

Università degli studi di Padova



Dipartimento di Ingegneria Industriale

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI MATERIALI

Influenza dei parametri operativi sulla
qualità di saldatura MAG
di acciai al carbonio



Relatore: Prof. Manuele Dabalà

Laureanda: Silvia Campagna

ANNO ACCADEMICO 2014 - 2015

ultima modifica 13/10/2015

A Giorgia ed Alice,

affinché imparino a mutare i loro confini nei loro orizzonti

Sommario

PROCESSI DI SALDATURA	1
1.1 Evoluzione temporale della saldatura.....	1
1.2 Saldabilità dei metalli	3
1.3 Termini generali del processo di saldatura.....	5
1.4 Tipi di giunti saldati	5
1.5 Metallurgia della saldatura	7
1.5.1 Il giunto saldato	7
1.5.2 Zona fusa	8
1.5.2.1 La composizione chimica della zona fusa.....	8
1.5.2.2. Influenza vari elementi chimici	11
1.5.2.3. Assorbimento di gas	12
1.5.2.4. Struttura zona fusa.....	13
1.5.3 Zona termicamente alterata (ZTA).....	14
1.5.3.1 Parametri caratterizzanti ZTA	16
1.5.3.2 I cicli termici	16
1.5.3.3 Apporto termico specifico	18
1.5.3.4 Influenza del tipo di giunto	20
1.5.3.5 Influenza del materiale base	20
1.6 Difettologia del giunto saldato	21
1.6.1 Cricche.....	22
1.6.1.1 Cricche in zona fusa	23
1.6.1.2 Cricche in zona termicamente alterata	25
1.6.2 Distorsioni indotte termicamente e tensioni residue	36
LA SALDATURA AD ARCO ELETTRICO	41
2.1 Caratterizzazione saldatura MAG, generalità	42

II

2.2 Modalità di trasferimento del metallo d'apporto.....	43
2.2.1 Short arc o cortocircuito	44
2.2.2 Trasferimento globulare	45
2.2.3 Spray arc.....	47
2.3 Caso di studio : SALDATURE MECOME.....	49
2.3.1 Equipaggiamento.....	49
2.3.1.1 Torcia di saldatura	50
2.3.1.2. Generatori di corrente.....	52
2.3.1.3 Elettrodo	53
2.3.1.4. I gas di protezione	55
2.4 Parametri di saldatura.....	66
2.4.1 Velocità di spostamento della torcia di saldatura.....	67
2.4.2 Sporgenza libera o stick-out.....	68
2.4.3 Posizione del giunto di saldatura.....	70
STRUMENTAZIONE E METODI D'ANALISI	73
3.1 Preparazione campioni	73
3.2 Microscopia ottica metallografica.....	75
3.3 Microdurometro	78
3.4 Risultati sperimentali.....	79
3.4.1 Presentazione dei materiali.....	79
3.4.2 Metodologia di conduzione delle prove	81
Risultati e discussione	83
4.1 Caratteristiche valutate del giunto saldato	83
4.2 Risultati generalizzati ottenuti dai giunti saldati.....	88
4.2.1 Variabili input	89
4.2.1.1 Corrente di saldatura	89
4.2.1.2 Velocità di saldatura.....	93

4.2.1.3 Stick out dell'elettrodo e Potenziale elettrico d'arco	97
4.2.2 Variabili output	104
4.2.2.1 Larghezza del cordone	104
4.4.2.2 Penetrazione	104
4.2.2.3 Fattore di forma di penetrazione (WPSF) o anche coefficiente di forma interna.....	105

Introduzione

Questo lavoro di tesi è stato improntato sullo studio delle tecnologie di giunzione metalliche ed in particolare della saldatura MAG, un processo a filo continuo ampiamente utilizzato per l'elevata produttività e per la sua applicabilità ai sistemi di automazione. Si tratta di un processo di saldatura autogena in cui l'arco scocca tra il pezzo ed il filo fusibile. Il dispositivo di avanzamento del filo provvede ad alimentare il bagno con continuità. La protezione gassosa attiva viene fornita, direttamente sul bagno fuso, da un gas di supporto.

I vantaggi legati a questi procedimenti di saldatura sono molteplici:

- Si saldano quasi tutti i materiali ferrosi e anche metalli non ferrosi
- Elevata qualità delle saldature
- Utilizzabile in tutte le posizioni (solo in alcuni casi)
- Non produce scoria (filo pieno)
- Elevata produttività
- Tecnica di facile apprendimento.

La gamma di metalli lavorabili, raccogliendo i più comuni come acciai al carbonio, acciai inossidabili, alluminio e sue leghe rende questo processo molto diffuso.

L'obiettivo della tesi è quello di individuare i principali parametri che influenzano qualitativamente la saldatura, mirando ad individuarne gli effetti ed il loro peso in relazione agli altri. Durante lo svolgimento delle prove ogni parametro prescelto come influente è stato cambiato in modo univoco rispetto agli altri al fine di individuare più facilmente la caratteristica qualitativa sulla quale esso aveva peso.

La trattazione affronta nel primo capitolo la saldatura in termini generici, descrivendo l'effetto indotto sulla microstruttura, non tralasciando la descrizione dei difetti.

Nel secondo capitolo si entra nello specifico della saldatura ad arco, caratterizzandone i parametri ed entrando nello specifico del caso di studio; è stata dunque affrontata la descrizione dell'equipaggiamento e dei parametri.

VI

Il terzo capitolo tratta l'esposizione del metodo con cui sono state condotte le prove, descrivendo i materiali utilizzati nello specifico.

Il cuore della ricerca è individuabile nel quarto capitolo in cui sono riportate i risultati ottenuti ed in cui si analizzano i motivi che hanno generato tali risposte alle prove.

*Come il ferro in disuso arrugginisce,
così l'inazione sciupa l'intelletto.*

Leonardo da Vinci

CAPITOLO 1

PROCESSI DI SALDATURA

1.1 Evoluzione temporale della saldatura¹

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

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

Nel 1802, lo scienziato russo Vasily Petrov scoprì l'arco elettrico proponendo le sue



Immagine 1 Vasly Petrov

possibili applicazioni pratiche, compresa la saldatura. Nel 1881-1882 l'inventore russo Nikolai Benardos creò il primo metodo di saldatura ad arco elettrico noto come saldatura ad arco in carbonio, usando elettrodi di carbonio.

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

L'acetilene è stato scoperto nel 1836 da Edmund Davy, ma il suo uso non era pratico di saldatura fino a 1900 circa, quando è stata sviluppata un'adeguata fiamma ossidrica diventando uno dei più popolari metodi di saldatura per il costo relativamente basso e la sua portabilità. Nel corso del 20° sec. però cadde in disuso a causa dell'avvento delle nuove applicazioni industriali, venendo in gran parte sostituito dalla saldatura ad arco.

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

Alla trattazione dei gas di protezione si cominciò a prestare molta attenzione, in quanto vari scienziati tentarono di proteggere le saldature dagli effetti di ossigeno e azoto dell'atmosfera sviluppando l'uso di idrogeno, argon e elio come atmosfere di saldatura.

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

La saldatura ad arco con elettrodo rivestito è stata sviluppata nel corso del 1950 e divenne presto il più popolare processo di saldatura ad arco manuale. Nel 1957, ha debuttato il processo di saldatura con flusso animato (flux-cored), ampliandone l'utilizzo con apparecchiature automatiche con conseguente aumento della velocità di saldatura. Nello stesso anno fu inventata la saldatura al plasma, mentre la saldatura ad elettro-scoria fu introdotta nel 1958, seguita dalla saldatura elettrogas nel 1961. Altri sviluppi recenti nella saldatura sono del 1958 con la svolta della saldatura a fascio elettronico e, dopo l'invenzione del laser nel 1960, la saldatura a fascio laser ha debuttato alcuni decenni più tardi dimostrando di essere particolarmente utile nella saldatura robotizzata. Infine, nel 1991 è stata inventata in Inghilterra la saldatura per frizione trovando applicazioni di alta qualità in tutto il mondo.



Immagine 2 Antenato delle moderne saldatrici

La saldatura è definita come una tecnica di giunzione che realizza l'unione permanente di due pezzi metallici (Figura 1) con o senza apporto di materiale (metallo d'apporto) e sotto l'azione del calore.

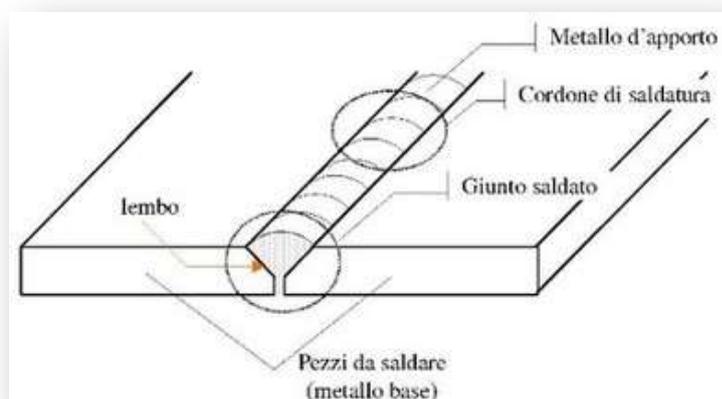


Figura 1. Schematizzazione di giunto saldato

Tale apporto di calore dà origine al bagno di saldatura, che poi solidificando si trasforma nel cordone di saldatura, responsabile del collegamento tra le parti.

La continuità può essere ottenuta essenzialmente in due modi:

- per contatto e connessione liquido-liquido, cioè portando a fusione i due materiali del giunto;
- per contatto solido-solido, cioè senza fusione: in questo caso la connessione si ottiene per mutua diffusione fra i materiali, che rimangono sempre allo stato solido.

Si deve dunque prestare particolare attenzione alla progettazione dei giunti saldati poiché le linee di forza possono distribuirsi nell'intero volume del manufatto ed eventuali rotture che potrebbero innescarsi in elementi secondari, rischierebbero di propagarsi catastroficamente anche oltre la giunzione.

1.2 Saldabilità dei metalli¹¹

Le modalità di comportamento dei vari materiali, nelle operazioni di saldatura, vengono definite dalla loro *saldabilità*, che ne esprime l'attitudine ad essere saldati.

Si distinguono:

- la "saldabilità operativa" riguarda la possibilità di realizzare, con una certa tecnologia operativa, una connessione di saldatura fra due pezzi metallici;
- la "saldabilità locale" si riferisce alle modifiche microstrutturali nel giunto e nella zona adiacente, che possono essere provocate durante saldatura;
- la "saldabilità globale" si riferisce alla possibilità che il giunto saldato possa correttamente entrare in una struttura o in una costruzione reale, cioè sia in grado di fornire la necessaria resistenza nelle condizioni di esercizio; è valutata attraverso prove meccaniche specifiche.

Un materiale ha buone proprietà di saldabilità quando un suo pezzo, prima diviso e successivamente saldato, conserva lungo il giunto saldato caratteristiche meccaniche non inferiori a quelle precedenti.

La saldabilità è condizionata dai seguenti elementi:

- temperatura di fusione del metallo base;
- temperatura di fusione degli ossidi del metallo base e del metallo d'apporto;
- conducibilità termica del metallo base;
- trasformazioni strutturali.

Un materiale metallico (metallo base) è saldabile se:

- la temperatura di fusione del suo ossido è minore di quella del metallo base;
- la massa volumica dell'ossido è minore di quella del metallo fuso in modo che galleggi.

Se non sussistono queste condizioni bisogna ricorrere a polveri disossidanti con le seguenti proprietà:

- massa volumica minore di quella del metallo fuso;
- temperatura di fusione minore di circa 100 °C di quella del metallo base;
- capacità di sciogliere l'ossido del bagno.

Tipo di acciaio	Saldabilità	Considerazioni
Acciai dolci	Ottima	Saldabili con qualsiasi processo
Acciai duri	Bassa	La presenza del carbonio infragilisce la struttura (si tempra la ZTA), problemi di corrosione.
Acciai inox ferritico-martensitici	Bassa	La struttura è fragile per i grossi grani di cromo in matrice martensitica, è necessario un preriscaldamento e anche un trattamento di rinvenimento a saldatura effettuata.
Acciai inox austenitici	Ottima	L'unica cosa a cui prestare attenzione è la pulizia dalle scorie.
Ghise	Pessima	L'alto carbonio le rende fragilissime, la situazione migliora leggermente solo con quelle sferoidali.

Tabella 1 Saldabilità degli Acciai

Metallo o lega	Saldabilità	Considerazioni
Alluminio e sue leghe	Media	Sono necessarie grandi potenze per fondere lo strato di ossido che si forma al semplice contatto con l'aria
Rame	Buona	Bisogna stare attenti agli ossidi che lo rendono estremamente fragile
Piombo	Buona	Solo in piano per il basso punto di fusione
Titanio	Media	Necessario l'impiego di opportuni gas protettivi

Tabella 2 Saldabilità di metalli o leghe non ferrose

1.3 Termini generali del processo di saldatura^{III}

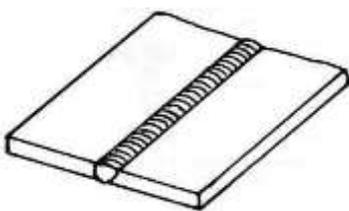
Di seguito una rassegna delle principali terminologie ricorrenti nella saldatura:

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

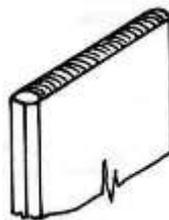
1.4 Tipi di giunti saldati^{IV}

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

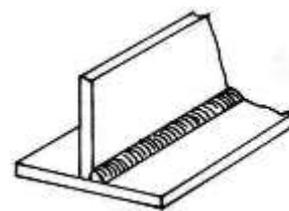
A seconda del posizionamento reciproco dei pezzi da saldare, si distinguono sei tipologie di giunti saldati, rappresentati in Figura 2



(A) a testa



(B) a spigolo



(C) a T

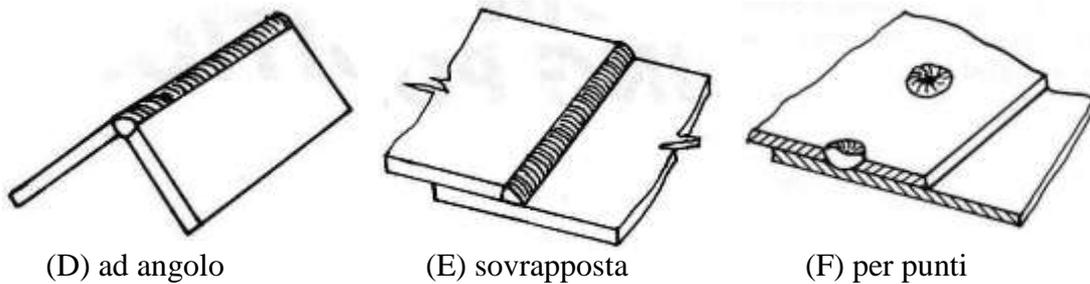


Figura 2 Tipologie di giunzione

Le giunzioni a T, a sovrapposizione e ad angolo comportano lo stesso tipo di giunto saldato che si presenta triangolare nella sezione trasversale.

Particolare è la saldatura *slot* (detto anche *plug* se la fessura ha forma tondeggiante invece che allungata) utilizzata per attaccare un pezzo di lavoro ad un altro attraverso la penetrazione sulla superficie superiore. Essa può ricoprire completamente o meno il foro e differisce leggermente dalla saldatura a punti ottenuta con una saldatura per resistenza.

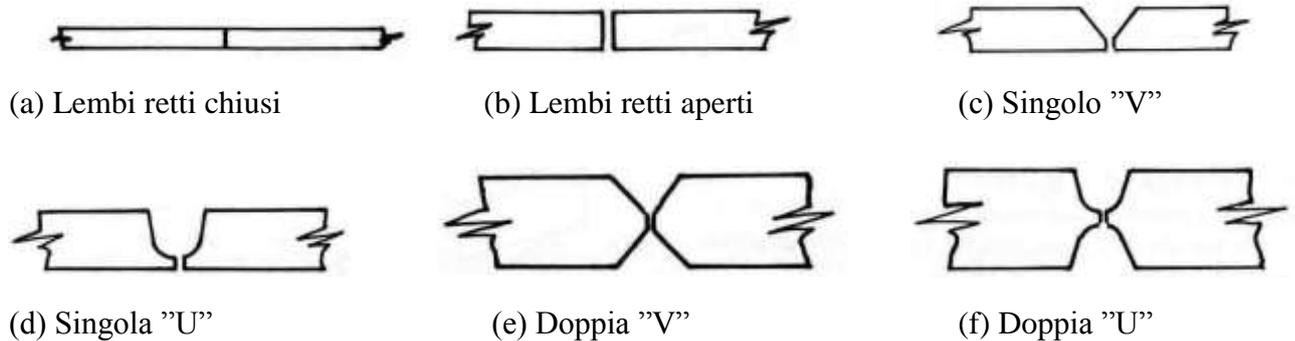


Figura 3 Principali preparazioni dei lembi per giunti di testa al crescere dello spessore dei pezzi da saldare

Si distingue poi il cordone di saldatura in

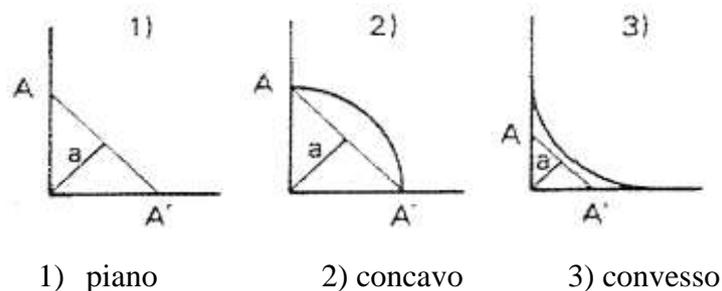


Figura 4 Classificazione della forma del cordone

Affinché la saldatura interessi totalmente lo spessore dei pezzi, nelle saldature di maggior impegno si richiede normalmente una preparazione dei lembi, smusso o cianfrino, entro il quale depositare più cordoni in passate successive. Infatti se un giunto consta di più cordoni,

si hanno nel contempo più "strati" (layer che, a loro volta, possono comprendere una o più passate.

In linea generale, un giunto saldato può occupare, in seno alla costruzione, qualunque posizione. Le posizioni più frequenti con relativa nomenclatura, sono riportate in Figura 5.

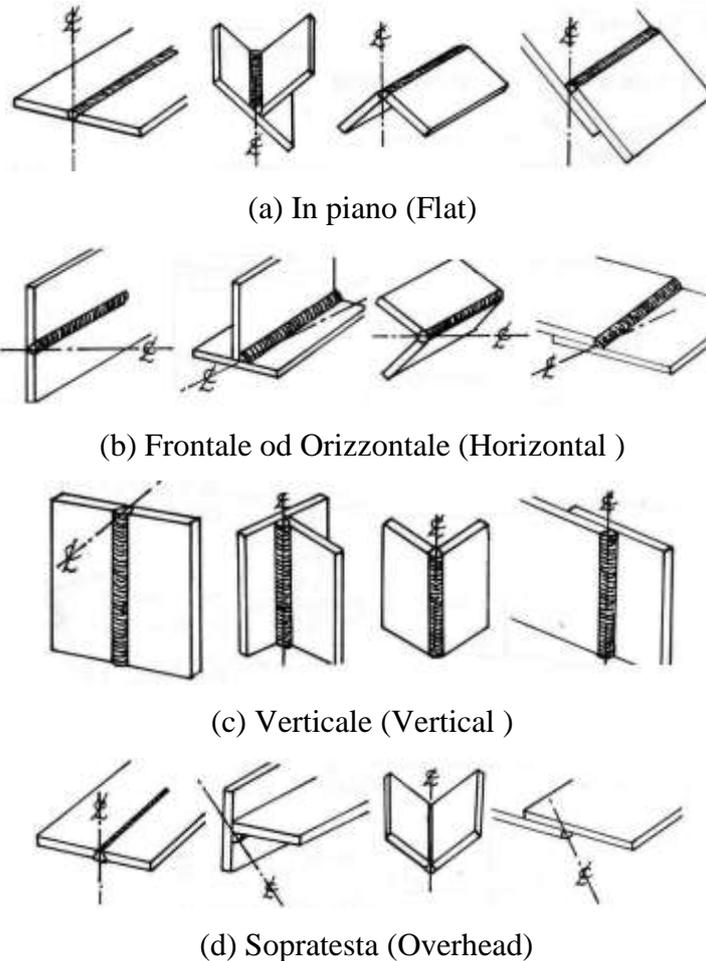


Figura 5 Posizioni di saldatura per diverse configurazioni dei giunti

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

1.5 Metallurgia della saldatura^v

1.5.1 Il giunto saldato

Per un'adeguata comprensione dei principi di funzionamento dei processi di qualifica in laboratorio è necessario innanzitutto conoscere le caratteristiche fondamentali del giunto saldato.

L'esecuzione della saldatura prevede l'impiego di una sorgente termica potente e concentrata, per fondere il metallo d'apporto e parte del materiale base. Dal punto di vista delle microstrutture cristalline, analizzando una saldatura si individuano tre zone in base alla distanza dall'asse del cordone; l'asse è centrato su una porzione fusa e poi ri-solidificata, detta zona fusa (ZF). Allontanandosi ulteriormente e superata la ZF è presente una zona in cui sono avvenute trasformazioni strutturali, chiamata zona termicamente alterata (ZTA), la cui estensione dipende dal metallo base e dalla tecnica di saldatura utilizzata.

All'esterno della ZTA si trova materiale base inalterato.

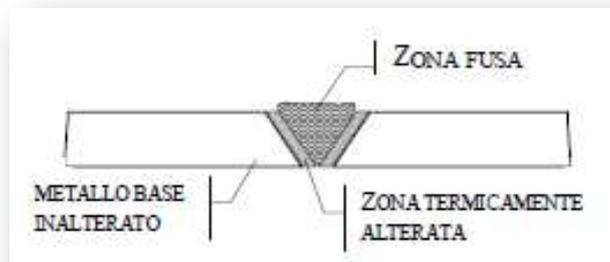


Figura 6 Rappresentazione del giunto di saldatura

Queste vengono così definite:

- La zona fusa (ZF): E' l'insieme di tutti i punti che durante la saldatura hanno superato la temperatura di fusione. E' in sostanza il bagno di saldatura allo stato solido.
- La zona termica alterata (ZTA): E' quella parte del materiale base, a ridosso della zona fusa, che non ha raggiunto la temperatura di fusione ma ha subito delle trasformazioni allo stato solido con conseguenti variazioni di strutture di proprietà in relazione alla temperatura raggiunta.
- Il metallo base inalterato (MB): E' quella porzione del materiale base che, in relazione alla distanza dalla zona fusa e quindi alle temperature alle quali è stata esposta, non ha subito cambiamenti di struttura e di proprietà.

1.5.2 Zona fusa

1.5.2.1 La composizione chimica della zona fusa

In generale, una saldatura autogena si realizza mediante la fusione di una certa porzione del materiale base ed il riempimento del giunto con la fusione totale del materiale d'apporto. La mescolanza di questi metalli allo stato fuso determina la formazione di una nuova composizione chimica che caratterizzerà la zona fusa. Questa nuova composizione sarà funzione delle analisi chimiche del materiale base e del materiale d'apporto e del

loro contributo quantitativo nel bagno di fusione. La diluizione è quel fenomeno in virtù del quale la composizione chimica della zona fusa risulta dal mescolarsi del metallo d'apporto col metallo base. In particolare definiamo il rapporto di diluizione il valore espresso dalla seguente relazione:

$$d\% = \frac{100 * b}{a + b}$$

Dove:

- $d\%$ = rapporto di diluizione;
- b = volume di metallo base portato in fusione;
- a = volume di metallo d'apporto portato in fusione;
- $a + b$ = volume complessivo della zona fusa.

Considerato che in genere la fusione del materiale d'apporto è totale, il rapporto di diluizione esprime la percentuale volumetrica del materiale base portato in fusione nella zona fusa. Questo parametro è molto importante ai fini della composizione chimica risultante, e varia al variare del procedimento di saldatura; avrà un valore pari al 100% per i procedimenti senza metallo d'apporto e valori molto bassi 5 - 10% per quei procedimenti che provocano la fusione di una piccola quantità di materiale base. La quantità di materiale base che entra nella zona fusa di un giunto saldato ne influenza decisamente l'analisi chimica e le caratteristiche meccaniche. Questo aspetto diventa sempre più decisivo man mano che si impiegano procedimenti di saldatura a penetrazione crescente; i vari elementi, così come le impurezze provenienti dal materiale base, giocano un ruolo determinante per l'ottenimento di giunti sani e rispondenti ai requisiti minimi richiesti. La scelta del materiale d'apporto compresa l'attività del rivestimento degli elettrodi e dei flussi per la saldatura in arco sommerso nonché l'azione dei gas di protezione per i procedimenti in atmosfera gassosa, non possono prescindere dalla conoscenza del fenomeno della diluizione. Estremamente complesso risulterà poi il caso delle saldature eterogenee, cioè fatte con metallo d'apporto diverso come composizione chimica nominale da quello di base oppure tra due materiali base di diversa composizione, per le quali dovrà essere scelto un materiale d'apporto avente un'analisi che, considerato il rapporto di diluizione, possa garantire l'ottenimento di una zona fusa priva di difetti e di strutture indesiderate.

d%	Tipologia di saldatura
0	Brasatura
30	Prima passata procedimento ad arco manuale con elettrodi rivestiti
10	Passate di riempimento ad arco con elettrodi rivestiti
20 – 40	Saldatura TIG con metallo d'apporto
10 – 40	Saldatura MIG/MAG prime passate
65	Arco sommerso a forte penetrazione
30 - 40	Arco sommerso multipass
15 – 30	Saldature ad elettroscoria
100	TIG, plasma, LASER e fascio elettronico (senza impiego di metallo d'apporto)

Tabella 3 Riepilogo dei rapporti di diluizione tipici

Nel caso specifico della saldatura ad arco sommerso nella quale il flusso può intervenire quale apportatore d'elementi di lega (attività del flusso), l'analisi della zona fusa dipenderà oltre che dal rapporto di diluizione e dalle composizioni dei metalli base e d'apporto, anche dall'attività del flusso.

Si valuti anche la solidificazione della zona fusa che comincia con la nucleazione dei nuovi grani in corrispondenza della superficie di separazione con la zona termicamente alterata. A questa fase segue poi un accrescimento di tipo dendritico, finalizzato a massimizzare lo smaltimento di calore all'interfaccia.

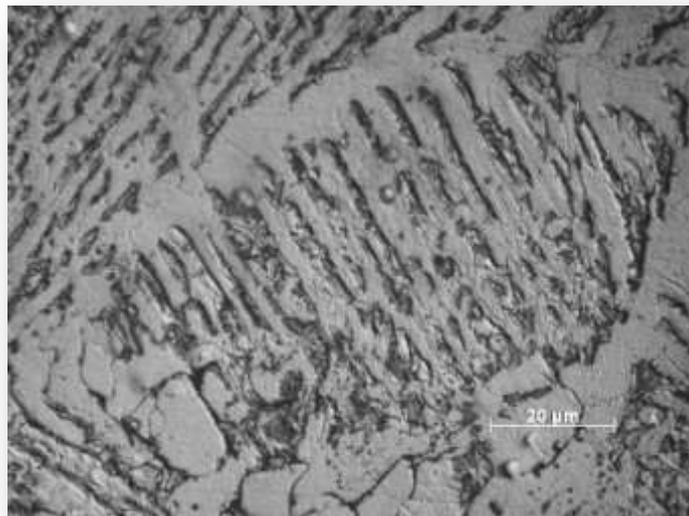


Immagine 3 Accrescimento dendritico nella zona fusa¹, 1000x

La dimensione finale dei grani risulta fondamentale nel determinare le proprietà meccaniche del giunto saldato, ad esempio una struttura a grano ingrossato risulta infatti particolarmente sfavorevole per alcune proprietà come la tenacità.

I fattori che determinano le dimensioni dei grani sono:

- Velocità di raffreddamento: alte velocità di raffreddamento (e quindi cicli termici severi) portano ad avere grani di dimensioni ridotte, mentre cicli termici blandi danno origine ad una struttura a grano ingrossato.

- Numero trasformazioni allotropiche allo stato solido: ad ogni trasformazione corrisponde una diminuzione della dimensione dei grani.
- Dimensioni del materiale base: in quanto la struttura della zona fusa tende a “copiare” quella del materiale base.

1.5.2.2. Influenza vari elementi chimici^{VI}

Come è noto, gli acciai al carbonio per le costruzioni saldate, sono fondamentalmente composti da pochi elementi: C, Mn, Si, impurezze (S e P), e tracce di gas. E' logico quindi che l'analisi chimica e le caratteristiche meccaniche della zona fusa saranno fortemente dipendenti dalla quantità percentuale di questi elementi provenienti dal materiale d'apporto e, in relazione al valore del rapporto di diluizione, dal materiale base. Considerato inoltre che in generale i materiali d'apporto hanno dei contenuti di impurezze molto bassi, sarà importante valutare l'influenza degli elementi provenienti, per diluizione, dal materiale base.

Carbonio (C)

Fra gli elementi citati, il C è quello che fondamentalmente governa la proprietà di questi acciai. All'aumentare della percentuale di C le proprietà dell'acciaio cambiano come segue:

- Aumenta il carico di rottura;
- Aumenta il carico di snervamento;
- Aumenta la durezza,
- Diminuisce l'allungamento;
- Diminuisce la resilienza;
- Aumenta la temprabilità;
- Peggiora la saldabilità.

In generale, la zona fusa è caratterizzata da grani austenitici abbastanza grossolani nei quali i fenomeni di segregazione tendono a concentrare il C ai loro bordi. Inoltre la zona fusa è soggetta ad un raffreddamento abbastanza rapido. All'aumentare quindi della percentuale di C aumenta notevolmente la possibilità di tempra e quindi la formazione di strutture fuori equilibrio. Il C diminuisce la duttilità a caldo del materiale, perciò gioca un ruolo molto negativo in relazione all'insorgere delle cricche a caldo in quanto il materiale attenua meno l'azione degli sforzi di ritiro e delle tensioni interne.

Si consideri inoltre che il C reagisce con molti gas, soprattutto con l'ossigeno, e con altri elementi quali l'ossido di ferro facilitando la formazione di porosità. Questo fenomeno assume proporzioni notevoli nel caso di acciai non disossidati. Infatti il C contribuisce con l'azoto e l'ossigeno a causare il fenomeno dell'invecchiamento.

Nella buona pratica costruttiva viene calcolato il carbonio equivalente, questo dato è ricavato da un calcolo dove vengono richiamati alcuni valori di elementi chimici, di norma un valore di C_{eq} inferiore a 0.45 (numero adimensionale) indica una buona saldabilità del materiale

$$C_{eq} = \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} < 0,45$$

1.5.2.3. Assorbimento di gas^{VII}

Durante la saldatura, in funzione del procedimento impiegato, il bagno fuso può assorbire alcuni gas che reagendo con elementi che compongono la zona di fusione, possono agire negativamente sulla composizione chimica finale e determinare la formazione di taluni difetti molto dannosi per il giunto saldato.

Questi gas possono provenire direttamente dall'aria, qualora non ci sia un'adeguata protezione del bagno fuso, oppure dai materiali d'apporto attraverso il rivestimento degli elettrodi o dal flusso. Inoltre l'eventuale presenza di grasso, sporco, ruggine e altre sostanze, può sviluppare una notevole quantità di gas durante la fusione. In aggiunta, non si trascuri poi l'eventuale apporto di elementi durante la saldatura con procedimento in atmosfera gassosa: dalla protezione possono infatti passare al bagno fuso dei gas indesiderati e dannosi. I gas che possono essere facilmente assorbiti durante il procedimento di saldatura sono:

- Ossigeno;
- Idrogeno;
- Azoto.

Questi possono essere estremamente dannosi per la qualità della saldatura compromettendo pesantemente le caratteristiche meccaniche e favorendo la formazione di difettologie inaccettabili.

1.5.2.4. Struttura zona fusa^{VIII}

Pur essendo rapida la solidificazione del bagno di fusione non è tuttavia istantanea e comincia con la formazione di grani austenitici (germi iniziali) a partire dalla superficie di separazione con il metallo base. La via di maggior smaltimento del calore è costituita infatti dal materiale solido circostante. I grani austenitici progressivamente si sviluppano perpendicolarmente a questa linea di separazione tra la zona fusa e il metallo base allungandosi verso il centro della zona fusa con formazione di una struttura dendritica colonnare. L'orientamento delle dendriti segue la direzione del raffreddamento. Il calore della zona fusa fugge in minima parte verso l'ambiente e trova nel metallo base il canale principale di conduzione e di sfogo.

