile riscontrare un forte richiamo alla terminologia utilizzata per l’anatomia umana. Un robot è costituito da: corpo, cioè la struttura portante; spalla; braccio; gomito; polso; mano; dita, che

rappresentano l'organo di presa. Inoltre, ciascun robot è libero di compiere un determinato numero di movimenti, detti gradi di libertà. Più questo numero è elevato e maggiore sarà la flessibilità del robot stesso.

3.1. Elementi costitutivi

Ciascun robot è composto da quattro componenti imprescindibili:

- Il sistema meccanico;
- Il sistema di azionamento;
- L'apparato di controllo, anche detto "unità di governo";
- L'insieme dei sensori.

3.1.1. Struttura meccanica

La struttura meccanica definisce i primi tre gradi di libertà di un robot. A seconda del numero e della natura dei gradi di libertà, è possibile individuare varie tipologie di struttura per un robot industriale:

- Cartesiana;
- A portale;
- Cilindrica;
- Sferica;
- Antropomorfa o articolata;
- SCARA.

3.1.1.1. Cartesiana

La geometria cartesiana è ottenuta tramite tre giunti prismatici. Pertanto, la movimentazione avviene in linea retta lungo i tre assi cartesiani e ciascun punto raggiungibile nello spazio è identificato da una terna cartesiana. Si ottengono così strutture piuttosto imponenti, che risultano particolarmente utili nei casi in cui si voglia ottenere un posizionamento molto preciso di un oggetto nello spazio oppure per la movimentazione a lunga distanza di carichi onerosi. I robot cartesiani sono caratterizzati da un funzionamento semplice e da costi contenuti. Inoltre, la facilità di installazione e



Figura 38 - Robot cartesiano

gestione ed il caratteristico design modulare (adattabile, quindi, in funzione dello spazio a disposizione) ne hanno agevolato la diffusione. Un altro vantaggio è rappresentato dalla semplicità con cui è possibile applicare e garantire le norme di sicurezza per una struttura cartesiana, poiché il volume di lavoro è facilmente identificabile da un parallelepipedo individuato sulla base dei movimenti dei tre assi.

Per un robot cartesiano, è possibile distinguere due differenti sistemi di coordinate, come riportato in figura 39:

- X_0, Y_0, Z_0 è il sistema di coordinate generico, la cui origine è stabilita da chi realizza il robot;
- X_E, Y_E, Z_E è il sistema di coordinate della mano, la cui origine coincide con il centro della mano stessa.

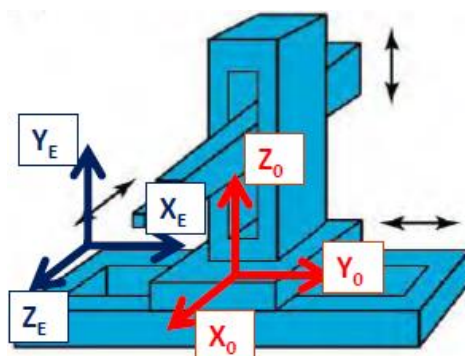


Figura 39 - Sistemi di coordinate per un robot cartesiano

Inoltre, la disposizione degli assi viene identificata tramite la regola della mano destra, in modo tale che Z_E risulti uscente dal centro di essa.

Le attività in cui sono maggiormente coinvolti i robot con struttura cartesiana sono dette “pick and place”, ossia operazioni di scelta e posizionamento dei componenti. Sono particolarmente adatti per l’automatizzazione dei processi di assemblaggio, imballaggio, saldatura a punti e per l’esecuzione di attività di carico/scarico. Il ricorso a macchinari di questo tipo garantisce l’abbattimento dei tempi, velocità più elevate e maggiore accuratezza in fase di posizionamento degli oggetti. [18]

Una variante del robot cartesiano è rappresentata dalla struttura a portale. Essa ha un funzionamento analogo a quello cartesiano dal punto di vista cinematico, ma è impiegata quando siano richiesti elevati volumi di lavoro, grazie alla possibilità di poter raggiungere agevolmente tutti i punti sottostanti alla struttura.



Figura 40 - Struttura a portale (sx) e schema con il relativo sistema di coordinate (dx)

La struttura a portale è utilizzata principalmente per eseguire assemblaggi o per lo spostamento ed il posizionamento di oggetti. [16]

3.1.1.2. Cilindrica

La struttura cilindrica è costituita da un giunto rotoidale che consente di compiere una rotazione e due giunti prismatici, che consentono la traslazione in orizzontale e verticale. Pertanto, a ciascun punto raggiungibile nello spazio è associata una terna di coordinate cilindriche. Il volume di lavoro è descritto da un cilindro cavo, ricavato dalla differenza tra un cilindro più esterno, ottenuto con la massima estensione del giunto prismatico che consente la traslazione orizzontale, ed uno più interno, nel caso in cui sia totalmente represso.

Le figure sottostanti rappresentano la configurazione schematica di un robot a struttura cilindrica ed il volume di lavoro che gli compete:

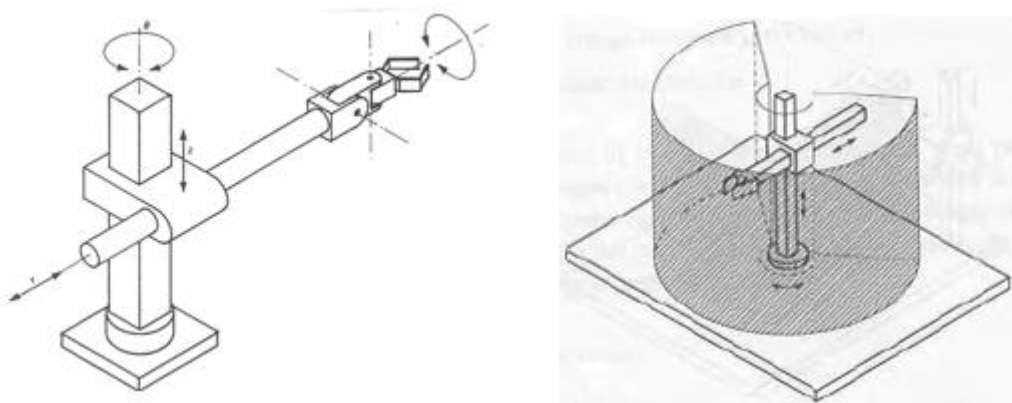


Figura 41 - Schema di un robot a struttura cilindrica (sx) e relativo volume di lavoro (dx)

Questi robot sono ideali per le lavorazioni in cui sia richiesto di movimentare oggetti o asservire macchine operatrici. Inoltre, sono adatti al raggiungimento di spazi stretti laddove richiesto. Per le operazioni di assemblaggio, invece, ai robot cilindrici sono preferiti gli “SCARA”, di cui verrà fatto un cenno nei paragrafi successivi.

Come rappresentato in figura 42, per definire il sistema di coordinate cilindriche del robot in questione sono necessari tre parametri:

- La rotazione, indicata con l’angolo ϑ ;
- Il raggio del braccio, indicato con r ;
- L’altezza del braccio, indicata con h .

Un qualsiasi punto P all’interno dello spazio di lavoro può essere descritto tramite le coordinate cilindriche appena introdotte, $P(\vartheta, r, h)$, oppure con coordinate cartesiane, $P(x, y, z)$.

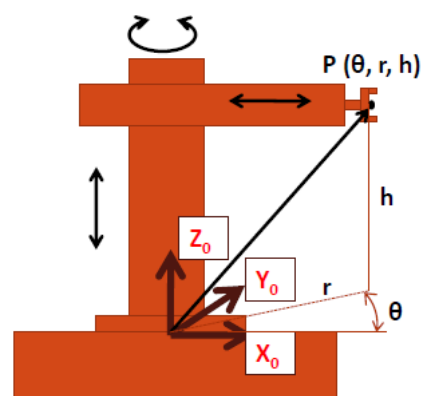


Figura 42 - Sistema di coordinate per un robot a struttura cilindrica

Per passare dalle coordinate cilindriche a quelle cartesiane si sfruttano le seguenti relazioni:

$$x = r \cos\vartheta \quad (3.1)$$

$$y = r \sin\vartheta \quad (3.2)$$

$$z = h \quad (3.3)$$

Tendenzialmente, però, l'operatore individua i punti nello spazio con coordinate cartesiane e li comunica al robot, il quale dovrà calcolare le corrispondenti grandezze in coordinate cilindriche per movimentare i propri assi. La conversione effettuata dall'unità di governo del robot seguirà, pertanto, queste equazioni:

$$h = z \quad (3.4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.5)$$

$$\vartheta = \arctan \frac{y}{x} \quad (3.6)$$

Rispetto ad una struttura cartesiana, quella cilindrica è caratterizzata da maggior flessibilità ma minor accuratezza, dovute alla presenza del giunto rotoidale. [16] [19]

3.1.1.3. Sferica

La struttura sferica è costituita da due giunti rotoidali, ciascuno dei quali consente la rotazione attorno ad un asse, ed un giunto prismatico, che consente di compiere una traslazione. Ogni punto che rientri nel volume di lavoro è descrivibile con una terna di coordinate polari. Tale volume coincide con la porzione di una sfera, il cui raggio della relativa superficie sferica è individuato nel caso di massima estensione del giunto prismatico che consente la traslazione.

Le figure sottostanti rappresentano la configurazione schematica di un robot a struttura sferica ed il volume di lavoro che gli compete:

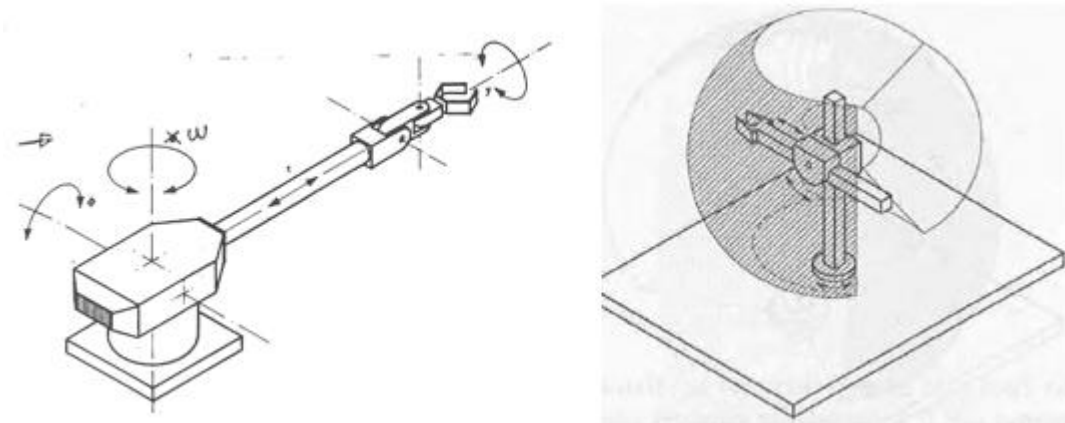


Figura 43 - Schema di un robot a struttura sferica (sx) e relativo volume di lavoro (dx)

Questi robot sono caratterizzati da strutture non molto complesse e poco costose, nel caso in cui non sia richiesta un'accuratezza molto elevata in fase di manipolazione e posizionamento. Inoltre, il fatto che possano essere situati a distanza rispetto allo spazio di lavoro ne ha determinato la facilità d'inserimento all'interno di sistemi per la produzione industriale. Raggiunsero la massima diffusione durante i primi anni di sviluppo della

robotica, per asservire macchine operatrici. Ad oggi, però, sono stati in gran parte soppiantati da robot antropomorfi. La saldatura a punti ed il posizionamento di carichi onerosi sono le uniche attività per le quali sono ancora impiegati i robot a struttura sferica.

In figura 44 è riportato il sistema di coordinate polari utilizzato nel caso di robot a struttura sferica, per il quale è necessario introdurre tre grandezze:

- Una rotazione, indicata con l'angolo ϑ ;
- Un'altra rotazione, indicata con l'angolo φ ;
- Il raggio del braccio, indicato con r .

Un qualsiasi punto P all'interno dello spazio di lavoro può essere descritto tramite le coordinate polari appena introdotte, $P(\vartheta, \varphi, r)$, oppure con coordinate cartesiane, $P(x, y, z)$.

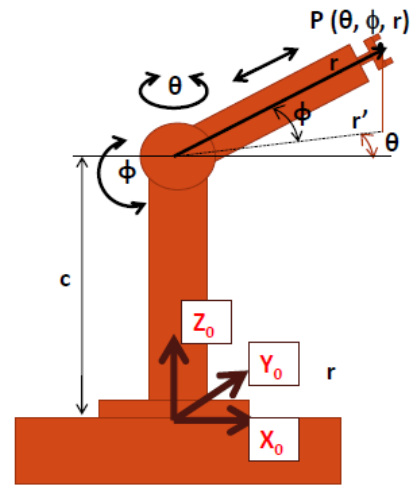


Figura 44 - Sistema di coordinate per un robot a struttura sferica

Per passare dalle coordinate polari a quelle cartesiane si sfruttano le seguenti relazioni:

$$x = r \cos(\varphi) \cos(\vartheta) \quad (3.7)$$

$$y = r \cos(\varphi) \sin(\vartheta) \quad (3.8)$$

$$z = r \sin(\varphi) \quad (3.9)$$

Tendenzialmente, però, l'operatore individua i punti nello spazio con coordinate cartesiane e li comunica al robot, il quale dovrà calcolare le corrispondenti grandezze in coordinate sferiche per movimentare i propri assi. La conversione effettuata dall'unità di governo del robot seguirà, pertanto, queste equazioni:

$$\vartheta = \arctan \frac{y}{x} \quad (3.10)$$

$$r = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos(\vartheta)} \quad (3.11)$$

$$\varphi = \arctan \frac{(z-c)}{r} \quad (3.12)$$

Rispetto ad una struttura cartesiana o cilindrica, quella sferica è caratterizzata da maggior flessibilità ma minor accuratezza, dovute alla presenza di due giunti rotoidali. [16] [19]

3.1.1.4. Antropomorfa

La struttura antropomorfa è costituita da tre giunti rotoidali, due dei quali consentono la rotazione attorno ad un asse orizzontale, mentre il terzo attorno ad uno verticale. Il volume di lavoro corrisponde ad una figura irregolare, al cui interno ciascun punto può essere raggiunto da ogni direzione e con qualunque inclinazione della mano. Questa tipologia di

robot è detta “antropomorfa”, poiché in grado di compiere movimenti analoghi a quelli del braccio umano.

Le figure sottostanti rappresentano la configurazione schematica di un robot antropomorfo ed il volume di lavoro che gli compete:

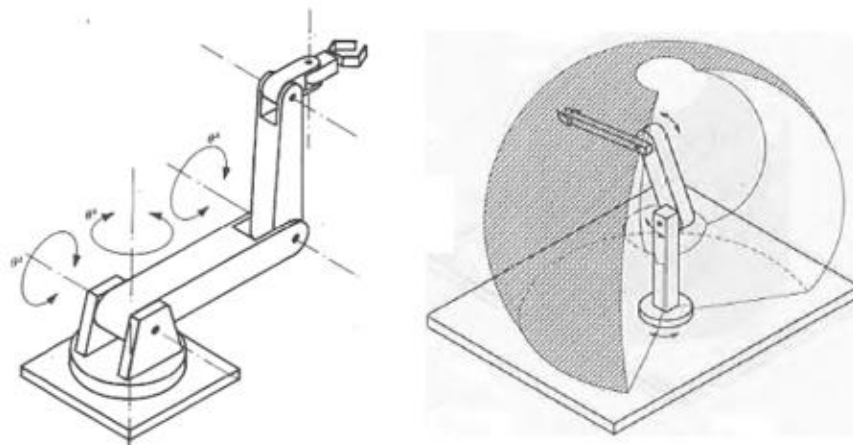


Figura 45 - Schema di un robot antropomorfo (sx) e relativo volume di lavoro (dx)

Per un robot antropomorfo, i sistemi di coordinate a cui è possibile ricorrere sono sostanzialmente due. Quello cartesiano in x,y,z oppure un sistema di coordinate alternativo, per il quale è necessario introdurre tre parametri:

- Rotazione attorno all'angolo ϑ_0 ;
- Rotazione attorno all'angolo ϑ_1 ;
- Rotazione attorno all'angolo ϑ_2 .

Un qualsiasi punto P all'interno dello spazio di lavoro può essere descritto tramite le coordinate appena introdotte, $P(\vartheta_0, \vartheta_1, \vartheta_2)$, oppure con coordinate cartesiane, $P(x,y,z)$. In questo caso, le relazioni che intercorrono tra i due sistemi non vengono esplicitate poiché particolarmente complicate.

Questo genere di robot è caratterizzato da una configurazione piuttosto complessa. Nonostante ciò, si tratta della categoria più diffusa in ambito industriale a causa dell'eccellente versatilità di cui dispone. Grazie a tale caratteristica, questi macchinari sono in grado di lavorare anche in volumi al cui interno siano presenti elementi che costituiscono ostruzione. Inoltre, la struttura compatta garantisce ingombri limitati, che possono essere ulteriormente ridotti ricorrendo al montaggio a soffitto.

Esistono, però, anche aspetti negativi. In primis, l'elevata versatilità determina inevitabilmente una riduzione della precisione. In aggiunta, va specificato che i costi da sostenere siano più elevati rispetto alle altre strutture robotizzate. Ciò è dovuto al fatto che il robot antropomorfo presenti un'architettura “a sbalzo”, particolarmente pericolosa una volta raggiunta la configurazione di massima estensione del braccio. Vanno previsti, pertanto, accorgimenti in fase di distribuzione dei pesi e di trasmissione del moto che ne incrementano la complessità.

In generale, i robot antropomorfi sono impiegati per asservire macchine operatrici o per eseguire attività di saldatura, verniciatura, assemblaggio, pallettizzazione, imballaggio e manipolazione. I principali vantaggi sono: massimizzazione della resa; incremento della flessibilità e della qualità; contenimento dei rischi e miglioramento delle condizioni di lavoro. [16] [19]

3.1.1.5. SCARA

Con il termine S.C.A.R.A. si intende “Selective Compliant Assembly Robot Arm”, ossia braccio robotizzato per assemblaggio a movimento selettivo. I tre gradi di libertà principali di un robot SCARA consentono la rotazione attorno a due assi paralleli ed una traslazione verticale. Il volume di lavoro così ottenuto è approssimabile con una porzione di cilindro.

Le figure sottostanti rappresentano la configurazione schematica di un robot SCARA ed il volume di lavoro che gli compete:

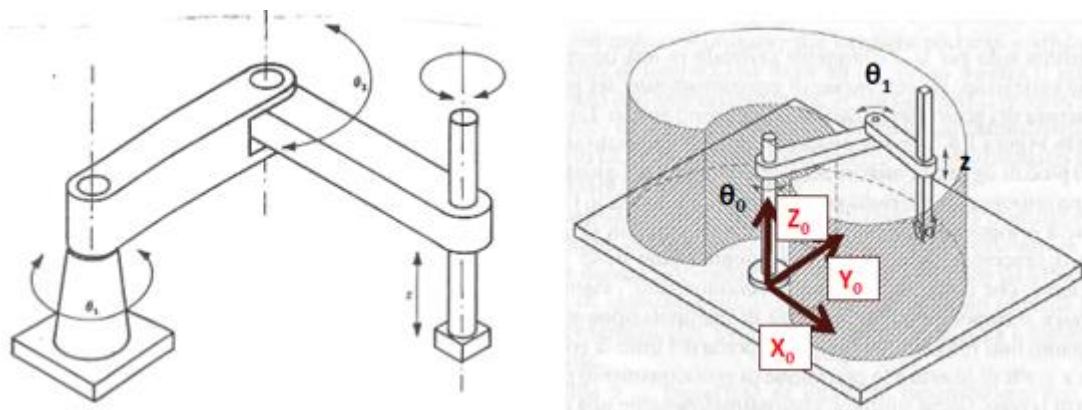


Figura 46 - Schema di un robot SCARA (sx) e relativo volume di lavoro (dx)

Per un robot SCARA, i sistemi di coordinate a cui è possibile ricorrere sono sostanzialmente due. Quello cartesiano in x,y,z oppure un sistema di coordinate alternativo, per il quale è necessario introdurre tre grandezze:

- Rotazione attorno all'angolo ϑ_0 ;
- Rotazione attorno all'angolo ϑ_1 ;
- Traslazione verticale, indicata con z .

Un qualsiasi punto P all'interno dello spazio di lavoro può essere descritto tramite le coordinate appena introdotte, $P(\vartheta_0, \vartheta_1, z)$, oppure con coordinate cartesiane, $P(x,y,z)$.

Come nel caso del robot antropomorfo, anche per la struttura SCARA le relazioni che intercorrono tra i due sistemi non vengono esplicitate poiché particolarmente complesse.

In generale, si può affermare che questa tipologia di robot sia caratterizzata da una notevole rigidità e che sia in grado di garantire elevata ripetibilità, accuratezza e velocità di posizionamento. Per queste ragioni, i campi di applicazione in cui si è maggiormente diffusa

sono la movimentazione di componenti leggeri e l'assemblaggio di oggetti di dimensioni contenute, in ambito meccanico ed elettronico.

Rispetto ai robot cilindrici, per i quali la movimentazione di oggetti prevede lo spostamento complessivo di tutta la struttura, il vantaggio nell'impiego di robot SCARA consiste nel poter effettuare operazioni di inserzione sfruttando la sola traslazione dell'asse z. In questo modo, dovrà essere sostenuta solo una porzione del peso complessivo della struttura, rendendo più fluide le operazioni di "pick and place".

D'altra parte, un aspetto negativo dei robot SCARA è rappresentato dall'impossibilità di operare in spazi ristretti, precludendone l'asservimento di macchine operatrici. Si tratta comunque di robot che garantiscono prestazioni limitate rispetto alle strutture antropomorfe, a causa di una minor flessibilità nel manovrare oggetti.

Nonostante ciò, nel caso in cui sia richiesto di svolgere agevoli attività di montaggio, è possibile acquistare robot SCARA a quattro gradi di libertà a costi contenuti. Al contrario, per garantire una manipolazione più fluida dei componenti, è necessario ricorrere a strutture a sei gradi di libertà, con costi simili a quelli sostenuti per un robot antropomorfo. [16] [19]

3.1.2. Polso, mano e organi di presa

Una volta definiti i primi tre gradi di libertà tramite la scelta della struttura, ne vengono conferiti al robot altri tre mediante il posizionamento del polso sul braccio. Come si evince dalla figura a fianco, i movimenti concessi sono:

- Rotazione del polso, attorno all'asse quattro;
- Basculamento del polso attorno all'asse cinque;
- Rotazione della parte terminale del polso attorno all'asse sei.

