Corso di metallurgia e saldatura – Parte 3
“Metallurgia della saldatura degli acciai”
“Difettologia”

Move Forward with Confidence

METALLURGIA DELLA SALDATURA DEGLI ACCIAI

- Generalità
- Zona fusa e zona termicamente alterata
- Rapporto di diluizione
- Fattori importanti in saldatura

GENERALITA’

La saldatura è un tipo di giunzione che permette di unire permanentemente parti solide, realizzando la continuità del materiale.

Le giunzioni saldate risultano quindi monolitiche.

Ciò può presentare vantaggi (come la rigidità), ma può essere causa di inconvenienti. Per esempio, nei collegamenti imbullonati, le sollecitazioni si trasmettono tra le parti collegate ed eventuali rotture si arrestano in corrispondenza di un giunto. Nella giunzioni saldate, invece, esiste una vera e propria continuità metallica. Un’eventuale rottura iniziata in un qualsiasi elemento (anche secondario) può propagarsi fino a elementi principali e danneggiare l’intera struttura.

Nella saldatura si fa uso normalmente di un materiale d’apporto il quale viene distribuito allo stato fuso tra i lembi opportunamente preparati (materiale base)

Oltre al materiale d’apporto si porta a fusione anche una certa quantità di materiale base a generare il “bagno di saldatura” dalla cui solidificazione si ottiene il cordone.

Nei tipi di giunzione in cui il materiale base non viene fuso, ma solo riscaldato si parla di saldobrasatura (con la tipica preparazione dei lembi come per la saldatura) o di brasatura

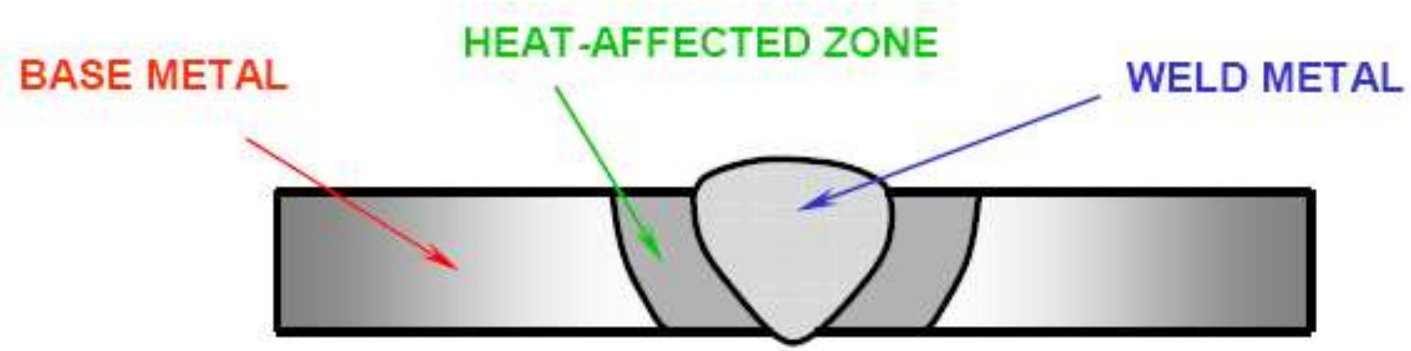
SALDABILITA’

E’ l’attitudine con cui il materiale si presta alla realizzazione di unioni saldate.

Ogni materiale, a seconda del procedimento usato, ha necessità di precauzioni generali ed esecutive tanto più importanti quanto minore è il suo grado di saldabilità

Bisogna inoltre considerare :

- ogni giunto ha una zona fusa e una zona termicamente alterata e quindi il materiale deve essere saldabile in modo da realizzare in queste zone strutture metallurgiche adatte alle caratteristiche richieste
- i giunti devono garantire la sicurezza e le caratteristiche della costruzione nel suo complesso



ZONA FUSA E ZONA TERMICAMENTE ALTERATA

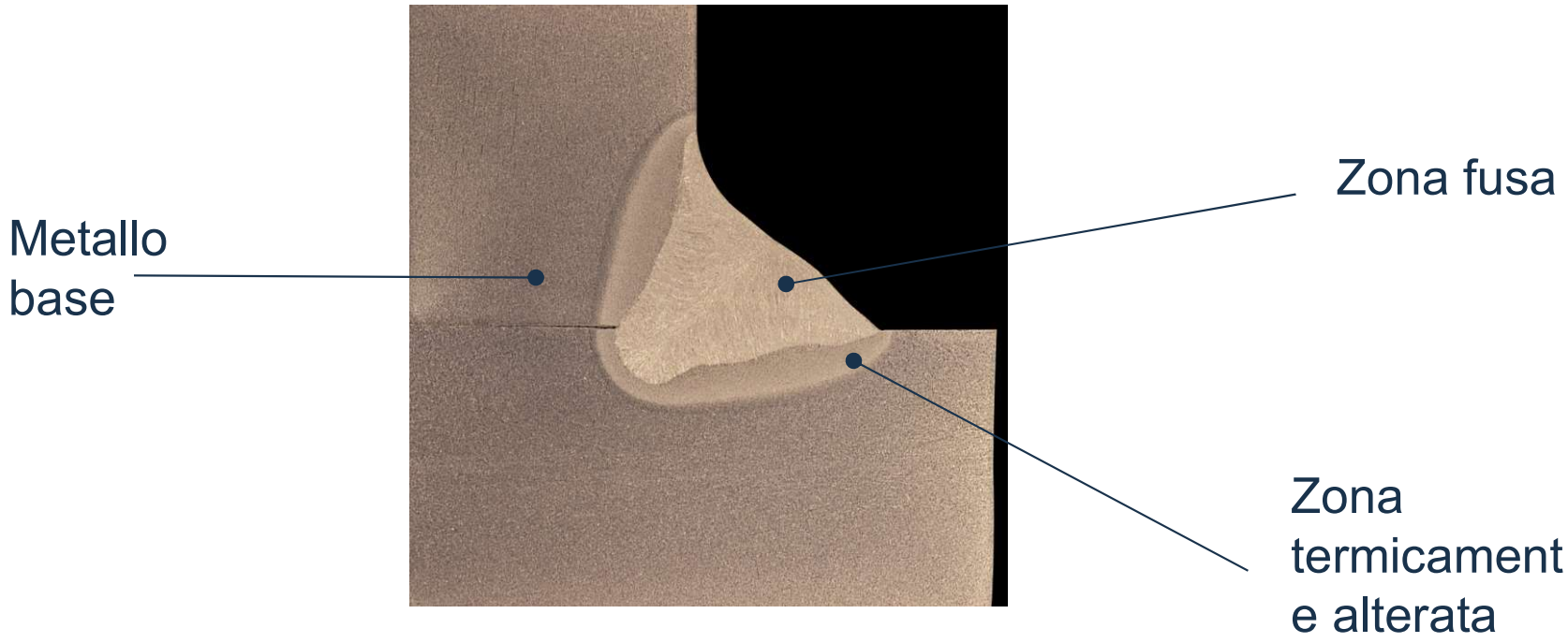
ZONA FUSA

Nell'esecuzione di una saldatura, il MB e quello d'apporto si mescolano formando il bagno di fusione; esso raffreddandosi origina il cordone di saldatura che prende il nome di Zona Fusa.

ZONA TERMICAMENTE ALTERATA

E' la zona di metallo base che non raggiunge la temperatura di fusione ma che è portata comunque ad alte temperature. Il materiale viene riscaldato e successivamente raffreddato con conseguenti trasformazioni strutturali.

Nel caso di acciai con C più elevato o elementi come Mn, Cr, Mo, Ni che aumentano la temprabilità è possibile trovare in ZTA strutture di tempra (necessario preriscaldo per rallentare la velocità di raffreddamento)



RAPPORTO DI DILUIZIONE

La saldatura autogena si ottiene nella grande generalità portando a fusione una certa parte di metallo base e completando il giunto con l'apporto di una certa quantità di materiale metallico dall'esterno; i due metalli fusi si mescolano nel bagno di fusione e formano una nuova lega.

Il rapporto fra il volume di metallo base e il volume totale della ZF di un giunto saldato si chiama "rapporto di diluizione".

Quindi si definisce rapporto di diluizione d (%) il rapporto tra il volume di metallo base fuso e il volume totale della zona fusa moltiplicato 100.

Così, se indichiamo con "Va" il contributo del metallo d'apporto e con "Vb" quello del metallo base avremo, nel caso di una sola passata: Rd(%) = Vb/(Va+Vb) x 100

$$R_d = \frac{V_b}{V_a + V_b} \times 100$$

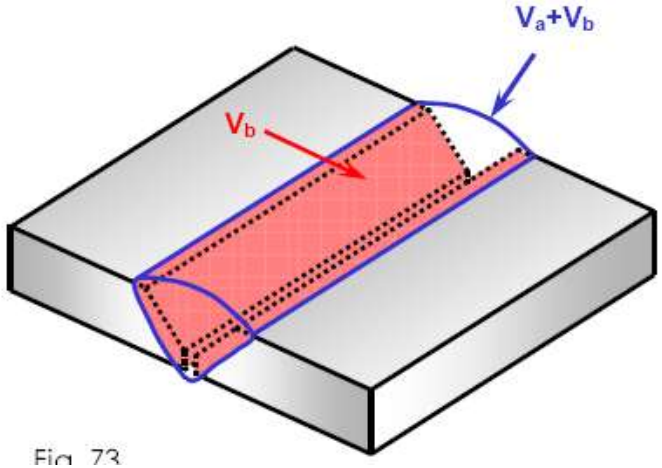


Fig. 73

RAPPORTO DI DILUIZIONE

La diluizione è favorita specialmente dalle elevate intensità di corrente e quindi varia sensibilmente a seconda del procedimento di saldatura; si possono di massima avere questi valori:

- Rd%= 0 nella brasatura
- Rd%= 20 nella prima passata nel procedimento ad arco manuale
- Rd%= 10 nelle passate successive ad arco manuale
- Rd%= 65 nella saldatura ad arco sommerso a forte penetrazione
- Rd%= 100 nella saldatura a resistenza.

L'intervento del materiale base nella composizione della zona fusa può influenzare notevolmente le caratteristiche del giunto.

Infatti nei procedimenti a forte penetrazione acquistano particolare importanza gli elementi di lega e le impurezze che il metallo base può apportare nel bagno di fusione i quali possono formare leghe poco propizie alla costituzione di giunti sani.

FATTORI IMPORTANTI IN SALDATURA

I fattori che influenzano la buona resistenza di un giunto saldato sono molteplici.

I principali sono:

- pulizia dei giunti
- composizione della lega metallica
- preparazione dei lembi
- materiali d'apporto scelti
- gas di protezione scelti
- sequenza di saldatura
- preriscaldo e temperatura di interpass
- apporto termico
- trattamenti termici dopo saldatura

PULIZIA DEI GIUNTI

Risulta fondamentale che prima di iniziare la saldatura con qualsiasi procedimento è necessario che i giunti sia ben puliti. I lembi devono essere esenti da ruggine, ossidi, vernici, grassi, olio, etc.

Oltre alla pulizia, è necessario sempre controllare che i giunti siano perfettamente asciutti per evitare successivi gravi difetti

Il 30% dei difetti finali sono provocati da mancata pulizia e asciugatura

COMPOSIZIONE DELLA LEGA METALLICA

Prima di cominciare le operazioni di saldatura è consigliabile conoscere le caratteristiche di saldabilità dei materiali da unire.

Bisogna tenere innanzitutto in considerazione i problemi di :

- criccabilità a caldo e a freddo
- temprabilità del materiale

Un buon parametro per determinare la temprabilità di un materiale è il carbonio equivalente oppure meglio ancora consultare i diagrammi TRC o CTC.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo+Cr+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \ (\%)$$

CEV < 0,43

PREPARAZIONE DEI LEMBI

Per ottenere saldature a completa o parziale penetrazione, la sorgente termica deve avere la possibilità di svolgere la sua azione anche nelle parti più profonde del giunto.

Considerando il giunto BW a lembi retti, la possibilità di conseguire la completa penetrazione mediante una sola passata dipende dalla potenza della sorgente termica. Quanto è più potente, maggiore è lo spessore che può essere saldato.

Vi è uno spessore, però, al di là del quale non è possibile ottenere la piena penetrazione ed è necessario ricorrere alla preparazione dei giunti per smussatura.

Tipi di preparazioni per giunti BW:

a) Lembi retti o a I

b) Preparazione a V

c) Preparazione a X

d) Preparazione a doppia Y

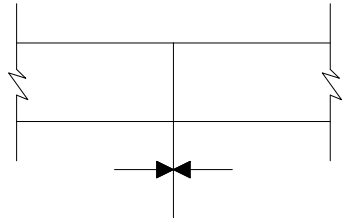
e) Preparazione a U

f) Preparazione a doppia U

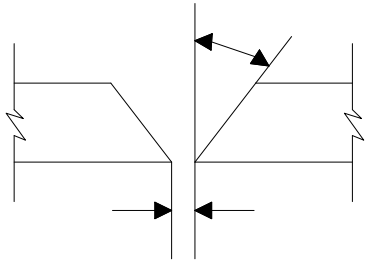
PREPARAZIONE DEI LEMBI

BW

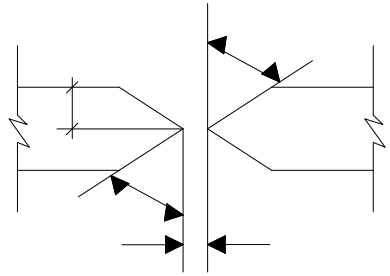
a) Lembi retti o a I



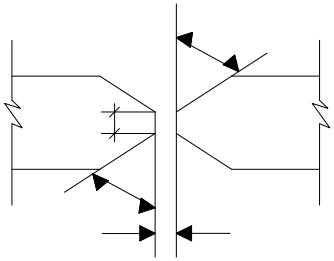
b) Preparazione a V



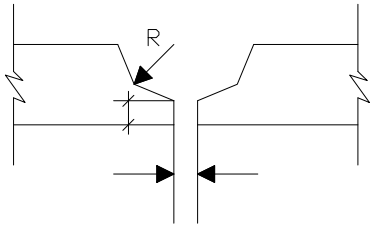
c) Preparazione a X



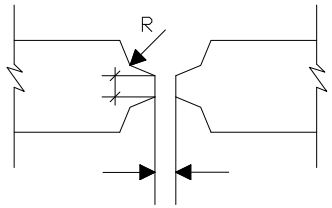
d) Preparazione a doppia Y



e) Preparazione a U

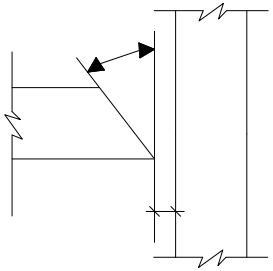


f) Preparazione a doppia U

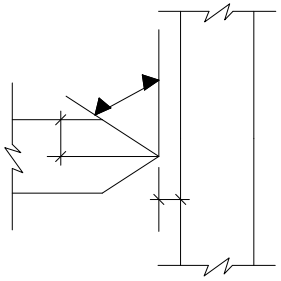


NOZZLE

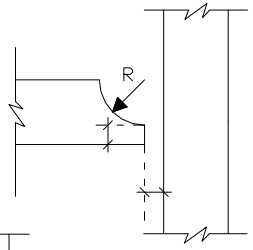
a) Preparazione a mezza V



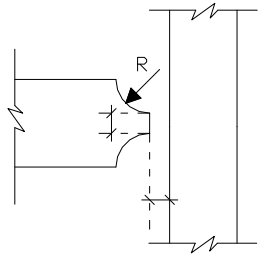
b) Preparazione a K



c) Preparazione a J



d) Preparazione a doppia J



PREPARAZIONE DEI LEMBI

Angolo di apertura del cianfrino (α):

consente l'accessibilità della sorgente termica a profondità nonché i movimenti necessari a governare il bagno

Spalla (s):

sostiene il bagno di fusione evitando lo sfondamento. L'altezza della spalla dipende dall'angolo di apertura del cianfrino e dalla potenza della sorgente

Distanza tra i lembi o luce (g):

Ha lo scopo di facilitare la penetrazione resa più difficile dalla presenza della spalla. Essa dipende dalla potenza della sorgente.