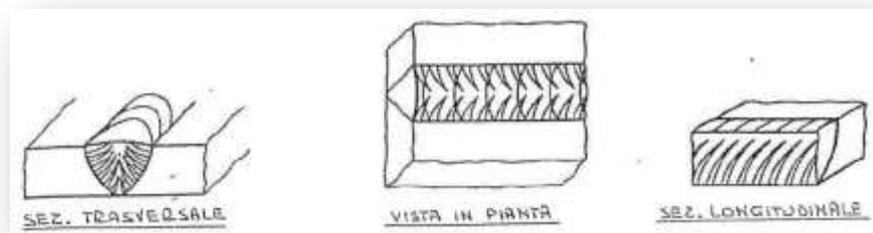


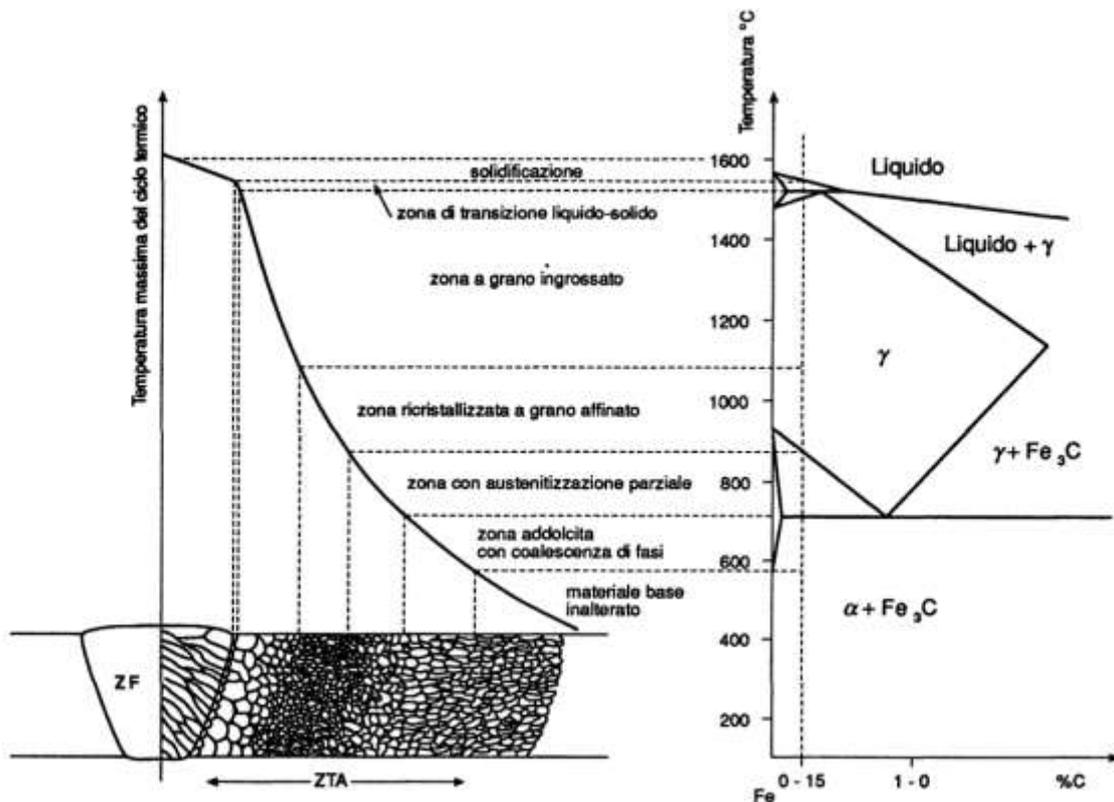
Figura 7 Zona fusa

La Figura 7 presenta schematicamente le strutture dendritiche di un giunto di testa eseguito in una sola passata. In pratica i grani nascono a partire da quelli della ZTA ai quali si agganciano mantenendo lo stesso orientamento del reticolo (epitassia). Perciò più i grani della ZTA sono grandi, più le dendriti tenderanno ad essere grandi, in particolare nei procedimenti che hanno maggior apporto termico e un raffreddamento abbastanza lento perché ingrossano il grano maggiormente. A parità di composizione chimica, le proprietà meccaniche della zona fusa migliorano con la finezza di struttura. La saldatura automatica ad arco sommerso è caratterizzata da solidificazione lenta e da strutture dendritiche abbastanza grossolane. Si ha, infatti, una fortissima potenza in gioco e l'apporto termico è alquanto rilevante nonostante l'avanzamento veloce. Nella saldatura manuale ad arco, l'apporto di calore varia entro vasti limiti al variare del diametro dell'elettrodo e della velocità di avanzamento. Più grossa è la passata e più lento è il raffreddamento. In generale la struttura dendritica risulta però più fine rispetto all'arco sommerso.

1.5.3 Zona termicamente alterata (ZTA)^{IX}

Come già detto in precedenza la ZTA corrisponde alla zona nelle immediate vicinanze del cordone di saldatura che ha subito importanti modificazioni nella struttura cristallina. La sua dimensione e struttura sono direttamente collegate alla tipologia di materiale base utilizzato. Per quanto riguarda agli acciai possiamo individuare due casi:

- Acciai non legati e bassolegati: In questo caso la ZTA può essere suddivisa in tre zone la cui struttura è collegata alla temperatura massima raggiunta durante il processo. Avremo quindi una zona surriscaldata a grano ingrossato per quei punti che raggiungono temperature comprese tra i 1100°C e i 1500°C, una zona ricristallizzata o normalizzata a grano affinato per temperature comprese tra 850°C e 1100°C e una zona con austenitizzazione parziale per permanenze tra i



720°C e gli 850 °C.

Figura 8 Struttura metallurgica di un cordone di saldatura rapportato al diagramma Fe₃C

- Acciai inossidabili: Nella porzione di ZTA che raggiunge temperature comprese tra i 450 e gli 850°C (per gli inossidabili al cromo-nichel) o tra i 950°C e i 1150°C (per gli inossidabili al solo cromo) si verifica il fenomeno della

sensibilizzazione, ovvero la precipitazione a bordo grano di carburi di cromo: di conseguenza il tenore di cromo si abbassa notevolmente e non è più sufficiente a garantire una protezione efficace dalla corrosione.

In tale zona, detta anche zona di transizione e sita nelle immediate vicinanze della zona fusa, i *cicli termici di saldatura*, superando le linee di trasformazione, hanno provocato delle variazioni nella struttura micrografica. La situazione finale dipende da:

- dal ciclo termico di saldatura che ogni punto di essa ha subito, quindi devono essere considerate tutte le variabili che influenzano i cicli termici;
- dalla composizione chimica del materiale base;
- dalla struttura originaria del materiale base.

Infatti i trattamenti termici portano a delle trasformazioni diverse a seconda della composizione della lega, della velocità di riscaldamento, della temperatura massima raggiunta, del tempo di permanenza ad alta temperatura, della velocità di raffreddamento e della struttura iniziale dalla quale si partiva.

Si consideri la deposizione di una passata ad arco manuale con elettrodo rivestito sulla superficie di una lamiera (Figura 9)

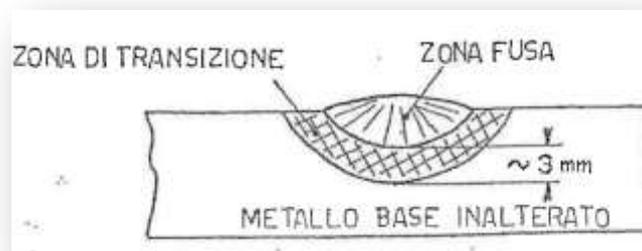


Figura 9 Caratterizzazione zona fusa

La temperatura massima decresce, in funzione della distanza dalla zona, perciò possiamo ritenere che all'incirca solo nei primi 3 mm sotto la zona fusa, il metallo base subisca delle trasformazioni strutturali. Ovviamente l'estensione della ZTA dipende dal procedimento e dai parametri di saldatura. La ZTA può estendersi fino a 7 ÷ 8 mm nel caso di procedimenti a più forte apporto termico oppure nel caso di acciai con strutture originali suscettibili di trasformarsi anche al di sotto dei punti critici. Il fenomeno più vistoso che appare all'analisi macro e micrografia della ZTA nel caso della saldatura

degli acciai al carbonio e a bassa lega, è la variazione delle dimensioni del grano in funzione della distanza della zona fusa.

Si veda ora in dettaglio la ZTA considerando separatamente i due casi seguenti:

- acciai dolci, con resistenza inferiore a 50 kg/mm² ($C < 0.25 \%$);
- acciai dolci, con resistenza superiore a 50 kg/mm² ($C \geq 0.25 \%$).

1.5.3.1 Parametri caratterizzanti ZTA^x

I parametri principali che intervengono a determinare la struttura della ZTA sono i seguenti:

- **Velocità di riscaldamento:** All'aumentare della velocità di riscaldamento, si ha un minore ingrossamento del grano con una minore temprabilità. All'aumentare della velocità di riscaldamento, si ha una distribuzione meno omogenea del carbonio nella fase austenitica con un conseguente incremento della possibilità di trovare zone ad elevata durezza.
- **Massima temperatura e tempo di mantenimento:** All'aumentare della temperatura e del tempo di permanenza, si assiste ad un ingrossamento del grano austenitico che determina una maggiore tendenza alla tempra.
- **Tenore di carbonio:** All'aumentare del tenore di carbonio aumenta sensibilmente la temprabilità.
- **Velocità di raffreddamento:** All'aumentare della velocità di raffreddamento, aumenta la possibilità di formazione di strutture fuori equilibrio dure e poco tenaci.

Le proprietà di queste aree e la loro struttura metallurgica sono determinate da molti fattori fra i quali i più importanti sono:

- ✓ La composizione chimica del materiale base;
- ✓ La composizione chimica del materiale d'apporto;
- ✓ Le strutture metallurgiche di partenza e da tutti i fenomeni chimici e termo fisici relativi al procedimento di saldatura impiegato.

1.5.3.2 I cicli termici^{xI}

Sotto l'azione riscaldante della sorgente termica, il materiale subisce dei cicli termici che influenzano le strutture che si andranno a formare sia nella ZF che nella ZTA. La severità dei cicli termici e l'estensione delle due zone dipendono dal procedimento adottato e dal materiale da saldare, mentre la temperatura massima che si raggiunge deriva, per di più,

dalla distanza dall'asse del cordone. Al crescere della distanza varia anche il tempo necessario per raggiungere il massimo della temperatura.

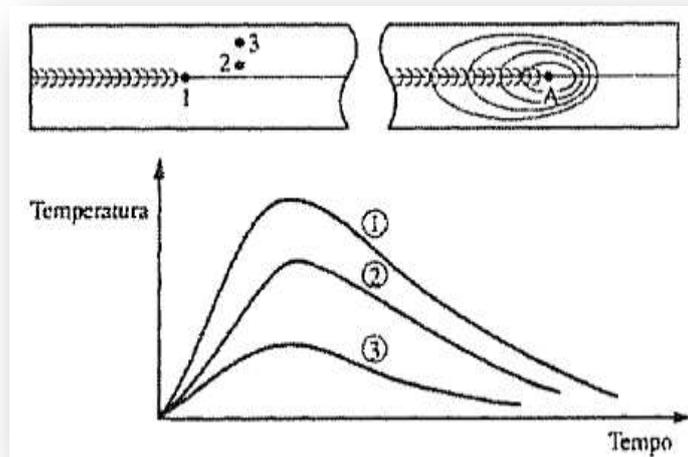


Figura 10 Andamento qualitativo della temperatura in funzione del tempo nelle diverse zone del giunto saldato

La legge con la quale, in un punto del pezzo la temperatura varia in funzione del tempo prende il nome di ciclo termico di saldatura. I cicli termici di saldatura sono veri e propri trattamenti termici e da essi dipende la struttura micrografica finale dei vari punti in prossimità del giunto saldato (trasformazione più o meno completa in austenite, eventuale ingrossamento del grano, ecc.).

La caratteristica termica fondamentale del procedimento di saldatura è un riscaldamento non uniforme (sorgente termica puntiforme). Il calore apportato localmente ai pezzi, deve poter innalzare la temperatura di una piccola quantità di metallo base e d'apporto fino al punto di fusione compensando le enormi perdite nella massa fredda dei pezzi circostanti.

I Cicli termici che ne derivano sono influenzati da numerosi fattori.

I **pezzi da saldare** intervengono coi loro fattori fisici, la conduttività, il calore specifico. Hanno influenza anche la temperatura iniziale e i fattori geometrici dei pezzi stessi fra i quali lo spessore e la forma del giunto.

Il **procedimento di saldatura** interviene pesantemente con le sue caratteristiche esecutive: volume del bagno di fusione, apporto termico specifico (tensione, corrente d'arco e velocità di traslazione).

Al fine di controllare i fenomeni metallurgici che avvengono durante l'operazione di saldatura è indispensabile conoscere le condizioni termiche nelle vicinanze del giunto saldato. In particolare è fondamentale determinare la temperatura più alta nella zona

termicamente alterata e nel materiale base. La velocità di raffreddamento media, nell'intervallo fra i 900°C ed i 400°C, è il parametro che governa i fenomeni di tempra sia in relazione alla struttura austenitica conseguita nelle precedenti fasi del ciclo che alla composizione dell'acciaio.

I cicli termici dipendono almeno dalle seguenti variabili:

- ✓ Posizione e distanza del punto considerato dalla linea di saldatura;
- ✓ Procedimento di saldatura e suoi parametri;
- ✓ Spessore dei pezzi e tipo di giunto;
- ✓ Proprietà fisiche del materiale base;
- ✓ Temperatura iniziale del pezzo.

1.5.3.3 Apporto termico specifico^{XII}

La variabile che, nei riguardi dei cicli termici, distingue procedimenti di saldatura è la quantità di calore (l'energia) introdotta dalla sorgente per ogni centimetro del giunto. Tale parametro rappresenta la severità termica del ciclo, la quale va ad influenzare la velocità di raffreddamento (al non equilibrio), ed è correlata allo

Apporto termico specifico: rappresenta l'energia che la sorgente termica fornisce ai pezzi per unità di lunghezza; questa è data dalla formula:

$$Q = \frac{60 P}{v} * \eta = \frac{60 * I * V}{v} * \eta$$

Equazione 1

dove P : potenza erogata dalla sorgente [W]

v : velocità di saldatura [cm/min]

I : corrente fornita dalla sorgente elettrica [A]

V : tensione fornita dalla sorgente elettrica [V]

η : efficienza di trasmissione termica, ossia il parametro che tiene conto dell'effettivo trasferimento di calore dalla sorgente, sia arco che laser, al cordone.

Efficienza di trasmissione termica	η
MMA	0,8
MAG, tutti i tipi	0,8
SAW	1,0
TIG	0,6

Tabella 4 Valori di efficienza di trasmissione termica per varie tipologie di

Maggiore è il valore dell'apporto termico specifico e più rilevante è la quantità di calore che il giunto deve smaltire, quindi il raffreddamento sarà più lento, con conseguente diminuzione della severità del ciclo termico. A parità di altre condizioni il raddoppio di Q riduce ad un terzo la velocità di raffreddamento.

La saldatura ad arco sommerso, in virtù del forte amperaggio è caratterizzata da elevati apporti termici specifici e pertanto da cicli termici più blandi; la saldatura ad arco manuale provoca cicli termici più severi. In generale gli apporti termici specifici, aumentano passando da procedimenti come quello con elettrodi rivestiti e quello a filo continuo con protezione di gas a procedimenti come l'arco sommerso e l'elettroscoria.

Le conseguenze di cicli termici sono di due tipologie:

dal punto di vista meccanico, a tale processo consegue l'instaurarsi di tensioni residue o ritiri di materiale, mentre come conseguenze metallurgiche si registrano trasformazioni micro e macro strutturali della ZF e ZTA che modificano la reologia del giunto.

Le problematiche di ordine meccanico sono da imputarsi sostanzialmente al fatto che, durante il ciclo termico, le differenti zone del materiale sono vincolate ad altre zone che si trovano a differente temperatura; non potendosi dilatare e contrarre liberamente, sotto l'effetto dei gradienti termici si generano delle deformazioni plastiche localizzate ed il conseguente permanere di tensioni residue che possono assumere valori elevati (ad esempio, lungo l'asse del cordone si giunge spesso allo snervamento). Qualora il materiale sia dotato di una sufficiente duttilità le tensioni residue possono ridistribuirsi, grazie alla plasticizzazione locale, mentre in caso di strutture fragili si può andare incontro alla formazione di un difetto della saldatura, la cricca.

Alla presenza delle suddette tensioni, si deve prestare attenzione soprattutto nel caso di:

- Strutture che lavorano a temperature basse;
- Strutture soggette a tenso-corrosione, in quanto le tensioni del ritiro aumentano la velocità del fenomeno;
- Strutture soggette a carico di punta, poiché aumenta l'instabilità del materiale.

Le tensioni da ritiro sono facilmente eliminabili, fatto salvo gli ingombri delle strutture realizzate, tramite un trattamento termico di *distensione*.

La genesi delle tensioni interne è da ascrivere principalmente a:

- ritiro proprio del cordone, il materiale fuso durante il raffreddamento alla temperatura di esercizio, contrae il proprio volume;
- ritiro delle zone adiacenti la zona fusa, dovuta alla trasmissione del calore proveniente dal giunto; queste zone si riscaldano e si dilatano, per poi ritornare al volume iniziale dopo il raffreddamento;
- liberazione, anche parziale delle tensioni interne già presenti prima della saldatura, come quelle generate dalle lavorazioni meccaniche.

1.5.3.4 Influenza del tipo di giunto^{XIII}

Il calore introdotto nel giunto dal processo di saldatura trova sfogo principale per conduzione attraverso il materiale base mentre la parte ceduta per convezione all'aria può essere comparativamente ignorata. A parità d'apporto termico specifico, il ciclo termico sarà tanto più severo quanto alto sarà lo spessore dei pezzi. Raddoppiare lo spessore significa raddoppiare le velocità di raffreddamento. Allo smaltimento di calore concorre praticamente tutto il materiale compreso in un raggio di circa 80 mm attorno al punto caldo per cui è essenziale tener conto, oltre che dello spessore, anche della geometria del giunto. Nella saldatura di giunti di testa fatta in più passate, ognuna delle quali viene eseguita in regime perfettamente identico di temperatura iniziale e di calore fornito per unità di lunghezza, le velocità di raffreddamento nelle passate finali sono maggiori che nella prima. Ciò è dovuto al fatto che nella prima passata, sul fondo del cianfrino, il metallo d'apporto si deposita in modo da costituire solo una piccola superficie attraverso cui trasmette il calore al metallo base, mentre nell'ultima passata il bagno si adagia sulle passate sottostanti e trasmette il calore attraverso una superficie più larga. Nei giunti a T le velocità di raffreddamento per la prima passata sono, a parità di calore fornito per unità di lunghezza, più alte che per i giunti di testa in relazione ad una più vasta superficie di scarico nell'intorno immediato del bagno di fusione che contribuisce alla sottrazione di calore.

1.5.3.5 Influenza del materiale base^{XIV}

A parità d'ogni altra circostanza, la velocità di raffreddamento è direttamente proporzionale alla conducibilità termica e al calore specifico propri del metallo base. Passando dagli acciai al carbonio agli acciai molto legati ad altri metalli il regime termico varia notevolmente, per le forti differenze di conducibilità termica e del calore specifico. I metalli a bassa conducibilità termica danno luogo a velocità di raffreddamento minori. Per gli acciai,

l'influenza degli elementi di lega sulla conducibilità termica è molto modesta; a parità di condizioni si avranno cicli termici identici nell'acciaio dolce e nell'acciaio Cr/Mo; ciò non toglie che le conseguenze metallurgiche siano molto diverse.

Non altrettanto può dirsi per gli acciai molto legati, quali ad esempio gli inossidabili austenitici al Cr/Ni la cui conducibilità termica è circa 4 volte inferiore a quella degli acciai dolci.

Lo stabilirsi di ciascun punto dei cicli termici porta ad alterazioni metallurgiche più o meno importanti in relazione alle temperature raggiunte, alla composizione chimica del materiale base ed in particolare, della velocità di raffreddamento determinata dal ciclo.

Se verticalmente, da ciascun punto della lamiera in saldatura, alziamo un segmento proporzionale alla temperatura, collegando gli estremi alti di detti segmenti, otteniamo una superficie cui si riserva l'appellativo di solido termico.

1.6 Difettologia del giunto saldato^{XV}

Secondo UNI EN ISO 6520-1¹ si definisce imperfezione qualsiasi deviazione dalla saldatura ideale e difetto un'imperfezione non accettabile. In particolare la norma citata classifica le imperfezioni in 6 gruppi:

- 1) cricche
- 2) cavità
- 3) inclusioni solide
- 4) mancanza di fusione e di penetrazione
- 5) difetti di forma e dimensionali
- 6) altre imperfezioni

Di seguito saranno illustrati sinteticamente i tipi di difetti più comunemente riscontrati nelle saldature e le cause che li originano.

¹ UNI EN ISO 6520-1:2008 : "Saldatura e procedimenti commessi-Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici- Parte1, Saldatura per fusione"

1.6.1 Cricche^{XVI}

La cricca (Figura 11) può essere definita come una rappresentazione di discontinuità originatasi per distacco inter o transcristallino in un materiale metallico originariamente continuo e sano. È un difetto che viene indicato come bidimensionale poiché solitamente si presenta più o meno lungo e profondo con andamento frastagliato mentre i suoi lembi sono piuttosto ravvicinati. Se le cricche hanno dimensioni molto ridotte (inferiori ad 1 mm), vengono definite microcricche. Le cricche sono il difetto più grave e temibile di un giunto saldato. Infatti una cricca, anche se di piccole dimensioni, rappresenta il segnale di una rottura in atto con alto fattore di concentrazione delle tensioni (effetto di intaglio) alle sue estremità.

Una cricca può aumentare le sue dimensioni nel tempo a seconda delle sollecitazioni di esercizio cui è sottoposta e delle dimensioni iniziali, portando (al limite) al cedimento del giunto. Un'ulteriore classificazione delle cricche può essere fatta a seconda che il distacco avvenga lungo i bordi dei grani (intergranulari) o attraverso i grani stessi (transgranulari), mentre, seconda della loro posizione rispetto al giunto saldato, si distinguono cricche in zona fusa o cricche in zona termicamente alterata.

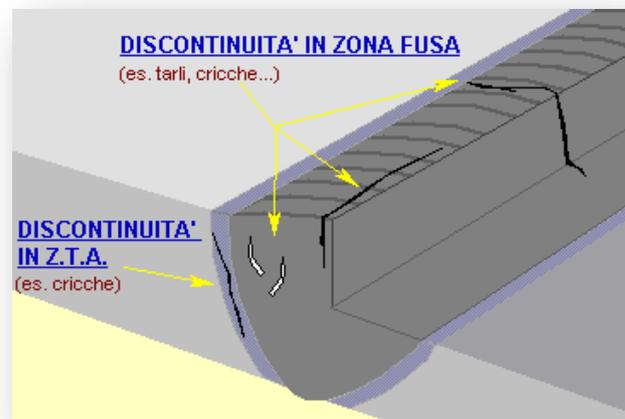


Figura 11 Rappresentazione cricca in giunto saldato testa a testa

Esse si trovano nella zona fusa del giunto e possono essere orientate longitudinalmente, trasversalmente oppure essere interdendritiche (queste ultime sono quelle che seguono l'andamento dei grani dendritici della zona fusa).

A seconda della loro origine si distinguono in:

- ❖ Cricche a caldo
- ❖ Cricche a freddo o da idrogeno

1.6.1.1 Cricche in zona fusa^{XVII}

Le **cricche a caldo in zona fusa ZF** hanno generalmente orientamento longitudinale (Figura 12) e si formano durante il raffreddamento del bagno di fusione quando la temperatura è poco al di sotto della linea del *solidus* e, nel caso degli acciai, ancora al di sopra dei 900°C a seguito della presenza, tra i grani già solidificati, di fasi liquide che solidificano per ultime.

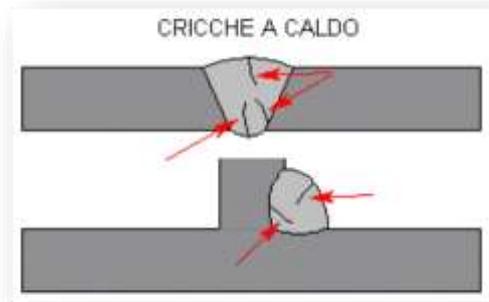


Figura 12 Rappresentazione di cricca a caldo

Quando la zona del cordone è ancora in fase liquida non c'è possibilità per la massa fusa di trasmettere tensioni; tuttavia, con l'inizio della solidificazione, i primi grani che riescono a formare dei collegamenti intergrano per l'intera larghezza del cordone sono soggetti a sforzi elevatissimi poiché la sezione resistente è molto piccola se rapportata allo spessore del materiale; superato il limite di snervamento e fino al limite di rottura, i ponti solidi rispondono con deformazioni plastiche e rispondono con rotture intergranulari quando si supera il limite di rottura che porta alla formazione di *cricche a caldo*. Per evitare questo fenomeno è necessario fare in modo che la composizione della zona fusa sia tale da presentare un piccolo intervallo di solidificazione e che la solidificazione avvenga con velocità elevate.

Nella formazione di cricche a caldo riveste importanza anche la dimensione delle dendriti: infatti, avere dendriti grandi significa avere pochi collegamenti intergranulari e quindi piccole sezioni resistenti. Al contrario grani piccoli assicurano la presenza di una sezione resistente più elevata con ridotta probabilità di formazione di cricche a caldo.

Negli acciai le cause principali sono:

un elevato tenore di impurezze (zolfo e fosforo) e/o di carbonio contenute nel materiale base, le tensioni di ritiro di saldatura e altre cause occasionali come, per esempio, la sporcizia presente sui lembi da saldare. In altri metalli, per esempio nelle leghe di alluminio, causa

delle cricche a caldo possono essere anche elementi di lega (Cu, Zn, Mg) in determinate percentuali che allargano l'intervallo di solidificazione della lega.

In presenza di queste condizioni è quindi evidente che, a parità di materiale base, il pericolo che insorgano cricche a caldo è direttamente proporzionale alla quantità di esso portata a fusione. Sono pertanto da evitare quei procedimenti e quei valori di parametri (per esempio un'intensità troppo elevata di corrente, una troppo bassa velocità di saldatura) che danno luogo ad un elevato apporto termico e quelli che danno luogo a bagni di fusione troppo voluminosi. Uno tra i più frequenti casi di cricche a caldo è rappresentato dalle cosiddette “*cricche di cratere*”, che sono situate nel cratere terminale di una passata di saldatura e sono dovute alla concentrazione progressiva delle impurezze nella parte del bagno che solidifica per ultima e alle condizioni di autovincolo molto severe. Nelle radiografie esse appaiono sotto forma di macchie scure con annerimento variabile e dalla forma irregolare.

Le cricche a freddo in zona fusa ZF si formano negli acciai durante il raffreddamento (Figura 13) del cordone quando la temperatura scende al di sotto di 100÷150°C, persino anche dopo ore dalla fine del processo. Le cause principali della loro formazione sono: un alto tenore di idrogeno in zona fusa, una durezza relativamente elevata della zona fusa stessa e la considerevole entità delle tensioni di ritiro longitudinali che, tra l'altro, ne generano il caratteristico prevalentemente trasversale. Per limitare (o eliminare) la loro comparsa è utile limitare la quantità di idrogeno assorbita dal bagno e applicare e mantenere un adeguato preriscaldamento (che ha lo scopo di diminuire la durezza della zona fusa e di consentire la diffusione dell'idrogeno all'interno). Poiché, come accennato, le tensioni di ritiro longitudinali sono in genere le più elevate nella zona fusa, queste cricche sono più frequentemente trasversali; solo più raramente si hanno in zona fusa cricche a freddo longitudinali.

Nella saldatura degli acciai dolci o ad alto limite elastico anche in assenza di tempra, ma in presenza di idrogeno e azoto, tali cricche si presentano di dimensioni molto piccole (talvolta vengono anche definite *microcricche da idrogeno*) e spesso si raggruppano in un certo numero nella stessa sezione (trasversale o longitudinale) del giunto. Nella saldatura degli acciai con elevate caratteristiche meccaniche (come i bonificati), per i quali si utilizzano materiali di apporto più tempranti, le cricche a freddo in zona fusa sono più grandi e possono tagliare completamente il cordone di saldatura in direzione trasversale ripetendosi quasi sistematicamente a certe distanze, quando la lunghezza del cordone accumula sufficiente

energia di ritiro longitudinale. Nella saldatura a più passate non è infrequente riscontrare la presenza di cricche a freddo nelle passate sottostanti, anche se in realtà, però, esse sono da riferirsi alle zona termicamente alterate dalle passate successive.

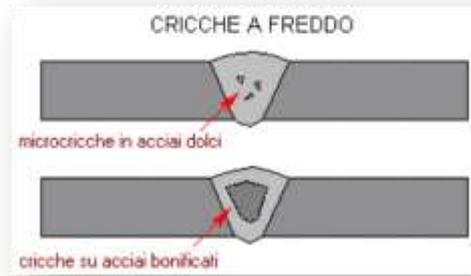


Figura 13 Rappresentazione Cricche a freddo

1.6.1.2 Cricche in zona termicamente alterata

Sono cricche che si trovano nella zona termicamente alterata di un giunto saldato, che è costituita dal materiale di base o, talvolta, dalle passate depositate precedentemente, o che comunque si sono originate da essa. Hanno generalmente direzione longitudinale e possono essere interne (cricche sotto il cordone) o affioranti a lato del cordone. A seconda della loro origine quelle più comuni si possono classificare in:

- ✓ Cricche a freddo;
- ✓ Strappi lamellari;
- ✓ Cricche a caldo;
- ✓ Cricche da trattamento termico.

Le cricche a freddo si formano negli acciai quando durante il raffreddamento (Figura 14) di un giunto saldato la temperatura scende al di sotto di circa $100\div 150^{\circ}\text{C}$. Il fenomeno è soprattutto legato alla presenza di idrogeno nel bagno (proveniente dai materiali d'apporto o dai lembi; per esempio umidità contenuta nel rivestimento degli elettrodi o lembi umidi, rugginosi e sporchi), unitamente ad una concomitante fragilità della zona termicamente alterata (per la formazione di strutture di tempra) e a tensioni interne di autovincolo (sempre esistenti). A seconda del tipo di materiale di apporto, se questo è meno temprante del materiale base le cricche si troveranno solo nella zona termicamente alterata del materiale base; se invece il materiale base è meno temprante del materiale d'apporto esse si formeranno nella zona fusa globale del cordone, cioè nella zona termicamente alterata

costituita dalle passate precedenti. Le cricche a freddo possono avere sia dimensioni ridottissime sia molto rilevanti, con lunghezze che possono arrivare a centinaia di millimetri; l'andamento microscopico è generalmente trasgranulare. Per quanto riguarda l'origine e prevenzione valgono all'incirca le stesse considerazioni svolte a proposito delle cricche a freddo in zona fusa.

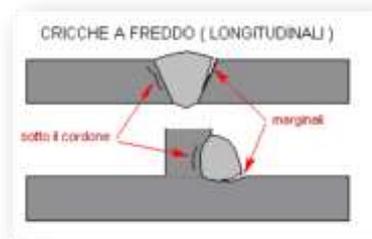


Figura 14 Rappresentazione Cricca a freddo longitudinale

Gli Strappi lamellari possono essere assimilati a cricche che si formano solo nella zona termicamente alterata del materiale base (Figura 15) e sono tipici dei giunti molto vincolati (giunti a T) la cui forma è tale che la lamiera è sollecitata a trazione normalmente rispetto alla sua superficie (cioè nel senso dello spessore della lamiera o *traverso corto*). Questi difetti sono dovuti al fatto che i materiali laminati sollecitati in questo modo possono presentare bassa resistenza e duttilità, motivo per cui possono rompersi proprio sotto la zona termicamente alterata. Il fenomeno degli strappi lamellari è influenzato dalle seguenti condizioni:

- *dimensioni del cordone* : quanto più grosso è il cordone tanto più forti sono le tensioni di ritiro che agiscono nel senso dello spessore della lamiera;
- *tipo di penetrazione* : sono più pericolosi da questo punto di vista i giunti a piena penetrazione che quelli con cordone ad angolo perché nei primi le tensioni di ritiro sono proprio perpendicolari alla lamiera;
- *spessore e qualità del laminato* : gli strappi sono dovuti a una debolezza “intrinseca” del laminato causata soprattutto dalla presenza di inclusioni, specialmente silicati e solfuri; in particolare queste ultime essendo “plastiche” alla temperatura di laminazione a caldo vengono “allungate” da quest’ultima riducendo quindi la coesione in senso trasversale allo spessore.

Poiché tale fenomeno è tanto più marcato quanto maggiore è lo spessore, il rimedio più efficace è una particolare elaborazione dell'acciaio (che riduca drasticamente il

contenuto inclusionale) e l'aggiunta eventuale di elementi, quali per esempio il calcio, oppure del cerio o altre terre rare, che legandosi allo zolfo rendono le inclusioni di solfuri più dure e non "allungabili" durante la laminazione;

- *tipo di procedimento e parametri di saldatura* : quando si teme che si verifichino strappi lamellari, è utile procedere a imburratura² preventiva della superficie del pezzo da saldare sollecitato trasversalmente o almeno usare, nella saldatura a passate multiple, una sequenza di passate particolare atta a depositare uno strato di cordoni sull'elemento sollecitato trasversalmente. È raccomandato inoltre, quando possibile, l'uso di materiali d'apporto a bassa resistenza e alta duttilità e di saldare contemporaneamente dalle due parti del T per distribuire i ritiri.