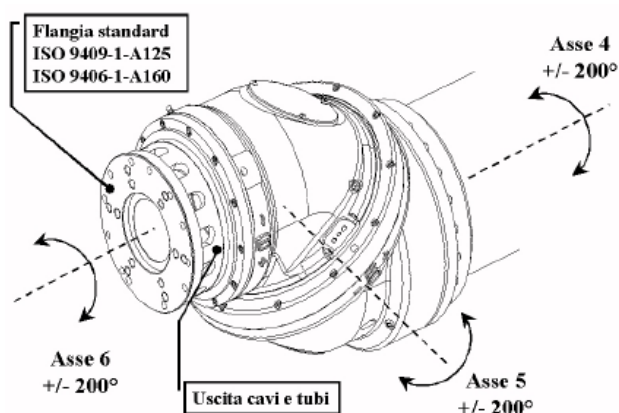


Figura 47 - Polso del robot

Sommando quelli dovuti alla struttura e quelli del polso, ciascun robot gode di sei gradi di libertà. Inoltre, nel caso in cui il robot sia libero di scorrere su una guida a pavimento, il numero totale ammonta a sette.

Al polso è solitamente connessa la mano, un componente fondamentale per il corretto svolgimento delle lavorazioni. Gli ulteriori gradi di libertà introdotti da questo elemento, però, sono considerati come esterni e non rientrano nel conteggio totale. La mano di un robot, a seconda dell'attività che dev'essere svolta, può assumere forme e dimensioni differenti:

- Utensili, in cui rientrano strumenti per saldatura a punti o ad arco, frese/mole per sbavatura, pistole per verniciatura, teste laser per il taglio;
- Organi di presa, ossia meccanismi dotati di organi presili (dita) che consentono di brandire e manovrare oggetti mediante semplici operazioni di apertura e chiusura.

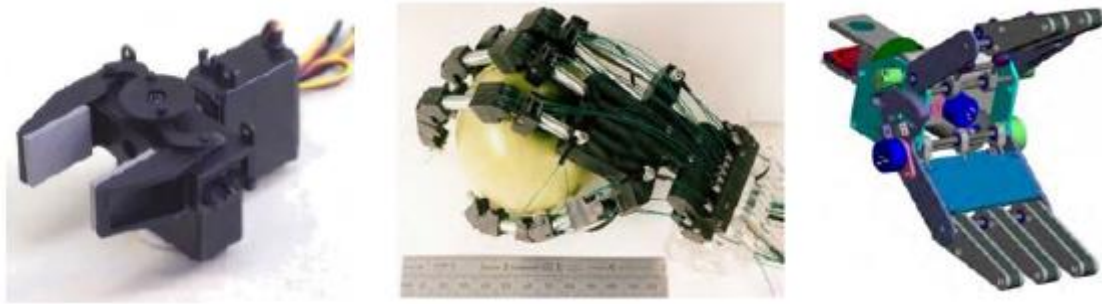


Figura 48 - Esempi di organi di presa di un robot

Tra i vari organi di presa esistenti, è possibile effettuare una classificazione a seconda della tipologia di comando utilizzato per afferrare gli oggetti:

- Organi di presa a comando meccanico, sostanzialmente rappresentati dal gripper meccanico, impiegato per la presa di differenti componenti;
- Organi di presa a comando magnetico, ossia il gripper magnetico, utilizzato per afferrare materiali di natura ferromagnetica;
- Organi di presa a depressione, nonché gripper a depressione. Essi si servono del “vuoto” creato tramite un tubo Venturi per generare una differenza di pressione che consenta di sollevare e manovrare materiali come le lastre di vetro.

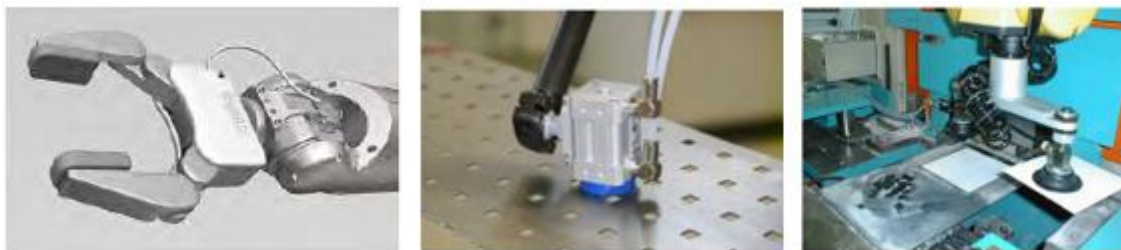


Figura 49 - Organi di presa a comando meccanico (sx), magnetico (centro), e a depressione (dx)

In generale, gli organi di presa sono per natura meno flessibili della mano dell'uomo. Pertanto, a seconda degli oggetti da manovrare, si ricorre a magazzini che siano in grado di eseguire il cambio gripper in modo automatico. [16]

3.1.3. Sistema di azionamento

Il sistema di azionamento di un robot consiste in un meccanismo che, in relazione ai segnali di comando, trasforma l'energia in ingresso in energia meccanica. È possibile ricorrere a tre differenti sistemi di azionamento, a seconda dell'applicazione prevista:

- Pneumatico, utilizzato per robot poco complessi che eseguono semplici operazioni di manipolazione e posizionamento di oggetti. Si tratta dell'azionamento più economico che, tuttavia, risulta poco rigido a causa dell'impiego di aria, per natura facilmente comprimibile;
- Oleodinamico, adottato per grandi robot adibiti alla movimentazione di carichi onerosi. In questo caso, i notevoli costi sostenuti dipendono principalmente dalle valvole

impiegate per il settaggio, che spesso risultano imprecise a causa dello sviluppo di vibrazioni. Il problema di maggior entità è costituito dalla regolazione dell'olio, per la quale sono richieste energia elevata e pressioni considerevoli, che generano perdite;

- Elettrico, basato sull'utilizzo di motori a corrente continua, motori brushless, motori passo passo o motori asincroni. L'azionamento elettrico è impiegato dalla maggior parte dei robot industriali a causa della facilità di gestione e dell'elevata accuratezza che è in grado di garantire. [16]

3.1.4. Unità di governo

L'unità di governo di un robot è una componente fondamentale che consente di svolgere principalmente le attività di programmazione e monitoraggio. Essa si configura come un armadio elettrico (figura 50) contenente gli azionamenti, le memorie, i quadri elettrici di potenza e le schede utili alla programmazione ed al monitoraggio. Queste ultime, in particolare, consentono il rilevamento dei dati raccolti dai sensori, la programmazione, l'interpolazione ed il controllo del movimento degli assi. L'unità di governo permette l'esecuzione delle seguenti attività:



Figura 50 - Unità di governo

- Comando, con cui vengono settate la posizione e la velocità desiderate in relazione a quelle precedenti alla messa in funzione;
- Cinematica, utile a definire la movimentazione degli assi in funzione della posizione voluta;
- Dinamica, che consente di stabilire la velocità di spostamento degli assi per il raggiungimento delle coordinate impostate, evitando lo sviluppo di vibrazioni;
- Gestione dei sensori, con cui si rilevano le informazioni utili per la corretta movimentazione dei vari assi.

L'unità di governo adotta uno schema di controllo ad anello chiuso con doppia retroazione, su posizione e velocità. Il controllo può essere implementato con due modalità:

- Punto a punto, senza effettuare il controllo della traiettoria tra punti consecutivi. Sono adatte a questa tipologia di controllo le attività di manipolazione, assemblaggio e saldatura a punti;
- Continuo, effettuando il controllo della traiettoria tra punti consecutivi mediante un interpolatore. È impiegato per eseguire operazioni di verniciatura e saldatura ad arco.

All'unità di controllo, fisicamente separata dalla struttura meccanica del robot, sono connesse il monitor e la tastiera per la programmazione, i trasduttori di posizione ed i sensori utilizzati per la raccolta dati. [20]

3.1.5. Sensori

I sensori consentono ai robot di assimilare informazioni e potersi interfacciare con l'ambiente circostante, costituito dai macchinari e dagli strumenti con cui interagiscono. Spesso, i robot sono impiegati per l'asservimento di macchine operatrici adibite alle lavorazioni in ambito industriale. Affinché ciò avvenga correttamente, è necessario che i sensori agevolino il robot nella gestione di ogni aspetto della produzione, dalla disponibilità di materiale grezzo da lavorare allo spazio necessario allo stoccaggio dei prodotti finiti. Esistono differenti tipologie di sensori che possono essere adottati:

- Sensori di contatto. Appartengono a questa categoria i sensori sensibili alla pressione, i microinterruttori e i sensori capacitivi/induttivi di prossimità. Sono posizionati sulle dita del robot ed utilizzati per valutare la presenza/assenza di un componente. Risultano particolarmente utili per effettuare operazioni di assemblaggio e per eseguire controlli o per manovrare oggetti;
- Sensori di forza. Consentono di eseguire misure di forze statiche e dinamiche. Le forze statiche sono impresse dal robot sui componenti durante la fase di presa, mentre quelle dinamiche vengono esercitate durante la movimentazione degli oggetti. In generale, conoscere le forze in gioco consente di valutare la bontà delle operazioni e di determinare eventuali picchi di forza che sono sintomo di collisioni o impedimenti rispetto all'ambiente circostante. Questi sensori sono utili per attività di assemblaggio e per manovrare componenti;
- Sensori di visione. Sono fondamentali per eseguire scansioni e apportare opportuni accorgimenti in tempo reale in termini di movimentazione degli assi. Sono impiegati per identificare e movimentare oggetti, per valutarne posizione ed orientamento, per effettuare ispezioni e operazioni di montaggio. Ciascun sensore di visione è composto da un impianto di illuminazione, da telecamere ubicate direttamente sul robot o in una precisa posizione all'interno dello spazio di lavoro e da un meccanismo che sia in grado di scansionare le immagini raccolte per poter condurre un'analisi approfondita. Le immagini seguono un processo di trasformazione dapprima a livelli di grigio, poi in binario, con l'obiettivo di valutarne i parametri da paragonare a quelli acquisiti durante una fase sperimentale iniziale. Dal confronto effettuato, si definiscono le movimentazioni che gli assi del robot devono eseguire. Per fare ciò, solitamente, si ricorre all'impiego di una sola telecamera, confrontando le figure in maniera bidimensionale. Nel caso in cui fosse richiesta maggior accuratezza, invece, sarebbe necessario utilizzare due telecamere per ottenere immagini tridimensionali, valutando anche la profondità.

L'immagine successiva rappresenta schematicamente il funzionamento di un tipico sensore di visione:

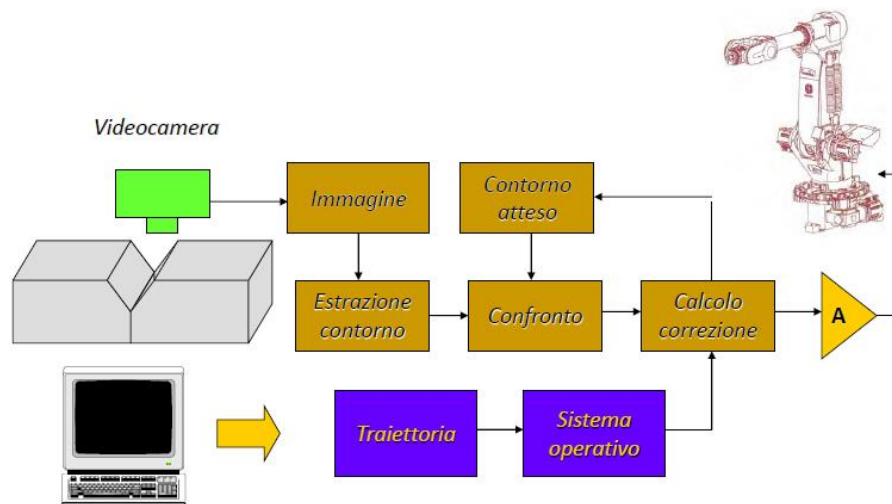


Figura 51 - Raffigurazione schematica del funzionamento di un sensore di visione

- Sensori laser o a infrarossi. Sono utilizzati per valutare lo spazio che separa le dita del robot da tutto ciò che è presente nell'ambiente circostante. Risultano particolarmente utili per quelle applicazioni in cui viene richiesto che la distanza sia mantenuta costante, come nel caso della verniciatura o della saldatura;
- Sensori vocali. Non hanno ancora raggiunto una vasta diffusione a causa del fatto che siano tuttora in fase di sviluppo. Vengono impiegati per imporre ordini ai robot tramite comando vocale. [16] [21]

3.2. Caratteristiche

Dopo aver definito gli elementi costitutivi dei robot, nel presente paragrafo sono illustrate le principali proprietà che li caratterizzano:

- Tipologia. Come ampiamente discusso in precedenza, le strutture meccaniche più note sono: cartesiana, a portale, cilindrica, sferica, antropomorfa e SCARA;
- Capacità di carico. È valutata nel caso di massima estensione ed è definita come il carico più gravoso che il robot sia in grado di movimentare;
- Velocità di lavoro. Da essa dipende la capacità di produzione del robot. Generalmente, è preferibile eseguire le lavorazioni alla massima velocità possibile. Nel caso di movimentazione di carichi pesanti, però, devono essere adottate velocità limitate per evitare lo sviluppo di vibrazioni. Inoltre, più è elevata la velocità e minore sarà la precisione ottenuta in fase di posizionamento;
- Volume di lavoro. È definito come "l'insieme dei punti cinematicamente raggiungibili dall'estremità del robot", senza tenere in considerazione l'end effector, ossia l'organo di presa. Tale volume risulta strettamente correlato alla struttura meccanica del robot ed alle sue dimensioni. Infatti, come già anticipato, esso è approssimabile con un parallelepipedo nel caso di struttura cartesiana, con un cilindro cavo nel caso di robot cilindrico, con una porzione di sfera per la struttura sferica e con una figura irregolare

per il robot antropomorfo. Come riportato nelle figure sottostanti, il volume di lavoro è definito tramite rappresentazioni grafiche:

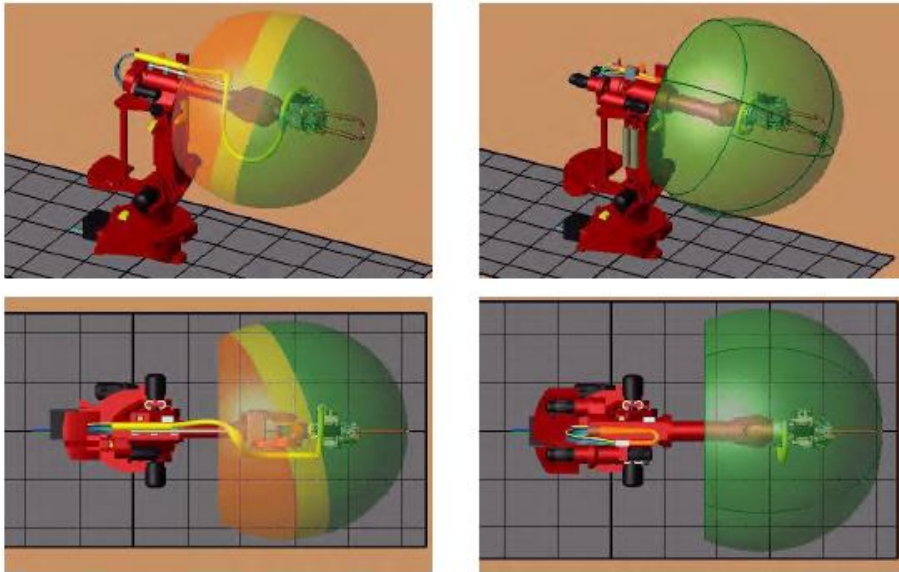


Figura 52 - Volume di lavoro di un robot

In figura 52 sono illustrate le diverse zone di lavoro. In verde è riportata l'area all'interno della quale è possibile eseguire lavorazioni in totale sicurezza. La zona gialla è considerata a rischio interferenza, quella rossa indica lo spazio in cui non può essere impiegato il robot.

- Precisione dei movimenti. È il risultato della combinazione di tre diverse componenti: risoluzione, precisione e ripetibilità.

La risoluzione è definita come lo spostamento più piccolo del polso che può essere gestito dal robot. Dipende da molteplici variabili: i giunti che costituiscono la struttura, i relativi giochi e le rigidità. La risoluzione del polso del robot è data dalla combinazione vettoriale delle singole risoluzioni dei movimenti base dei giunti. Questi movimenti, sommati, restituiscono lo spostamento complessivo del polso. Più in generale, si può affermare che la risoluzione dipenda dall'unità di governo del robot. Infatti, maggior è la capacità in termini di memoria e più alta sarà la risoluzione.

La precisione è l'abilità del robot di collocare l'end effector in un punto preciso dello spazio di lavoro. Più è bassa la risoluzione e maggiore sarà la precisione, che solitamente assume un valore circa uguale alla metà della risoluzione stessa. Sebbene sia vantaggioso mantenere la precisione costante all'interno del volume di lavoro, nella pratica essa cambierà in relazione al posizionamento. Possibili cause di imprecisione sono determinate dai giochi presenti nei giunti.

La ripetibilità è l'abilità del robot di assumere ripetutamente un medesimo posizionamento. Essa dev'essere mantenuta costante all'interno del volume di lavoro e, solitamente, risulta minore della precisione. I giochi dei giunti che costituiscono la struttura e le imprecisioni dell'end effector sono le motivazioni più frequenti a cui attribuire gli errori riscontrati in termini di ripetibilità.

La figura seguente rappresenta in maniera schematica il significato di ripetibilità per un robot:

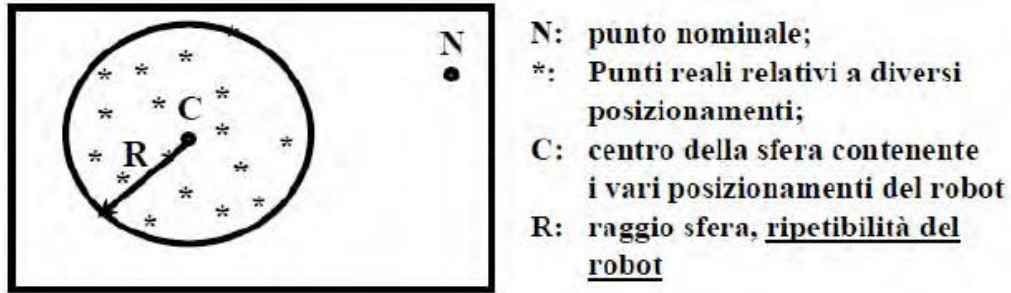


Figura 53 - Ripetibilità del robot

- Programmazione. Esistono tre diverse modalità con cui è possibile programmare un robot: per autoapprendimento, tramite linguaggio e off-line.

La programmazione manuale per autoapprendimento prevede che il robot venga movimentato tramite un pc adibito alla programmazione, in modo tale che sia percorsa la traiettoria voluta. L'unità di governo del robot ha il compito di memorizzare i vari punti che costituiscono il percorso, così che possano essere riprodotti successivamente.

La programmazione tramite linguaggio consiste nella stesura di un programma mediante un linguaggio non normalizzato, differente per ciascun produttore. L'obiettivo è quello di programmare il robot affinché possa eseguire le lavorazioni previste. Perciò, tramite il linguaggio è possibile impartire comandi come la movimentazione, l'apertura/chiusura della mano per afferrare oggetti, il controllo dei sensori, le soste.

La programmazione assistita off-line non prevede l'impiego del robot o della sua unità di governo per tracciare e memorizzare la traiettoria. Per questo motivo, durante la fase di programmazione, è possibile continuare ad eseguire le lavorazioni previste. Questa modalità si serve di un pc connesso ad un meccanismo CAD tridimensionale, che consente di riprodurre graficamente la struttura meccanica del robot e l'ambiente di lavoro circostante. Affinché ciò sia possibile, per evitare eventuali collisioni, è necessario disporre delle informazioni relative agli oggetti che si trovano all'interno del volume di lavoro, conoscere i sensori e le loro proprietà, comprendere il funzionamento cinematico e gli eventuali giochi dei giunti che costituiscono il robot. All'interno dell'ambiente simulato, il robot viene movimentato tramite comandi settati da pc, il quale si occuperà anche di elaborare, sulla base della traiettoria percorsa, il programma nel linguaggio interpretabile dall'unità di governo. [16]

3.3. Co-bot

I robot collaborativi, comunemente detti "cobot", sono progettati per interagire fisicamente con gli operatori all'interno di uno spazio di lavoro condiviso. Un cobot è anche definito come "un dispositivo e un metodo per l'interazione fisica diretta tra una persona e un manipolatore controllato da un computer". Sono tipicamente impiegati al posto di robot industriali nei casi in cui sia eccessivamente dispendioso effettuare una totale automatizzazione delle operazioni svolte o per lo svolgimento di lavori troppo complicati per un robot autonomo.

I cobot sono realizzati secondo la normativa ISO, che stabilisce i valori di soglia di velocità e forza che non possono essere superati per garantire agli operatori di lavorare in totale sicurezza. In termini di collaborazione uomo-macchina, la sicurezza può essere garantita tramite: stop di sicurezza monitorato; guida manuale; monitoraggio della velocità e della separazione; limitazione della forza e della coppia.