Nella preparazione di un giunto possono anche tenuti in considerazione se si vuole :

- riprendere al rovescio un giunto (con o senza solcatura)
- utilizzare materiali come sostegno al rovescio (fisso o asportabile)

PRERISCALDO E TEMPERATURA DI INTERPASS

Preriscaldo : temperatura a cui sono portati gli elementi da saldare prima di iniziare l'attività

Interpass : temperatura tra due passate di saldatura

Postriscaldo : mantenere la saldatura ad una data temperatura dopo l' esecuzione (da non confondere con un PWHT)

Hanno lo scopo di :

- *ridurre la velocità di raffreddamento, durante e dopo la saldatura per modificare la microstruttura*
- *facilitare la diffusione dell'idrogeno (causa delle cricche a freddo)*
- *modificare le tensioni residue*

TRATTAMENTI TERMICI

*Per **trattamento termico** si intende il ciclo termico di riscaldamento effettuato in predeterminate condizioni e temperature a cui devono seguire raffreddamenti, più o meno lenti, con lo scopo di fare assumere ad un metallo o ad una lega metallica (solitamente acciaio) quelle strutture cristalline che gli conferiscono determinate caratteristiche meccaniche e/o tecnologiche.*

Principali trattamenti termici sono :

- *Normalizzazione*
- *Tempra e rinvenimento*
- *Distensione*
- *Ricottura*
- *Solubilizzazione*

TABELLA GENERALE SALDABILITA'

Tipo di acciaio	*Saldabilità*	*Note*
Acciai al C	*Eccellente saldabilità*	
Acciai basso legati al Mn	*Buona saldabilità*	
Acciai ad alto carbonio (>0.45%)	*Pessima saldabilità*	*Usata solo per riparazione o per ricarico*
Acciai bonificati	*Media saldabilità*	*Possono essere saldati con molte precauzioni*
Acciai al Cr Mo	*Media saldabilità*	*Richiedono un preriscaldo e, a volte, un trattamento termico dopo saldatura*
Acciai inossidabili austenitici	*Eccellente saldabilità*	
Acciai inossidabili martensitici	*Scarsa saldabilità*	*Richiedono un forte preriscaldo, e il trattamento termico di rinvenimento dopo saldatura è praticamente obbligatorio.*

DIFETTI IN SALDATURA - CLASSIFICAZIONE

La norma UNI EN ISO 6520-1 dal titolo generale, "Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici", servirà di base per una precisa classificazione e descrizione delle imperfezioni di saldatura

DEFINIZIONI

- ***imperfezione***: qualsiasi deviazione dalla saldatura ideale
- ***difetto***: imperfezione non accettabile

DIFETTI IN SALDATURA - CLASSIFICAZIONE

La norma prevede sei gruppi:

1. cricche

2. cavità

3. inclusioni solide

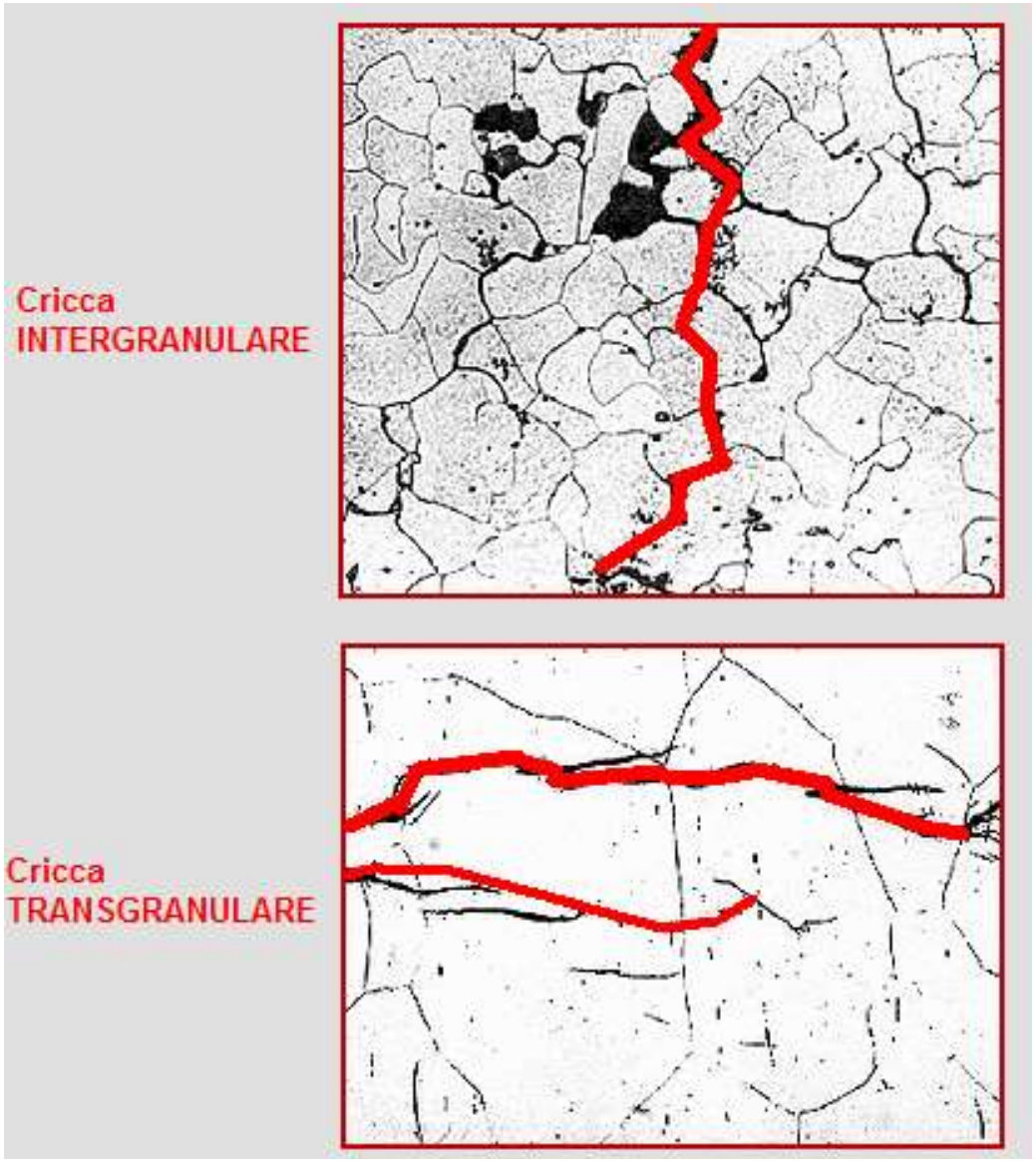
4. mancanza di fusione e di penetrazione

5. difetti di forma e dimensionali

6. altre imperfezioni

DIFETTI IN SALDATURA - CRICCHE

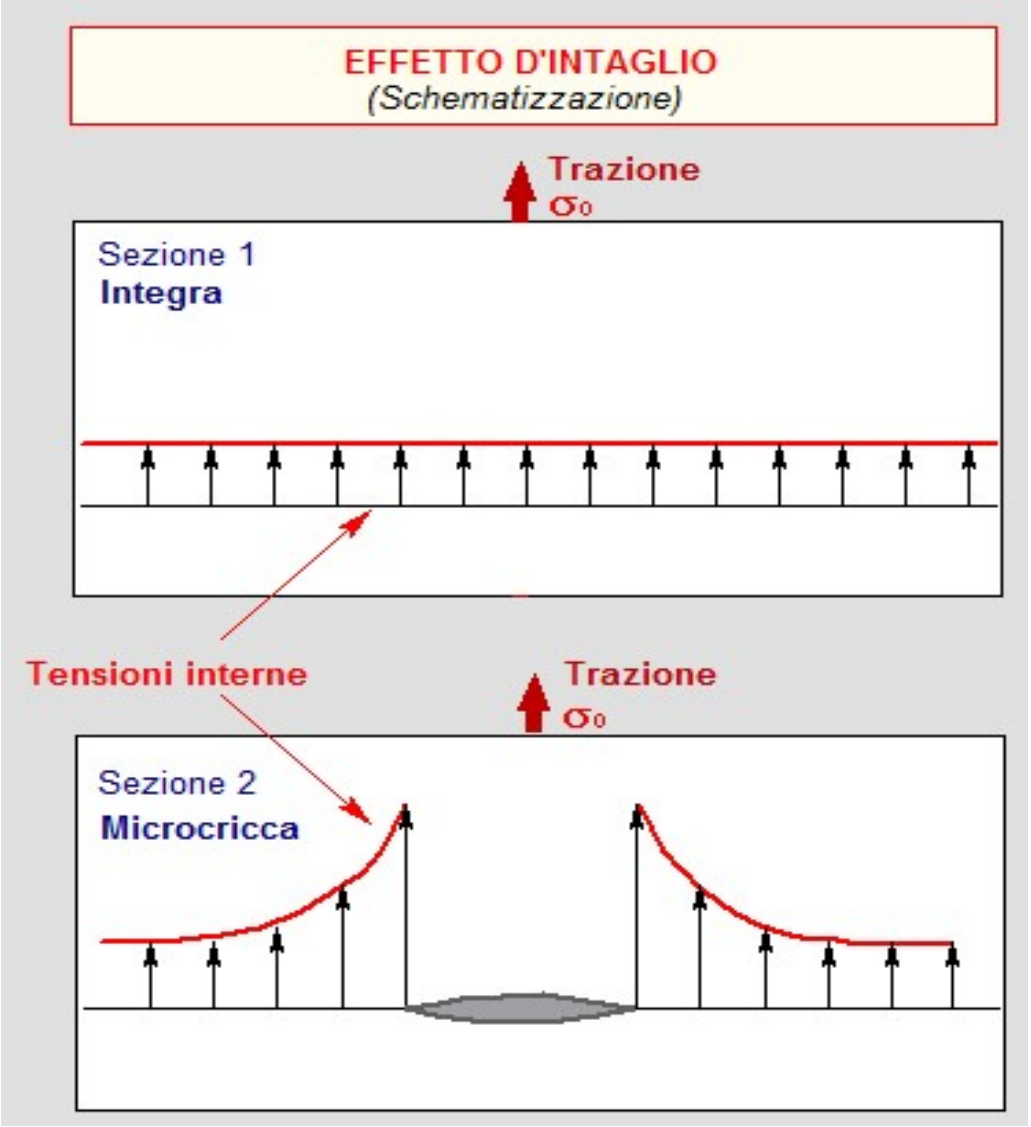
Una **cricca** è una discontinuità originatasi per distacco inter- o trans-cristallino in un materiale metallico originariamente continuo e sano. A seconda che il distacco avvenga lungo i bordi dei grani o attraverso i grani stessi, le cricche si distinguono in **intergranulari** o **transgranulari**.



Viene normalmente considerata una **discontinuità bidimensionale** perché è più o meno allungata e profonda con un andamento frastagliato, mentre i suoi lembi sono piuttosto ravvicinati. Se le dimensioni sono molto ridotte (inferiori a 1 mm) si parla di **microcricche**.

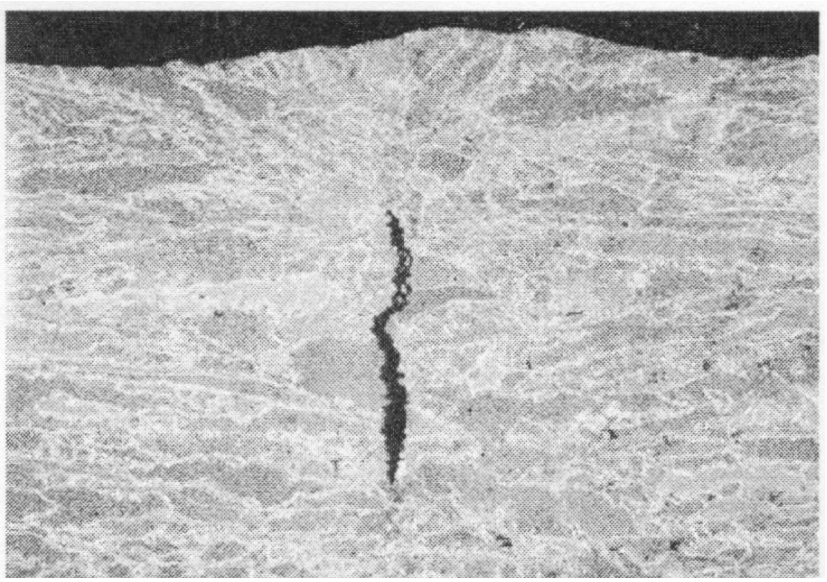
DIFETTI IN SALDATURA - CRICCHE

Le cricche sono il difetto più grave e temibile di un giunto saldato in quanto, anche se di piccole dimensioni, sono sempre una rottura in atto, con alto fattore di concentrazione delle tensioni (effetto d'intaglio) alle sue estremità; una cricca può essere suscettibile di ingrandirsi col tempo a seconda delle sollecitazioni di esercizio e delle sue dimensioni iniziali, portando il giunto a cedimento.