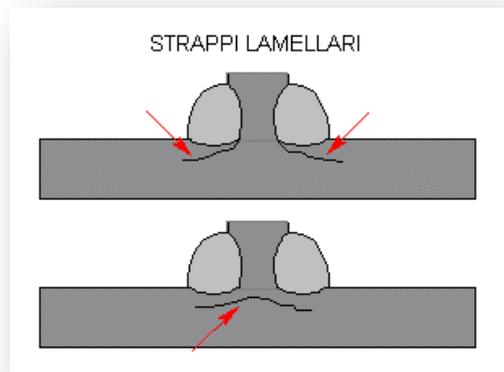


Figura 15 Rappresentazione Strappi lamellari

Le cricche a caldo sono dovute al passaggio allo stato liquido di composti a basso punto di fusione che si trovano al contorno del grano cristallino nella zona termicamente alterata del giunto, immediatamente vicino alla zona fusa, e all'azione delle tensioni di ritiro trasversali, che tendono a staccare i grani; esse hanno, pertanto, carattere intergranulare e sono generalmente molto piccole. L'unica procedura possibile per limitarne la comparsa è quella di saldare con basso apporto termico in modo da limitare l'ampiezza della zona termicamente alterata e fare attraversare il campo di temperature critico assai rapidamente. Le cricche a caldo sono abbastanza rare e tipiche di taluni materiali come i getti a più alto tenore di carbonio, certi acciai inossidabili stabilizzati e alcuni acciai bonificati o al nichel.

² L'imburratura è una forma particolare di riporto per saldatura con cui si deposita dapprima uno strato di cordone avente caratteristiche chimico-fisiche intermedie tra quelle del materiale base e del deposito finale.

Cricche da trattamento termico: sono cricche che si producono durante il trattamento termico di rinvenimento-distensione di una costruzione saldata a seguito delle tensioni termiche, dovute ai gradienti di temperatura che si possono avere in fase di riscaldamento, e delle deformazioni plastiche “di distensione locale” che avvengono in zone in cui la struttura metallurgica è ancora fragile e non rinvenuta. Mentre generalmente gli acciai dolci, quelli al Cr-Mn o quelli al Nb, soffrono poco di tale inconveniente, certi acciai contenenti Cr e/o Mo e/o V ne sono particolarmente suscettibili. Le cricche da trattamento termico si formano più facilmente in zone nelle quali vi sono concentrazioni di tensioni come per esempio: in corrispondenza di difetti di saldatura; in corrispondenza di incroci di cordoni; in corrispondenza di discontinuità strutturali; in corrispondenza di disomogeneità metallurgiche (per esempio zona termicamente alterata in acciai ferritici sotto a riporti di acciai austenitici). Le cricche da trattamento termico corrono generalmente lungo i bordi dei grani dell'austenite originaria nella quale, in origine, si era avuta precipitazione di carburi (Cr, Mo o V) e arricchimento di impurezze. Quando si teme tale fenomeno, particolare cura va posta nella scelta dell'acciaio e nei requisiti di purezza dello stesso e particolari precauzioni vanno adottate nell'effettuazione del trattamento termico.

Mancanza di penetrazione o fusione

In questo caso si tratta di discontinuità esistenti tra i due lembi del cianfrino (mancanza di penetrazione) o tra un lembo e la zona fusa (mancanza di fusione) provocate dalla mancata fusione di entrambi o di uno solo dei lembi (Figura 16).



Figura 16 Rappresentazione mancanza di penetrazione



Figura 17 Esempio mancata penetrazione in C18_9

Nella radiografia questo difetto si presenta come una linea nera continua o discontinua che si trova sul fondo e corre parallelamente alla saldatura. Questo tipo di difettosità (grave e quasi sempre incettabile) può essere riscontrato nella zona della prima passata, al vertice o al cuore della saldatura, a seconda del tipo di preparazione: a V, a X ecc. o in corrispondenza di

passate successive. La causa principale della loro comparsa è da ricercarsi nella non corretta preparazione dei lembi (angolo di apertura del cianfrino troppo piccolo, spalla eccessiva, distanza tra i lembi insufficiente, slivellamento), talvolta nella mancanza di opportuna puntatura o di cavallotti distanziatori che evitino che i lembi si chiudano, a mano a mano che la saldatura procede, per effetto del ritiro trasversale, o nella scarsa abilità del saldatore. Nel caso di giunti che possono essere ripresi dal lato opposto (come accade per esempio nel caso delle lamiere) il difetto può essere eliminato con un'accurata solcatura al rovescio effettuata prima dell'esecuzione della passata di ripresa. È da notare, peraltro, che se la presenza di questo difetto si osserva al cuore della saldatura, significa non solo che la preparazione dei lembi non è stata corretta ma anche che la solcatura e la ripresa non sono state eseguite con sufficiente cura. Dal punto di vista della localizzazione, i fenomeni di ritiro trasversale, che esercitano un'azione compressiva, possono portare a stretto contatto i lembi non fusi di una mancata penetrazione al cuore (specialmente se i lembi sono stati preparati mediante lavorazione meccanica); tale contatto intimo può creare grosse difficoltà qualora si intenda rivelare successivamente il difetto con tecniche NDT quali radiografia, magnetoscopia e ultrasuoni. Si tratta, pertanto, di un difetto molto subdolo la cui comparsa deve essere evitata soprattutto con controlli preventivi (in fase di preparazione) o durante l'esecuzione della solcatura. Oltre alla mancata penetrazione si può presentare il difetto di penetrazione eccessiva; tale problema si manifesta nel controllo radiografico sotto forma di una linea chiara piuttosto spessa, che corre lungo la saldatura, spesso accompagnata da eventuali macchie ancora più chiare di forma arrotondata.



Figura 18 Rappresentazione Mancanza di fusione



Figura 19 Esempio mancata fusione, PB_1

Le incollature si presentano di caratteristiche simili alle mancanze di fusione, ma tra il lembo e la zona fusa si trova interposto uno strato di ossido, per cui in quella zona la saldatura diventa una brasatura all'ossido del materiale che si salda (Figura 20). Questo

difetto è tipico dell'acciaio, qualora si proceda a saldatura ossiacetilenica (cioè ad apporto termico poco concentrato) e MAG ad immersione (quindi con basso apporto), ma si presenta anche nei materiali facilmente ossidabili come, ad esempio, le leghe di alluminio. Un giunto nel quale siano presenti incollature possiede caratteristiche meccaniche scadenti. Anche questo difetto è molto subdolo e, particolarmente negli acciai, poco rilevabile ai controlli non distruttivi, per cui deve essere evitato soprattutto con i controlli preventivi.

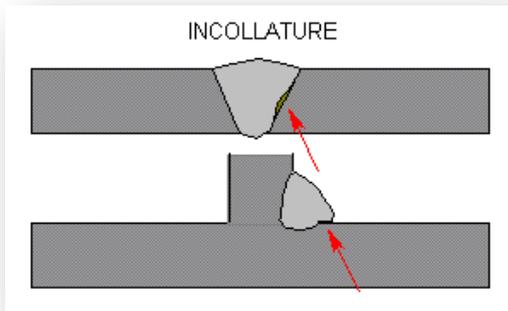


Figura 20 Rappresentazione incollature

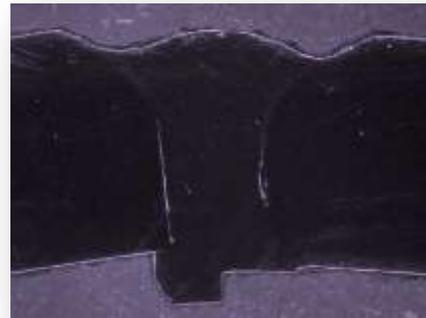


Figura 21 Esempio incollature, C18_2

Le inclusioni (solide o gassose) sono difetti situati in zona fusa, dovuti alla presenza di sostanze diverse dal metallo del cordone di saldatura, che risultano inglobate nel cordone stesso. Le *inclusioni solide* si classificano, a seconda del materiale che le costituisce, in inclusioni di scorie e inclusioni di tungsteno. Le prime sono cavità in zona fusa contenenti solo scoria o scoria e gas. Le inclusioni di scoria sono definite *allungate* quando la loro lunghezza è più di tre volte la larghezza e in radiografia si presentano come macchie nere, irregolari, di forme diverse. Si tratta di uno dei difetti più comuni nei cordoni realizzati con elettrodi rivestiti e ad arco sommerso, quando l'esecuzione del giunto sia stata effettuata con passate multiple ed è causato principalmente dall'asportazione poco accurata di scorie ad alto punto di fusione di una passata prima dell'esecuzione della passata successiva; tuttavia le inclusioni possono essere anche dovute ad un uso scorretto dell'elettrodo rivestito, ad un non preciso posizionamento della testa saldatrice oppure ad una non corretta scelta dei parametri della preparazione (es. angolo di apertura del cianfrino troppo stretto).

Le inclusioni di tungsteno, (Figura 22) che appaiono, in radiografia come macchie bianche di forma e dimensioni irregolari sono originate dalla presenza di minute schegge di tungsteno sia isolate che raggruppate (spruzzi).

È un tipico difetto del procedimento TIG imputabile alle seguenti cause:

- ❖ maneggio scorretto della torcia
- ❖ insufficiente protezione gassosa dell'elettrodo
- ❖ scarsa qualità dell'elettrodo
- ❖ intensità di corrente troppo elevata

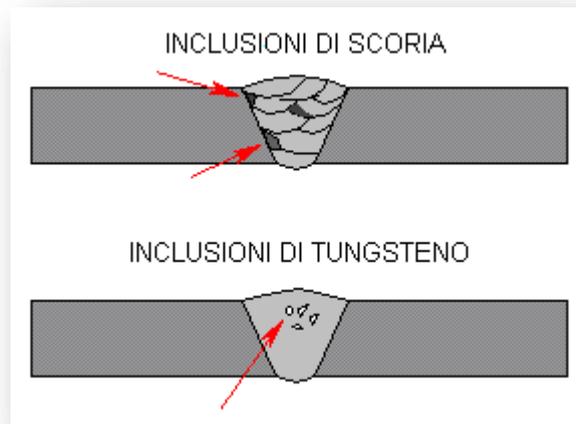


Figura 22 Rappresentazione inclusioni solide

Le inclusioni gassose sono cavità provocate da gas intrappolati nel bagno che si è solidificato troppo rapidamente (Figura 23); esse si presentano tipicamente di forma tondeggiante e assumono la denominazione di pori o soffiature a seconda che la loro dimensione sia inferiore o superiore ad 1 mm. In radiografia, questa tipologia di difetti appare in veste di macchie nere arrotondate localizzate all'interno del cordone. Le inclusioni gassose possono essere provocate dalla presenza, sui lembi da unire, di ruggine, vernice o sporcizia in genere. Altre cause sono un eccessivo tasso di umidità nel rivestimento degli elettrodi o nei flussi (arco sommerso) oppure nei gas impiegati (saldatura ossiacetilenica e saldatura elettrica sotto protezione di gas). Anche l'uso di procedimenti ad elevata velocità di deposito o di saldatura (per esempio saldatura laser o a fascio elettronico) e un non corretto maneggio della torcia o della pinza (protezione gassosa difettosa o scarsa, nel caso dei procedimenti sotto gas sono causa di inclusioni gassose. Contrariamente a quanto ritenuto dalla maggior parte degli operatori di saldatura, questi difetti non sono molto pericolosi per la resistenza del giunto; in particolare una porosità diffusa nella saldatura MIG di leghe

leggere è praticamente inevitabile e accettabile, mentre tali difetti diventano inaccettabili solo quando sono di grandi dimensioni o numerosi (nidi di porosità o di soffiature) o quando, come nel caso della porosità diffusa, sono di entità tale da mascherare l'eventuale presenza di altri difetti più gravi. Le inclusioni gassose di forma allungata (lunghezza superiore a più di tre volte il loro diametro) vengono dette tarli, e quelle con una coda particolarmente lunga, che può terminare con piccole cricche o incollature, sono da considerarsi più pericolose per la sicurezza del giunto. I tarli possono, inoltre, presentarsi raggruppati (nidi di tarli) nelle zone in cui, per errore di maneggio, l'arco con elettrodi basici o cellulosici, è stato troppo allungato. Nella radiografia i tarli appaiono come delle macchie più scure allungate. Un caso particolare è quello delle inclusioni allungate dette bastoni da golf nei procedimenti ad elettroscoria o elettrogas dovute a presenza di sfogliature affioranti o meno nei lembi da saldare.

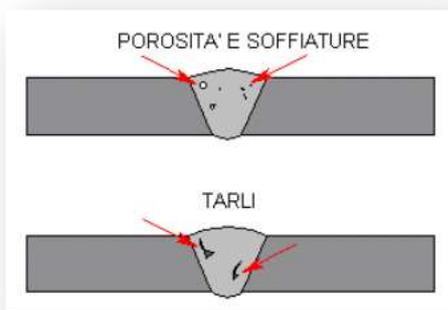


Figura 23 Rappresentazione inclusioni gassose



Figura 24 Esempio porosità, SCH2_4

Eccesso di sovrametallo

È un difetto che si riscontra nei giunti di testa dovuto, in genere, a scorretta procedura da parte dell'operatore che non ha saputo distribuire opportunamente il numero delle passate (caso della saldatura manuale) oppure qualora non si siano seguite scrupolosamente le specifiche di saldatura (Figura 25). Talvolta questo difetto può essere dovuto alla non corretta scelta della preparazione del giunto: ad esempio, nella saldatura a lembi retti su un certo spessore, se per ottenere una sufficiente penetrazione si innalza la corrente, cresce parallelamente il consumo del filo e ciò origina una maggiore quantità di metallo d'apporto con conseguente sovrametallo. In tali casi occorre cambiare la preparazione del giunto affinché questo sia adatto a poter accogliere il maggiore apporto. È luogo comune ritenere, erroneamente, che l'eccesso di sovrametallo non sia un difetto ma che, anzi, a causa del

maggiore spessore della saldatura il giunto offra una resistenza più elevata. Ciò è assolutamente falso: infatti ai margini del sovrametallo si crea sempre, per effetto della forma, una concentrazione di tensioni (effetto di intaglio) che sotto certe condizioni di servizio come fatica, urti o bassa temperatura, può ridurre la capacità di resistenza dal giunto.



Figura 25 Rappresentazione eccesso di sovrametallo



Figura 26 Esempio eccesso sovrametallo, SCH4_1

Cordone d'angolo troppo convesso

Questo difetto (Figura 27) è caratteristico dei giunti d'angolo ed è dovuto ad un uso improprio dell'elettrodo da parte del saldatore o a parametri non corretti (per esempio tensione insufficiente) nella saldatura automatica.



Figura 27 Rappresentazione Cordone d'angolo troppo convesso

Incisioni marginali

Le incisioni marginali (Figura 28) sono, sostanzialmente, una sorta di solcatura a margine del cordone che si presenta, nell'immagine radiografica, sotto forma di piccole linee nere, talvolta sui due lati, continue o a tratti. Questo tipo di difetto si presenta spesso nei cordoni eseguiti manualmente sia in giunti di testa sia in cordoni d'angolo, più frequentemente in posizione diversa da quella piana. Le incisioni marginali sono essenzialmente causate dall'impiego di corrente eccessiva, associata ad un impiego non corretto della torcia.

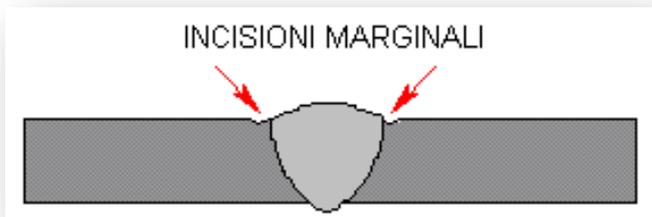


Figura 28 Rappresentazione Incisioni marginali

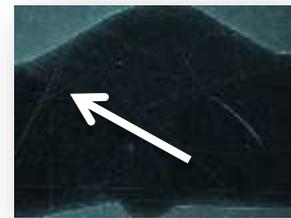


Figura 29 Esempio incisioni marginali, C18_2

Irregolarità superficiale

È un difetto che conferisce un cattivo aspetto estetico al cordone le cui maglie (Figura 30) anziché essere disposte parallelamente una di seguito all'altra, seguono un andamento irregolare, con variazione di profilo del cordone, avvallamenti denunciati i punti di ripresa ecc. La causa di tale difetto è da imputarsi ad una scarsa abilità da parte del saldatore. Nella saldatura automatica si può riscontrare uno scadente aspetto superficiale a seguito dell'adozione di parametri di saldatura non appropriati quali, ad esempio, velocità eccessiva (maglia a spina di pesce troppo accentuata) o velocità troppo bassa (eccesso di sovrametallo accoppiato a traboccamenti laterali che costituiscono incollature tra sovrametallo e metallo base).

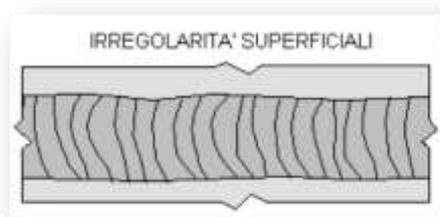


Figura 30 Rappresentazione irregolarità cordone



Immagine 4 Campione PB_1

Disallineamento dei lembi

È un difetto dovuto ad un imperfetto assemblaggio del giunto che ostacola la possibilità di eseguire una saldatura regolare. Nel migliore dei casi si riscontra una brusca variazione del profilo, ma in certe situazioni lo slivellamento è tale da provocare una mancanza di fusione del lembo sottoposto.



Figura 31 Rappresentazione disallineamento lembi



Figura 32 Esempio disallineamento, PB_6

Spruzzi

Sono depositi più o meno grandi e dispersi, frequentemente incollati sulla superficie del metallo base vicino al cordone, tipici della saldatura manuale a elettrodi rivestiti (basico e cellulosico) e del procedimento MAG (CO₂). Gli spruzzi di saldatura appaiono nell'immagine radiografica sotto forma di piccole macchie bianche sia sul cordone di saldatura sia nel materiale base. Questo tipo di difetto è pericoloso, soprattutto per i giunti che operano in ambienti chimicamente aggressivi, poiché rappresentano un facile innesco per l'attacco corrosivo. Inoltre, su acciai ad elevata resistenza, in corrispondenza degli spruzzi possono avere luogo pericolosi fenomeni di tempra localizzati, eventualmente accompagnati dalla formazione di piccole cricche.

Colpi d'arco

Consistono in una fusione localizzata del materiale base che è avvenuta senza deposito di materiale d'apporto. Si tratta di difetti tipici dei procedimenti manuali ad arco e sono provocati dalla scarsa cura del saldatore che innesca l'arco sul materiale base e non, come è regola, su un lembo del cianfrino. Tali fusioni localizzate possono essere particolarmente pericolose su materiali base temprati, specialmente se sono accompagnate dalla presenza di piccole cricche.

1.6.2 Distorsioni indotte termicamente e tensioni residue^{XVIII}

Origine delle tensioni termiche

Le principali tensioni, che si hanno nel materiale o nella struttura, sono di origine termica e dipendono dal gradiente di temperatura. Esse sono di tre tipi:

- Tensioni indotte da variazioni volumetriche, come l'espansione o la compressione, associati a cambiamenti di fase nel materiale;
- Tensioni dovute a differenti coefficienti di dilatazione termica dei materiali da saldare;
- Tensioni indotte dai gradienti di temperatura, dovuti alle differenti velocità di espansione nel riscaldamento e compressione nel raffreddamento.

Di conseguenza, i materiali variano in dimensioni, prima localmente e poi coinvolgendo l'intera struttura, e così nascono le distorsioni.

Cause che portano alla formazione delle tensioni residue

Le tensioni residue si originano nel materiale o nella struttura dopo che tutti i carichi esterni sono rimossi. Ad esempio, possono nascere da deformazioni plastiche non uniformi, specialmente durante lavorazioni a freddo, da trattamenti termici e trasformazioni di fase localizzati.

Nelle strutture, esse hanno origine da differenze strutturali e da distribuzioni non uniformi di sforzi anelastici, dovuti a sorgenti termiche o meccaniche.

Cause della distorsione

Le distorsioni nascono quando le tensioni indotte termicamente non sono controllate e le più importanti sono: restringimenti trasversali perpendicolari alla linea di saldatura, restringimenti longitudinali paralleli alla linea di saldatura, e rotazioni attorno alla linea di saldatura.

Si ravvisano tali distorsioni in Figura 33:

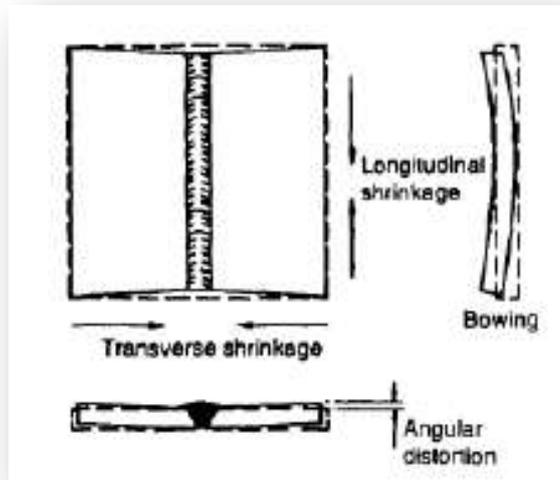


Figura 33 Distorsioni dimensionali durante la saldatura

L'ammontare e la direzione del restringimento dipendono dal tipo di saldatura, dalla presenza di altre saldature con le loro tensioni, dalla profondità della saldatura, dal calore in ingresso, dalla composizione strutturale dei materiali, e dalla sequenza di esecuzione della saldatura.

Esempio di una distribuzione tipica delle tensioni residue longitudinali e trasversali per la saldatura testa a testa:

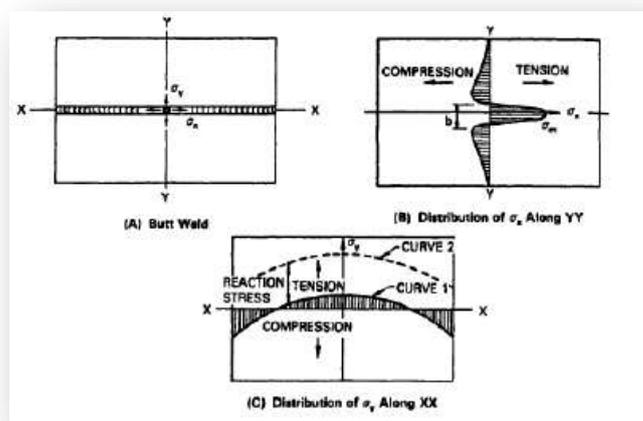


Figura 34 Distribuzioni tipiche delle tensioni residue longitudinali (b) e trasversali (c) nella saldatura testa a testa (a)

Effetti della distorsione

Gli effetti della distorsione sono:

- ✓ Dimensioni ridotte della struttura saldata;
- ✓ Disallineamento degli elementi strutturali;
- ✓ Gradienti di smaltimento termico;
- ✓ Rilassamento di tensioni residue preesistenti l'operazione di saldatura;
- ✓ Difficoltà a usare gli strumenti necessari a mantenere al proprio posto gli elementi della struttura.

Effetti delle tensioni residue

Gli effetti di carichi esterni non uniformi sulla distribuzione delle tensioni residue in una saldatura di testa possono essere schematizzati come in Figura 35:

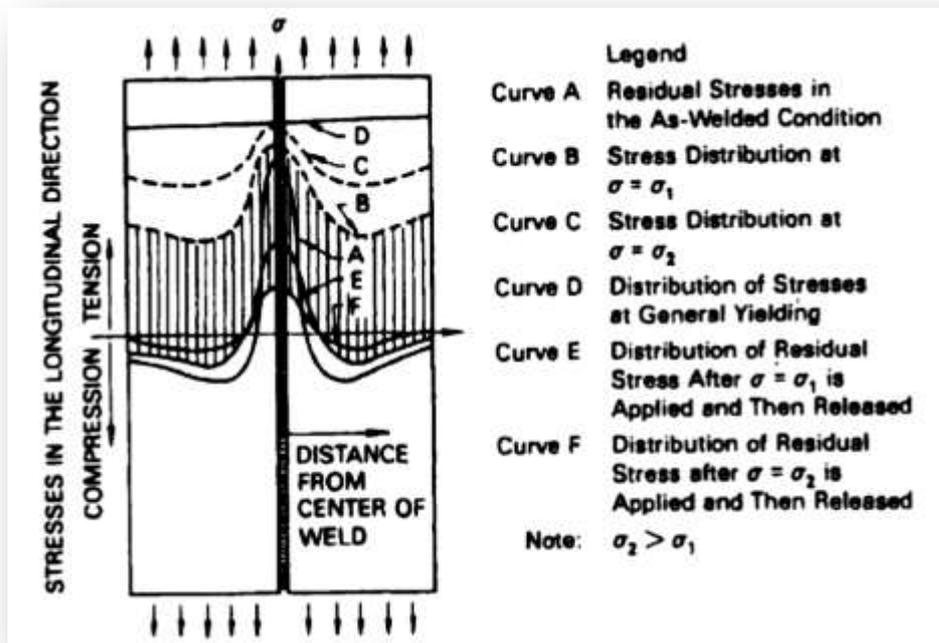


Figura 35 Effetti di carichi esterni non uniformi sulla distribuzione di temperatura

Le tensioni residue influenzano il processo di saldatura in diversi modi: riducono il carico di rottura dei materiali creando fratture e causano piegamenti che possono portare alla rottura completa della struttura. Inoltre possono aggravare la fragilità e la resistenza al taglio, causare increspature, incrementare la rugosità e aumentare la sensibilità alla corrosione.

-
- ^I " Workshop IGF: Problematiche Di Frattura Ed Integrità Strutturale Di Materiali E Componenti Ingegneristici, Forni Di Sopra (UD), 1-3 Marzo 2012 ", Francesco Iacoviello, Luca Susmel ,Gruppo Italiano Frattura, 2012.
- ^{II} "Saldatura E Taglio Dei Metalli", Emilio rinaldi, HOEPLI EDITORE
- ^{III} "Introduzione ai processi di saldatura",Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari,Società Editrice Esculapio.
- ^{IV} "Machine Design",Jindal U. C., Pearson Education India.
- ^V "Saldatura per fusione, Volume 2",Istituto italiano della saldatura, HOEPLI EDITORE.
"Saldatura E Taglio Dei Metalli", Emilio rinaldi, HOEPLI EDITORE
"Progettare costruzioni in acciaio", Giulio Ballio, Claudio Bernuzzi, HOEPLI EDITORE.
- ^{VI} "Saldatura E Taglio Dei Metalli", Emilio rinaldi, HOEPLI EDITORE
- ^{VII} "Progettare costruzioni in acciaio", Giulio Ballio, Claudio Bernuzzi, HOEPLI EDITORE.
- ^{VIII} "Introduzione ai processi di saldatura", Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari,Società Editrice Esculapio.
- ^{IX} "Steel in the chemical industry" , European Coal and Steel Community, Commission of the European Communities
- ^X "Advances and Trends in Structural Engineering, Mechanics and Computation", Alphose Zingoni,CRC Press.
- ^{XI} "Introduzione ai processi di saldatura",Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari,Società Editrice Esculapio.
- ^{XII} "Manuale dell'ingegnere meccanico", Pierangelo Andreini ,HOEPLI EDITORE.
- ^{XIII} "Fatigue of Welded Structures", T. R. Gurney, CUP Archive.
- ^{XIV} "Introduzione ai processi di saldatura",Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari,Società Editrice Esculapio.
- ^{XV} "Introduzione ai processi di saldatura",Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari,Società Editrice Esculapio.
- ^{XVI} "Saldatura E Taglio Dei Metalli", Emilio rinaldi, HOEPLI EDITORE
- ^{XVII} "Arcosaldatura", Luigi Mazzilli,HOEPLI EDITORE.
- ^{XVIII} "Saldatura per fusione, Volume 2",Istituto italiano della saldatura, HOEPLI EDITORE.

Capitolo 2

LA SALDATURA AD ARCO ELETTRICO^{XIX}

In questo capitolo si analizzeranno i processi di saldatura per fusione che implementano un arco elettrico come fonte di calore sono chiamati AW (Arc Welding).

Questo metodo, oltre ad essere uno dei più antichi e diffusi metodi di saldatura, corrisponde al procedimento di saldatura che si presta ad essere maggiormente automatizzato.

Le caratteristiche comuni sono relative a:

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

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

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

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

A seconda del tipo di gas di protezione utilizzato, che dipende dal tipo di metallo da saldare, dalla forma della giunzione e dalle specifiche caratteristiche desiderate, il procedimento si distingue in due tipi³:

- Procedimento MIG³ : quando si impiega, come gas di protezione, elio o argon (e loro miscele) i quali non hanno alcuna attività chimica nemmeno alle alte temperature dell'arco voltaico;
- Procedimento MAG⁴ : il gas di protezione ha un'attività chimica ossidante, seppure modesta, nel bagno di fusione. In tal caso i gas usati sono: anidride carbonica, miscele di aria e anidride carbonica, miscele di aria ed ossigeno ecc.

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

2.1 Caratterizzazione saldatura MAG, generalità^{xx}

La saldatura MAG è caratterizzata dal presentare elettrodo fusibile, sotto forma di fili raccolti in bobine, e l'impiego di un gas attivo quale gas a protezione del bagno di fusione; l'attività del gas garantisce un apporto termico maggiore, grazie al trasferimento dell'energia associativa e ri-associativa delle molecole del gas attivi (O_2 , CO_2) che, prelevando energia in una zona d'arco più lontana dal metallo base, la rilasciano più in sua prossimità; la MAG, rispetto alla MIG, permette di incrementare la produttività dei processi di saldatura, oltre che a modificare la reologia e la forma del bagno fuso. Per particolari applicazioni, ad esempio con gli Inox, vengono anche adoperati gas (al massimo ppm al 2%) come H_2 con effetti riducenti ed N_2 con effetti alliganti; sono del tutto da evitare però con altri tipi di materiali come leghe di Alluminio, acciai C-Mn e leghe reattive in generale.

L'attrezzatura è costituita dal generatore, dalla guaina portafilo (al cui interno si trova anche il circuito per il trasporto del gas), dalla torcia, dal sistema di svolgimento delle bobine, dal quadro comandi per l'impostazione dei parametri elettrici del generatore, e dalla regolazione della velocità del metallo d'apporto.

³ Metal-arc Inert Gas : utilizza un gas inerte a protezione del bagno.

⁴ Metal-arc Active Gas



Figura 36 Display Speedtec 505SC

Il processo presenta le caratteristiche di una fornitura continua del metallo d'apporto che concede così di non interrompere la passata di saldatura; inoltre, non presenta formazione di scoria e consente l'utilizzo di correnti elevate che permettono di mantenere elevate velocità di saldatura.

2.2 Modalità di trasferimento del metallo d'apporto^{XXI}

Le caratteristiche del processo G.M.A.W. sono ben descritte in termini di tre diversi meccanismi di trasferimento dell'elettrodo nel bagno di fusione:

1. "short-arc" o ad immersione o per cortocircuito (o short circuiting transfer);
2. "drop-arc" o di tipo globulare, cioè a grosse gocce (o Globular transfer);
3. "spray-arc" o di tipo polverizzato, cioè a piccole gocce.

Il tipo di trasferimento che si instaura è determinato da diversi fattori, i più importanti dei quali sono:

- ✓ valore e tipo di corrente di saldatura;
- ✓ diametro dell'elettrodo;
- ✓ composizione dell'elettrodo;
- ✓ stick-out o estensione dell'elettrodo o sporgenza libera;
- ✓ gas di protezione
- ✓ tensione d'arco
- ✓ velocità del filo
- ✓ caratteristiche statiche e dinamiche della saldatrice

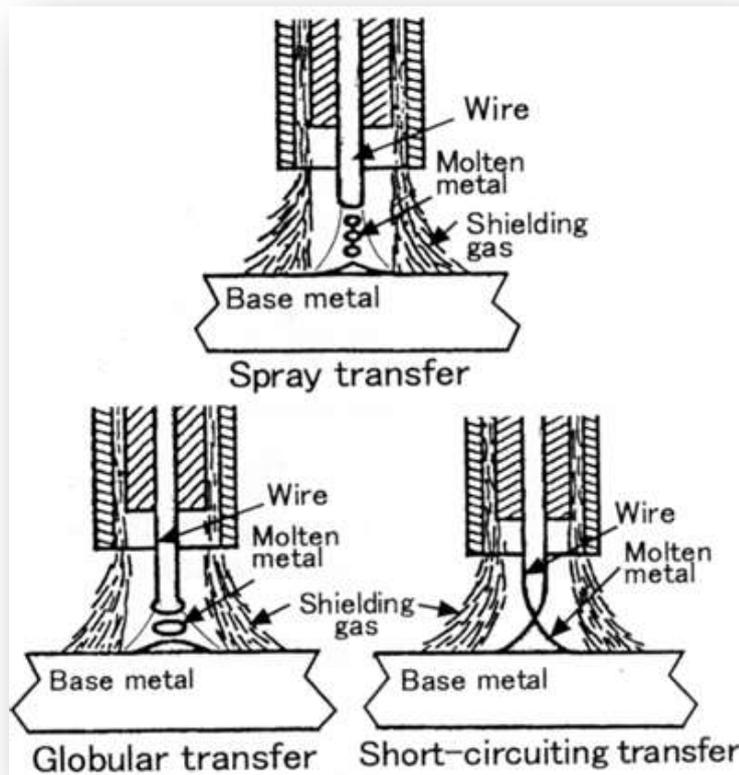


Figura 37 Differenti modalità di trasferimento del metallo d'apporto in G.M.A.W.

2.2.1 Short arc o cortocircuito^{XXII}

Quando l'alimentazione è tale da non far scattare l'arco ed il filo tocca il pezzo, nel filo passano delle forti correnti elettriche.