- Stop di sicurezza monitorato. Secondo questa modalità, il robot lavora principalmente in autonomia e l'intervento dell'uomo è limitato a semplici operazioni di carico/scarico. Nel momento in cui l'operatore accede allo spazio di lavoro del robot, opportuni sensori ne rilevano la presenza determinando un arresto istantaneo del cobot. Va specificato che la fermata comporta la semplice attivazione dei freni, mentre il sistema elettrico è mantenuto costantemente alimentato. Infatti, non appena l'operatore sgombera lo spazio di lavoro, il robot ricomincia a svolgere le proprie mansioni;
- Guida manuale. A differenza del metodo precedente, in questo caso è previsto il ricorso ad un robot tradizionale e la delimitazione dello spazio di lavoro tramite una recinzione. Le attività eseguite dall'operatore, per esempio il serraggio delle viti, sono effettuate in modo sistematico. Nel momento in cui l'addetto accede all'interno dello spazio di lavoro, il robot tradizionale entra in modalità collaborativa rallentando la velocità di movimentazione degli assi. Un tipico esempio applicativo è rappresentato dall'avvitamento dei paraurti delle automobili, che viene effettuato dall'uomo mentre il componente stesso è mantenuto in posizione dal robot;
- Monitoraggio della velocità e della separazione. Rispetto al sistema "arresto di sicurezza monitorato", in questo caso il robot non viene fermato ma la velocità di movimentazione è progressivamente ridotta in funzione della distanza dall'operatore. È possibile ricorrere a sensori laser o sistemi di visione che siano in grado di calcolare correttamente lo spazio che divide il cobot dall'uomo, garantendo lo svolgimento delle varie lavorazioni in sicurezza ed evitando eventuali collisioni con ostacoli o persone. Come si evince dalla figura a fianco, la zona verde è quella in cui è consentito l'accesso senza determinare un calo in termini di prestazioni del robot. Quella gialla, invece, prevede un rallentamento dei movimenti in base alla distanza. Infine, l'area rossa determina l'arresto delle funzioni svolte dal robot per consentire l'accesso agli operatori in sicurezza.
- Limitazione di potenza e di forza. Viene adottata per quei robot che garantiscono il massimo grado di collaborazione, nei casi in cui si possano verificare eventuali contatti tra uomo e cobot. Essi sono capaci di avvertire livelli di carico troppo elevati, che potrebbero essere sintomo di impedimenti o collisioni, determinando così l'immediato arresto del robot. Nel caso in cui il contatto avvenga con superfici di dimensioni considerevoli, l'energia generata viene dissipata.



Figura 54 - Monitoraggio della velocità e separazione

La figura seguente rappresenta i quattro possibili scenari appena descritti per l'esecuzione delle lavorazioni in sicurezza secondo la normativa ISO:

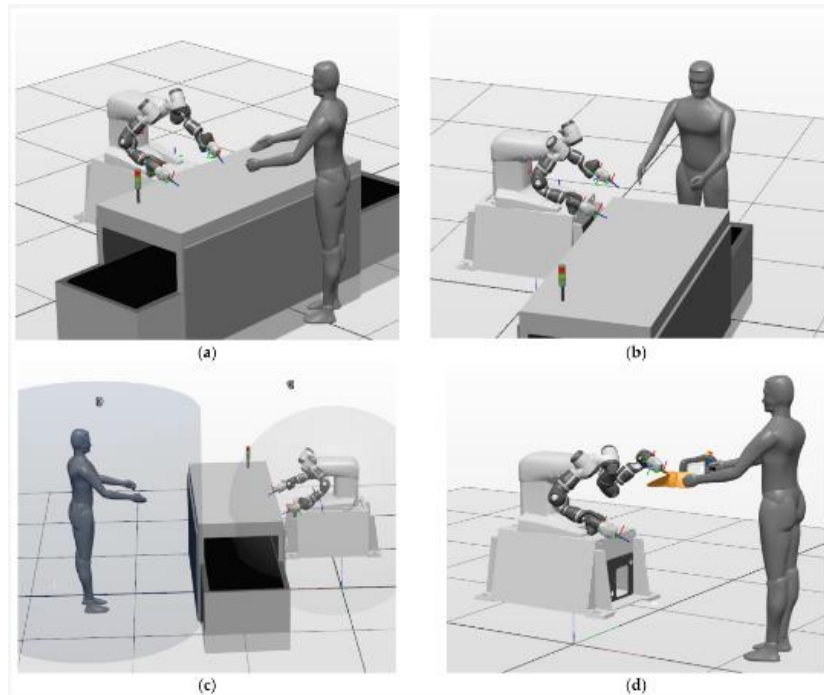


Figura 55 - Collaborazione uomo robot: stop di sicurezza monitorato (a); guida manuale (b); monitoraggio della velocità e della separazione (c); limitazione di potenza e di forza.

In generale, lo spazio di collaborazione è identificato come quel volume all'interno del quale sia l'operatore che il robot eseguono le attività previste anche simultaneamente. Per garantire l'incolumità degli operatori è necessario effettuare un'analisi dei rischi, come illustrato in figura 56:

- Se il cobot si trova all'esterno dello spazio di collaborazione, l'operatore può svolgere le proprie mansioni senza incorrere in alcun tipo di pericolo;
- Se il cobot, invece, si trova all'interno del volume di lavoro condiviso, si aprono due possibilità. La prima prevede che l'addetto sia all'esterno dello spazio di collaborazione e, in
- Se il cobot, infine, si trova in fase di arresto di sicurezza, l'operatore è libero di procedere con il lavoro sia all'interno che all'esterno dello spazio di collaborazione.

Robot <system> motion or stop function		Operator's proximity to collaborative workspace	
		Outside	Inside
Robot's <system> proximity to collaborative workspace	Outside	Continue	Continue
	Inside and moving	Continue	Protective stop
	Inside, at Safety-Rated Monitored Stop	Continue	Continue

Figura 56 - Analisi del rischio relativo alla collaborazione uomo-robot
 questo caso, il robot può proseguire senza sosta le proprie attività. La seconda, al contrario, suppone che sia l'operatore che il robot rientrino all'interno dello spazio condiviso. In questa situazione è necessario intervenire, come visto in precedenza, riducendo la velocità di movimentazione degli assi o addirittura predisponendo l'arresto immediato del robot;

Per prevenire le conseguenze che potrebbero scaturire da un rischio eccessivo di collisione tra uomo e robot, è possibile adottare rimedi classificabili come attivi o passivi. I primi

consistono nel definire i valori di soglia di grandezze come forza, pressione, quantità di moto e nel limitare lo spazio di collaborazione con l'operatore. Altre misure preventive attive riguardano il ricorso a sensori che possano intuire anticipatamente eventuali collisioni e che garantiscano l'arresto di sicurezza in caso di distanza ridotta tra uomo e cobot. Tra i rimedi "passivi", invece, rientrano l'aumento delle superfici in gioco che potrebbero entrare in contatto, il contenimento dei corpi in movimento e l'impiego di rivestimenti costituiti da materiali in grado di dissipare l'energia generata in seguito ad una collisione. [16] [22] [23]

I cobot vengono impiegati principalmente per eseguire operazioni ripetitive in cui sia richiesto un elevato grado di accuratezza, oppure per sostituire la manodopera in attività gravose dal punto di vista della salute umana. Le applicazioni in cui maggiormente si ricorre all'utilizzo di robot collaborativi sono:

- Imballaggio e pallettizzazione;
- Saldatura;
- Asservimento di macchine utensili;
- Montaggio;
- Pick and place;
- Stampaggio;
- Controllo qualità.

La tabella sottostante mette in evidenza le differenze esistenti tra i robot industriali autonomi ed i robot collaborativi:

	Robot industriali	Robot collaborativi
Installazione	Complessa	Semplice
Programmazione	Richiede elevate competenze	Richiede competenze base
Struttura	Massiccia e fissa	Compatta e flessibile
Spazio richiesto	Ampio	Limitato
Sicurezza	Richiede barriere protettive	Assenza di protezioni
Costo	Elevato	Ridotto

Tabella 5 - Principali differenze tra robot industriali e robot collaborativi

3.4. Robot per saldatura utilizzati in Manitowoc

Presso la Manitowoc Crane Group Italy, nella sede di Niella Tanaro, sono presenti quattro robot adibiti alla saldatura. Si tratta di macchinari a marchio CLOOS, un'azienda tedesca specializzata nella produzione di robot di saldatura. Il linguaggio di programmazione utilizzato è detto "CAROLA", acronimo che sta ad indicare "CLOOS Advanced RObot LAnguage", ossia linguaggio avanzato per i robot della CLOOS. La programmazione può essere fatta direttamente tramite la pulsantiera di programmazione oppure da tastiera.

3.4.1. Caratteristiche tecniche

I robot della CLOOS presenti in stabilimento appartengono alla serie QIROX, che comprende la linea classica “QRC” e quella ad albero cavo “QRH”. Per ciascuna di esse sono disponibili svariati modelli, a seconda delle dimensioni richieste:

- QRC: 320; 350; 410;
- QRH: 280; 360; 390.

In base alle esigenze ed allo spazio disponibile, è possibile adottare il montaggio a pavimento oppure il montaggio sopra-testa. I robot QIROX sono detti “a giunti rotanti” poiché è previsto che lavorino in modo rotatorio. Infatti, il volume di lavoro è approssimabile con un’area semisferica. In basso è riportato un classico esempio dell’installazione di un robot CLOOS della serie QIROX in ambito industriale:

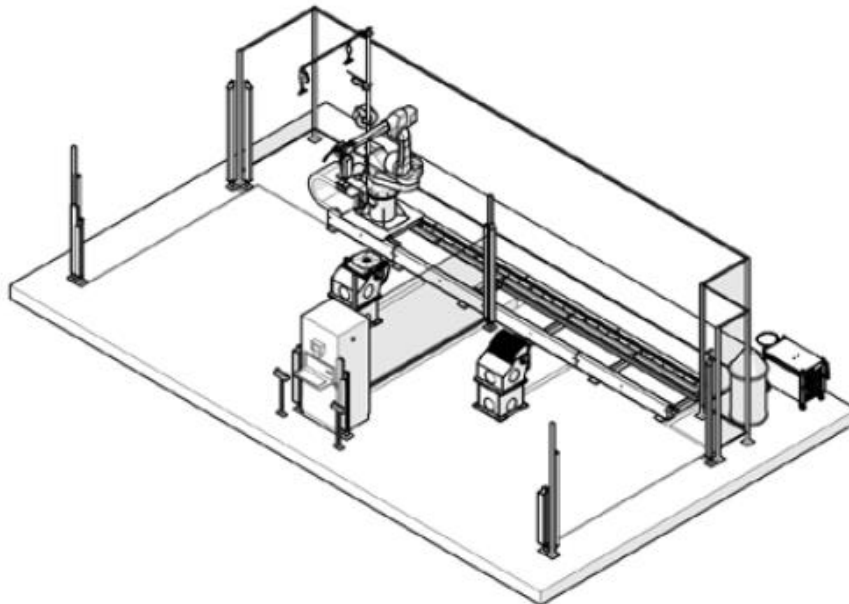


Figura 57 - Esempio di isola di lavoro per un robot CLOOS della serie QIROX

Ciascun robot è dotato di un determinato numero di assi, a cui corrisponde un egual numero di gradi di libertà. Questi consentono al robot di spostarsi nello spazio, movimentare oggetti e posizionarli all’interno del volume di lavoro nei punti desiderati. In particolare, i robot CLOOS della serie QIROX hanno struttura antropomorfa e sono dotati di tre gradi di libertà per il posizionamento degli oggetti nello spazio e altri tre gradi di libertà per l’orientazione angolare, come riportato nella figura a fianco.

Nella tabella sottostante, invece, sono riportati i sei assi di rotazione dei robot QIROX e, per ciascuno di essi, i relativi angoli di rotazione:

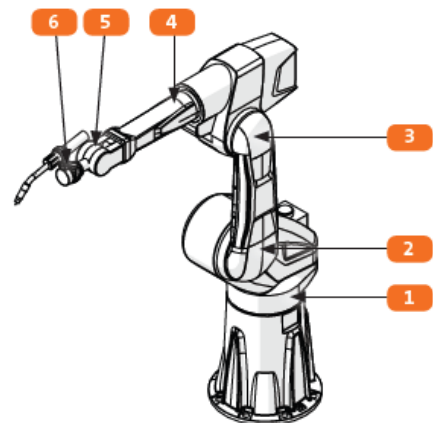


Figura 58 - Robot QIROX a sei gradi di libertà

Asse	Angolo di rotazione
1	340°
2	215°
3	290°
4	358°
5	270°
6	600°

Tabella 6 - Angoli di rotazione degli assi

Inoltre, gli impianti di saldatura sono in grado di gestire un numero di assi esterni che va da zero a trenta. I gradi di libertà esterni consentono di movimentare la struttura del robot o i pezzi da saldare per agevolare l'accessibilità della torcia e, più in generale, le operazioni di saldatura. Per assolvere questa funzione vengono impiegati meccanismi di movimentazione periferica come tavole rotanti, posizionatori a portale e attrezzature di bloccaggio a telaio fisso/mobile. Gli assi esterni vengono ulteriormente suddivisi in rotatori o lineari, a seconda del movimento che consentono di eseguire. Indipendentemente dalla loro natura, essi consentono di espandere il volume di lavoro del robot, che è strettamente dipendente dalla tipologia di installazione scelta. Nelle figure in basso è rappresentato il campo di lavoro per un robot CLOOS della serie QIROX classico "QRC", nel caso di montaggio a pavimento e montaggio sopra-testa:

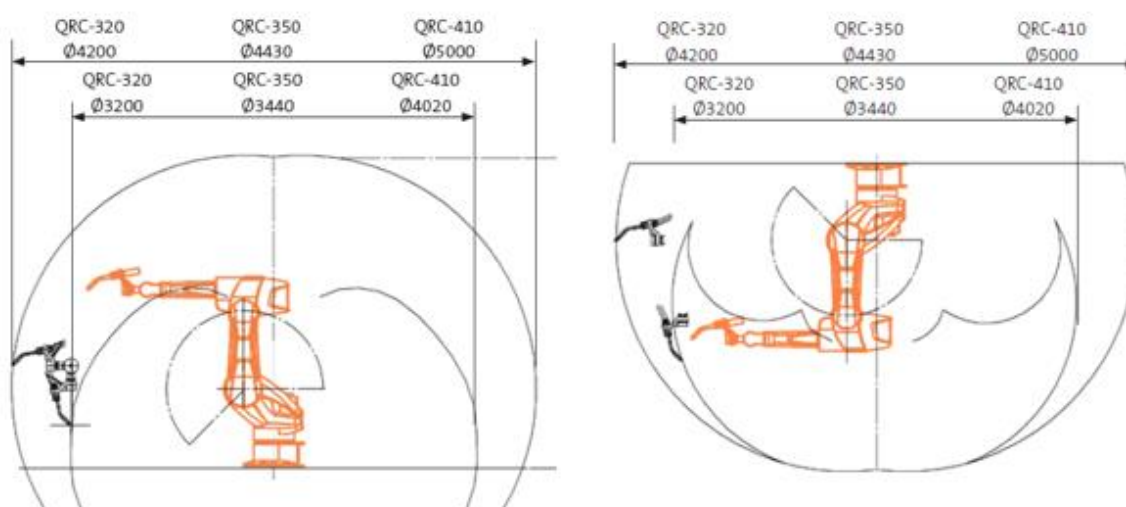


Figura 59 - Volume di lavoro per un robot CLOOS QIROX QRC con installazione a pavimento (sx) e sopra-testa (dx)

Il volume di lavoro è definito come quello spazio all'interno del quale un robot può eseguire le lavorazioni sui componenti da saldare, senza correre il rischio che si verifichino eventuali collisioni. Questo volume, generalmente, è limitato in base alle posizioni che la torcia può assumere per eseguire le saldature.

In fase di installazione di un robot all'interno di uno stabilimento industriale, è necessario valutare l'ingombro totale costituito da struttura meccanica, strumentazione, componenti da lavorare e meccanismi di movimentazione periferica. In sintesi, risulta essenziale conoscere il raggio d'azione del robot, che ne definisce l'area massima di interesse. Al fine di poter

garantire l'incolumità del personale presente nello stabilimento, parte dell'area massima dev'essere delimitata tramite meccanismi di protezione, come le barriere. [24] [25]

3.4.1.1. Robot 1 e 2

I primi due robot presenti in stabilimento sono adibiti alla saldatura di basamenti fissi e rotanti di tre diversi modelli di gru automontanti a marchio Potain:

- Hup M 28-22;
- Hup 32-27;
- Hup 40-30.

Si tratta di due robot antropomorfi CLOOS della serie QIROX QRC 350 che costituiscono un impianto robotizzato a due stazioni di lavoro con un'unica via di corsa a terra, come rappresentato nell'immagine seguente:

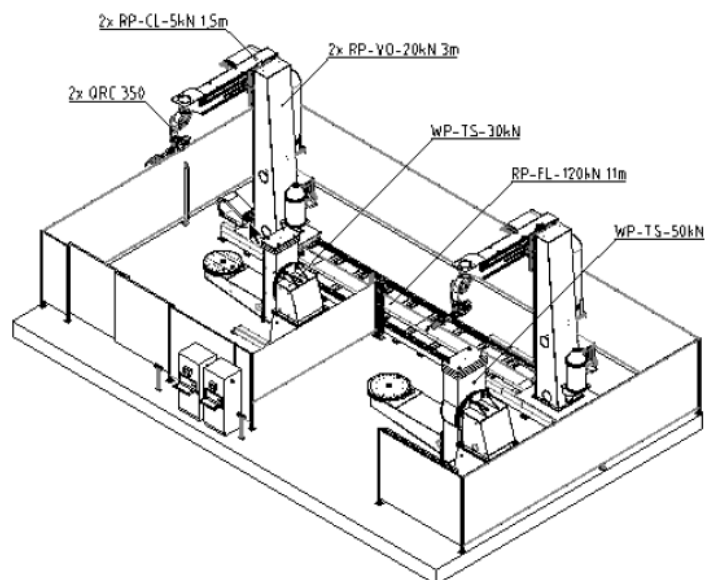


Figura 60 - Impianto robotizzato a due stazioni di lavoro con via di corsa a terra

Come anticipato in precedenza, ognuno dei due robot è costituito da sei assi di rotazione, tre per il posizionamento e tre per l'orientazione angolare. Inoltre, sono previsti ulteriori assi esterni:

- Asse 7, consente la traslazione orizzontale tramite la via di corsa a terra;
- Asse 8, consente un'altra traslazione orizzontale, perpendicolare a quella precedente, grazie ad una via di corsa orizzontale;
- Asse 9, consente la traslazione verticale mediante una via di corsa verticale;
- Asse 10, determina la rotazione del posizionatore attorno ad un asse verticale, permettendo la rotazione dei basamenti da saldare;
- Asse 11, determina la rotazione del posizionatore attorno ad un asse orizzontale, permettendo un'ulteriore rotazione dei basamenti.

I robot CLOOS QIROX QRC 350 presenti in stabilimento sono adibiti alla saldatura tramite processo MAG, che sfrutta una miscela di gas attivo con la seguente composizione chimica:

- 88% argon (Ar);
- 10% anidride carbonica (CO₂);
- 2% ossigeno (O₂).

I dati tecnici più rilevati relativi a questo modello di robot sono riportati in tabella 7:

Configurazione	Giunti rotanti
Numero di assi	6
Peso sul polso	15 kg
Azionamenti	Un controllo digitale per ogni azionamento
Sistema di misura	Digitale tramite resolver assoluti
Ripetibilità	≤ ±0.1 mm
Area di lavoro	Semisferica
Diametro	4430 mm
Spazio a pavimento	500 x 515 mm
Peso	220 kg

Tabella 7 - Dati tecnici meccanici per un robot CLOOS QIROX QRC 350

Per ciascuno dei sei assi, è possibile definire l'angolo di rotazione e la massima velocità raggiungibile:

Asse	Angolo di rotazione	Velocità massima
1	340°	151°/s
2	215°	151°/s
3	290°	176°/s
4	358°	290°/s
5	270°	338°/s
6	600°	410°/s

Tabella 8 - Angolo di rotazione e massima velocità relative ai sei assi di rotazione del robot CLOOS QIROX QRC 350

Dopo aver definito dettagliatamente le caratteristiche del robot, è necessario effettuare una panoramica relativa ai dispositivi di movimentazione periferica, con cui vengono introdotti i cinque assi esterni, a cui corrispondono cinque gradi di libertà:

- Via di corsa a terra, con cui viene consentita la traslazione orizzontale mediante l'asse 7. In tabella 9 sono riportati i relativi dati tecnici:

Capacità di carico [kN]	50
Lunghezza [mm]	11000
Velocità [m/s]	0.7

Tabella 9 - Dati tecnici via di corsa a terra

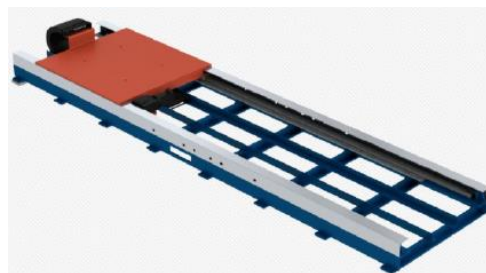


Figura 61 - Via di corsa a terra

- Via di corsa orizzontale, che permette un'altra traslazione orizzontale in direzione perpendicolare rispetto alla precedente. Questa traslazione è consentita dall'asse esterno numero 8. In tabella 10 sono riportati i dati tecnici:



Figura 62 - Via di corsa orizzontale

Capacità di carico [kN]	5
Corsa orizzontale [mm]	1500
Velocità [m/s]	0.7

Tabella 10 - Dati tecnici via di corsa orizzontale

- Via di corsa verticale, con cui è consentita la traslazione verticale lungo l'asse 9. In tabella 11 sono riportati i dati tecnici:



Figura 63 - Via di corsa verticale

Capacità di carico [kN]	20
Corsa verticale [mm]	3000
Velocità [m/s]	0.2

Tabella 11 - Dati tecnici via di corsa verticale

- Posizionatore, che garantisce una rotazione attorno ad un asse verticale (10) ed un'altra rotazione attorno ad un asse orizzontale (11). I dati tecnici sono riportati in tabella 12:

Capacità di carico [kN]	50
Altezza piastra [mm]	1200
Diametro piastra [mm]	1200
Range di rotazione [°]	±360
Velocità di rotazione [°/s]	8.4
Velocità di ribaltamento [°/s]	8.5

Tabella 12 - Dati tecnici posizionatore



Figura 64 - Schema (sx) e fotografia scattata in stabilimento (dx) del posizionatore

La fotografia a fianco, scattata presso lo stabilimento Manitowoc, raffigura gli elementi principali che caratterizzano l'impianto robotizzato a due stazioni di lavoro presieduto dai robot numero uno e due:

- 1) Robot 1;
- 2) Robot 2;
- 3) Via di corsa a terra, unica per entrambi i robot;
- 4) Via di corsa verticale del robot 2;
- 5) Via di corsa orizzontale del robot 2;
- 6) Posizionatore del robot 2, per il fissaggio e la movimentazione del basamento;
- 7) Cappa di aspirazione dei fumi del robot 2;
- 8) Saldatrice;
- 9) Refrigeratore;
- 10) Barriere protettive di separazione tra i due robot. [26]

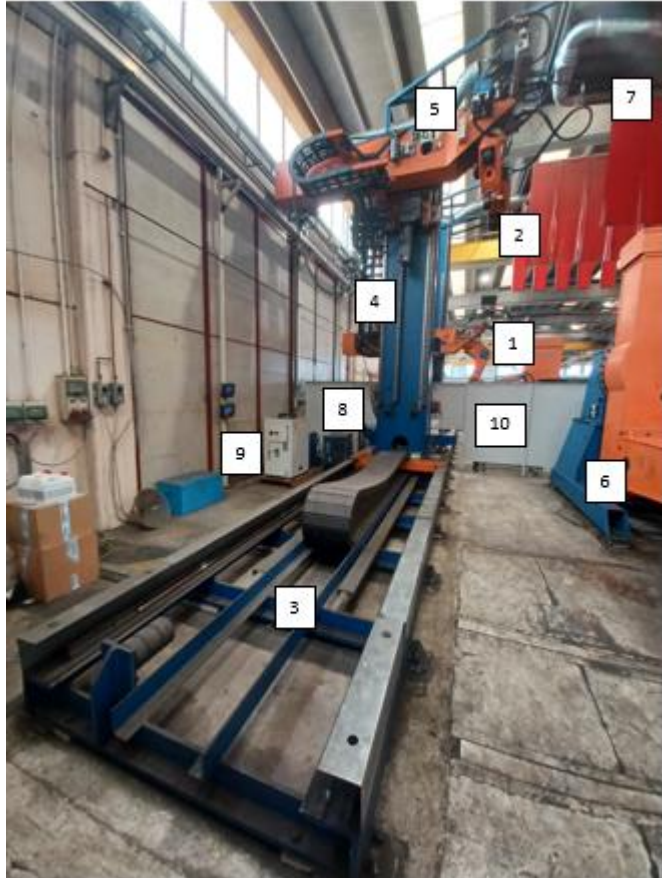


Figura 65 - Fotografia dell'impianto robotizzato a due stazioni di lavoro

3.4.1.2. Robot 3 e 4

Il robot numero 3 è adibito alla saldatura di travi stabilizzatori di tre diversi modelli di gru automontanti a marchio Potain:

- Hup M 28-22;
- Hup 32-27;
- Hup 40-30.

