

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di ingegneria industriale

Corso di laurea in ingegneria dei materiali



**Tesi laurea specialistica :Caratterizzazione di saldature e trattamenti
post-saldatura in acciai speciali da costruzione**

Relatore: Prof. Carlo Mapelli

Co-relatore: Ing. Silvia Barella

Tesi di laurea di:

Luca Maria Roversi Matr. 718172

Anno Accademico 2012-2013

Indice Generale

SOMMARIO.....	7
1. GIUNTO SALDATO.....	9
1.1 PREPARAZIONE DEI LEMBI PER LA SALDATURA.....	12
1.2 PROCESSI DI SALDATURA.....	23
2. METALLURGIA DELLA SALDATURA.....	31
2.1 STRUTTURA DEL GIUNTO SALDATO.....	31
2.1.1 ZONA FUSA.....	32
2.3 ZONA TERMICAMENTE ALTERATA (ZTA).....	41
2.4 CICLI TERMICI E TRATTAMENTI TERMICI.....	45
3 DIFETTOLOGIA DEI GIUNTI SALDATI.....	51
4. NORMATIVE EUROPEE PER L'ESECUZIONE DELLA QUALIFICA DI SALDATURA.....	68
5. PROCEDURA SPERIMENTALE.....	71
5.1 DESCRIZIONE PROCESSI DI SALDATURA.....	71
5.2 DESCRIZIONE TRATTAMENTI TERMICI.....	71
5.3 PROVE.....	73
6. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	77
CONCLUSIONI.....	109

Elenco Figure

Figura 1: giunto saldato.....	9
Figura 2 : posizioni di saldatura.....	10
Figura 3: tipi di giunto.....	10
Figura 4: preparazione cinafrino a V.....	14
Figura 5: preparazione cianfrino a X.....	16
Figura 6: preparazione a “U” o a calice.....	17
Figura 7: giunto d’angolo.....	19
Figura 8: giuto a mezza V.....	20
Figura 9: giunto a K.....	21
Figura 10: preparazione a J.....	22
Figura 11: schema saldatura ad elettrodo.....	24
Figura 12: schema saldatura TIG.....	26
Figura 13: schema saldatura MIG MAG.....	28
Figura 14: saldatura ad arco sommerso.....	30
Figura 15: rappresentazione zone giunto saldato, MB, CS e ZTA.....	31
Figura 16: vista zona fusa.....	39
Figura 17: effetto passate multiple.....	41
Figura 18: caratterizzazione zona fusa.....	42
Figura 19: temperature in funzione dei cicli termici	47
Figura 20: rappresentazione cricca.....	52
Figura 21: rappresentazione cricca a caldo.....	53
Figura 22: rappresentazione cricca a freddo.....	54
Figura 23: rappresentazione cricca a freddo longitudinali	56
Figura 24: rappresentazione strappi lamellari.....	57
Figura 25: rappresentazione mancanza di fusione e mancata penetrazione.....	60
Figura 26: rappresentazione incollature.....	61
Figura 27: rappresentazione inclusioni solide.....	62
Figura 28: rappresentazione inclusioni gassose.....	63
Figura 29: eccesso di sovrametallo.....	64
Figura 30: errori di sovrametallo.....	65
Figura 31: incisioni marginali.....	65
Figura 32: irregolarità cordoni.....	66
Figura 33: rappresentazione prelievi prove su tallone di saldatura.....	69
Figura 34: rappresentazione step cooling.....	71
Figura 35: prelievo provini da tallone di saldatura.....	73

Figura 36: confronto resilienze ZTA dopo trattamento termico post saldatura (PWHT) tra i 3 materiali in esame.....	77
Figura 37: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di step cooling tra i 3 materiali in esame.....	78
Figura 38: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad elettrodo materiale 2 ¼ Cr.....	79
Figura 39: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale 2 ¼ Cr.....	80
Figura 40: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale Cr. V.....	81
Figura 41: confronto resilienze CS dopo trattamento termico post saldatura (PWHT) tra i 3 materiali in esame.....	82
Figura 42: confronto resilienze CS dopo trattamento di step cooling tra i 3 materiali in esame.....	83
Figura 43: confronto resilienze CS dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad elettrodo da 3.25 Ø materiale 2 ¼ Cr.....	84
Figura 44: confronto resilienze CS dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad elettrodo da 4 Ø materiale 2 ¼ Cr.....	85
Figura 45: confronto resilienze CS dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale 2 ¼ Cr.....	86
Figura 46: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale Cr. V.....	87
Figura 47: confronto snervamenti tra i diversi materiali dopo step cooling e dopo PWHT.....	89
Figura 48: confronto trazioni tra i diversi materiali dopo step cooling e dopo PWHT.....	89
Figura 49: schema misurazione durezza.....	90
Figura 50: durezza Cr.V.....	90
Figura 51: durezza Cr.V. in posizione A.....	91
Figura 52: durezza Cr.V. in posizione B.....	91

Figura 53: durezze 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso.....	92
Figura 54: durezze 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso in posizione A.....	92
Figura 55: durezze 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso posizione B.....	93
Figura 56: durezze 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo.....	93
Figura 57: durezze 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo in posizione A.....	94
Figura 58: durezze 2 ¼ Cr. saldato elettrodo posizione B.....	94
Figura 59: Materiale base Cr.V. dopo PWHT.....	95
Figura 60: zona termicamente alterata Cr.V. dopo PWHT.....	95
Figura 61: centro saldatura Cr.V. dopo PWHT.....	96
Figura 62: Materiale base 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso dopo PWHT....	97
Figura 63: zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso dopo PWHT.....	97
Figura 64: centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso dopo PWHT..	98
Figura 65: materiale base 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo dopo PWHT.....	99
Figura 66: zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo dopo PWHT.....	99
Figura 67: centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo dopo PWHT.....	100
Figura 68: centro saldatura Cr.V. dopo step cooling.....	100
Figura 69: zona termicamente alterata Cr.V. dopo step cooling.....	100
Figura 70: centro saldatura Cr.V. dopo step cooling.....	101
Figura 71: materiale base 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso dopo step cooling.....	102
Figura 72: zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso dopo step cooling.....	103
Figura 73 centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso dopo step cooling.....	104
Figura 74 materiale base 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo dopo step cooling.....	105
Figura 75 zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo dopo step cooling.....	105
Figura 76 centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo dopo step cooling....	106

Elenco tabelle

Tabella 1: prove minime richieste per l'esecuzione di una qualifica di procedimento secondo norma EN 15614.....	68
Tabella 2: range applicazioni norma EN 15514.....	70
Tabella 3: riepilogo materiali a disposizione.....	72

SOMMARIO

Lo scopo di questa tesi è la caratterizzazione di due materiali speciali da costruzione e l'effetto dei trattamenti termici post saldatura su di essi. Questi materiali sono molto usati nella costruzione di apparecchiature a pressione nel mondo oil & gas, i due materiali trattati in questa tesi sono:

- Acciaio 2 ¼ Cr
- Acciaio Cr. V.

Questi due materiali sono molto utilizzati nel campo oil & gas per le loro ottime proprietà meccaniche ad alta temperatura. Mentre il 2 ¼ Cr è ormai diventato un comune materiale da costruzione, il Cr. V. è un materiale che solo recentemente è entrato nella gamma di materiali utilizzati per la costruzione di apparecchi in pressione.

In questa tesi verranno illustrati: i processi di saldatura utilizzati nella caldareria, la struttura di un giunto saldato, la preparazione dei cianfrini di un giunto saldato, la possibile difettologia legata al giunto saldato, il metodo di qualifica preliminare della saldatura secondo le normative di riferimento (PQR), ed infine verranno effettuate prove sperimentali su 2 ¼ Cr e Cr.V.

Su tali giunti si realizzeranno prove meccaniche e metallografiche per determinare la bontà dei processi di saldatura sottoposti ai classici trattamenti termici post saldatura; inoltre sono state verificate anche le proprietà dopo step cooling. Con questa ultima prova simula il giunto in esercizio, quindi fornisce dati molto interessanti che vanno a dare un'idea di come si potrebbe trovare il giunto dopo molte ore di lavoro in campo. I risultati ottenuti sono molto buoni e superano le minime caratteristiche meccaniche necessarie da ASME II parte A.

parole chiave: saldatura, trattamento termico, acciai legati, step coling, qualifica di procedimento

Purpose of this thesis work is analyze two different special material used for pressure equipments. One of objective of this work is to verify the effect on material after thermal cycle after welding.

The two material are:

- 2 ¼ Cr. Steel
- Cr.V. steel

This material are very used in oil & gas industries because this material have a great proprieties at high temperature. The 2 ¼ Cr. steel is very commune construction material, Cr.V. steel is new material in the last years start to be used for pressure equipment.

In this thesis will be described welding process, geometry of welding joints, preparation of welding joints, defects on welding joint, method to qualify new welding process according to EN code and experimental test on 2 ¼ Cr. Steel and Cr.V. steel.

On weld test coupon will be carry out mechanical test, micrographic test in order to check the status of welding process. This test will be performed after post welding treatment and after step cooling. With step cooling treatment will be check the brittles of material after and can give an idea of status of material after many hours of work in plant.

Key words: welding, heat treatment, step cooling, alloy steel, welding process record

1. GIUNTO SALDATO

La saldatura è 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. Il metallo d'apporto viene distribuito allo stato fuso tra i lembi opportunamente preparati (cianfrinatura) dei pezzi da collegare. I lembi, o bordi, sono le superfici che in tutta la loro lunghezza sono interessate nella saldatura dei pezzi; la loro preparazione è eseguita dando la forma geometrica più opportuna, in funzione soprattutto dello spessore da saldare, per facilitare l'esecuzione della saldatura. Il materiale dei pezzi da collegare si chiama materiale base. Il bagno di fusione è la parte di metallo che durante la fusione si trova allo stato liquido.

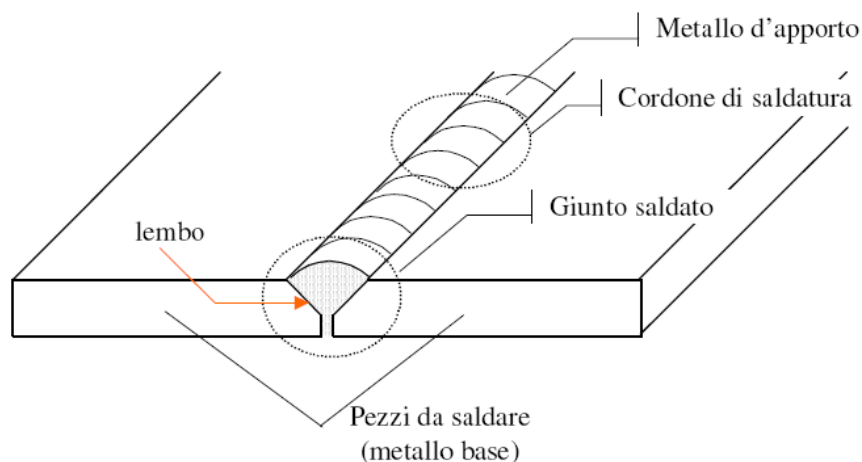


Figura 1: giunto saldato

Il cordone di saldatura è costituito da tutto il metallo, sia di base sia d'apporto, solidificati per raffreddamento dopo essere stati fusi nella saldatura. Il cordone di saldatura è l'elemento essenziale del giunto saldato e la sua deposizione determina la tecnica di saldatura vera e propria. In base alla posizione del cordone di saldatura (Figura 2) si distinguono le varie posizioni di saldatura:

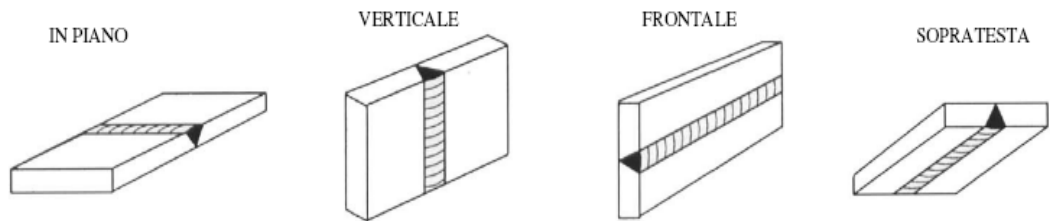


Figura 2 : posizioni di saldatura

Il risultato dell'operazione di saldatura si chiama giunto saldato. In base alla posizione relativa dei pezzi da saldare si distinguono i seguenti vari tipi di giunto (Figura 3).



Figura 3: tipi di giunto

L'attitudine dei metalli a saldarsi si chiama saldabilità: 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:

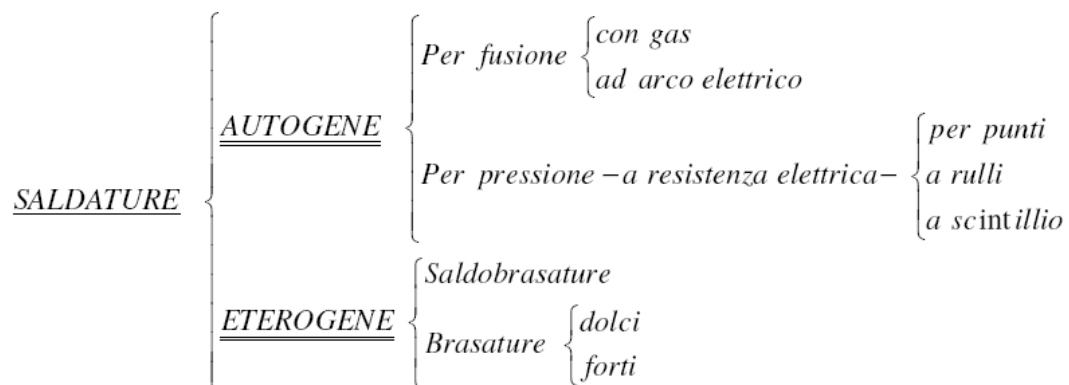
- la temperatura di fusione del suo ossido è minore di quella del metallo base;
- la massa volumica dell'ossido è minore di quella del metallo fuso in modo che galleggi.

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.

La classificazione dei processi di saldatura può essere fatta nel modo seguente:



SALDATURE AUTOGENE quando il metallo base prende parte, fondendo, alla formazione del giunto; il metallo d'apporto può non esserci a secondo del procedimento e dello spessore. Quando è presente è metallurgicamente simile al metallo base, poiché si tende ad ottenere nella giunzione una continuità strutturale e una resistenza meccanica pari a quella dei pezzi da saldare.

A seconda dello stato fisico in cui si trovano i pezzi al momento della loro unione si hanno:

- SALDATURE PER FUSIONE quando i pezzi vengono uniti allo stato liquido. In base a come viene prodotto il calore necessario per portare a fusione il metallo si distinguono saldature a gas o ad arco.
- SALDATURE A PRESSIONE quando i pezzi vengono collegati non allo stato fuso, ma quando si trovano in uno stato pastoso. Tale stato viene raggiunto, generalmente, per effetto Joule, dal passaggio di una corrente elettrica.

SALDATURE ETEROGENE quando il metallo base non prende parte alla formazione del giunto. Il cordone di saldatura è formato dal solo metallo d'apporto, sempre presente, diverso dal metallo base e con temperatura di fusione inferiore. A seconda di come avviene la formazione del cordone di saldatura si hanno:

- SALDOBRASATURE quando i lembi dei pezzi vengono preparati con cianfrinature. Il metallo d'apporto fondendo riempie il cianfrino costituendo il cordone di saldatura.
- BRASATURE quando i pezzi da saldare sono semplicemente appoggiati l'uno sull'altro: lo spazio capillare che rimane tra i due viene riempito dal metallo d'apporto fuso. In questo caso il giunto è costituito da uno strato sottilissimo di metallo d'apporto che ha formato una lega col metallo base.

1.1 PREPARAZIONE DEI LEMBI PER LA SALDATURA

Uno dei requisiti fondamentali che si richiede ad un giunto saldato è che interessi totalmente lo spessore dei pezzi da collegare ovvero, che si realizzi quella che un gergo si definisce la “piena penetrazione”. Se lo spessore è sottile, la penetrazione del procedimento (determinata dalle caratteristiche dell'arco elettrico e dai parametri operativi) può direttamente garantire la deposizione di un cordone passante anche operando lembi retti o accostati. Oltre un certo spessore diviene però necessario una preparazione tra i lembi da unire; un vano (smusso o cianfrino) di forma e dimensioni opportune,

entro il quale si possono depositare i cordoni delle varie passate successive. Si hanno vari tipi di smussi che, a seconda della forma, prendono il nome di preparazione: a “V”, ad “U”, a “X” ad “Y” ecc. La geometria della preparazione dipende non solo dallo spessore dei pezzi ma anche dal procedimento di saldatura, dal tipo di giunto (se testa a testa oppure d’angolo), dalla natura del metallo base e dalla posizione di lavoro. Non è quindi possibile dare una regola per come preparare i lembi ma dovremo analizzare caso per caso le differenti condizioni.

Giunti di testa

Per materiali di piccolo spessore, generalmente fino a 3 mm, si può saldare in unica passata fra lembi non smussati, “retti”, distanti indicativamente 3 mm. Ovviamente i parametri elettrici e la velocità di avanzamento dovranno essere opportunamente modulati per garantire una piena penetrazione lungo tutto il giunto. L’impiego di procedimenti di saldatura a forte penetrazione come ad esempio la saldatura plasma, permette di saldare a lembi retti spessori fino a 8 ÷ 10 mm in funzione delle caratteristiche dell’impianto e dei materiali da unire. Ovviamente fra tutte le preparazioni, quella a lembi retti è la più economica. Le preparazioni dei lembi possono essere ottenute mediante taglio termico o lavorazione meccanica. Nel caso del taglio termico, deve essere sempre prevista una asportazione della zona termicamente alterata causata dal taglio mediante molatura. Prima della saldatura, i lembi dovrebbero sempre essere controllati con liquidi penetranti o particelle magnetiche per rilevare eventuali difettologie che potrebbero incidere negativamente sulla qualità del giunto finito. L’accuratezza della preparazione dei lembi è fondamentale per il buon esito della saldatura.

In particolare:

- Si dovranno controllare le dimensioni dei raggi, delle spalle e degli angoli di apertura per consentire l’accesso del elettrodo o del filo di saldatura con la giusta inclinazione onde evitare difetti operativi;
- Si dovrà verificare che la forma della radice del cianfrino sia conforme a quanto previsto per garantire, con il procedimento selezionato, la piena penetrazione. Da questo punto di vista, è

importante che l'allineamento dei lembi sia il più accurato possibile per ottenere una prima passata di forma regolare ben raccordata con i due lembi di materiale base.

Per i motivi suddetti, prima di iniziare la saldatura è necessario eseguire un controllo visivo della preparazione dei lembi per verificarne la conformità alla forma e alle dimensioni previste in fase di progettazione della saldatura.

Preparazione a "V"

Non è possibile dare delle regole precise ma, in genere, per spessori compresi tra 5 e 20 mm, si adotta la preparazione dei lembi a forma di "V" (Figura 4). Le grandezze importanti per questo tipo di preparazione sono:

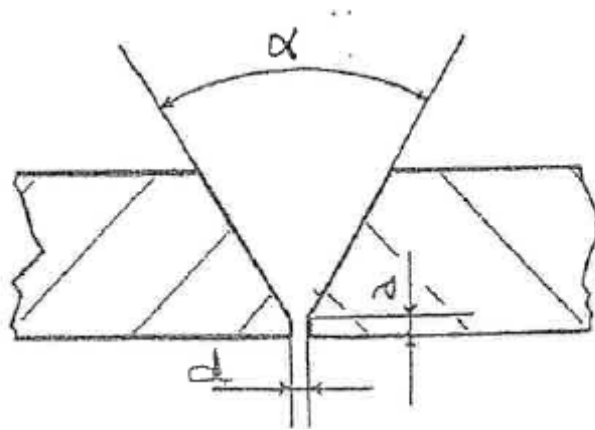


Figura 4: preparazione cinafrino a V

- Angolo complessivo di apertura (α) generalmente può variare tra 50° e 75° in funzione dello spessore, del tipo di materiale, del procedimento e della posizione di saldatura
- Spessore della spalla diritta (a) in funzione del procedimento di saldatura della prima passata al vertice può essere di 1 o 1.5 mm.
- Distanza tra i lembi (d) in funzione del procedimento di saldatura e della posizione di esecuzione della prima passata, può variare da 2.5 mm fino a 3.5 mm.

Generalmente la prima passata viene eseguita con elettrodi rivestiti di piccolo diametro o con procedimento Tig che permette d'ottenere una penetrazione migliore e più regolare lungo tutto il giunto. Il riempimento del giunto può essere eseguito con procedimento ad elettrodo rivestito o per spessori significativi e saldature in posizione piana, con l'arco sommerso.

La prima passata può lasciare, specialmente se eseguita con elettrodi rivestiti, una certa mancanza di penetrazione. Per ovviare a questo problema si procede a solcare (mediante molatura) al rovescio e riprendere il giunto così da garantire la completa penetrazione. Dopo molatura al rovescio e prima di riprendere la saldatura, lo scavo deve essere controllato con liquidi penetranti o, se il materiale lo consente, con particelle magnetiche.

La preparazione a "V" è spesso usata per la saldatura dei tubi. Non essendo in tal caso possibile la ripresa al rovescio, lo smusso deve essere adeguatamente dimensionato affinché il saldatore possa accedere alla radice con facilità, specialmente se il giunto non può essere posto con asse orizzontale rotante (saldatura in piano).

Preparazione a "X"

Per spessori mediamente superiori a 15 mm, allorché il giunto è accessibile da entrambe le parti, conviene passare dalla preparazione a "V" a quella a "X" (Figura 5). Ne deriva una importante economia nel volume del materiale depositato nonché una compensazione alle deformazioni angolari.

Per tutti i giunti che devono essere radiografati e controllati mediante esame ultrasonoro, è opportuno solcare (in genere mediante molatura) la prima passata al rovescio onde evitare mancanza di penetrazione con eventuali inclusioni di scoria al vertice. Dopo molatura al rovescio e prima di riprendere la saldatura, lo scavo deve essere controllato con liquidi penetranti o, se il materiale lo consente, con particelle magnetiche.

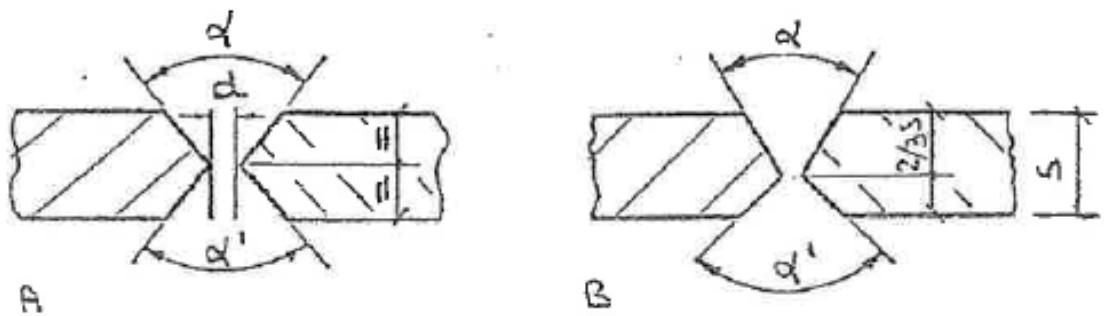


Figura 5: preparazione cianfrino a X

La preparazione ad "X" normale è simmetrica, cioè con valori uguali per gli angoli di apertura dei due smussi e con il vertice esattamente a metà dello spessore. La spalla sarà uguale a zero, poiché il forte valore dell'angolo solido costituisce garanzia sufficiente contro gli sfondamenti. La distanza tra i lembi può essere di 3 ÷ 4 mm in base al procedimento di saldatura e alla posizione. La preparazione ad "X" può anche essere dissimmetrica ovvero con angoli d'apertura diversi per i due smussi e con il vertice posizionato non a metà spessore. La preparazione a "X" permette l'impiego di tutti i principali procedimenti di saldatura. Considerando che generalmente viene applicata a spessori medio grossi, deve essere opportunamente adattata all'impiego del

procedimento ad arco sommerso fin dalla prima passata. Per questo motivo, lo spessore della spalla non può essere zero ma dovrà essere stabilito in base ai parametri di saldatura che s'intendono utilizzare durante l'esecuzione della passata al vertice. Per una giunzione in arco sommerso a filo singolo da 4 mm di diametro, lo spessore della spalla varia in funzione di corrente, tensione e velocità d'avanzamento, da 3 a 5 mm e per un adeguato sostegno del bagno di saldatura e del flusso di protezione, i lembi devono essere accostati. In questi casi il valore dell'angolo del cianfrino deve essere incrementato per permettere l'accesso e il corretto posizionamento del filo nonché una facile rimozione della scoria. Indispensabile in questa configurazione è la solcatura al rovescio prima della ripresa della saldatura dal lato opposto.