Il trasferimento di metallo avviene per effetto Joule, con il trasferimento di gocce grosse con bassa frequenza, ognuna delle quali genera un cortocircuito che estingue l'arco elettrico.

tensioni	i più bassi valori utilizzabili	< 20V (12÷20V)
correnti	con il Processo G.M.A.W.	< 220A (70A ÷ 180A)
diametri di elettrodo		compresi tra 0,6mm e 1,2mm

Tabella 5 Condizioni operative per lo short arc

Date tensioni così basse si ottiene un angolo molto corto, da qui il nome di "Short Arc".

Con questo tipo di trasferimento l'apporto termico è estremamente basso e quindi produce un piccolo bagno di fusione che si raffredda velocemente determinando un basso riscaldamento del giunto. E' quindi generalmente adatto per la saldatura di spessori sottili,

per saldature fuori posizione, per la saldatura i giunti caratterizzati da gap elevati (gap è la distanza tra i lembi da saldare) e per la saldatura di metalli a bassa temperatura di fusione.

Il modesto apporto termico di tale regime comporta, però, due rischi:

- ✓ l'incollatura, per mancata fusione del metallo base (specie nella saldatura di spessori elevati e nella saldatura di materiali buoni conduttori) ;
- ✓ la formazione di soffiature o porosità causata dalla velocità di solidificazione elevata.

Il metallo è trasferito dall'elettrodo al bagno di fusione solo quando l'elettrodo è in contatto con il bagno di fusione e quindi solo durante il periodo di corto circuito, mentre durante il periodo di accensione dell'arco non vi è alcun trasferimento di metallo. I contatti tra l'elettrodo ed il bagno di fusione avvengono con una frequenza di 20÷200 volte al secondo.

2.2.2 Trasferimento globulare^{XXIII}

Il trasferimento globulare si ottiene quando il metallo è trasferito tramite gocce di grosse dimensioni e con frequenza di trasferimento più bassa rispetto alla modalità spray. Questa modalità, indesiderata, si ottiene quando il livello di alimentazione dell'arco è insufficiente a sviluppare adeguate forze elettromagnetiche capaci di spingere le gocce verso il metallo base, che grazie al loro significativo peso riescono ad esser deposte nel bagno di fusione per spinta gravitazionale. In queste condizioni si producono elevati sputtering ed uno scarso controllo dell'arco che risulta dunque turbolento: il trasferimento è casuale perché risente delle forze elettromagnetiche.

Tale modalità avviene quando la corrente è relativamente bassa, indipendentemente dal tipo di gas di protezione.

Si richiede l'accortezza che l'arco debba essere abbastanza lungo da assicurare il distacco della goccia prima che essa entri in contatto con il bagno di fusione. Questo limita molto l'uso del tipo di trasferimento globulare nelle applicazioni industriali.

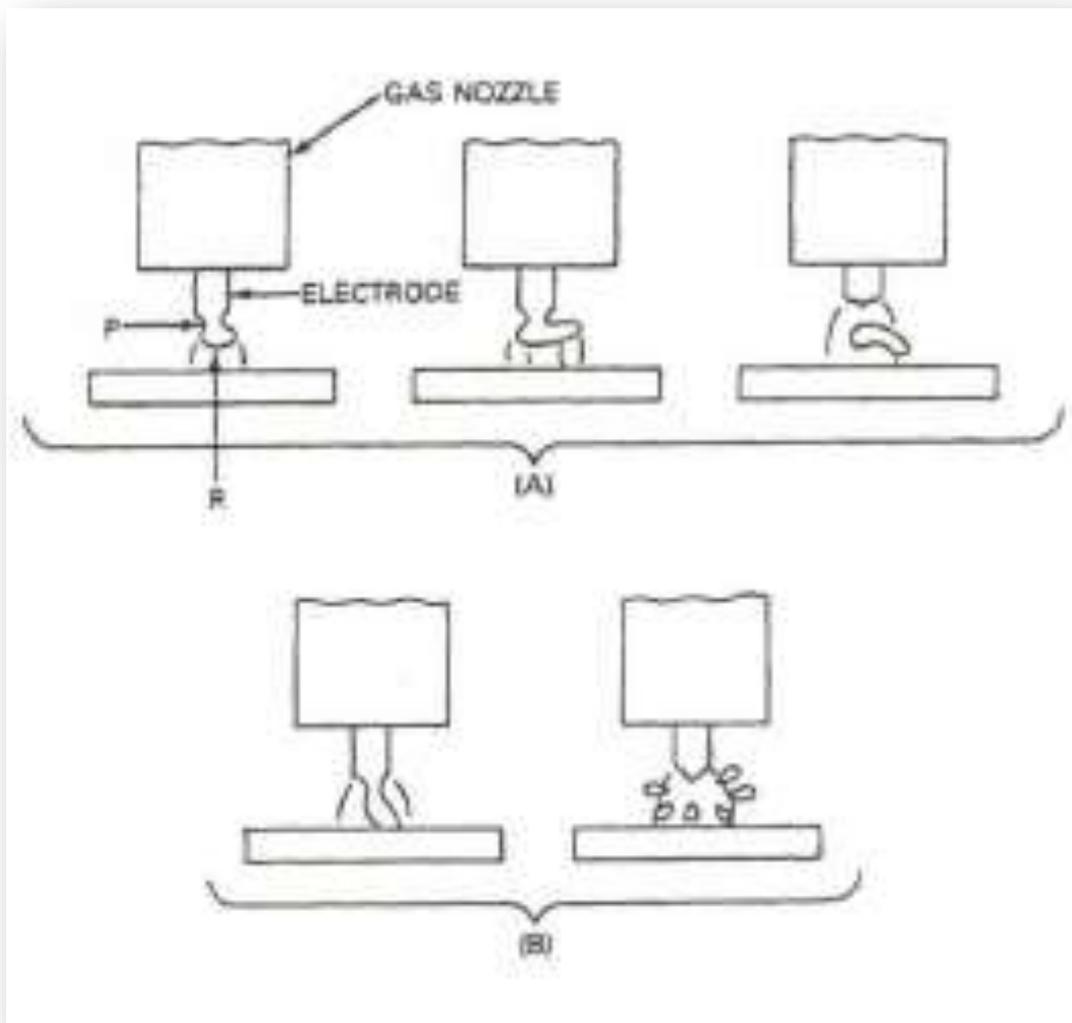


Figura 38 Trasferimento globulare non assiale

Come mostrato in Fig.38 è possibile che la goccia venga distaccata e trasferita nel bagno di fusione, senza esplodere o disintegrarsi. Ma la situazione più probabile è mostrata nella Fig 38B dove la goccia va in contatto con il metallo base, creando un cortocircuito, esplodendo e generando spruzzi molto grossi.

Contrariamente a quanto necessita il trasferimento globulare standard, si ovvia a tale inconveniente adottando una lunghezza d'arco molto piccola e generando l'arco elettrico in posizione più profonda rispetto alla superficie non fusa del metallo base. Questa tecnica, chiamata "Buried arc" o "Arco immerso", richiede alte correnti di saldatura e genera una elevata penetrazione..

2.2.3 Spray arc^{XXIV}

Si ottiene da correnti indotte tali da innescare e mantenere l'arco sempre attivo ed il valore minimo della corrente che permette di avere questo tipo di trasferimento si chiama TLV⁵, ovvero *corrente di transizione spray*. In questa modalità si ha una continua fusione del materiale d'apporto e formazione di centinaia di gocce di piccole dimensioni, che vengono di continuo trasferite al pezzo da saldare per effetto delle forze elettromagnetiche presenti. Queste gocce sono accelerate assialmente attraverso l'arco dell'arco a velocità superiori rispetto a quelle che si raggiungerebbero per il solo effetto della gravità (la forza di spinta dell'arco è superiore a quella gravitazionale).

Con un gas di protezione ricco di argon è possibile produrre un tipo di trasferimento spray-assiale privo di spruzzi e molto stabile, così come mostrato nella Fig.39.

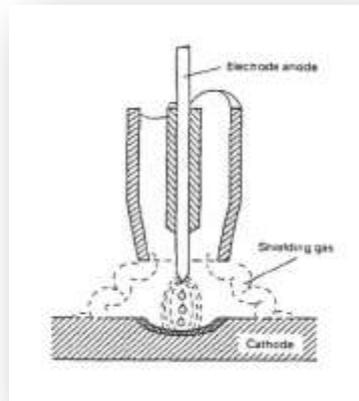


Figura 39 Trasferimento spray assiale

Questo tipo di trasferimento richiede l'utilizzo di:

- ✓ una corrente continua;
- ✓ un elettrodo collegato al polo positivo;
- ✓ un valore della tensione d'arco generalmente variabile tra i 25 e 42 volt
- ✓ un valore della corrente al di sopra di un valore critico detto "corrente di transizione".

Al di sotto di questo valore il trasferimento si presenta di tipo globulare (Drop-Arc).

Le caratteristiche vincenti di questa modalità sono un arco più stabile, una maggiore penetrazione ed un cordone di saldatura migliore da punto di vista estetico. I fili normalmente impiegati sono del diametro compreso tra 1÷2,4mm.

⁵ Threshold limit value

L'immediata conseguenza è che tale processo, con determinati accorgimenti, può essere usato in ogni posizione. C'è da notare che il diametro delle gocce è molto più piccolo della lunghezza dell'arco, per cui non avvengono cortocircuiti e gli spruzzi sono trascurabili, anche se non totalmente eliminabili.

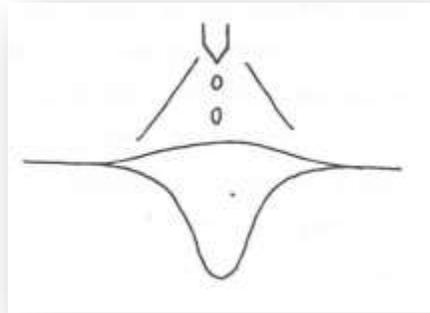


Figura 40 Profilo del cordone a gola o a dito

Sebbene tale gola possa essere profonda, essa è influenzata dai campi magnetici che devono essere controllati in maniera tale da essere mantenuti al centro del profilo di penetrazione della saldatura. Il tipo di trasferimento spray-arc può essere usato per saldare quasi tutti i metalli e le relative leghe, date le caratteristiche di gas inerte del gas argon comunemente utilizzato come gas di protezione. In ogni caso l'utilizzo del processo per la saldatura di lamiera sottili può essere difficoltosa a causa delle elevate correnti necessarie per produrre lo spray arc. Le forze dell'arco possono "sfondare" (tagliare) invece di "saldare" le lamiera sottili. Inoltre l'elevata deposizione di metallo può produrre un bagno di fusione di dimensioni eccessive per essere trattenuto dalla tensione superficiale del metallo fuso nella saldatura in posizione verticale o sopratesta. Le limitazioni dovute alle difficoltà di saldare piccoli spessori e di saldare in posizione verticale o sopratesta sono state ampiamente superate con un particolare tipo di impianto di saldatura. Questo tipo di impianto produce un accurato controllo della corrente di saldatura generando una corrente non più costante, ma "pulsata".

Trasferimento Globular arc	
Trasferimento Spray arc	
Trasferimento Short arc	

Tabella 6 Immagini di trasferimento differenziato operato con Lincoln Elecrtic Speedtec 505SP

2.3 Caso di studio : SALDATURE MECOME

2.3.1 Equipaggiamento^{xxv}

Il processo G.M.A.W. può essere usato sia in versione semiautomatica, sia in versione automatica. L'equipaggiamento base per una generica applicazione di un impianto G.M.A.W. è costituito da:

- . Una torcia di saldatura (raffreddata ad aria o ad acqua)
- . Un'unità di alimentazione del filo
- . Centralina di controllo dei parametri di saldatura
- . Un generatore di corrente
- . Un riduttore di pressione ed una bombola contenente il gas di protezione
- . Bobina di filo continuo costituente l'elettrodo
- . Cavi e tubi di collegamento
- . Sistema di circolazione dell'acqua (per le torce raffreddate ad acqua)

Si tratteranno nel seguito solo alcuni elementi costitutivi del sistema di saldatura G.M.A.W..
Per l'esecuzione dei test saranno impiegate le seguenti attrezzature:

Supporto	Saldatrice	Filo
 <p>Figura 41 Automatismo MECOME, banco di bloccaggio⁶</p>	 <p>Figura 42 Saldatrice LINCOLN ELECTRIC⁷</p>	 <p>Figura 43 Filo di saldatura LINCOLN ELECTRIC⁸</p>

Tabella 7 Attrezzature impiegate

2.3.1.1 Torcia di saldatura^{XXVI}

I componenti principali di una torcia di saldatura sono:

1. impugnatura;
2. isolante (in bianco) e inserto filettato per la guida del filo (in giallo);
3. ugello per il gas di protezione;
4. pattino di contatto fra alimentazione elettrica e filo (guidafilo);
5. bocchello di alimentazione del gas di protezione;

come illustrato in Figura 44

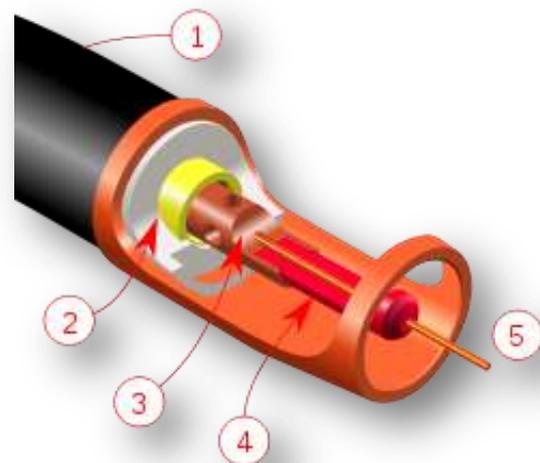


Figura 44 Spaccato di una torcia di saldatura G.M.A.W.

⁶ Mod. BR 1500- 1405145010

⁷ Mod. SPEEDTEC 505SP

⁸ SG2 diam.1,00 mm



Figura 45 Dettaglio torcia: guidafile



Figura 46 Dettaglio torcia: Guaina



Figura 47 Integrità della torcia

Il **guida-filo**: normalmente fatto di rame o di leghe di rame, trasferisce la corrente di saldatura all'elettrodo e direziona l'elettrodo, che deve esser ben centrato, nella zona di fusione. Esso è costituito da un semplice tubetto forato ed è collegato elettricamente alla saldatrice dal cavo di alimentazione elettrica. La superficie interna del foro del guida-filo deve essere ben levigata sia per far scorrere facilmente il filo sia per assicurare un buon contatto elettrico.

Il posizionamento del guida-filo rispetto all'estremità dell'ugello é una variabile dipendente dal tipo di trasferimento che si desidera instaurare. Per il regime short-arc, generalmente sporge dall'ugello gas per una lunghezza variabile da 0 a 2 mm, mentre per il regime spray-arc è approssimativamente represso di circa 3 mm (1/8 in) rispetto al bordo dell'ugello.

L'ugello per il gas di protezione : dirige un flusso laminare non turbolento del gas attivo a sezione circolare nella zona di saldatura tale da assicurare una protezione adeguata del metallo di saldatura fuso, e renderlo privo di contaminazione atmosferica.

Generalmente sia l'ugello che il guidafile sono perfettamente levigati onde evitare, o meglio ridurre, l'adesione degli spruzzi sulle relative superfici.

Sono disponibili, inoltre, ugelli raffreddati ad acqua attraverso la superficie di contatto degli stessi con la lancia di saldatura o attraverso un circuito di raffreddamento secondario, o ancora, degli ugelli gas di protezione addizionali che possono essere richiesti per proteggere maggiormente il bagno di fusione nelle saldature ad elevata velocità di spostamento o nella saldatura di metalli fortemente ossidabili.

La guaina ed inserto filettato per la guida del filo : è collegata al gruppo di alimentazione filo. La guaina supporta, protegge e guida l'elettrodo dalla bobina di filo alla torcia fino ad arrivare al guida-filo, evitandone la curvatura grazie anche al rinforzo con elica in acciaio.

Il tipo di materiale di cui è costituita la guaina influenza in misura notevole il funzionamento della stessa:

Fili per saldatura		Guaina
Acciaio, Rame	duro	metallica elicoidale in acciaio
Alluminio, Magnesio	morbido	teflon o teflon grafitato
Alluminio, Magnesio	al elevati valori di corrente	con terminali in rame

Tabella 8 Guida alla scelta della guaina guida-filo

Fascio cavi: I rimanenti elementi presenti nel fascio cavi della torcia servono per fornire il gas di protezione, l'acqua di raffreddamento e la corrente alla torcia. Questi elementi possono essere collegati o direttamente alle rispettive sorgenti o ad una centralina di controllo dei parametri di saldatura.

L'interruttore: serve per avviare ed arrestare la saldatura; con una 18 pressione si determina l'apertura, generalmente anticipata, dell' elettrovalvola del gas, la chiusura del interruttore montato nel generatore di corrente e la partenza del motorino per l'alimentazione del filo. L'interruttore deve essere rilasciato una volta che si è instaurato l'arco. Con una 28 pressione si arresta l'operazione di saldatura, e si determina una chiusura posticipata del gas di protezione.

2.3.1.2. Generatori di corrente^{xxvii}

I generatori di corrente sono le macchine che generano la differenza di potenziale necessaria all'accensione dell' arco. Ogni generatore, indipendentemente dal proprio principio di funzionamento, è contraddistinto da una particolare relazione che intercorre tra la d.d.p.

misurabile ai suoi morsetti e la corrente che emette in corrispondenza di quella particolare d.d.p. .

Tale relazione prende il nome di “caratteristica esterna del generatore” ed è proprio in funzione di tale relazione che il generatore viene scelto. L’importanza di tale relazione sta nel fatto che, conoscendo la caratteristica interna dell’ arco e la caratteristica esterna del generatore, il punto di funzionamento può essere determinato mediante sovrapposizione dei due diagrammi nello stesso piano.

Nei moderni generatori, la stabilizzazione dell’arco è assicurata, oltre che dalle caratteristiche delle macchine elettriche, anche dai sistemi di controllo elettronici che introducono ulteriori vantaggi, tra cui la possibilità di erogare la corrente in forme d’onda particolari.

Nei generatori di corrente alternata la stabilità dell’arco è ottenuta mediante mezzi induttivi che sfasano la corrente dell’arco rispetto alla tensione. In questo modo si dispone di una riserva migliore per riattivare l’arco ad ogni spegnimento, anche con tensioni basse. In corrente alternata è importante operare con archi quanto più corti possibile, in modo che la colonna di plasma tenda a deionizzarsi meno; inoltre è conveniente utilizzare frequenze di corrente elevate ed elettrodi realizzati con materiali aventi buona capacità termoionica.

I generatori elettrici devono presentare:

- tensione a vuoto elevata ma sempre nella sicurezza dell’operatore;
- corrente di corto circuito I_{cc} adeguata affinché il materiale d’apporto si fonda per effetto joule in caso di contatto con il pezzo;
- regolazione della corrente tale da adattare il processo, tramite apposito meccanismo, alle diverse condizioni di lavoro.

Intensità di corrente	243 A
Potenza	28,6 V

Tabella 9 Parametri standard impiegati

2.3.1.3 Elettrodo^{xxviii}

Il processo G.M.A.W. usa un elettrodo continuo che é consumato a velocità relativamente elevata e che viene prelevato da bobine su cui e' avvolto in modo uniforme, in quantità variabili da 0.5 a 25 kg, per permettere un'alimentazione libera, a velocità costante e senza “effetto d'elica”.

Le bobine possono essere posizionate in prossimità dell'alimentatore del filo o lontano da questo; in quest'ultimo caso, il filo verrà fornito mediante uno speciale equipaggiamento di distribuzione. Normalmente la bobina dovrebbe trovarsi quanto più vicino possibile alla torcia per minimizzare problemi di alimentazione, ma anche abbastanza lontano per dare flessibilità ed accessibilità alla saldatrice.

I fattori che influenzano la selezione del gas di protezione e dell'elettrodo di saldatura sono i seguenti:

1. tipo di metallo base
2. proprietà meccaniche richieste al giunto saldato
3. condizioni di pulizia del metallo base
4. tipo di servizio o specifiche applicazioni richieste
5. posizione di saldatura
6. modalità di trasferimento del metallo desiderato

Generalmente la composizione dell'elettrodo (metallo d'apporto) é simile a quella del metallo base.

L'aggiunta di appropriati disossidanti in una giusta quantità, é essenziale per la produzione di una saldatura solida. I disossidanti più comuni usati negli elettrodi di acciaio sono manganese, silicio, alluminio; per gli elettrodi in lega di nickel sono usati il titanio ed il silicio; per gli elettrodi in lega di rame sono usati il titanio, il silicio, il fosforo.

Gli elettrodi usati per il G.M.A.W. sono abbastanza più piccoli di diametro rispetto a quelli usati per la saldatura ad arco sommerso o per la saldatura in filo animato. Sono comuni diametri di elettrodo che vanno da 0,8 a 1,6 mm; in ogni caso possono essere usati diametri di elettrodo più piccoli (0.5 mm) o più grandi (3.2 mm), ma comunque di dimensioni ridotte tanto da non esser adatti alla lubrificazione (dimensioni confrontabili).

Dato che le dimensioni dell'elettrodo sono piccole e le correnti relativamente alte, le velocità di avanzamento del filo devono essere elevate.

Il campo di variazione va approssimativamente dai 40 ai 340 mm/sec, anche se possono essere necessarie velocità di 590 mm/sec, caso in cui gli elettrodi sono opportunamente temperati .

Nel caso di studio condotto in questo lavoro di tesi, sono stati adottati i parametri come da Tabella 10

velocità di alimentazione del filo, ottimizzata	5,51 m*min⁻¹ ovvero 92 mm*sec⁻¹
diametro filo di alimentazione SG2	1mm

Tabella 10 Parametri ottimizzati impiegati

Per migliorare le caratteristiche meccaniche del giunto e l'esteticità del cordone, vengono spesso usati i fili animati prodotti a partire da nastro o tubolari con una cavità interna nella quale vengono posti elementi di lega che migliorano le qualità del giunto ma ad un elevato costo unitario, che supera di gran lunga i fili pieni.

2.3.1.4. I gas di protezione^{XXIX}

Durante il processo di saldatura, come già detto, l'ossigeno e l'azoto contenuti nell'atmosfera non devono combinarsi con il bagno di fusione che dunque viene protetto dal gas per evitare difettosità come inclusioni di scorie, porosità ed infragilimento del cordone di saldatura.

Nel caso di processo a filo continuo la gamma di scelta è molto ampia, in quanto oltre ad i gas inerti tipo Ar (argon) ed He (elio) usati nei processi con elettrodo al tungsteno, si possono usare anche gas riducenti quali l'azoto e le miscele di argon-idrogeno.

Se non si usasse alcuna protezione, vista la comune tendenza dei metalli, una volta raggiunta la temperatura di fusione, a formare ossidi ed in minore quantità nitruri, si otterrebbero cordoni di saldatura con caratteristiche non accettabili. Inoltre la presenza dell'O₂ nei pressi della zona fusa potrebbe portare all'ossidazione del carbonio presente nell'acciaio con la formazione di CO (monossido di carbonio) e CO₂ (anidride carbonica).

Il gas più frequentemente impiegato è l'Argon che si estrae dall'aria liquida per distillazione forzata. L'aria contiene circa 1 % di Ar che si presenta incolore ed inodore. Il suo costo è comunque elevato e questo è uno dei motivi per i quali il suo impiego è limitato alla saldatura delle leghe leggere e degli acciai inossidabili. Negli Stati Uniti è disponibile a costi ragionevoli anche l'elio, altro gas inerte, estraibile dal metano che ne contiene circa il 2%. Oltre questi esistono altri gas inerti quali il neon, lo xeno, il cripto che però hanno costi proibitivi e quindi i vantaggi che ne deriverebbero dal loro uso sarebbero commercialmente improponibili.

E' da ricordare che l'azione protettiva del gas agisce ovviamente solo al diritto del giunto per cui al rovescio la prima passata risulta ossidata e richiede la scricatura con ripresa, o dove non è possibile si dovrà far circolare il gas anche all'interno.

La composizione del gas, influenza anche alcune delle caratteristiche del processo di saldatura:

- modalità e velocità di fusione del filo
- corrente di transizione
- forma del cordone di saldatura
- gli spruzzi
- la fluidità del bagno
- la tendenza alle incisioni marginali
- la tensione dell' arco
- la dimensione delle gocce di metallo fuso

Nei processi di tipo G.M.A.W. (Gas Metal Arc Welding, saldatura con protezione di gas) si può operare una prima classificazione a secondo della miscela usata che vede i gas divisi in:

- ✓ gas inerti, in questo caso si parla di saldatura di tipo MIG – inert gas;
- ✓ gas ossidanti cioè miscele di ossigeno ed anidride carbonica;
- ✓ gas riducenti cioè miscele nelle quali è presente pure l'idrogeno.

Negli ultimi due casi si parla di saldatura di tipo MAG -active Gas.

Ovviamente a seconda del metallo da saldare e del suo spessore (quindi di tutte le caratteristiche chimico-fisiche) esistono opportune miscele con adeguate concentrazioni di vari gas che, si è visto sperimentalmente, garantiscono la buona riuscita del giunto. La maggior parte di queste sono miscele di gas inerti che contengono piccole quantità di O₂ o CO₂. Unica eccezione è, come già anticipato, l'uso dell' azoto nella saldatura del rame.

Gas inerti puri	Argon ed Elio
Miscela di gas inerti	Argon-Elio
	Anidride Carbonica (CO ₂)
Miscela di tipo binario	Argon -Ossigeno
	Argon -Anidride Carbonica
	Argon -Idrogeno
	Argon -Azoto
Miscela di tipo ternario	Argon -Anidride Carbonica -Ossigeno
	Argon -Elio -Anidride Carbonica
	Argon -Idrogeno -Anidride Carbonica

Tabella 11 Miscela più comuni per G.M.A.W.

La scelta della miscela di protezione dipende fundamentalmente dai seguenti fattori:

Procedimento di saldatura (TIG, MIG, MAG, Plasma)

- Caratteristiche chimico-fisiche del materiale da saldare
- Spessore del materiale
- Materiale d'apporto (se necessario)
- Proprietà meccaniche richieste
- Penetrazione
- Velocità di saldatura
- Caratteristiche estetiche
- Costi

Per operare una scelta ponderata delle composizioni attive, bisogna tener conto delle proprietà chimico-fisiche degli elementi:

Il *potenziale di ionizzazione* è l'energia, espressa in elettronvolt, necessaria ad allontanare un elettrone dall' atomo del gas trasformandolo in un catione, o un atomo gassoso caricato elettricamente. Mantenendo tutti gli altri fattori costanti, il valore del potenziale di ionizzazione diminuisce con l'aumentare del peso molecolare del gas. L'innesco dell'arco e la sua stabilità sono fortemente influenzati dal potenziale di ionizzazione dei componenti del gas di protezione usato durante il processo di saldatura.

Un gas con un <u>basso potenziale di ionizzazione</u> , come ad esempio l' Argon, può facilmente trasformare gli atomi in cationi.	L'elio, con il suo relativamente <u>alto potenziale di ionizzazione</u> , produce un difficile innesco e un arco meno stabile.
--	--

La *conducibilità termica* di un gas misura quanto facilmente l'arco sia capace di condurre calore ed influenza la perdita di calore radiale (dal centro alla periferia della colonna dell' arco) così come il trasferimento di calore tra il plasma e il metallo fuso.

L' Argon, il quale ha una bassa conducibilità termica produce un arco nel quale si possono evidenziare due zone: una zona centrale molto calda ed una zona periferica con una temperatura considerevolmente più bassa. Il cordone che si ottiene è caratterizzato da un ampio bagno di fusione ed una elevata penetrazione a dito.

Un gas con una più alta conducibilità termica manifesta una piccola differenza di temperatura tra il fuso (zona interna dell' arco) e l'aureola (zona esterna dell' arco). Questo tipo di distribuzione termica si ottiene usando elio, miscele di argon ed idrogeno e con argon ed anidride carbonica garantendo quindi una migliore distribuzione di calore sulla superficie del cordone e quindi una sezione più regolare.

La dissociazione e riassociazione nei gas come CO₂, H₂, O₂ che si trovano in natura sotto forma molecolare si manifesta quando essi, portati ad elevate temperature all'interno dell'arco, questi gas molecolari si dissociano ionizzandosi nei loro componenti atomici e producendo elettroni liberi e molecole ionizzate, quindi corrente. Non appena i gas dissociati entrano in contatto col bagno di fusione, che ha una temperatura più bassa di quella dell' arco, gli atomi dissociati si ricombinano rilasciando calore che riscalda il bagno. Tale particolarità fa sì che il calore ceduto al bagno di fusione sia più uniformemente distribuito sulla superficie di interfaccia rendendo le caratteristiche del cordone simili a quelle ottenute utilizzando elio. La dissociazione e la ricombinazione ovviamente non sono possibili per gas monoatomici come i gas nobili.

A parità di temperatura dell'arco, il calore trasmesso alla superficie del bagno risulta considerevolmente più elevato usando dei gas come CO₂ ed H₂ rispetto ai gas inerti.

La reattività e potenziale di ossidazione influenzano sia le caratteristiche della saldatura che le proprietà delle scorie depositate;

I gas ossidanti come CO₂ ed O₂ reagirebbero formando un deposito (ossido) sulla superficie del cordone di saldatura ma la conseguente perdita di elementi, come Mn e Si, può alterare la qualità dell' acciaio.

L'Ar e l'He sono completamente non reattivi ovvero non hanno alcun effetto chimico diretto sul metallo fuso.

Sia la durezza che la resistenza del cordone diminuiscono all'aumentare della natura ossidante del gas di protezione.

All'aumentare della stabilità dell' arco vi si correla il tipo di trasferimento ottenibile. All'aumentare della percentuale di O₂ nella miscela si ha una riduzione della tensione superficiale del bagno fuso che determina un incremento della bagnabilità permettendo quindi una velocità di saldatura superiore. Si nota inoltre una progressiva diminuzione delle dimensioni delle gocce di metallo fuso e un aumento del numero di gocce trasferite per unità di tempo. Un'aggiunta di CO₂ produce sostanzialmente gli stessi effetti.

La tensione superficiale che si instaura tra metallo fuso e la sovrastante atmosfera influenza notevolmente la geometria del cordone.

Se la tensione superficiale è alta il cordone risulterà irregolare e convesso -cordone non molto ampio ma alto-
È il caso dell'Ar

Al contrario bassi valori producono dei letti piatti con una bassissima suscettibilità alle incisioni marginali: la tensione superficiale può essere diminuita aggiungendo una piccola quantità di gas ossidante, es. O₂, aumentando così la fluidità e la bagnabilità del materiale base.

La densità, ovvero il peso del gas per unità di volume incide fortemente sulla portata.

Argon	Ar	1,784 Kg/m³
Anidride carbonica	CO₂	1,98 Kg/m³
Ossigeno	O	1,429 Kg/m³
Aria		1,225 Kg/m³

Per gas come Ar e CO₂ che sono più pesanti dell'aria si necessita di una portata minima per saldature in piano e elevata per saldature di diverso tipo

Al contrario volendo garantire lo stesso tipo di protezione, quando si usa He, più leggero dell'aria, il discorso si inverte.

Tabella 12 Proprietà chimico fisiche degli elementi che compongono le miscele attive

Per questo lavoro di tesi sono state condotte campionature di saldatura variando le miscele poste a protezione. Si tratteranno di seguito solo gli elementi utilizzati nel caso di caso studio.

ARGON

L'Argon fu scoperto verso la fine del 1800 da William Ramsay (1852- 1916), professore di chimica all' "University College" di Londra.

Contenuto nell'aria nella misura dello 0.94 % in volume viene prodotto per distillazione dell'aria liquida ottenendo al massimo un grado di purezza del 99,998 % con costi di produzione non eccessivi. Per le sue caratteristiche di gas totalmente inerte viene usato nella saldatura di metalli non ferrosi, acciai inossidabili, al carbonio e basso legati, rame e leghe di magnesio. Con il suo uso si può garantire l'assenza nel cordone di microporosità dovuta alla non miscibilità del gas con il bagno di fusione, limitando la presenza di soffiature o tarlature all'interno del cordone di saldatura.

vantaggi	svantaggi
<p>Il basso potenziale di ionizzazione fa sì che si <u>liberino facilmente elettroni rendendo più semplice l'innesco, producendo un arco meno rumoroso e più stabile e diminuendo gli spruzzi durante il processo di saldatura.</u> Inoltre per la sua elevata densità, essendo circa 1.33 volte più denso dell'aria (peso atomico 39.95) prende facilmente il posto dell'aria intorno al cordone, in posizione piana, ed è meno suscettibile a perturbazioni dovute a spostamenti d'aria.</p>	<p>Per la saldatura degli acciai ordinari e dei metalli ferrosi è in genere sconsigliato l'uso di argon puro in quanto presenta <u>inconvenienti di tipo economico e tecnico.</u> Essendo il costo di tale gas relativamente elevato, l'incidenza economica è tale da compromettere la competitività del processo sull'acciaio, materiale per il quale esistono altri procedimenti che presentano costi di gestione molto più bassi.</p>

Per quanto riguarda la distribuzione del calore all'interno del flusso di protezione la presenza dell'argon puro, gas monoatomico che quindi ad elevate temperature non può dissociarsi, evita la migrazione trasversale del calore concentrandolo nella zona centrale del bagno.