Il robot numero 4, invece, è destinato alla saldatura di bielle.

Esattamente come per i robot QRC 350, anche i robot numero tre e quattro presenti in stabilimento eseguono la saldatura tramite processo MAG, che sfrutta una miscela di gas attivo con la seguente composizione chimica:

- 88% argon (Ar);
- 10% anidride carbonica (CO_2);
- 2% ossigeno (O_2).

In generale, si tratta di due robot antropomorfi CLOOS della serie QIROX QRC 410, ciascuno dei quali presiede un impianto di saldatura costituito da due stazioni di lavoro. In

questo modo, mentre il robot salda un trave all'interno della prima stazione, la seconda può essere predisposta per successive lavorazioni, garantendo così il funzionamento in continuo.

La figura 66 riporta lo schema tipico di uno dei due impianti di saldatura:

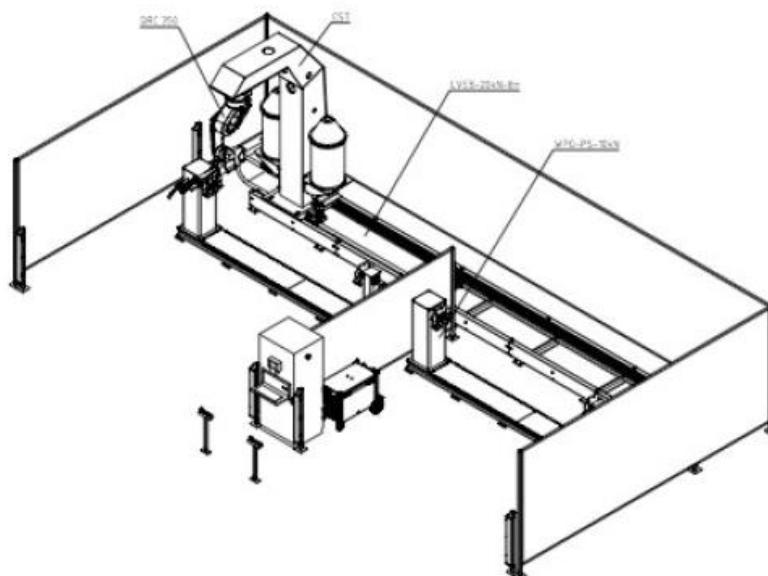


Figura 66 - Impianto di saldatura a due stazioni di lavoro per un robot QIROX QRC 410

Anche i robot CLOOS QIROX QRC 410 sono costituiti da sei assi di rotazione, tre per il posizionamento e tre per l'orientazione angolare. Inoltre, sono previsti ulteriori due assi esterni:

- Asse 7, consente la traslazione orizzontale tramite la via di corsa a terra;
- Asse 8, determina la rotazione del posizionatore attorno ad un asse orizzontale, permettendo la rotazione dei travi stabilizzatori da saldare.

I dati tecnici più rilevati relativi a questo modello di robot sono riportati in tabella 13:

Configurazione	Giunti rotanti
Numero di assi	6
Peso sul polso	10 kg
Azionamenti	Un controllo digitale per ogni azionamento
Sistema di misura	Digitale tramite resolver assoluti
Ripetibilità	$\leq \pm 0.1$ mm
Area di lavoro	Semisferica
Diametro	4430 mm
Spazio a pavimento	500 x 515 mm
Peso	225 kg

Tabella 13 - Dati tecnici meccanici per un robot CLOOS QIROX QRC 410

Per ciascuno dei sei assi, è possibile definire l'angolo di rotazione e la massima velocità raggiungibile:

Asse	Angolo di rotazione	Velocità massima
1	340°	151°/s
2	215°	151°/s
3	290°	176°/s
4	358°	290°/s
5	270°	338°/s
6	600°	410°/s

Tabella 14 - Angolo di rotazione e massima velocità relative ai sei assi di rotazione del robot CLOOS QIROX QRC 410

Dopo aver definito dettagliatamente le caratteristiche del robot, è necessario effettuare una panoramica relativa ai dispositivi di movimentazione periferica, con cui vengono introdotti i due assi esterni, a cui corrispondono due gradi di libertà:

- Via di corsa a terra, con cui viene consentita la traslazione orizzontale mediante l'asse 7. In tabella 15 sono riportati i relativi dati tecnici:

Capacità di carico [kN]	20
Lunghezza [mm]	10000
Velocità [m/s]	1.8

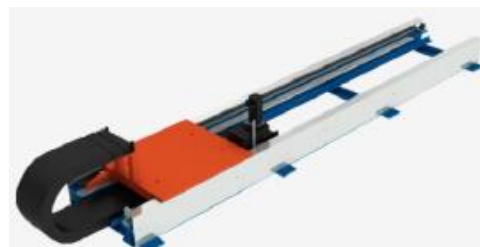


Figura 67 - Via di corsa a terra

Tabella 15 - Dati tecnici via di corsa a terra

- Posizionatore a tavola rotante, che garantisce una rotazione attorno ad un asse orizzontale (8). I dati tecnici sono riportati in tabella 16:

Capacità di carico [kN]	20
Diametro dei dischi [mm]	600
Luce tra le tavole [mm]	4000
Raggio di rotazione [°]	360
Velocità di rotazione [°/s]	90
Momento torcente [Nm]	1700
Momento di ribaltamento [Nm]	8800
Momento d'inerzia [kg m²]	1200

Tabella 16 - Dati tecnici posizionatore a tavola rotante



Figura 68 - Schema (sx) e fotografia scattata in stabilimento (dx) del posizionatore a tavola rotante

La fotografia sottostante, scattata presso lo stabilimento Manitowoc, raffigura gli elementi principali che caratterizzano l'impianto robotizzato a due stazioni di lavoro presieduto dal robot numero tre:

- 1) Posizionatore a tavola rotante, per il fissaggio e la movimentazione dei travi stabilizzatori;
- 2) Via di corsa a terra;
- 3) Robot 3;
- 4) Cappa di aspirazione dei fumi;
- 5) Barriere protettive;
- 6) Armadio di controllo, comprensivo di pulsantiera di programmazione, tastiera e semaforo;
- 7) Tenda protettiva per saldatura. [27]

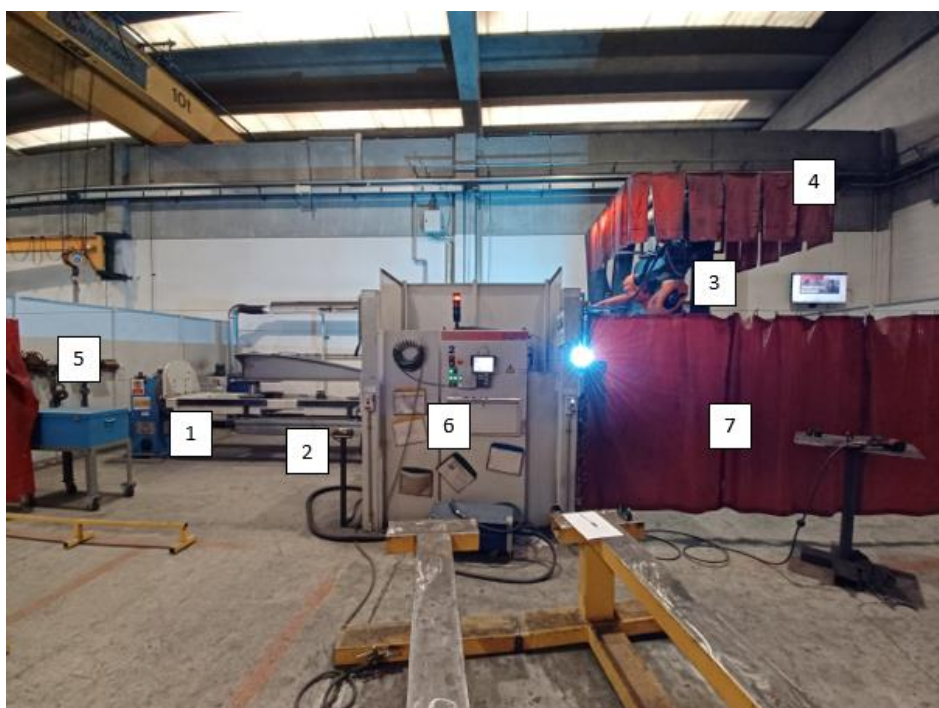


Figura 69 - Fotografia dell'impianto robotizzato a due stazioni di lavoro presieduto dal robot 3

3.4.2. Pulsantiera di programmazione

Come già anticipato precedentemente, la programmazione del robot di saldatura può essere effettuata tramite tastiera oppure pulsantiera di programmazione (PHG). Quest'ultima è composta da diversi elementi:

- 1) Fungo d'emergenza, per l'arresto immediato del robot;
- 2) Display touch screen;
- 3) Tastiera a membrana;
- 4) Tasto di conferma per il funzionamento in "modalità manuale a velocità ridotta";
- 5) Tasto di conferma per il funzionamento in "modalità manuale ad alta velocità".

In basso sono riportati uno schema e una fotografia della pulsantiera di programmazione impiegata per i robot 1 e 2:



Figura 70 - Schema (sx) e fotografia scattata in stabilimento (dx) della pulsantiera di programmazione

Per la stesura di un programma di saldatura è necessario ricorrere sia al display touch screen che alla tastiera a membrana. Questa è costituita da: tasti di traslazione e numerici, che consentono di movimentare gli assi del robot interni ed esterni; pulsanti per l'esecuzione di varie funzioni, riportati nell'immagine sottostante:

	Denominazione	Funzione		Denominazione	Funzione
	Pulsante START	Per avviare il programma		Tasto memoria	Per l'esecuzione delle funzioni di memorizzazione
	Pulsante STOP	Per interrompere il programma		Tasto interruzione	Per l'interruzione delle funzioni
	Pulsante POWER	Per accendere l'impianto		Tasto acquisizione informazioni	Per la conferma delle funzioni
	Pulsante RC	Per la commutazione al sistema di coordinate del robot		Selettore velocità	Per scegliere la velocità di via di corsa
	Pulsante CC	Passaggio al sistema di coordinate cartesiane		Tasto freccia sinistra	Tasto di commutazione Indietro per la modalità EST
	Tasto INT/EXT	Commutazione assi INTERNI/ESTERNI		Tasto freccia destra	Tasto di commutazione Avanti per la modalità EST
	Tasto Go	Per il raggiungimento dei punti		Tasto "meno"	Per la riduzione dei valori dei parametri
	Tasto Point	Per scegliere i numeri dei punti		Tasto "più"	Per incrementare i valori dei parametri
	Tasto Q	Per creare un file di diagnostica di sistema		Moltiplicatore x 10	Per ridurre/aumentare i valori dei parametri con il moltiplicatore 10

Figura 71 - Pulsanti e relative funzioni eseguibili tramite tastiera a membrana

Il display touch screen, riportato in figura 72, consente di visualizzare il menu principale, costituito da varie icone che permettono di eseguire diverse funzioni e impartire ordini al robot. A ciascun tasto corrisponde una funzione:

- “Teach” consente di configurare un programma sequenziale in modalità teach, con cui è possibile muovere gli assi dei robot per eseguire le lavorazioni previste e memorizzare i punti delle traiettorie compiute;
- “Program” consente di configurare un programma sequenziale in modalità program. È lo step successivo che combina la modalità “teach” all’editor per la stesura dei programmi tramite codice CAROLA;



Figura 72 - Display touch screen

- “Text” è utilizzato per la scelta dell’Editor e per apportare modifiche ai programmi in fase di esecuzione degli stessi. Tramite l’editor di testo è possibile visualizzare il testo del programma in fase di esecuzione, modificando o eliminando eventuali righe di comando. Inoltre, la funzione “help” consente di approfondire e comprendere la sintassi del linguaggio di programmazione utilizzato;
- “Points” è impiegato per la generazione di nuovi punti o per la correzione di punti già esistenti;
- “Test” viene usato per eseguire i programmi, testandoli a velocità contenute per verificarne l’effettivo funzionamento. La semplice sperimentazione dei programmi può essere effettuata ricorrendo alla modalità “EXE”. La modalità “EST”, invece, consente di eseguire il test “passo-passo”, richiedendo il consenso dell’operatore tra un comando e quello successivo. In generale, i programmi possono essere testati in modalità manuale a velocità ridotta oppure ad alta velocità. Nel caso in cui non siano riscontrati problemi, la procedura standard prevede che il robot lavori in modalità “automatica”;
- “Auto” consente di eseguire i programmi in modalità “automatica”, una volta che siano stati testati mediante la modalità manuale;
- “Offline” è utilizzato per la programmazione offline e per movimentare gli assi del robot esterni. Inoltre, consente di estrapolare le informazioni relative ai punti e di avviare/interrompere programmi secondari;
- “Archive” consente la gestione di tutti i programmi, che possono essere salvati su disco rigido oppure su chiavetta USB. Per garantire una gestione in totale sicurezza è bene attenersi ad alcuni fondamentali principi: archiviare i singoli programmi in modo indipendente su dispositivi opportuni; realizzare duplicati da conservare in sicurezza e aggiornare periodicamente; ricorrere ad un’adeguata protezione dei dispositivi informatici utilizzati per la memorizzazione dei programmi.

Dopo aver realizzato un programma tramite il linguaggio di programmazione CAROLA, è necessario eseguirne la verifica riducendo la velocità di movimentazione degli assi rispetto a quella di normale funzionamento, prevista dalle lavorazioni eseguite in modalità “automatica”. A tale fine, ci si può avvalere della modalità manuale a velocità ridotta (T1) oppure di quella manuale ad alta velocità (T2). In entrambi i casi, risulta facilitata l’operazione di monitoraggio delle movimentazioni. Ridurre la velocità in fase di prova si traduce in una limitazione delle conseguenze dovute ad eventuali errori in fase di programmazione. Per consentire un controllo più approfondito, durante l’esecuzione del programma in modalità manuale è possibile visualizzare molteplici informazioni sul display touch screen, che è strutturato in questo modo:



Figura 73 - Display touch screen per la saldatura in modalità "manuale"

- 1) Campo informativo, costituito da varie finestre tra le quali è possibile scorrere per focalizzarsi sui parametri d’interesse: corrente di saldatura, tensione di saldatura e grandezze estrapolate dalle liste di saldatura stesse, come l’ampiezza di oscillazione della torcia, l’avanzamento del filo e la velocità; potenza ed energia di saldatura; “inseguimento del giunto”, con regolazione laterale ed in altezza;
- 2) Tempo totale di esecuzione del programma corrente;
- 3) Nome del programma;
- 4) Tempo effettivo di saldatura;
- 5) Nome del sottoprogramma;
- 6) Funzione “change”;
- 7) Campo di programma, nel quale è possibile visualizzare parte del codice di programmazione. La riga posta in evidenza corrisponde al comando in fase di esecuzione;
- 8) Campo di visualizzazione di testo;
- 9) Riga informativa;

- 10) Informazioni sul programma;
- 11) Campo funzioni, con cui è possibile scegliere la riga di inizio/ripresa saldatura, attivare/disattivare l'arco, settare la velocità limite e cambiare la finestra del campo informativo a seconda di ciò che si vuole visualizzare.

Una volta testato il programma in modalità “manuale”, dopo aver effettuato le opportune modifiche in termini di movimentazione degli assi e parametri di saldatura, il codice verrà implementato in modalità “automatica” per garantire una maggior efficienza del robot. In questo caso, però, il display touch screen non mostrerà tutti i parametri precedentemente elencati (figura 70). Infatti, le finestre relative al campo informativo riporteranno solamente tensione e corrente impiegate, saranno assenti la riga informativa e il campo di visualizzazione di testo, mentre il campo di programma permetterà la visione della sola riga di codice in esecuzione.

In alternativa, nel caso in cui non si impieghi la pulsantiera di programmazione, i codici possono essere creati/modificati tramite tastiera. [24] [25]

3.4.3. Armadio di comando

Ogni robot presente in stabilimento dev'essere dotato di un quadro di controllo situato sulla porta anteriore dell'armadio di comando, caratterizzato dal seguente aspetto:

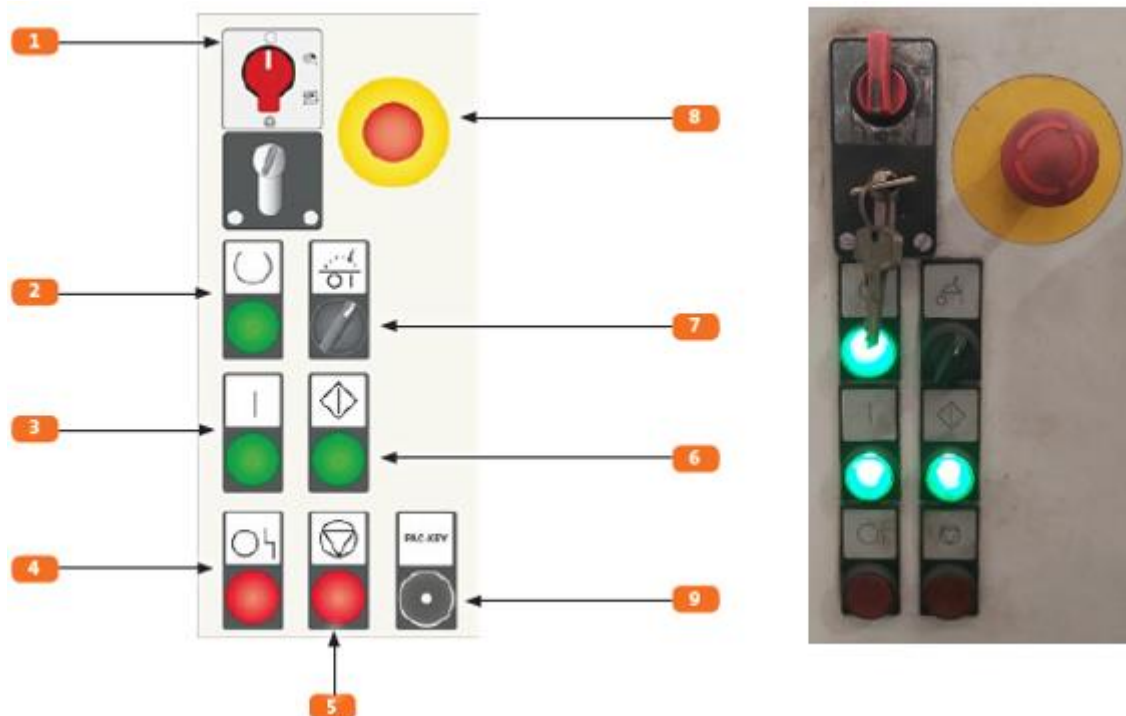


Figura 74 - Schema (sx) e fotografia scattata in stabilimento (dx) del quadro di controllo del robot 1

Il quadro di controllo è un dispositivo di sicurezza costituito da vari pulsanti, tramite i quali è possibile interagire con il robot per avviare/arrestare la movimentazione degli assi, scegliere la modalità di funzionamento e recepire eventuali messaggi di errore.