Preparazione a "U" o a calice

Per giunti inaccessibili al rovescio, non essendo possibile impiegare lo smusso a "X", si utilizza la preparazione a "V". Oltre però un certo spessore (circa 20 mm) anche il volume di materiale depositato aumenta e, oltre un certo valore, s'impone la preparazione a "U" (detta anche a bicchiere). Questa forma si ispira al concetto di offrire uno spazio adeguato per le passate di fondo pur assicurando la massima economia di riporto. La preparazione a "U" (Figura 6) non può essere realizzata mediante ossitaglio ma richiede macchine utensili (fresatura o tornitura) risultando più costosa. Il vantaggio globale della preparazione a "U", tenuto conto della più costosa lavorazione di macchina, si può ritenere cominci sui 25 mm.

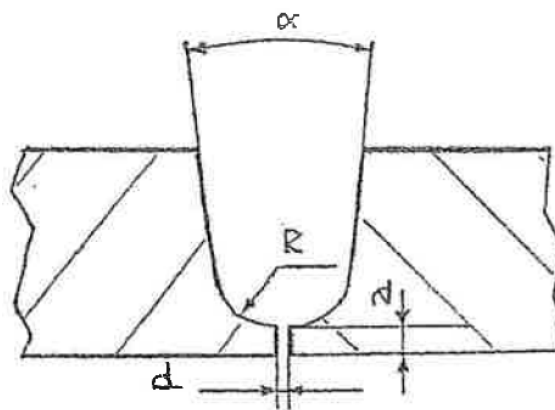


Figura 6: preparazione a "U" o a calice

Le grandezze fondamentali di questa configurazione sono:

Raggio di fondo cianfrino (R): questa dimensione viene stabilita in base al procedimento che vogliamo applicare per il riempimento del giunto dopo aver eseguito la prima passata di penetrazione e alcune passate di sostegno. In genere il procedimento che si usa per riempire, considerati gli spessori, è l'arco sommerso; perciò la dimensione del raggio dovrà essere tale da permettere il corretto posizionamento della punta guidafile del nostro impianto di saldatura. Si consideri che il raggio non può nemmeno essere troppo piccolo, perché altrimenti sarebbe impossibile per il saldatore eseguire adeguatamente la prima passata al vertice. Le dimensioni più comuni sono 6 mm, 8 mm e 10 mm.

Spessore della spalla (a): data la presenza del raggio, lo spessore della spalla viene in genere maggiorato rispetto alla preparazione a "V" per evitare sfondamenti in prima passata. La dimensione raccomandata è di $2 \div 2.5$ mm.

Angolo di apertura del cianfrino (α): viene stabilito in relazione allo spessore da saldare, al procedimento di saldatura e al tipo di materiale. Può variare quindi da pochi gradi fino a raggiungere i 20° per gli spessori inferiori.

Come si è detto la preparazione a "U" viene in linea di massima impiegata nel caso di saldature di chiusura di componenti a pressione dove non sia possibile l'accesso al rovescio; per questo motivo l'allineamento dei lembi alla radice deve essere estremamente accurato.

Preparazione ad angolo

Ove non sia richiesta la penetrazione, si salda in angolo (Figura 7) senza smusso. Il bordo retto dell'elemento discontinuo dovrà essere a contatto con la faccia della lamiera continua (distanza massima di 1 o 2 mm).

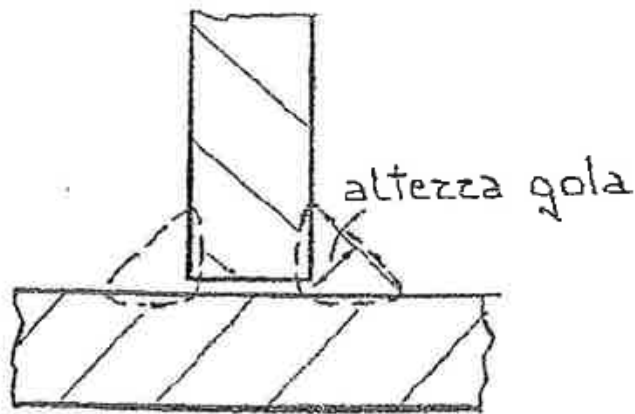


Figura 7: giunto d'angolo

I cordoni vengono di solito dimensionati in modo tale che l'altezza di gola del cordone (o la somma delle due gole, se si saldano entrambi gli angoli) sia pari almeno al minore dei due spessori collegati.

Le regole precise di calcolo e di proporzionamento dei cordoni d'angolo sono indicate dalle Normative di progettazione

Preparazione a mezza V

Allorché le condizioni d'esercizio del giunto richiedono la completa penetrazione, si dovrà smussare il bordo dell'elemento discontinuo

Per spessori fino a circa 15 mm, bene si presta la preparazione a 1/2 V (Figura 8), Poiché l'angolo solido è di soli 40°, sarà necessario lasciare una spalla in circa 2 mm per evitare lo sfondamento dello spigolo vivo con incollatura sull'elemento continuo. La distanza fra i lembi sarà di 2 ÷ 3 mm. Per i giunti più impegnativi, conto tenuto che anche in questo caso, come sempre, la perfetta penetrazione della prima passata è praticamente impossibile, sarà bene provvedere alla solcatura con ripresa al vertice.

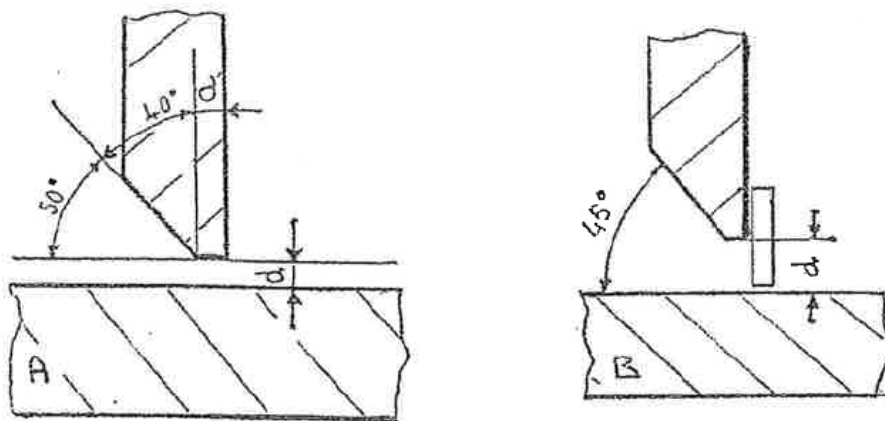


Figura 8: giunto a mezza V

Preparazione a V con sostegno

Se accettato dalle Normative di riferimento e dalle condizioni di servizio della nostra costruzione, ove il vertice non sia accessibile per la solcatura con ripresa al rovescio mentre si presenta necessario assicurare la penetrazione, si può ricorrere all'accorgimento di sistemare un sostegno al rovescio .

In questo caso, l'angolo di smusso sarà di 45° mentre, le distanze fra i lembi avranno i valori variabili da 4 a 8 mm in funzione dello spessore e della posizione di saldatura. Se anziché di 45°, si fa un angolo di 25°, le distanze fra i lembi dovranno essere maggiorate di circa 2 mm.

Preparazione a K

Allorché il giunto sia accessibile da entrambe le parti, oltre i 12 mm di spessore conviene abbandonare la preparazione a $1/2 V$ per adottare, in sua vece, la preparazione a K (Figura 9). Il volume di metallo di riporto si riduce a circa la metà e si ha inoltre il vantaggio della compensazione delle deformazioni angolari.

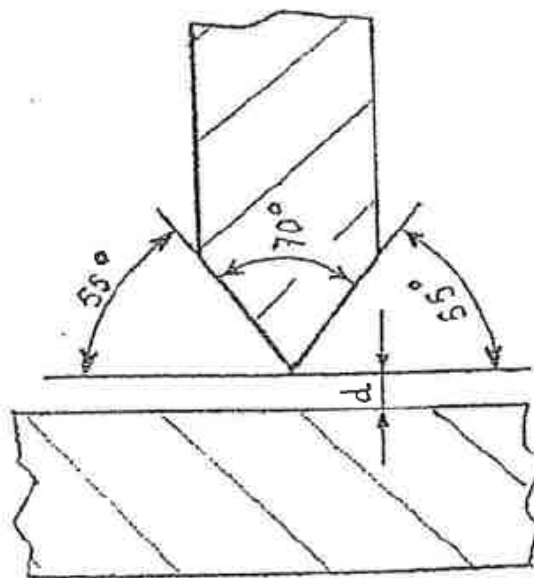


Figura 9: giunto a K

L'angolo di smusso può essere di 55° da entrambe le parti, si da lasciare un angolo solido di 70° . Il valore dell'angolo solido è così sufficientemente ampio da non lasciare rischio di sfondamenti e, nello stesso tempo, autorizza ed anzi impone che la spalla sia uguale a zero.

La distanza fra i lembi potrà variare da 2 a 4 mm in funzione della posizione di saldatura. L'ottenimento di una perfetta saldatura al vertice, richiede anche per questa preparazione la solcatura di ripresa mediante molatura.

Preparazione a J

In perfetta analogia con le ragioni che, nel caso dei giunti di testa, abbiamo visto militare a favore della preparazione ad U, si ricorrerà, per i giunti a T, inaccessibili al rovescio e di forte spessore, alla preparazione a J (Figura 10).

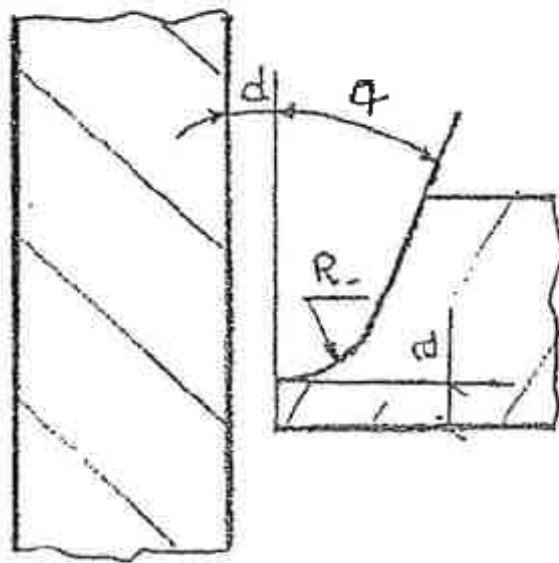


Figura 10: preparazione a J

Il valore del raggio può variare da 10 a 12 mm, l'inclinazione del cianfrino da 20° a 40°, la spalla da 2 a 3 mm e la distanza tra i lembi da 3 a 4 mm.

1.2 PROCESSI DI SALDATURA

Qui di seguito verranno descritti i principali processi di saldatura utilizzati nell'ambito della caldareria industriale

Saldatura ad elettrodo

È il procedimento di saldatura manuale più diffuso (Figura 11). Il calore necessario alla fusione del materiale base è prodotto da un arco elettrico che scocca tra un elettrodo metallico e il metallo base. L'elettrodo fusibile ha un'anima di materiale metallurgicamente simile al metallo base ed è ricoperto da un opportuno rivestimento che sviluppando gas (idrogeno, anidride carbonica) protegge l'arco e il cratere di fusione. Il saldatore tenendo in mano la pinza porta elettrodo, dirige e guida l'arco, che viene innescato toccando il metallo base con la punta dell'elettrodo e subito ritirandolo ad una distanza di qualche millimetro. Al momento del contatto scorre nel circuito elettrico una corrente di elevata intensità (di corto circuito) che surriscalda notevolmente elettrodo e metallo base; inoltre provoca una ionizzazione dell'aria circostante con innesco dell'arco elettrico. Il trasferimento del metallo d'apporto avviene sotto forma di gocce che passano attraverso l'arco. Le forze che provocano questo passaggio sono: peso proprio, forze elettromagnetiche, azione dei gas che si sviluppano dal rivestimento. I lembi dei pezzi da saldare devono essere opportunamente preparati per assicurare la giusta penetrazione e la facilità di saldatura. Questo metodo di saldatura è adatto per acciai non legati o basso legati, acciai inossidabili, leghe leggere, ghisa, rame, nichel e sue leghe.

Non viene usato per leghe basso fondenti, dato l'intenso calore generato dall'arco, e nel caso di metalli reattivi (titanio, zirconio), in quanto troppo sensibili alla contaminazione da parte dell'ossigeno. Inoltre il metodo non si presta per spessori molto sottili (minori di 2 , 3 mm), in quanto è difficile saldare senza provocare fori nello spessore. La saldatura ad arco con elettrodo rivestito è particolarmente usata per effettuare cordoni di limitata lunghezza, nelle operazioni di manutenzione e riparazione, e per costruzioni in cantiere. L'attrezzatura è relativamente semplice, economica e portatile.

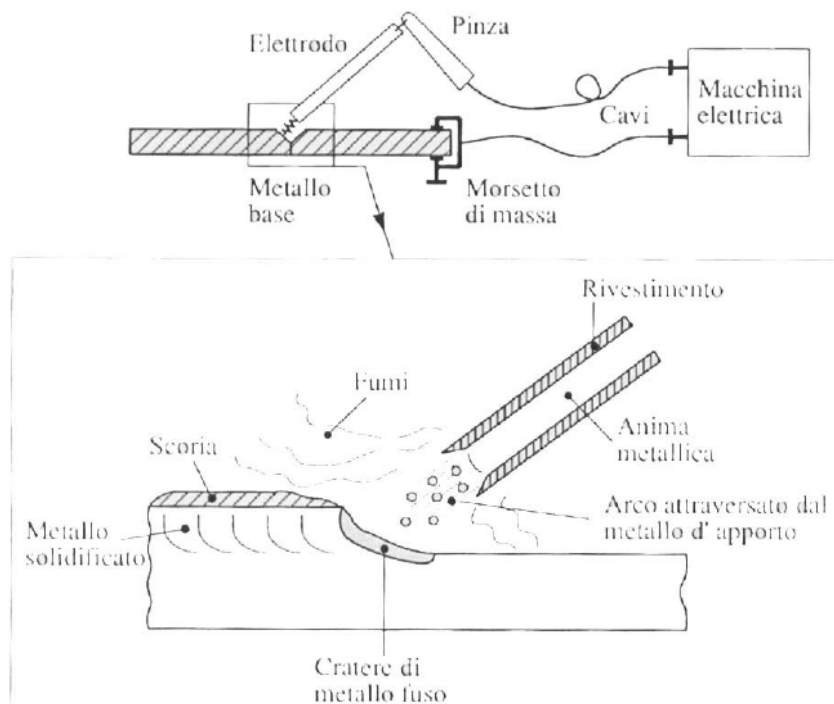


Figura 11: schema saldatura ad elettrodo

Saldatura TIG

Il nome deriva dall'acronimo "Tungsten Inert Gas" (Figura 12). È un metodo di saldatura ad arco elettrico in atmosfera inerte. L'arco, che scocca tra l'elettrodo e il metallo base, è protetto dal gas (argon, elio o una miscela dei due gas) che fuoriesce dalla pistola, dalla cui estremità sporge l'elettrodo. L'arco viene acceso da una scintilla pilota che provocando la ionizzazione del gas protettivo, lo rende conduttore. Per l'alta temperatura di fusione del tungsteno, l'elettrodo non fonde (saldatura con elettrodo infusibile) per cui non prende parte al processo di fusione.

Il metallo d'apporto, presente se lo spessore dei pezzi è maggiore di circa 1 mm, viene immesso nella zona dell'arco elettrico e fondendo andrà a costituire il cordone di saldatura. Il metallo d'apporto ha la forma di bacchette quando si salda manualmente, mentre ha la forma di filo quando si salda con sistemi automatici. Tutta la zona di saldatura: arco, elettrodo, metallo base fuso, metallo d'apporto, si trova immersa in un ambiente inerte costituito dal gas protettivo; questo fatto impedisce l'ossidazione del giunto saldato da parte dell'atmosfera e permette così anche la saldatura di materiali reattivi.

L'elettrodo può essere costituito:

- da tungsteno puro, usato nelle saldature meno critiche, dove è sopportabile il rischio di contaminazione del cordone di saldatura; sono tra gli elettrodi utilizzati quelli più economici;
- da una lega di tungsteno con 0,15 ÷ 0,4 % di zirconio, usato quando è necessario saldare con correnti più basse e con un arco più stabile (saldatura di spessori sottili);
- da una lega di tungsteno con 1 ÷ 2 % di torio, usato quando si salda in corrente alternata; questi elettrodi hanno caratteristiche intermedie fra i primi due citati.

La saldatura TIG permette di ottenere saldature di elevata qualità su quasi tutti i materiali, ad eccezione dei basso fondenti: stagno, piombo, zinco. È particolarmente adatta per le leghe di alluminio, di magnesio e dei materiali reattivi come titanio e zirconio. È molto utilizzata per la saldatura di spessori sottili. Nel campo di medi e grossi spessori è possibile il suo utilizzo, ma non è economicamente conveniente rispetto ad altri metodi (MIG e arco sommerso) caratterizzati da costi orari minori, grazie ai tempi minori per formazione del cordone di saldatura.

Il processo TIG è costoso sia per le macchine e le attrezzature utilizzate, sia per l'elettrodo di

tungsteno, ma soprattutto per il costo del gas protettivo utilizzato; pertanto questo metodo è

riservato ai materiali più pregiati e agli spessori più sottili.

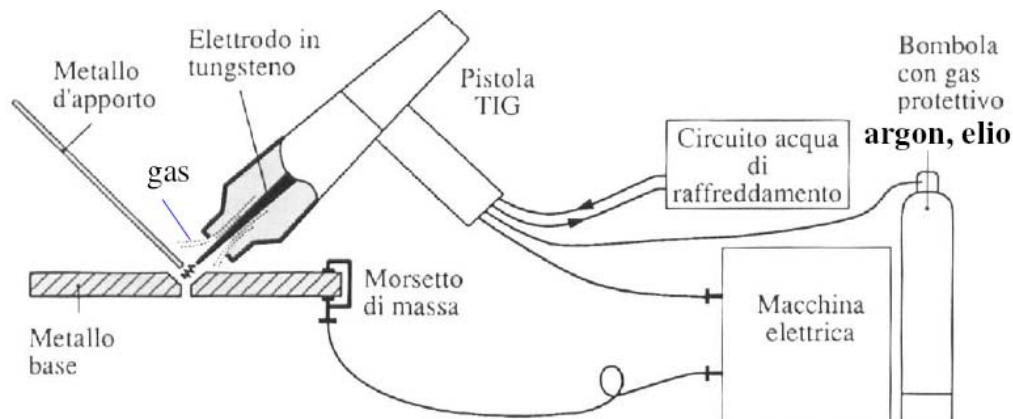


Figura 12: schema saldatura TIG

Saldatura MIG MAG

I nomi derivano dagli acronimi “Metal Inert Gas” e “Metal Active Gas”(Figura 13) . Il processo di saldatura MIG e MAG (o a filo continuo) è molto simile a quello TIG: da esso differisce soprattutto per il fatto di avere un elettrodo fusibile, sotto forma di filo, che costituisce così anche il metallo d’apporto.

La differenza tra MIG e MAG consiste essenzialmente per il tipo di gas impiegato ed ovviamente nel campo d’impiego: nella MIG si utilizza argon o elio che garantiscono una efficace protezione dell’arco e della zona di fusione dal contatto con l’atmosfera, ma sono costosi; nella MAG utilizza l’anidride carbonica (CO₂), molto economica, o la miscela Shutgas (80% argon, 15% CO₂, 5% ossigeno), più costosa, ma che garantisce risultati migliori.

Il saldatore impugna la pistola (raffreddata da un sistema di circolazione d’acqua) e indirizza la pistola sul metallo base: il metallo d’apporto, sotto forma di filo, è avvolto in una bobina. Il filo viene fatto scorrere, a velocità costante, tra due rulli di pressione comandati da un motorino elettrico. Un sistema di regolazione fa in modo che l’avanzamento del filo ne compensi la fusione.

Il filo esce dall’ugello della pistola completamente circondato dal gas protettivo; in tal modo l’arco elettrico e la zona dove avviene la fusione sono completamente isolati dall’atmosfera. La saldatura può essere fatta manualmente: in questo caso il saldatore ha il controllo dell’inizio e della fine della saldatura tramite un pulsante sulla pistola. Può anche essere completamente automatica: in questo caso la pistola è fissa su un supporto e con

dispositivi automatici viene realizzato il movimento relativo tra pistola e pezzi da saldare. Il trasferimento del metallo d'apporto al metallo base può avvenire in vari modi, in funzione della tensione dell'arco e della corrente che lo attraversa.

- **Modalità “short arc”**: si verifica con tensioni d'arco basse (< 20 volt) e basse correnti. Il trasferimento avviene con formazione di grosse gocce che si allungano verso il metallo base, creano un corto circuito e spengono momentaneamente l'arco; il fenomeno si ripete da 20 a 200 volte al secondo. La solidificazione del cordone di saldatura è rapida e quindi questa modalità è adatta per la saldatura in qualunque posizione e per gli spessori sottili. Ha come svantaggio la bassa deposizione oraria, quindi tempi più lunghi.
- **Modalità “spray arc”**: si verifica con tensioni d'arco superiori a 25 volt ed elevate correnti. Il trasferimento avviene sotto forma di un elevato numero di gocce di piccole dimensioni che attraversano l'arco senza spegnerlo. La fluidità del bagno di fusione è elevata, la solidificazione del cordone di saldatura lenta; per tali motivi è adatta solo per la saldatura in piano e per gli spessori grossi. Ha come vantaggio la elevata deposizione oraria, quindi tempi di esecuzione bassi.

La saldatura MIG permette di saldare in modo semiautomatico o automatico tutte le leghe d'importanza commerciale: acciai, acciai inossidabili, leghe leggere, leghe del rame. La saldatura MAG si utilizza per la saldatura di acciai dolci (basso tenore di carbonio) per l'economicità del gas che utilizza. Rispetto alla saldatura con elettrodo rivestito

- ha una maggiore penetrazione;
- una maggiore velocità d'esecuzione per la presenza di un elettrodo continuo e per l'assenza di scoria;
- richiede una minore professionalità dell'operatore, date le caratteristiche di controllo automatico dei parametri che regolano il processo.

Per contro le macchine sono costose, meno portatili e più complesse. Non è impiegabile nelle saldature in zone difficili da raggiungere. La rapidità di

raffreddamento del cordone dovuto all'assenza di scorie e alla corrente del gas può creare problemi nella saldatura di acciai a medio tenore di carbonio.

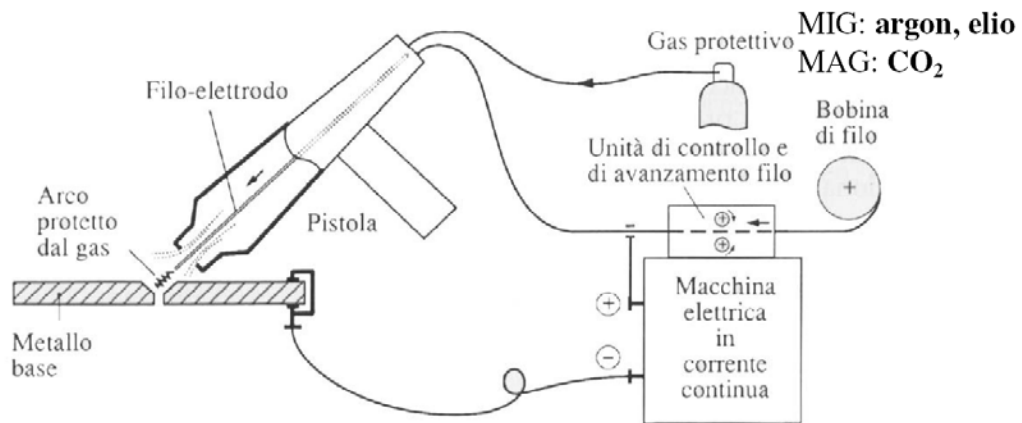


Figura 13: schema saldatura MIG MAG

Saldatura ad arco sommerso

È un procedimento automatico d'impiego molto diffuso nella esecuzione di saldature in serie, in quanto permette di ridurre notevolmente i tempi di saldatura, su una vasta gamma di spessori (figura 15). La saldatura viene eseguita generando un moto relativo tra la testa di saldatura e i pezzi da saldare, che normalmente sono in posizione piana. L'elettrodo è costituito da un filo metallurgicamente simile al metallo base; il suo diametro varia da 2 a 8 mm, in funzione dello spessore da saldare; inoltre è ramato per migliorare il passaggio di corrente. Il filo costituisce il metallo d'apporto, è avvolto su un bobina e un gruppo motorizzato di rulli di trascinamento provvede al suo avanzamento a velocità controllata.

