



# HIMACROW

Harmonized Personnel Training for Macro and Microscopic  
Metallographic Examination of Structural Materials



HIMACROW.EU



## Educational Materials for HIMACROW Training Course

For the Personnel with the responsibility for **Macroscopic**  
and **Microscopic** Metallographic Examination of Base  
Materials and their Joints Made by Welding and Allied  
Techniques (**Standard & Comprehensive Levels**).

Project Nr. 2021-1-RO01-KA220-VET-000025835.



 <https://himacrow.eu/>



The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein. Project Nr. 2021-1-RO01-KA220-VET-000025835





Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



# HIMACROW

Harmonized Personnel Training for Macro and Microscopic  
Metallographic Examination of Structural Materials

## Materiali didattici O3 per il corso di formazione HIMACROW

---

*Progetto Nr° 2021-1-RO01-KA220-VET-000025835*



*Questo progetto è stato finanziato con il sostegno della Commissione Europea. Questa pubblicazione riflette esclusivamente il punto di vista dell'autore e la Commissione non può essere ritenuta responsabile per qualsiasi uso che possa essere fatto delle informazioni in essa contenute.*

*ERASMUS+: Progetto n° 2021-1-RO01-KA220-VET-000025835.*



## Sommario

<b>Sommario</b> .....	3
introduzione .....	8
<b>1. Introduzione all'esame metallografico</b> .....	11
1.1. CU1: Le tipologie di esame metallografico; condizioni di sicurezza sul lavoro durante la preparazione dei provini per gli esami metallografici .....	11
1.2.1. Sicurezza del campionamento .....	11
1.2.2. Sicurezza nell'inglobatura .....	11
1.2.3. Sicurezza nella lucidatura meccanica.....	12
1.2.4. Sicurezza della lucidatura e dell'attacco elettrolitica .....	12
1.2.5. Sicurezza dell'attacco metallografico (materiali tossici e infiammabili).....	13
1.2. Metodi di preparazione dei campioni per l'esame macro e microscopico .....	17
1.2.1. Campionamento .....	17
1.2.2. Inglobatura .....	17
1.2.3. Marcatura .....	18
1.2.4. Pulizia durante le fasi di lucidatura.....	18
1.2.5. Preparazione meccanica delle superfici, rettifica .....	19
1.2.6. Preparazione meccanica della superficie, Lucidatura.....	20
1.2.7. Lucidatura elettrolitica.....	20
1.2.8. Attacco metallografico.....	20
1.3. Esame macroscopico e sua applicazione nella tecnologia di saldatura .....	22
1.2.1. Panoramica dell'esame macroscopico .....	22
1.2.2. Caratteristiche macroscopiche dei giunti saldati.....	24
1.2.3. Difetti nei giunti saldati .....	32
1.2.4. Valutazione della qualità della saldatura .....	44
1.2.5. Riparazione della saldatura ed esame post-saldatura.....	53
1.2.6. Metodi per prove meccaniche di materiali metallici.....	58
1.4. Esame microscopico e sua applicazione nella tecnologia di saldatura.....	67
1.2.1. Fasi di equilibrio .....	69
1.2.2. Trattamenti termici .....	71
1.2.3. Aspetti microstrutturali di una saldatura .....	75
<b>2. CU2: Metodi specifici per la preparazione dei campioni per esami macro e microscopici</b> .....	78
2.1. Lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica, attacco metallografico colorato – scopo e applicazione .....	78
2.2.1. Introduzione alla lucidatura elettrolitica - Definizione, scopo e come funziona .....	78
2.2.2. Il principio della lucidatura chimica.....	90



2.2.3.	Attacco metallografico colorato. Definizione e scopo .....	100
2.2.4.	Differenze tra lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica, attacco colorato .....	110
2.2.	DIMOSTRAZIONE DI LUCIDATURA ELETTROLITICA E ATTACCO COLORATO .....	119
2.2.1	Lucidatura elettrolitica: scopo, applicazione e dimostrazione .....	119
2.2.2	Esercitazioni pratiche con la lucidatura elettrolitica .....	120
2.2.3.	Problemi comuni e soluzioni quando si utilizza la tecnica di elettrolucidatura per la preparazione dei campioni metallografici .....	127
2.2.4.	Manipolazione e smaltimento degli elettroliti derivanti dalla lucidatura elettrolitica	134
2.2.5.	Risoluzione dei problemi e suggerimenti nella lucidatura elettrolitica dei campioni metallografici .....	136
2.2.6.	Esempi reali di lucidatura elettrolitica e attacchi colorati .....	139
2.2.7.	Attacco colorato: scopo, applicazione e dimostrazione .....	141
2.2.8.	Pratica pratica con l'incisione colorata .....	144
2.2.9.	Problemi comuni e soluzioni quando si utilizza l'attacco colorato per la preparazione dei campioni metallografici.....	158
2.2.10.	Manipolazione e smaltimento dei reagenti da Coloured Etching .....	164
2.2.11.	Risoluzione dei problemi e suggerimenti nei campioni metallografici incisi colorati.	167
2.2.12.	Esempi reali di incisione colorata.....	167
2.4.	L'analisi dell'immagine come strumento nell'esame metallografico .....	172
2.2.1.	Campionamento e preparazione dei campioni.....	173
2.2.2.	Selezione del campo .....	173
2.2.3.	Misurazioni 2D .....	174
2.2.4.	Determinazione della frazione volumetrica.....	176
2.2.5.	Granulometria.....	186
2.5.	Dimostrazione delle capacità del programma per l'analisi delle immagini .....	200
2.6.	Introduzione alla microscopia a scansione.....	218
2.2.1.	<b>Modalità di funzionamento</b> .....	222
2.2.2.	<b>Forme di contrasto</b> .....	227
2.2.3.	<b>Risoluzione e miglioramento del contrasto</b> .....	228
2.2.4.	<b>Requisiti del campione</b> .....	230
2.2.5.	<b>Analisi dell'EDS</b> .....	230
2.7.	Dimostrazione delle capacità del microscopio a scansione.....	233
2.2.1.	<b>Esame delle superfici di frattura</b> .....	233
2.2.2.	<b>SEM applicato all'analisi di rottura delle leghe metalliche e dei loro giunti di saldatura</b>	239
3.	CU3: Dimostrazioni in esame macro e microscopico .....	247