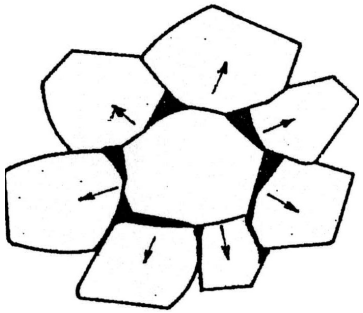


DIFETTI IN SALDATURA – CRICCHE A CALDO

Rappresentano un gravissimo difetto di natura "metallurgica" cioè non dipendente dall'esecutore



- *Si formano durante la solidificazione della zone fusa e sono causate dall'accumulo di impurezze (composti di zolfo e di fosforo), basso-fondenti, che si raccolgono verso il centro della zona fusa rimanendo liquidi quando la lega metallica è già solidificata*

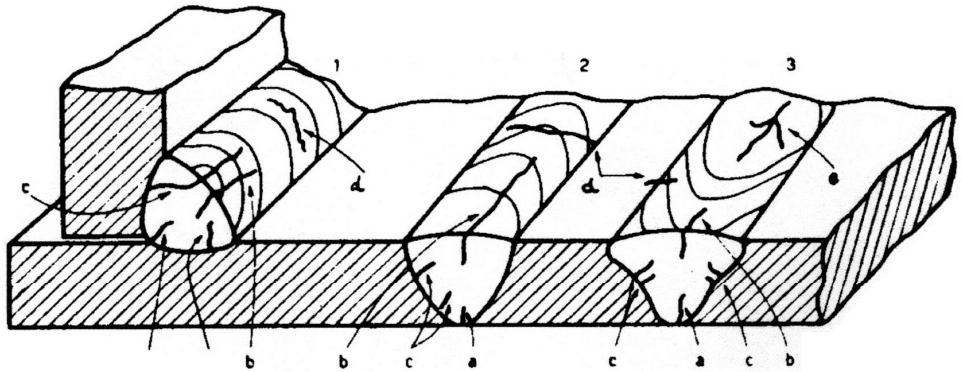


- *Durante la solidificazione, il ritiro che si verifica nella zone fusa stabilisce uno stato di tensione che può indurre la rottura dei ponticelli solidi esistenti tra le zone ancora liquide e formare la cricca*

- *Anche causate da elevata % di C del materiale base e da alto grado di tensioni di ritiro*

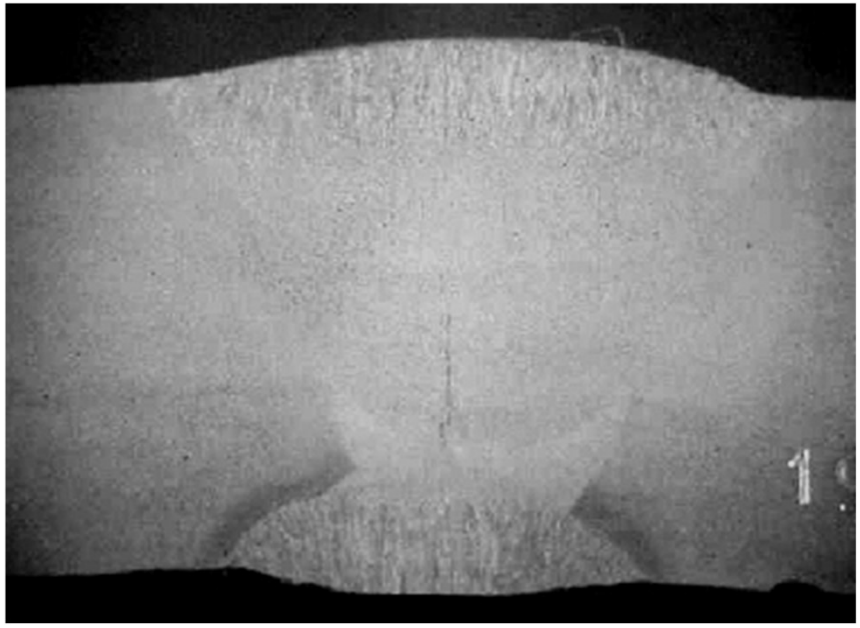
DIFETTI IN SALDATURA – CRICCHE A CALDO

➢ *Le cricche a caldo, così chiamate perché si formano ad alta temperatura (fra i 1400 ed i 900 ° C), hanno origine nei punti che solidificano per ultimi; possono essere affioranti o sotto cordone*



a = Cricche longitudinali alla radice della saldatura;
b = Cricche longitudinali sul diritto lungo l'asse della saldatura
c = Cricche interdentritiche;
d = Cricche trasversali;
e = Cricche di cratere.

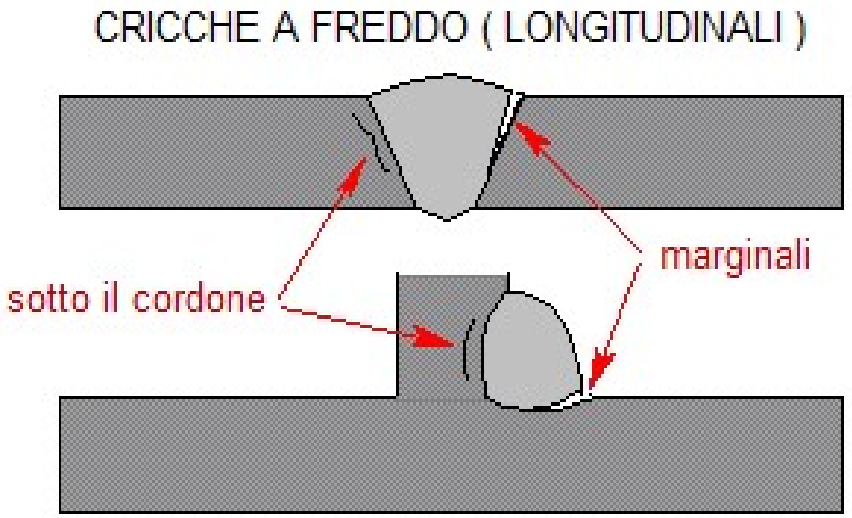
➢ *Le loro posizioni tipiche e la relativa nomenclatura risultano dalla figura di fianco*



➢ *L'impiego di buoni elettrodi a rivestimento basico rappresenta il miglior mezzo per evitare grazie alla energica azione desolforante e defosforante della scoria basica*

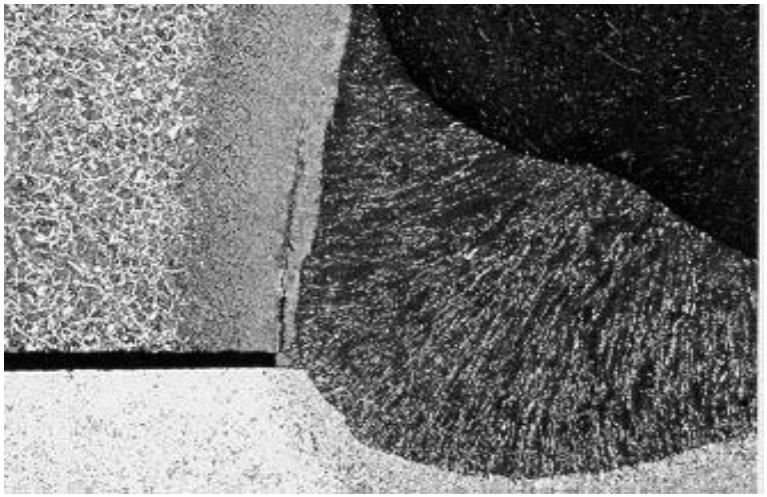
DIFETTI IN SALDATURA – CRICCHE A FREDDO

➢ ***Sono minutissime incrinature che si formano sotto il cordone di saldatura (ZTA) nei primi strati del metallo base (il metallo d'apporto è infatti più dolce del metallo base)***



➢ Hanno andamento parallelo alla superficie che delimita la zona fusa

➢ Come le cricche a caldo rappresentano un grave difetto di natura metallurgica



DIFETTI IN SALDATURA – CRICCHE A FREDDO

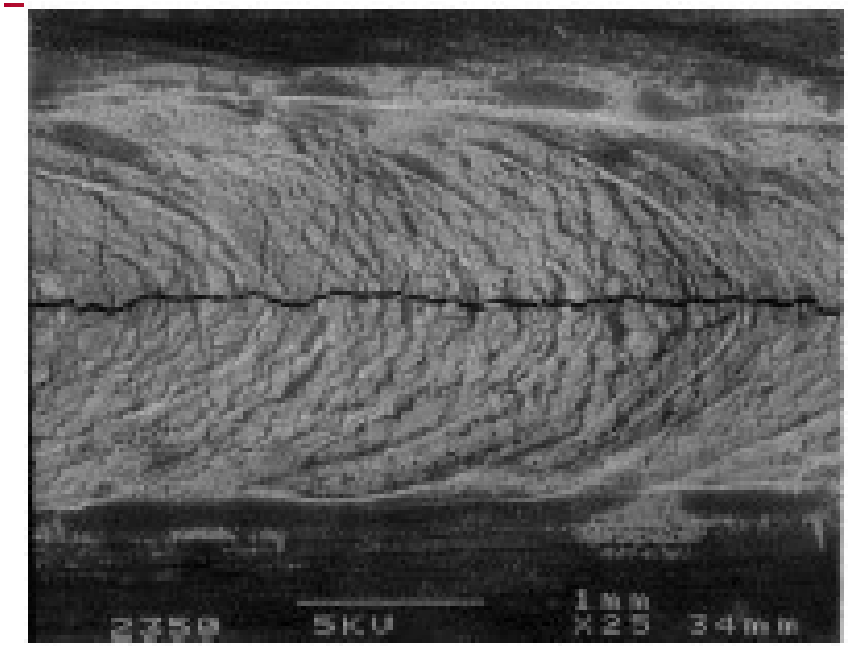
La denominazione deriva dal fatto che il loro nascere è legato alla presenza di strutture temprate che si formano solitamente negli ultimi stadi del raffreddamento

- *Sono causate dall'azione concomitante dei due seguenti fattori:*

a) indurimento per tempra del metallo sotto l'azione dei cicli termici di saldatura (alta velocità di raffreddamento). Strutture dure e fragili che possono rompersi a causa delle tensioni residue

b) presenza di idrogeno che può diffondersi nei micro-vuoti disponibili durante la solidificazione della lega metallica. Se il tenore di idrogeno è particolarmente elevato, la rottura si verifica appena ragginta una temperatura sufficientemente bassa. Se il tenore di idrogeno non è così elevato, si possono verificare con notevole ritardo (fino a 48 h)

DIFETTI IN SALDATURA – CRICCHE



Cricca longitudinali in zona fusa
(4 mm, MIG, A6082)

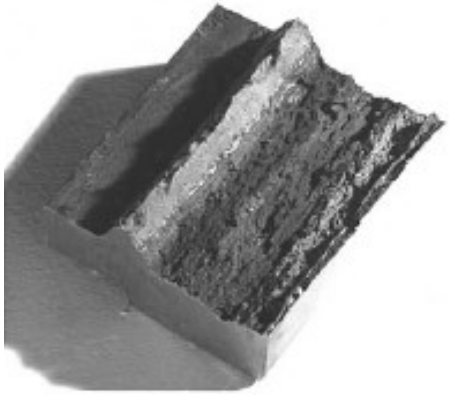


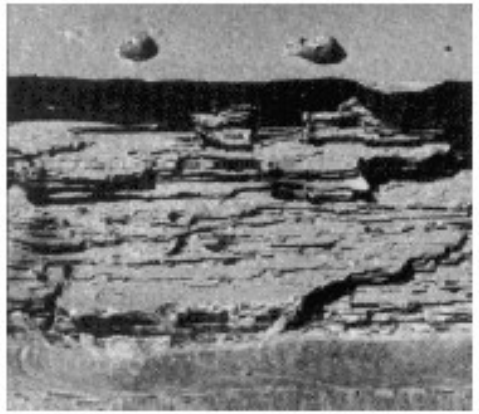
Cricca trasversale in zona fusa
(Cricca a freddo – Controllo MT)



Cricca a freddo nella ZTA

Strappi
lamellari



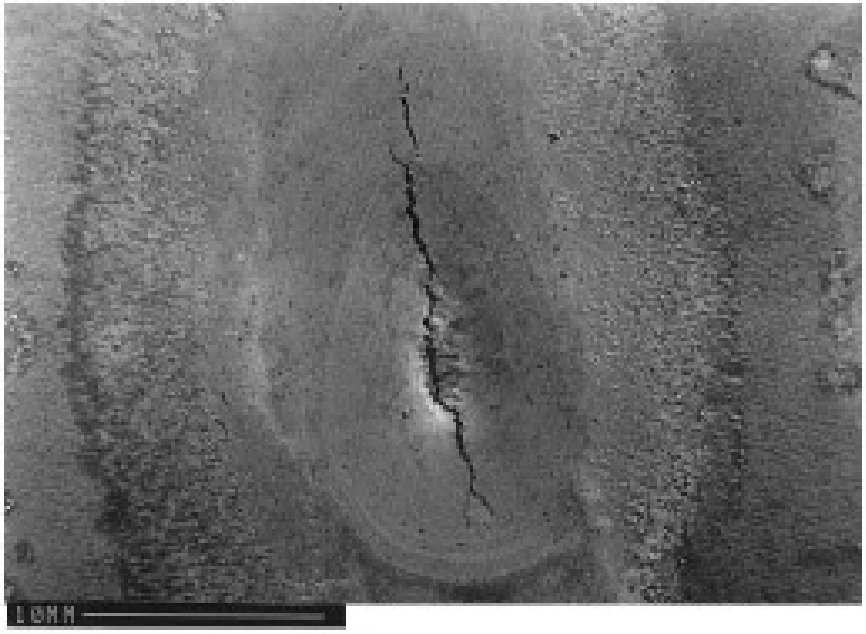


DIFETTI IN SALDATURA – CRICCHE DI CRATERE

Imperfezioni legate alla condizione metallurgica in prossimità della fine di una passata o di un tratto di saldatura:

– il ritiro del metallo durante il raffreddamento determina la formazione di un **cratere** dovuto al risucchio del materiale ancora liquido da parte delle zone circostanti;

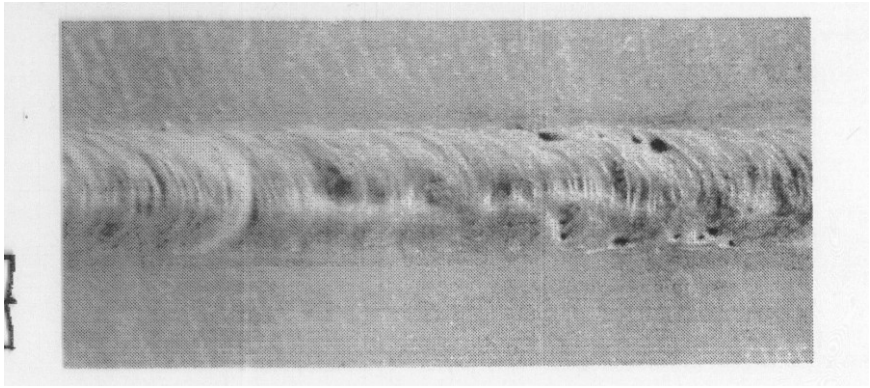
– fenomeni di **segregazione** comportano spesso la presenza di sostanze a bassa temperatura di fusione.