Tabella 13 Vantaggi e svantaggi dell'utilizzo di Argon

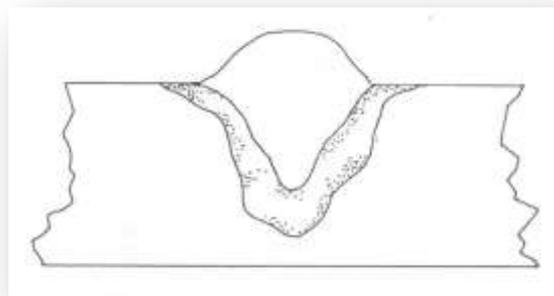


Figura 48 profilo di un cordone ottenuto mediante protezione di solo Argon

L'uso di solo argon permette la formazione di un cordone di saldatura definito tecnicamente "a fungo". Tale cordone è caratterizzato da un'ampia penetrazione centrale e largo alla sommità, talvolta si riscontra la presenza di spruzzi ed incisioni marginali.

ANIDRIDE CARBONICA

E' un gas molto reattivo che viene usato in svariate applicazioni di tipo G.M.A.W.

Con l'utilizzo di CO₂ si migliorano notevolmente i problemi economici derivanti dall'uso di gas inerti che aumentano il costo fino a 10 volte. I primi esperimenti nei quali si usò CO₂ risalgono al 1953. Questo gas tende ad instaurare un trasferimento spray non assiale con notevoli spruzzi. A temperatura ambiente manifesta un comportamento classico di gas inerte in quanto si dimostra stabile e non reattiva nei confronti degli altri elementi. Ad elevate temperature, come quelle che si raggiungono nell'arco, si è notato che è molto reattiva dissociandosi in maniera endotermica, secondo la seguente reazione:



Equazione 2

alla quale si può notare lo sprigionarsi di ossigeno molecolare. E' ovvio che in questo caso il saldatore dovrà fare attenzione ad allontanare O₂ dal bagno di fusione per evitare che le caratteristiche del giunto possano essere deludenti, e questo può essere fatto usando fili disossidanti, come ad esempio un filo del tipo: C=0.08%; Mn=1.5%; Si=1%; P<0.03%; S<0.03%. Per gli acciai inossidabili l'atmosfera di CO₂ interverrebbe con effetto carburante e quindi si altererebbe la resistenza alla corrosione del giunto.

vantaggi

non sono solo economici, con tale gas si ottengono velocità di saldatura elevate e migliori penetrazioni

svantaggi

usando solo CO₂ il profilo del cordone tende ad essere molto penetrante (in quanto a contatto con il bagno di fusione viene rilasciata l'energia precedentemente assorbita) e poco largo, aumentando però il rischio di formazione di cricche a caldo.

Per effetto della ricombinazione esotermica delle molecole di CO che riscaldando il giunto da luogo ad una penetrazione più ampia e profonda come si può notare dalla Figura 49.

E' inoltre elevato il rapporto di diluizione per cui occorre operare con materiali base di elevata purezza.

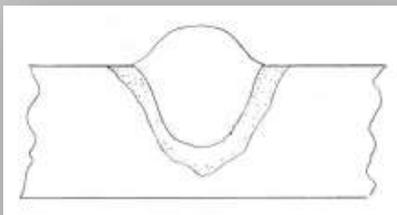


Figura 49 Schema esplicativo del profilo di un cordone realizzato con aggiunta di CO₂ alla miscela di protezione

A causa della bassa conducibilità elettrica il tipo di arco che si stabilisce è molto instabile e violento, e la tensione di innesco risulta elevata

Tabella 14 Vantaggi e svantaggi dall'introduzione di CO₂

In definitiva tale gas nonostante generi un cordone grezzo permette velocità di saldatura molto alte con costi contenuti.

Il tipo di trasferimento che si può instaurare con questa protezione è principalmente di tipo *short-arc* e *drop-arc* a causa dell'elevato valore della corrente di transizione che innesca il regime spray. Se comunque si instaura tale trasferimento il flusso di gocce fuse non è diretto assialmente, ma esse vengono deviate in tutte le direzioni a causa della presenza di campi magnetici e reazioni elettrochimiche di cui tutt'oggi non si conosce la causa ed è accompagnato da formazione di spruzzi lungo il cordone. Il regime spray è accompagnato da variazioni di corrente, osservabili con l'oscilloscopio, perché ogni goccia interposta tra filo e bagno turba la lunghezza libera dell'arco. Con l'inserimento di opportune reattanze nel circuito di saldatura si può eliminare questo problema. Per tutti questi motivi le saldature effettuabili sono principalmente quelle in piano o d'angolo piano-frontale su spessori medi e grossi (data la sua tendenza alla penetrazione) ed è in genere usata per gli acciai da carpenteria comuni (per motivi concorrenziali di economicità).

- L'aggiunta di CO₂ in percentuali del 3-25% a miscele di argon rende l'arco stabile, riduce le incisioni marginali e conferisce alla penetrazione un profilo a pera. In genere l'anidride carbonica viene utilizzata con trasferimento in short arc, ma può essere anche adoperata per trasferimenti spray e per l'arco pulsato.
- Una percentuale di CO₂ superiore al 25% aumenta il valore della corrente di transizione rendendo più difficile e irregolare il funzionamento spray. Certamente la ragione che attira di più gli sperimentatori su questo tipo di miscela è l'economicità di questo gas che permette un notevole abbattimento dei costi.

OSSIGENO

Temperatura di fusione	-218°C
Temperatura di ebollizione	-183°C
Temperatura critica	-118°C
Pressione critica	49.7 At
Densità	1.43 g/l

Tabella 15 Proprietà fisiche dell'O₂ a temperatura ordinaria

L'O₂ è contenuto in grande quantità nell'aria (21 % in volume) da cui viene ricavato per distillazione frazionata e nell'acqua (89 % in peso) da cui viene estratto per elettrolisi industriale.

L'ossigeno si combina con la maggior parte degli elementi conosciuti tranne che con i gas inerti ed è per questo che viene utilizzato nelle miscele di protezione costituite essenzialmente da He ed Ar.

Elemento	Effetto	Risultato sul processo
Un'aggiunta di O₂ compresa tra l' 1% - 5% ad una miscela di argon		migliora la stabilità dell' arco, migliora la fluidità del bagno di fusione e riduce notevolmente gli spruzzi
	Avendo un alto potenziale di ionizzazione e una bassa conducibilità termica ripartisce meglio il calore nell' arco	rendendo la penetrazione più regolare e attenuando la classica forma a fungo caratteristica dell'argon.
	diminuisce anche la corrente di transizione	diminuisce inoltre la tendenza alle incisioni i marginali facilitando l'innesco del regime spray che risulta molto più regolare di quello ottenibile con argon puro
		dimensione media delle gocce trasferite diminuisce aumentandone però il numero nell' unità di tempo
	la sua presenza rende più economica la miscela per due motivi:	
	<ul style="list-style-type: none"> • minore la quantità di argon utilizzata • ricavandosi quest'ultimo dall'aria, ammettendo una certa impurezza di ossigeno nell' Argon ne diminuisce anche il costo di produzione 	

Tabella 16 Studio di conseguenze all'aggiunta di elementi sia nel gas attivo

Elemento	Effetto	Risultato sul processo
Utilizzando fili d' apporto con elementi disossidanti come silicio, alluminio, manganese e titanio	Essi ossidandosi formano una patina sul bagno evitando che l'ossigeno lo attacchi alterando il metallo base e quello di apporto	Perché l'O ₂ fa perdere al bagno Si e Mn ossidandoli
La presenza degli ossidi di titanio e di alluminio	Facilita inoltre il formarsi di germi di cristallizzazione	l'ottenimento di una grana più fine nel cordone con evidente miglioramento delle proprietà meccaniche del giunto

Tabella 17 Studio di conseguenze all'aggiunta di elementi liganti in bagno

In genere si utilizzano miscele contenenti circa il 2% di ossigeno ma questa non è una regola in quanto la quantità ottimale per ottenere i suddetti risultati dipende da fattori esterni e non prevedibili come lo stato superficiale del metallo da saldare, eventuale presenza di ossidi, composizione chimica del metallo da saldare, forma del giunto e posizione di saldatura e caratteristiche dell'arco (tensione e corrente).

Miscela Argon -Anidride Carbonica

L'aggiunta di anidride carbonica all' Argon produce gli stessi effetti che si hanno con l'aggiunta di ossigeno ma inoltre migliora la penetrazione all'aumentare della sua percentuale attenuando la caratteristica sezione a dito del cordone.

caratteristiche	
cordone di saldatura di aspetto eccellente, liscio, pulito, lavoro di rifinitura minimo per la bassa quantità di scorie, forte resistenza alla corrosione dato il basso contenuto di carbonio e riduzione delle incisioni marginali	E' bene tenere presente che il flusso di CO ₂ deve essere di qualità adatta alla saldatura cioè di tipo super secco, in caso contrario si potranno trovare soffiature all'interno del cordone di saldatura. Tali soffiature possono anche essere dovute alla insufficienza della portata di gas dovuta ad esposizione a correnti d'aria e nel caso manuale, al fatto che la torcia è stata inavvertitamente allontanata troppo dal cordone.
notevole abbattimento dei costi rispetto all' Argon puro (circa il 50 %) in quanto in questo caso non si necessita un elevato grado di purezza in genere richiesto nella saldatura di tipo MIG	
nella saldatura di leghe leggere protette da anidride carbonica la portata capace di assicurare una valida protezione del bagno di fusione passa da 15-18 l/min, nel caso di argon puro, a circa 10-15 l/min, nel caso di aggiunta di CO ₂	
Le apparecchiature possono essere utilizzate egualmente per i metalli non ferrosi e per le leghe leggere, rendendo l'impianto flessibile, semplicemente sostituendo CO ₂ con Ar.	

Tabella 18 Studio degli effetti sortiti dall'utilizzo di miscela Argon-CO₂

Se la quantità di CO₂ supera il 18% - 20 % si rende difficile il mantenimento del regime spray. Con percentuali comprese tra il 20% e il 50 % si può instaurare solo un trasferimento di tipo globulare. Le più comuni miscele utilizzate per instaurare un trasferimento di tipo spray sono con 5, 8, 10, o dal 13 al 18 % di CO₂ in argon. All'aumentare del contenuto di anidride carbonica il bagno risulta più fluido e quindi permette una maggiore velocità di saldatura.

Questo tipo di miscele sono utilizzate nella saldatura di acciai al carbonio e bassolegati e raramente di acciai inossidabili. Queste miscele vengono utilizzate nei seguenti settori: industria meccanica, industria lattiero-casearia, conserviera e della congelazione, industria della carta, industria chimica e petrolchimica (pompe, tubazioni e serbatoi) e costruzione di cisterne.

MISCELE DI TIPO TERNARIO

Miscela Argon-Anidride Carbonica -Ossigeno

Le miscele ternarie sono più versatili di quelle binarie coniugando le caratteristiche positive di tre gas elementari, potendo operare con modalità di trasferimento short-arc, globular-arc e spray-arc.

Questo tipo di atmosfera è particolarmente usata per acciai inossidabili, acciai al carbonio e bassolegati, alluminio, magnesio e loro leghe con spessori non troppo elevati, tale atmosfera sarebbe utilizzabile anche per la saldatura degli acciai comuni da carpenteria solo che si preferisce rivolgersi verso miscele più economiche.

vantaggi	svantaggi
minor presenza di spallature	L'aggiunta di ossigeno molecolare non può superare per alcun motivo la soglia del 5 %, se ciò si verifica si potrebbe avere il problema del decadimento della tenacità o della qualità del giunto; questo difetto insorge quando si ha immissione di ossigeno nel gas di protezione o nel fuso non controllata e desiderata.
maggior resistenza meccanica del giunto	
ottime caratteristiche estetiche	
riduzione degli spruzzi	
attenuazione della caratteristica forma a fungo del cordone	
diminuzione delle incisioni marginali	
abbassamento della corrente di transizione con più facile innesco della modalità di trasferimento spray	

Tabella 19 Vantaggi e svantaggi derivanti dall'uso di miscele ternarie in MAG

Per realizzare una eccellente stabilità dell'arco di tipo spray e garantire un buon bagno di fusione anche per saldature fuori posizione con trasferimento di tipo short-arc e arco pulsato un' opportuna miscela ternaria di argon è stata recentemente sviluppata ed introdotta sul mercato statunitense con composizione del tipo Ar 80% -CO₂ 15% -O₂ 5%.⁹

2.4 Parametri di saldatura^{xxx}

I parametri presi in considerazione in questo lavoro di tesi, ritenuti influenzanti le principali caratteristiche della saldatura, come la profondità di penetrazione, la geometria del cordone e la qualità del giunto, sono i seguenti:

- ✓ Velocità di spostamento della torcia di saldatura;
- ✓ stick-out;
- ✓ posizioni del giunto di saldatura e preparazione dei lembi.

La conoscenza della loro influenza ed il relativo controllo sono essenziali al fine di ottenere saldature di buona qualità.

Generalmente possiamo dire che la forma del cordone è funzione della corrente di saldatura, della velocità di spostamento della torcia, della tensione d'arco del gas di protezione e della posizione della torcia.

Le proprietà meccaniche e metallurgiche del metallo di saldatura e della zona termicamente alterata dipendono principalmente dal tipo di metallo base, dalla composizione del metallo d'apporto e dalla velocità di raffreddamento, che è strettamente legata alla forma del giunto ed alla dimensione del cordone; anche l'effetto del tipo di gas di protezione è influente e rimane fondamentale la sua presenza. Per riuscire a selezionare, per ogni tipo di applicazione, la combinazione ottimale di questi parametri è necessaria dunque un'ottima conoscenza ed una elevata esperienza.

Questi valori ottimali sono influenzati:

- 1) dal tipo di metallo base,
- 2) dalla composizione chimica dell'elettrodo,
- 3) dalla posizione di saldatura,
- 4) dalla qualità del giunto richiesta.

E' per tale motivo che non esiste un unico set di valori che riesca a soddisfare in tutti i casi le esigenze richieste.

⁹ RIVOIRA; STARGON, SCH1 gas utilizzato durante questo lavoro di tesi.

2.4.1 Velocità di spostamento della torcia di saldatura^{XXXI}

La velocità di spostamento è la velocità alla quale la torcia viene spostata lungo il giunto di saldatura. Con tutte le altre variabili mantenute costanti, la penetrazione di saldatura diventa massima ad un valore ben determinato di questa velocità.

Quando la velocità di spostamento viene diminuita, la quantità di metallo d'apporto depositata per unità di lunghezza aumenta. Ad una velocità molto bassa l'arco di saldatura incide sul bagno di fusione, piuttosto che sul metallo base, riducendo in tal modo la penetrazione ottenuta e producendo un cordone di saldatura più largo.

All' aumentare della velocità di spostamento della torcia, l'energia termica trasmessa dall'arco al metallo base per unità di lunghezza di saldatura in un primo momento aumenta, dato che l'arco elettrico incide più direttamente sul metallo base; con un ulteriore aumento della velocità di spostamento, inizia a diminuire.

Perciò la fusione del metallo base, e quindi la penetrazione (direttamente legata all' energia termica specifica apportata al giunto) prima aumenta e poi diminuisce con l'aumentare della velocità di avanzamento della passata.

Se questa velocità viene ulteriormente aumentata, nasce una tendenza a formare incisioni marginali lungo i bordi del cordone di saldatura, data l'insufficiente deposizione di metallo d'apporto.

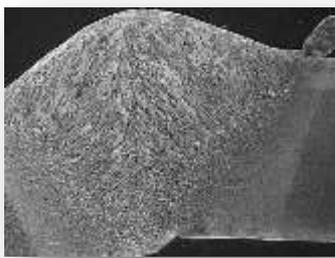


Figura 50 Saldatura velocità molto alta, si noti lo schizzo e la pessima forma del cordone

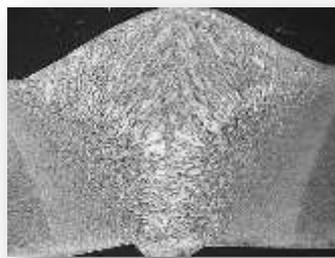


Figura 51 Saldatura alta velocità, si noti la buona forma del cordone ma anche l'eccessiva curvatura del cordone



Figura 52 Saldatura giusta velocità, si noti il buon cordone

Tabella 20 Esempi di saldature condotte a varie velocità, a parità di altri parametri operativi, per C18

2.4.2 Sporgenza libera o stick-out^{xxxii}

La sporgenza libera, o estensione non fusa dell'elettrodo, o stick-out, è la distanza compresa tra l'estremità del guida-filo e l'estremità dell'elettrodo.

La distanza tra l'estremità della punta di contatto con il metallo base è detta invece contact-tip-to-work, CTWD. La lunghezza dell'arco è dunque indirettamente nota dalla conoscenza di questi parametri.

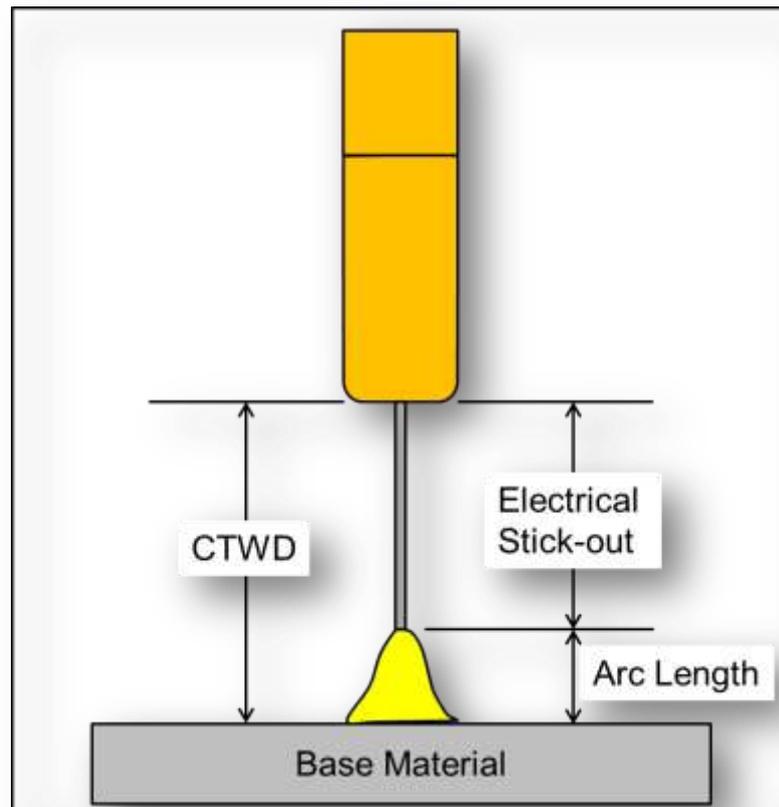


Figura 53 Terminologia per G.M.A.W.

Quando il filo è all'interno del guida-filo, la densità di corrente che lo attraversa è bassa, essendo anche il guida-filo conduttore, ma quando il filo esce, la densità di corrente aumenta notevolmente causando un riscaldamento per effetto Joule e portando il filo a fusione in corrispondenza dell'arco stesso.

Uno stick-out più lungo, a parità di tutte le altre condizioni, determina un aumento della propria resistenza elettrica, e di conseguenza un aumento della temperatura dell'estremità del filo. Quindi, per fondere l'estremità del filo sarebbe sufficiente una corrente più bassa: ad uno stick-out più lungo fa corrispondere un valore di corrente più basso ed un valore di tensione praticamente costante. Possiamo quindi dire che in corrispondenza di uno stick-out

più lungo, la tensione e la lunghezza d'arco rimangono praticamente invariate, mentre la corrente di saldatura diminuisce. In tal modo, a meno che non si aumenti la tensione di saldatura sul generatore, il metallo d'apporto sarà depositato sotto forma di cordone di saldatura più stretto, con cresta del cordone più alta (più a "schiena di asino") e con una minore penetrazione.

Aumentando lo stick-out, per mantenere costante la corrente, dovrà essere aumentata la velocità di alimentazione del filo; sono quindi raccomandabili grossi stick-out nelle saldature ove vi siano da effettuare grossi depositi.

Lo stick-out ha influenza anche sulla forma del cordone e sulla fluidità del bagno di fusione: una sua diminuzione determina un allargamento del cordone ed un aumento della fluidità del bagno, migliorando il raccordo del sovra-spessore.

L'aumento dello stick-out allontana la torcia dalla zona di lavoro, riducendo il rischio di eventuali spruzzi causino l'otturazione degli ugelli del gas e l'ostruzione del guida-filo. In ogni caso, tale sporgenza, non deve essere troppo grande altrimenti si possono verificare serpeggiamenti del filo, una non completa penetrazione del bagno, ed inoltre, data la lontananza della torcia dalla zona di lavoro, un consumo eccessivo di gas.

Tuttavia, poiché nelle normali condizioni operative la velocità del filo resta costante, le variazioni dello stick out sono prodotte variando l'altezza della torcia e si producono in variazioni di corrente, come descritto in Figura 54.

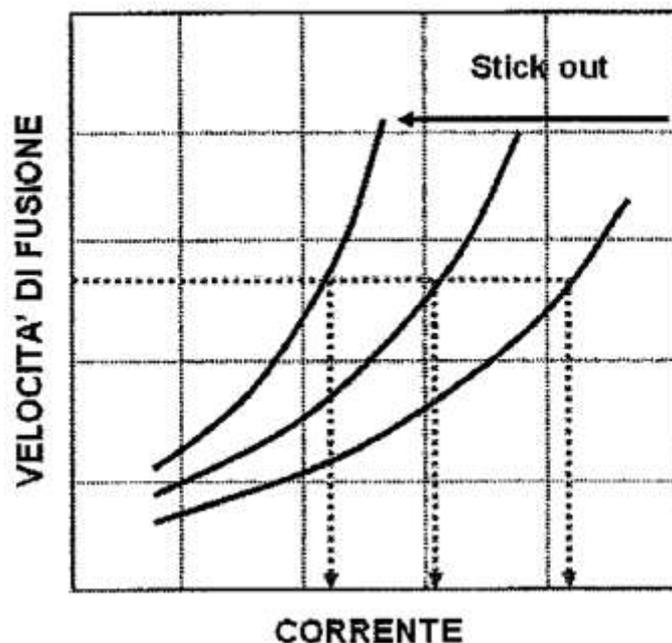


Figura 54 Effetto di una variazione di Stick Out

- Se la torcia viene alzata, si verifica un incremento dello stick out, con una conseguente diminuzione della corrente di saldatura e conseguentemente della penetrazione, la tensione resta invece costante. Se la distanza della torcia risulta eccessiva, la protezione di gas diventa insufficiente, l'arco prende a scoppiettare e si sviluppano spruzzi e porosità;
- Se la torcia viene abbassata, si verifica una diminuzione della corrente di saldatura e conseguentemente della penetrazione.

2.4.3 Posizione del giunto di saldatura^{xxxiii}

La maggior parte dei processi di saldatura G.M.A.W in regime spray sono utilizzati in posizione piana od orizzontale, mentre i processi G.M.A.W in regime pulsato o cortocircuitato, avendo livelli energetici più bassi, possono essere usati in tutte le posizioni.

Le saldature d'angolo (fillet weld) fatte in posizione piana con un regime spray sono generalmente più uniformi, raramente hanno lembi laterali diseguali e profili convessi e sono meno sensibili alle incisioni marginali rispetto a quelle fatte in posizione orizzontale.

Per superare la forza di gravità che agisce sul metallo di apporto nelle posizioni di saldature verticali e soprastesta, sono usati generalmente diametri di elettrodo piccoli sia con un regime short-arc che con un regime spray pulsato.

Diametri di elettrodo di 1.0 mm o 1.2 mm e anche più piccoli, sono i migliori per le saldature fuori posizione ed un basso apporto termico permette alla zona fusa di solidificarsi rapidamente. Nella saldatura delle lamiere in posizione verticale ha generalmente un effetto positivo la saldatura discendente.

Quando la saldatura è fatta in posizione piana, l'inclinazione dell'asse di saldatura rispetto al piano orizzontale, influenzerà la forma del cordone di saldatura, la penetrazione e la velocità ottimale di avanzamento della torcia. Nella saldatura orbitale in posizione piana, il pezzo ruota sotto la torcia di saldatura e l'inclinazione è ottenuta dallo spostamento della torcia in entrambe le direzioni rispetto al punto morto superiore.

Posizionando il giunto con l'asse di saldatura a 15° sull'orizzontale e saldando in modo discendente, il sovrametallo può essere diminuito nelle stesse condizioni di saldatura che produrrebbero un cordone non ben raccordato e con eccessivo sovrametallo quando il pezzo è in posizione piana. Con la saldatura discendente è possibile anche aumentare la velocità. Allo stesso tempo la penetrazione diminuisce, cosa gradita nelle saldature delle lamiere di metallo.

La saldatura discendente influenza la forma del cordone e la penetrazione della saldatura. Il bagno di fusione tende ad essere trascinato dall'elettrodo e preriscalda, particolarmente in superficie, il metallo base. Questo produce una forma irregolare di zona fusa, chiamata "scia secondaria". Se l'angolo di inclinazione della asse di saldatura aumenta, il cordone di saldatura diventa più piano, la penetrazione diminuisce, e la larghezza del cordone di saldatura aumenta. Per l'alluminio, la tecnica discendente non è raccomandabile, data la perdita dell'azione pulente e l'inadeguata protezione. La saldatura ascendente influenza la forma della zona fusa e del cordone di. Le forze di gravità fanno fluire all'indietro il bagno di fusione che resta completamente dietro l'elettrodo. I bordi della saldatura perdono metallo, che fluisce al centro. Se l'angolo di inclinazione aumenta, il sovrametallo e la penetrazione aumenta, e l'estensione della saldatura diminuisce. Gli effetti sono esattamente gli opposti di quelli prodotti dalla saldatura discendente. Quando vengono usate correnti di saldatura più alte, il valore massimo dell'angolo utilizzabile diminuisce.

-
- XIX "Saldatura ad arco elettrico. Nozioni teoriche e pratiche per gli utilizzatori di impianti", A. F. Manz, Tecniche Nuove
- XX "Saldatura per fusione, Volume 2", Istituto italiano della saldatura, HOEPLI EDITORE
- XXI "Introduzione ai processi di saldatura", Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari, Società Editrice Esculapio.
- XXII "Welding: Principles and Applications" seventh edition, Larry Jeffus
- XXIII "Saldatura per fusione, Volume 1", Istituto italiano della saldatura, HOEPLI EDITORE
- XXIV "Weld Like a Pro: Beginning to Advanced Techniques", Jerry Utrachi
- XXV "Mig-Mag welding guide" lincoln electric
- XXVI "Saldatura E Taglio Dei Metalli", Emilio rinaldi, HOEPLI EDITORE.
- XXVII "Mig-Mag welding guide" lincoln electric
- XXVIII "Mig-Mag welding guide" lincoln electric
- XXIX "Mig-Mag welding guide" lincoln electric
- XXX "Saldatura E Taglio Dei Metalli", Emilio rinaldi, HOEPLI EDITORE.
- XXXI "Saldatura per fusione, Volume 1", Istituto italiano della saldatura, HOEPLI EDITORE.
- XXXII "Introduzione ai processi di saldatura", Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari, Società Editrice Esculapio.
- XXXIII "Introduzione ai processi di saldatura", Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari, Società Editrice Esculapio.

CAPITOLO 3

STRUMENTAZIONE E METODI D'ANALISI

Nel seguente capitolo si illustrano le tecniche di analisi utilizzate nella caratterizzazione microstrutturale dei cordoni in esame.

In particolare sono stati utilizzati i seguenti macchinari:

- ❖ il microscopio ottico per indagare la microstruttura,
- ❖ il microdurometro Vickers per valutare la microdurezza,

3.1 Preparazione campioni

La preparazione meccanica è il metodo più utilizzato per la preparazione metallografica di campioni da osservare con il microscopio: la metodologia prevede che , dietro asportazioni sequenziali, effettuate con carte di abrasione costituite da particelle gradatamente più fini, il materiale superficiale viene asportato fino ad ottenere la grana desiderata in base al particolare tipo di analisi.

Il campione dell'analisi viene ricavato dopo taglio tramite troncatrice facendo attenzione a rimuovere i lembi di materiale che contornano il cordone stesso senza intaccare però la zona termicamente alterata, come da Figura 55. Si esclude dalla campionatura anche il punto di innesco e fine corsa saldata.

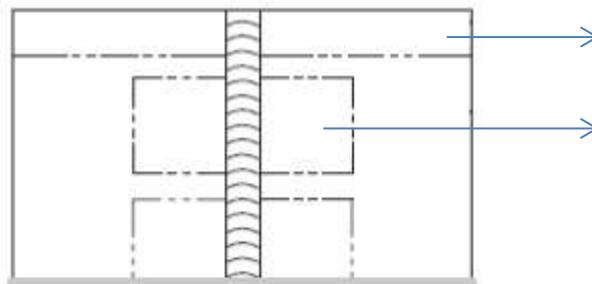


Figura 55 Trancio di lastra piana saldata

Come descritto nella Filosofia di Preparazione Struers, i campioni possono essere portati alla fase finale della preparazione fino all'ottenimento della struttura reale, o la preparazione può essere interrotta quando la superficie del campione è accettabile per l'esame a cui deve essere sottoposta.

Indipendentemente dal grado di finitura, la preparazione deve essere eseguita sistematicamente e riproducibilmente per assicurare un risultato ottimale al minimo costo.

Successivamente si procede con una lucidatura meccanica (disco rotante coperto da un panno morbido, intriso di una sospensione di un abrasivo in un liquido lubrificante), chimica o elettrochimica. Tale fase è di grandissima importanza perché permette di ottenere la finitura superficiale necessaria all'osservazione al microscopio con l'eliminazione dei residui strati di metallo alterato dalle precedenti operazioni.

Si procede con un attacco chimico o elettrochimico sul campione lucidato al fine di differenziare più facilmente nelle analisi successive le tre diverse zone del cordone di saldatura, la struttura (cioè il bordo dei grani) e la presenza di fasi diverse.

Del campione non attaccato nell'immagine al microscopio si distinguono bene cricche, incollature ed eventuali porosità.

L'attacco aggredisce alcuni costituenti specifici (ad esempio discioglie il bordo grano più velocemente dei grani stessi) e permette così di individuare questi ultimi al microscopio. La scelta del tipo di attacco dipende fortemente dal tipo di metallo che si va ad osservare e, nel caso di studio condotto per questa tesi è stato utilizzato il Nital¹⁰ 3.



Immagine 5 Campione C8_1



Immagine 6 Campione C8_4

¹⁰ Composizione: Acido nitrico 3% in Alcool etilico

3.2 Microscopia ottica metallografica

Il microscopio ottico rimane il più importante strumento per lo studio della microstruttura. Ogni esame della microstruttura dovrebbe cominciare con una osservazione al microscopio ottico con basso ingrandimento, seguita da ingrandimenti progressivamente più elevati per stimare efficacemente gli elementi base della microstruttura.

Il microscopio metallografico normale è il tipo Le Chatelier a illuminazione riflessa in cui la luce è riflessa dalla superficie del campione. Consideriamo la figura 16 per evidenziare il percorso della luce e le parti costitutive del microscopio.

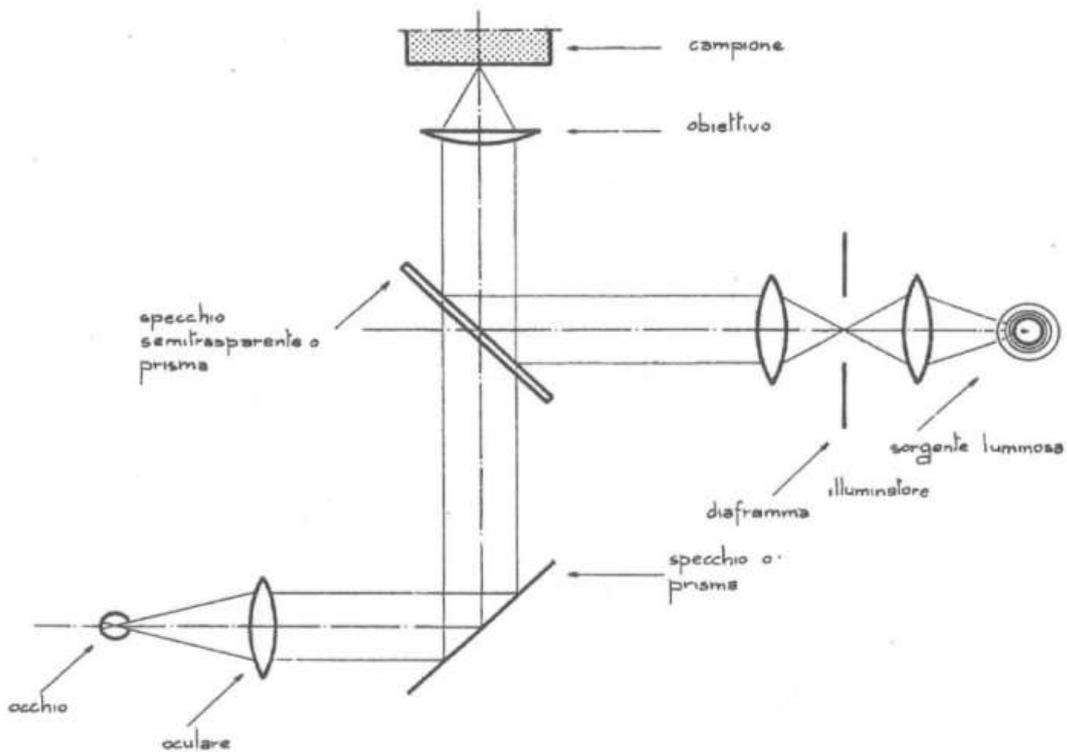


Figura 16- Schema del percorso della luce nel microscopio ottico metallografico

Dalla sorgente S il fascio luminoso è concentrato dalla lente condensatrice Lc, diaframmato in D, reso monocromatico dal filtro F, deviato dal prisma a riflessione totale P1 verso l'alto, indirizzato attraverso il sistema obiettivo Ob che ingrandisce e risolve l'immagine, riflesso dalla superficie del campione C appoggiato sul tavolino portaoggetti T munito di tre movimenti fondamentali: due orizzontali e uno verticale per la ricerca della posizione di fuoco. Il prisma P2 ha la duplice funzione di dirigere l'immagine ingrandita verso il sistema

oculare Oc mediante il quale essa subisce un ulteriore ingrandimento, oppure verso l'oculare fotografico Of. Nel primo caso l'osservazione viene compiuta direttamente, nel secondo si ha uno specchio H, a tiraggio di camera regolabile, che dirige l'immagine al quadro di proiezione Q (schermo computer) o ad una lastra fotografica situata al posto del quadro.