L'arco, che scocca tra il filo e il metallo base, è ricoperto da una sostanza granulare chiamata flusso; quest'ultimo viene distribuito da una tramoggia che fa parte della testa di saldatura. Durante la saldatura sia l'arco elettrico che il bagno di fusione sono continuamente ricoperti dal flusso, pertanto l'arco non è visibile dall'esterno (arco sommerso).

Il flusso è composto da una miscela di ossidi, carbonato, silicati e ferroleghie; le sue funzioni sono:

- proteggere il metallo fuso dal contatto con l'atmosfera, così da limitare al minimo i fenomeni di ossidazione e di nitrurazione;
- limitare la velocità di raffreddamento del cordone con vantaggi metallurgici;
- può reagire chimicamente con le impurezze del metallo base (generalmente zolfo e fosforo) trasformandole in scoria.

Parte di questo flusso fonde e solidifica sopra il cordone: quella parte che rimane granulare viene recuperata tramite aspirazione e riutilizzata.

Il risultato di questo processo è un cordone di alta qualità e forma regolare

Il procedimento di saldatura è caratterizzato da alta penetrazione ed elevata deposizione oraria, così da permettere anche la saldatura di grossi spessori in tempi modesti. La posizione di saldatura, causata dalla presenza del flusso, è limitata a quella in piano o d'angolo. Il giunto che si ottiene è di elevata qualità; il cordone di saldatura è liscio, uniforme, grazie alla completa automazione del metodo. Le deformazioni dei pezzi sono ridotti al minimo per l'elevata velocità di saldatura e per l'elevata concentrazione del calore.

Le applicazioni tipiche per questo metodo sono:

- realizzazione di giunti longitudinali e circolari in recipienti che devono sopportare elevate pressioni (caldaie, bombole);
- saldature di grossi elementi nel settore della carpenteria;
- saldatura di tubi sia del tipo elicoidale che longitudinale;
- saldature su grandi pannelli nel settore navale.

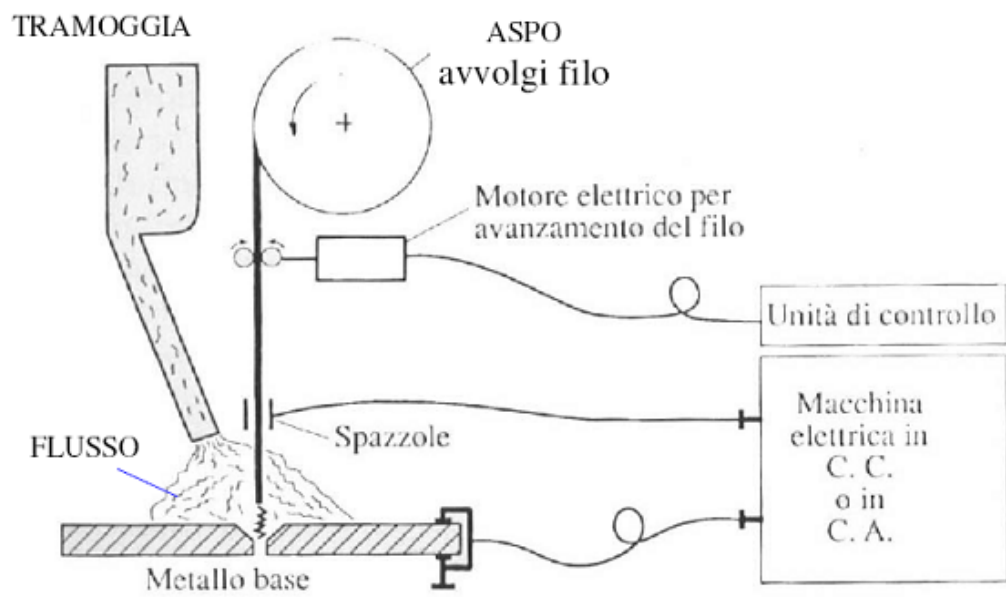


Figura 14: saldatura ad arco sommerso

2. METALLURGIA DELLA SALDATURA

2.1 STRUTTURA DEL GIUNTO SALDATO

In una giunzione ottenuta con l'impiego di un procedimento di saldatura, possiamo distinguere con chiarezza delle zone diverse (Figura 15) zona fusa (CS), zona termicamente alterata (ZTA) e materiale base (MB).

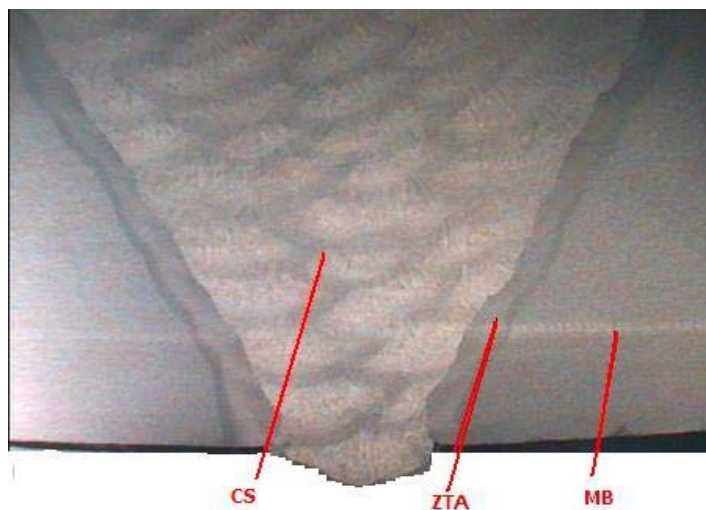


Figura 15: rappresentazione zone giunto saldato, MB, CS e ZTA

Queste vengono così definite:

- **La zona fusa (CS):** 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.

2.1.1 ZONA FUSA

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:

$$d\% = \frac{100 \cdot b}{a + b} \quad (2.1)$$

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 ,(es. riporti superficiali a nastro). 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. 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.

Influenza vari elementi chimici

Come sappiamo gli acciai al carbonio di 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 fondamentalemente 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; il materiale in pratica " assorbe" in maniera ridotta l'azione degli sforzi di ritiro e delle tensioni interne. Si aggiunga 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. Ricordiamo che 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

$$C.Eq = \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.2)$$

Silicio (Si)

Come noto il Si è aggiunto per "calmare" l'acciaio dato il suo potere disossidante. Possiamo trovarlo in zona fusa proveniente soprattutto dal materiale base quando quest'ultimo ha subito la calmatatura al Si. E' opportuno che il contenuto di questo elemento in zona fusa non sia troppo elevato (0,25 ÷ 0,30 %) in quanto produce un sensibile aumento dell'infragilimento tanto maggiore al crescere della % di C.

Zolfo (S)

E' un'impurezza che entra nell'acciaio durante la produzione e proviene dalle impurezze del minerale. La diluizione lo porta nella zona fusa (i materiali d'apporto sono in genere più puri di zolfo rispetto al materiale base). Lo zolfo forma un composto con il ferro (monosolfuro di ferro) che ha un punto di fusione molto basso 985°C (basso fondente). Durante la solidificazione questo composto, rimanendo liquido più a lungo, segrega (si separa, si addensa) al bordo dei grani dendritici riducendo drasticamente la sezione resistente. Le tensioni e gli sforzi di ritiro tendono a spaccare segregazioni aumentando così la criccabilità ad alta temperatura (cricche a *caldo*). La quantità di zolfo nella zona fusa deve essere quindi molto ridotta, per garantire questa condizione, questo elemento deve essere opportunamente ridotto nel materiale, base specialmente dove è previsto l'impiego di procedimenti di saldatura che determinano un elevato valore del rapporto di diluizione. Non dobbiamo poi trascurare un fatto importante: anche nel materiale base possono essere presenti delle segregazioni di monosolfuro di ferro e quindi possono esserci delle aree dove la concentrazione locale di zolfo è maggiore. Si pensi, ad esempio, al caso di un

prodotto di laminazione ricavato da un lingotto effervescente nel quale abbiamo la presenza di bande d'impurezze, generalmente raccolte vicino al cuore della lamiera, questi casi dovranno essere impiegati materiali di saldatura estremamente puri e ricchi di elementi che esplicino una efficace attività desolforante nonché controllare il rapporto di diluizione agendo sui parametri di saldatura in modo da contenere la penetrazione. Reagendo con idrogeno e ossigeno, lo zolfo può causare anche soffiature in zona fusa. Un eccellente elemento desolforante è il Manganese (Mn). Il manganese, reagisce spontaneamente con il monosolfuro di ferro (FeS) formando del monosolfuro di manganese (MnS) che ha minore tendenza a segregare e quindi si distribuisce uniformemente in tutta la massa solidificando in forma tondeggiante. Per ridurre il contenuto di zolfo è altresì importante usare elettrodi rivestiti a flussi composti da sostenere ad elevata basicità; questi elementi tendono a mantenere lo zolfo all'interno della scoria che viene a galla durante la solidificazione determinano così un bagno fuso e di conseguenza, un giunto più depurato.

Fosforo (P)

Anche il fosforo come lo zolfo è un'impurezza che entra nell'acciaio durante il processo produttivo. Il fosforo forma con il ferro un composto basso fondente (FeP), in quantità minore rispetto allo zolfo perché ha una maggiore solubilità nel Fe anche allo stato solido. Anche il fosforo favorisce la formazione delle cricche a caldo anche se, rispetto allo zolfo ha un'influenza molto più bassa. I prodotti del fosforo hanno una pesante e assai negativa incidenza sulla fragilità del materiale alle basse temperature. E' sempre utile impiegare materiali d'appoggio contenenti elementi defosforanti così come elettrodi rivestiti e flussi per saldatura in arco sommerso di tipo basico.

Assorbimento di gas

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 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.

Ossigeno (O)

L'ossigeno tende a reagire con il ferro formando alcuni ossidi che sono solo parzialmente solubili. La solubilità dell'ossigeno aumenta all'aumentare della temperatura ed è massima nel ferro fuso. Nel ferro solido la solubilità diminuisce rapidamente; si riduce nel ferro γ ed è ulteriormente inferiore nel ferro α . L'ossigeno assorbito ad elevata temperatura tende perciò ad essere messo fuori soluzione dal bagno che solidifica ed a reagire col carbonio, costituendo la causa principale di soffiature e inclusioni non metalliche che riducono le caratteristiche meccaniche del materiale. Come nel caso delle produzioni dell'acciaio, così anche nel caso della zona fusa durante la saldatura l'azione disossidante di certi elementi, quali Manganese e Silicio, può essere molto utile per evitare i suddetti difetti inoltre, si devono creare atmosfere protettive che prevengano il più possibile l'ossidazione. La rapidità dei cicli termici in saldatura non consente una completa formazione e un'omogenea distribuzione degli ossidi; questo aspetto complica la situazione rispetto ai fenomeni che si manifestano durante la produzione dell'acciaio in relazione alla presenza di ossigeno assorbito dal materiale fuso. Gli ossidi di Mn e Si possono liberarsi dal bagno di fusione oppure fissare l'ossigeno, in maniera innocua, così da evitare la formazione di CO con conseguente formazione di soffiature o la formazione di altri ossidi dannosi.

Azoto (N)

La solubilità dell'azoto è estremamente ridotta allo stato solido; a temperatura ambiente è pressochè nulla mentre a temperature più elevate è molto maggiore. L'azoto in sovrasaturazione tende a formare nitruri di ferro che, precipitando (soprattutto in seguito a deformazione plastica) sono causa d'invecchiamento con conseguente infragilimento. L'azoto tende ad essere assorbito dal bagno di fusione direttamente dall'aria e vi resta inglobato sotto forma di nitruri dall'aspetto aghiforme, che producono sensibili effetti d'infragilimento. E' quindi essenziale una buona protezione del metallo d'apporto durante il trasferimento e del bagno di fusione.

Idrogeno (H)

La presenza dell'idrogeno è estremamente dannosa per la saldatura. Per ora basti sapere che la solubilità dell'idrogeno è elevata nell'acciaio fuso, bassa nell'austenite ed ancora minore nella ferrite, per cui esso durante il raffreddamento tende ad uscire di soluzione provocando cricche, fiocchi e porosità in zona fusa e, nel caso di strutture martensitiche nella zona termicamente alterata, la formazione di cricche sotto il cordone.

Struttura zona fusa

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.

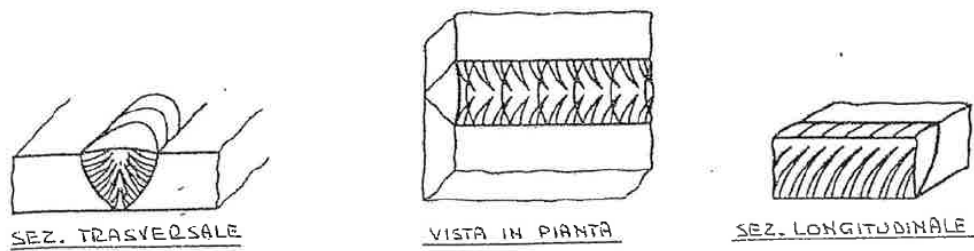


Figura 16: vista zona fusa

La Figura 16 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.

Fenomeni di segregazione

In generale il termine segregazione indica una separazione. Nel caso specifico degli acciai si intende quel fenomeno per il quale certi elementi, abbandonano, si separano dalla soluzione solida e vanno di solito a raccogliersi ai giunti dei grani sottoforma di composti di diverso tipo. La solidificazione dendritica della zona fusa è sempre accompagnata da cospicui fenomeni di segregazione con accumulo delle impurezze ai giunti dei grani nelle zone che solidificano per ultime, al centro del giunto. Le impurezze (Zolfo e Fosforo) sono solubili nel

metallo liquido ma non nel metallo solido. Durante la solidificazione della zona fusa le impurezze si concentrano nel liquido che solidifica per ultimo e reagiscono chimicamente col ferro formando solfuri e fosfuri la cui temperatura di solidificazione è attorno ai 900°C. Allorché, verso i 1400°C la zona fusa, raffreddando, ha ormai attraversato l'intervallo di solidificazione, restano ancora, al contorno delle dendriti, dei veli liquidi più o meno continui, carichi d'impurezze. Questi veli resistono liquidi fino a che la temperatura non è scesa sotto i 900°C. Il fenomeno della migrazione delle impurezze al contorno dei grani è detto segregazione. E' evidente che, a parità di impurezze, il fenomeno sarà tanto più marcato quanto più grosse sono le dendriti, cioè quanto minore è la superficie totale di contorno. La segregazione nuoce alle proprietà meccaniche della zona fusa e, in particolare, ne risente la resilienza. Le impurezze entrano in zona fusa provenienti dal metallo base e ciò in misura tanto maggiore quanto più forte è la diluizione. La saldatura ad arco sommerso opera in condizioni più critiche di altri procedimenti sia per il forte apporto di calore, responsabile di strutture grossolane, quanto per l'elevato rapporto di diluizione che trascina in zona fusa le impurezze del metallo base. La segregazione, che di per sé interviene negativamente sulle proprietà meccaniche della zona fusa, sta alla base di un altro grave inconveniente, le cricche a caldo.

Effetto passate multiple

Quando la saldatura è eseguita in più passate, il calore delle passate successive esercita un'azione benefica di trattamento termico sulle sottostanti (Figura 17). Esaminiamo il caso di una saldatura in due passate. Dopo deposizione, la prima passata è soggetta ai fenomeni di solidificazione (dendritismo) e di trasformazione in fase solida in modo simile a quanto descritto in precedenza. Allorché si deposita la seconda passata, parte della prima fonde per essere inglobata nella zona fusa della seconda e, più in profondità, la prima passata subisce un ciclo termico assimilabile al trattamento di normalizzazione, che cancella il dendritismo originario per sostituirlo con una struttura a grani molto fini. Le fasi descritte e le strutture indicate appaiono chiaramente sulla sezione lucidata ed attaccate di un esame macrografico. Possiamo concludere che, in ogni saldatura eseguita in più passate, la struttura dendritica di solidificazione rimane solo nell'ultima passata mentre le altre passate risultano più o meno parzialmente ricotte a seconda dei regimi termici usati e del volume di ciascuna.

A Seguito di questo fenomeno di affinamento del grano nelle passate sottostanti il giunto risulta, nel complesso, più duttile e più tenace.

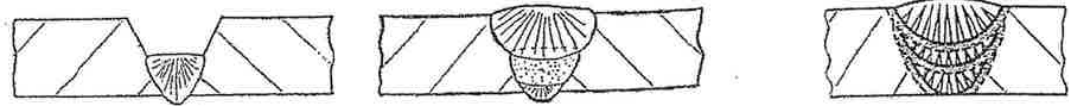


Figura 17: effetto passate multiple

Nell'ambito dei diametri comunemente usati in saldatura manuale ad arco, il volume delle passate è sempre sufficientemente modesto e tale da conseguire l'effetto benefico delle passate multiple. Per contro, il procedimento ad arco sommerso potrebbe consentire la deposizione di passate di grosso volume. La grossolanità della struttura dendritica diviene inaccettabile specie quando il carbonio e le impurezze nel metallo base sono rilevanti. In questi casi si impone la riduzione del volume delle passate e l'adozione della tecnica "*multipass*" con i seguenti vantaggi:

- Si ottengono strutture dendritiche più fini in virtù del minor apporto termico di ciascuna passata;
- Si gode l'effetto normalizzante delle passate successive;
- Si riducono i fenomeni di diluizione, di segregazione ed il rischio di cricche a caldo.

2.3 ZONA TERMICAMENTE ALTERATA (ZTA)

La zona termicamente alterata (detta anche zona di transizione), è quella porzione di metallo base, nelle immediate vicinanze della zona fusa, dove 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.

Dobbiamo, infatti, ricordare che i trattamenti termici portano a delle trasformazioni diverse a seconda della composizione della lega, della velocità di riscaldamento, della temperatura massima raggiunta, dal tempo di permanenza ad alta temperatura, della velocità di raffreddamento e della struttura iniziale dalla quale si partiva. Pertanto provocando nella saldatura un vero e proprio trattamento termico, può indurre nella ZTA strutture notevolmente diverse da punto a punto e da caso a caso. Consideriamo, la deposizione di una passata ad arco manuale con elettrodo rivestito sulla superficie di una lamiera (Figura 18)

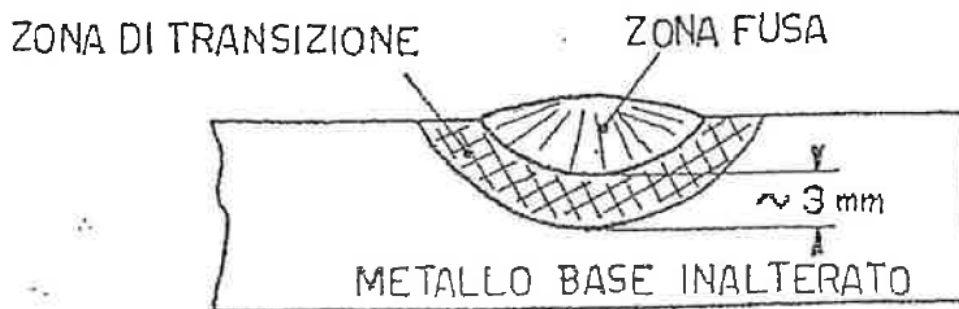


Figura 18: caratterizzazione zona fusa

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. Vediamo in dettaglio la ZTA considerando separatamente i due casi seguenti:

- acciai dolci, con resistenza inferiore a 50 kg/mm^2 ($C < 0.25 \%$);
- acciai dolci, con resistenza superiore a 50 kg/mm^2 ($C \geq 0.25 \%$).

Parametri caratterizzanti ZTA

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 termofisici relativi al procedimento di saldatura impiegato.

2.4 CICLI TERMICI E TRATTAMENTI TERMICI

Cicli termici in saldatura

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 pure influenza 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, cioè attraverso le linee di trasformazione, 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.

Influenza della posizione del giunto

La distribuzione delle temperature durante la saldatura è legata alla trasmissione del calore per conduzione. Nel caso della saldatura ad arco elettrico, si può ritenere che la sorgente di calore si sposti con moto uniforme rettilineo lungo il giunto e che, di conseguenza, si stabilisca, raggiunte le condizioni di regime dopo un primo tratto di saldatura, una distribuzione delle temperature tale che le isoterme si spostino rigidamente assieme alla sorgente. Ogni isoterma è un'ellisse con asse minore tanto più spostato all'indietro (rispetto all'avanzamento) quanto è minore la temperatura dell'isoterma. Per ciascun punto si viene a stabilire un ciclo termico caratterizzato dal fatto che la massima temperatura raggiunta è tanto minore, quanto più è distante il punto della sorgente termica.

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.

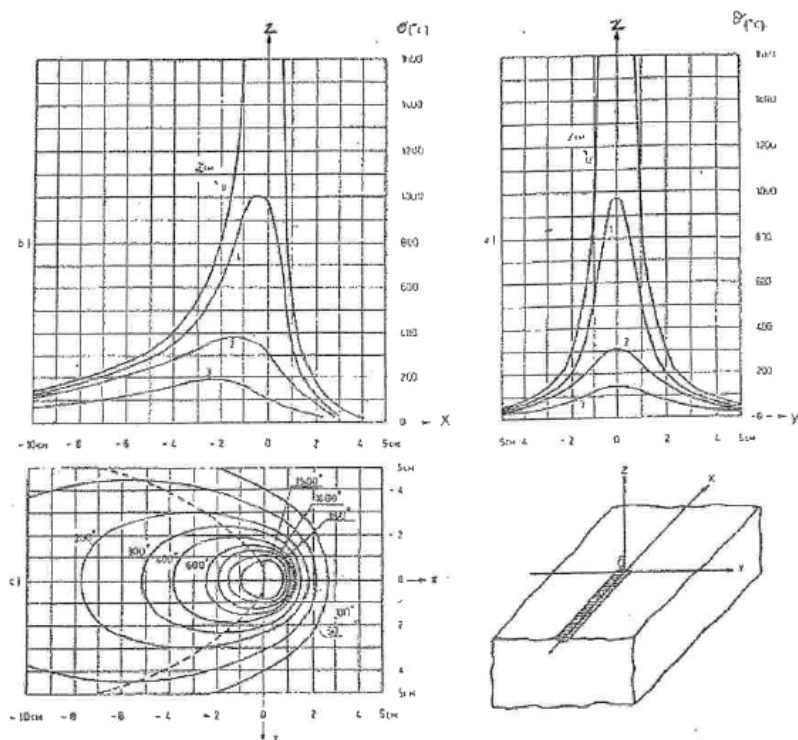


Figura 19: temperature in funzione dei cicli termici

Il solido termico rappresenta quindi l'immagine istantanea della distribuzione della temperatura nell'intorno della sorgente che determina lo stabilirsi dei gradienti termici cui è connesso e, come si vedrà, l'insorgere di deformazioni e tensioni conseguenti al riscaldamento localizzato.

Influenza del procedimento

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.

Questo parametro è chiamato apporto termico specifico (heat input) e può essere calcolato con la seguente formula:

$$Q = \frac{V \cdot I \cdot 60}{v} [J/cm] \quad (2.3)$$

Dove:

- "V" è la tensione di saldatura in volt;
- "I" è la corrente di saldatura in Ampere;
- "v" è la velocità d'avanzamento della sorgente di calore in [cm/min].

Più alto 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. 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.

Influenza del tipo di giunto

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 venga eseguita in regime perfettamente identico di temperatura iniziale e di calore fornito per unità di lunghezza, la 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.

Influenza del materiale base

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.

Trattamento termico post saldatura

A valle del processo di saldatura viene molto spesso eseguito il trattamento termico di distensione post saldatura, questo viene eseguito per distendere le tensioni interne che si sviluppano dopo il processo di saldatura. Questo trattamento può essere fatto in forni a gas che possono contenere dei grossi pezzi completamente saldati o può essere fatto localizzato mediante resistenze elettriche.