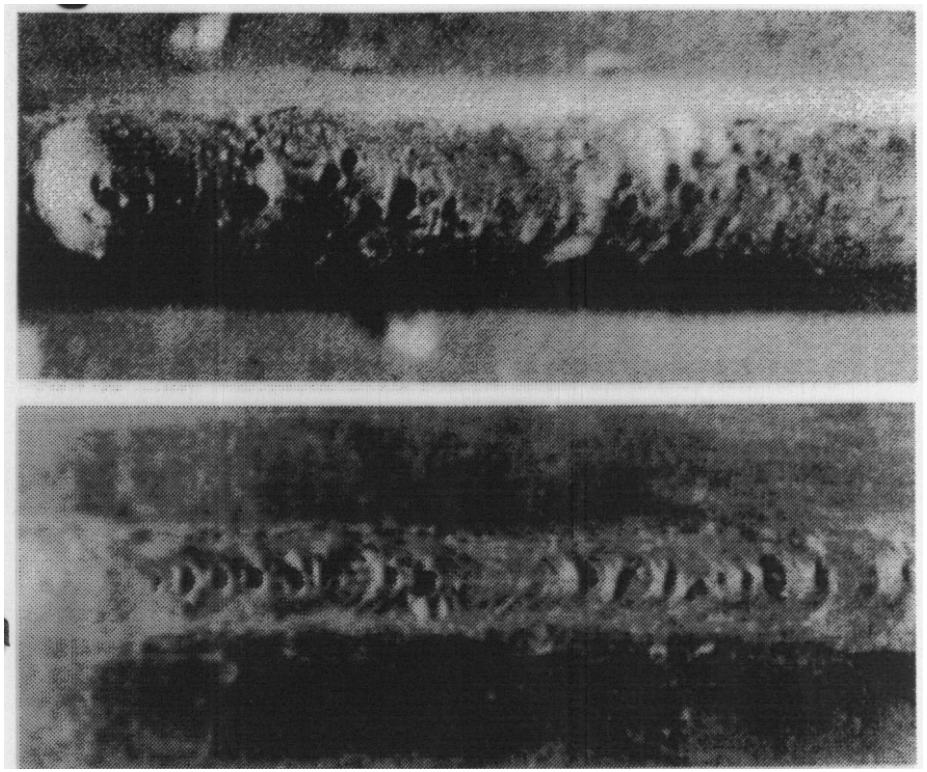
Cricca di cratere (TIG , A5083)

DIFETTI IN SALDATURA – POROSITA' E SOFFIATURE

- *Sono cavità contenenti gas e possono presentarsi sotto forma vermicolare con lunghezze di circa 10 mm oppure sotto forma di piccole sferette con diametro di circa 1 mm*



- *Fino a che la zona fusa rimane liquida, i gas possono sfogarsi all'esterno, ma se la solidificazione è rapida, rimane imprigionato sotto forma di bollicine gassose insolubili originando soffiature*



- *Sono causate da sporcizia presente sui lembi da unire, da umidità nel rivestimento degli elettrodi o nei flussi o nei gas di protezione, dall'utilizzo di procedimenti ad alta velocità di deposito, da un non corretto maneggio della pinza o della torcia (lunghezza d'arco eccessiva o protezione gassosa scarsa)*

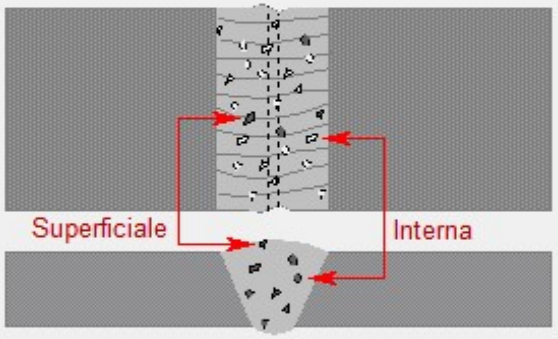
DIFETTI IN SALDATURA – POROSITA' E SOFFIATURE

La porosità si può manifestare in queste diverse forme:

POROSITA'

DIFFUSA UNIFORMEMENTE

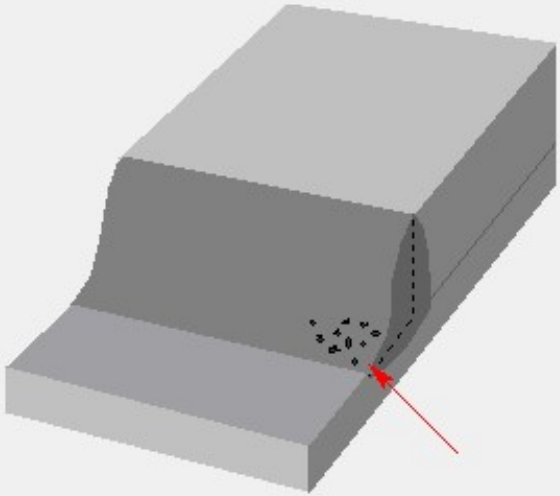
E' distribuita più o meno uniformemente nel metallo di apporto. Nella porosità uniforme non ci sono regioni di concentrazione di porosità.



POROSITA'

A GRAPPOLO

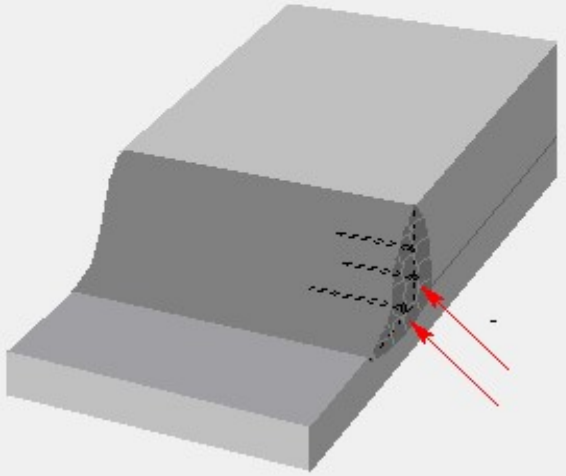
Una concentrazione di porosità in una regione separata dal resto della saldatura da regioni che non contengono porosità o contengono porosità con concentrazioni minime.



POROSITA'

LINEARE

Allineata internamente al deposito e solitamente non è osservata mediante esami visivi.
Si trova lungo i contorni del giunto, al confine fra le passate o alla radice della saldatura.



DIFETTI IN SALDATURA – POROSITA' E SOFFIATURE

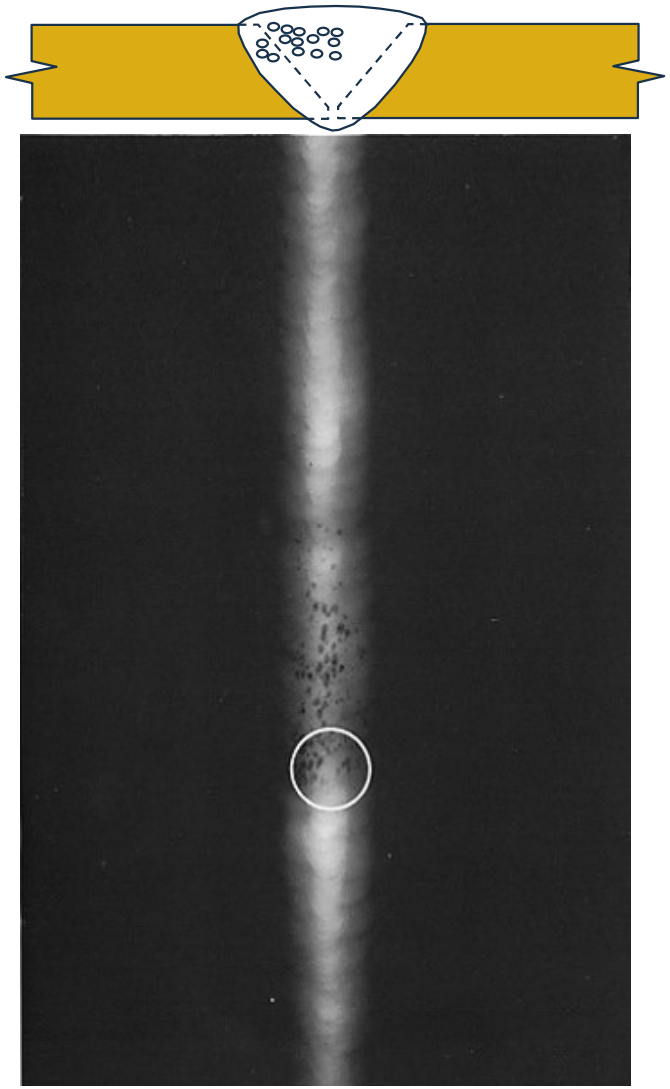


Porosità

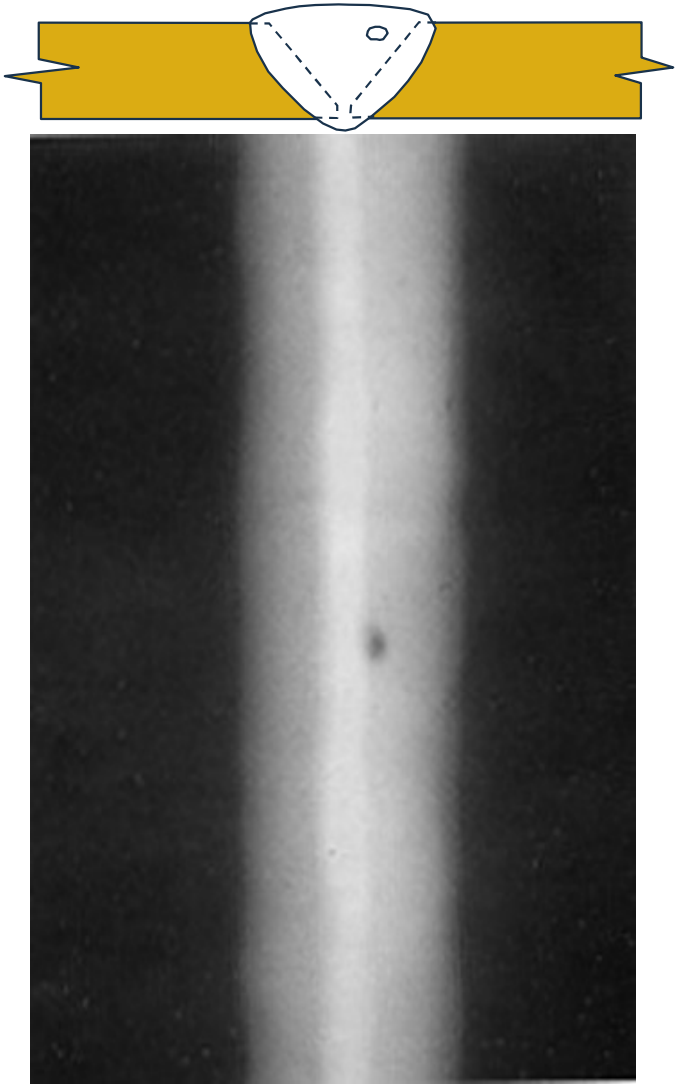


Cavità alla radice

DIFETTI IN SALDATURA – POROSITA' E SOFFIATURE



Gruppo di porosità



Singolo poro

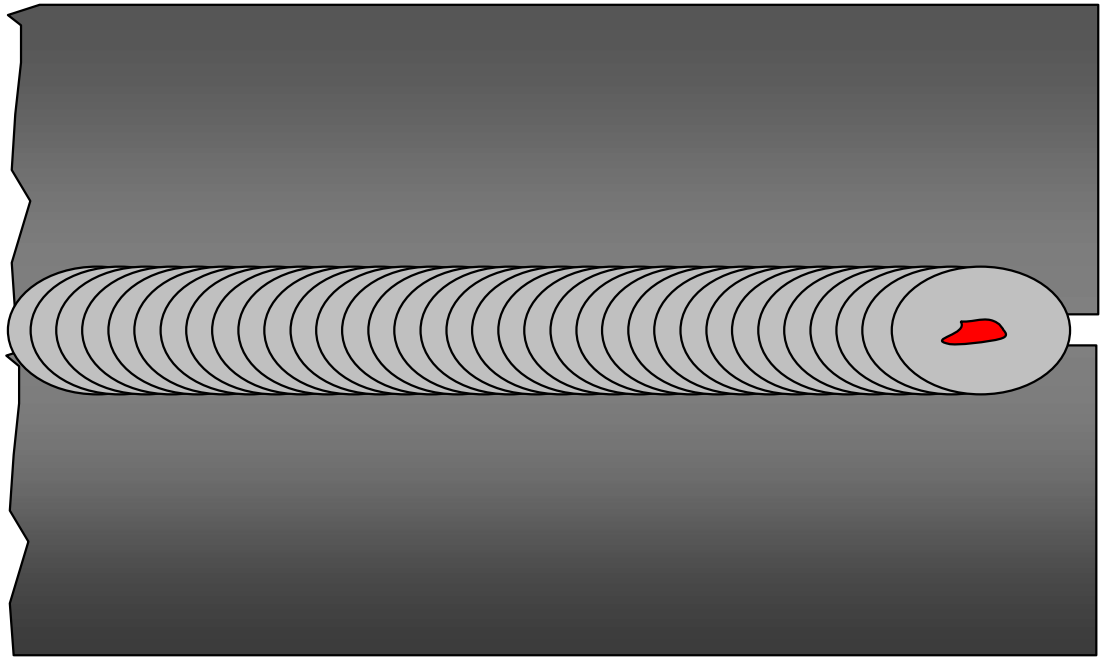
DIFETTI IN SALDATURA – CAVITA' DI CRATERE