La tabella seguente riassume tutti i possibili comandi associandoli alle relative funzioni:








Numero	Simbolo	Descrizione	Funzione
1		Selettore modale	Commutatore a chiave
2		Pronto	Indicatore luminoso
3		Potenza ON	Pulsante luminoso
4		Potenza OFF / errore	Pulsante luminoso
5		STOP	Pulsante
6		START	Pulsante luminoso
7		Arco ON / OFF	Selettore a leva a scatto
8		Pulsante a fungo	Arresto di emergenza
9		Chiave di accesso personale	Interruttore a codice

Tabella 17 - Comandi del quadro di controllo

Nello specifico, è possibile effettuare un'analisi più approfondita dei vari comandi:

- 1) Selettore modale. Si presenta come un commutatore a chiave, con cui è possibile selezionare la modalità di funzionamento del robot prima di avviare il programma di saldatura. Le modalità consentite sono schematizzate in tabella 18:

Simbolo	Funzionamento
	OFF
	Manuale a velocità ridotta "T1"
	Manuale ad alta velocità "T2"
	Automatica "AUTO"

Tabella 18 - Modalità di funzionamento del selettore modale



Figura 75 - Selettore modale

- Modalità OFF. Il robot risulta privo di alimentazione elettrica, pertanto non è possibile effettuare programmazione né da tastiera né dalla pulsantiera di programmazione. Questa modalità è impiegata in fase di manutenzione del sistema robotico;
- Modalità manuale a velocità ridotta "T1". È caratterizzata da una velocità massima di movimentazione degli assi pari a $250 \frac{mm}{s}$ e viene utilizzata per testare nuovi programmi. Durante il funzionamento in modalità manuale a velocità ridotta è possibile modificare le liste dei parametri di saldatura in corso d'opera. Inoltre, la movimentazione dev'essere concessa dal tasto di conferma presente sul lato della pulsantiera e i meccanismi di sicurezza sono disattivati;

- Modalità Manuale ad alta velocità “T2”. Tipicamente, la velocità di movimentazione è superiore a $250 \frac{mm}{s}$. Anche in questo caso è possibile modificare le liste di saldatura durante la movimentazione, che dev’essere confermata premendo il tasto presente sull’altro lato della pulsantiera. La differenza principale, rispetto alla modalità precedente, è dovuta all’attivazione dei meccanismi di sicurezza;
 - Modalità Automatica “AUTO”. Si tratta del funzionamento che garantisce la maggior efficienza del robot, implementato dopo aver testato il codice con le modalità precedenti;
- 2) Pronto. È un indicatore di colore verde che si accende quando il sistema risulta pronto per il funzionamento. Le cause di un’eventuale mancata accensione potrebbero essere: fungo di arresto d’emergenza premuto; livelli di pressione inadeguati per il corretto funzionamento; pulsantiera di programmazione scollegata; assenza di alimentazione elettrica e unità di controllo non inserita;
 - 3) Potenza ON. È un pulsante di colore verde, che si accende quando il sistema è operativamente pronto per essere avviato. La movimentazione degli assi dipenderà dalla modalità su cui è settato il selettore modale: “T1”, “T2” o “AUTO”;
 - 4) Potenza OFF. È anch’esso un pulsante, che si illumina di colore rosso per segnalare un’emergenza oppure un arresto dell’impianto di saldatura. Le cause potrebbero essere molteplici: l’accensione del fungo di emergenza; l’azionamento delle fotocellule che delimitano il campo di lavoro del robot in modalità automatica, segnalando la presenza di personale in una zona non sicura; un errore rilevato in fase di saldatura, ad esempio una collisione del robot con un ostacolo oppure un difetto dell’arco. Le immediate conseguenze sono la disattivazione degli azionamenti e la comparsa di un messaggio di errore sul display della pulsantiera. Per consentire il ripristino delle funzioni, è necessario risolvere il problema che ha provocato l’errore;
 - 5) STOP. Questo pulsante consente di mantenere gli azionamenti pronti, pur sospendendo il funzionamento del sistema di saldatura ed interrompendo l’arco;



Figura 76 - Armadio di comando

- 6) **START.** È un pulsante che si illumina di verde nel caso in cui i comandi siano pronti per la messa in funzione. Premendolo, ha inizio la movimentazione degli assi del robot sulla base del programma di saldatura selezionato. Inoltre, consente la ripresa delle attività in seguito all'attivazione del tasto "STOP";
- 7) **Arco ON/OFF.** È un selettore che può essere impostato su due modalità: ON consente all'arco di scoccare, effettuando la saldatura; OFF impedisce la generazione dell'arco;
- 8) **Pulsante a fungo.** Si tratta del tasto di arresto di emergenza, che determina l'interruzione istantanea degli azionamenti. A seconda della modalità di funzionamento, l'emergenza andrà affrontata in modo differente. Per la ripresa delle attività, nel caso di funzionamento in modalità "T1", sarà sufficiente risolvere la situazione di emergenza e riattivare il sistema. Per le modalità "T2" e "AUTO", invece, è necessario riportare il selettore in modalità "OFF" e ripetere la procedura di accensione;
- 9) **Chiave di accesso personale.** A seconda dell'utente, consente livelli di accesso diversificati. È opzionale, infatti è presente nei quadri di controllo dei robot 3 e 4, ma non per i robot 1 e 2. [24] [25]

4. Gestione, analisi e ottimizzazione

Il presente capitolo è suddiviso in tre sezioni principali. Inizialmente, saranno presentati gli strumenti con cui sono state eseguite le analisi sui robot presenti in stabilimento. Successivamente, verranno forniti i risultati dello studio condotto sulla saldatura di basamenti fissi, basamenti rotanti e travi stabilizzatori. Infine, sarà realizzato un approfondimento nel tentativo di ottimizzare le prestazioni del robot numero tre.

4.1. Manitowoc web app e Manitowoc app

Per poter monitorare il processo di saldatura delle saldatrici presenti in azienda, Manitowoc si serve di un'applicazione fruibile sia via web che tramite smartphone. Le due versioni hanno caratteristiche molto simili, pur presentando alcune differenze.

Manitowoc web app è caratterizzata dalla seguente schermata principale:



Figura 77 - Schermata principale Manitowoc web app

Come si evince dalla figura 77, la web app è costituita da due sezioni differenti: la sezione richieste, utilizzata per la richiesta di documentazione interna allo stabilimento Manitowoc, e la sezione energia, che consente di monitorare il consumo energetico delle saldatrici su cui è stato installato il sistema “Trace&Follow”.

Una volta effettuato l'accesso alla sezione di nostro interesse, “energia”, dovrà essere selezionato lo stabilimento. Dal momento che il sistema “Trace&Follow” è stato installato solamente presso lo stabilimento di Niella Tanaro, ad oggi risulta l'unica opzione selezionabile (figura 78).



Figura 78 - Selezione stabilimento

Si accede così alla Home Page (figura 79), in cui è possibile visualizzare:

- Il consumo energetico giornaliero totale;
- Il consumo energetico giornaliero delle singole saldatrici;
- Lo stato delle macchine;
- Eventuali allarmi causati dalle saldatrici stesse.

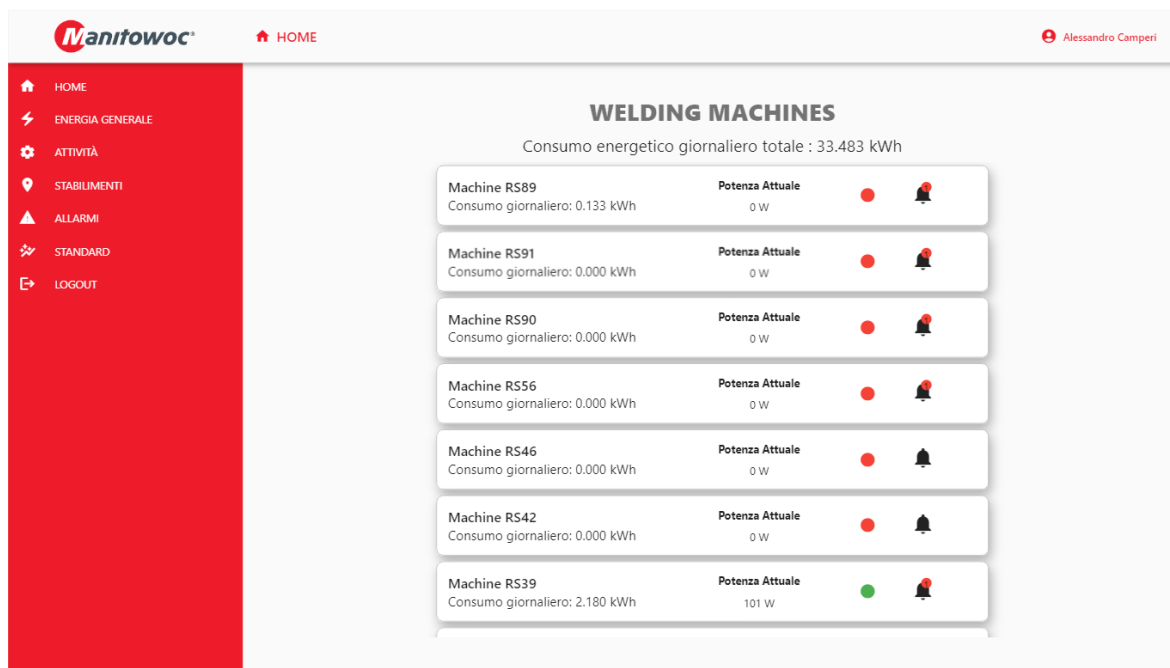


Figura 79 - Home Page

Dalla Home Page è possibile accedere a molte altre schermate:

- Selezionando la dicitura “energia generale”, è possibile visualizzare il riepilogo dell’energia consumata dalle saldatrici presenti in stabilimento, divise tra robotizzate e manuali:

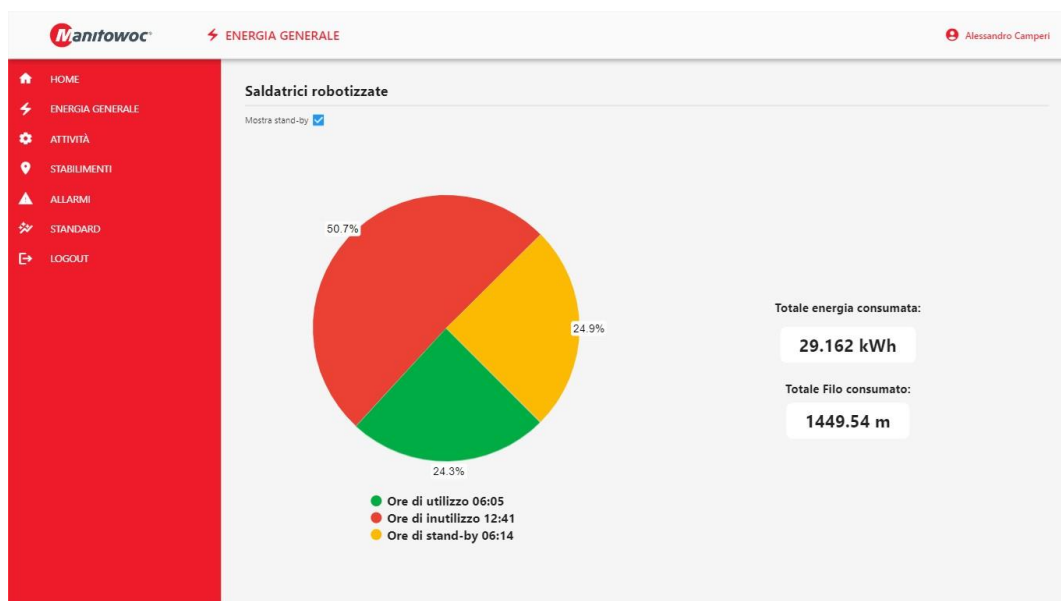


Figura 80 - Riepilogo dei consumi relativi alle saldatrici robotizzate

A titolo esemplificativo, in figura 80 è riportato il riepilogo relativo all'energia consumata dalle saldatrici robotizzate. Il diagramma a torta consente di valutare, a seconda della colorazione, l'efficienza degli impianti di saldatura robotizzati. Infatti, in colore verde sono riportate le ore di effettivo utilizzo dei robot, mentre i colori giallo e rosso indicano, rispettivamente, stato di stand-by e stato inattivo. Inoltre, sono riportati due dati significativi in termini di impiego: l'energia totale consumata ed il filo complessivamente utilizzato.

La medesima analisi potrebbe essere condotta sulle saldatrici manuali.

- Selezionando la pagina “attività”, è possibile visualizzare la lista di tutte le attività svolte dagli operatori nel periodo di tempo scelto:



Figura 81 - Lista attività

La figura 81 rappresenta la lista delle attività svolte tra il 01/05/2023 e il 31/05/2023. Per ciascuna di esse, sono indicati:

- 1) La macchina saldatrice impiegata;
- 2) Il prodotto realizzato ed il numero di pezzi;
- 3) L'identità dell'operatore;
- 4) Data e turno lavorativo.

Per poter valutare la bontà del lavoro svolto dall'operatore durante un turno, sarà sufficiente selezionare l'attività desiderata, come verrà illustrato in seguito.

- Selezionando la voce “allarmi”, è possibile visualizzare lo storico degli allarmi ed il loro stato (attivo/disattivo). Si tratta di segnalazioni inviate dalle saldatrici e dovute a malfunzionamenti che richiedono opere di manutenzione. Impostando il periodo di tempo voluto, vengono individuati gli allarmi con le relative informazioni:
 - 1) Numero della saldatrice, per l'identificazione;
 - 2) Data di attivazione;
 - 3) Stato attivo/disattivo;

4) Data di disattivazione, se già avvenuta.

STORICO ALLARMI			
DA	19-09-2022	A	02-08-2023
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS89	Stato ATTIVO	Data attivazione 12:37 - 17/02/2023	Data disattivazione allarme attivo
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS91	Stato ATTIVO	Data attivazione 11:04 - 24/01/2023	Data disattivazione allarme attivo
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS67 R2	Stato DISATTIVO	Data attivazione 08:29 - 23/06/2023	Data disattivazione 13:41 - 01/07/2023
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS67 R2	Stato DISATTIVO	Data attivazione 08:29 - 23/06/2023	Data disattivazione 08:29 - 23/06/2023
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS41	Stato DISATTIVO	Data attivazione 08:07 - 29/05/2023	Data disattivazione 08:08 - 29/05/2023
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS41	Stato DISATTIVO	Data attivazione 08:07 - 29/05/2023	Data disattivazione 08:07 - 29/05/2023
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS41	Stato DISATTIVO	Data attivazione 08:54 - 11/01/2023	Data disattivazione 13:43 - 26/05/2023
ALLARME MANUTENZIONE Machine RS55	Stato DISATTIVO	Data attivazione 11:13 - 23/05/2023	Data disattivazione 14:13 - 25/05/2023

Figura 82 - Storico allarmi

- Selezionando la voce “standard”, è possibile prendere visione di tutti gli standard produttivi inseriti precedentemente oppure crearne di nuovi, scegliendo la saldatrice di riferimento ed il prodotto realizzato. Con il termine “standard” si intende l’andamento del consumo energetico che una saldatrice dovrebbe far registrare in condizioni di lavoro ottimali, senza che si verifichino interruzioni dovute a problemi vari. Una volta definito questo andamento, l’efficienza del turno lavorativo andrà valutata comparando il consumo energetico del turno con lo standard di riferimento.

STANDARD

Lista dei prodotti : Trave stabilizzatore HUP B 32-27 Elimina Standard

Inserisci un nuovo STANDARD

Inserisci il nome del prodotto :

Scegli su quale macchina :
Machine RS89

Seleziona il periodo :
02-08-2023 06:00 a: 02-08-2023 17:27

INSERISCI STANDARD

Figura 83 - Standard

- Selezionando la saldatrice di interesse, si accede alla pagina in cui sono riportate dettagliatamente le informazioni principali relative alla macchina:
 - 1) Diagramma a torta, in cui sono evidenziate le ore di utilizzo, inutilizzo e stand-by;
 - 2) Energia totale consumata;
 - 3) Filo di saldatura complessivamente impiegato;

- 4) Grafico della potenza dissipata in funzione del tempo;
- 5) Lista delle attività in base al periodo di tempo selezionato.

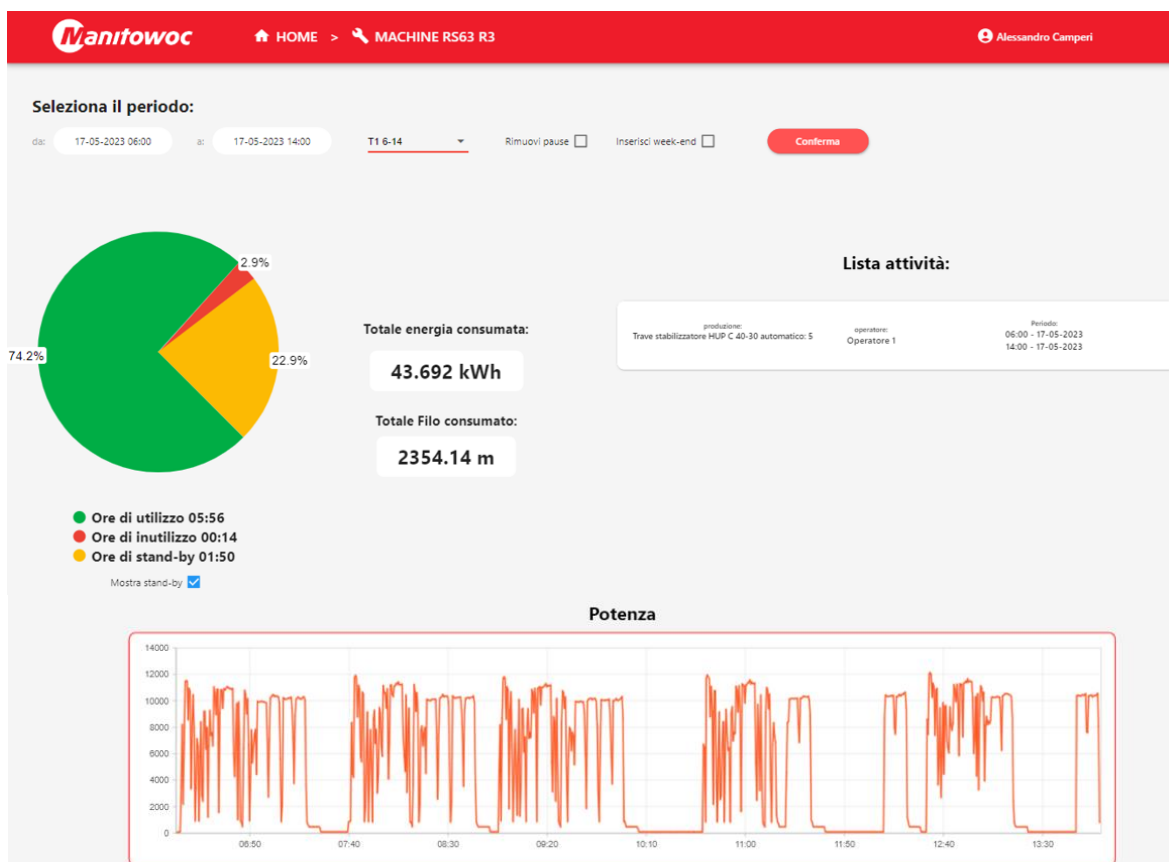


Figura 84 - Pagina informativa relativa al robot di saldatura numero tre impiegato nel giorno 17/05/2023

Come anticipato in precedenza, selezionando un'attività presente nella lista è possibile valutare l'efficienza del lavoro svolto, confrontandolo con lo standard di produzione:

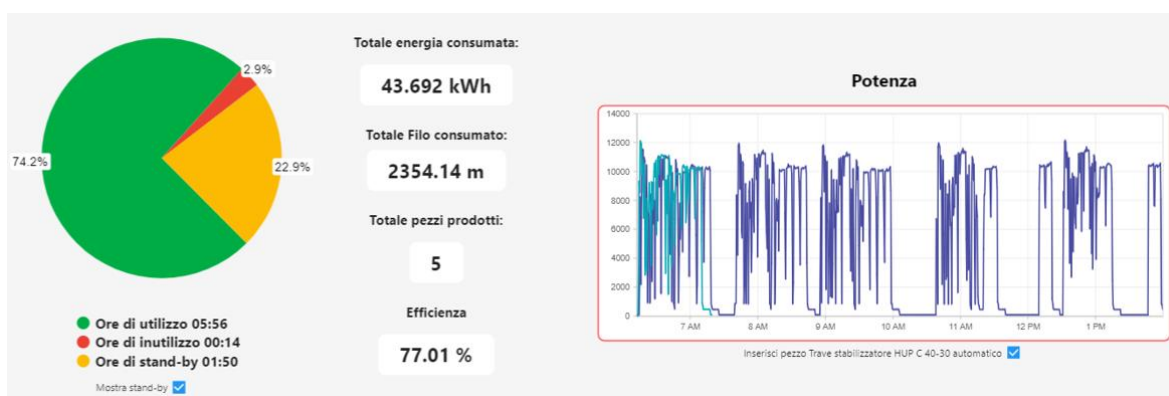


Figura 85 - Pagina relativa ad una specifica attività svolta

Nell'esempio proposto in figura 85, viene confrontata l'attività svolta (colore blu scuro) dall'operatore durante il primo turno di lavoro (6-14) del giorno 17/05/2023 con lo standard di produzione (in colore azzurro chiaro) previsto per la realizzazione di travi stabilizzatori Hup 40-30.

Rispetto alla Manitowoc web app appena descritta, la versione per smartphone presenta analogie e differenze. È ancora presente la suddivisione nelle due sezioni “richieste” ed “energia” e, oltre a dover scegliere lo stabilimento desiderato, in aggiunta va selezionato il reparto a cui fare riferimento, come riportato in figura 86. Nonostante siano presenti ben quattro reparti, ossia fabbricazione, bracci zincati, manutenzione e saldatura tower, il sistema “Trace&Follow” è stato installato solamente nel primo di essi. Pertanto, dopo aver selezionato il reparto fabbricazione, è possibile accedere alle seguenti schermate:

- Mappa del reparto, in cui sono indicate con led di colore verde o rosso, a seconda che la macchina sia attiva o inattiva, le saldatrici presenti in stabilimento (figura 86). Questa mappa consente di individuare agevolmente la posizione di ciascuna macchina all’interno del reparto, facilitando così le operazioni di manutenzione;
- Lista delle varie saldatrici, da cui è possibile raggiungere la pagina di dettaglio della macchina selezionata;
- Storico degli allarmi, che riporta lo stato attivo/disattivo con relative date di segnalazione ed intervento;
- Informazioni sull’account.