In un microscopio ottico l'ingrandimento, definito come il rapporto tra la distanza tra due punti dell'immagine e la distanza tra gli stessi due punti misurata sulla superficie del campione, è compreso tra 50 e 1000X. Si determina eseguendo il prodotto tra gli ingrandimenti dell'obiettivo e dell'oculare.

Le più comuni sorgenti luminose sono: la lampada a incandescenza, caratterizzata da basso voltaggio e alto amperaggio; la lampada puntiforme ad elevata potenza luminosa; la lampada a vapori di mercurio sotto alta pressione; la lampada ad arco con elettrodi di carbone; la lampada allo xeno.

Condensatore

Raccoglie, focalizza e regola la luce fra la sorgente luminosa e la superficie del campione in esame. Situato fra la sorgente e l'illuminatore da luogo a raggi sensibilmente paralleli.

Diaframmi

Sono due: il diaframma di campo e quello di apertura. Il primo ha la funzione di evitare l'abbagliamento dell'operatore e di ridurre le riflessioni spurie nell'obiettivo, mentre mediante il secondo è possibile ottenere un buon equilibrio fra condizioni di contrasto e di risoluzione dell'immagine poiché esso consente di variare l'intensità e l'angolo del cono di luce che giunge sull'obiettivo.

Illuminatori

Sono sistemi ottici che dirigono sull'obiettivo il fascio di luce proveniente dalla sorgente dopo che è stato concentrato, diaframmato e filtrato, in modo che la maggior quantità di luce possa essere riflessa dall'oggetto.

Filtri

Hanno la funzione di assorbire alcune radiazioni dello spettro luminoso per ridurre l'aberrazione e per aumentare il potere risolutivo lineare.

Obiettivi

Sono sistemi ottici centrati costituiti da numerose lenti convergenti, rigorosamente calcolate nella forma, nelle dimensioni, nelle distanze e nelle combinazioni, atti a formare immagini reali. Le principali caratteristiche di un obiettivo sono:

- *l'ingrandimento*: è rappresentato dal rapporto dell'immagine intermedia e la grandezza dell'oggetto. L'ingrandimento finale risulta dal prodotto degli ingrandimenti dell'obiettivo e dell'oculare, a meno di un fattore correttivo che tiene conto della lunghezza del tubo oculare.
- *l'apertura numerica NA*: è l'apertura angolare del cono luminoso il cui vertice è situato nel fuoco e la cui base copre la superficie utile delle lenti componenti l'obiettivo. Rappresenta la capacità dell'obiettivo di raccogliere e condensare il fascio di luce e, di conseguenza, è l'indice della luminosità dell'obiettivo, cioè della capacità di convogliare attraverso se stesso quanti più raggi di luce possibile allo scopo di dare una visione nitida dell'immagine. E' indicata dall'equazione:

$$NA = n \sin \alpha$$

Equazione 3

essendo n l'indice di rifrazione del mezzo interposto fra la superficie dell'oggetto in esame e la lente frontale dell'obiettivo, α il semiangolo sotto cui, dal centro dell'oggetto, si vede il diametro della lente frontale dell'obiettivo. A parità di lente, l'apertura è maggiore, cioè è maggiore la quantità di luce convogliata, se il mezzo interposto ha indice di rifrazione maggiore.

- *il potere risolutivo lineare*: è la capacità dell'obiettivo di separare distintamente due punti situati in un piano perpendicolare all'asse ottico. Si indica con la minima distanza tra due punti alla quale è possibile individuare l'uno separatamente dall'altro. Si esprime attraverso l'equazione:

$$\delta = \frac{\lambda}{(2 NA)} = \frac{\lambda}{(2 n \sin \alpha)}$$

Equazione 4

essendo λ la lunghezza d'onda della luce impiegata.

- *il potere risolutivo assiale*: è la capacità dell'obiettivo di separare distintamente due punti su piani diversi disposti perpendicolarmente all'asse ottico. È misurato dallo spessore dello strato i cui punti risultano ugualmente a fuoco, cioè nitidi ed è espresso dall'equazione:

$$\delta = \frac{\lambda}{2NA} = \frac{\lambda}{2n \operatorname{sena}}$$

Equazione 5

essendo A_0 il potere risolutivo assiale dell'occhio, G_{ob} l'ingrandimento dell'obiettivo e NA l'apertura numerica dello stesso.

- *la struttura degli obiettivi*: risente della necessità di evitare la presenza di difetti tipici delle lenti semplici caratterizzate da superfici di rifrazione sferiche piuttosto che piane. Ciò può comportare una maggiore rifrazione dei raggi centrali, la suddivisione della luce bianca nei suoi componenti spettrali e quindi l'impossibilità di ottenere un'immagine nitida.

Oculari

Sono sistemi ottici che servono a trasformare l'immagine prodotta da un obiettivo in un'immagine comoda per l'osservazione e precisamente all'infinito o ad una distanza convenzionale di 250 mm.

Ingrandimento e potere risolutivo lineare

L'ingrandimento del microscopio alla visione diretta è espresso dall'equazione:

$$G = \frac{G_{ob} * G_{oc}}{l}$$

cioè dal prodotto degli ingrandimenti singoli dell'obiettivo e dell'oculare rapportato alla lunghezza tubolare l qualora sia diversa da 250 mm.

Le immagini in questa ricerca sono state realizzate mediante un microscopio ottico Leica DMR, camera Leica DC100 e software Leica QWin.

3.3 Microdurometro

Il microdurometro è uno strumento destinato a misurare la durezza superficiale dei materiali. È costituito essenzialmente da un penetratore di diamante che lascia sulla superficie del pezzo un'impronta, accoppiato ad un microscopio ottico provvisto di uno speciale reticolo per determinare le dimensioni dell'impronta stessa.

Oggi sono in uso diverse scale di misura, ognuna delle quali fa riferimento alla propria specifica metodologia. Per i materiali metallici queste sono essenzialmente tre:

- scala Brinell, con penetratore costituito da una sfera di acciaio ad alta resistenza.
- scala Rockwell, a sua volta suddiviso in altre due sotto scale, B e C, usata rispettivamente per metalli morbidi e duri, con differenti penetratori (sfera in acciaio indurito del diametro di 1/16 di pollice e diamante con punta conica con un apertura di 120°). La prova si svolge in tre steps successivi.
- scala Vickers, che permette di testare materiali anche molto duri. Il penetratore è costituito da una piramide a base quadrata con un apertura di 136°. Come per la scala Brinell, il valore di durezza si ricava come rapporto tra la forza esercitata e la superficie dell'impronta.

Concentrandosi sulla scala Vickers, usata in questa ricerca, se si indica il carico in kg, la durezza del materiale è data da

$$HV = \frac{F}{A} \cong 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

con F in kg e d in millimetri.

lo strumento utilizzato è un microdurometro Vickers Leitz Wetzlar, 6215

3.4 Risultati sperimentali

Le prove di saldatura sono state condotte valutando principalmente tre parametri di processo e l'influenza delle composizioni dei gas: questo, allo scopo di ottimizzare le correlazioni tra le scelte di lavoro e la qualità del manufatto.

3.4.1 Presentazione dei materiali

Come da protocollo, assegnato da LINCOLN ELECTRIC, si segue un metodo operativo standardizzato per i test eseguiti in modo da render replicabile il procedimento e confrontabili i risultati.

c	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Zr+Ti _{max}
0,08	0,82	1,43	0,007	0,005	0,030	0,010	0,001	0,010	0,004	0,002	0,10
Caratteristiche a trazione											
Re _L [MPa]					R _m max [MPa]		Allungamento % min				
451					556		31				

Tabella 22 Caratterizzazione del materiale d'apporto

La scelta della dimensione dell'elettrodo influisce sulla forma cordone di saldatura, sulla profondità di penetrazione a corrente fissa e sulla velocità di deposizione. In qualsiasi corrente, un elettrodo di piccolo diametro avrà una densità di corrente più elevata e velocità di deposizione superiore di un elettrodo grande. Tuttavia, un elettrodo di diametro maggiore può trasportare più corrente di un elettrodo più piccolo, ed avrà un tasso di deposizione superiore a più alto amperaggio.^{xxxiv}

La scelta di 1mm risiede nel centro del range consigliato per saldatura MAG, ovvero [0,8-1,3 mm].

Per caratterizzare i gas prova della RIVOIRA¹⁴, nella Tabella 23, accanto alla composizione puramente chimica del gas compare anche la stima della parte attiva del gas:

		Ar	CO ₂	O ₂	% gas attivo	CO ₂ eq ¹⁵	O ₂ eq
Miscele binarie	STARGON C18	82	18	-	18	18	9
	STARGON C8	92	8	-	8	8	4
Miscele ternarie	STARGON PB	95	3	2	5	7	8
	STARGON SCH1	80	15	5	20	25	13,5
	STARGON SCH2	90	5	5	10	15	7,5
	STARGON SCH3	93	6	1	7	8	4
	STARGON SCH4	86	12	2	14	16	8

Tabella 23 Dettagli composizione dei gas STARGON

Si precisi che per gas attivo si intende quella quota parte del gas di lavoro in grado di aumentare la stabilità di posizionamento dell'arco su materiali ferromagnetici (acciai al carbonio e bassolegati).

3.4.2 Metodologia di conduzione delle prove

In Tabella 24 vengono mostrate le condizioni di lavoro predefinite, ovvero quelle che al variare delle prove resteranno immutate:

¹⁴ Rivoira Gas Srl: attiva nei mercati industriali con una vasta gamma di linee di prodotto, rappresenta un'azienda focalizzata nella commercializzazione di gas criogenici, tecnici, puri e speciali. Oltre ai prodotti, Rivoira fornisce servizi, materiali, apparecchiature ed impianti destinati a diversi utilizzatori dei gas, dalla grande industria al piccolo laboratorio.

¹⁵ Dalla dissociazione $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$ si definisce (2CO₂) equivalente ad (O₂)

Parametri standard	Valore assegnato
Intensità di corrente	243 A
Potenziale elettrico	28.6 V
Velocità di avanzamento del filo	13 mt/min
Flusso del gas	12 lt/min
Tipologia di trasferimento	SPRAY ARC

Tabella 24 Parametri standard di saldatura

Di contro, in Tabella 25 sono presentati i parametri eletti per valutarne l'influenza sulla qualità di saldatura: si studierà dunque come al loro variare risponderà in giunto saldato.

Parametri di processo	Velocità di saldatura	Stick out	Gap tra i lembi da saldare
Elementi costitutivi del gas	Argon	Carbonio	Ossigeno

Tabella 25 Parametri di cui si è valutata l'influenza

Nel procedere con i test, si è cercato un metodo di scelta della variazione delle condizioni di lavoro tale che fosse possibile scandagliare vari scenari in cui un solo parametro mostrava il proprio peso rispetto agli altri;

ecco perché in **Tabella 26** sono messi in risalto tramite una X i parametri tenuti fissi mentre quelli variabili sono evidenziati in grassetto:

Parametri variabili		Prova 1		Prova 2		Prova 3		Prova 4		Prova 5		Prova 6
Velocità di saldatura	X	150	X	150	X	150	X	150		250		500
Stick out i	X	0,94	X	0,94	X	0,94		1,06	X	0,94	X	0,94
Gap tra lembi		1		2		3	X	3	X	3	X	3

Tabella 26 Presentazione alternanza parametri

Sono state realizzate dunque 6 prove per ogni gas studiato, eseguendo come da richiesta Lincoln, un primo settaggio sul gas C18.

^{xxxiv} = "A Review Study of Submerged Arc welding Fluxes"

Kumar, Ajay; Singh, Hari; Maheshwaric, Sachin. i-Manager's Journal on Mechanical Engineering .

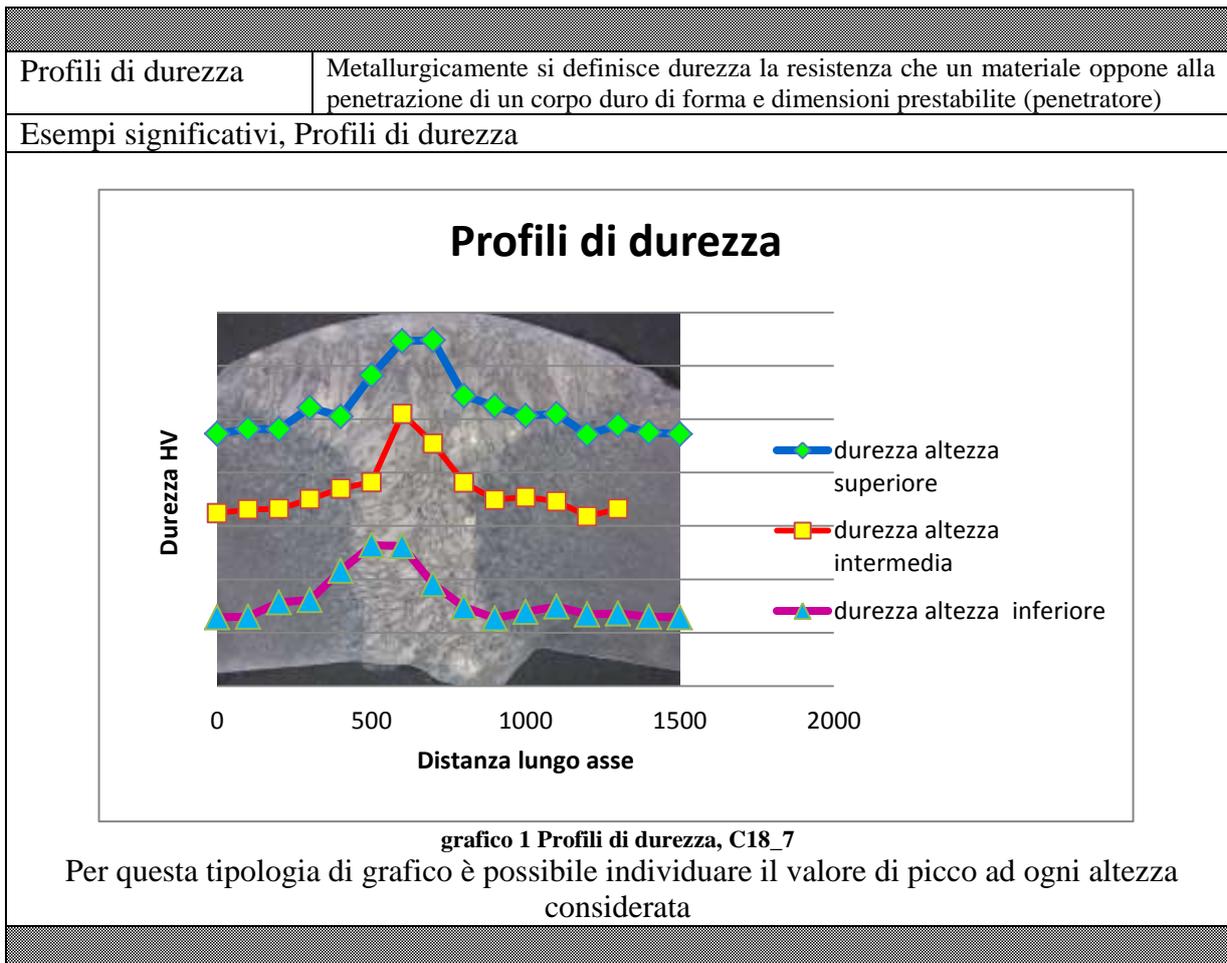
Capitolo 4

Risultati e discussione

Questo quarto capitolo presenta i parametri considerati per ogni giunto saldato ottenuto nel corso delle varie prove. Anzitutto essi verranno trattati genericamente, mostrandone alcuni esempi significativi per poi, nei successivi paragrafi, prendere in esame gli andamenti da essi scaturiti.

4.1 Caratteristiche valutate del giunto saldato

A seguito della conduzione delle prove, si vedano in Tabella 27 le caratteristiche del manufatto che sono state prese in esame per valutarne la bontà.



Esame ottico

Permette di individuare la forma del giunto saldato, e senza attacco chimico rivela le cricche, mentre se effettuato dopo attacco chimico, palesa la crescita dendritica e la dimensione della ZTA

Esempio significativo, Esame ottico senza attacco

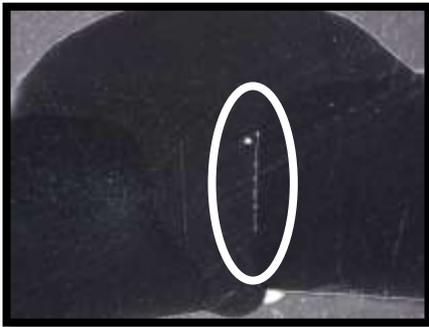


Figura 56 Campione senza attacco Nithal 3, C8_5

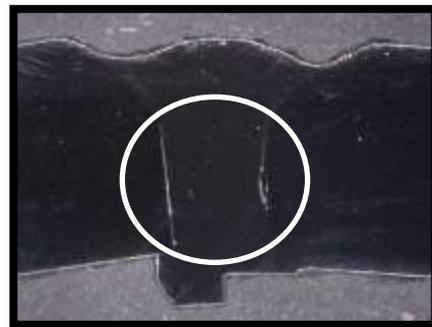


Figura 57 Campione senza attacco Nithal 3, C8_2

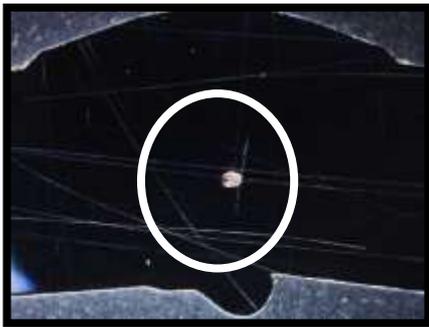


Figura 58 Campione senza attacco Nithal 3, SCH2_1

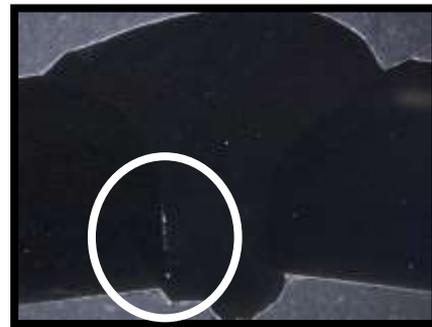


Figura 59 Campione senza attacco Nithal 3, SCH2_4

Esempio significativo, Esame ottico con attacco



Figura 61 Campione attaccato Nithal 3, C18_4

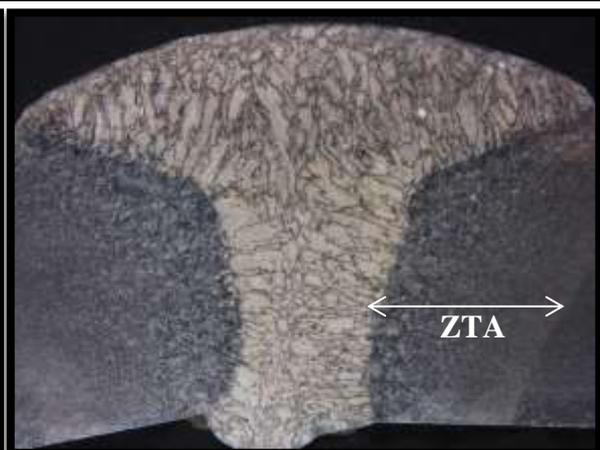
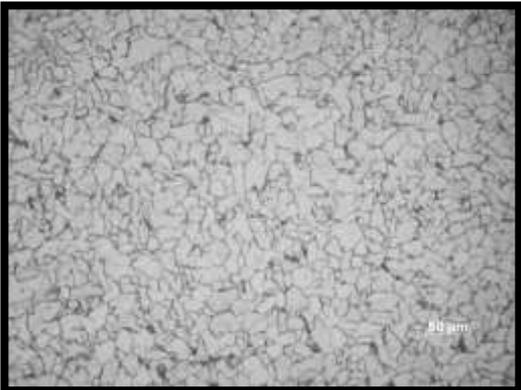
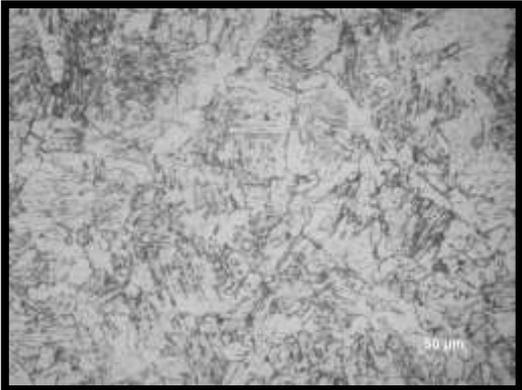
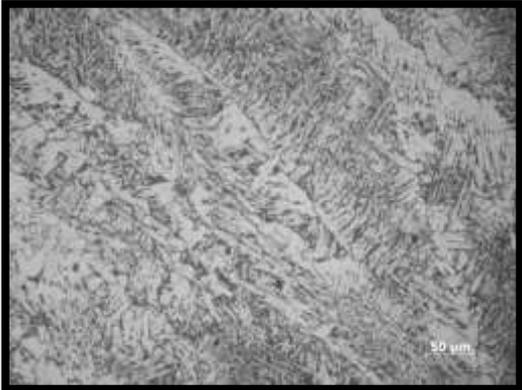


Figura 60 Campione attaccato Nithal 3, C18_6

Esame micrografico	
Esame micrografico	Distingue la grana della struttura che dopo attacco chimico si distingue in base alle zone : metallo base, ZTA e materiale d'apporto
Esempio significativo, Esame micrografico	
 	
<p>Figura 62 Micrografia Materiale di base, 200x, SCH1_2</p> <p>Figura 63 Micrografia ZTA, 200X, SCH1_2</p>  <p>Figura 64 Micrografia Materiale d'apporto, 200X, SCH1_2</p>	
Dimensionamento della ZTA	
Dimensionamento della ZTA	Misura della più grande dimensione raggiunta dall'alterazione termica in direzione parallela alla lamiera
Esempi significativi, Dimensionamento della ZTA	

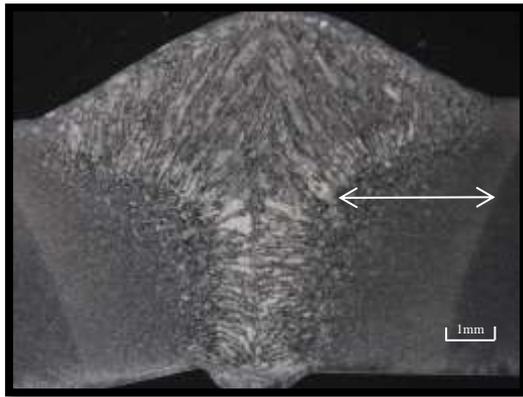


Figura 66 Dimensionamento ZTA, C18_2

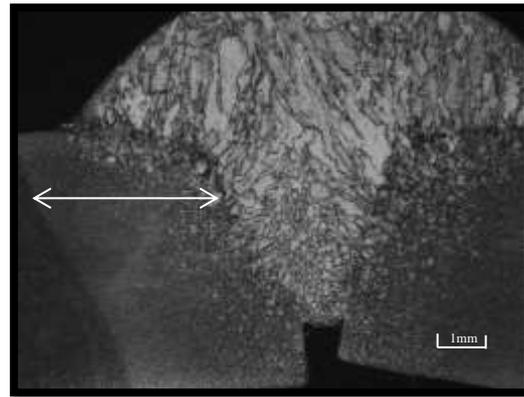


Figura 65 Dimensionamento ZTA, SCH3_2

Esame di qualità
superficiale

Esame visivo della bontà di superficie del cordone di saldatura

Esempio significativo di analisi di qualità superficiale

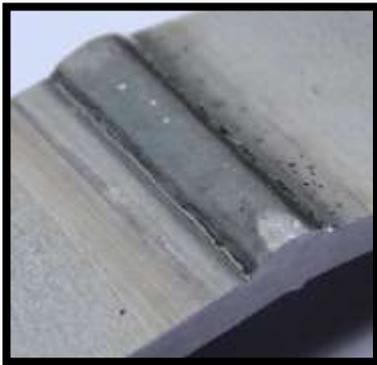


Figura 69 Ottima finitura superficiale, C8_1



Figura 69 Buona finitura superficiale, PB_1



Figura 69 Pessima finitura superficiale, PB_4

Apporto termico

Stima numerica che valuta l'energia termica introdotta nel bagno tramite il processo di saldatura e per unità di lunghezza.

$$Q = \frac{60 P}{v} * \eta = \frac{60 * I * V}{v} * \eta$$

Equazione 6

dove P : potenza erogata dalla sorgente [W]

v : velocità di saldatura [cm/min]

I : corrente fornita dalla sorgente elettrica [A]

V : tensione fornita dalla sorgente elettrica [V]

η : efficienza di trasmissione termica, ossia il parametro che tiene conto dell'effettivo trasferimento di calore dalla sorgente, sia arco che laser, al cordone.

Gas	Apporto termico	Gas	Apporto termico	Gas	Apporto termico	Gas	Apporto termico	Gas	Apporto termico	Gas	Apporto termico	Gas	Apporto termico
CI8_1	0,702336	CB_1	0,269376	PB_1	0,61824	SCH1_1	0,24288	SCH2_1	0,263808	SCH3_1	0,2604672	SCH4_1	0,240768
CI8_2	0,684212	CB_2	0,5799936	PB_2	1,10144	SCH1_2	0,5010432	SCH2_2	0,5523456	SCH3_2	0,732192	SCH4_2	0,514464
CI8_3	0,52992	CB_3	0,887264	PB_3	1,165568	SCH1_3	0,868608	SCH2_3	0,909632	SCH3_3	0,917088	SCH4_3	0,879808
CI8_4	0,909216	CB_4	0,91264	PB_4	1,50336	SCH1_4	0,898304	SCH2_4	0,92736	SCH3_4	0,936448	SCH4_4	0,921024
CI8_5	0,887264	CB_5	0,939456	PB_5	1,62864	SCH1_5	0,917088	SCH2_5	0,96512	SCH3_5	0,94208	SCH4_5	0,928
CI8_6	0,887264	CB_6	1,17824	PB_6	1,929312	SCH1_6	1,02336	SCH2_6	1,203488	SCH3_6	1,176896	SCH4_6	1,102496
CI8_7	1,018336		0,269376		0,61824		0,24288		0,263808		0,2604672		0,240768

Tabella 27 Valori apporto termico

Tabella 28 Caratteristiche prese in esame

Gas	Fattore di forma	Gas	Fattore di forma	Gas	Fattore di forma	Gas	Fattore di forma	Gas	Fattore di forma	Gas	Fattore di forma	Gas	Fattore di forma
CI8_1	2,19	CB_1	1,758	PB_1	1,3	SCH1_1	1,52	SCH2_1	1,4	SCH3_1	1,59	SCH4_1	1,778
CI8_2	1,77	CB_2	0,805	PB_2	2,15	SCH1_2	4,185	SCH2_2	4,185	SCH3_2	2,35	SCH4_2	1,565
CI8_3	2,57	CB_3	0,853	PB_3	1,857	SCH1_3	2,95	SCH2_3	2,95	SCH3_3	4,185	SCH4_3	3,135
CI8_4	2,39	CB_4	1,967	PB_4	1,113	SCH1_4	1,09	SCH2_4	1,089	SCH3_4	1,11	SCH4_4	0,984
CI8_5	3,103	CB_5	1,774	PB_5	3,5	SCH1_5	0,778	SCH2_5	0,788	SCH3_5	1,37	SCH4_5	0,835
CI8_6	1,75	CB_6	3,67	PB_6	4,226	SCH1_6	3,421	SCH2_6	0,98	SCH3_6		SCH4_6	
CI8_7	1,65												

Tabella 29 Valutazioni caratterizzanti i giunti saldati

Fattore di forma

Si definisce *fattore di forma* del cordone di saldatura il rapporto

$$\frac{W}{D}$$

dove W rappresenta la larghezza massima del cordone, e D la profondità.

Con fattori di forma inferiori ad 1 aumentano i rischi di formazione di cricche al centro del cordone; ciò è dovuto alla crescita di dendriti contrapposte che non garantiscono una sezione resistente sufficientemente estesa durante l'inizio della solidificazione. Inoltre le impurezze, ancora in fase liquida, si condensano al centro del cordone. Per questo motivo utilizzare cinafrini troppo stretti è rischioso; inoltre occorre tenere presente che all'aumentare della velocità di saldatura, aumenta la lunghezza del bagno di fusione e diminuisce la larghezza, con conseguente diminuzione del fattore di forma. (conviene intervenire sui parametri elettrici e non sulla velocità di saldatura).

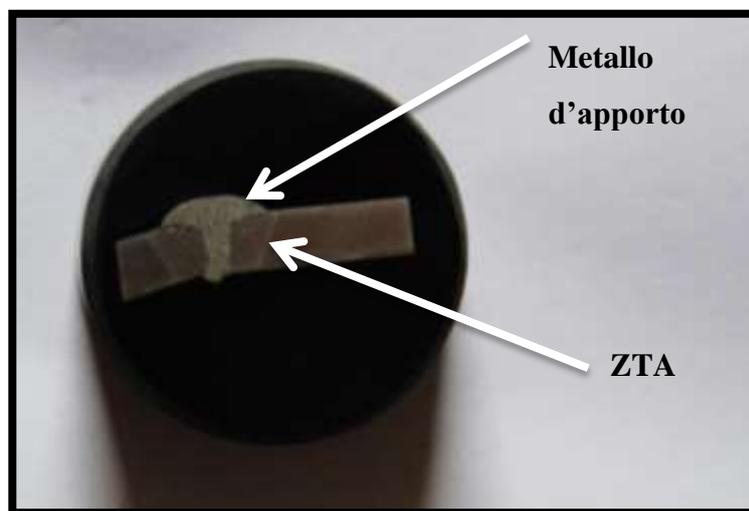
Si è inoltre notato che un'eccessiva concavità della superficie del cordone, conduce con più facilità alla formazione di cricche a caldo, a causa di una sollecitazione superficiale sfavorevole.

4.2 Risultati generalizzati ottenuti dai giunti saldati

La necessità di ottenere una maggiore produttività e requisiti di sicurezza rigorosi ha posto crescente attenzione alla selezione precisa ed attenta delle variabili del processo di saldatura, tali da permettere di avere un sufficiente controllo della forma del cordone di saldatura che si andrà ad ottenere.

La resistenza meccanica del giunto è infatti influenzata non solo dalla composizione del metallo, ma anche dalla forma del cordone^{xxxv}, che a sua volta dipende da fattori quali apporto termico, velocità di saldatura e preparazione dei giunti per esempio.

Come è visibile in figura, la sezione trasversale di un cordone di saldatura ne mostra la geometria.



In questo lavoro di tesi si studia la qualità metallurgica del giunto saldato anche attraverso relazioni di forma come la penetrazione, l'altezza del rinforzo di saldatura, fattore di forma di penetrazione e fattore di forma di rinforzo.

In questo paragrafo si andrà ad estendere la valutazione dei parametri ad ogni singola prova. Si considerino i parametri presi ad esame classificabili in variabili di input e di output in modo che dell'una si possa meglio comprendere l'influenza sull'altra.

Variabili INPUT	Variabili OUTPUT
<ul style="list-style-type: none"> • corrente di saldatura [Ampère]; • velocità di saldatura [mm/min]; • contact tube-to-work distance, Stick Out, potenziale elettrico dell'arco [Volt] 	<ul style="list-style-type: none"> ○ larghezza del cordone di saldatura ○ penetrazione ○ WPSF (penetration shape factor) o Fattore di Forma

Tabella 30 Classificazione delle variabili di processo

4.2.1 Variabili input

4.2.1.1 Corrente di saldatura

La corrente di saldatura è il parametro più influente perché influenza la forma del cordone, controlla la velocità con cui l'elettrodo è fuso e quindi controlla anche la velocità di deposizione, la zona termicamente alterata, la profondità di penetrazione e la quantità di metallo fuso di base.