La cavità di cratere non è un difetto gassoso; esso appare come un poro di gas in un cratere

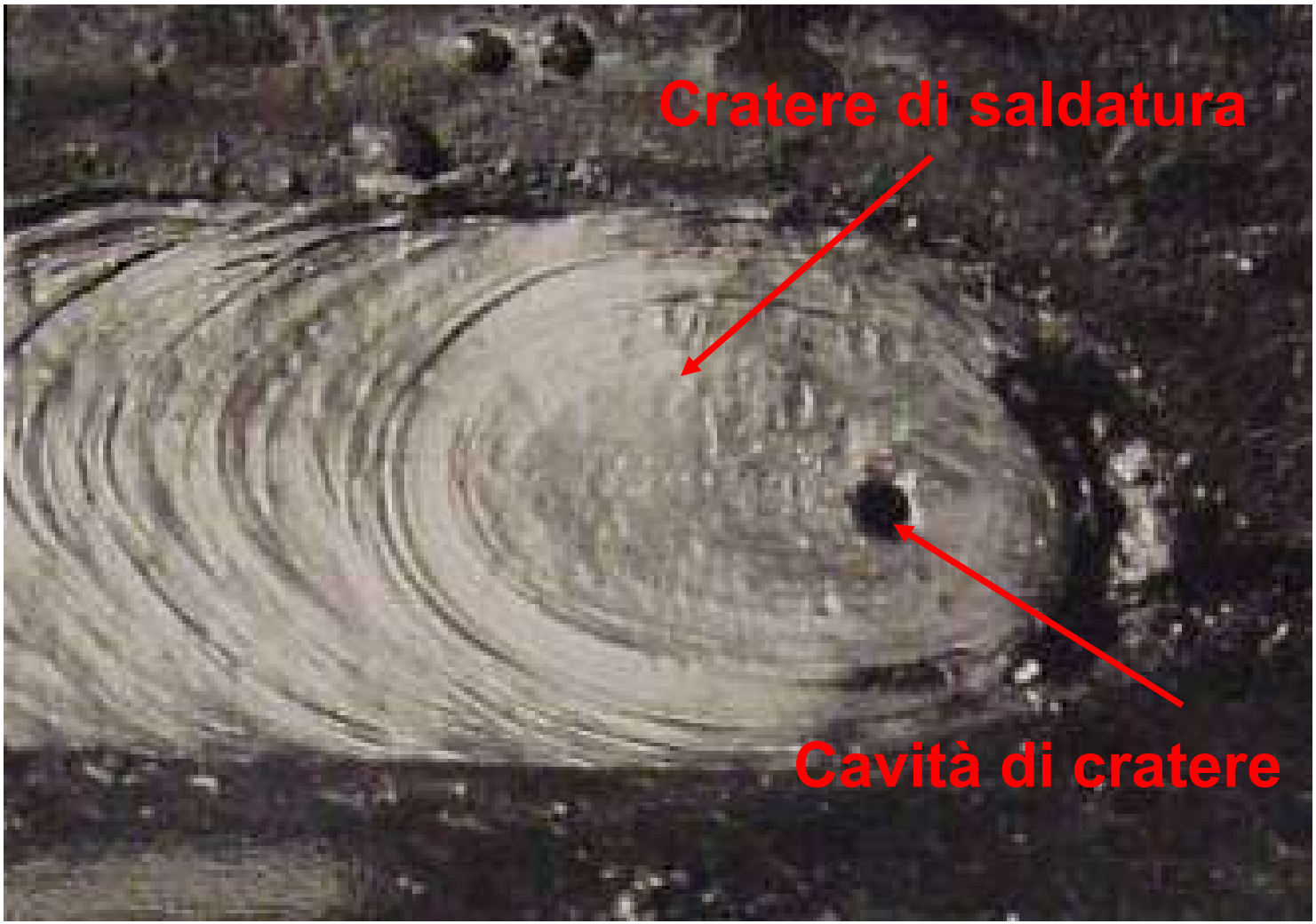
Possibili cause

Raffreddamento troppo veloce

Contaminazione



DIFETTI IN SALDATURA – CAVITA' DI CRATERE



DIFETTI IN SALDATURA – INCLUSIONI DI SCORIA

E' una delle imperfezioni più comuni nei cordoni eseguiti con elettrodi rivestiti (inclusioni di scoria) o ad arco sommerso (inclusioni di flusso) in più passate.

– **Asportazione** poco accurata delle scorie di una passata **prima dell'esecuzione della passata successiva**

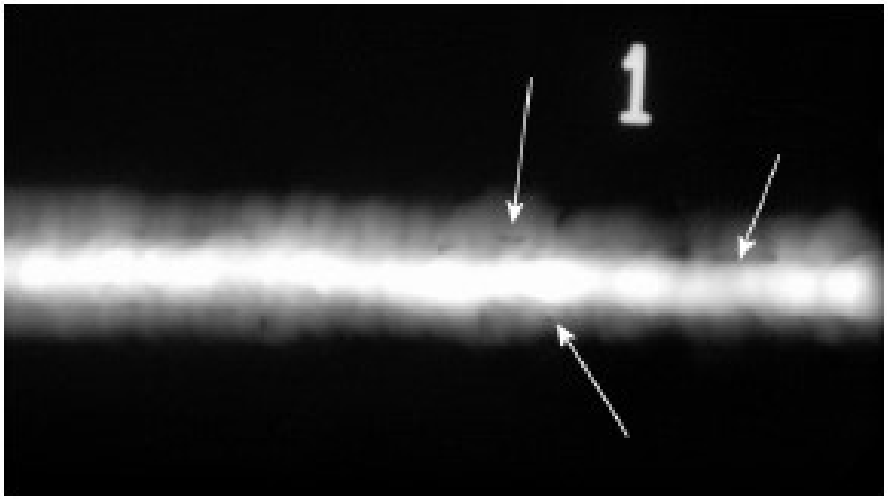
– **Maneggio** non corretto dell'elettrodo rivestito

– Non esatto **posizionamento della testa saldante**

– Errati **parametri della preparazione** (per esempio, angolo di apertura del cianfrino troppo stretto)



Inclusioni di scoria

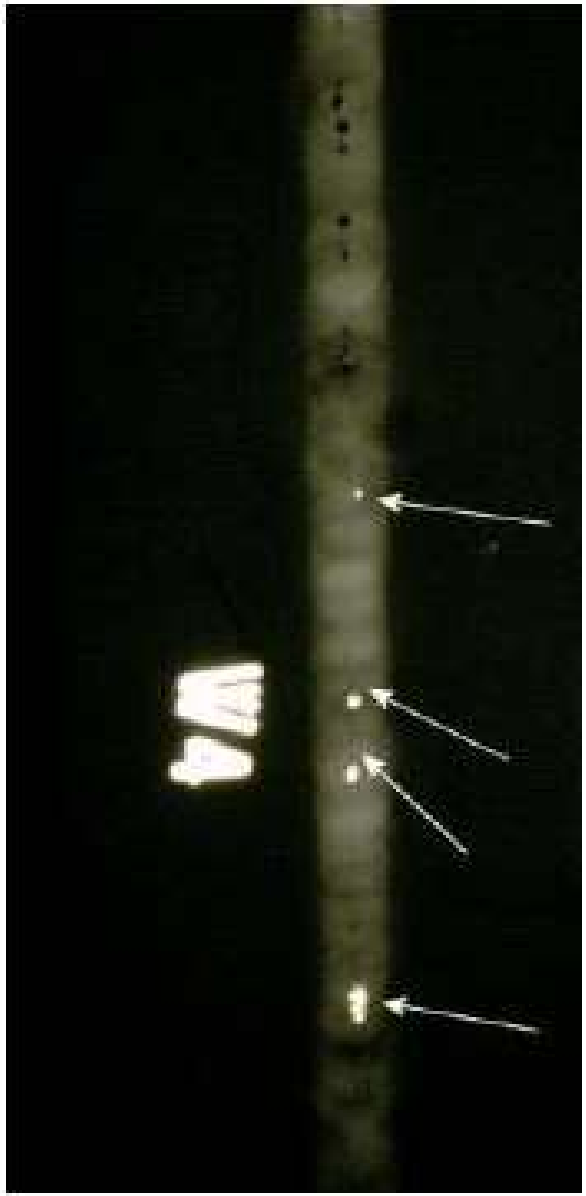


Inclusioni di scoria raggruppate (controllo RT)

DIFETTI IN SALDATURA – INCLUSIONI METALLICHE

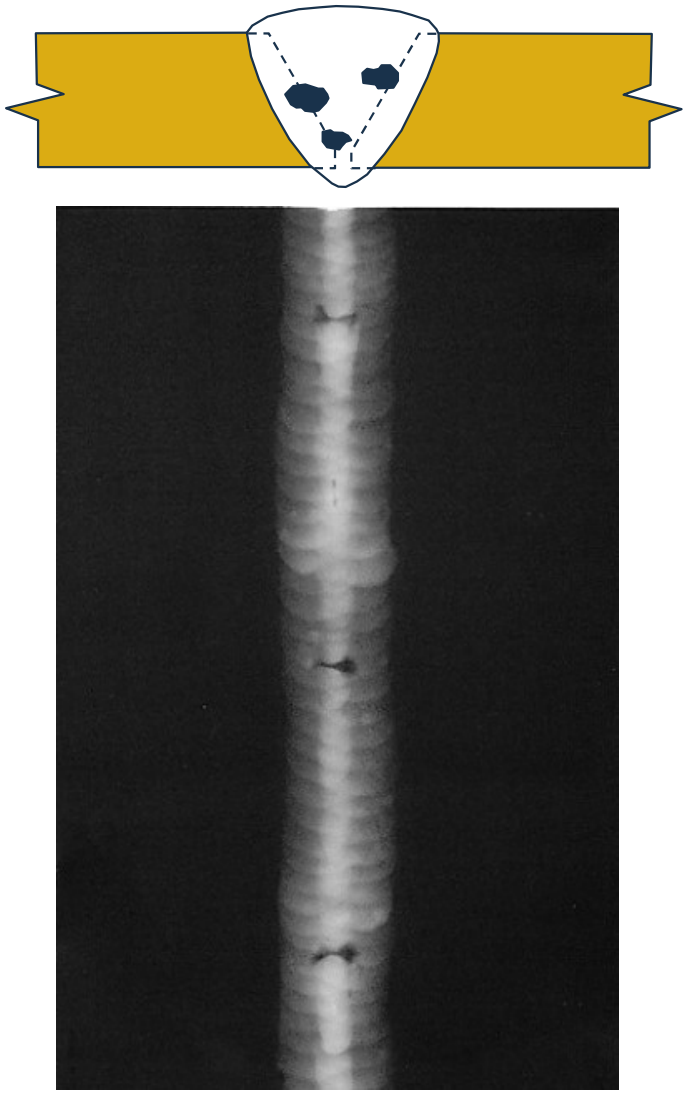
• *Inclusioni di tungsteno (3041)*
– sono un'imperfezione tipica del **processo TIG**;
– tra le possibili cause ci sono uno scorretto **maneggio della torcia**, insufficiente **protezione gassosa**, **corrente** troppo elevata o uso di alimentazione incorretta nella saldatura dell'alluminio;
– hanno **forma** generalmente molto irregolare ed ai vertici delle loro frastagliature possono trovarsi piccole cricche.

• *Inclusioni di rame (3042)*
– sono caratteristiche della saldatura su **supporto infusibile**, e possono essere responsabili di un infragilimento del metallo o della semplice riduzione di sezione resistente.

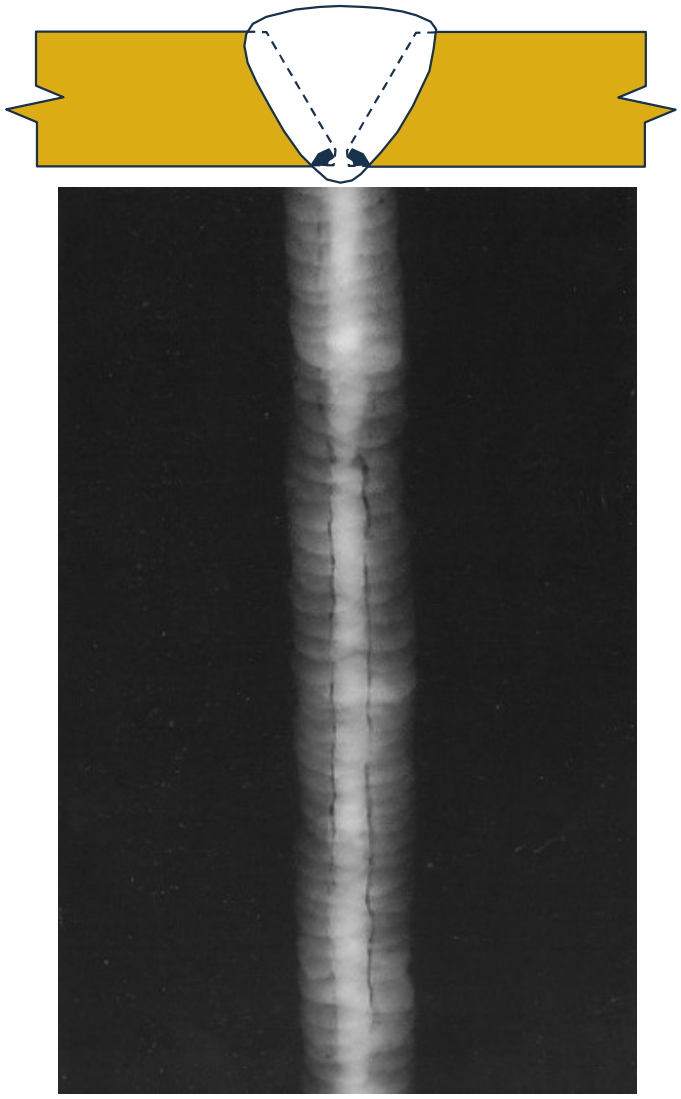


Inclusioni di tungsteno
(Lega di alluminio, esame RT)