Le norme di costruzione ASME o EN danno dei criteri per decidere dove eseguire il trattamento termico, a quale temperatura e a per che tempi, tutti questi parametri sono direttamente dipendenti dal materiale e dallo spessore dello stesso.

Di norma vengono eseguiti a valori di temperatura di circa 700°C.

Preriscaldamento

Il cianfrino del pezzo da saldare viene portato a circa 150°C prima dell'inizio della saldatura, questo serve per cercare di limitare i difetti nel giunto saldato. Viene eseguito mediante torce a gas

Postriscaldamento

Viene eseguito post saldatura, viene seguito con resistenze elettriche, la saldatura viene mantenuta a circa 300°C per un paio d'ore post saldatura, anche questo trattamento serve per ovviare gli eventuali difetti di saldatura.

Step cooling

E' un trattamento termico molto lungo eseguito a step e con tempi di mantenimento crescenti e temperature decrescenti. Viene eseguito su talloni di saldatura, per simulare il comportamento della saldatura con il passare del tempo, infatti simula il comportamento dei materiali in esercizio per tempi lunghi. Dopo il trattamento termico vengono fatte delle prove di resilienza a temperature decrescenti, queste prove servono per stimare le sensibilità del materiale alla fragilizzazione.

3 DIFETTOLOGIA DEI GIUNTI SALDATI

Secondo UNI EN ISO 6520-1 [1] 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.

Cricche

La cricca (Figura 20) può essere definita come una 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.

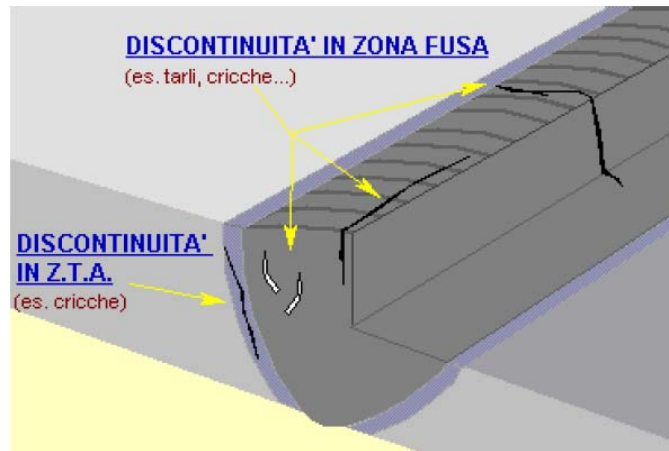


Figura 20: rappresentazione cricca

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

Le cricche a caldo hanno generalmente orientamento longitudinale (Figura 21) 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. 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

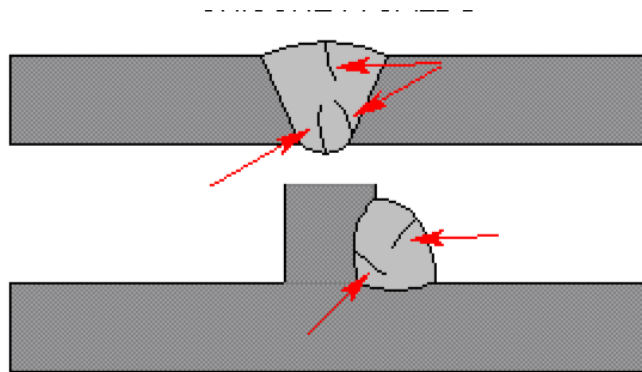


Figura 21: rappresentazione cricca a caldo

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 si formano negli acciai durante il raffreddamento (Figura 22) del cordone quando la temperatura scende al di sotto di $100\div 150^{\circ}\text{C}$. 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.

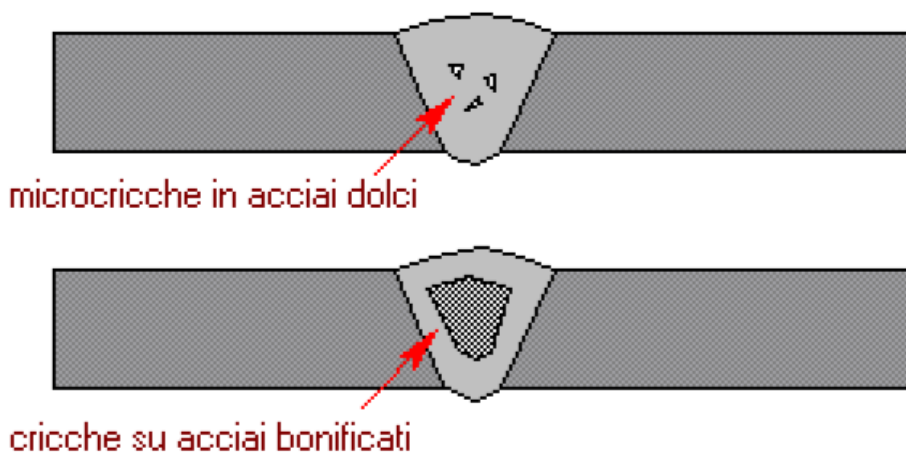


Figura 22: rappresentazione cricca a freddo

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 23) di un giunto saldato la temperatura scende al di sotto di circa 100÷150°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.

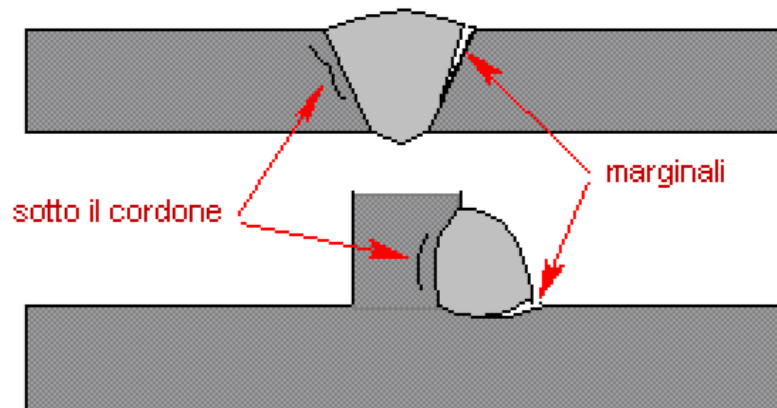


Figura 23: rappresentazione cricca a freddo longitudinali

Gli Strappi lamellari possono essere assimilati a cricche che si formano solo nella zona termicamente alterata del materiale base (Figura 24) 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 imburratura 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.

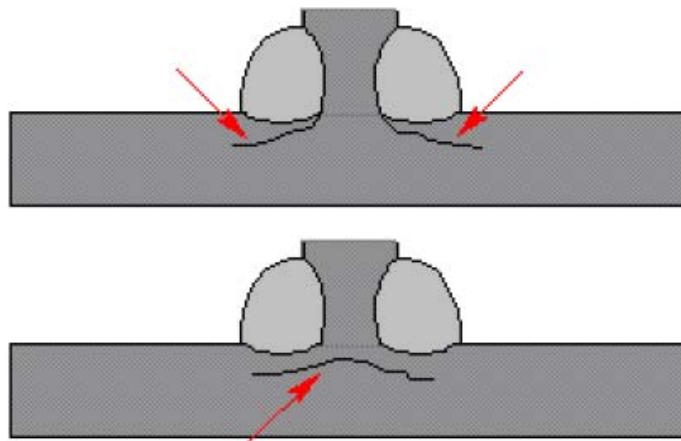


Figura 24: rappresentazione strappi lamellari

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.

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 25). 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.

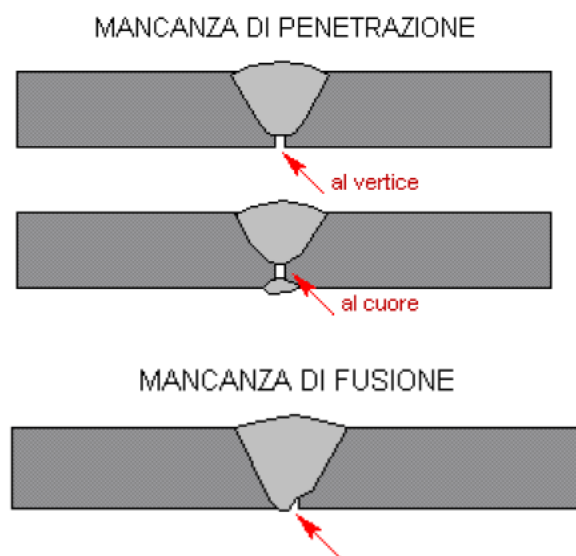


Figura 25: rappresentazione mancanza di fusione e mancata penetrazione

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 26). 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.

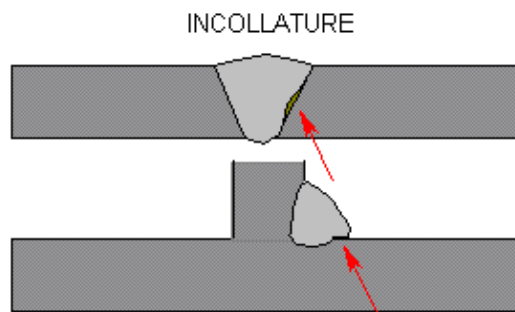


Figura 26: rappresentazione incollature

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 27) 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

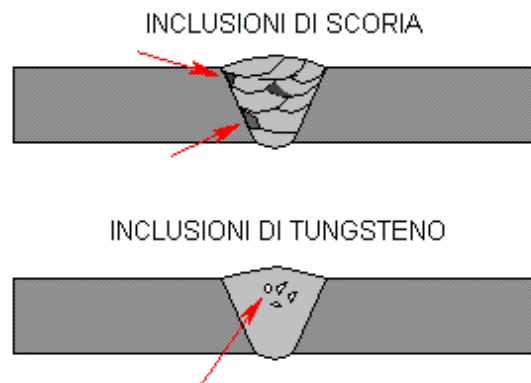


Figura 27: rappresentazione inclusioni solide

Le inclusioni gassose sono cavità provocate da gas intrappolati nel bagno che si è solidificato troppo rapidamente (Figura 28); esse si presentano tipicamente di forma tondeggianti 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.

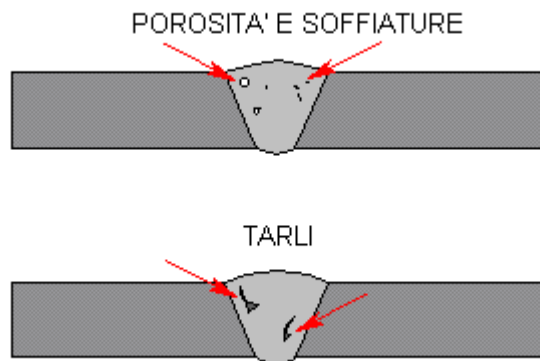


Figura 28: rappresentazione inclusioni gassose

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 29). Talvolta questo difetto può essere dovuto a non corretta scelta della preparazione del giunto, in particolare nella saldatura ad arco sommerso: 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.

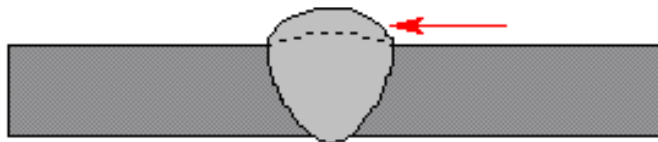


Figura 29: eccesso di sovrametallo

Cordone d'angolo troppo convesso

Questo difetto (Figura 30) 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 30: errori di sovrametallo

Incisioni marginali

Le incisioni marginali (figura 31) 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.

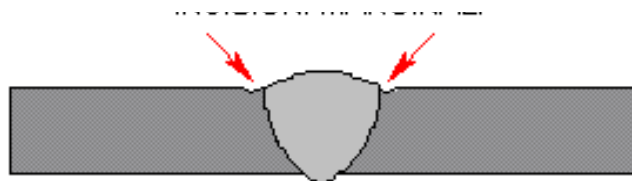


Figura 31: incisioni marginali

Irregolarità superficiale

È un difetto che conferisce un cattivo aspetto estetico al cordone le cui maglie (Figura 32) 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).

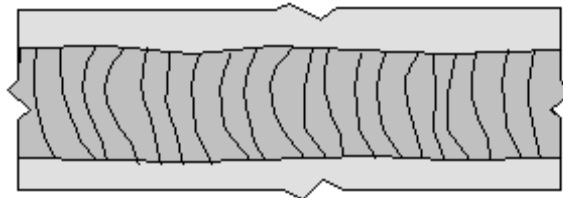


Figura 32: irregolarità cordoni

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.

4. NORMATIVE EUROPEE PER L'ESECUZIONE DELLA QUALIFICA DI SALDATURA

Di norma prima di eseguire una saldatura viene eseguita una “prova” che simuli le condizioni operative durante la saldatura. Il tallone di saldatura che viene saldato con i medesimi paramenti della produzione, viene poi testato mediante prove meccaniche, che hanno lo scopo di verificare il mantenimento delle proprietà meccaniche tipiche del materiale. I dati raccolti dalle prove meccaniche vengono raccolti in un documento chiamato PQR.

Le PQR devono essere redatte secondo il codice di costruzione dell'apparecchio; di norma si possono avere PQR secondo le norma ASME IX [2] oppure secondo la norma UNI EN ISO 15614[3] .

La norma più utilizzata in Europa è la norma UNI EN ISO 15614 la quale prevede le prove meccaniche riportate nella tabella qui di seguito riportata.

Saggio di prova	Tipo di prova	Entità delle prove	Note
Giunto testa a testa a piena penetrazione	Esame visivo	100%	-
	Controllo radiografico o mediante ultrasuoni	100%	a)
	Rivelazione di cricche superficiali	100%	b)
	Prova di trazione trasversale	2 provini	-
	Prova di piegamento trasversale	4 provini	c)
	Prova di resilienza	2 serie	d)
	Prova di durezza	richiesta	e)
	Esame macroscopico	1 provino	-
Giunto a T a piena penetrazione	Esame visivo	100%	f)
	Rivelazione di cricche superficiali	100%	b) e f)
Giunto tubo-tronchetto a piena penetrazione	Controllo radiografico o mediante ultrasuoni	100%	a) f) e g)
	Prova di durezza	richiesta	e) e f)
	Esame macroscopico	2 provini	f)
Saldature d'angolo	Esame visivo	100%	f)
	Rivelazione di cricche superficiali	100%	b) e f)
	Prova di durezza	richiesta	e) e f)
	Esame macroscopico	2 provini	f)
a)	Il controllo mediante ultrasuoni non deve essere utilizzato per $t < 8$ mm, né per i gruppi di materiali 8, 10, da 41 a 48.		
b)	Controllo con liquidi penetranti o con particelle magnetiche. Per i materiali non magnetici, controllo con liquidi penetranti.		
c)	Per le prove di piegamento vedere punto 7.4.3.		
d)	Una serie in zona fusa ed una serie in zona termicamente alterata (ZTA) per materiali di spessore ≥ 12 mm ed aventi caratteristiche di resilienza specificate. Le norme di applicazione possono richiedere la prova di resilienza per spessori minori di 12 mm. La temperatura di prova deve essere scelta dal fabbricante tenendo conto del tipo di applicazione o della norma di applicazione, ma non deve essere minore del valore specificato per il metallo base. Per prove addizionali vedere punto 7.4.5.		
e)	Non richiesta per i seguenti metalli base: sottogruppo 1.1, e gruppi 8, da 41 a 48.		
f)	Le prove indicate non forniscono informazioni sulle caratteristiche meccaniche del giunto. Quando queste caratteristiche sono importanti per il tipo di applicazione si deve effettuare anche una qualificazione addizionale, per esempio su un giunto testa a testa.		
g)	Per diametro esterno ≤ 50 mm non è richiesto il controllo mediante ultrasuoni. Per un diametro esterno > 50 mm e quando non è tecnicamente possibile effettuare il controllo mediante ultrasuoni, deve essere eseguito il controllo radiografico purché la configurazione del giunto permetta di ottenere risultati significativi.		

Tabella 1: prove minime richieste per l'esecuzione di una qualifica di procedimento secondo norma EN 15614

La norma prevede sia controlli non distruttivi che controlli distruttivi diversi a seconda del tipo di giunto

La norma prescrive anche come prelevare i provini dal tallone e la locazione delle varie prove (Figura 33).

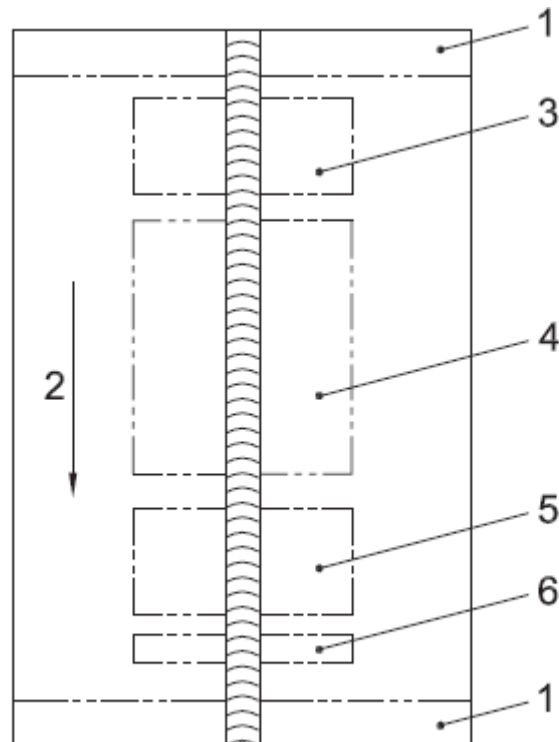


Figura 33: rappresentazione prelievi prove su tallone di saldatura

1 Scarto 25 mm

2 Direzione di saldatura

3 Zona per:

- 1 provino di trazione

- provini di piega

4 Zona per:
provini di resilienza e addizionali se richiesti

5 Zona per:
1 provino di trazione
provini di piega

6 Zona per:
1 provino macrografico
1 provino di durezza

La norma prevede anche dei range di validità, in altre parole qualificando un processo su un dato spessore posso utilizzare la medesima qualifica purché la saldatura che devo eseguire rimanga all' interno del range di qualifica.

Qui sotto viene riportata la tabella dei range di qualifica relativa alla norma UNI EN ISO 15614:

Spessore del saggio di prova t	Campo di validità della qualificazione	
	Passata singola	Passate multiple
$t \leq 3$	da $0,7 t$ a $1,3 t$	da $0,7 t$ a $2 t$
$3 < t \leq 12$	da $0,5 t$ (3 min.) a $1,3 t$ ^{a)}	da 3 a $2 t$ ^{a)}
$12 < t \leq 100$	da $0,5 t$ a $1,1 t$	da $0,5 t$ a $2 t$
$t > 100$	non applicabile	da 50 a $2 t$

a) Quando sono specificati requisiti di resilienza, il limite superiore della qualificazione è 12 mm, a meno che sia stata fatta la prova di resilienza.

Tabella 2: range applicazioni norma EN 15514

5. PROCEDURA SPERIMENTALE

5.1 DESCRIZIONE PROCESSI DI SALDATURA

Verranno presi in esame due campioni in 2 ¼ cromo (P22) uno saldato TIG elettrodo uno saldato in arco sommerso ad entrambi i campioni è stata eseguita una preparazione a X e un campione in cromo vanadio saldato con arco sommerso avente smusso a X

5.2 DESCRIZIONE TRATTAMENTI TERMICI

I tre talloni hanno una lunghezza di circa 1,5 metri, sono stati tagliati a metà , una metà è stata trattata in forno e sottoposta a un trattamento termico di distensione dopo saldatura: La seconda metà di talloni è stata sottoposta al trattamento di step cooling, qui di seguito è riportato lo schema di trattamento a cui sono stati sottoposti questi provini

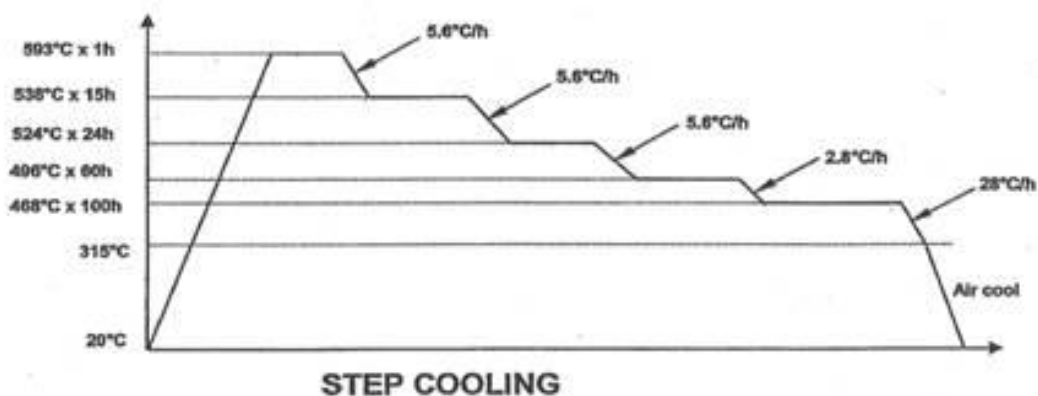


Figura 34: rappresentazione step cooling

Qui di seguito nella tabella 3 verranno schematizzati i materiali e relativi trattamenti termici presi in esame.

Materiale	Processo di Saldatura	Trattamento termico	Prove meccaniche
2 ¼ Cr.	elettrodo	Distensione dopo saldatura	Resilenze, trazioni, durezza e micrografie
2 ¼ Cr.	elettrodo	Step cooling	Resilenze, trazioni, durezza e micrografie
2 ¼ Cr.	Arco sommerso	Distensione dopo saldatura	Resilenze, trazioni, durezza e micrografie
2 ¼ Cr.	Arco sommerso	Step cooling	Resilenze, trazioni, durezza e micrografie
Cr.V.	Arco sommerso	Distensione dopo saldatura	Resilenze, trazioni, durezza e micrografie
Cr.V.	Arco sommerso	Step cooling	Resilenze, trazioni, durezza e micrografie

Tabella 3: riepilogo materiali a disposizione

5.3 PROVE

I provini per eseguire le prove meccaniche sono stati prelevati dai talloni di saldatura seguendo lo schema riportato in figura 35. I provini sono stati tagliati mediante lavorazione meccanica.

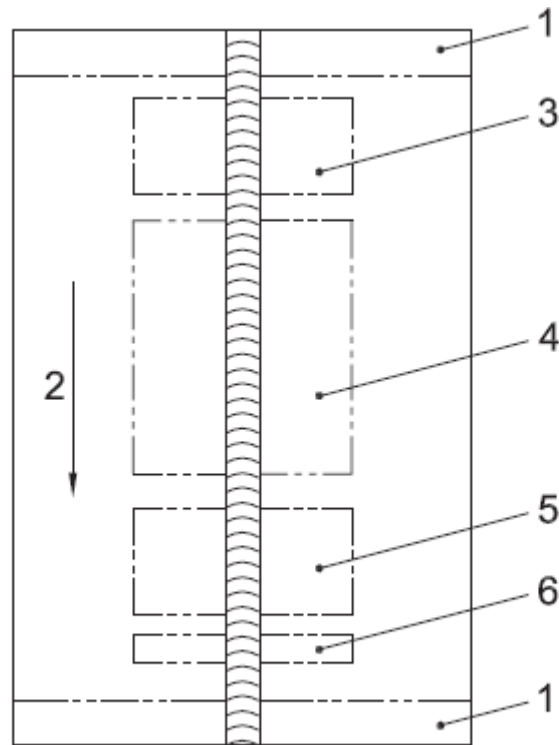


Figura 35: prelievo provini da tallone di saldatura

1 Scarto 25 mm

2 Direzione di saldatura

3 Zona per:
- 1 provino di trazione

4 Zona per:

provini di resilienza

5 Zona per:

1 provino di trazione

6 Zona per:

1 provino macrografico

1 provino di durezza

Resilienze

Le resilienze sono state eseguite mediante il pendolo di Charpy (Galdabini), lo strumento è composto da un'asta che prevede da un lato una cerniera fissata alla base e dall'altro una mazza. Affinché la misurazione non venga falsata dall'attrito dell'aria e della cerniera, quest'ultima presenta dimensioni sensibilmente contenute, mentre la mazza ha una forma aerodinamica ed è munita di una lama intercambiabile dal profilo standardizzato; questa prova consta serve per la verifica della tenacità

Le provette sono state lavorate sezione quadrata con lato di 10 mm e lunghezza di 55 mm; esse presentano al centro un intaglio (che non è un invito alla rottura ma che serve a garantire la multiassialità degli sforzi, tanto è vero che il pendolo colpisce la provetta dal lato opposto all'intaglio) perpendicolare all'asse longitudinale della provetta.