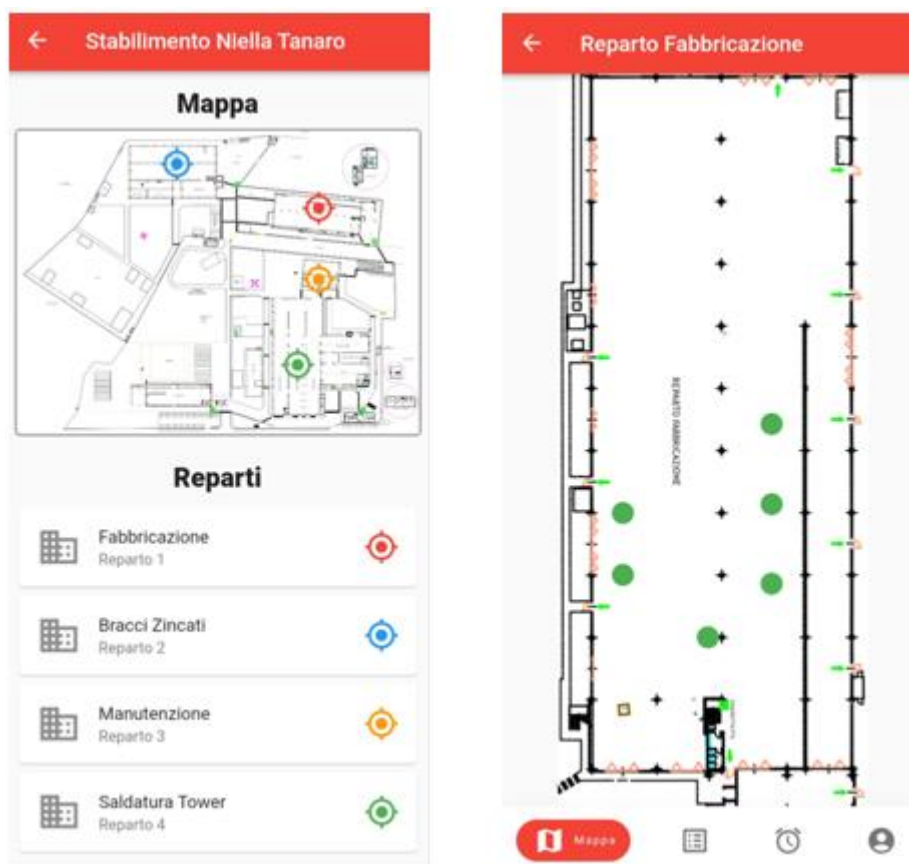


Figura 86 - Reparti presenti in stabilimento (sx) e mappa delle saldatrici situate nel reparto di fabbricazione (dx)

Una volta selezionata la saldatrice desiderata, si accede alla pagina di dettaglio (figura 87). La differenza principale rispetto alla web app è dovuta alla possibilità di impostare il tempo di cut-off nel box “Imposta il START&STOP”, ovvero i minuti oltre i quali viene imposto lo spegnimento della macchina nel caso in cui sia accesa ed in stato di stand-by. Inoltre, è

anche possibile ordinare lo spegnimento immediato della macchina saldatrice da remoto, premendo il tasto “STOP”.

Infine, una funzionalità aggiuntiva è dovuta alla possibilità di inserire le attività svolte dagli operatori: dev’essere selezionato il giorno di riferimento, il turno lavorativo, l’identità del lavoratore, il prodotto realizzato ed il numero di pezzi. In questo modo, tramite web app sarà possibile valutare l’efficienza del lavoro svolto paragonandolo con lo standard di riferimento, come spiegato precedentemente.

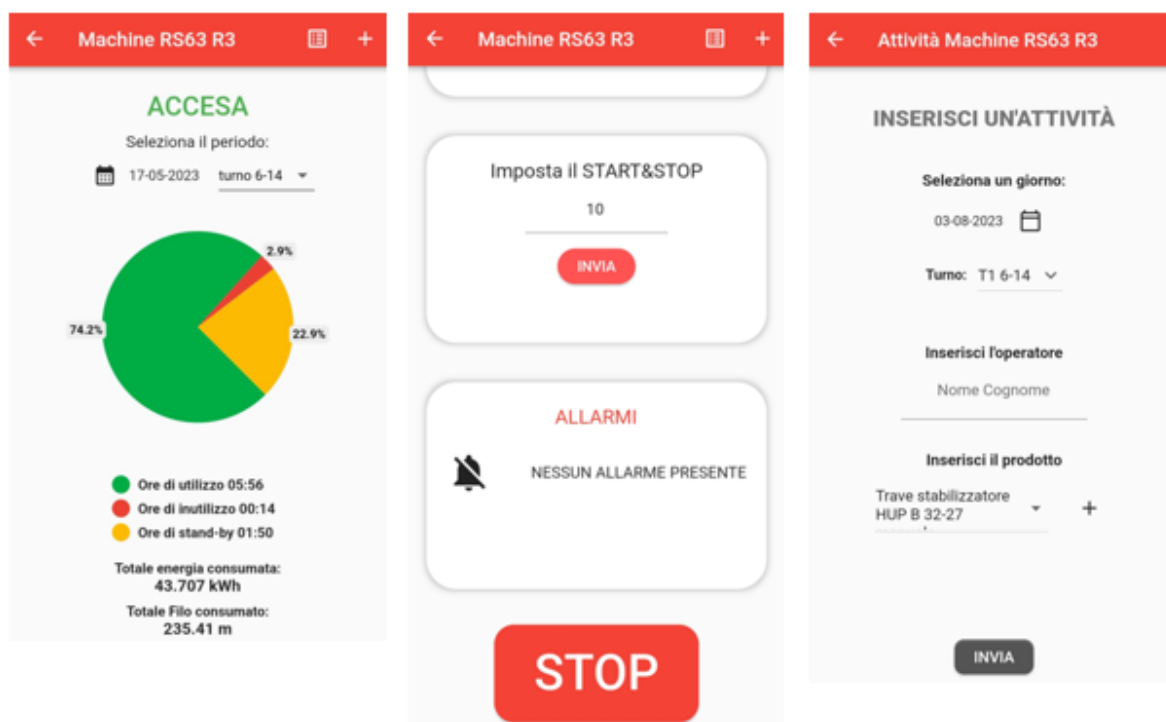


Figura 87 - Pagina di dettaglio del robot 3 (sx); modalità “START&STOP” e “STOP” (centro); inserimento attività (dx)

Per poter monitorare il consumo energetico delle saldatrici, si ricorre al sistema “Trace&Follow”. Si tratta di una piattaforma installabile sulle macchine con alimentazione a fase singola oppure trifase, dotata di un connettore di espansione a cui è possibile collegare ulteriori schede per espanderne le funzionalità. Attualmente, il connettore viene impiegato per misurare il filo di saldatura consumato dalle saldatrici.

In generale, il sistema “Trace&Follow” consente di implementare, per ogni macchina su cui è installato, le seguenti funzioni:

- Indicazione dello stato della macchina, effettuato mediante un led luminoso. Il colore della spia indica lo stato della scheda:

Spia	Stato
Verde lampeggiante	Scheda operativa
Viola	Scheda in cerca di rete LoRa
Rosso-bianco	Errore invio pacchetto LoRa
Arancione lampeggiante	Richiesta manutenzione

Tabella 19 - Stato della macchina in funzione del colore della spia luminosa

- Monitoraggio del consumo energetico;
- Invio delle richieste di manutenzione tramite un apposito pulsante;
- Spegnimento della macchina da remoto tramite un sistema cut-off;
- Invio tramite connettività LoRa delle informazioni acquisite verso la piattaforma cloud che gestisce ed archivia i dati raccolti.

La scheda “T&F” può essere alimentata sia in tensione continua che alternata ed è dotata di 4 input e 4 output digitali, attualmente riservati per implementazioni future. Per permettere la localizzazione della saldatrice, la scheda è dotata di un ricevitore bluetooth e si serve di una rete di nodi fissi installata all’interno dello stabilimento. La trasmissione dei dati avviene tramite protocollo LoRa, una tecnologia a lungo raggio e bassa potenza. Ogni scheda “T&F” invia le informazioni raccolte ad un unico gateway presente in reparto (figura 88), che deve assumere una posizione preferibilmente sopraelevata rispetto alle schede e centrale rispetto al reparto di installazione. Inoltre, la presenza di ostacoli metallici può influenzare il posizionamento a cause delle inevitabili riflessioni del segnale radio. I gateway necessitano di una connessione internet preferibilmente cablata, ma supportano anche le connessioni wireless previa configurazione. La loro funzione principale consiste nel ricevere i dati via LoRa dalle schede T&F, le quali effettuano periodicamente una scansione per selezionare il gateway con la potenza di segnale maggiore tra quelli individuati. Successivamente, le informazioni vengono inoltrate dal gateway alla piattaforma cloud che li gestisce. Manitowoc web app e Manitowoc app attingono dalla piattaforma cloud per ricavare le informazioni di cui necessitano.



Figura 88 - Gateway Dragino



Figura 89 - Scheda T&F installata su una saldatrice

4.2. Monitoraggio delle performance dei robot

Si tratta di un’attività di carattere generale, che consiste nell’osservazione dei procedimenti di saldatura con cui i robot consentono di realizzare basamenti fissi, basamenti rotanti e travi stabilizzatori di tre modelli di gru automontanti a marchio Potain:

- Hup M 28-22;
- Hup 32-27;
- Hup 40-30.

4.2.1. Analisi dati

L'analisi dati sui tre modelli appena citati è condotta nel modo seguente: per ciascuno di essi, si monitora il processo di saldatura di basamento fisso, basamento rotante e trave stabilizzatore in doppia modalità, ossia saldatura robotizzata in modalità manuale a velocità ridotta "T1" e modalità automatica "AUTO". La differenza principale tra le due tipologie consiste nella velocità di esecuzione. Infatti, in modalità T1, i movimenti degli assi del robot risultano rallentati rispetto a quelli eseguiti in AUTO. Ciò garantisce una maggiore tempestività di intervento ed un monitoraggio a più stretto contatto con la macchina saldatrice robotizzata.

Per ciascun componente di ogni modello considerato, viene condotta un'analisi relativa al valore aggiunto apportato all'azienda. In questi termini, durante la realizzazione dei pezzi, le fasi di saldatura sono considerate come "valore aggiunto", mentre le restanti azioni, ossia spostamenti, fermate, movimentazioni e attese vengono etichettate come "non valore aggiunto". Pertanto, risulta logico pensare che sia necessario ridurre al minimo indispensabile il numero di fermate e rendere il più veloce possibile, nei limiti consentiti, le movimentazioni.

I dati correlati al processo di saldatura di un singolo componente comprendono tutte le azioni svolte con i relativi tempi. Una volta raccolte tutte le informazioni, queste vengono inserite all'interno di una tabella e classificate come VA oppure come NVA, ossia "valore aggiunto" e "non valore aggiunto". Il risultato è esposto nell'esempio seguente, relativo al processo di saldatura eseguito in modalità automatica per la realizzazione di un trave stabilizzatore modello Hup M 28-22:

Time Observation Form					
Description of operation	Start	Finish	Duration	Classification	VA vs. NVA
Stabilizer beam movement	00:00:00	00:03:12	03:12	MM	NVA
Placement on the rotary table and program start	00:03:12	00:07:43	04:31	MF	NVA
Manual robot tip control	00:07:43	00:07:59	00:16	TF	NVA
Robot tip cleaning	00:07:59	00:08:12	00:13	C	NVA
Welding	00:08:12	00:14:02	05:50	A	VA
Safety stop	00:14:02	00:16:32	02:30	Q	NVA
Welding	00:16:32	00:20:06	03:34	A	VA
Table rotation (90°) and welding	00:20:06	00:21:00	00:54	A	VA
Table rotation (180°) and welding	00:21:00	00:24:15	03:15	A	VA
Table rotation (180°) and welding	00:24:15	00:26:28	02:13	A	VA
Table rotation (90°) and welding	00:26:28	00:33:27	06:59	A	VA
Table rotation and welding	00:33:27	00:34:41	01:14	A	VA
Table rotation and welding	00:34:41	00:35:12	00:31	A	VA
Table rotation and welding	00:35:12	00:40:00	04:48	A	VA
Table rotation (180°) and welding	00:40:00	00:45:09	05:09	A	VA
Table rotation (180°) and welding	00:45:09	00:50:13	05:04	A	VA
Table rotation (180°) and welding	00:50:13	00:55:11	04:58	A	VA
Table rotation and return to initial position (robot)	00:55:11	00:55:24	00:13	OM	NVA
Stabilizer beam movement	00:55:24	01:00:00	04:36	MM	NVA

Tabella 20 – Monitoraggio del processo di saldatura di un trave stabilizzatore modello M 28-22

Affinché fosse possibile classificare come VA o NVA le varie azioni è stato necessario stilare, precedentemente, una lista di tutte le possibili tipologie, come si evince dalla tabella seguente:

Pareto analysis					
Type of action	VA/NVA	Classification	Total	% VA/NVA	Acum. %
Assembly/Welding	VA	A	00:44:29	74%	74%
Material (Movements)	NVA	MM	00:07:48	13%	87%
Material (Fitting, adjusting)	NVA	MF	00:04:31	8%	95%
Quality Problem	NVA	Q	00:02:30	4%	99%
Tools (Fitting, adjusting)	NVA	TF	00:00:16	0%	99%
Structure Cleaning	NVA	C	00:00:13	0%	100%
Other (Movements)	NVA	OM	00:00:13	0%	100%
Information	NVA	I	00:00:00	0%	100%
Material (Waiting)	NVA	MW	00:00:00	0%	100%
Tools (Searching/getting)	NVA	TS	00:00:00	0%	100%
Material (Searching/getting)	NVA	MS	00:00:00	0%	100%
Other (Waiting)	NVA	OW	00:00:00	0%	100%
Out Sourcing	VA	OS	00:00:00	0%	100%
Total Time of Production:			01:00:00		

Tabella 21 – Classificazione delle varie tipologie di azioni eseguibili

Nella tabella precedente, inoltre, è effettuato il conteggio in ore, minuti e secondi della durata di ogni azione. In questo modo, è possibile determinare in quale percentuale ciascuna di esse contribuisca alla realizzazione del componente studiato.

La distinzione tra VA e NVA è indicativa in termini di margini di miglioramento apportabili in azienda. Per rendere visivamente più chiaro questo aspetto, si ricorre ad un diagramma a torta, nel quale le azioni che portano valore aggiunto sono positive e rappresentate col colore verde, mentre quelle che non portano valore aggiunto sono negative e rappresentate in rosso:

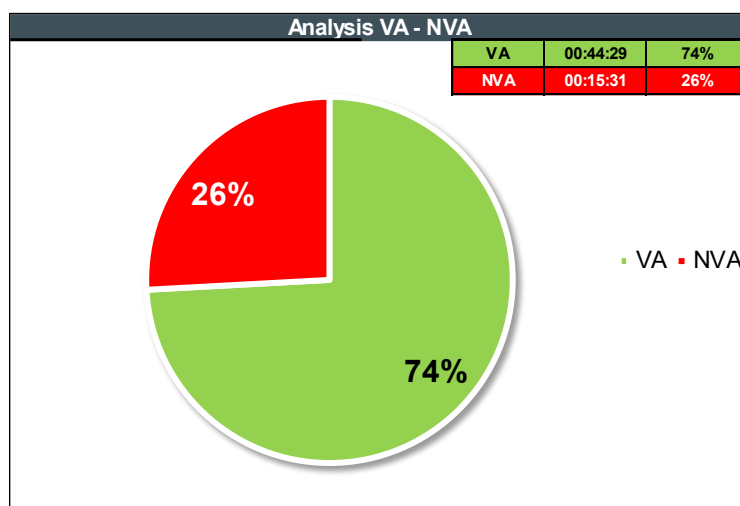


Figura 90 - Diagramma a torta relativo a VA e NVA per il processo di saldatura di un trave stabilizzatore M 28-22

Chiaramente, non sarà possibile eliminare completamente la sezione in rosso relativa al NVA, poiché essa comprende alcune azioni necessarie come lo spostamento del braccio robotizzato, la rotazione del posizionatore a portale o della tavola rotante, la movimentazione dei componenti, il loro fissaggio, la pulizia e le fasi di carico e scarico.

D'altro canto, esiste un grande margine di miglioramento. Attuare modifiche su determinate azioni implica ridurre al minimo la porzione rossa e aumentare significativamente i punti

percentuali che rappresentano il VA, determinando una riduzione dei tempi e un aumento di produttività.

Per esempio, è possibile apportare migliorie dal punto di vista logistico. Cambiando la sequenza con cui vengono svolte le lavorazioni è possibile evitare movimentazioni superflue e svolgere operazioni in tempo mascherato.

Ulteriori migliorie sono attuabili a livello software: cambiando, per esempio, le traiettorie del robot, è possibile ridurre il tempo ciclo pur mantenendo gli spostamenti in sicurezza. Inoltre, come si può notare dalla tabella 20, sono presenti alcune azioni evidenziate in rosso che comportano un arresto non voluto del robot. Nell'esempio in questione, relativo al trave stabilizzatore modello M 28-22, si tratta di uno stop di sicurezza che si verifica a causa del movimento del braccio robotico. Quest'ultimo, infatti, durante la fase di pulizia torcia, transita dinanzi al sensore di movimento provocando un arresto del robot, come se una persona fosse entrata all'interno dell'area di lavoro provocando l'interferenza con la fotocellula.

Come ultimo strumento di analisi si ricorre al diagramma di Pareto, che consente di visualizzare graficamente quali sono i fattori che maggiormente influenzano i risultati ottenuti:

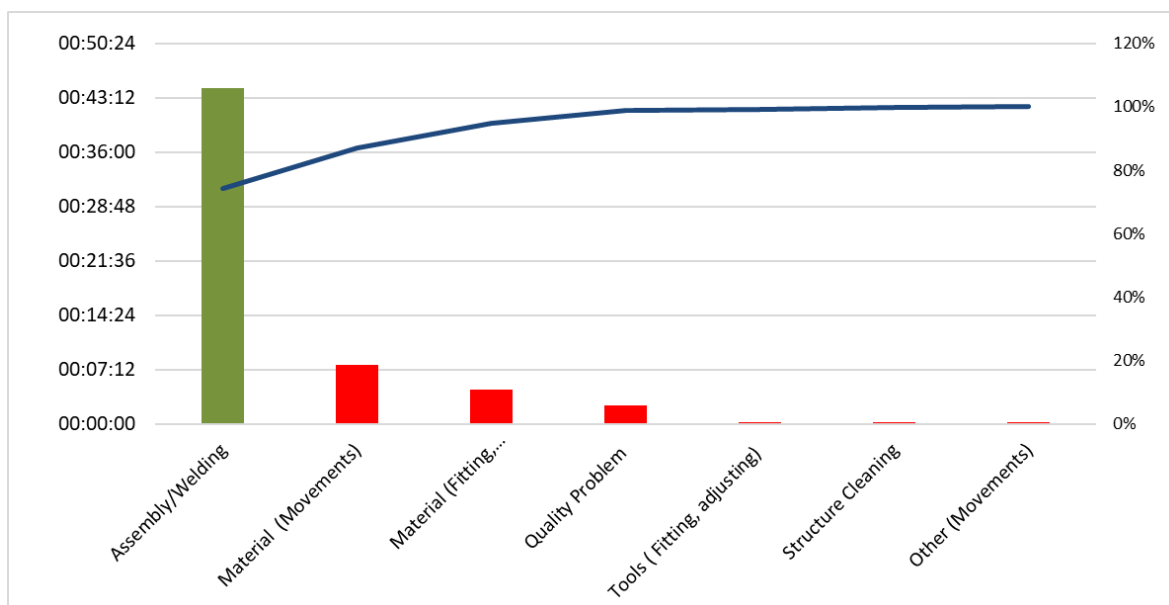


Figura 91 - Diagramma di Pareto relativo al trave stabilizzatore modello M28-22

Si tratta di un'altra modalità con cui può essere approfondita la relazione tra VA e NVA, rappresentando in ordine di importanza le voci su cui è possibile agire maggiormente per incrementare la percentuale di VA.

4.2.2. Confronto tra modalità manuale/automatico

Come anticipato in precedenza, per ciascuno dei tre modelli di gru automontanti a marchio Potain sono stati monitorati i processi di saldatura di basamento fisso, basamento rotante e

trave stabilizzatore in modalità T1 e AUTO. A seconda del tempo impiegato e delle percentuali di VA e NVA ricavate dai dati raccolti, verrà determinata la convenienza dell'azienda nel far lavorare il robot in modalità manuale oppure automatica. Benché la modalità di funzionamento normalmente prevista per le lavorazioni sia quella AUTO, talvolta potrebbe risultare più opportuno procedere con la saldatura in T1. Ciò si verifica nei casi in cui i programmi di saldatura risultino ormai obsoleti o necessitino di opportune correzioni, che eviterebbero la concretizzazione di problemi come collisioni, incollature e difetti arco.

La seguente analisi verte proprio sul confronto tra le due modalità di saldatura impiegate per la realizzazione dei componenti appena citati, con l'obiettivo di determinare quale procedimento sia più opportuno utilizzare.

- Basamento fisso Hup M 28-22:

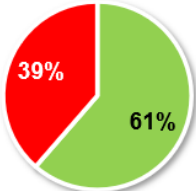
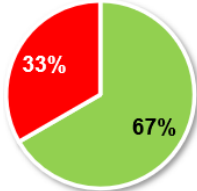
	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	06:34:23	04:31:02
% VA e NVA		

Tabella 22 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il basamento fisso Hup M 28-22

Come si evince dalla tabella 22, la percentuale di VA per la saldatura in modalità automatica risulta maggiore. In aggiunta, vengono risparmiate quasi due ore di tempo durante ciascun ciclo di saldatura. Per queste ragioni, dev'essere prediletta la saldatura in modalità automatica per il basamento fisso Hup M 28-22;



Figura 92 - Basamento fisso Hup M 28-22

- Basamento rotante Hup M 28-22:

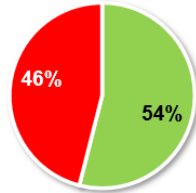
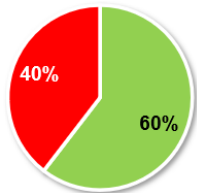
	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	05:09:50	03:50:36
% VA e NVA		

Tabella 23 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il basamento rotante Hup M 28-22

Anche in questo caso la saldatura in modalità automatica garantisce un tempo ciclo di durata inferiore e percentuali di VA più elevate, come mostrano i diagrammi a torta. Per questi motivi, risulta più conveniente procedere con la saldatura in modalità automatica per la fabbricazione del basamento rotante Hup M 28-22.