DIFETTI IN SALDATURA – INCLUSIONI ESEMPI



Inclusioni di scoria tra le passate



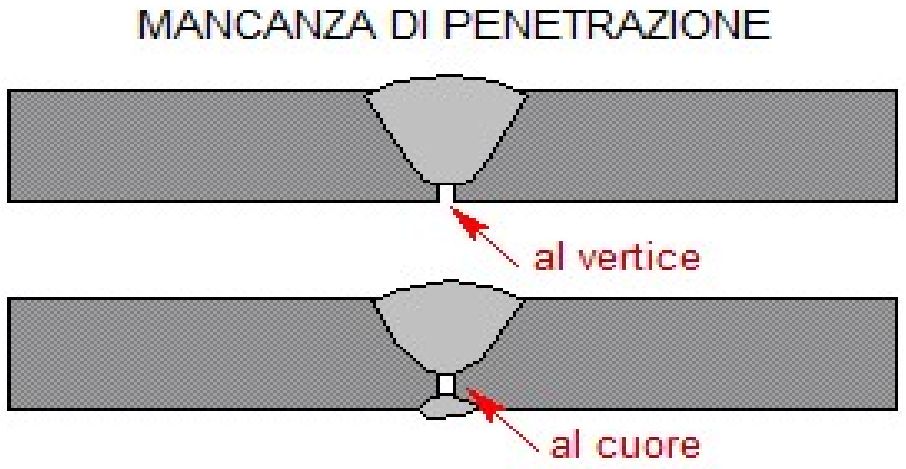
Linee di scoria allungata

MANCANZA DI FUSIONE E/O PENETRAZIONE

➢ Si verifica tra due lembi del cianfrino con assenza di fusione della parte opposta alla torcia (mancanza di penetrazione) o tra un lembo e la zona fusa (mancanza di fusione). Sono provocate dalla mancata fusione di entrambi o di uno solo dei lembi.

➢ Possono essere causate dalla scorretta preparazione dei lembi (angolo di apertura del cianfrino troppo piccolo, spalla eccessiva, distanza tra i lembi insufficiente, slivellamento) o come nel caso della saldatura manuale ad arco, localizzato in corrispondenza delle riprese (cambio di elettrodo).

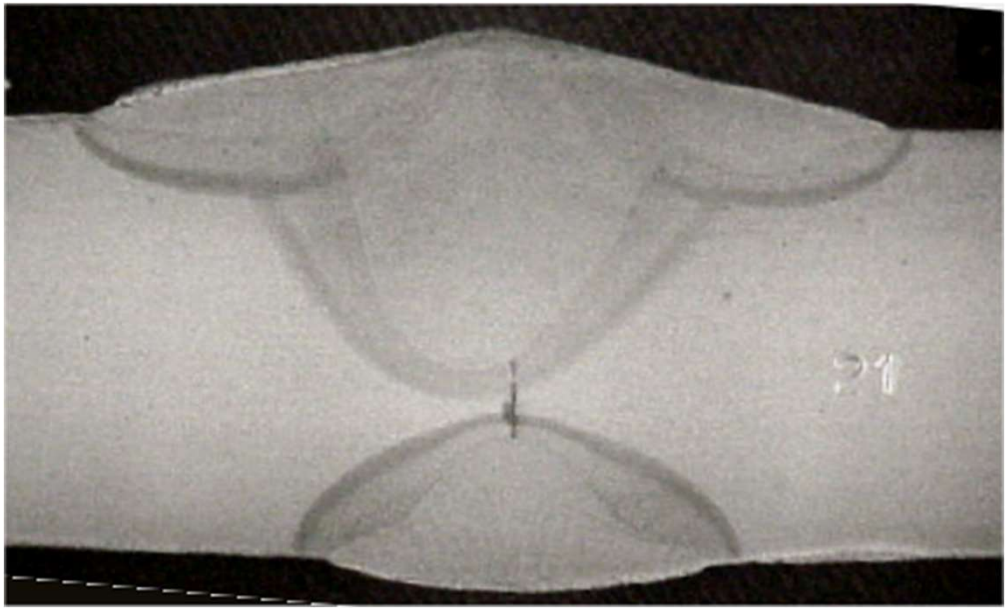




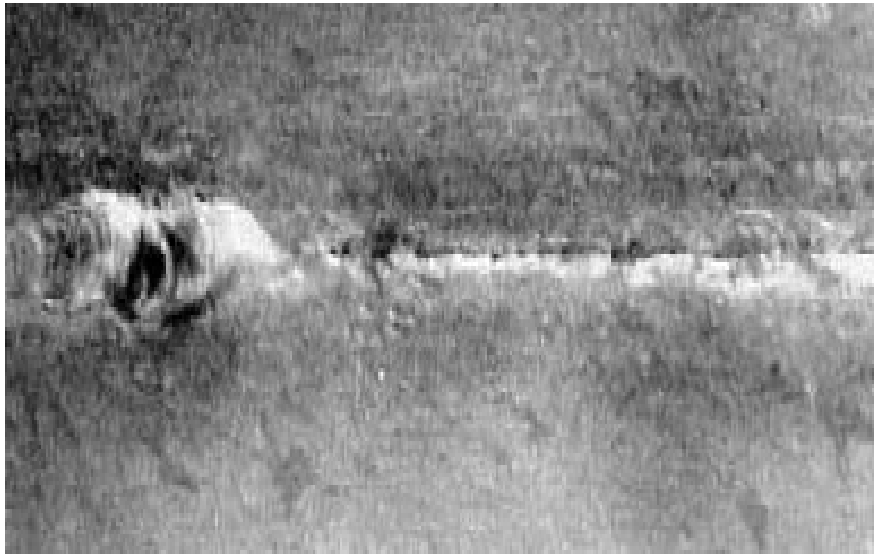
MANCANZA DI FUSIONE E/O PENETRAZIONE



Mancanza di penetrazione, incollatura



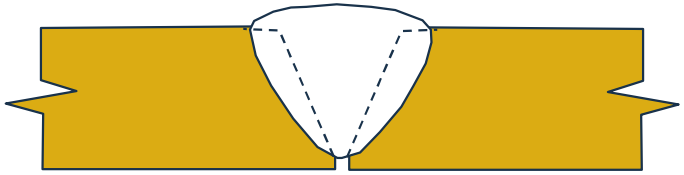


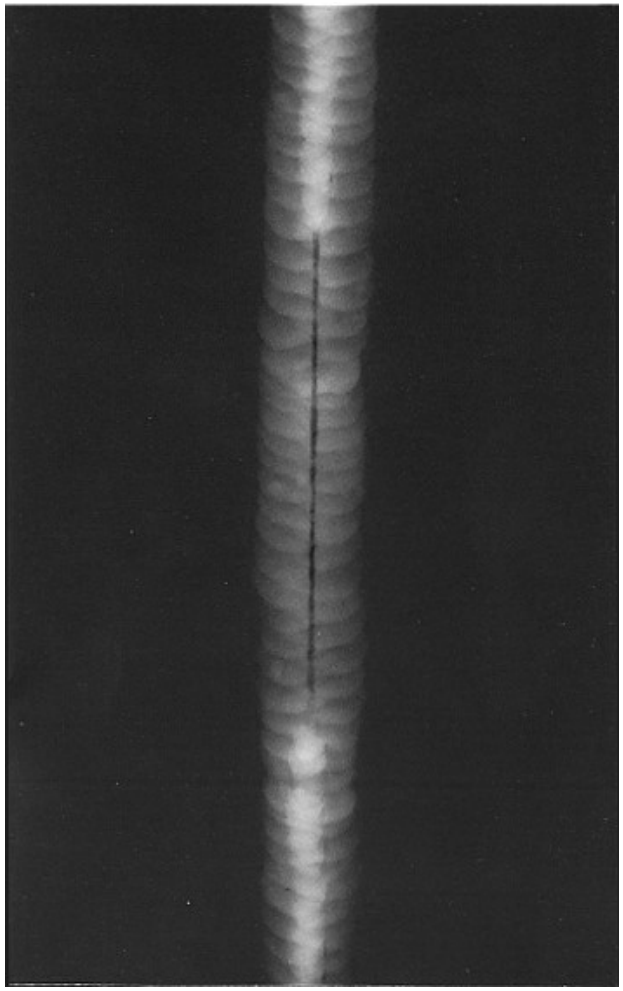


Mancanza di fusione alla radice

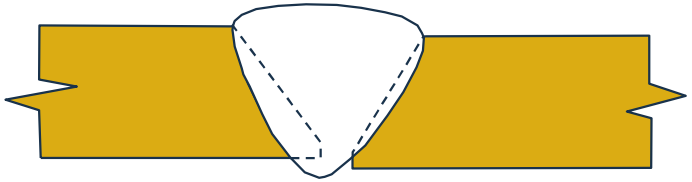
Mancanza di penetr. alla radice

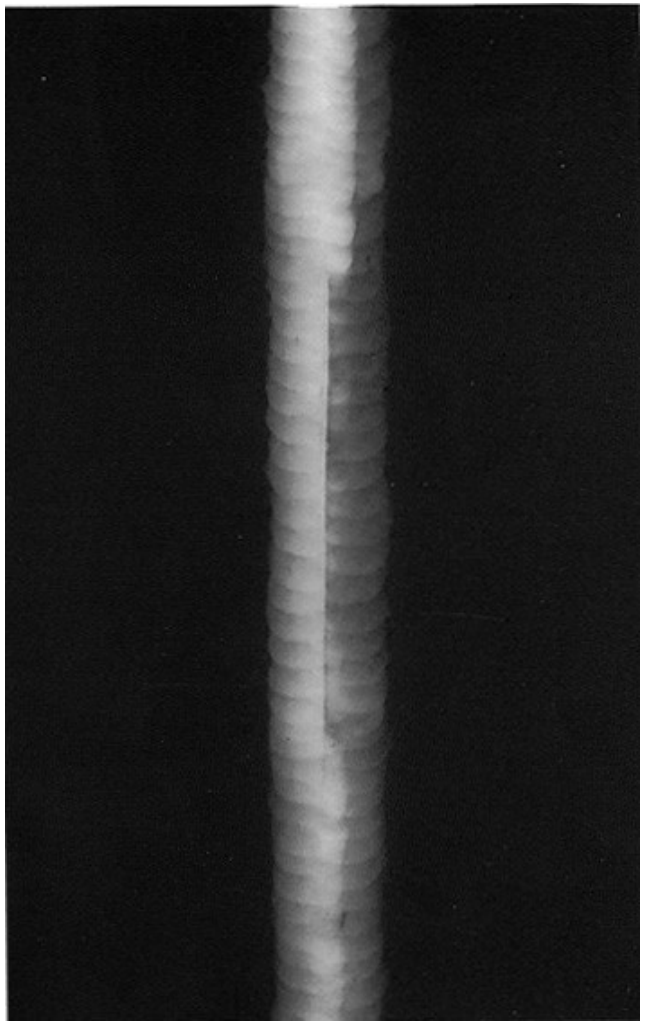
MANCANZA DI FUSIONE E/O PENETRAZIONE





Mancanza di penetr. alla radice

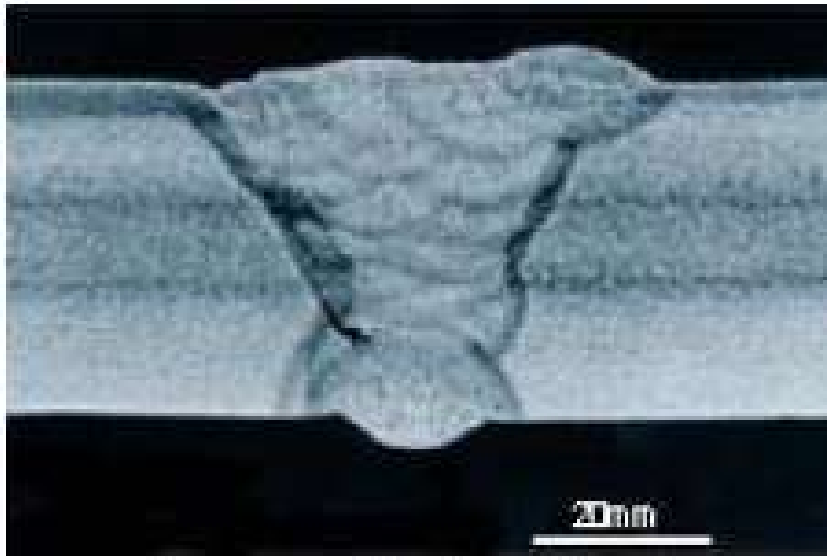




Mancanza di fus. alla radice

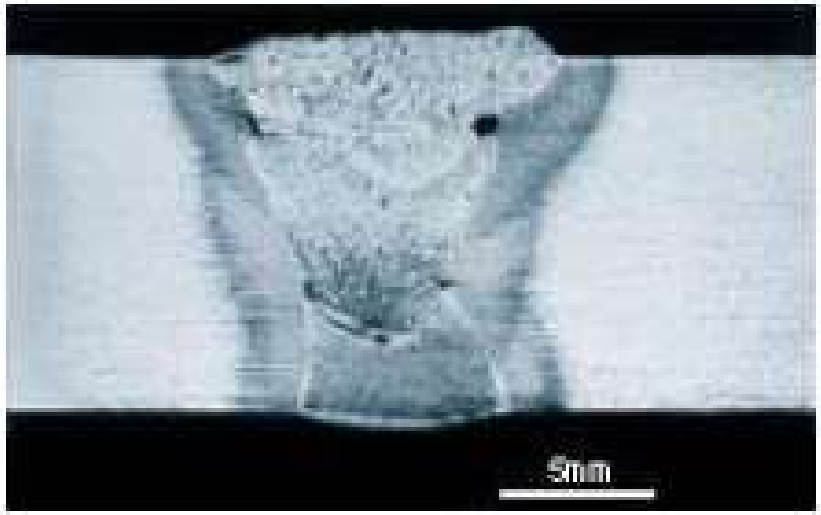
MANCANZA DI FUSIONE O INCOLLATURA

• Si tratta di una mancanza di collegamento tra il metallo depositato ed il metallo base, oppure tra strati contigui di metallo depositato



Mancanza di fusione laterale

• In base alla posizione dell'incollatura è possibile distinguere:
– *mancanza di fusione laterale (4011)*
– *mancanza di fusione tra le passate (4012)*
– *mancanza di fusione al vertice (4013)*



Mancanza di fusione tra le passate

DIFETTI DI FORMA E DIMENSIONALI

Si tratta, in generale, di imperfezioni del profilo sulle superfici esterne della saldatura oppure della configurazione geometrica difettosa del giunto.