Nel caso studiato l'intaglio è stato eseguito a V con una dimensione di 2mm come da UNI EN 10045/1.

Le resilienze sono state eseguite sui materiali in esame dopo trattamento termico e dopo step cooling, le prove sono state eseguite in zona termicamente alterata e in centro saldatura.

Trazioni

La prova di trazione è una prova di caratterizzazione dei materiali che consiste nel sottoporre un provino di un materiale in esame ad un carico F inizialmente nullo che viene incrementato fino a un valore massimo che determina la rottura del materiale. La prova di trazione serve a determinare alcune caratteristiche del

materiale in esame, tra cui la resistenza meccanica (R_m) e il modulo di Young o modulo di elasticità (E). Si fissa il provino tra due morsetti in posizione verticale (in modo tale che la forza di gravità non influisca sulla prova). I morsetti stringono il provino nella zona larga. Una ganaschia comincia a spostarsi a velocità costante, impostata tramite computer; comincia a nascere uno stato di sforzo nel materiale e si genera una forza crescente, opposta alla direzione della traversa della macchina. Si impone lo stop alla macchina quando il provino si rompe oppure quando la traversa si è spostata di una distanza prefissata. Sulla macchina è presente una cella di carico che misura istante per istante la forza applicata al provino sul quale inoltre è applicato un estensimetro, che misura l'allungamento. Grazie all'estensimetro e alla cella di carico, si ottengono valori di sforzo e deformazione a intervalli di tempo costanti e ottenere quindi un diagramma sforzo-deforma

Nel caso studiato sono stati utilizzati provini cilindrici, è stata utilizzata una macchina per trazioni (Instron), mediante queste prove è stato verificato la resistenza a snervamento e a rottura dei materiali presi in esame.

Durezza

Sono state eseguite delle microdurezze sul profilo della saldatura dal materiale base fino a centro saldatura con un intervallo tra le letture di 1 mm. Queste prove sono state eseguite per verificare i valori delle durezze su tutto il profilo di saldatura

Per eseguire le prove è stata utilizzata una macchina che esegue utilizza un puntatore ottico capace di calcolare elettronicamente le misure di durezza. Sullo strumento è stato impostato un carico di 300 g e mediante la lettura elettronica vengono calcolati i relativi valori di durezza Vickers.

Micrografie

Questa prova viene eseguita per verificare la microstruttura del materiale, nel caso studiato sono stati lucidati mediante carte abrasive e panni di vario tipo i pezzi, fintanto che non è stata ottenuta una superficie a specchio, dopodiché è stato eseguito un attacco acido mediante Nital al 5%.

Dopo la preparazione superficiale dei provini è stata utilizzato un microscopio ottico con telecamera in grado di catturare le immagini ingrandite dei provini.

Sono stati eseguiti prima dei profili di ingrandimento da materiale base fino a cento saldatura con un ingrandimento di 50 X. Dopodiché sono stati eseguiti degli ingrandimenti su materiale base, zona termicamente alterata e centro saldatura con i seguenti ingrandimenti, 50X, 100X, 200X e 500 X.

6. RISULTATI E DISCUSSIONE

Resilienze in zona termicamente alterata (ZTA)

I valori ottenuti dalle prove di resilienza a temperatura decrescente, dopo il trattamento termico post saldatura (PWHT), sono rappresentati nella figura 36. Si nota che i valori riscontrati nelle tre differenti condizioni sono paragonabili e hanno andamenti molto simili. Ci sono alcuni punti sotto la media, in particolare del 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso, questi valori sono probabilmente causati da piccoli difetti all'interno della saldatura che vengono accentuati dalle basse temperature, comunque questi valori di resilienza si attestano a dei valori molto più alti rispetto ai valori minimi richiesti dalle normative europee (minimo valore per normativa 27J). Si nota inoltre che dopo i -45°C c'è un inizio di diminuzione delle proprietà meccaniche.

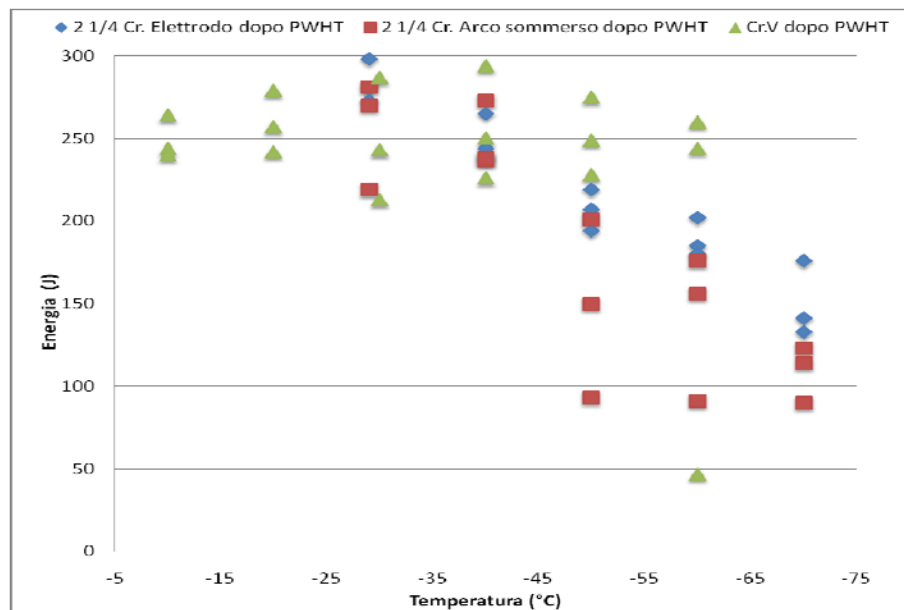


Figura 36: confronto resilienze ZTA dopo trattamento termico post saldatura (PWHT) tra i 3 materiali in esame

I dati ottenuti di resilienza a temperatura decrescente dopo il trattamento di step cooling sono rappresentati nella figura 37. Si nota che i valori riscontrati tra le tre differenti condizioni sono paragonabili e hanno andamenti molto simili. Ci

sono alcuni punti sotto la media, in particolare per il 2 ¼ Cr saldato con arco sommerso, questi punti con valori di resilienza più bassi sono probabilmente causati da piccoli difetti all'interno della saldatura che vengono accentuati dalle basse temperature, comunque questi valori di resilienza si attestano a dei valori molto più alti rispetto ai valori minimi richiesti dalle normative europee (minimo valore per normativa 27J). Si nota inoltre che dopo i -35°C c'è un inizio di diminuzione delle proprietà meccaniche, questo valore è sceso di circa 10°C rispetto al solo PWHT in quanto il materiale ha subito un severo ciclo di invecchiamento che accentua la fragilità dei materiali.

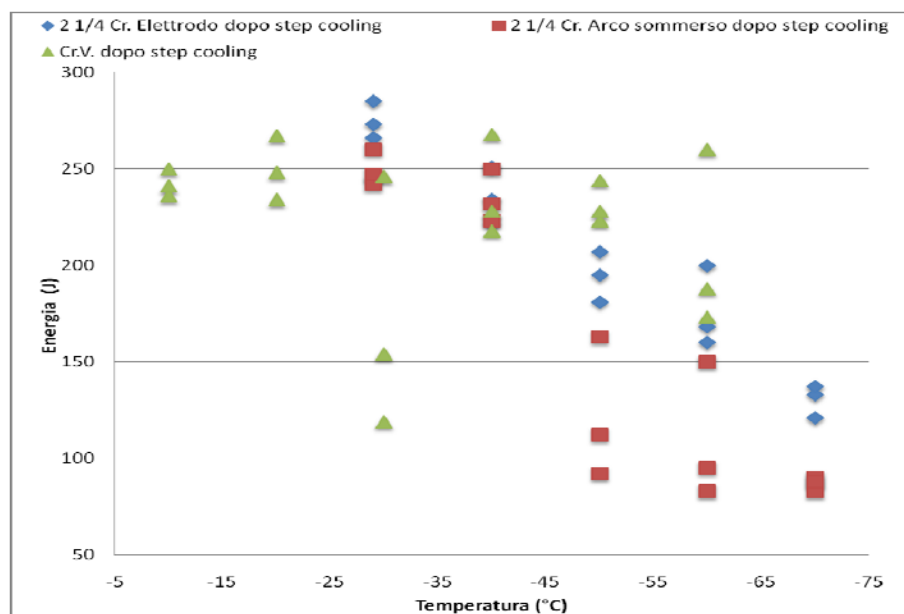


Figura 37: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di step cooling tra i 3 materiali in esame

Mettendo a confronto i valori di resilienza ottenuti sul 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo, dopo trattamento termico post saldatura e dopo step cooling, rappresentati in figura 38, si nota che i valori seguono un andamento simile per i due diversi tipi di trattamento termico. Chiaramente i valori relativi alle prove effettuate dopo step cooling hanno un valore lievemente inferiore rispetto ai valori ottenuti dopo solo PWHT, questo è abbastanza normale poiché il materiale ha subito un severo ciclo di trattamento termico che accentua la fragilità dei materiali. Il trattamento di step cooling accentua la fragilità in quanto accresce il grano austenitico che infragilisce i materiali.

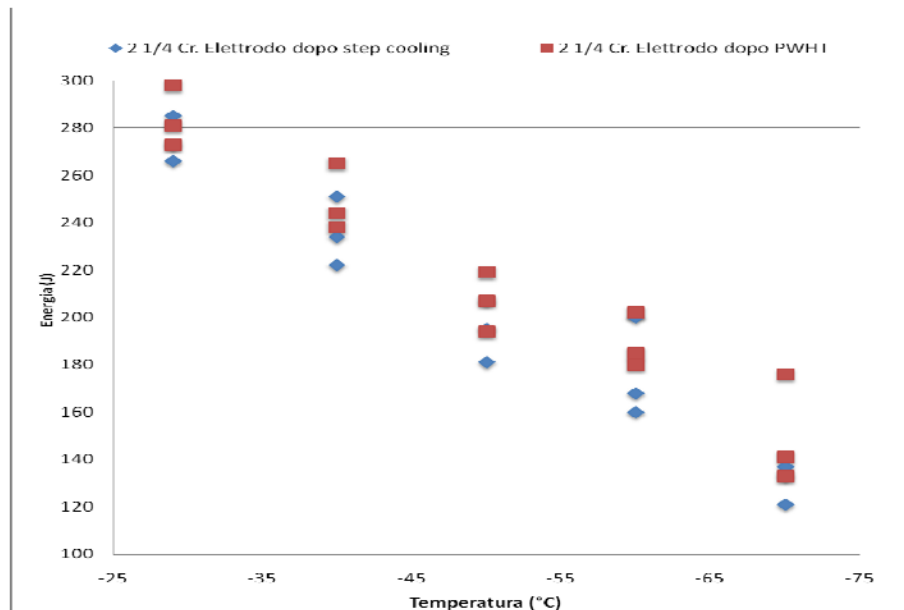


Figura 38: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad elettrodo materiale 2 ¼ Cr.

Mettendo a confronto i valori di resilienza ottenuti sul 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso, dopo trattamento termico post saldatura e dopo step cooling, rappresentati in figura 39 si nota che i valori seguono un andamento comune tra i due diversi tipi di trattamento termico. Chiaramente i valori relativi alle prove effettuate dopo step cooling hanno un valore lievemente inferiore rispetto ai valori ottenuti dopo solo PWHT, questo è abbastanza normale poiché il materiale ha subito un severo ciclo di trattamento termico che accentua la fragilità dei materiali. Per il processo di saldatura in esame si nota inoltre una marcata perdita di proprietà meccaniche intorno dopo i -40°C.

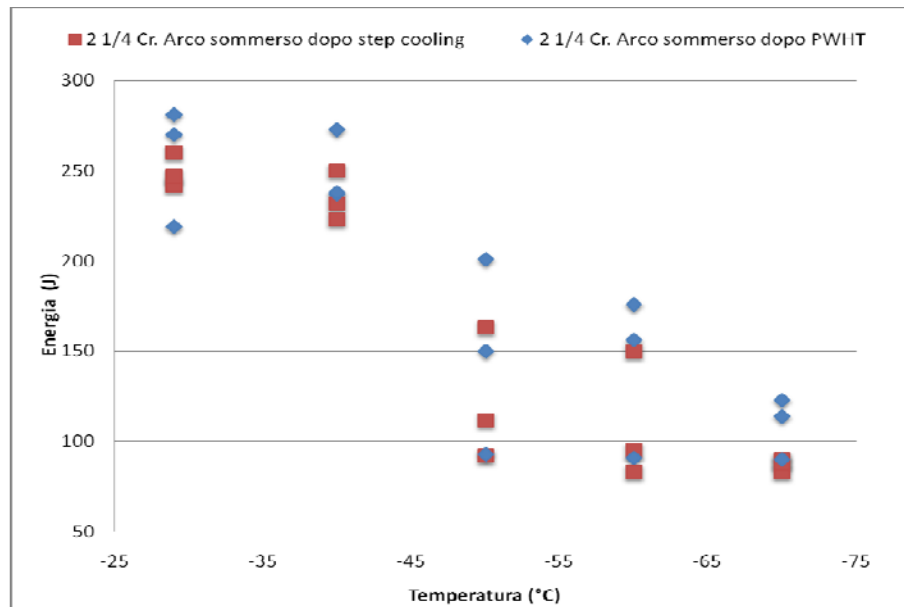


Figura 39: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale 2 1/4 Cr.

Mettendo a confronto i valori di resilienza ottenuti sul Cr.V. saldato ad arco sommerso, dopo trattamento termico post saldatura e dopo step cooling, rappresentati in figura 40. Si nota che i valori seguono un andamento comune tra i due diversi tipi di trattamento termico. I valori si mantengono a valori molto alti anche a temperature molto basse. Ci sono alcuni punti sotto la media, questi punti con valori di resilienza più bassi sono probabilmente causati da piccoli difetti all'interno della saldatura che vengono accentuati dalle basse temperature, comunque questi valori di resilienza si attestano a dei valori molto più alti rispetto ai valori minimi richiesti dalle normative europee (minimo valore per normativa 27J).

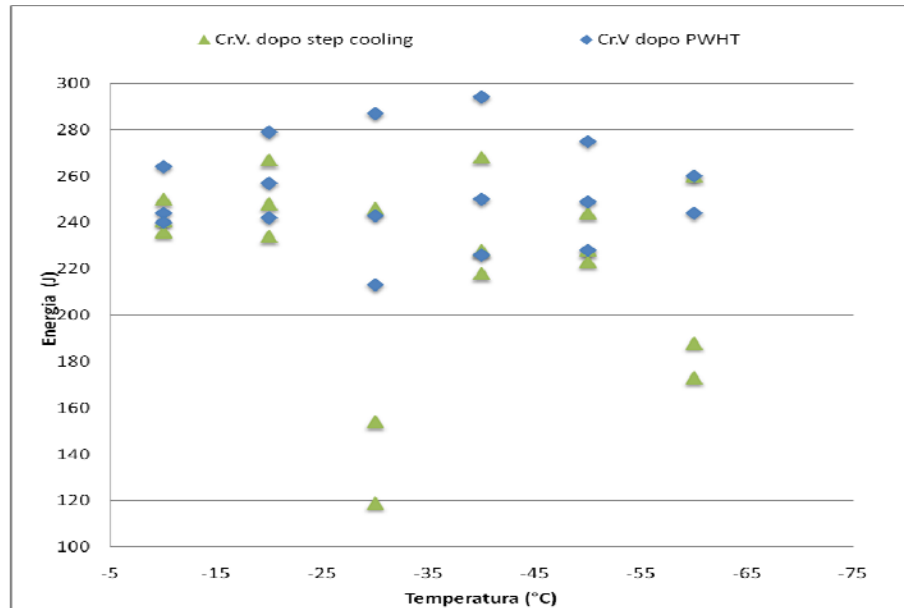


Figura 40: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale Cr. V.

A valle di questa analisi delle resilienze in zona termicamente alternata possiamo affermare che tutti i materiali hanno un ottimo comportamento alle basse temperature anche dopo avere subito un trattamento come lo step cooling che va ad aumentare la fragilità dei materiali.

Il 2 ¼ Cr. ha una diminuzione delle proprietà meccaniche al diminuire della temperatura, il materiale saldato ad elettrodo risulta inoltre meno preformate in termini di resilienza rispetto al 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso..

Il Cr. V. mantiene, al diminuire della temperatura, dei valori più che ottimali di resistenza meccanica, infatti mantiene pressoché invariati i valori di resilienza anche alle basse temperature.

Resilienze centro saldatura (CS)

I dati ottenuti di resilienza in centro saldatura, al diminuire della temperatura dopo il trattamento termico post saldatura (PWHT) sono rappresentati nella figura 41. Si nota che i valori riscontrati tra i tre differenti materiali hanno andamenti molto simili. Ci sono alcuni punti sotto la media, in particolare del Cr.V., questi valori di resilienza si attestano a dei valori poco più alti rispetto ai valori minimi richiesti dalle normative europee (minimo valore per normativa 27J). Si nota che il 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo con Ø 4 mm ha un'ottima performance anche a bassa temperatura.

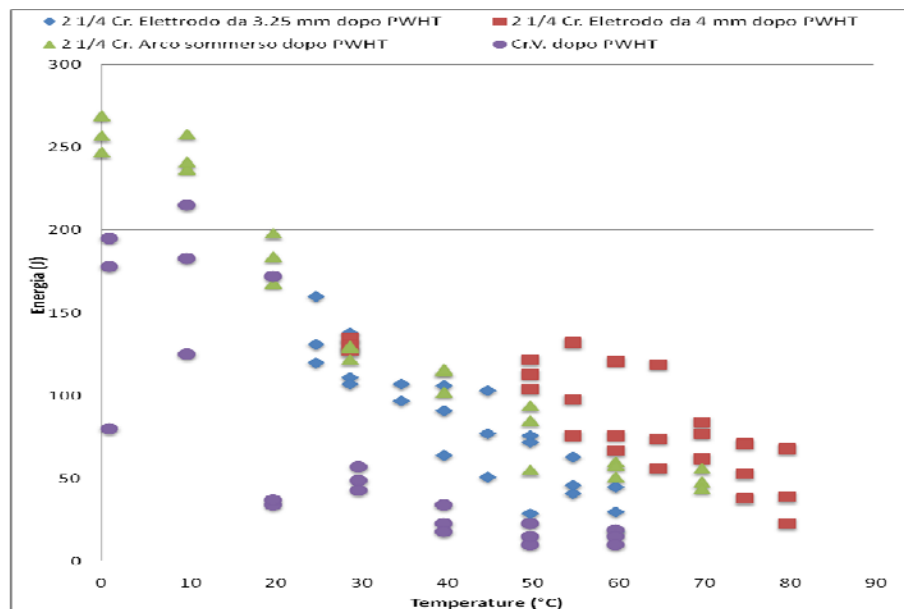


Figura 41: confronto resilienze CS dopo trattamento termico post saldatura (PWHT) tra i 3 materiali in esame

I dati ottenuti di resilienza in centro saldatura al diminuire della temperatura, dopo il trattamento di step cooling, sono rappresentati nella figura 41. Si nota che i valori riscontrati nelle tre differenti condizioni hanno andamenti molto simile. Ci sono alcuni punti sotto la media, in particolare del Cr.V., questi valori di resilienza si attestano a dei valori poco più alti rispetto ai valori minimi richiesti dalle normative europee (minimo valore per normativa 27J). Si nota che il 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo con Ø 4 mm ha un'ottima performance anche a bassa temperatura. Questa ottima performance è dovuta all'effetto benefico

dovuto alle passate molto strette (rispetto alle passate di un arco sommerso), la saldatura con elettrodo da \varnothing 4 mm è stata fatta su una base di saldatura fatta con un elettrodo più piccolo.

I valori di resilienza dopo step cooling si attestano a dei valori inferiori rispetto ai valori riscontrati dopo il solo trattamento termico di distensione post saldatura PWHT in quanto il materiale ha subito un severo ciclo di invecchiamento che accentua la fragilità dei materiali

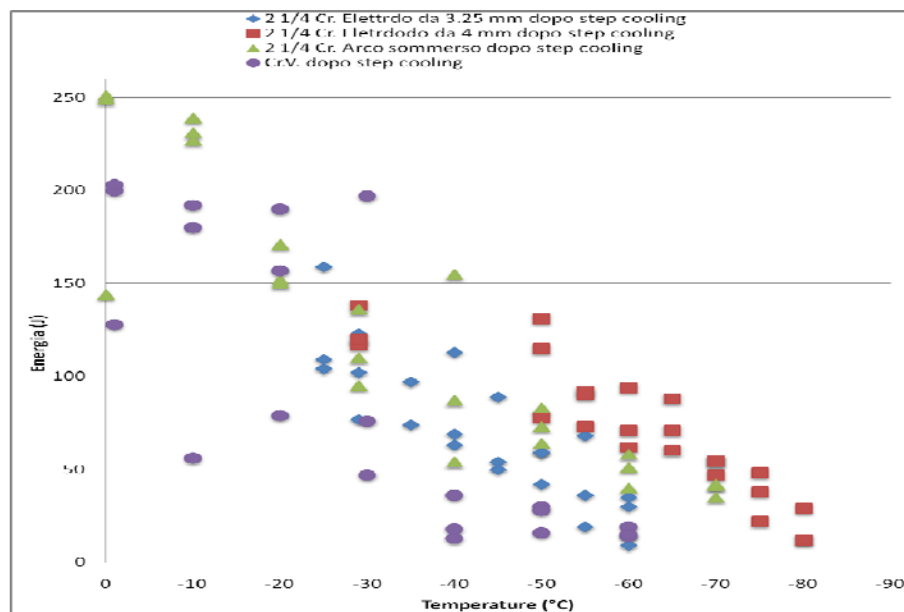


Figura 42: confronto resilienze CS dopo trattamento di step cooling tra i 3 materiali in esame

Mettendo a confronto i valori di resilienza ottenuti sul 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo da \varnothing 3.25 mm, dopo trattamento termico post saldatura e dopo step cooling, rappresentati in figura 43. Si nota che i valori seguono un andamento simile tra i due diversi tipi di trattamento termico. Chiaramente i valori relativi alle prove effettuate dopo step cooling hanno un valore lievemente inferiore rispetto ai valori ottenuti dopo solo PWHT, questo è abbastanza normale poiché il materiale ha subito un severo ciclo di trattamento termico che accentua la fragilità dei materiali.

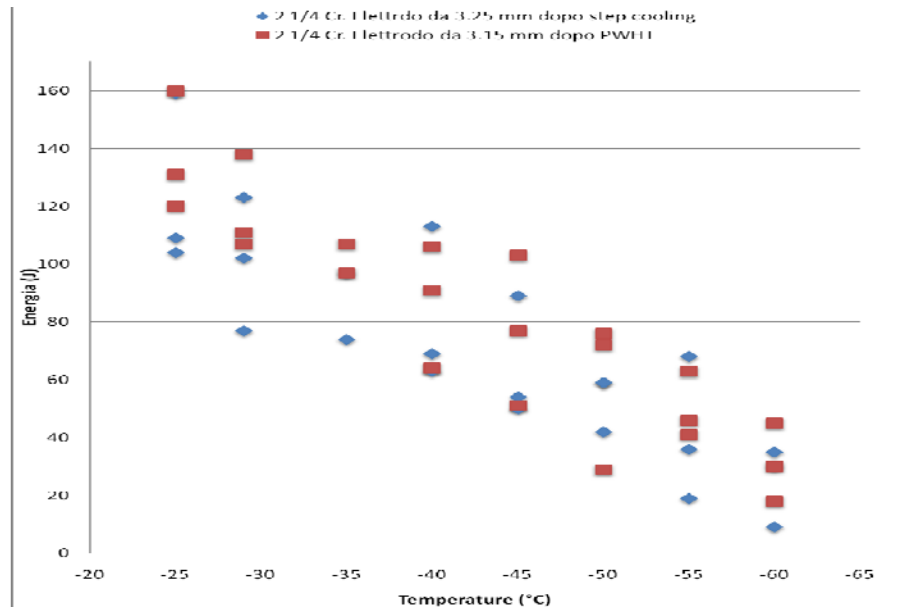


Figura 43: confronto resilienze CS dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad elettrodo da 3.25 Ø materiale 2 ¼ Cr.