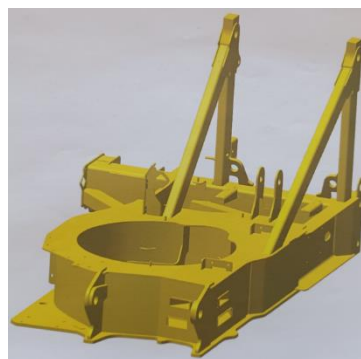


Figura 93 - Basamento rotante Hup M 28-22

- Trave stabilizzatore Hup M 28-22:

	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	01:09:45	01:00:00
% VA e NVA		

Tabella 24 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il trave stabilizzatore Hup M 28-22

Per la saldatura del trave stabilizzatore M 28-22, si assottiglia la differenza tra i diagrammi a torta relativi alla percentuali di VA e NVA, che farebbero propendere per il procedimento automatico di un solo punto percentuale. La differenza più marcata è dovuta al tempo ciclo, che in modalità AUTO risulta pari ad un'ora esatta, mentre la saldatura T1 richiederebbe nove minuti e quarantacinque secondi in più. Ancora una volta, com'era prevedibile, si propenderà per la saldatura in automatico.

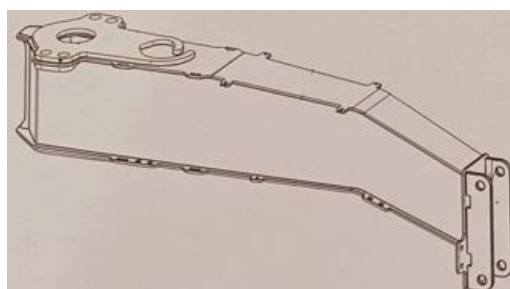


Figura 94 Trave stabilizzatore Hup M 28-22

- Basamento fisso Hup 32-27:

	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	02:18:53	01:37:22
% VA e NVA		

Tabella 25 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il basamento fisso Hup 32-27

In questo caso, a differenza dei precedenti, la percentuale di VA del diagramma a torta relativo al processo di saldatura manuale supera di tre punti percentuali il corrispettivo in modalità automatica. Ciò è riconducibile ad un problema che è stato riscontrato in fase di saldatura durante la modalità AUTO, riportato sulla pulsantiera di programmazione sotto la voce “collisione”. In particolare, il filo di saldatura che fuoriesce dalla punta del robot si è fuso restando incollato al pezzo e impedendo il regolare svolgimento del processo.

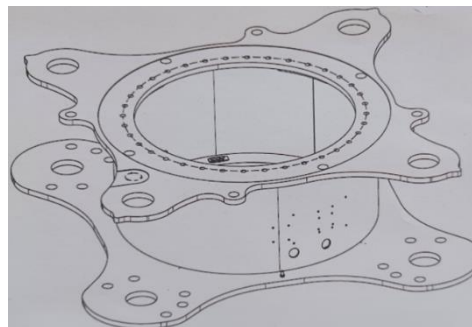


Figura 95 - Basamento fisso Hup 32-27

La combinazione tra impurezze superficiali presenti sul pezzo, imprecisioni relative alle coordinate dei punti nello spazio che devono essere raggiunti dal robot e velocità eccessive di movimentazione, ha causato l’arresto del robot per un tempo complessivo di quattordici minuti e quarantacinque secondi. Questa sosta ha condizionato pesantemente le percentuali di VA e NVA, visibili nel diagramma a torta di destra in tabella 25. Nonostante ciò, il tempo ciclo della saldatura in modalità automatica risulta comunque decisamente inferiore rispetto al corrispettivo in manuale. La sosta forzata, però, comporta l’intervento di un operatore dedicato alla fase di puntatura, che dovrà interrompere lo svolgimento delle proprie mansioni per assistere il robot.

In sintesi, la soluzione migliore dovrebbe prevedere un’adeguata rimozione delle impurezze superficiali presenti sui componenti e la revisione dei programmi di saldatura, utile per apportare eventuali correzioni in termini di coordinate dei punti raggiunti dal robot. Solo dopo aver effettuato queste operazioni sarebbe conveniente ricorrere al processo di saldatura in modalità automatica, senza che sia necessaria un’eventuale assistenza da parte del personale.

- Basamento rotante Hup 32-27:

	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	06:14:25	05:08:26
% VA e NVA		

Tabella 26 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il basamento rotante Hup 32-27

Si tratta dello stesso tipo di analisi condotta per il basamento fisso Hup 32-27. Anche per questo componente la percentuale di valore aggiunto è superiore per la saldatura eseguita in modalità T1. In questo caso, la causa di errore in modalità AUTO è dovuta all’elevato numero di collisioni in cui incorre il braccio robotico durante il processo di saldatura, di cui è riportato un esempio in figura 96. Anche la saldatura in manuale

comporta il verificarsi di collisioni, ma la ridotta velocità di movimentazione degli assi ne limita la quantità, riducendo così il numero di fermate indesiderate.

Come già visto per il basamento fisso, anche quello rotante necessiterebbe di una revisione dei codici per poter implementare la saldatura in modalità automatica.

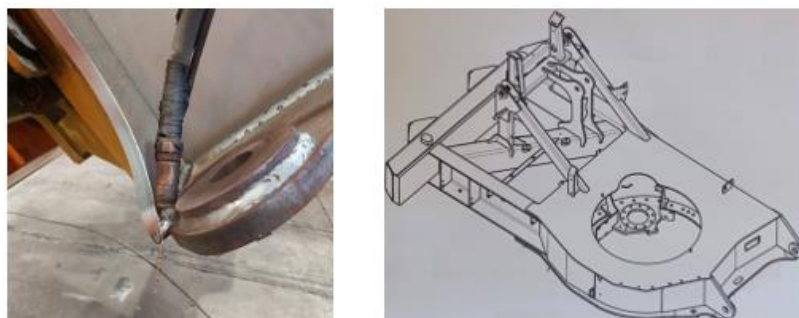


Figura 96 - Fotografia di una collisione (sx) e basamento rotante Hup 32-27 (dx)

- Trave stabilizzatore Hup 32-27:

	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	01:17:18	01:06:48
% VA e NVA		

Tabella 27 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il trave stabilizzatore Hup 32-27

Per la saldatura del trave stabilizzatore Hup 32-27, la percentuale di VA per la modalità automatica è maggiore rispetto alla procedura manuale, mentre il tempo impiegato

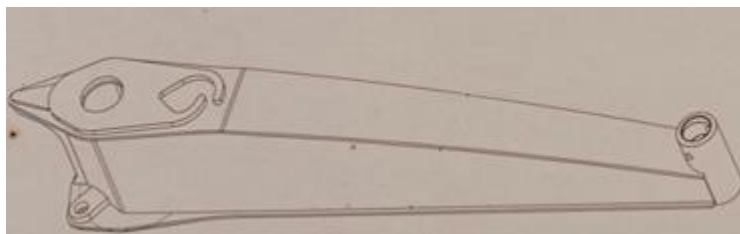


Figura 97 - Trave stabilizzatore Hup 32-27

per l'esecuzione del processo è inferiore. Inoltre, il procedimento non è caratterizzato da particolari fermate. Per queste ragioni, va prediletta la saldatura in modalità AUTO.

- Basamento fisso Hup 40-30:

	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	05:17:20	04:03:24
% VA e NVA		

Tabella 28 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il basamento fisso Hup 40-30

Come si evince dalla tabella 28, la percentuale di valore aggiunto per la modalità automatica è nettamente superiore se paragonata al corrispettivo in modalità manuale. Inoltre, viene risparmiata oltre un'ora di tempo per la saldatura di un singolo componente. Ne consegue la predilezione per la procedura AUTO per la realizzazione di basamenti fissi Hup 40-30.



Figura 98 - Basamento fisso Hup 40-30

- Basamento rotante Hup 40-30:

	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	08:31:16	04:49:49
% VA e NVA		

Tabella 29 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il basamento rotante Hup 40-30

Si tratta del componente per cui è maggiormente marcata la differenza tra le due procedure di saldatura. Il basamento rotante Hup 40-30 viene quindi realizzato in modalità automatica senza riscontrare particolari problemi, con un tempo ciclo nettamente inferiore rispetto alla modalità T1 ed una percentuale di VA di gran lunga superiore, come mostrato in tabella 29.

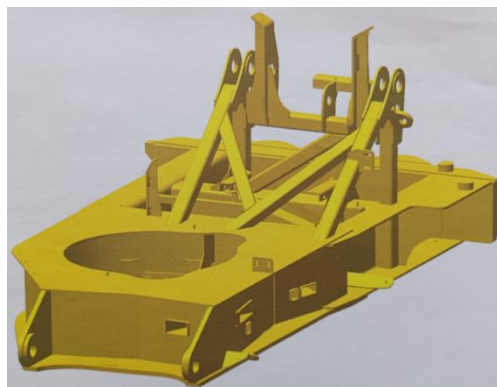


Figura 99 - Basamento rotante Hup 40-30

- Trave stabilizzatore Hup 40-30:

	Manuale	Automatico
Tempo ciclo [h:min:sec]	01:17:38	01:10:54
% VA e NVA		

Tabella 30 - Confronto tra modalità di saldatura manuale/automatica per il trave stabilizzatore Hup 40-30

Nonostante il tempo ciclo per la saldatura in modalità AUTO sia inferiore rispetto a quello ottenuto in T1, la percentuale di VA risulta superiore con la procedura manuale. Ciò è dovuto ad una serie di errori che si verificano in modalità automatica a causa dell'eccessiva velocità di movimentazione del braccio robotico, che provocano lo stop di sicurezza della fotocellula posteriore o l'arresto del braccio stesso in posizioni inusuali. Come verrà illustrato nel paragrafo successivo, in seguito all'intervento di rettifica del codice di programmazione sarà possibile eseguire la saldatura del trave stabilizzatore Hup 40-30 in modalità automatica, senza correre il rischio di danneggiare permanentemente il robot impiegato.

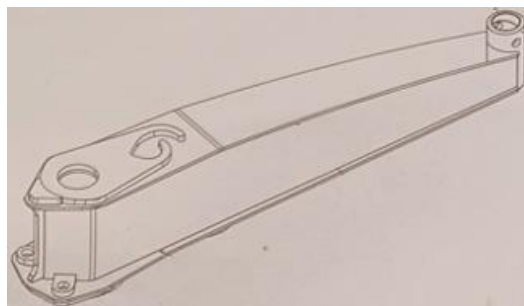


Figura 100 - Trave stabilizzatore Hup 40-30

In sintesi, si può affermare che per l'azienda sia più conveniente far lavorare i robot di saldatura in modalità automatica, la quale garantisce una velocità di movimentazione degli assi maggiore e tempi ciclo ridotti rispetto alla procedura manuale. Nei casi in cui l'eccessiva velocità del braccio provochi fermate indesiderate dovute ad arresti di sicurezza o collisioni, sarà opportuno intervenire revisionando i codici di saldatura al fine di garantire lo svolgimento delle lavorazioni in sicurezza ed ottimizzare la produttività.

4.3. Ottimizzazione robot 3

Dopo aver monitorato il lavoro dei robot ed aver individuato i potenziali margini di miglioramento, è stato possibile implementare l'ottimizzazione del processo di saldatura condotto dal robot numero tre su travi stabilizzatori modello Hup 40-30 (figura 101).

Per la realizzazione di un trave stabilizzatore, il procedimento adottato si suddivide in tre stadi: puntatura, saldatura e finitura. La saldatura viene eseguita dal robot, mentre le altre due fasi sono effettuate dall'operatore manualmente.

Quest'ultimo, prima che venisse condotto il presente studio, lavorava in totale autonomia, senza una precisa sequenza da rispettare. In questo modo,

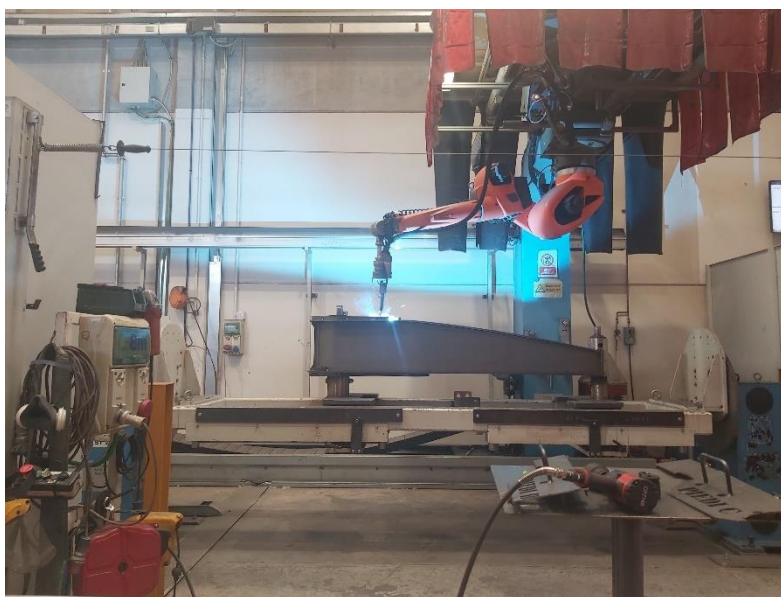


Figura 101 - Saldatura di un trave stabilizzatore Hup 40-30 con il robot numero tre

però, la produttività del robot risultava fortemente limitata e si verificavano frequenti pause. Il grafico sottostante rappresenta, in un tipico turno lavorativo di otto ore, la potenza dissipata dal robot, che è indicativa del suo funzionamento:



Figura 102 – Potenza dissipata per la saldatura di travi stabilizzatori Hup 40-30 il 29/05/2023 dalle 08:00 alle 14:00

Il presente grafico riporta in ordinata il valore della potenza espressa in [kW] e in ascissa il tempo in [h]. Eseguendo il prodotto tra potenza e tempo si ottiene l'energia consumata dal robot, che in questo turno lavorativo ammonta ad un totale di 35'223 kWh.

Osservando l'andamento della potenza risulta evidente che le fermate siano eccessivamente lunghe, compromettendo di fatto il corretto funzionamento del robot, con conseguenze che si ripercuotono sulla produttività della postazione.

Per ovviare a questo problema, è stata definita una totale riorganizzazione del lavoro. Il robot numero tre gode della possibilità di lavorare su due stazioni di lavoro, in modo tale che, mentre viene eseguita la saldatura di un trave su una stazione, l'altra possa essere predisposta per lavorazioni successive. Prima dell'intervento di ottimizzazione questa potenzialità non era sfruttata pienamente ed il saldatore era libero di gestire a propria discrezione il lavoro previsto per il turno. Inoltre, le finiture venivano eseguite su un cavalletto esterno (figura 103). Ciò determinava un incremento dei tempi di movimentazione dei travi e soprattutto un rischio per la salute del lavoratore, che eseguiva la rotazione dei componenti senza l'ausilio di una tavola rotante, operazione che non garantisce la totale incolumità del saldatore.



Figura 103 - Cavalletto esterno per le finiture

L'obiettivo dell'ottimizzazione, invece, consiste nel garantire il funzionamento in continuo del robot, in modo che possa eseguire le saldature dei travi alternativamente tra le due stazioni di lavoro. Per consentire questa operazione è stato necessario ridurre il tempo impiegato dall'operatore per effettuare le finiture, adottando i seguenti accorgimenti:

- Ciascuna stazione è stata dotata di una saldatrice CLOOS per le finiture. Precedentemente, invece, era disponibile una sola saldatrice che l'operatore impiegava per le lavorazioni sul cavalletto esterno;

- Il cavalletto esterno è stato rimosso ed è stato stabilito di eseguire le finiture direttamente sul posizionatore a tavola rotante, sgravando l'operatore dallo sforzo di dover ruotare il trave sul cavalletto (pur aiutato dal carroponte) e riducendo i tempi di movimentazione;
- È stata acquistata una mola a batteria (figura 104) in modo tale da facilitare le operazioni di finitura, eseguibili senza l'ingombro del cavo.



Figura 104 - Mola a batteria

Infine, sono stati rilevati i tempi relativi a puntatura, saldatura e finitura pre-intervento. Per poter implementare la lavorazione in continuo sulle due stazioni, mentre il robot effettua la saldatura di un trave in una stazione, è necessario che l'operatore nell'altra sia in grado di:

- Eseguire le finiture del trave stabilizzatore presente sulla tavola rotante;
- Scaricare il trave finito tramite carroponte in un sito apposito;
- Eseguire la puntatura di un nuovo trave;
- Movimentare e fissare il nuovo trave alla tavola rotante per la predisposizione alla saldatura.

Ripetendo le misurazioni dei tempi molteplici volte e calcolandone la media, si è giunti al seguente risultato:

Fase	Tempo impiegato [h:min:sec]
Puntatura	00:27:19
Saldatura	00:56:35
Finitura	00:36:10

Tabella 31 – Tempi medi per la realizzazione di un trave stabilizzatore Hup 40-30 pre-intervento

Considerando anche i tempi necessari alla movimentazione dei travi tramite carroponte e le pause fisiologiche dell'operatore, in queste condizioni, risultava impossibile per il saldatore effettuare puntatura e finitura nel tempo ciclo in cui il robot saldava il trave. Perciò, è stato necessario effettuare un intervento volto a ridurre il tempo medio di finitura ed incrementare la produttività della macchina saldatrice robotizzata. Per ridurre il numero di pause ed abbattere i tempi di finitura sono stati rilevati i punti del programma software del robot di saldatura più critici, in cui si verificavano ripetutamente determinati tipi di problemi. I più ricorrenti sono stati riportati in tabella 32.

Errori riscontrati durante la saldatura
Riga 540 gc (1093). Difetto arco
Riga 660. Stop di sicurezza dovuto alla fotocellula posteriore
Riga 709. Difetto arco
Riga 711. Raggiunta velocità troppo elevata
Riga 788 gc (367,368).
Riga 803. Robot bloccato in posizione arretrata
Riga 810 gc (384, 385).
Riga 820 gc (422). Difetto arco
Riga 831. Punta del robot incollata
Riga 834 gp (393).
Riga 841 gc (402). Difetto arco
Riga 848 gp (409). Collisione

Tabella 32 – Errori comuni rilevati durante la saldatura

Per poter comprendere a fondo il significato dei vari errori segnalati dalla pulsantiera di programmazione, nella tabella seguente sono riportate le funzioni principali richiamate nei programmi di saldatura con la relativa spiegazione:

Comando	Spiegazione
\$ ()	A seconda del numero presente all'interno della parentesi, richiama la corrispondente lista di saldatura con i relativi parametri
GP ()	Esegue lo spostamento del braccio robotico, che raggiunge le coordinate del punto nello spazio indicato tra parentesi
GC ()	Esegue la saldatura rettilinea dal punto in cui si trova il braccio robotico fino al punto indicato tra parentesi
ARC (, ,)	Consente di effettuare una saldatura circolare dati tre punti
DEVOPM ()	Consente di eseguire una saldatura multipass, ossia un tratto di saldatura a tre passate per garantire maggiore resistenza del giunto
SSPD (,)	È detto "cerca giunto" o "inseguimento del giunto". Il primo numero tra parentesi ne determina l'attivazione, il secondo l'oscillazione
CALL NSENSE	Consente di effettuare la tastata prima dell'inizio di un tratto di saldatura
CALL CLEAN	Richiama il braccio robotico per eseguirne la pulizia della punta

Tabella 33 - Funzioni principali utilizzate nei programmi di saldatura

Gli errori riscontrati durante i cicli di saldatura monitorati relativamente al trave Hup 40-30, sono stati affrontati nel modo seguente:

- Lo stop di sicurezza dovuto alla fotocellula posteriore (riga 660) è stato risolto correggendo la traiettoria percorsa dal robot durante la fase di pulizia della torcia, poiché esso transitava dinanzi al sensore attivandolo. In questo modo, la fotocellula inviava un segnale di errore, analogamente a come avrebbe fatto se una persona avesse invaso il volume di lavoro del robot, mettendo a repentaglio la propria incolumità;
- Il "difetto arco" appartiene all'unica tipologia di errori non completamente eliminabile. Si tratta di un problema dovuto al fatto che non sia "scoccata la scintilla", ossia non si sono create le condizioni adatte affinché avesse inizio la saldatura. Ciò si può verificare a causa di molteplici fattori, come la pulizia del materiale saldato, la corretta curvatura della torcia, la presenza della giusta quantità di gas di saldatura, il corretto stato della punta utilizzata per saldare. Proprio il fatto che il "difetto arco"



Figura 105 - Strumento adibito alla pulizia della punta del robot

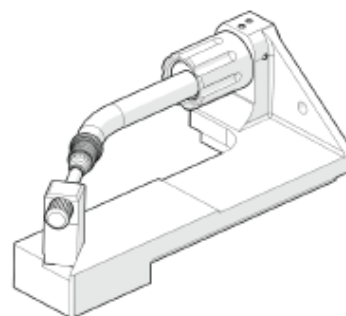


Figura 106 - Calibro raddrizzatore

sia riconducibile a differenti cause, ne rende molto complicata la completa eliminazione. Per ridurre il rischio che si verifichi, è possibile effettuare l'operazione di centratura e verifica della torcia mediante un calibro raddrizzatore (figura 106). Si tratta di una pratica necessaria nel caso in cui la torcia venga sostituita, oppure quando essa entra in collisione con il pezzo da saldare, o durante un intervento di manutenzione. Il calibro può trovarsi su un banco di lavoro a parte (robot 1 e 2) oppure direttamente sulla via di corsa verticale (robot 3 e 4), come rappresentato in figura 107:



Figura 107 – Calibro raddrizzatore sul banco di lavoro per il robot 1 (sx) e sulla via di corsa per il robot 3 (dx)

- Il problema legato alla velocità di movimentazione troppo elevata, registrata in corrispondenza della riga 711 del codice, è stato semplicemente risolto imponendo una velocità massima di spostamento degli assi che fosse inferiore a quella precedentemente raggiunta;
- La riga di codice numero 803 causava sistematicamente l'arresto del robot in “posizione arretrata”, ossia il blocco del braccio robotizzato dovuto ad una movimentazione non corretta (figura 108). Per risolverlo, è stato necessario modificare la combinazione delle inclinazioni dei vari assi, pur mantenendo invariate le coordinate del punto di arrivo nello spazio:



Figura 108 - Robot bloccato in posizione arretrata

- Gli errori riscontrati durante le saldature rettilinee (GC) sono stati eliminati correggendo l'inclinazione della torcia oppure perfezionando i parametri di saldatura;
- Per quanto riguarda i restanti difetti, ossia le collisioni e gli errori in fase di spostamento (GP), vi è stato posto rimedio modificando le coordinate dei punti intermedi e dei punti di arrivo nello spazio, incrementando così la precisione e garantendo una maggiore ripetibilità di esecuzione.