Risposta della Corrente	Variabile processo	Tendenza	Effetti sul giunto
Aumenta	Penetrazione	aumenta	

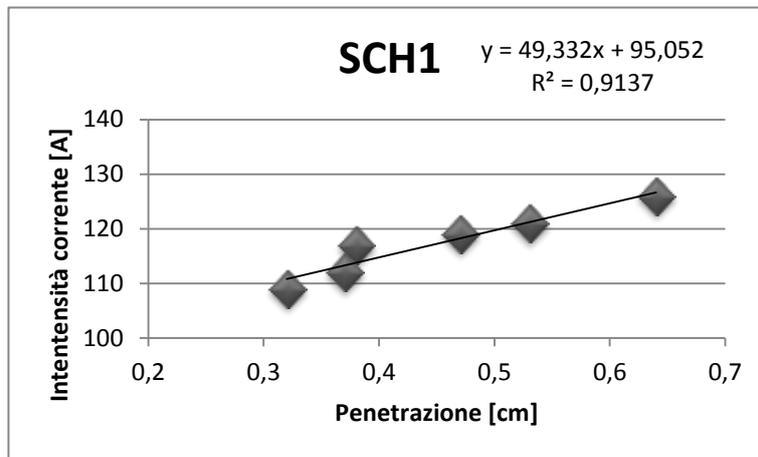


grafico 2 Influenza dell'intensità di corrente sulla penetrazione, STARGON SCH1

Aumentando la corrente infatti aumenta il calore introdotto e quindi la quantità di materiale fuso tale che la penetrazione aumenta.

A differenza della larghezza e del Fattore di Forma (WPSF), la penetrazione aumenta proporzionalmente all'intensità di corrente, per ogni gas.

GAS	Ceq	Pendenza retta [A/cm]
PB	7	49,332
SCH3	8	46,874
SCH2	15	45,627
SCH4	16	43,344
C18	18	40,067
C8	24	38,169
SCH1	25	35,994

Tabella 31 Pendenza [A/cm]

Dalla tabella 31 è possibile vedere come il maggior contenuto di Ceq comporti maggiore penetrazione, condizione favorita dalla lentezza della saldatura, a parità di corrente.^{xxxvi}

Larghezza Aumenta ma fino ad un valore critico

Ad elevate correnti, e dunque profonde penetrazioni, esiste il rischio che il metallo d'apporto si sciolga nel metallo base, portando allo spreco di elettrodi sotto forma di eccessivo riempimento, o addirittura alla conversione in arco tagliente.

La larghezza dunque aumenta in maniera importante fino ad un valore critico di corrente oltre il quale la crescita si affievolisce.

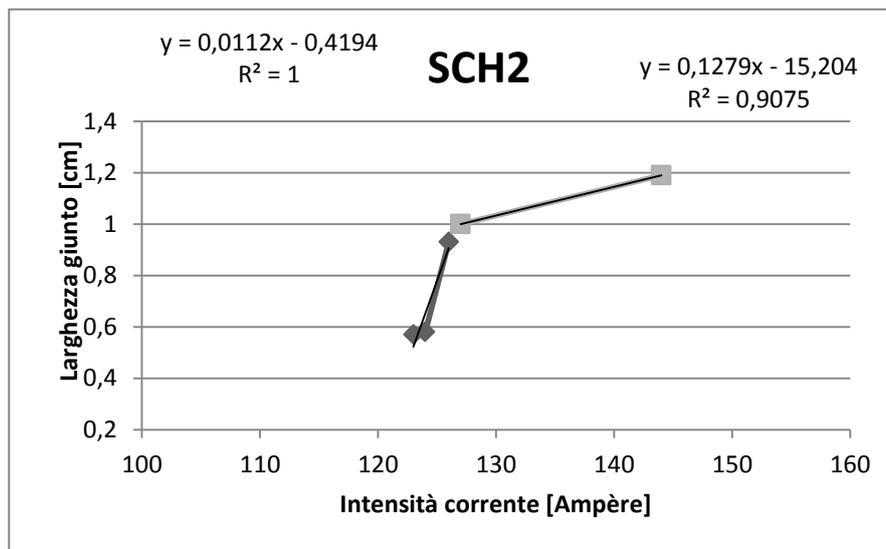


grafico 3 Influenza dell'intensità di corrente sulla larghezza del giunto.

Il lavoro condotto alternando un set di gas di saldatura permette l'indagine anche sull'influenza che la componente attiva, rappresentata dal carbonio equivalente, esercita sui valori di intensità di corrente oltre i quali l'aumento di larghezza subisce una drastica diminuzione;

Nel seguente grafico 3 sono riportate le curve intensità di corrente in funzione della larghezza del cordone. Si noti come sia possibile individuare tre gruppi di rette (fasci di rette parallele) ed il C8 che resta isolato in quanto privo di ossigeno, per le quali la pendenza si approssima a simili valori e che si riportano in Tabella 32

Gas	C _{eq}	Pendenza Pre-Corrente limite	Pendenza Post-Corrente limite
SCH1	25	0,10	0,019
C18	18	0,15	0,015
SCH4	16	0,10	0,008
SCH2	15	0,12	0,011
SCH3	8	0,25	0,009
PB	7	0,13	0,007
C8	8 _(no O₂)	0,07	0,031

Tabella 322

E' interessante notare come maggiore sia il C_{eq} più la retta sia spostata verso sinistra ovvero verso minori valori di Intensità di corrente. Dunque maggiore C_{eq} necessita di minore corrente per raggiungere larghezze maggiori.

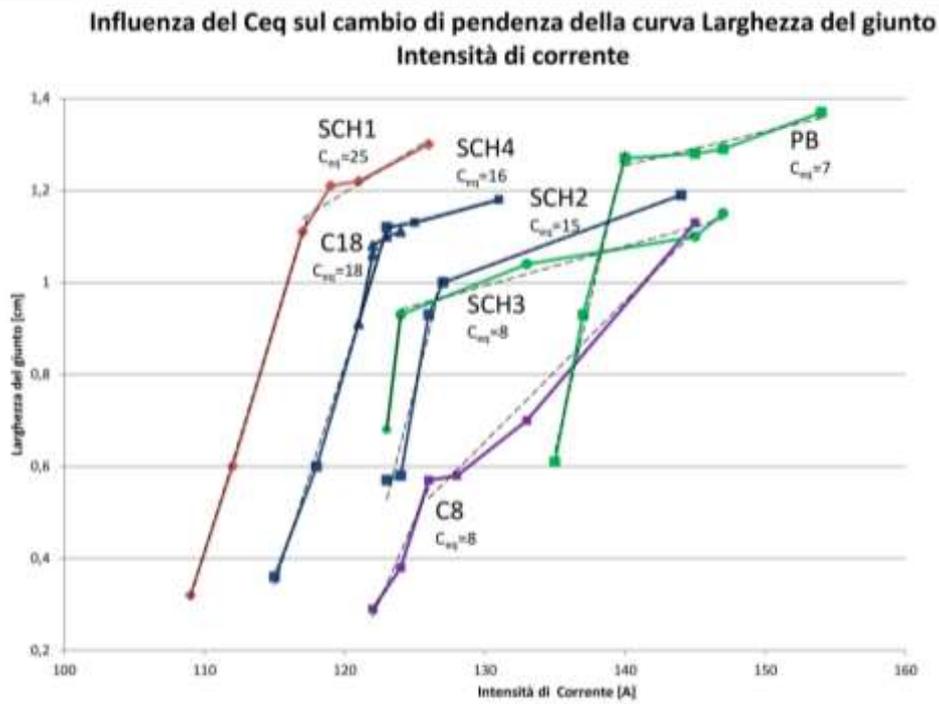


grafico 4 Influenza del Ceq sul cambio di pendenza delle curve Larghezza del giunto contro Intensità

Per studiare l'aumento della penetrazione al crescere della presenza di Ceq, si osservi che la frequenza di gocciolamento minima per garantire il trasferimento spray è maggiore nel caso di protezione in gas attivo rispetto al gas inerte, di cui si mostra il dettaglio nella seguente tabella 33:

Gas	Densità di corrente [A/mm ²]
Attivo	200-200
Inerte	120-130

Tabella 33 Densità di corrente per gas attivo o inerte

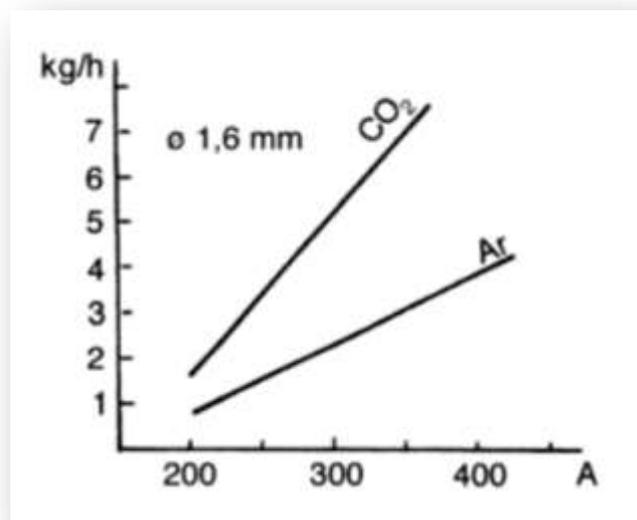


grafico 5 Velocità di fusione in funzione dell'intensità di corrente nella saldatura con protezione di Ar e CO₂

Occorre esplicitamente notare che, a parità di condizioni di corrente, le velocità di fusione del filo in atmosfera di CO_2 sono assai più elevate rispetto alle protezioni in Argon come è possibile vedere in Grafico 5; dunque le velocità di avanzamento del filo sono di conseguenza più alte quando si utilizza CO_2 .

Per rendere più evidente l'influenza del tipo di gas si osserva nel grafico 6 come in atmosfera di Ar risulti evidente che per ottenere una frequenza di deposito di 50 gocce/s sia necessario impiegare per il procedimento MAG in CO_2 un'intensità di corrente quasi doppia che non nel procedimento MIG. Inoltre la necessità di utilizzare elevate densità di corrente porta alla conseguenza che, a causa del voluminoso bagno di fusione e della elevata penetrazione ottenibili, il procedimento di saldatura in atmosfera di CO_2 con trasporto di materiale a spray, cioè a forte intensità, possa essere applicato alle sole saldature in posizione piana.

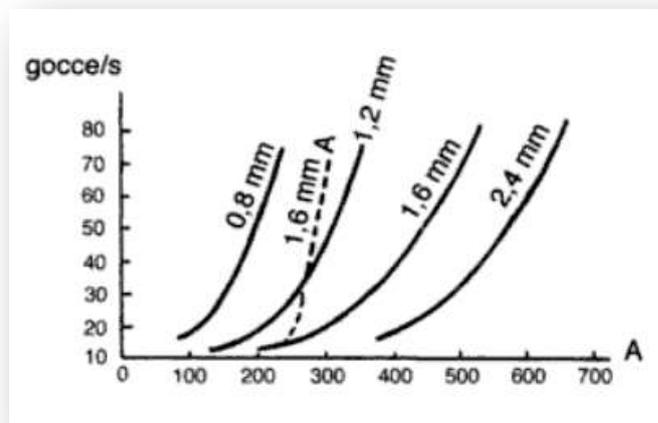


grafico 6 Frequenza di formazione delle gocce nel trasporto a spruzzo in funzione dell'intensità di corrente e del diametro del filo in atmosfera di CO_2 e di Ar

Le elevate correnti necessarie alla CO_2 pura, comportano un notevole ingrossamento delle gocce che si formano lateralmente all'asse del fuso d'arco; in tali condizioni può avvenire che alle tensioni alle quali in MIG il trasferimento avverrebbe regolarmente nel caso del MAG le gocce tocchino il pezzo prima che siano distaccate dall'elettrodo; si verificano perciò cortocircuiti ed "esplosioni delle gocce" che possono provocare abbondanti spruzzi e riversamenti, con successive incollature del deposito ai margini del giunto. L'inconveniente viene eliminato aumentando la tensione di saldatura (e cioè la lunghezza d'arco):

nel grafico 7 il campo a destra della retta indica il valore della tensione e della corrente di saldatura che debbono essere adottati per ottenere un cordone esente dal difetto descritto.

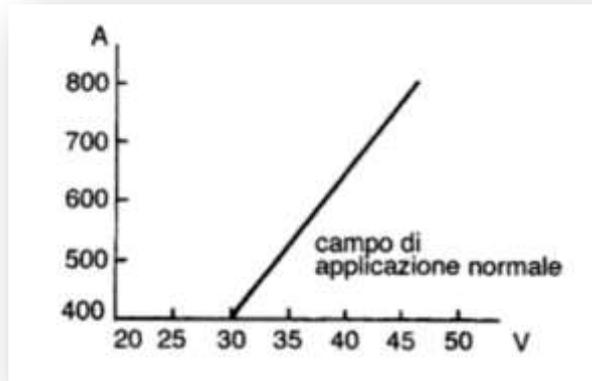
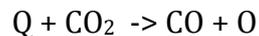


grafico 7 Relazione tra V ed I nelle saldature effettuate in CO₂ con l'impiego di elevate intensità di corrente

Inoltre, a supporto dei dati sperimentali si osservi che quando si usa un gas attivo (MAG), si adopera generalmente CO₂, dato il basso costo. Questo subisce la reazione:



che, alle alte temperature dell'arco, avviene nel senso della dissociazione con assorbimento di calore Q. A ridosso del metallo base, più freddo, si ha la reazione inversa con restituzione del calore, che quindi risulta trasferito al bagno di fusione. Questo fenomeno asseconda la penetrazione e la buona stabilità dell'arco.

Eccessivo aumento	Profondità della fusione e penetrazione	Troppo elevate	
La saldatura risultante tenderà a rimescolarsi con il metallo da saldare, comportando anche spreco di elettrodi a causa dell'eccessivo rinforzo e induce un arco talmente violento che è capace di scavare. A causa di tale sovrasaldatura comporta ritiri esasperati e dunque maggiori distorsioni;			
	a parità di flusso, la ZTA aumenta. ^{xxxvii}		
Eccessiva diminuzione	La penetrazione è insufficiente;		
	la fusione incompleta;		
	l'arco instabile.		

Tabella 34 Parametro input: corrente di saldatura

4.2.1.2 Velocità di saldatura

Per velocità di saldatura si intende la velocità lineare con la quale l'arco si sposta lungo il giunto.

Risposta della Velocità di saldatura	Variabile processo	Tendenza	Effetti sul giunto
aumenta	Apporto termico	diminuisce	

Nel seguente grafico 9, preso ad esempio il gas STARGON C8, si noti come all'aumentare della velocità con cui procede la saldatura, l'apporto termico presenti un drastico calo: infatti, essendo questi indirettamente proporzionali, ci confermano l'andamento atteso. La linea retta lungo la quale si muove l'arco durante la saldatura influenza l'energia termica introdotta per unità di lunghezza della saldatura: un incremento di velocità induce un decremento del calore penetrato ed una minore quantità di materiale di riempimento, ottenendo così un cordone di saldatura più piccolo.

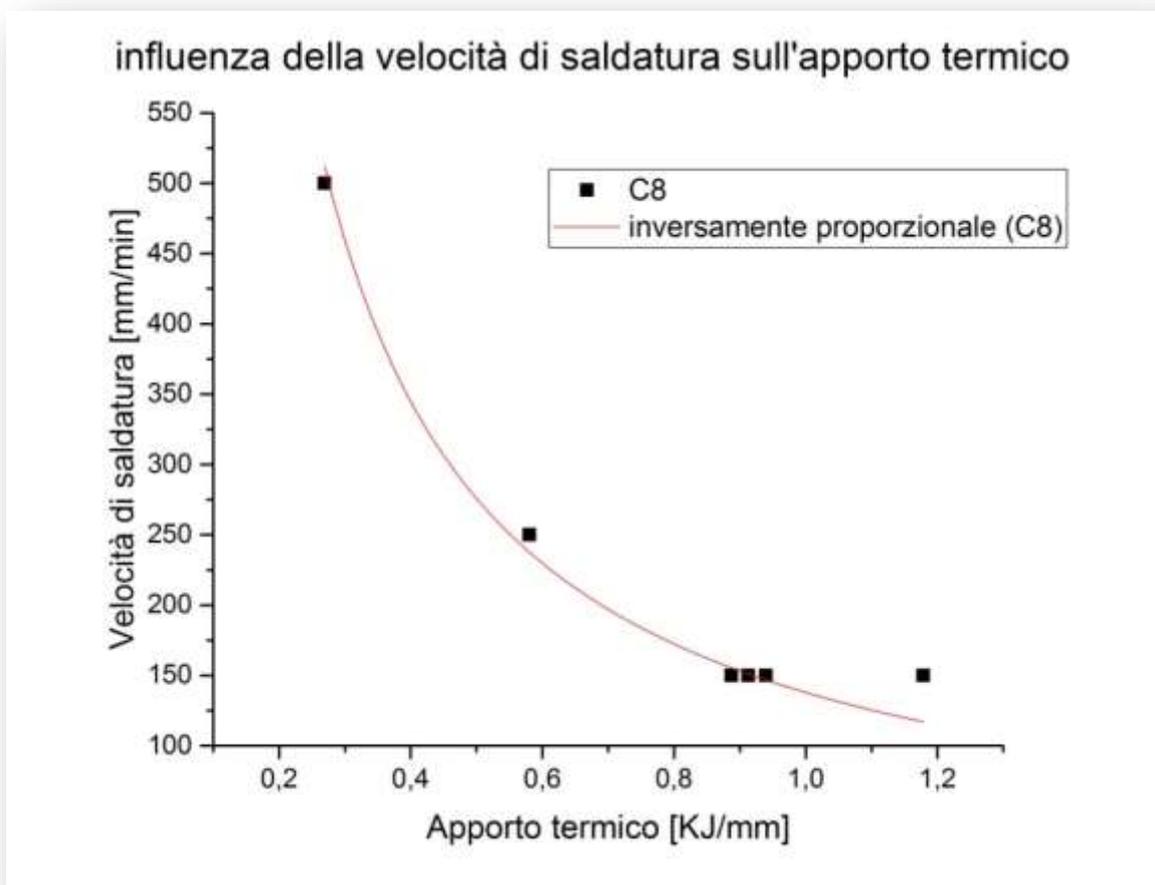
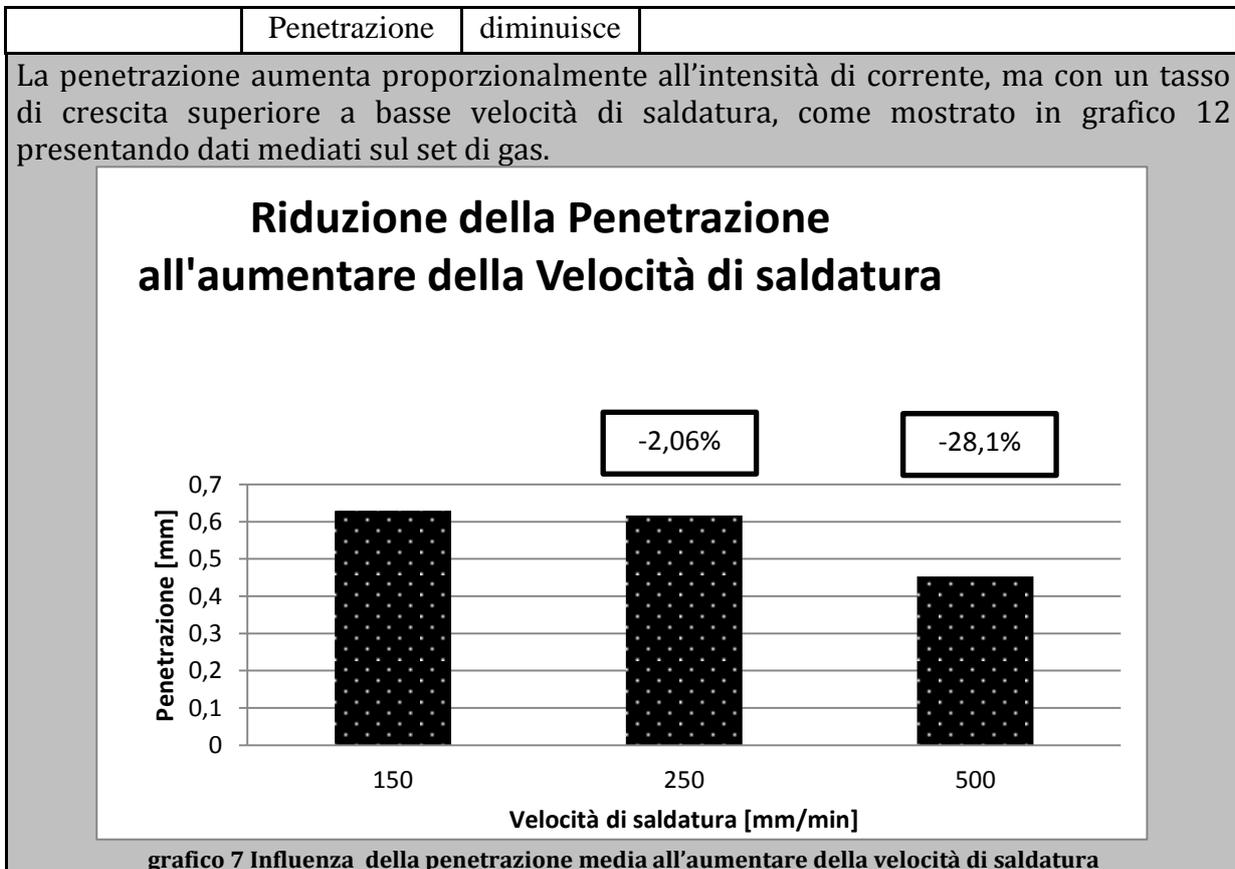
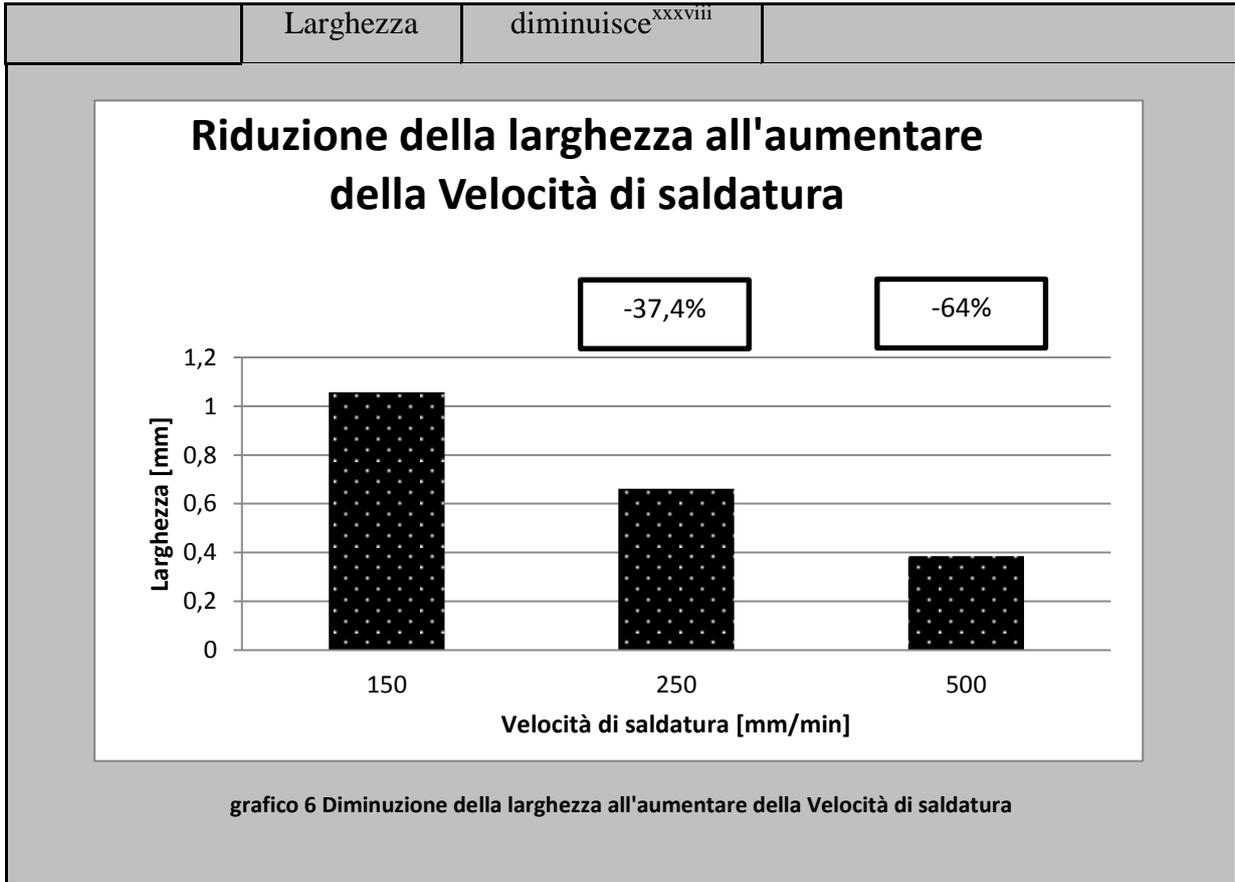


grafico 5 Apporto termico al variare della Velocità di saldatura



Riduzione e Penetrazione sono due parametri che si compendiano a vicenda per descrivere il comportamento dei gas all'aumentare della Velocità: infatti un cordone ben penetrato sarà anche meno largo.
 Per essi è evidente che sia valido lo stesso andamento di diminuzione ma per la penetrazione, lo è solo ad elevate velocità mentre la riduzione di larghezza è sensibile all'aumento di velocità in qualsiasi misura.

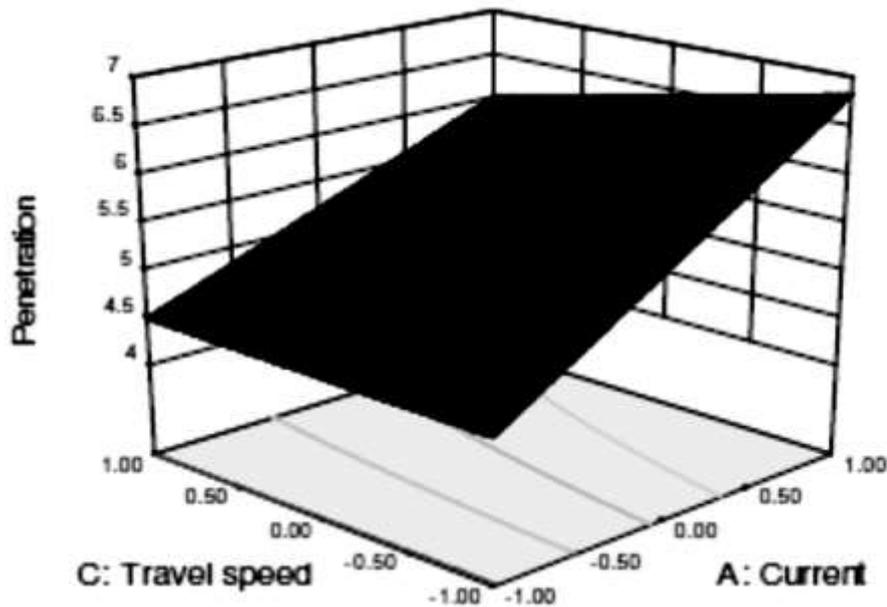


Figura 70 Superficie di risposta all' effetto interattivo della corrente e della velocità di saldatura sulla penetrazione

Come visibile in Figura 70, la penetrazione aumenta all'aumentare della corrente ad ogni velocità di saldatura, ma la quota incrementale maggiore si registra a basse velocità.

	Evacuazione di gas dal bagno fuso	Aumenta perché facilitata	Minore porosità
Eccessiva diminuzione	Forza di penetrazione dell'arco	diminuisce	La pozza di materiale fuso ammortizza la spinta dell'arco
	Esposizione dell'arco	aumenta	Cordone più convesso, e screpolature

Velocità di saldatura troppo bassa può anche provocare una grande piscina fuso che scorre nella zona dell'arco, con conseguente tallone ruvido, inclusioni di scoria e bruciare della piastra di saldatura.

Eccessivo aumento	porosità, instabilità dell'arco, forma del cordone irregolare, screpolature e maggiore inclusione di scorie nel metallo saldato ^{xxxix}
--------------------------	--

Tabella 35 Parametro input: Velocità di saldatura

4.2.1.3 Stick out dell'elettrodo e Potenziale elettrico d'arco

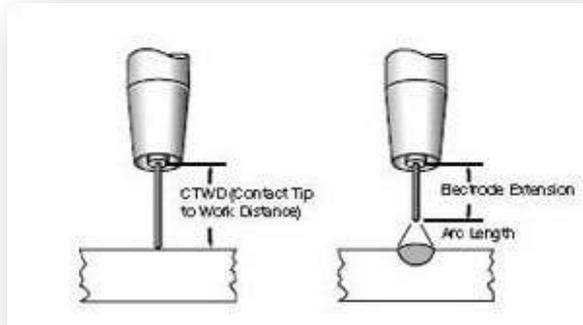


Figura 711 Rappresentazione della lunghezza libera di elettrodo

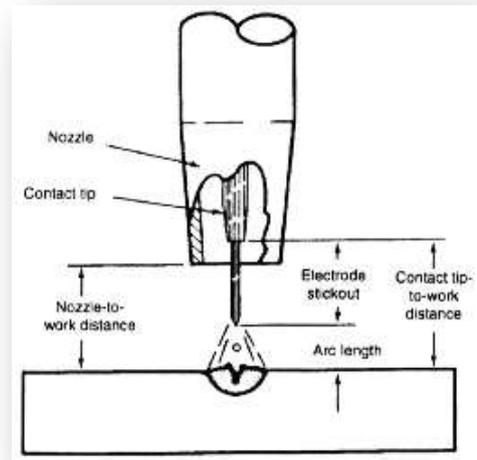


Figura 722 Movimentazione di CTDW e conseguenze

Come mostrato in figura 72, l'estensione dell'elettrodo o Stick out rappresenta la distanza tra la parte superiore dell'elettrodo libero e la radice dell'arco; esso ha un notevole effetto sulla geometria del cordone di saldatura in quanto da esso deriva la forma della pozza fusa.

Le caratteristiche elettriche sono determinate dall'elettrodo ed in particolare questa porzione è l'unica a condurre la corrente di saldatura, motivo per il quale un suo aumento induce un incremento della temperatura per effetto Joule.

L'effetto Joule, in un generico elemento in cui confluisce una corrente I e ai cui capi vi è una differenza di potenziale pari a V , individua nella potenza elettrica (P) fornita:

$$P = V I = R I^2$$

viene trasformata in calore.

Questo preriscaldamento può raggiungere un valore di temperatura vicina al punto di fusione dell'elettrodo, in tal modo una piccola quantità di calore sarà sufficiente per farlo diventare fuso nel punto di saldatura. L'aumento della resistenza dello Stickout produce una maggiore caduta di tensione dalla punta di contatto al materiale base alla quale, la fonte di alimentazione risponde diminuendo la corrente: si avrà un arco più stretto ed una saldatura poco penetrata con un'alta corona. Al contrario, diminuendo lo Stickout si induce l'effetto opposto: il preriscaldamento del filo viene ridotto, la caduta di tensione non è alta e la fonte di alimentazione fornisce più corrente al pezzo, ottenendo così giunti più penetrati.

Risposta dello Stick Out	Variabile processo	Tendenza	Effetti sul giunto
aumenta	Penetrazione	diminuisce	

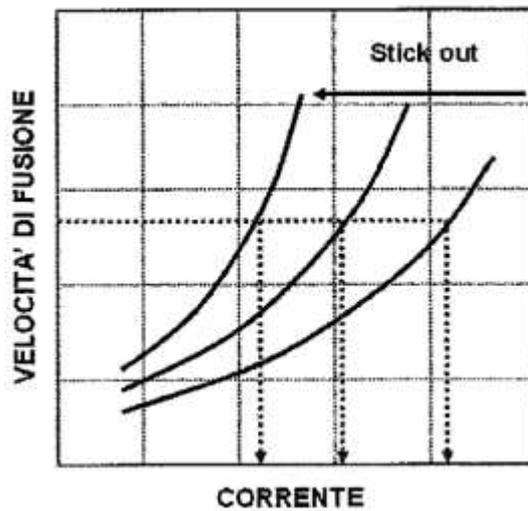


grafico 10 Relazione tra la Velocità di fusione e la Corrente, parametrico in Stickout

Se la torcia viene alzata, si verifica un incremento dello stick out, con una conseguente diminuzione della corrente di saldatura e dunque della penetrazione, la tensione resta invece costante.