Mettendo a confronto i valori di resilienza ottenuti sul 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo da Ø4 mm, dopo trattamento termico post saldatura e dopo step cooling, rappresentati in figura 44, si nota che i valori seguono un andamento simile tra i due diversi tipi di trattamento termico. Chiaramente i valori relativi alle prove effettuate dopo step cooling hanno un valore lievemente inferiore rispetto ai valori ottenuti dopo solo PWHT, questo è abbastanza normale poiché il materiale ha subito un severo ciclo di trattamento termico che accentua la fragilità dei materiali. Si nota che dopo i -50°C c'è una forte diminuzione dei valori di resilienza, comunque fino a -80 °C questo processo di saldatura fornisce degli ottimi valori di resilienza.

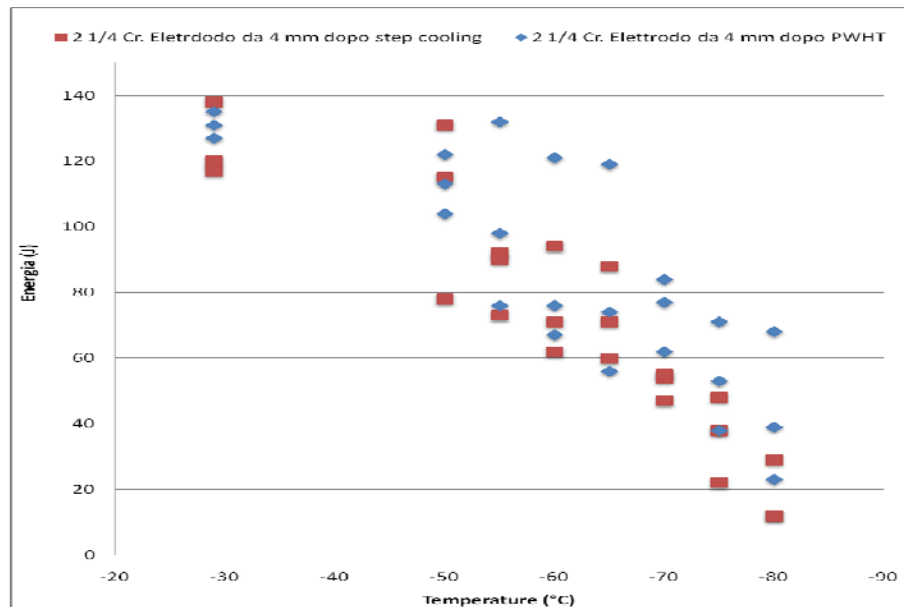


Figura 44: confronto resilienze CS dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad elettrodo da 4 Ø materiale 2 ¼ Cr.

Mettendo a confronto i valori di resilienza ottenuti sul 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso, dopo trattamento termico post saldatura e dopo step cooling, rappresentati in figura 45 si nota che i valori seguono un andamento comune tra i due diversi tipi di trattamento termico. Chiaramente i valori relativi alle prove effettuate dopo step cooling hanno un valore lievemente inferiore rispetto ai valori ottenuti dopo solo PWHT, questo è abbastanza normale poiché il materiale ha subito un severo ciclo di trattamento termico che accentua la fragilità dei materiali. Fino a -80 °C questo processo di saldatura fornisce degli ottimi valori di resilienza.

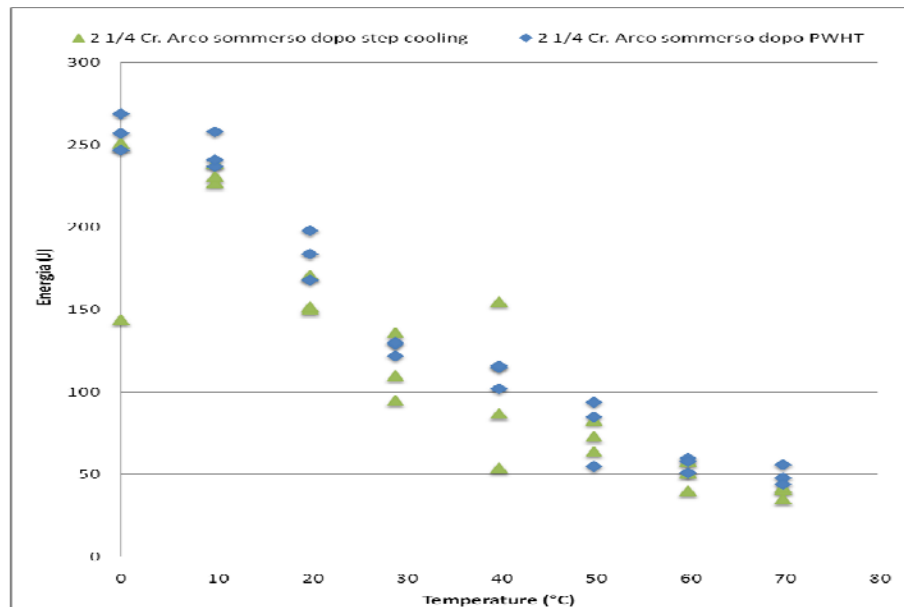


Figura 45: confronto resilienze CS dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale 2 1/4 Cr.

Mettendo a confronto i valori di resilienza ottenuti sul Cr.V. saldato ad arco sommerso, dopo trattamento termico post saldatura e dopo step cooling, rappresentati in figura 46. Si nota che i valori seguono un andamento comune tra i due diversi tipi di trattamento termico. Ci sono alcuni punti sotto la media, questi punti con valori di resilienza più bassi sono probabilmente causati da piccoli difetti all'interno della saldatura che vengono accentuati dalle basse temperature.

Si nota una forte perdita delle proprietà meccaniche sotto i -20°C , infatti sopra questo valore vengono ottenuti dei valori di resilienza più che accettabili, mentre sotto i -20°C si riscontrano dei valori molto inferiori, con alcuni addirittura sotto il valore minimo accettabile per le norme di costruzione eurpee (27J minimo).

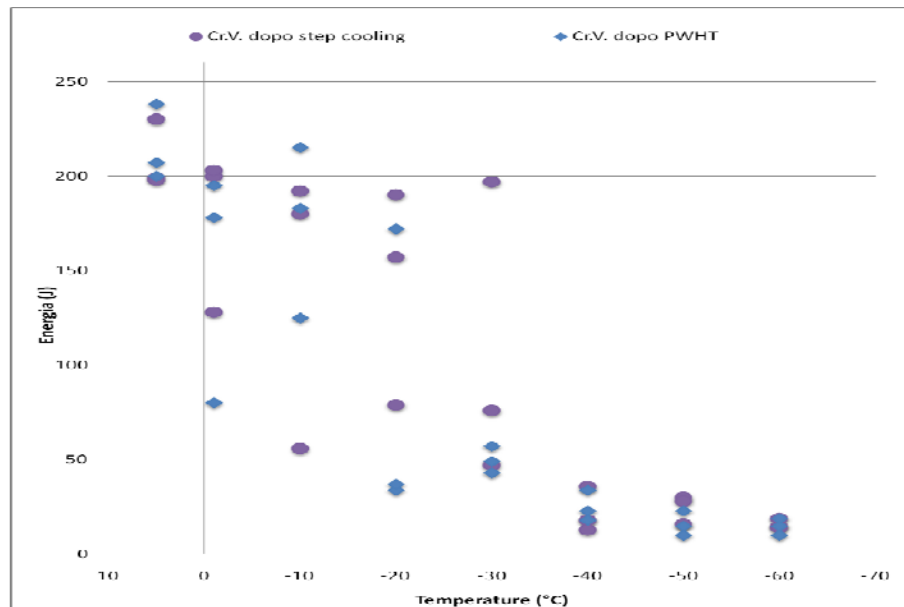


Figura 46: confronto resilienze ZTA dopo trattamento di distensione post saldatura PWHT e dopo trattamento di step cooling saldatura ad arco sommerso materiale Cr. V.

A valle di questa analisi delle resilienze in centro saldatura possiamo affermare che tutti i materiali hanno un buon comportamento alle basse temperature anche dopo avere un trattamento come lo step cooling che va ad aumentare la fragilità dei materiali.

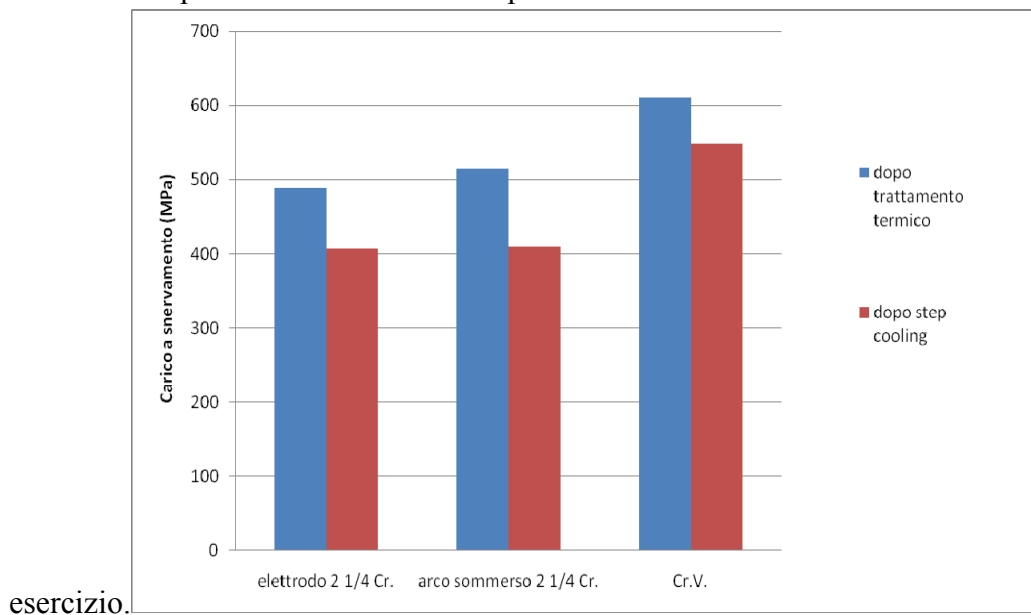
Il 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo e ad arco sommerso ha una diminuzione delle proprietà meccaniche in funzione della temperatura, comunque anche a bassissime temperature questo materiale assicura dei valori di resilienza buoni.

Il Cr. V. ha una diminuzione delle proprietà meccaniche sotto i -20°C, questo potrebbe essere dovuto a materiali di saldatura meno collaudati rispetto ai più conosciuti per il 2 ¼ Cr; infatti il Cr.V. è un materiale da costruzione relativamente nuovo.

Prove di trazione

Nella figura 47 sono riportati i valori di snervamento ottenuti dopo trattamento termico di distensione post saldatura (PWHT) e dopo step cooling.

Possiamo dire che i valori sono in linea con i requisiti richiesti dalle normative per questi materiali, come è facile intuire i valori di snervamento dopo un lungo ciclo di step cooling sono inferiori, poiché questo severo trattamento termico viene fatto sugli acciai per accentuare la fragilità dei materiali, questo trattamento di step cooling simula l'esercizio dei materiali, infatti fornisce un'idea di come può essere il materiale dopo molte ore di



esercizio.

Figura 47: confronto snervamenti tra i diversi materiali dopo step cooling e dopo PWHT

Nella figura 48 sono riportati i valori dello sforzo di rottura ottenuti dopo trattamento termico di distensione post saldatura (PWHT) e dopo step cooling.

Possiamo dire che i valori sono in linea con i requisiti richiesti secondo ASME II parte A per questi materiali, come è facile intuire i valori di rottura dopo un lungo ciclo di step cooling sono inferiori, poiché questo severo trattamento termico viene fatto sugli acciai per accelerare l'invecchiamento e la fragilizzazione dei materiali. Viene simulato con questo trattamento l'esercizio dei materiali, le prove meccaniche effettuate dopo questo trattamento danno

un'idea di come può rispondere alle sollecitazioni meccaniche il materiale dopo molte ore di esercizio.

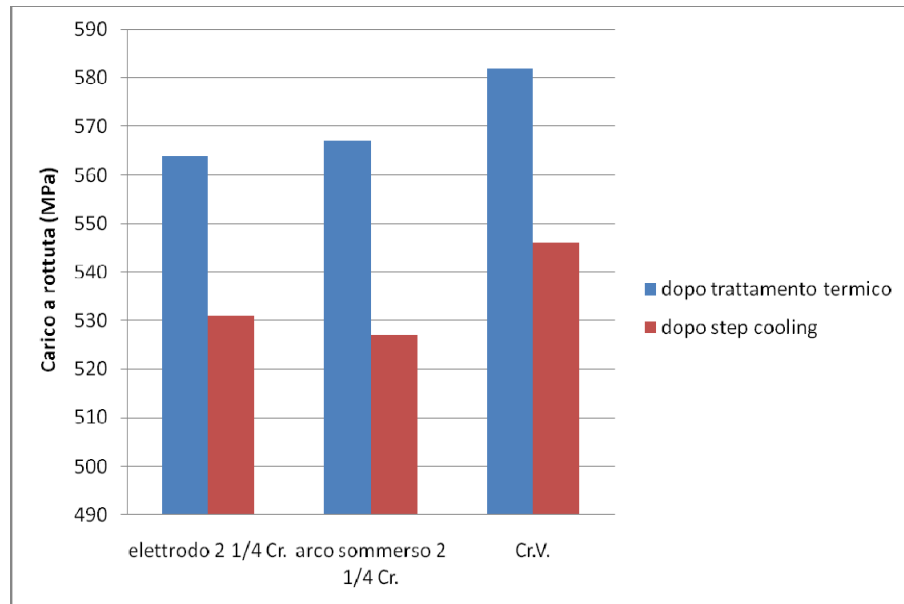


Figura 48: confronto trazioni tra i diversi materiali dopo step cooling e dopo PWHT

Possiamo notare che sia i valori ottenuti dello sforzo di rottura sia quelli dello sforzo di snervamento presentano un andamento simile, sono più alti dopo PWHT e minori dopo step cooling.

I valori di snervamento ottenuti dopo PWHT si discostano di poco rispetto ai valori ottenuti dopo step cooling.

I valori di rottura ottenuti dopo PWHT sono molto più alti rispetto ai valori dopo step cooling, infatti come si diceva precedentemente lo step cooling invecchia il materiale.

Prove di durezza

Sono state misurate le durezza, come rappresentato in figura 49, partendo dal materiale base verso il centro saldatura (1,2,3), queste misure sono state prese a due altezze di saldatura diverse posizioni A e B.

A corrisponde alla posizione alta verso la pelle della saldatura posizione B la posizione centrale della saldatura.

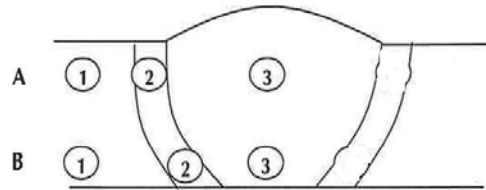


Figura 49: schema misurazione durezza

Nella figura 50 sono riportate le durezza rilevate sul Cr.V.

Si nota che il profilo di durezza parte dal materiale base con valori che si attestano intorno a 220 HV, si alzano i valori di durezza della parte di ZTA con delle punte di 255HV, per poi scendere nuovamente nel centro saldatura.

Come si nota la distribuzione è abbastanza omogenea con solo pochi valori fuori dalla media dei materiali.

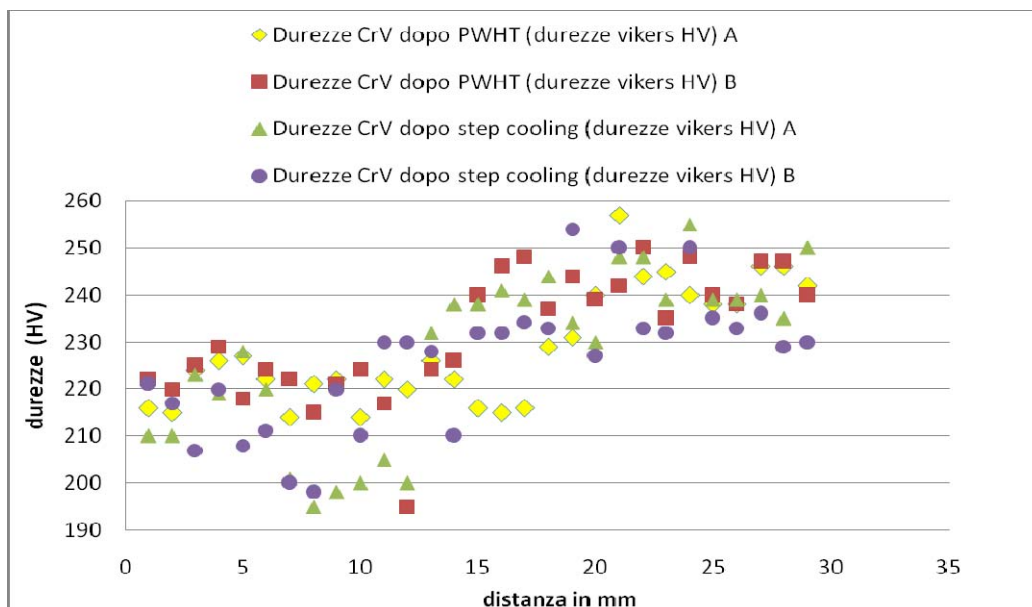


Figura 50: durezza Cr.V.

Sono riportate in figura 51 i valori di durezza in posizione A (vicino alla pelle della saldatura), si nota che i valori seguono una distribuzione omogenea, con una discreta diminuzione di durezza dopo step cooling nel materiale base, questo è chiamante dovuto al lungo trattamento termico.

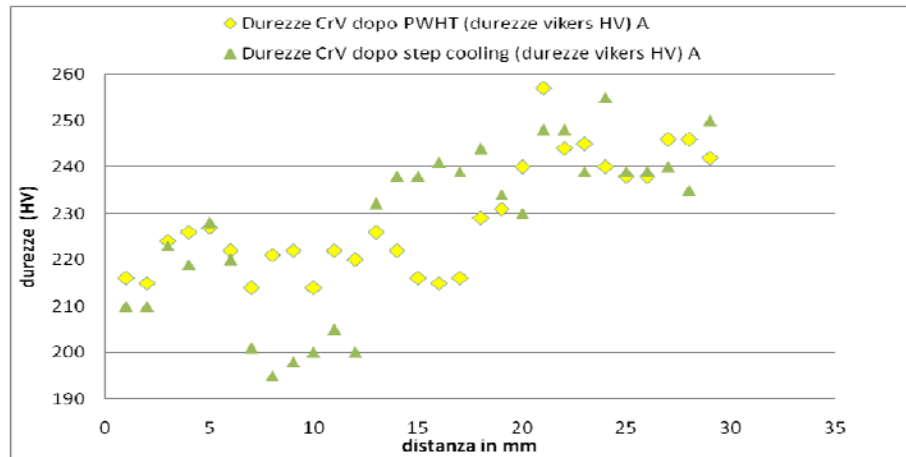


Figura 51: durezza Cr.V. in posizione A

Sono riportate in figura 52 i valori di durezza in posizione B (centro della saldatura), si nota che i valori seguono una distribuzione omogenea, con una discreta diminuzione di durezza dopo step cooling nel materiale base, questo è chiamante dovuto al lungo trattamento termico.

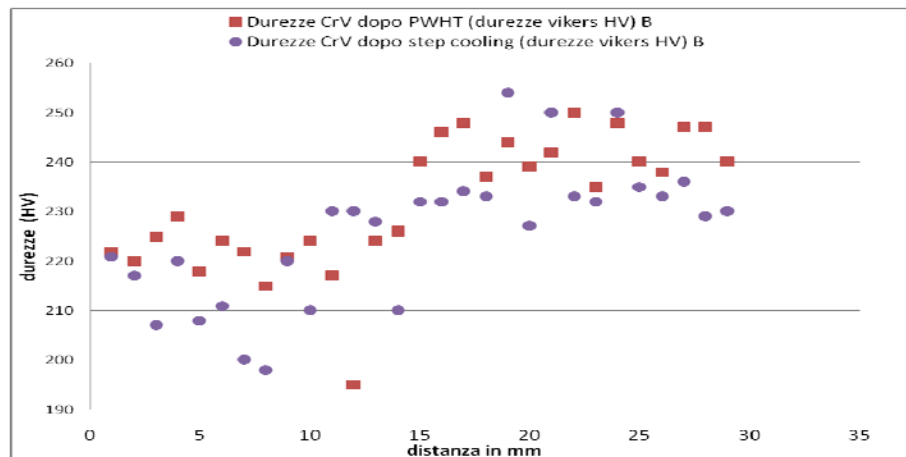


Figura 52: durezza Cr.V. in posizione B

Nella figura 53 sono riportate le durezze rilevate sul 2 ¼ Cr saldato SAW. Si nota che il profilo di durezza parte dal materiale base con valori che si attestano intorno a 200 HV, si alzano i valori di durezza della parte di ZTA con delle punte di 240HV, per poi scendere nuovamente nel centro saldatura. Come si nota la distribuzione è abbastanza omogenea con solo pochi valori fuori dalla media dei materiali.

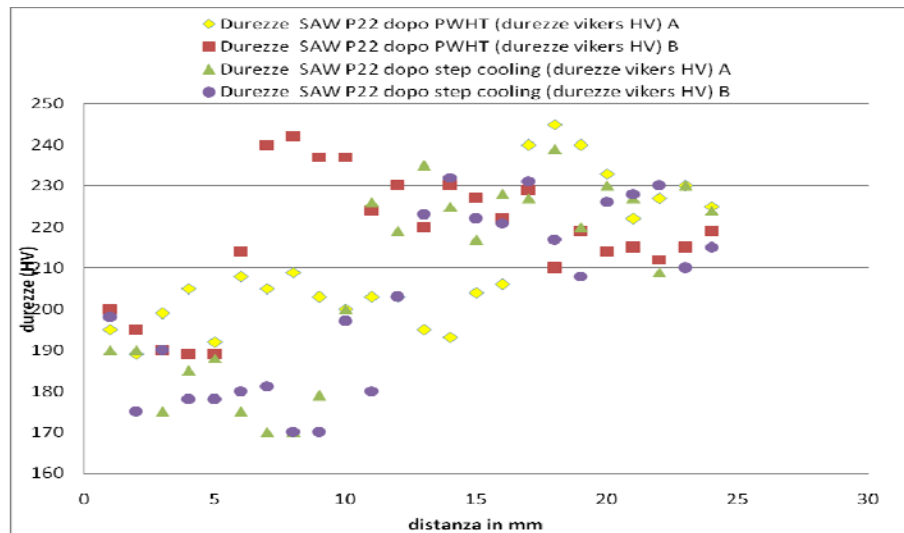


Figura 53: durezze 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso

Sono riportate in figura 54 i valori di durezza in posizione A (vicino alla pelle della saldatura), si nota che i valori seguono una distribuzione omogenea, con una discreta diminuzione di durezza dopo step cooling nel materiale base, questo è chiamante dovuto al lungo trattamento termico.

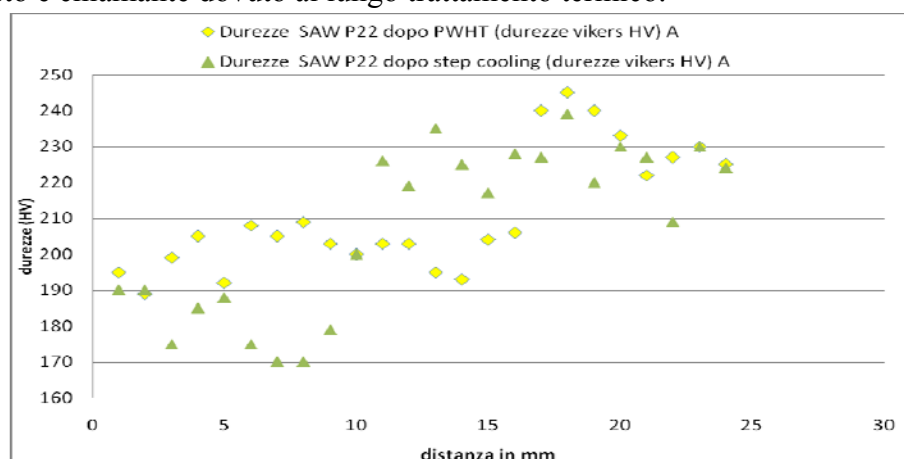


Figura 54: durezze 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso in posizione A

Sono riportate in figura 55 i valori di durezza in posizione B (centro della saldatura), si nota che i valori seguono una distribuzione omogenea, con una discreta diminuzione di durezza dopo step cooling nel materiale base, questo è chiamato dovuto al lungo trattamento termico.