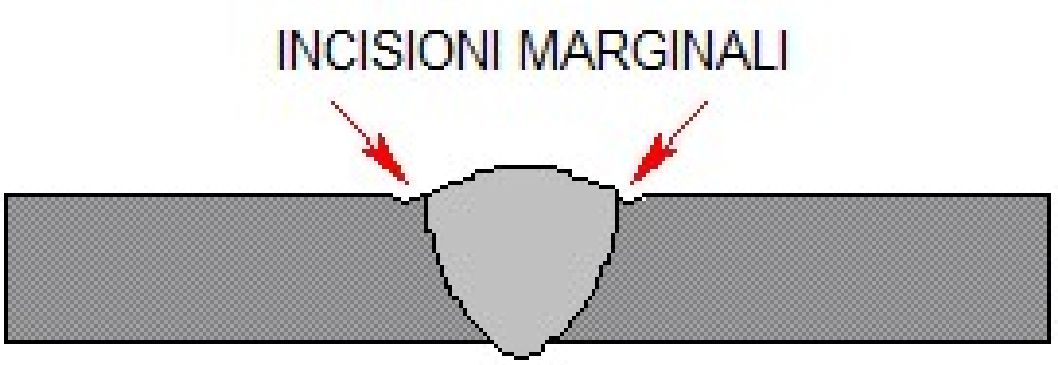
Appartengono quindi a questo gruppo imperfezioni di carattere operativo.

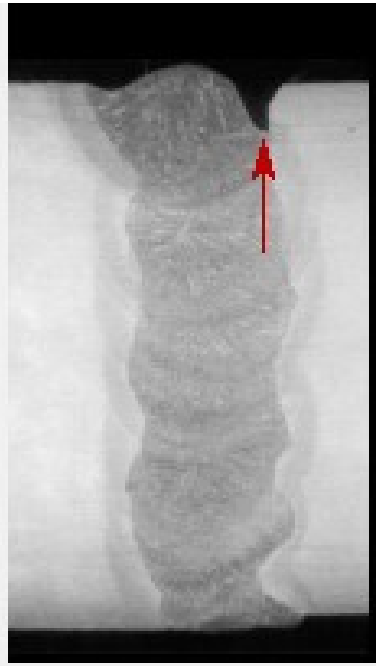
DIFETTI IN SALDATURA – INCISIONI MARGINALI

➢ ***Consiste nell'asportazione di metallo base alla giunzione col metallo di saldatura. Sono i canaletti che si possono formare in corrispondenza del raccordo fra il sovraspessore del giunto e la superficie dei pezzi.***

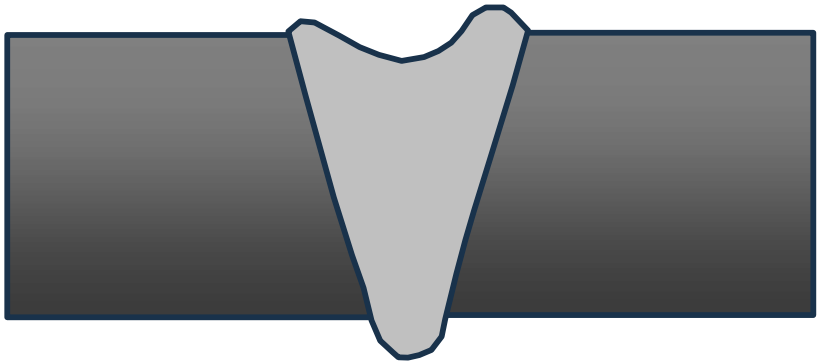
➢ *Sono essenzialmente causate dall'impiego di corrente eccessiva, associata ad un maneggio non corretto. Le incisioni marginali (o solchi laterali) rappresentano una riduzione di sezione resistente ed un invito a rottura. Si può rimediare depositando una ulteriore passatina di riempimento.*

➢ *Il difetto è più frequente sui giunti eseguiti in posizione diversa da quella piana.*

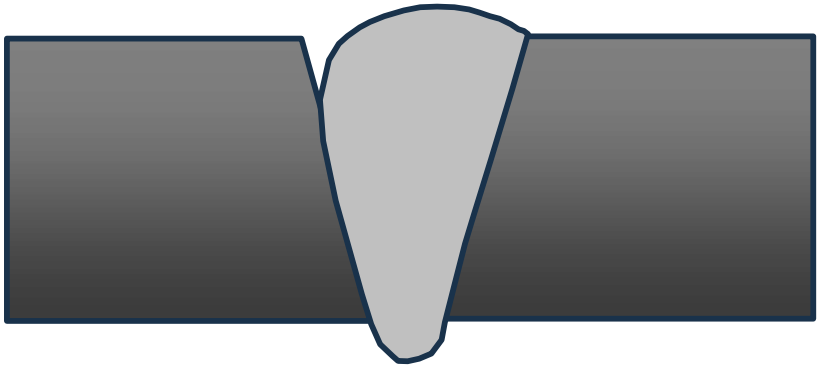




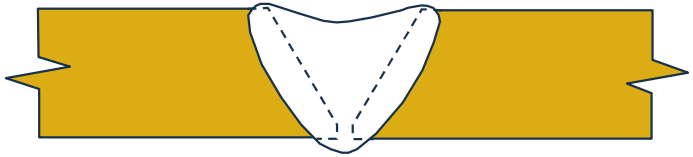
DIFETTI – RIEMPIMENTO INCOMPLETO

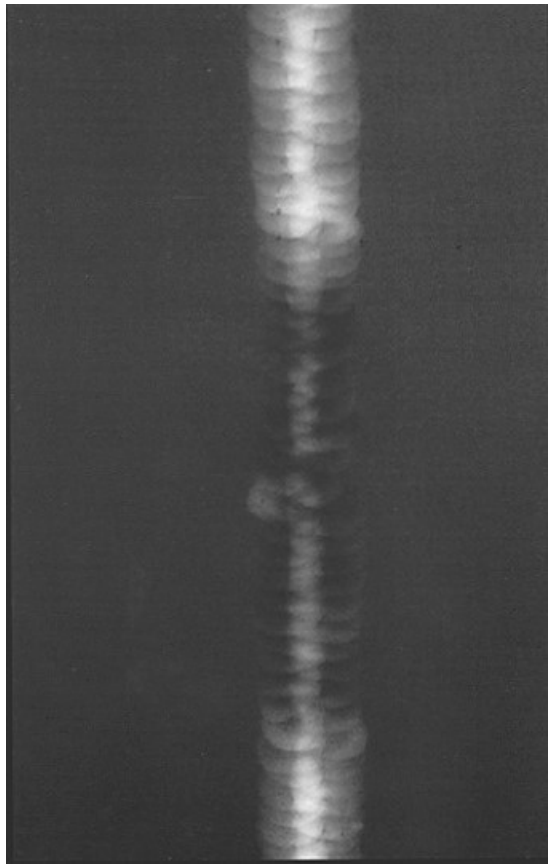


Riempimento incompleto



Riempimento incompleto + mancanza di fusione laterale





Riempimento incompleto

DIFETTI – SOVRASPESSORE ECCESSIVO

- *E' dovuto ad eccessivo deposito di materiale d'apporto*

- *Un eccesso di sovrametallo costituisce uno spreco e, se mal raccordato, indebolisce il giunto*

- *Si creano infatti ai margini del sovrametallo concentrazioni di tensione (per effetto di intaglio) che in condizioni di esercizio di fatica, urti, bassa temperatura possono ridurre la resistenza meccanica del giunto.*

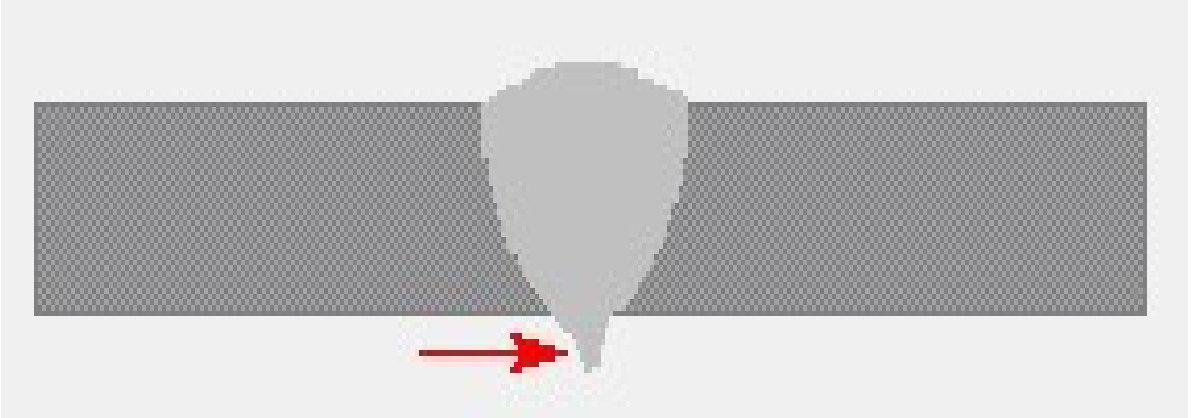


DIFETTI – ECCESSO DI PENETRAZIONE

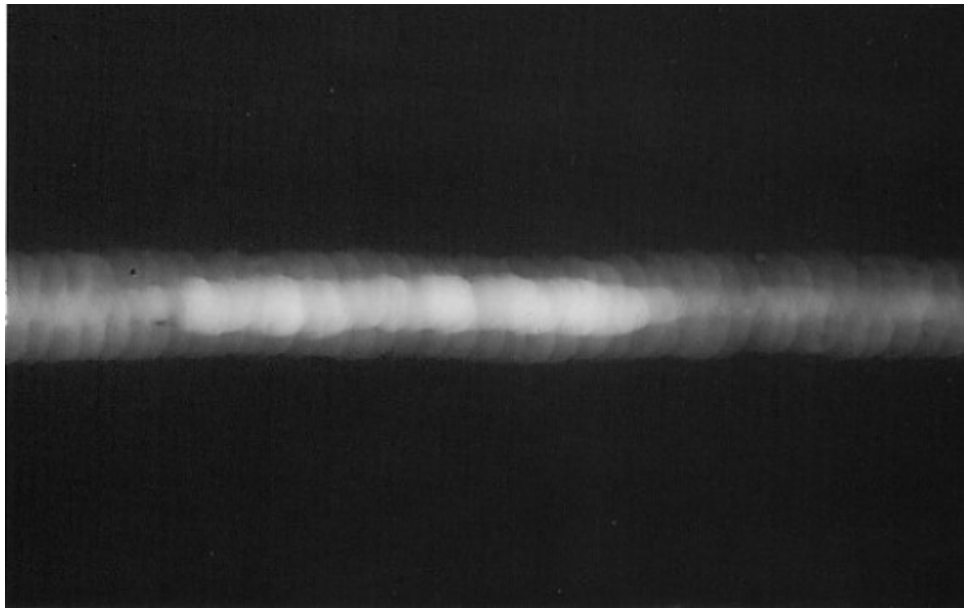
Il metallo d'apporto oltrepassa più del previsto la radice della saldatura. Questa discontinuità si forma durante la passata di fondo.

Possibili cause:

- *distanza dei lembi eccessiva*
- *eccessivi amps/Volts*
- *bassa velocità di saldatura*





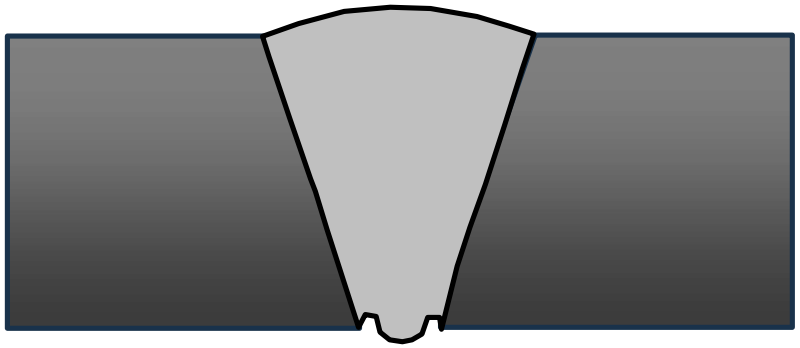


CAVITA' DI RITIRO

Si tratta di un solco causato da una contrazione del metallo di saldatura lungo ogni lato del cordone penetrato.