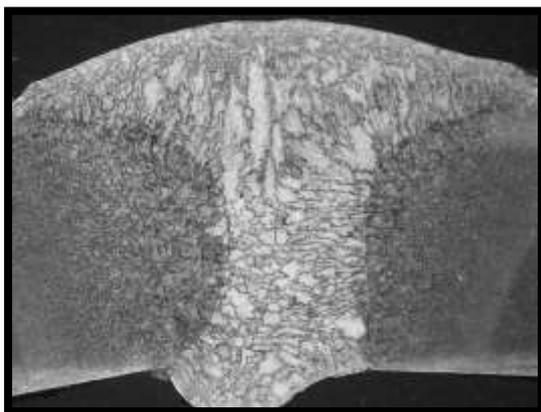


Figura 73 SCH1_1 completa penetrazione



Figura 74 SCH1_6 pessima penetrazione

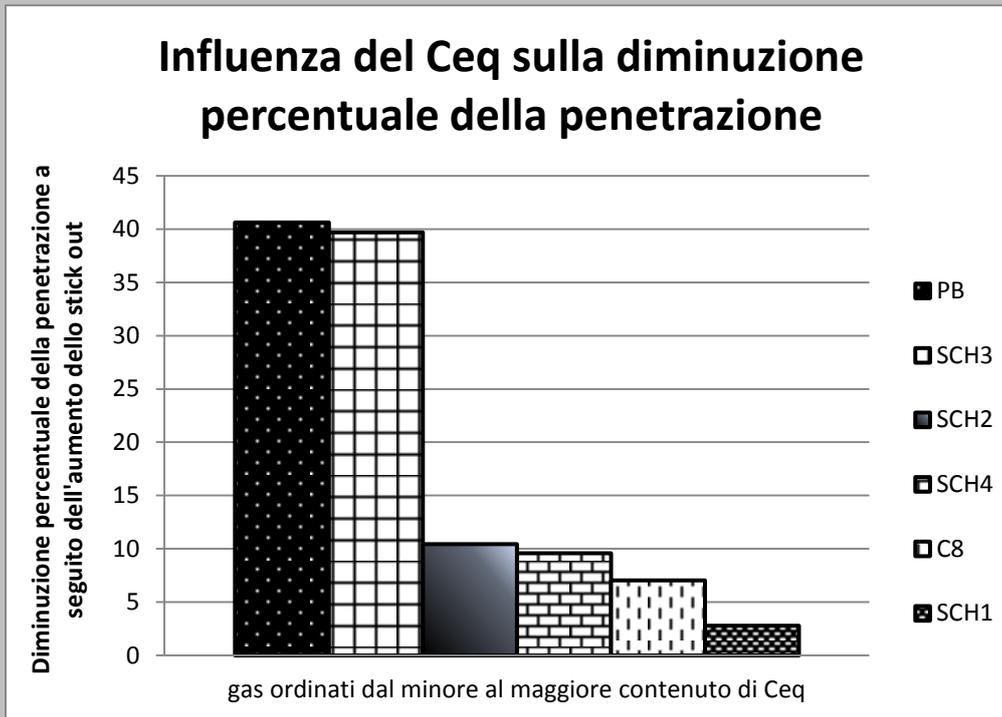


grafico 8 Influenza del C_{eq} sulla diminuzione percentuale della penetrazione a seguito dell'aumento dello Stickout

Come è mostrato nel grafico 12, la diminuzione della penetrazione è sì legata all'aumento del valore di Stickout, e dunque all'abbassamento della tensione, ma è maggiormente pesante per gas a basso contenuto di carbonio equivalente, e dunque di parte attiva.

Il PB e l'SCH3 hanno contenuto di C_{eq} rispettivamente di 7 ed 8, mentre i restanti gas hanno valori superiori al 15.

	ZTA	diminuisce	L'Intensità di corrente, responsabile anche delle temperature raggiunte in resistenza elettrica, controlla direttamente l'apporto termico introdotto nel metallo; alla maggiore resistenza elettrica, dunque al maggiore stick out, il sistema necessita una minore intensità di corrente: si otterrà un metallo di base molto meno alterato nell'intorno della penetrazione, che presenta cioè una ZTA molto meno estesa. ^{x1}

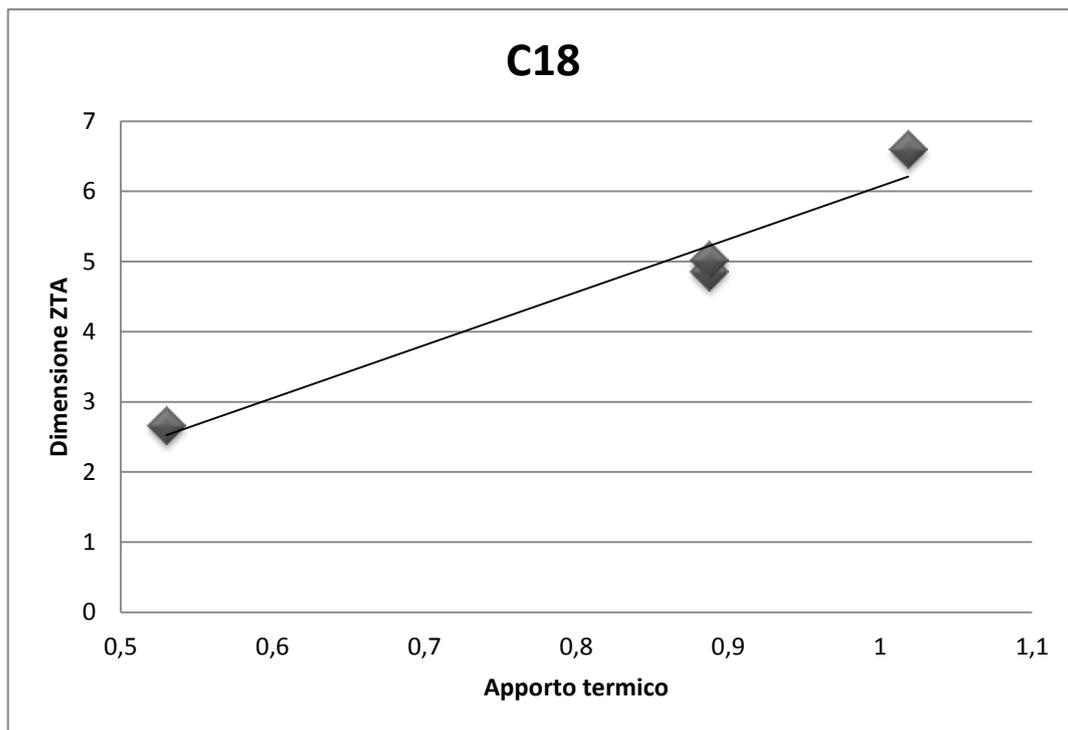


grafico 13 Apporto termico al variare della dimensione della ZTA

All'aumentare dell'Apporto termico, com'è ben visibile in grafico 13, aumenta il calore introdotto nel bagno che per conduzione termica troverà come via di dissipazione principale il metallo di base: questo fenomeno avrà come conseguenza l'ingrossamento del grano in ZTA che per tanto risulterà tanto più estesa quanto maggiore sarà l'apporto termico.

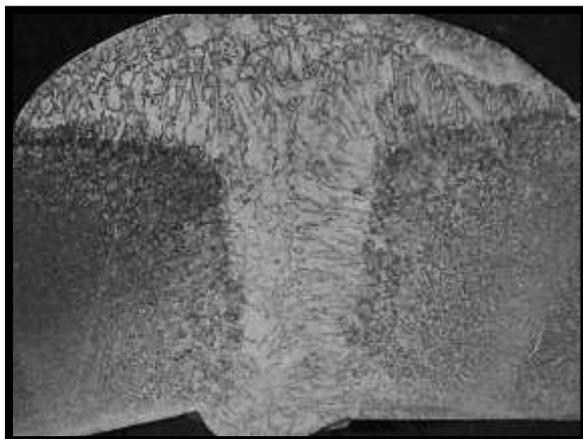


Figura 6 Minore ZTA, C8_4

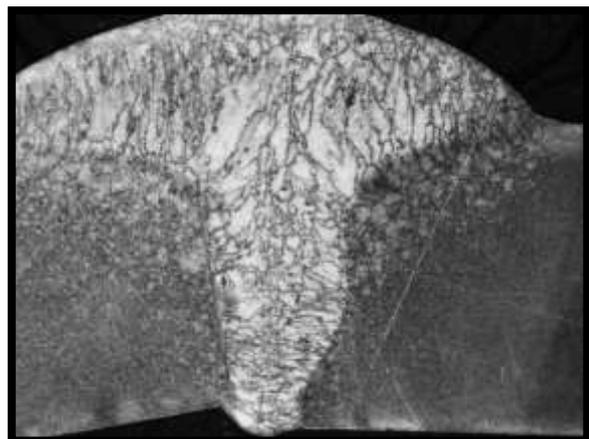


Figura 7 Maggiore ZTA, C8_1

Studiando l'effetto della diminuzione della ZTA dovuta all'aumento dello Stick out, al variare del contenuto di Ceq, si osserva, dal grafico 13

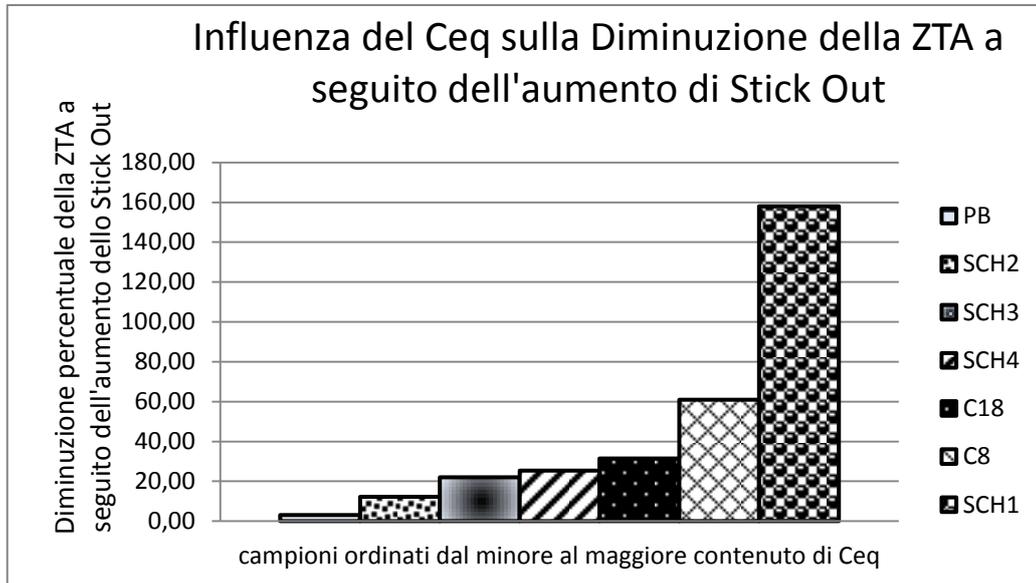


Grafico 9 Influenza del Ceq sulla diminuzione della ZTA a seguito dell'aumento di Stick out che un aumento della componente attiva nel gas, conduca verso una maggiore diminuzione percentuale della ZTA, permettendo di registrare per valori prossimi al 25 di Ceq una straordinaria dimostrazione della capacità del gas di stabilizzare l'arco.

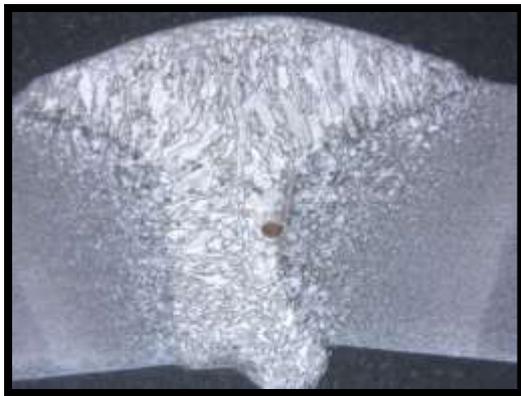


Figura 75 Larghezza del cordone maggiore, SCH2_1 stick out (0,94)

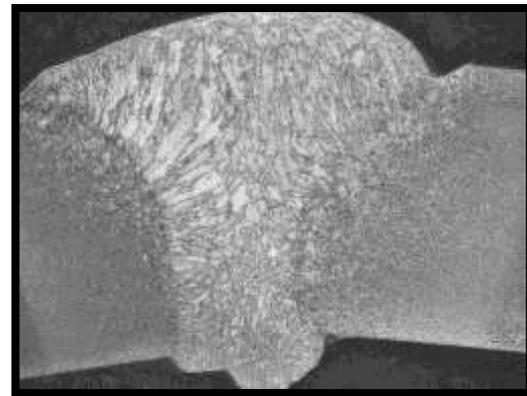


Figura 76 Larghezza del cordone minore, SCH2_4 (stick out 1,06)

Nel seguente grafico 14 si studia la risposta dei diversi gas all'aumentare della larghezza del cordone ottenuta conseguentemente all'aumento dello stick out. Interpretiamo questo comportamento dividendo i gas in due famiglie:

	Ordine di stabilità		
Gas contenenti solo CO₂	C18 >	C8	
Gas contenenti anche O₂	SCH1 >	SCH2 >	SCH3 > PB

Tabella 36 Classificazione dei gas a seconda del contenuto o meno di Ossigeno

Si noti come i gas più stabili in pozza fusa ovvero in larghezza del cordone, siano C18 e C8, gas ad esclusivo contenuto di CO₂, e come questi siano anche superiori in stabilità alla serie SCH- e PB.

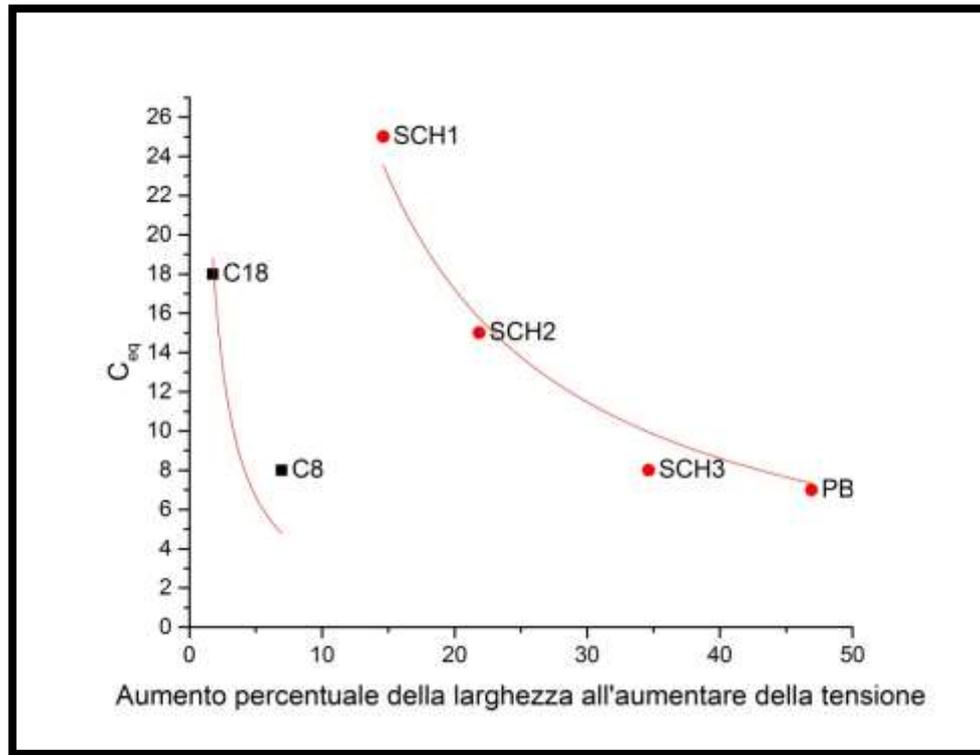


grafico 10 Influenza del Ceq sull'aumento percentuale della larghezza dovuta alla variazione di Stickout

Tensione di saldatura aumenta	Altezza dell'arco	aumenta	
<p>L'altezza dell'arco varia con la tensione di saldatura perché all'aumentare di questa, aumenta la distanza tra elettrodo e metallo fuso. Inoltre, la colonna d'arco espone maggiore circonferenza al freddo contorno, perdendo continuamente i portatori di carica per migrazione radiale ed imponendo quindi un maggiore fabbisogno di potenziale per mantenere una carica appropriata tra l'elettrodo e la piastra di saldatura.^{xli}</p> <p>Di contro, un abbassamento del tensione produce arco più rigido, che migliora la penetrazione.</p>			
	Velocità	aumenta	

Nel caso di gas monoatomici inerti come Ar ed He la ionizzazione avviene direttamente, Nel caso in cui si utilizzino gas biatomici come ad esempio la CO₂, essi devono prima essere dissociati nell'arco e questo processo necessita di ulteriore energia. Se la quantità di energia necessaria non è molto elevata, l'innesco dell'arco è più semplice. Se sono presenti componenti difficili da ionizzare, come ad esempio CO₂, la tensione di saldatura deve essere adeguatamente aumentata. Comunque questa energia elettrica addizionale viene rilasciata nuovamente in forma di energia ricombinata e ciò permette di avere

maggiore immissione di calore ed un incremento della velocità di saldatura.

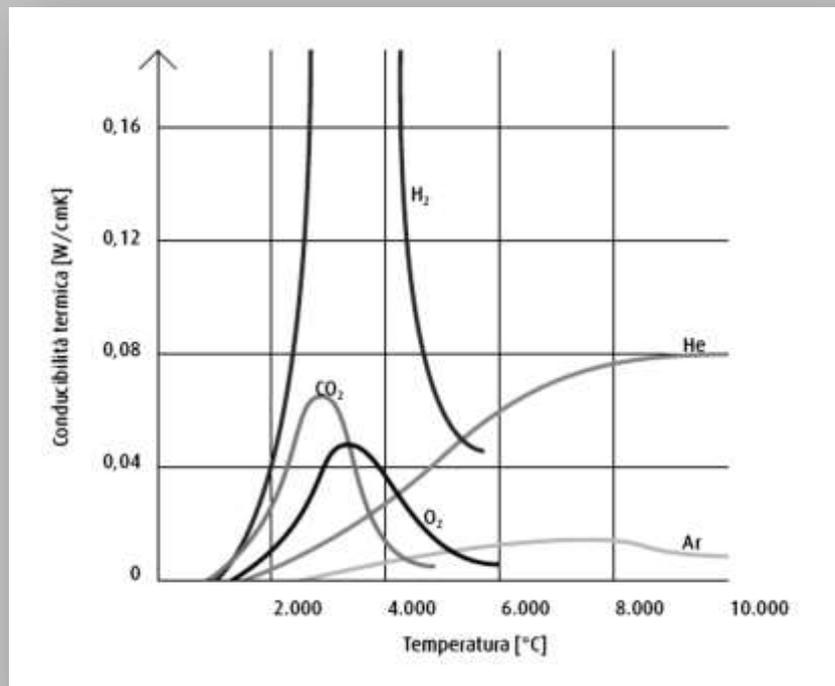


grafico 11 Conducibilità termica contro Temperatura

Parte del calore dell'arco viene trasferita al pezzo da saldare attraverso il flusso di gas.

Inoltre un elevato voltaggio porta ad un eccessivo ingrossamento del tallone del giunto

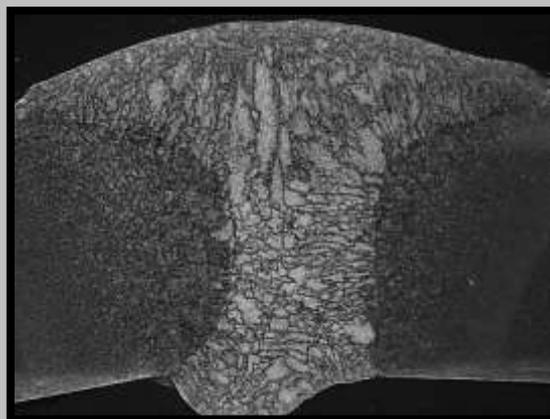


Figura 77 Esempio di maggiore larghezza del tallone del giunto saldato ad alta tensione, SCH1_1

	la taglia degli schizzi	aumenta	di conseguenza ne diminuisce il numero, cosicché il tempo del movimento del il trasferimento di materiale aumenta.
--	-------------------------	---------	--

Un eccessivo aumento di tensione produce una forma tallone ampio che è soggetto a cracking, ne aumenta il sottosquadro e crea difficoltà nella rimozione della scoria.

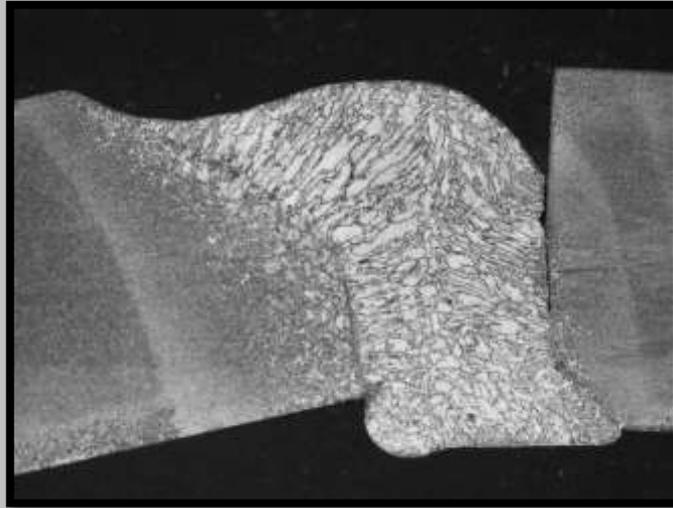


Figura 78 Campione soggetto a cracking che presenta maggiore sottosquadro ,SCH3_4

4.2.2 Variabili output

4.2.2.1 Larghezza del cordone

La larghezza del cordone di saldatura è la larghezza massima del metallo depositato. Essa influenza il tasso di consumo di flusso e la chimica del metallo di saldatura.

La trattazione delle variabili che su di essa incidono è rimandata al Paragrafo 4.2.1.

4.4.2.2 Penetrazione

Per penetrazione di saldatura si intende la distanza massima tra la superficie superiore della piastra di base e la profondità a cui la fusione ha avuto luogo.

La trattazione delle variabili che su di essa incidono è rimandata al Paragrafo 4.2.1.

4.2.2.3 Fattore di forma di penetrazione (WPSF) o anche coefficiente di forma interna

Risposta del WPSF	Variabile processo	Tendenza	Effetti sul giunto
Aumenta	velocità	Inversamente proporzionale	Aumenta secondo me

E' interessante osservare come l'indiretta proporzionalità tra la Velocità ed il fattore di forma sia ovviamente legata al diminuire della penetrazione essendo

$$FF = \frac{\text{Larghezza cordone}}{\text{Profondità del cordone}} = \frac{W}{P}$$

Di cui è ripotato un esempio in grafico 17 del gas STARGON C8.

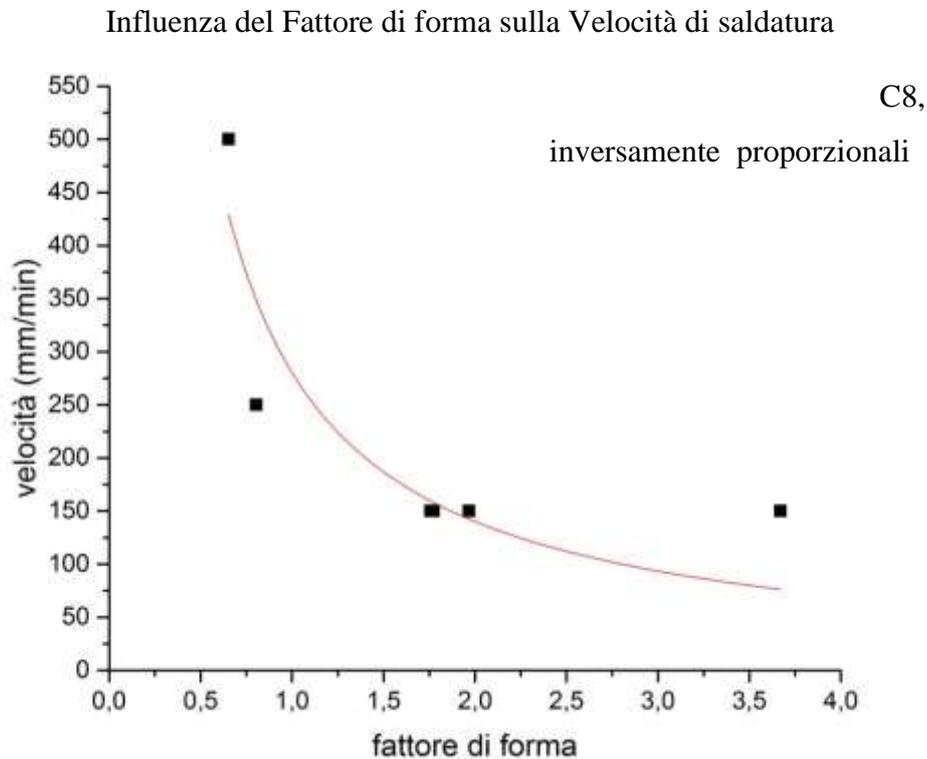


grafico 12 Influenza del fattore di forma sulla Velocità di saldatura

Ovvero, all'aumentare della Velocità di saldatura viene sfavorita la penetrazione che entrando nel rapporto del Fattore di Forma al denominatore ne riduce il valore.

Per capire l'influenza che la quota parte attiva ha sulla risposta del giunto alla variazione di Apporto termico si è osservato come la relazione che tra esse intercorre mostri un punto di massimo: per valori $FF < 1$ il giunto presenta tendenza al cracking anche a causa della diminuzione di larghezza.

I valori del FF poi crescono fino ad un certo valore Apporto termico, legato alla velocità di saldatura, oltre il quale cominciano di nuovo a decrescere, tendendo di nuovo verso valori minori del FF come mostrato in esempio per l'SCH1, in grafico 14.

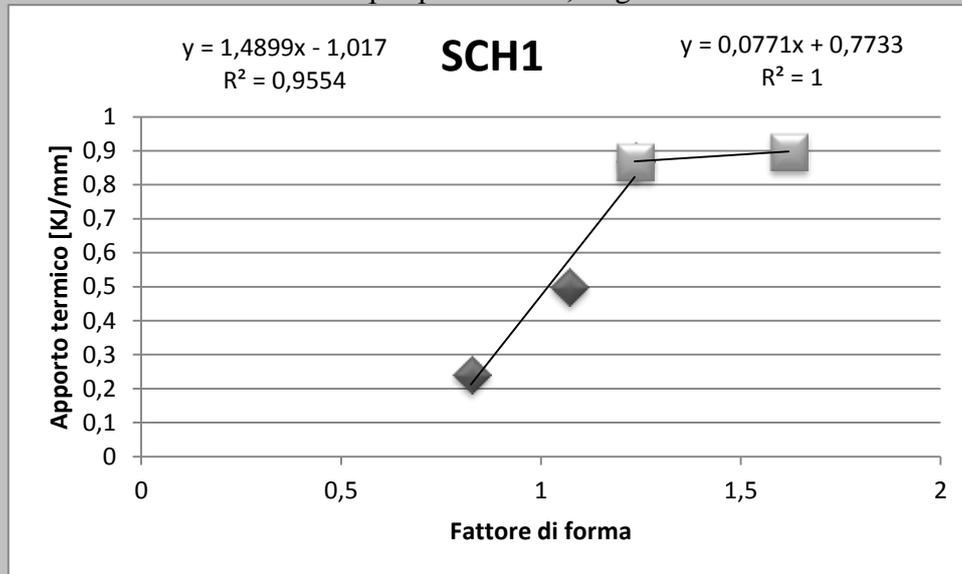


grafico 13 Influenza del Fattore di Forma sull'Apporto Termico

Relazionando la posizione del punto di massimo con la presenza di C_{eq} nei gas, si osserva che all'aumentare del C_{eq} il valore di Apporto Termico al quale il Gas risponde con il massimo Fattore di Forma resta pressoché costante [0,9-1,2], ad eccezione del PB che dimostra ancora una volta la propria cattiva gestione del calore;

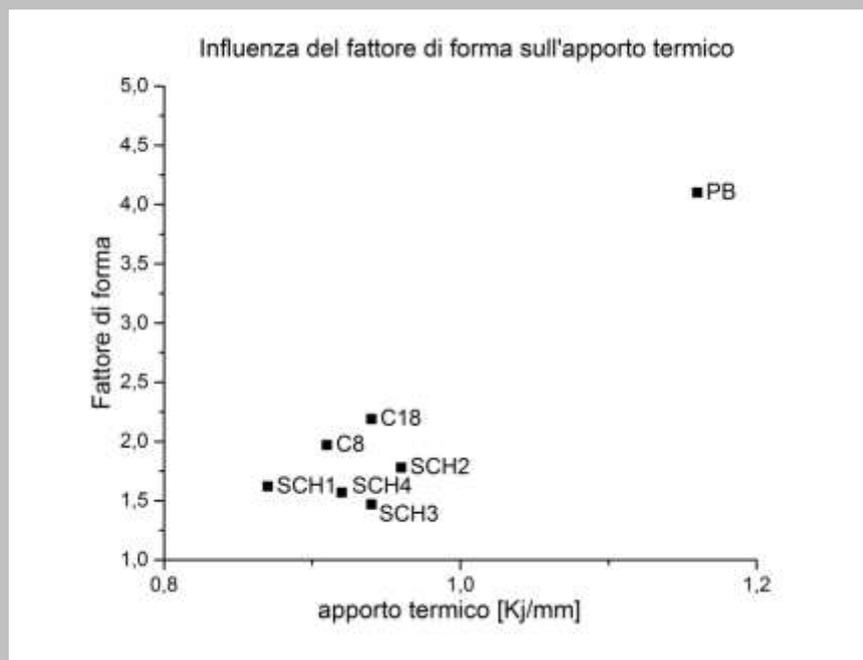


grafico 14 Influenza del Fattore di forma sul massimo Apporto Termico

^{xxxv} "Correlation between solidification parameters and weld microstructures"

S. A. David; J. M. Vitek.

^{xxxvi} To study the effect of welding parameters on weld bead geometry in SAW welding process Deepak Kumar Choudhary¹, Sandeep Jindal² and N.P.Mehta³ ¹Department of Mechanical Engineering, IET, Yamuna Nagar, Haryana, India ²Department of Mechanical Engineering MMEC, Mullana ³Director in MMEC, Mullana.

^{xxxvii} "Weldability of Intercritical Annealed Dual-Phase Steel with the Resistance Spot Welding Process "

^{xxxviii} Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel N. Murugan, R.S. Parmar.

^{xxxix} Submerged arc welding of high strength low alloy steels, T. Srihari – 1992.

^{xl} "Prediction and comparison of the area of the heat-affected zone for the bead-on-plate and bead-on-joint in submerged arc welding of pipes", V Gunaraja, N Muruganb .

^{xli} Submerged arc welding of high strength low alloy steels, T. Srihari – 1992.

Conclusioni

Obiettivo del lavoro di tesi svolto era la comprensione del ruolo dei principali parametri adottati in saldatura di tipo MAG, in modo da valutare qualitativamente l'effetto dei diversi gas utilizzati come protettori attivi.

Quando si parla di percentuale attiva del gas si parla della somma della CO₂ e dell'O₂ quando presente, mentre il parametro Ceq è pari alla somma del C inserito nella sua totalità e dell'O₂ inserito a metà, questo in virtù del fatto che vale la dissociazione



Gas	% attiva	Ceq
C18 18	18	18
C8 8	8	8
PB 3:2	5	7
SCH1 15:5	20	25
SCH2 5:5	10	15
SCH3 1:7	7	8
SCH4 2:14	14	16

Posto che il ruolo della stabilità del gas risulta fondamentale per avere buone penetrazioni ed ottime finiture superficiali, si può partire da questa caratteristica per valutarne la bontà nell'occasione in cui durante una prova si varia lo "stick out":

un gas stabile è in grado di sostenere rigidamente l'arco, concentrando l'apporto termico lungo l'asse dell'arco e favorendo soprattutto la penetrazione, mantenendo così contenuta la larghezza del cordone di saldatura.

Misurando quanto i gas siano capaci di mantenere un cordone stretto all'aumento di tensione dovuto allo stickout siamo in grado di stilare una graduatoria di stabilità:

(C18>C8)_{gas senza ossigeno} > (SCH1>SCH2>SCH3>PB)_{gas con ossigeno}

I gas con inferiori percentuali di gas attivo in miscela presentano le migliori performance di saldatura in condizioni di minimo gap; i tali condizioni si registrano le maggiori penetrazioni e le migliori adesioni dei giunti.

Per contro, sempre a parità di condizioni, per gap minore, i gas che danno i peggiori risultati sono C18 e SCH1 che hanno invece i Ceq maggiori, nonostante per essi si registri la maggiore penetrazione ed il più basso FF, prossimi entrambi ad 1.

Una possibile spiegazione è dovuta al fatto che minore è il C_{eq} , maggiore è la tendenza ad ottenere un giunto largo, molto riempito e poco penetrato; in questo modo si sfrutta la vicinanza tra i lembi per farli semplicemente fondere ed aderire.

Invece i gas molto attivi, penetrando molto, spingono radialmente i lembi che così si allontanano dal loro assetto iniziale.

Alla condizione di gap intermedio, quando già gli altri gas producono giunti con penetrazione non accettabile, il gas che lavora meglio è SCH4, ovvero quello che ha il maggior Ossigeno in composizione.

Si è appurato che l'ossigeno, benché sembri esser meno attivo della CO₂, in questa particolare condizione aumenta la stabilità della pozza fusa, confermando la condizione in cui i gas contenenti maggiori volumi di ossigeno risultano più stabili.

Si è osservato che il migliore gap di lavoro corrisponde ai 3 mm a parità delle altre condizioni di lavoro.

Al variare invece delle Velocità di Lavoro, va segnalato che nel caso in cui si lavori con PB, questo gas è dotato della minore attività rispetto agli altri e dunque non solo non riesce a stabilizzare l'arco alle stesse velocità degli altri gas di prova, ma necessita anche di un apporto termico molto maggiore per raggiungere la sua condizione di lavoro ottimale ovvero quella in cui si raggiunge il più alto fattore di forma.

Un'altra condizione osservata e valida per tutti i gas è quella in cui maggiore è il C_{eq} e minore è la corrente necessaria a raggiungere la condizione di massima larghezza.

Queste valutazioni inducono ad ottimizzare l'utilizzo del gas focalizzando l'attenzione su un ben determinato settaggio di parametri iniziali in quanto piccole variazioni di contenuto attivo modificano molto la risposta del gas.