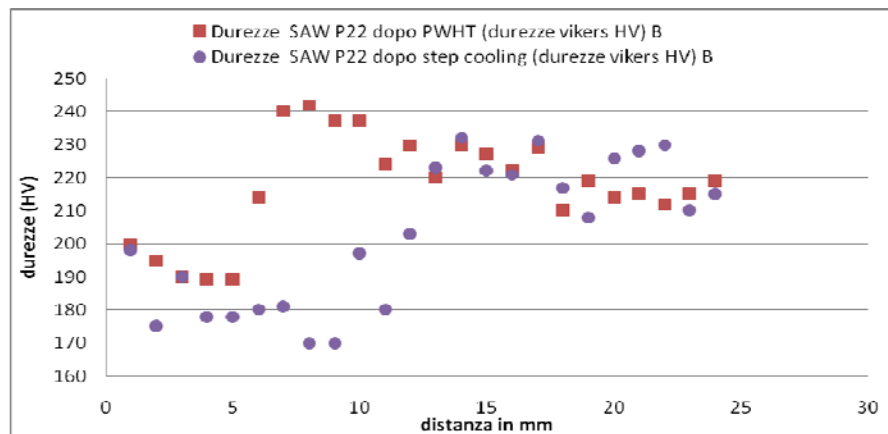


Figura 55: durezza 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso posizione B

Nella figura 56 sono riportate le durezza rilevate sul 2 ¼ Cr saldato ad elettrodo. Si nota che il profilo di durezza parte dal materiale base con valori che si attestano intorno a 200 HV, si alzano i valori di durezza della parte di ZTA con delle punte di 245HV, per poi scendere nuovamente nel centro saldatura. Come si nota la distribuzione è abbastanza omogenea.

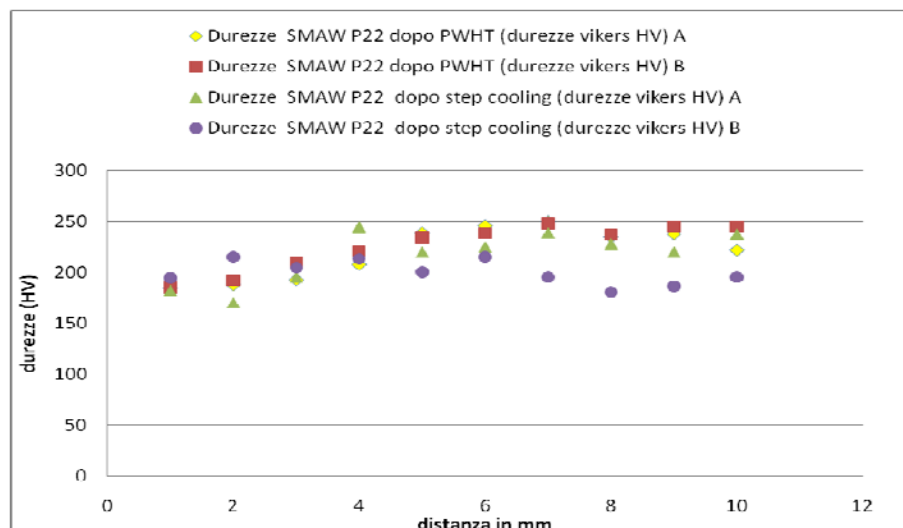


Figura 56: durezza 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo

Sono riportate in figura 57 i valori di durezza in posizione A (vicino alla pelle della saldatura), si nota che i valori seguono una distribuzione omogenea, con una discreta diminuzione di durezza dopo step cooling, questo è chiamante dovuto al lungo trattamento termico.

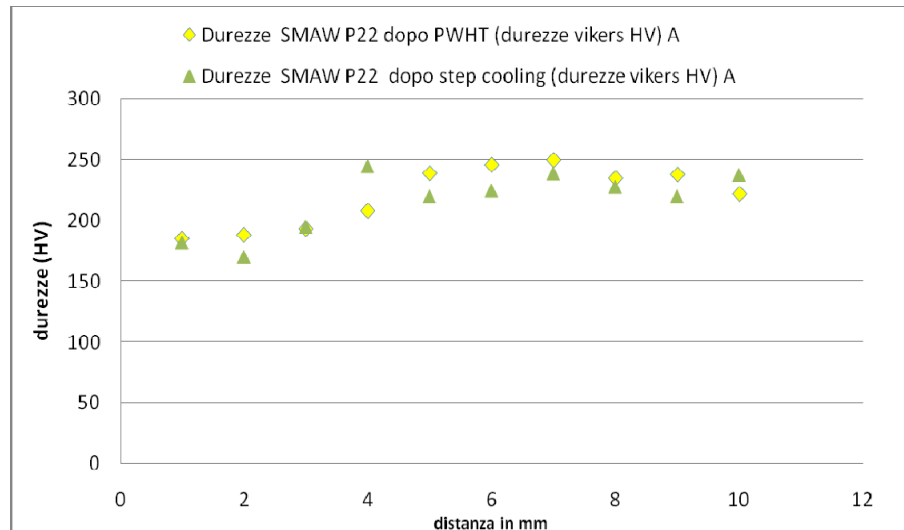


Figura 57: durezza 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo in posizione A

Sono riportate in figura 58 i valori di durezza in posizione B (centro della saldatura), si nota che i valori seguono una distribuzione omogenea, con una discreta diminuzione di durezza dopo step cooling, questo è chiamante dovuto al lungo trattamento termico.

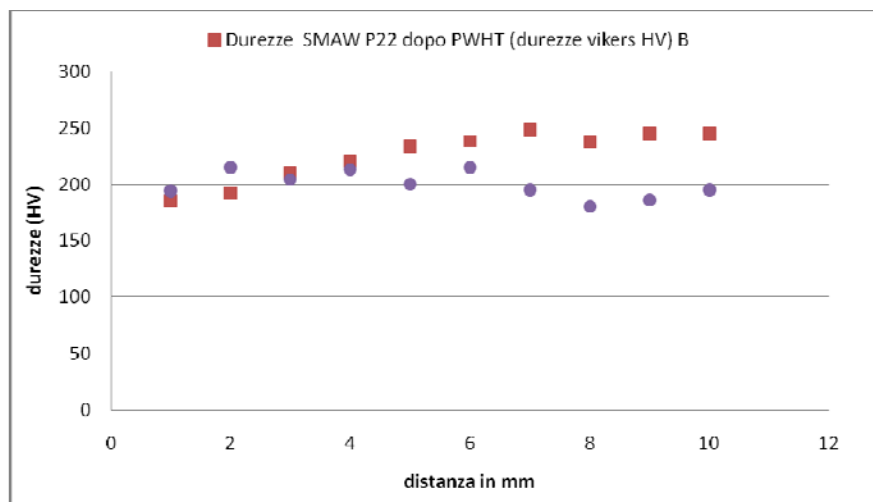


Figura 58: durezza 2 ¼ Cr. saldato elettrodo posizione B

Micrografie scattate dopo trattamento termico di distensione post saldatura PWHT

Immagini micrografiche Cr. V. dopo trattamento termico di distensione PWHT

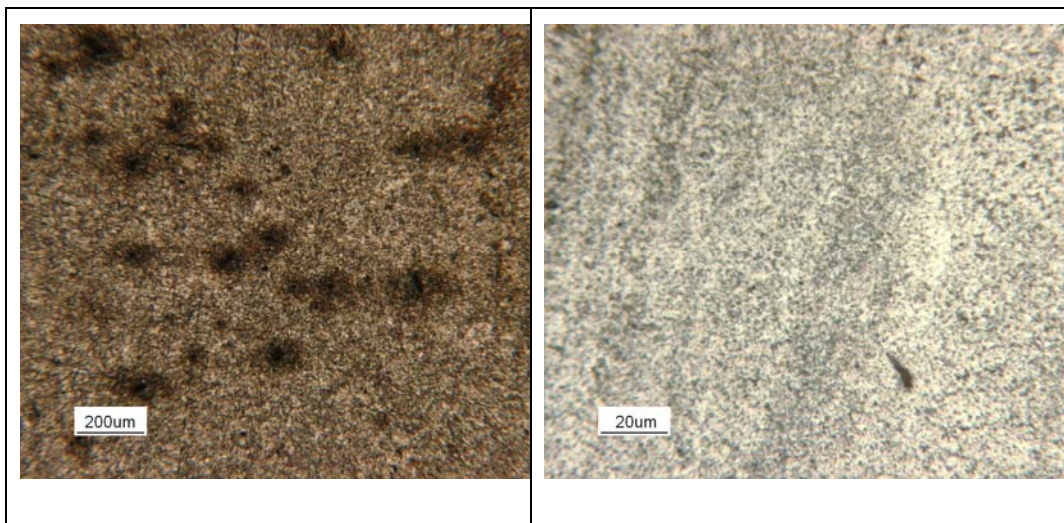


Figura 59: Materiale base Cr.V. dopo PWHT

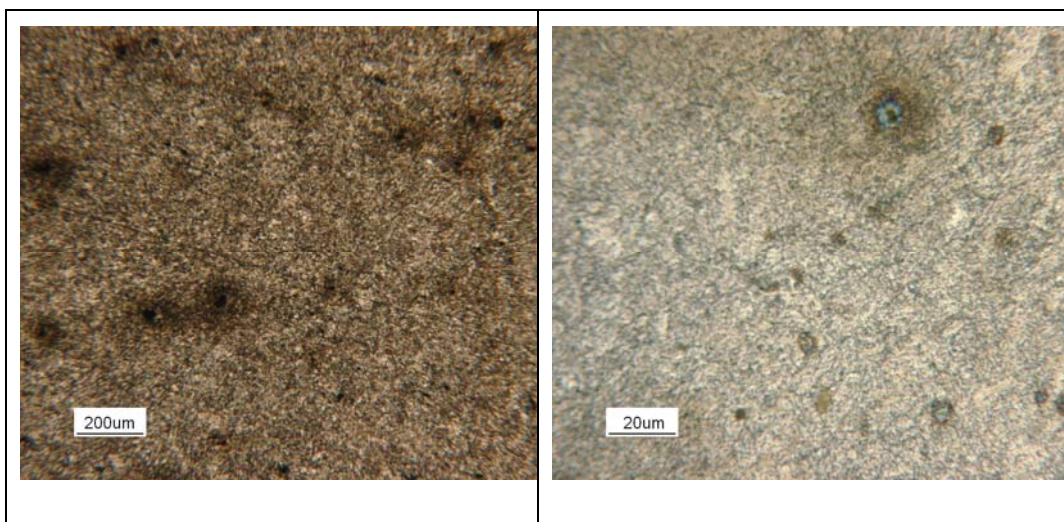


Figura 60: zona termicamente alterata Cr.V. dopo PWHT

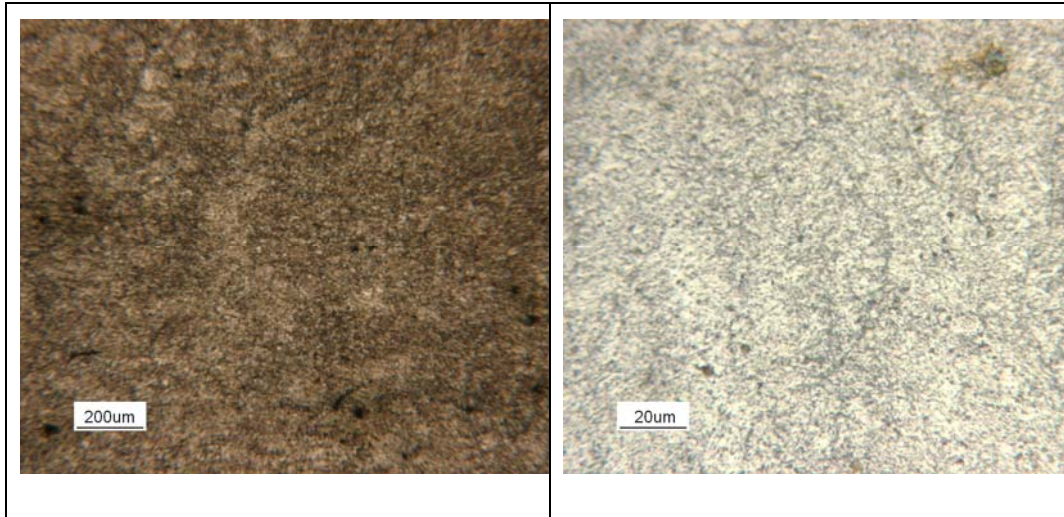


Figura 61: centro saldatura Cr.V. dopo PWHT

Nelle figure 59,60 e 61 sono rappresentate le micrografie eseguite sul campione Cr.V., sono state inserite le micrografie con un'ingrandimento di 50X e 200X. Da queste immagini si nota una struttura martensitica omogenea in tutto il campione. Nella zona fusa si nota la presenza delle dendriti della solidificazione.

Immagini micrografiche 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso dopo trattamento termico di distensione PWHT

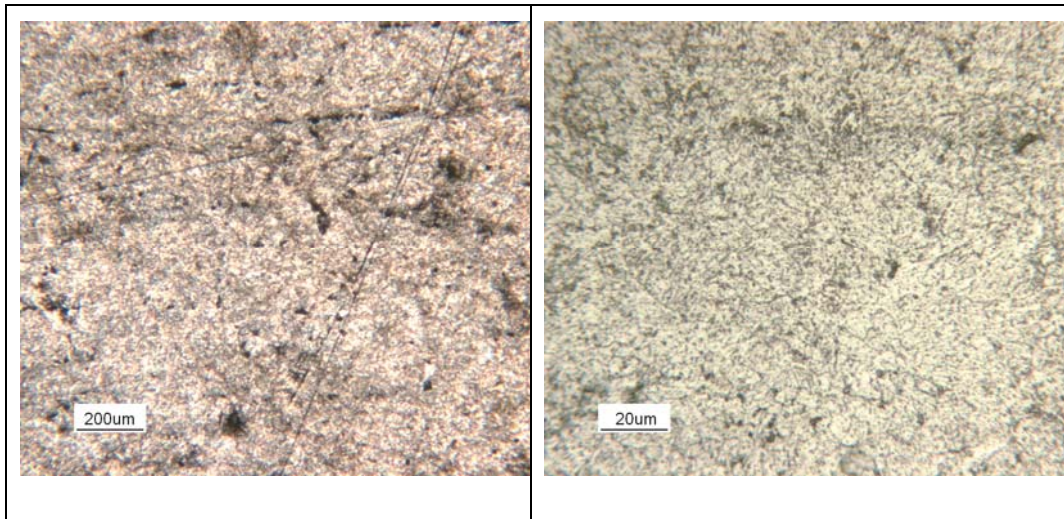


Figura 62: Materiale base 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso dopo PWHT

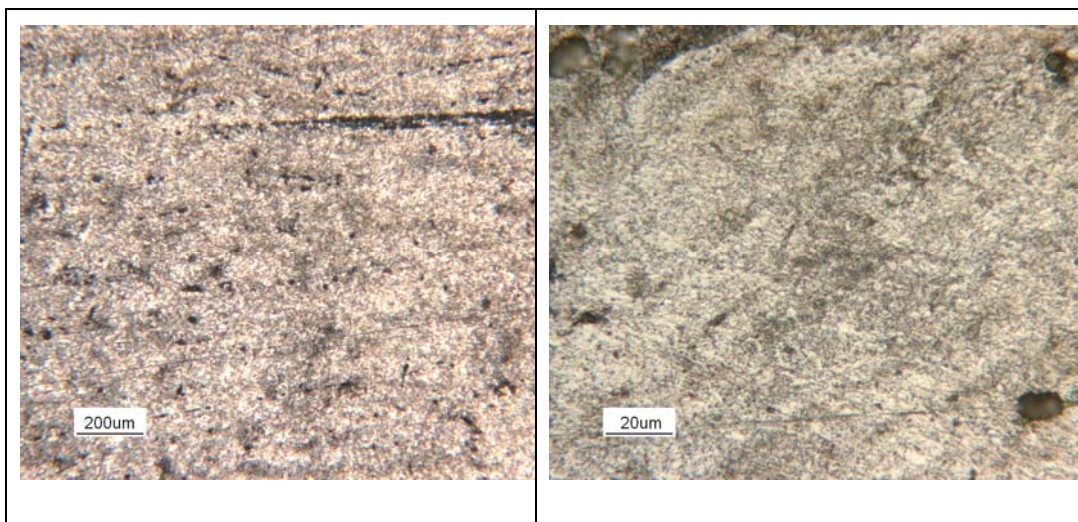


Figura 63: zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso dopo PWHT

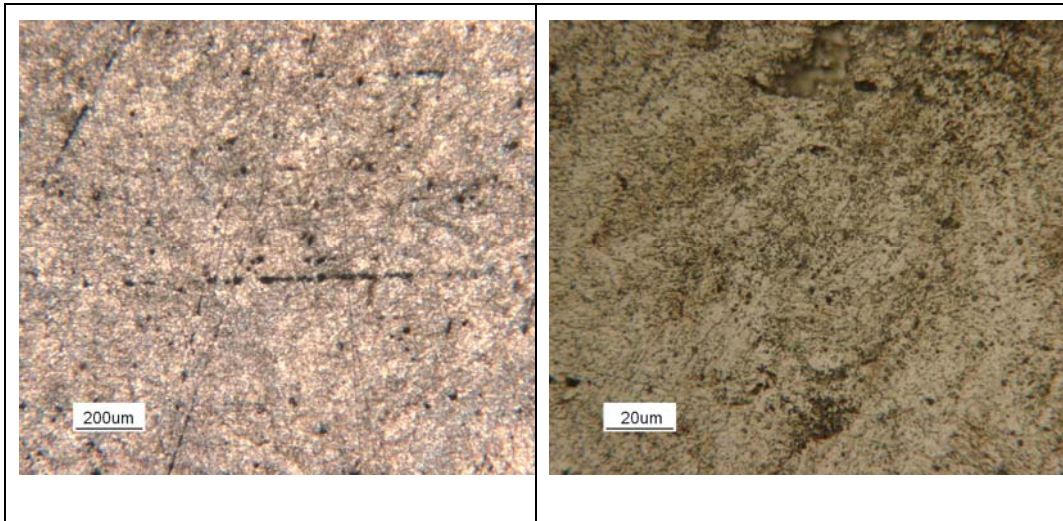


Figura 64: centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso dopo PWHT

Nelle figure 62, 63 e 64 sono rappresentate le micrografie eseguite sul campione 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso, sono state inserite le micrografie con un'ingrandimento di 50X e 200X.

Il materiale presenta la tipica struttura martensitica in tutte le posizioni analizzate, si nota che il materiale e oggetto della saldatura è un laminato. Sono infatti visibili le inclusioni non metalliche allungate in direzione della laminazione.

Immagini micrografiche 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo dopo trattamento termico di distensione PWHT

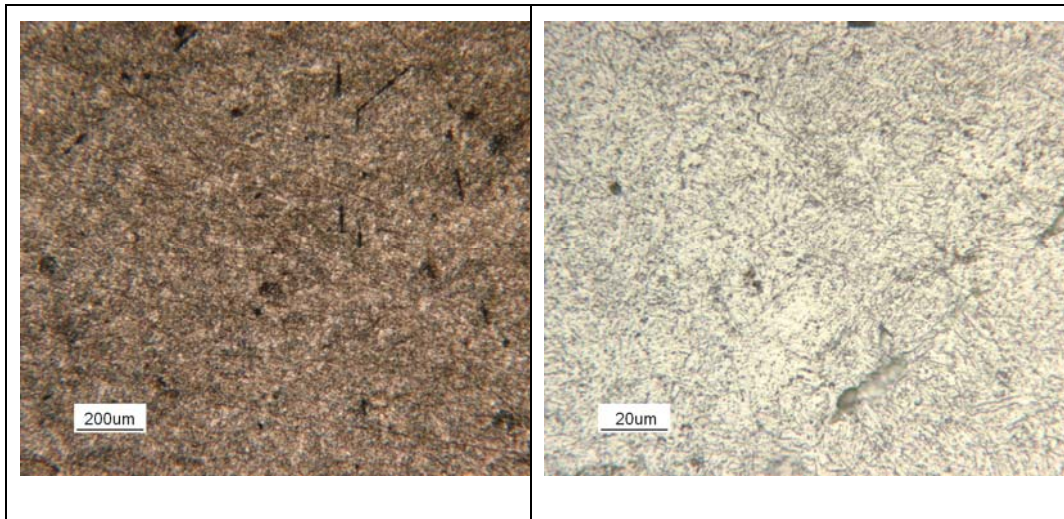


Figura 65: materiale base 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo dopo PWHT

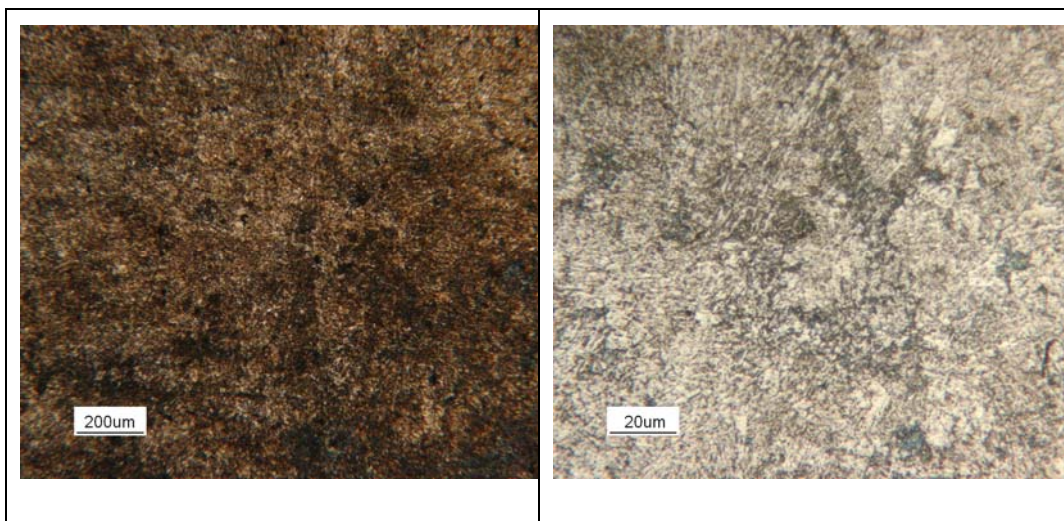


Figura 66: zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo dopo PWHT

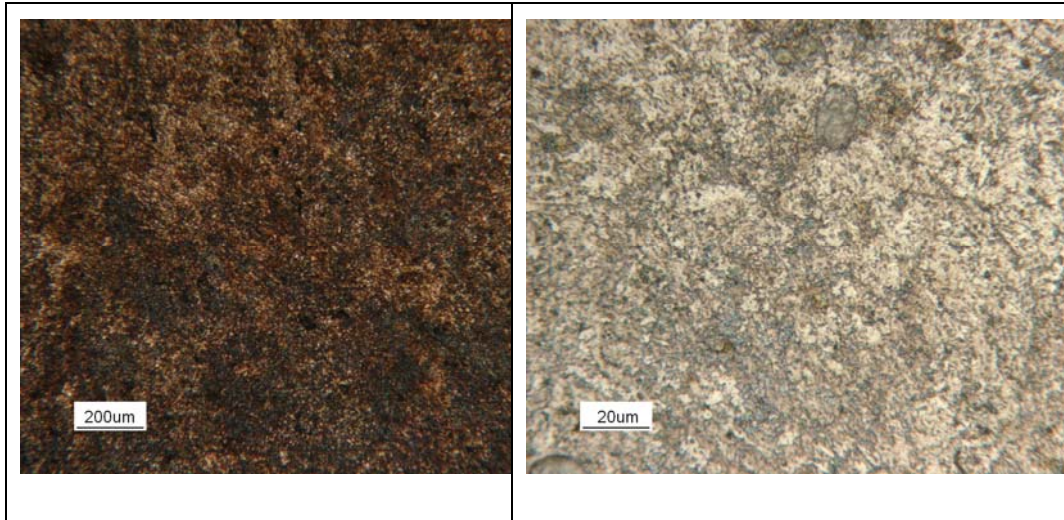


Figura 67: centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo dopo PWHT

Nelle figure 65, 66 e 67 sono rappresentate le micrografie eseguite sul campione 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo, sono state inserite le micrografie con un'ingrandimento di 50X e 200X.