In generale, l'intervento di modifica e correzione sul programma di saldatura è stato fondamentale per ridurre drasticamente i fermi macchina. In aggiunta, la delegazione al robot di determinati tratti di saldatura, che precedentemente venivano effettuati manualmente dal saldatore in fase di finitura, ha consentito di alleggerire il carico di lavoro dell'operatore con conseguente riduzione dei tempi stessi di finitura. In particolare, le operazioni effettuate sono state:

- 1) Esecuzione più accurata della saldatura multipass;
- 2) Perfezionamento della saldatura del supporto superiore;
- 3) Miglioramento del tratto di saldatura circolare relativo al supporto inferiore;
- 4) Correzione del tratto di curvatura sul fianco del trave stabilizzatore.



Figura 109 - Tratti di saldatura perfezionati

Di seguito è riportato il codice scritto tramite linguaggio di programmazione CAROLA per la saldatura di un trave stabilizzatore Hup 40-30, dopo aver effettuato le opportune modifiche. Per ovvie ragioni, saranno presentate in modo generale le sezioni principali e

verrà posta particolare attenzione alle righe di codice modificate, evidenziate dal carattere in grassetto:

ROTROL-FILE-S
RESTART

EXTERNAL PROC CLS, SYNC1, SYNC2 FROM MASTER
...
EXTERNAL PROC TOOL1 FROM TOOLLIB
EXTERNAL PROC CONTROL FROM MASTER

VAR SP
VAR SPEED, POL, STAT, X, Y, Z, AL, BE, GA, WEG, E1, E2, E3
...
VAR PROG, SYSCO
VAR MS, SS, MI, HH, WELDTIME, CYCLTIME
VAR CP, STA, AL2, BE2, GA2, X3, Y3, Z3

Inizializzazione

LISTE 1 = (3111,1,100,68,42,0,703,0,278,0,-3,0,0,0,0,50,30,0,0,0,0,0)
LISTE 2 = (3111,1,0,64,37,-1,701,0,278,2,0,0,0,0,0,30,20,0,0,0,0,0)
...
LIST 33 = (3111,3,0,28,90,7,485,0,250,27,5,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0)

!MIG PULSE
LIST 100 = (3111,259,0,50,100,0,700,0,278,20,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
...
LIST 104 = (3111,259,0,50,100,0,700,0,278,20,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)

**Richiamo delle liste
di saldatura**

!NORMAL MIG
LIST 500 = (3111,1,0,45,50,0,784,0,313,20,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
...
LIST 510 = (3111,1,0,45,50,0,784,0,313,20,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)

LIST 900 = (3111,0,0,31,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
...
LIST 902 = (5211,0,0,300,1,1,700,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)

PROC NSENSE
\$(900)
RES (1,2)
SET (1)
GP (SP)
L102: IF IN (1) THEN JUMP L102
WHEN IN (1) DURING GC (SP+2) THEN JUMP L101
RESET (1)
PAUSE
L101:
RESET (1)
DECHANGE
CHANGE (SP+1)
GP (SP)
ENDP
...

**Ricerca del punto di
avvio per il
movimento**


```

PROC CENTER
DUMMYPNT:=8888
RESET (1..2)
$ (901)
GP (STRPNT)
DECH
STORPOS (DUMMYPNT,30,1,0)
SYSCO:=1
GP (DUMMYPNT)
SASTOPAT (0;DUMMYPNT)
STORPOS (DUMMYPNT+1,30,1,0;SYSCO;-1500,0,0,0,0,0,0,0,0)
SET (2)
WHEN IN (1) DURING GC(DUMMYPNT+1) THEN JUMP MK11
RESET (2)
PAUS
MK11:
RESET (2)
STORPOS (DUMMYPNT+1,100,1,0)
GP (DUMMYPNT)
SASTOPAT (0; DUMMYPNT)
STORPOS (DUMMYPNT+2,30,1,0;SYSCO;+1500,0,0,0,0,0,0,0,0)
...
ENDP

```

Ricerca del centro parametrizzata

```

MAIN
PTPMAX (80)
FUNCON WPS,1
...
FUNCON ARCIGNIT,30,3,0,0

```

Richiamo delle funzioni

```

CALL TOOL1
CALL MANAXST2
CALL SYNC2
SETTIME (10;0)
SETTIME (20;0)

```

Reset del tempo ciclo e del tempo di saldatura

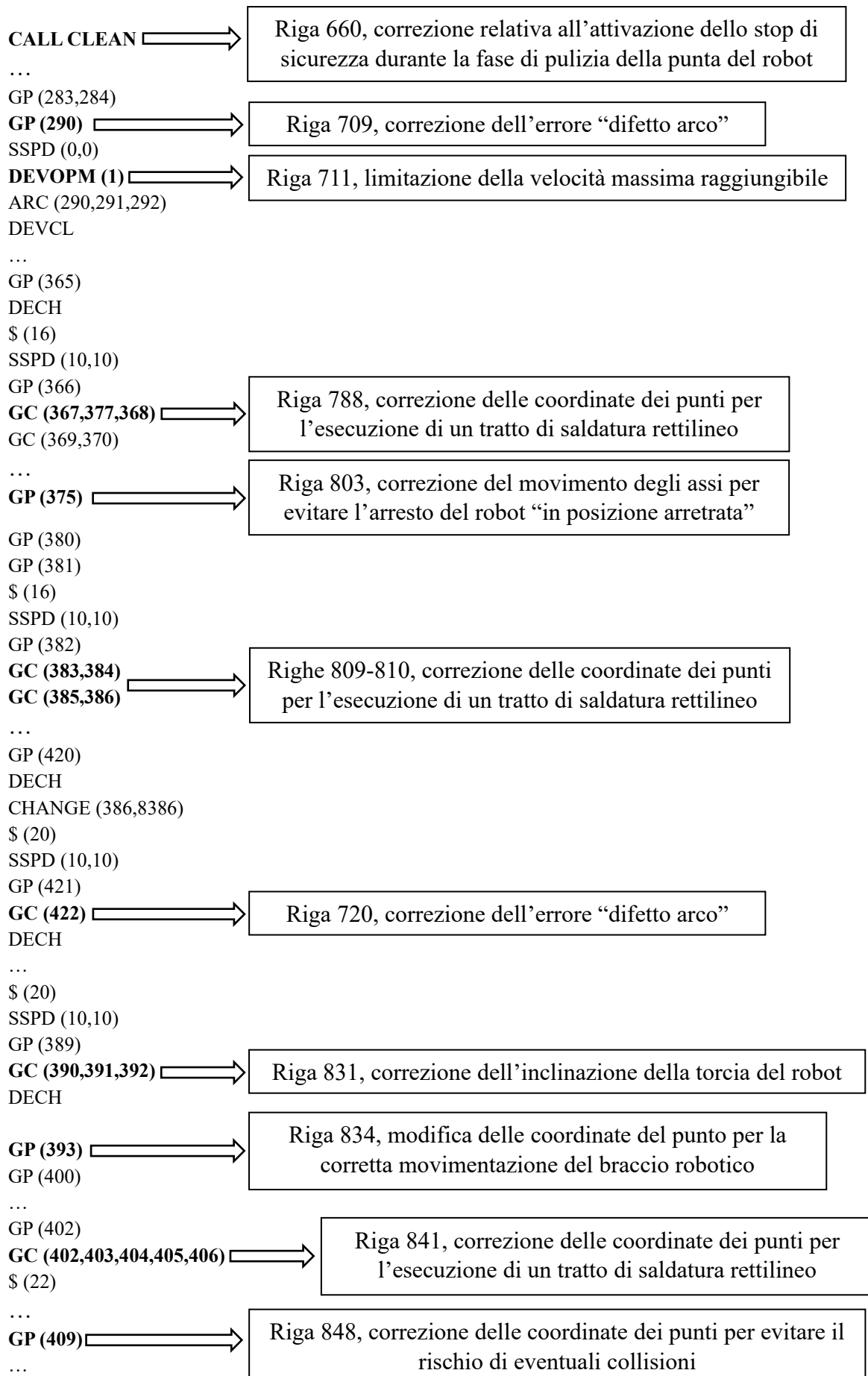
```

!WAITI (IN (15))
CALL CONTROL
GP (1,2,3)
GP (4,5)
GP (6,10)
!PAUSE
GP (2508,2509,2510,2520)
$ (2)
SSPD (10,10)
ARC (2520,2521,2522)
DECH
...
$ (30)
SSPD (0,0)
DEVOPM (1)
GC (1093,1094,1095,1096)
...

```

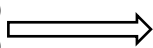
Richiamo per il controllo della punta del robot

Riga 540, correzione dell'errore "difetto arco"



CALL CLEAN

GP (6,5,4)
GP (3,2,1)



Ritorno del robot in posizione iniziale 'home'

CALL CLS
GOTOXY (1,9)
GETTIME (10;MS,SS,MI,HH)
WRITE ('TEMPO CICLO - ORE:',HH,' MINUTI:',MI,' SECONDI:',SS)

GOTOXY (1,11)
GETTIME (20;MS,SS,MI,HH)
WRITE ('TEMPO SALDATURA - ORE:',HH,' MINUTI:',MI,' SECONDI:',SS)

Conteggio del tempo ciclo e del tempo di saldatura

EXTSYNOFF
CALL MANAXON

SET (15)
WAITM(500)
RESET (15)
RUN CICLO
PAUS
END

Chiusura del ciclo di saldatura

Dopo aver apportato le correzioni mostrate precedentemente, il nuovo programma di saldatura è stato implementato per la realizzazione di travi stabilizzatori Hup 40-30. I tempi registrati durante la fase di finitura post-intervento sono illustrati nella tabella seguente:

Prova	Tempo impiegato [h:min:sec]
1	00:12:05
2	00:12:43
3	00:11:03
4	00:11:31
5	00:12:14
6	00:12:08
7	00:11:27
8	00:12:56
9	00:11:05
10	00:12:15
Media	00:11:57

Tabella 34 - Tempi relativi alla fase di finitura post-intervento di ottimizzazione

Come si evince dalla tabella 34, i tempi necessari alla finitura sono stati estremamente ridotti, passando da una media di 36 minuti e 10 secondi a 11 minuti e 57 secondi.

Nella tabella seguente sono, pertanto, riportati i tempi aggiornati relativi a tutte le fasi del processo di saldatura di un trave Hup 40-30:

Fase	Tempo impiegato [h:min:sec]
Puntatura	00:27:19
Saldatura	00:57:23
Finitura	00:11:57

Tabella 35 - Tempi medi per la realizzazione di un trave stabilizzatore Hup 40-30 post-intervento

Come si può dedurre dalle nuove rilevazioni riportate in tabella 35, è ora possibile effettuare le fasi di puntatura e finitura restando all'interno del tempo ciclo previsto dal robot per la saldatura di un trave. Anche sommando ulteriori dieci minuti per le fasi di carico, scarico, movimentazione e fissaggio, si rientra comunque all'interno del tempo ciclo. Questo significa che, ricorrendo alle modifiche effettuate, risulta possibile realizzare puntatura, saldatura e finitura di un trave stabilizzatore Hup 40-30 in poco meno di un'ora. Considerando che un turno lavorativo consta di otto ore, sottraendo mezz'ora di pausa pranzo, quindici minuti per la produzione delle targhette da applicare a ciascun trave e alcuni minuti dovuti a pause fisiologiche degli operatori, è possibile realizzare una media di sette travi stabilizzatori per ciascun turno. In seguito all'intervento di modifica, è stata effettuata una prova che conferma quanto esplicitato. Nel grafico sottostante è riportato il risultato ottenuto:



Figura 110 - Potenza dissipata per la saldatura di travi stabilizzatori Hup 40-30 il 14/06/2023 dalle 08:00 alle 14:00

Confrontando il presente grafico con quello di figura 102, si evince che il numero di fermate sia stato decisamente ridotto, così che la produttività per ciascun turno di lavoro risulti notevolmente incrementata. In questo senso, è piuttosto indicativo il dato relativo all'energia consumata, che per il turno lavorativo del 14/06/2023 ammonta a 59'264 kWh, a fronte dei 35'223 kWh registrati durante il turno del 29/05/2023.

Un altro dato piuttosto significativo è rappresentato dai diagrammi a torta relativi alle fasi di utilizzo, inutilizzo e stand-by del robot per i due turni lavorativi paragonati:

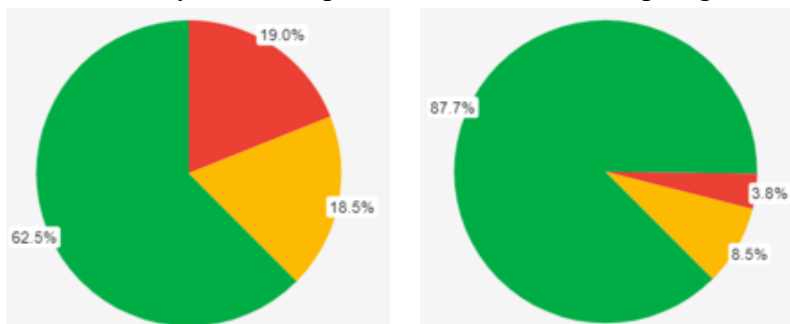


Figura 111 - Diagrammi a torta relativi alle prestazioni del robot pre-intervento (sx) e post-intervento (dx)

Come si evince dalla figura 111, il divario è netto:

- La percentuale di tempo in cui il robot risulta funzionante cresce dal 62.5% all'87.7%;
- La percentuale di tempo in cui il robot risulta in stand-by decresce dal 18.5% all'8.5%;
- La percentuale di tempo in cui il robot risulta non funzionante decresce dal 19.0% al 3.8%.

Nonostante tutti i risvolti positivi elencati, è possibile notare che il grafico in figura 110 presenti ancora alcune pause, seppur in numero ridotto:

- La prima pausa si è verificata tra le 07:05 e le 07:25 e coincide con il tempo necessario all'operatore per produrre le targhette da applicare ai travi;
- La seconda pausa, tra le 08:33 e le 08:36, è stata causata da un "difetto arco" riscontrato dal robot di saldatura;
- La terza pausa, verificatasi tra le 09:33 e le 09:45, coincide con una pausa fisiologica dell'operatore;
- La quarta pausa, compresa tra le 11:45 e le 12:05, coincide con la "pausa pranzo" del saldatore;
- Il quinto e ultimo tratto di discesa, invece, registrato tra le 13:04 e le 13:07, corrisponde al tempo necessario per far transitare il robot da una stazione di lavoro all'altra e settare il programma di saldatura idoneo.

Risulta piuttosto evidente che l'unica vera fermata indesiderata coincida con il "difetto arco". Come già anticipato in precedenza, è possibile ridurre il rischio che questo problema si verifichi, ma non si tratta di un errore completamente eliminabile. Pertanto, riscontrare un solo difetto dell'arco durante la saldatura di ben sette travi stabilizzatori va considerato come un risultato accettabile.

In conclusione, da una media di quattro travi saldati pre-intervento, si registra il passaggio ad una media di circa sette, quasi raddoppiando il numero di prodotti finiti realizzati. Ciò vuol dire che la produzione vedrà i propri numeri crescere notevolmente, con una media che passerà circa da otto a quattordici travi stabilizzatori hup 40-30 saldati quotidianamente. Pertanto, in termini di produttività, lo studio condotto ha portato al seguente risultato: l'intervento di ottimizzazione effettuato sul robot di saldatura per la produzione di travi stabilizzatori Hup 40-30 ha determinato un incremento pari al 75% della produttività.

5. Conclusioni

Il presente studio si è posto l'obiettivo di ottimizzare le performance di una macchina saldatrice robotizzata presente all'interno dello stabilimento Manitowoc Crane Group Italy, al fine di incrementarne la produttività.

In tale scenario, è stato necessario effettuare dapprima un monitoraggio del funzionamento dei robot di saldatura, per poter determinare gli eventuali margini di miglioramento su cui lavorare. Pertanto, sono stati posti sotto analisi tre componenti strutturali delle gru, ossia il basamento fisso, il basamento rotante ed il trave stabilizzatore per ciascuno dei tre modelli di gru automontanti a marchio Potain prodotti. Per ogni componente, i rilevamenti sono stati effettuati in doppia modalità: saldatura manuale e saldatura automatica. Da queste analisi è stato possibile effettuare un confronto tra le due differenti procedure di saldatura, al fine di determinare la modalità più vantaggiosa in termini produttivi ed economici per l'azienda.

Successivamente ci si è focalizzati sul robot numero tre, adibito alla saldatura di travi stabilizzatori. In particolare, il principale oggetto di studio è stato il trave stabilizzatore modello Hup 40-30. Inizialmente, è stato necessario effettuare numerosi rilevamenti del processo di saldatura di tale trave, per poter determinare i punti del programma software che comportavano fermate indesiderate. Al fine di risolvere tali problemi, si è ricorsi ad una completa revisione del programma di saldatura, modificando le righe di codice laddove fosse richiesto. Inoltre, affinché fosse possibile apportare miglioramenti significativi, è stata implementata una completa riorganizzazione del lavoro del saldatore che presiede tale postazione.

All'intervento di ottimizzazione ha fatto seguito una nuova fase di rilevamenti che appurasse gli effettivi miglioramenti introdotti. Dopo aver posto sotto analisi tali risultati, il bilancio scaturito è risultato nettamente positivo: la ricerca condotta ha determinato un incremento di produttività del 75%.

A questo punto, l'azienda è aperta ad una duplice possibilità, a seconda del numero di gru richieste dal mercato:

- Se la domanda crescerà, sarà possibile soddisfarla grazie all'aumento di produttività;
- Se la domanda resterà invariata o decrescerà, verrà destinato un minor numero di giorni a settimana per la produzione di travi stabilizzatori, mentre per i restanti giorni il robot sarà adibito alla saldatura di componenti che, ad oggi, sono acquistati da fornitori esterni.

Il presente studio è stato incentrato sul processo di saldatura di travi stabilizzatori Hup 40-30. La stessa tipologia di analisi potrebbe essere implementata per la saldatura di travi stabilizzatori Hup 32-27 e Hup M 28-22, saturando la produzione del robot numero tre.

Inoltre, possibili sviluppi futuri potrebbero coinvolgere i robot di saldatura adibiti alla realizzazione di basamenti fissi e basamenti rotanti, con l'obiettivo di implementare un processo di ottimizzazione analogo a ciò che è stato effettuato in questo progetto.

Bibliografia e sitografia

- [1] «Wikipedia,» 19 Aprile 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/The_Manitowoc_Company.
- [2] Manitowoc, 2023. [Online]. Available: <https://www.manitowoc.com>.
- [3] Istituto Italiano della Saldatura, Saldatura per fusione 1. Procedimenti di saldatura - Economia - Sicurezza e salute, Milano: Ulrico Hoepli Milano, 1995.
- [4] «Wikipedia,» 03 Luglio 2023. [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura>.
- [5] A. Ascari e A. Fortunato, Introduzione ai processi di saldatura, Bologna: Società editrice Esculapio, 2014.
- [6] M. Pasquinelli, Tecnologia meccanica e laboratorio tecnologico, Giunti Editore, 1998.
- [7] K. Weman, Welding Processes Handbook, Woodhead Publishing, 2012.
- [8] «Wikipedia,» 29 Giugno 2023. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura_MIG/MAG.
- [9] R. W. M. Alliance, Resistance Welding Manual, American Welding Society, 2003.
- [10] Samuels e E. Leonard, Light Microscopy of Carbon Steels, ASM Internazionale, 1999.
- [11] P. K. Rakesh e P. Davim, Joining Processes for Dissimilar and Advanced Materials, Elsevier, 2022.
- [12] M. Harris e M. Phibbs, Welding Health and Safety - A Field Guide for OEHS Professionals, American Industrial Hygiene association, 2021.
- [13] Istituto Italiano della Saldatura, Saldatura per fusione 2. Metallurgia e saldabilità dei materiali metallici - Qualità e controllo dei giunti saldati, Hoepli, 1996.
- [14] S. E. Hughes, Quick Guide to Welding and Weld Inspection, Woodhead Publishing, 2009.
- [15] Discontinuities and Defects - Training Workbook, Hobart Institute of Welding Technology, 2010.
- [16] F. Giusti e M. Santochi, Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione, Milano: Casa Editrice Ambrosiana, 2000.
- [17] «Wikipedia,» 14 Luglio 2023. [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Robot>.
- [18] J. Condemi, «Network Digital 360,» [Online]. Available: <https://www.ai4business.it/robotica/robot-cartesiano-cose-e-come-funziona/>.
- [19] P. Radhakrishnan, Computer Numerical Control Machines and Computer Aided Manufacture, New Academic Science, 2015.

- [20] S. Campolo, «e-nsight,» 14 dicembre 2018. [Online]. Available: <https://www.e-nsight.com/2018/12/14/i-robot-industriali/>.
- [21] S. Tzafestas, Introduction to mobile robot control, 2013.
- [22] G. Lefranc, I. Lopez-Juaréz, R. Osorio-Comparan e M. Pena-Cabrera, Impact of Cobots on automation, 8 dicembre 2022.
- [23] C. Taesi, F. Aggogeri e N. Pellegrini, COBOT Applications - Recent Advances and Challenges, Brescia, 4 giugno 2023.
- [24] CLOOS, Manuale di programmazione QIROX QS 2.0, maggio 2019.
- [25] CLOOS, Manuale di istruzioni di servizio QIROX, 30 luglio 2018.
- [26] CLOOS, «saldobraz.it,» 2023. [Online]. Available: <https://www.cloos.de/de-en/products/qirox/robots/details/qirox-qrc-350/>.
- [27] CLOOS, «saldobraz.it,» 2023. [Online]. Available: <https://www.cloos.de/de-en/products/qirox/robots/details/qirox-qrc-410/>.