Possibili cause:

- insufficiente deposito di saldatura nella prima passata
- raffreddamento troppo veloce durante l'applicazione della prima passata
- tecnica di saldatura errata



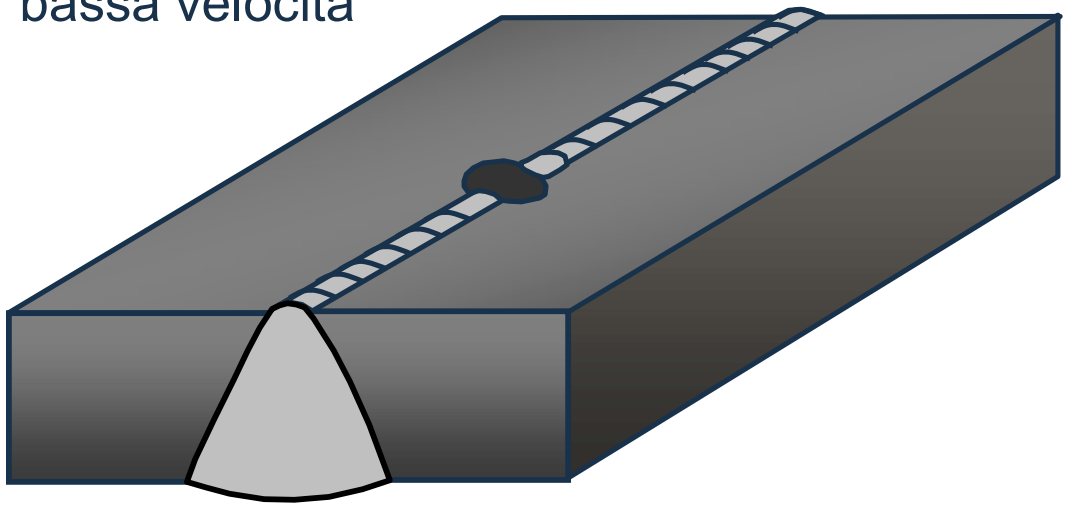
DIFETTI IN SALDATURA – DIFETTI ALLA RADICE

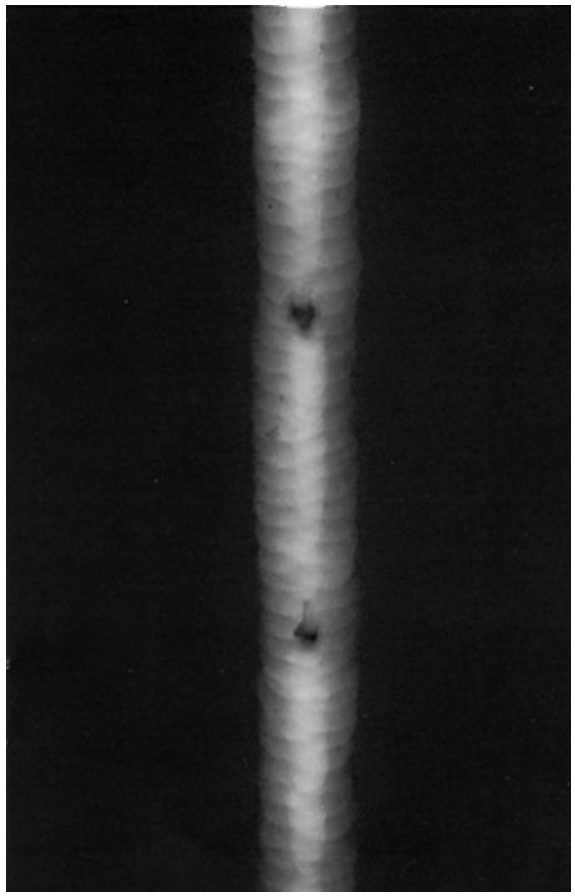
SFONDAMENTO

Uno sfondamento localizzato dovuto ed un'eccessiva penetrazione è rappresentato da un foro lungo la radice.

Possibili cause:

- alti Amps/Volts
- faccia piccola della radice
- distanza ampia dei lembi
- bassa velocità

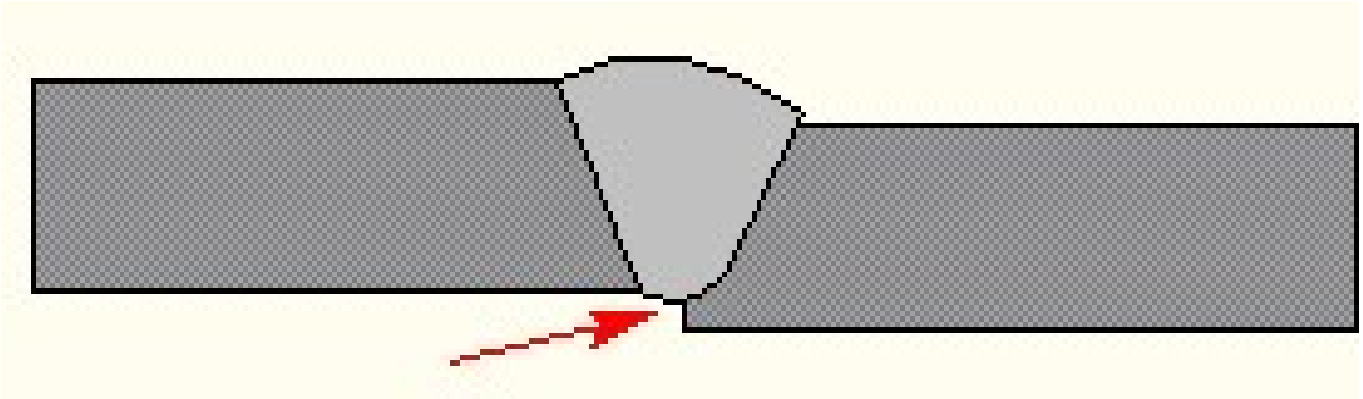






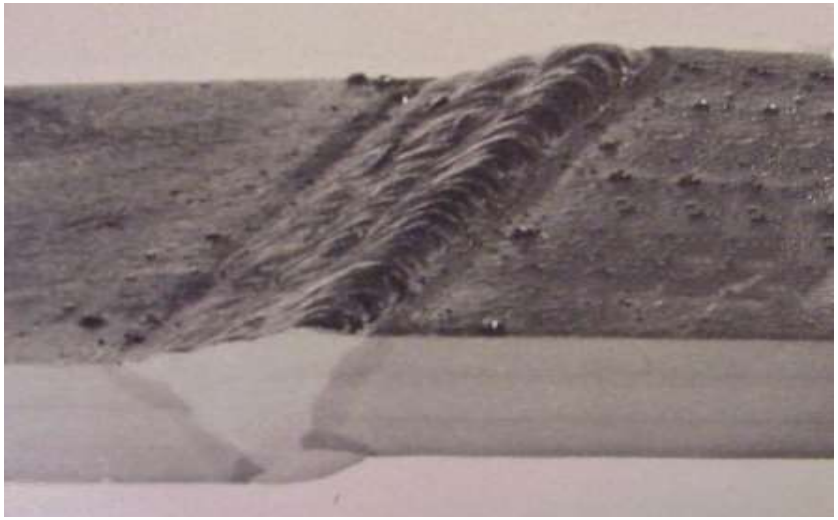
DIFETTI – SLIVELLAMENTO

Nel migliore dei casi consiste in una brusca variazione del profilo, altrimenti si può avere la mancanza di fusione del lembo sovrapposto

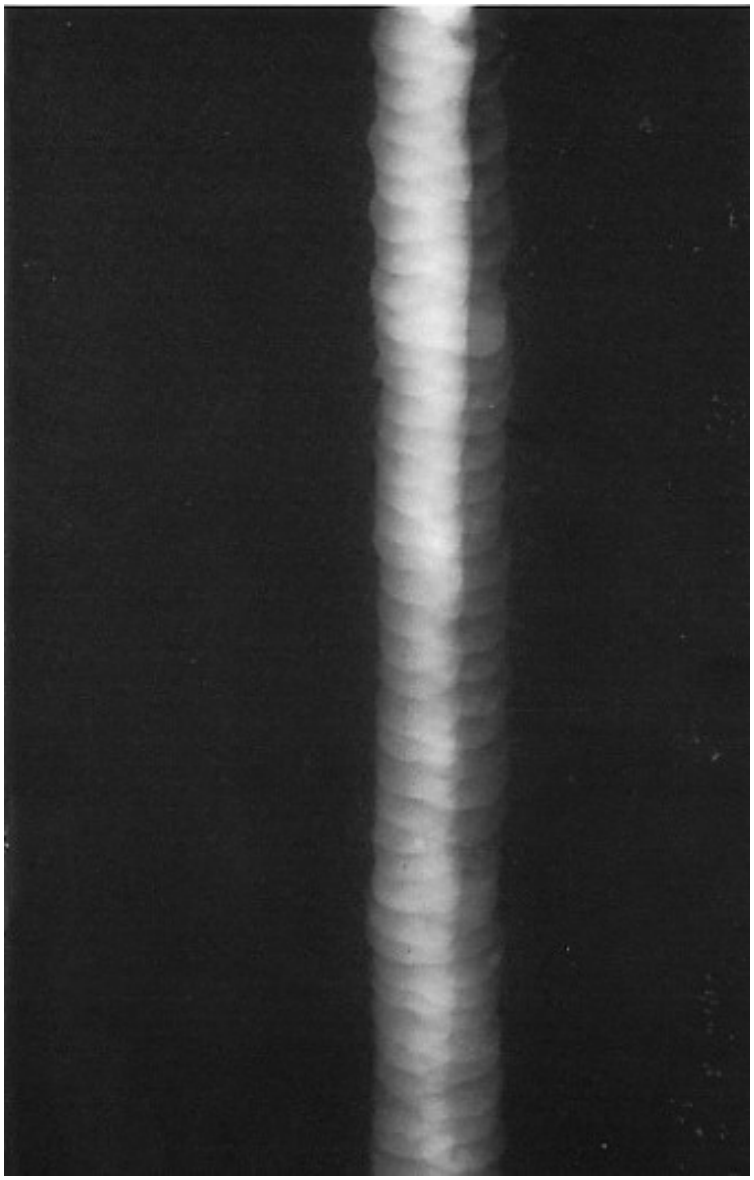


E' dovuto ad un montaggio imperfetto che ostacola la possibilità di eseguire una saldatura regolare

DIFETTI – SLIVELLAMENTO





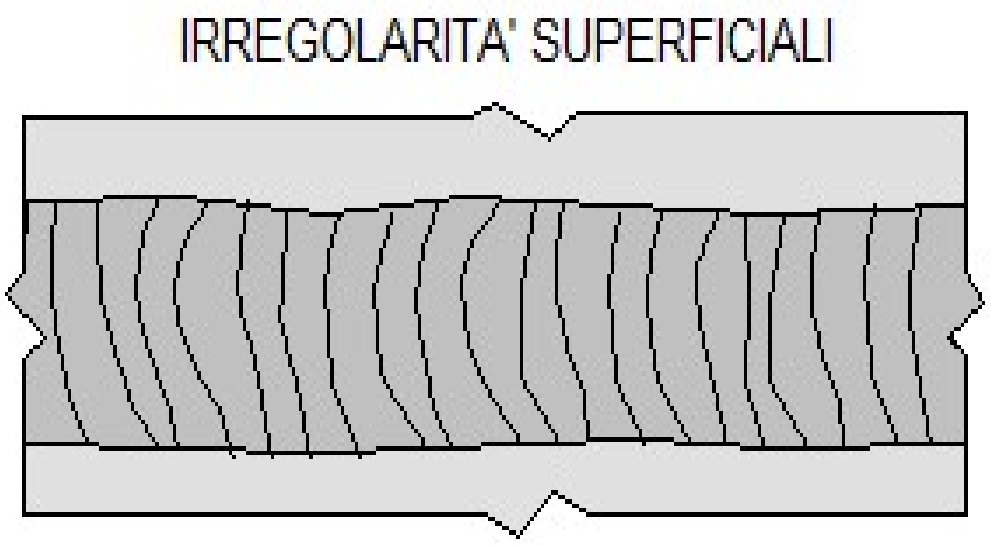


DIFETTI – MAGLIA IRREGOLARE

➢ ***Dicesi "maglia" il tipico disegno a squame che caratterizza la superficie di ogni cordone di saldatura***

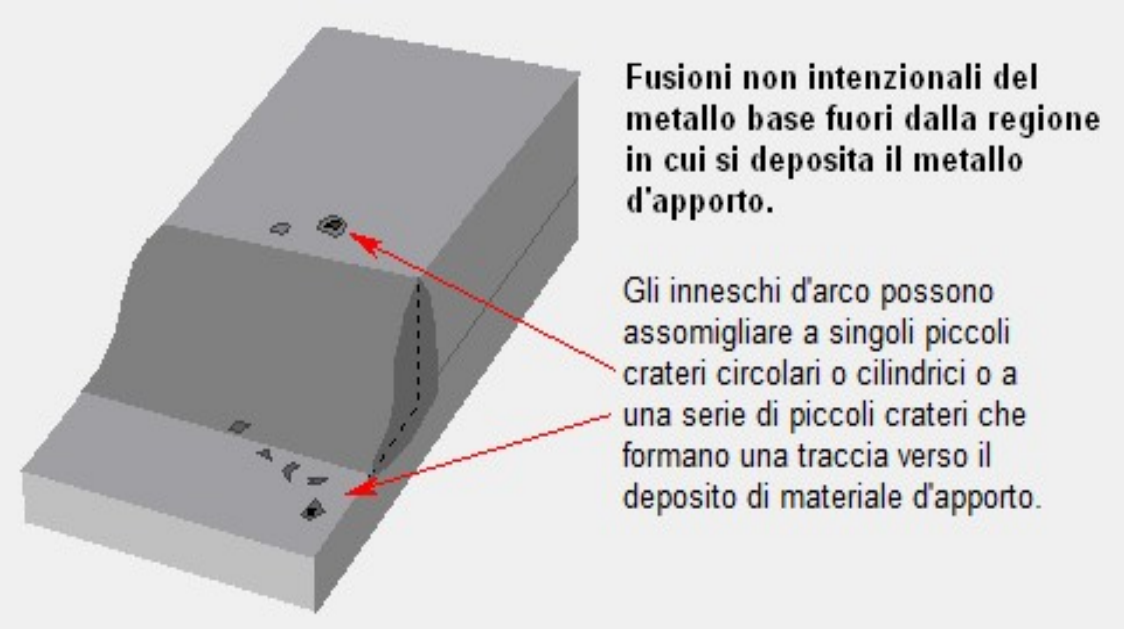
➢ ***La maglia è detta "irregolare", quando la larghezza del cordone è variabile, quando il sovraspessore è incostante, quando il citato disegno di superficie perde la sua cadenza geometrica***

➢ ***La causa è la capacità operatoria non adeguata da parte del saldatore***



DIFETTI IN SALDATURA – COLPO D'ARCO

➢ Consistono in una fusione localizzata del metallo base fuori dalla regione in cui si deposita il metallo d'apporto





➢ E' tipico dei procedimenti manuali ad arco provocati dalla scarsa cura del saldatore che innesca l'arco sul materiale base e non, come è regola, su un lembo del cianfrino

DIFETTI IN SALDATURA – SPRUZZI

➢ **Sono depositi di materiale d'apporto più o meno grandi e dispersi, frequentemente incollati sulla superficie del metallo base vicino al cordone**

➢ *Sono particolarmente pericolosi nel caso di esercizio in ambiente corrosivo, perché consentono un facile innesco di attacco chimico*

➢ *In acciai ad alta resistenza si possono avere in corrispondenza di essi pericolosi fenomeni di tempra locale*

➢ *Denunciano l'impiego di una corrente esagerata o di una eccessiva lunghezza d'arco*





DIFETTI IN SALDATURA – MATERIALE BASE

Un ispettore di saldatura dovrebbe anche ispezionare il materiale base per rilevare qualsiasi difetto visibile.