Il materiale presenta la tipica struttura martensitica in tutte le posizioni analizzate, si nota che il materiale e oggetto della saldatura è un laminato. Sono infatti visibili le inclusioni non metalliche allungate in direzione della laminazione.

Micrografie scattate dopo trattamento termico di step cooling

Immagini micrografiche Cr. V. dopo trattamento termico step cooling

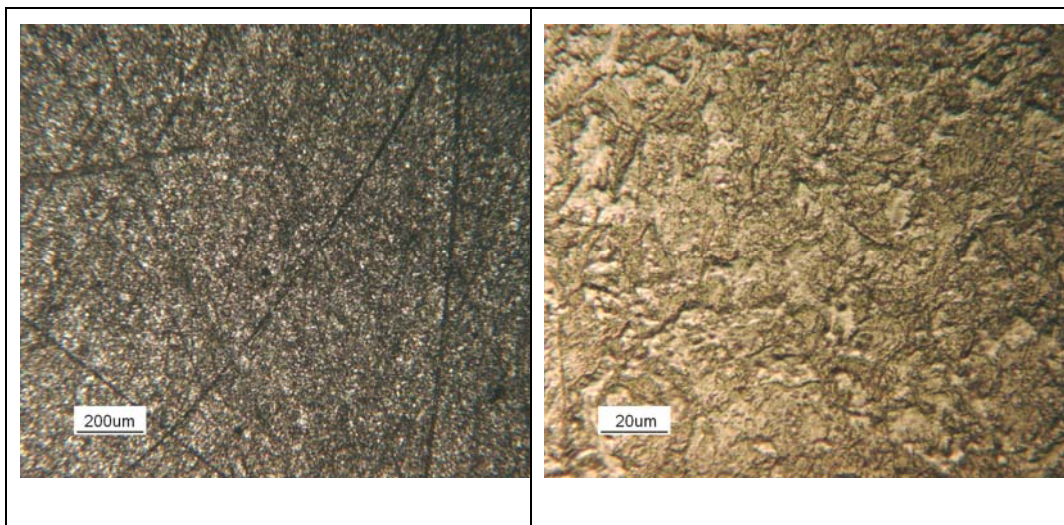


Figura 68: centro saldatura Cr.V. dopo step cooling

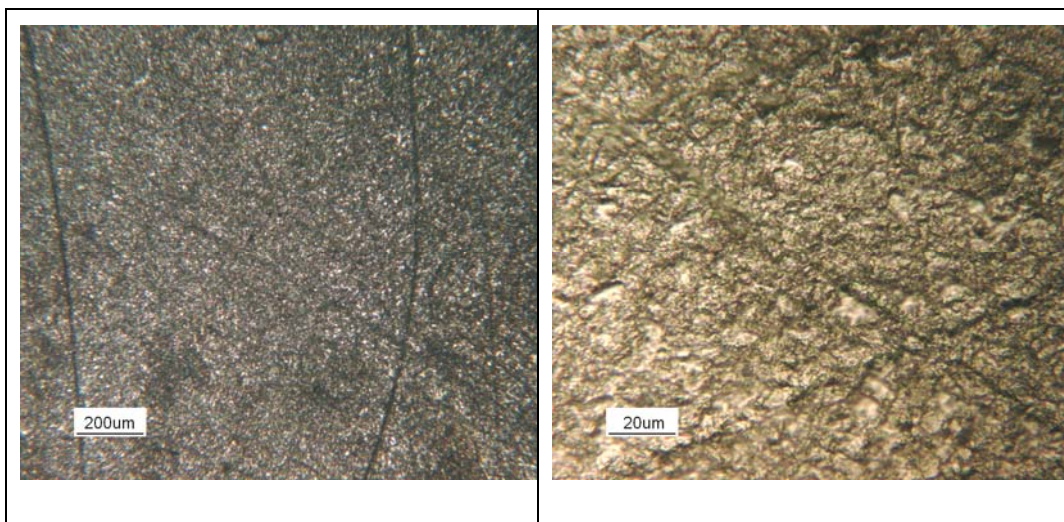


Figura 69: zona termicamente alterata Cr.V. dopo step cooling

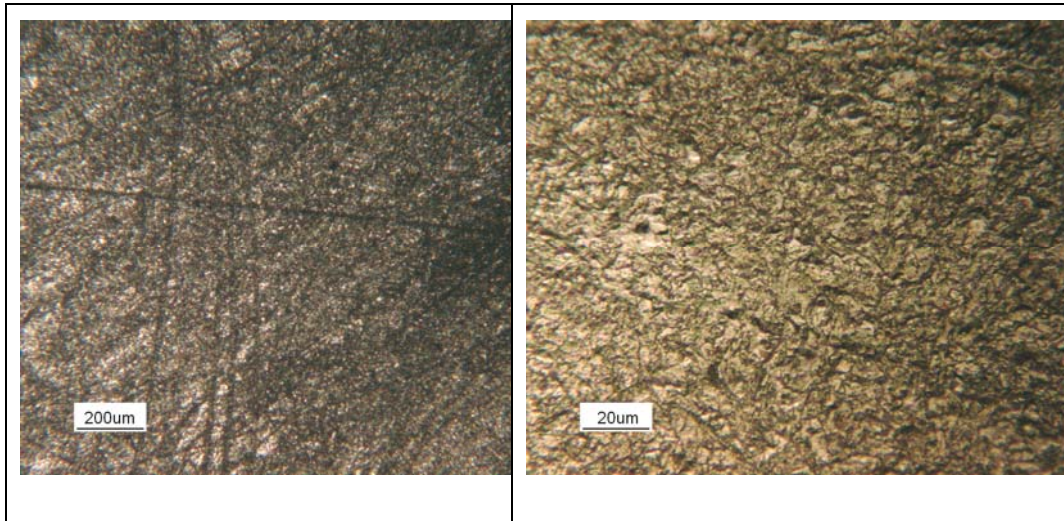


Figura 70: centro saldatura Cr.V. dopo step cooling

Nelle figure 68, 69 e 70 sono rappresentate le micrografie eseguite sul campione Cr.V., sono state inserite le micrografie con un'ingrandimento di 50X e 200X. Il materiale presenta una struttura martensitica con alcuni isolati dendriti.

Immagini micrografiche 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso dopo trattamento termico step cooling

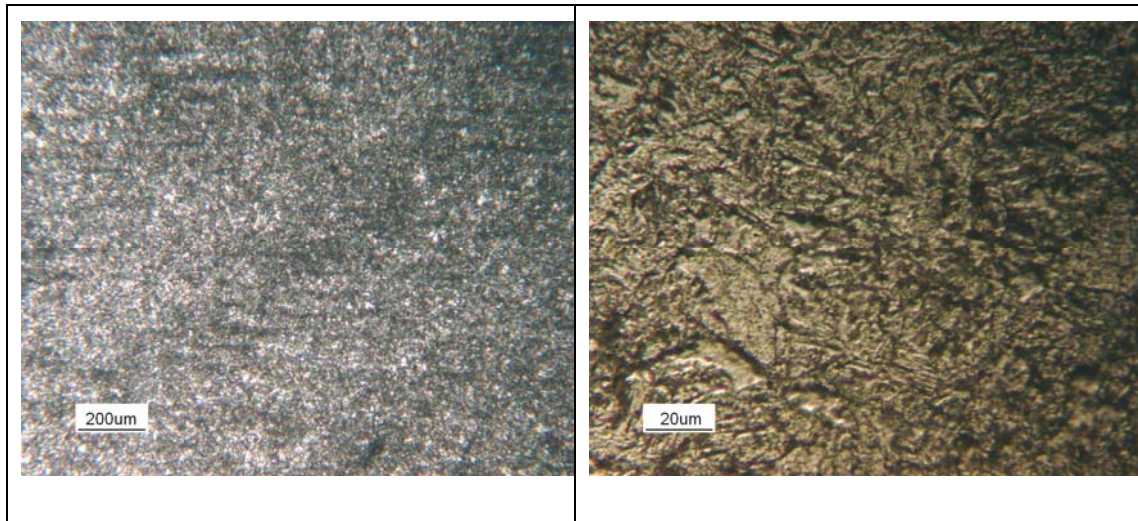


Figura 71: materiale base 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso dopo step cooling

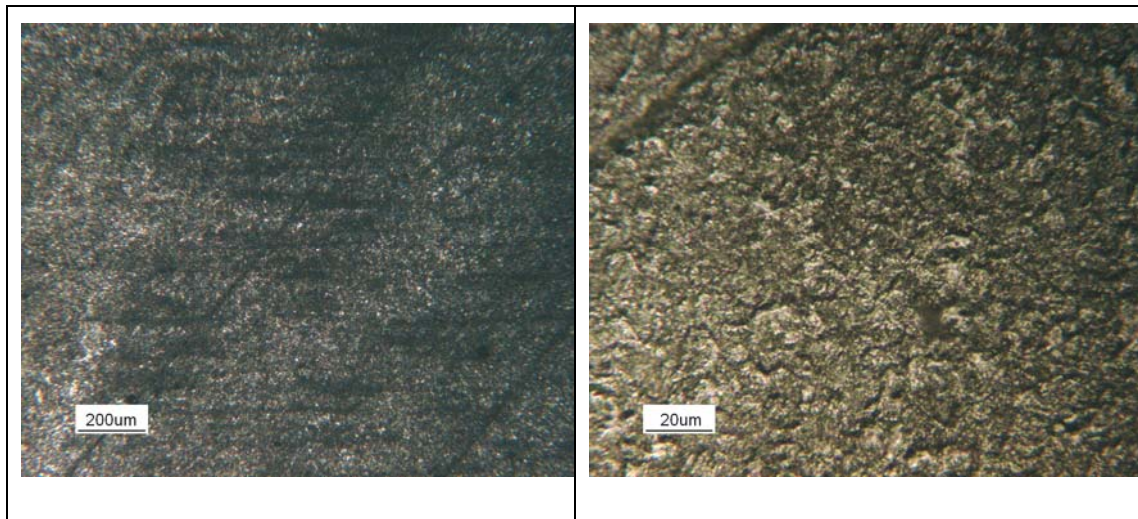


Figura 72: zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso dopo step cooling

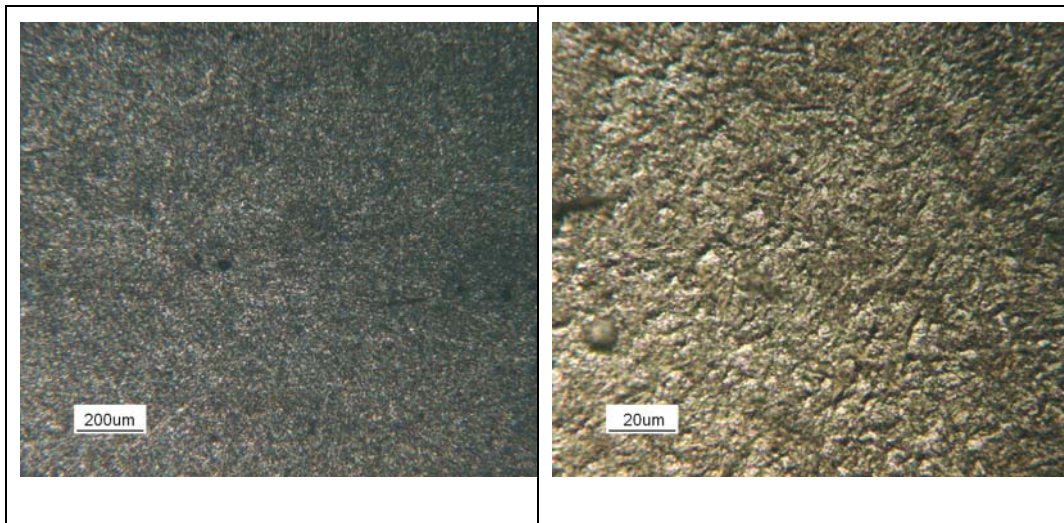


Figura 73 centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato ad arco sommerso dopo step cooling

Nelle figure 71, 72 e 73 sono rappresentate le micrografie eseguite sul campione 2 ¼ Cr. saldato con arco sommerso, sono state inserite le micrografie con un'ingrandimento di 50X e 200X.

Il materiale presenta la tipica struttura martensitica in tutte le posizioni analizzate.

Immagini micrografiche 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo dopo trattamento termico step cooling

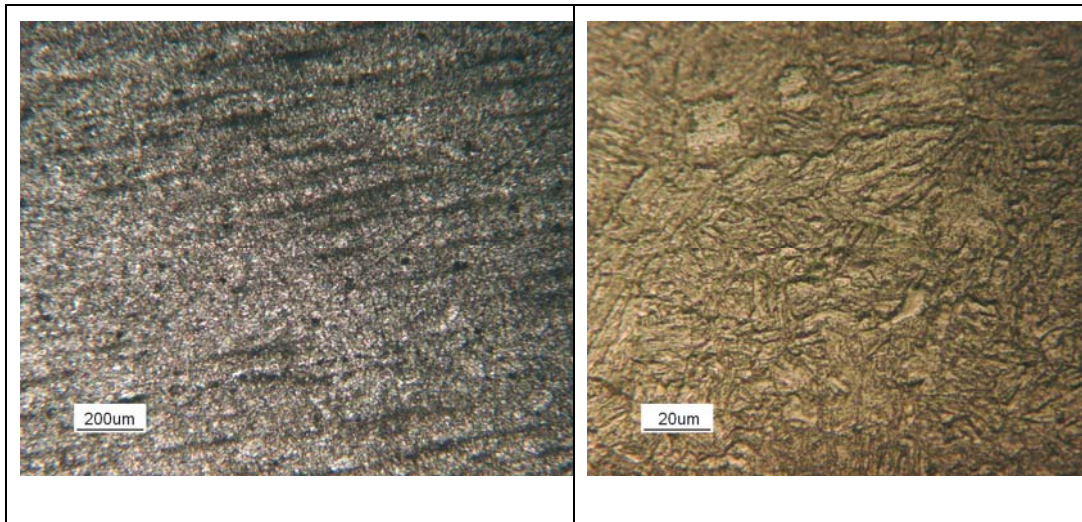


Figura 74 materiale base 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo dopo step cooling

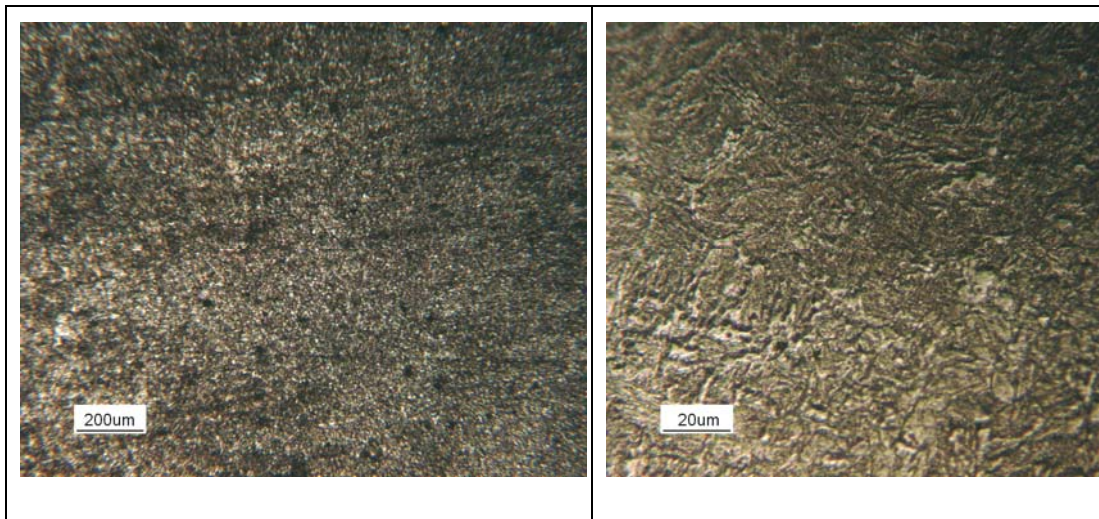


Figura 75 zona termicamente alterata 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo dopo step cooling

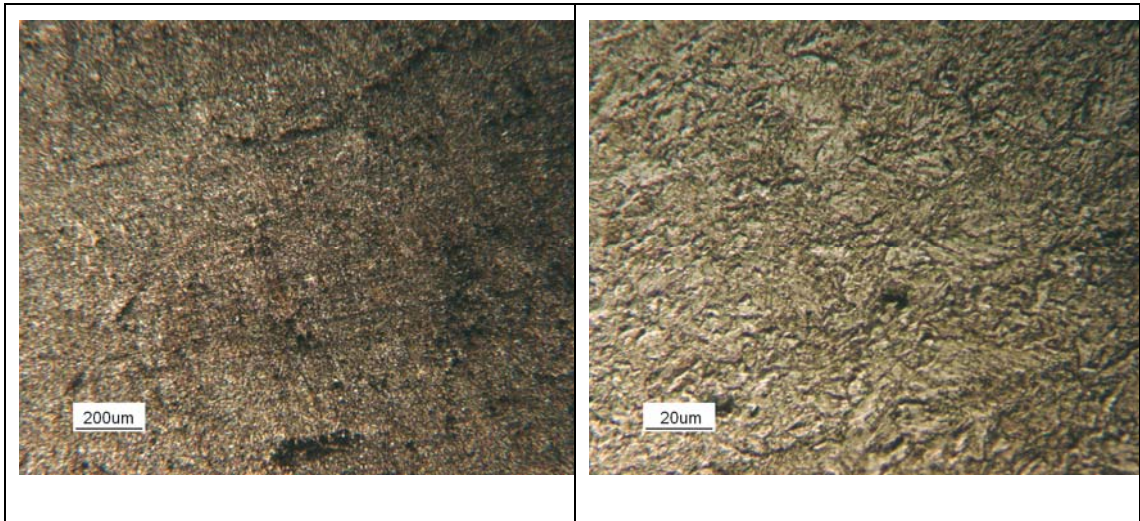


Figura 76 centro saldatura 2 ¼ Cr. saldato ad elettrodo dopo step cooling

Nelle figure 74, 75 e 76 sono rappresentate le micrografie eseguite sul campione 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo, sono state inserite le micrografie con un'ingrandimento di 50X e 200X.

Il materiale presenta la tipica struttura martensitica in tutte le posizioni analizzate, si nota che il materiale e oggetto della saldatura è un laminato. Sono infatti visibili le inclusioni non metalliche allungate in direzione della laminazione.

Risultati ottenuti dalle prove sperimentali

A valle delle prove effettuate possiamo dire che tutti i campioni esaminati hanno struttura martensitica, i profili di durezza seguono un andamento comune, partendo dal materiale base si ha un incremento di durezza in corrispondenza della zona termicamente alterata per poi diminuire lievemente al centro della saldatura, i valori riscontrati sono in linea con i requisiti riportati nelle normative di riferimento, i valori medi per il 2 ¼ Cr. si attestano intorno ai 220 HV mentre per il Cr.V: si attestano intorno ai 240 HV. Dopo le prove di step cooling sono stati riscontrati dei valori di durezza più bassi per tutti i materiali, in quanto i trattamenti termici abbassano sempre questi valori. Il trattamento termico di step cooling abbassa anche i valori di resilienza in quanto questo trattamento viene effettuato per simulare il comportamento del materiale in esercizio, questo trattamento aumenta il grano austenitico e aumenta la fragilità del materiale invecchiandolo. A questo proposito le prove meccaniche di resilienza hanno avuto gli esiti aspettati con valori decrescenti al diminuire della temperatura per tutti i campioni esaminati, le resilienze dopo step cooling sono sensibilmente più basse a causa dell'infragilimento materiale.

Il materiale con i migliori risultati di resilienza è il Cr.V in zona termicamente alterata, mentre le resilienze al centro saldatura i migliori risultati sono stati ottenuti con il 2 ¼ Cr. saldato con elettrodo Ø 4 mm. Per quanto riguarda il Cr.V. è un risultato aspettato in quanto le proprietà meccaniche caratteristiche di questo materiale sono più elevate rispetto alle proprietà del 2 ¼ Cr., il risultato in centro saldatura invece è dovuto all'effetto benefico delle passate di piccola larghezza fatte con un elettrodo, infatti rispetto all'arco sommerso dove le passate sono larghe la saldatura con elettrodo le passate sono più strette.

Anche per le trazioni sono stati ottenuti i risultati aspettati, i valori di rottura e snervamento si attestano a valori più bassi dopo il trattamento di step cooling, questo è dovuto all'invecchiamento dei materiali. Le trazioni effettuate sui tre materiali hanno rilevato il Cr.V. come materiale aventi le migliori performance sia rottura che a snervamento, questo perché i valori minimi richiesti per questo materiale dalle normative di riferimento sono più alti rispetto al 2 ¼ Cr.

Alla luce delle indagini effettuate, il migliore materiale risulta essere il Cr.V, l'utilizzo di quest'ultimo potrebbe anche consentire delle importanti riduzioni degli spessori. D'altro canto è ancora poco conosciuto ed è difficile da reperire.

Il 2 ¼ Cr. è ormai un comune materiale di saldatura entrambi i processi visti danno delle ottime caratteristiche per un prodotto saldato.

CONCLUSIONI

Obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di verificare la variazione di proprietà meccaniche dopo step cooling (invecchiamento) di acciai da costruzione basso legati al Cr e al Cr.V. in zona di saldatura. In tutti i casi analizzati i materiali conservano delle buone proprietà meccaniche anche dopo lo step cooling.

Il materiale che sopporta meglio le basse temperature è il 2 1/4 Cr. saldato con elettrodo Ø 4 mm, anche se sollecitato a temperature molto basse C ha un comportamento ottimale.

L'acciaio al Cr.V. ha un ottima resistenza ad impatto a basse temperature in zona termicamente alterata, ma non molto soddisfacente nel centro della saldatura. Questo scarso risultato in centro saldatura è in parte anche dovuto ai materiali di apporto che sono di recente commercializzazione.

I tre materiali sottoposti a prove di trazione vedono il Cr.V. come migliore materiale, ha elevato carico di snervamento, con un moderato decadimento di questa proprietà dopo il trattamento di step cooling. Questa caratteristica di alta resistenza risulta molto importante, poiché è possibile ridurre gli spessori resistenti e di conseguenza di pesi dei manufatti saldati.

I materiali hanno tutti struttura martensitica, al centro saldatura sono individuabili inclusioni non metalliche dovute ad impurezze entrate nel bagno di saldatura.

Alla luce delle indagini effettuate, il migliore materiale risulta essere il Cr.V, l'utilizzo di quest'ultimo potrebbe anche consentire delle importanti riduzioni degli spessori. D'altro canto è ancora poco conosciuto ed è difficile da reperire.

Il 2 1/4 Cr. è ormai un comune materiale di saldatura entrambi i processi visti danno delle ottime caratteristiche per un prodotto saldato.

Bibliografia

- [1] Istituto italiano della saldatura – saldatura per fusione volume 2 metallurgia, saldabilità dei materiali metallici e controllo dei giunti saldati – edizioni Hoepli anno 2000
- [2] Istituto italiano della saldatura – saldatura per fusione volume 1 metallurgia, saldatura per fusione – edizioni Hoepli anno 2000
- [3] UNI EN 15614 norma europea per l'emissione delle qualifiche di saldatura
- [4] UNI EN 10045 norma europea per l'esecuzione delle prove di resilienza
- [5] Metallurgia : Principi generali / Raffaello Zoja , Walter Nicodemi. - Milano : Tamburini editore, 1971.
- [6] Acciai e leghe non ferrose / Walter Nicodemi. - Bologna : Zanichelli, 2000.
- [7] La metallurgia nelle tecnologie di produzione / Walter Nicodemi, Maurizio Vedani. - Milano : Associazione italiana di metallurgia, stampa 1998.
- [8] Acciai speciali da costruzione : composizione chimica, trattamenti termici, proprietà, applicazioni / Raffaello Zoja. - Milano : Tamburini editore, 1961.
- [9] Elementi di tecnologia meccanica : lavorazione a caldo, trattamenti termici, prove dei materiali. - 8. edizione riveduta / a cura di Ettore Nicola Campazzi. - Milano : U. Hoepli, 1956
- [10] Guida breve ai trattamenti termici degli acciai : tecnica e pratica / Edoardo W. Lister. - Milano, 1952
- [11] Controllo metallurgia e resistenza dei giunti saldati / Antonio Vallini. - Udine : Del Bianco, 1964.
- [12] Elementi di metallurgia e di saldatura dei metalli e delle leghe metalliche / Roberto Besenconi. - Bergamo, 1963