<b>3.1. Dimostrazione di valutazione di campioni macroscopici di articolazioni 1</b> .....	247
<b>3.2.1. Considerazioni generali</b> .....	247
Preparazione dei campioni metallografici .....	247
<b>3.2.2. Analisi macroscopica su superfici non preparate</b> .....	247
<b>3.2.3. L'analisi macroscopica dei materiali metallici su superfici non preparate consente l'esame e la valutazione di queste caratteristiche strutturali</b> .....	247
<b>3.2.4. Analisi macroscopiche su superfici preparate</b> .....	247
Preparazione dei campioni metallografici .....	247
<b>3.2.5. Esame macroscopico di materiali metallici su superfici preparate</b> .....	247
<b>3.2.6. Domande</b> .....	247
<b>3.2. Formazione pratica per l'identificazione senza ausilio di imperfezioni di saldatura su campioni macroscopici</b> .....	264
<b>3.2.1. Introduzione alle imperfezioni di saldatura</b> .....	264
Panoramica delle imperfezioni comuni della saldatura.....	264
Importanza di identificare le imperfezioni di saldatura.....	264
<b>3.2.2. Tecniche di ispezione visiva per l'identificazione delle imperfezioni di saldatura</b> .....	264
Attrezzature e strumenti per l'ispezione visiva.....	264
Procedure di ispezione e migliori pratiche .....	264
<b>3.2.3. Esame macroscopico dei giunti saldati</b> .....	264
<b>3.2.4. Formazione pratica nell'identificazione senza aiuto delle imperfezioni di saldatura</b> ..	264
Pratica pratica con tecniche di ispezione visiva.....	264
Esame e analisi di campioni macroscopici.....	264
<b>3.2.5. Documentazione e segnalazione delle imperfezioni di saldatura</b> .....	264
Importanza di una documentazione accurata.....	264
Formati e requisiti di reporting .....	264
<b>3.2.6. Precauzioni di sicurezza durante l'ispezione della saldatura</b> .....	264
Requisiti dei dispositivi di protezione individuale (DPI). .....	264
Pericoli e misure di sicurezza.....	264
3.2.1 Introduzione alle imperfezioni di saldatura.....	265
Panoramica delle imperfezioni comuni della saldatura.....	265
3.2.2 Tecniche di ispezione visiva per l'identificazione delle imperfezioni di saldatura .....	276
Procedure di ispezione e migliori pratiche .....	278
3.2.4 Formazione pratica per l'identificazione delle imperfezioni di saldatura .....	284
Pratica pratica con tecniche di ispezione visiva.....	285
Esame e analisi di campioni macroscopici.....	292
3.2.5 Documentazione e segnalazione delle imperfezioni di saldatura.....	293



Formati e requisiti di reporting .....	295
3.2.6 Precauzioni di sicurezza durante l'ispezione della saldatura .....	297
Requisiti dei dispositivi di protezione individuale (DPI) .....	300
<b>3.3. Formazione pratica nella preparazione dei campioni (Mhte).....</b>	<b>307</b>
3.3.1. Acciai al carbonio .....	307
<b>3.2.7.</b> Acciaio inossidabile austenitico .....	310
<b>3.2.8.</b> Rame e leghe.....	310
<b>3.2.9.</b> Alluminio e leghe .....	310
<b>3.2.10.</b> Titanio e leghe.....	311
3.3.6. Polimeri .....	311
<b>3.3. Norme per la valutazione della qualità dei giunti realizzati mediante saldatura e tecniche correlate .....</b>	<b>312</b>
<b>3.2.1. EN ISO 17639</b> Prove distruttive su saldature in materiali metallici — Esame macroscopico e microscopico delle saldature .....	312
<b>3.4.2. ISO/TR15608</b> Saldatura - Linee guida per un sistema di raggruppamento di materiali metallici.....	312
<b>3.4.5. EN ISO 17637</b> Controlli non distruttivi delle saldature - Controllo visivo dei giunti saldati per fusione .....	313
<b>3.4.6. ISO 15614-1</b> Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici — Prova della procedura di saldatura — Parte 1: Saldatura ad arco e a gas di acciai e saldatura ad arco di nichel e leghe di nichel.....	314
3.4.8. EN 10247 Esame micrografico del contenuto di inclusioni non metalliche degli acciai utilizzando immagini standard.....	316
<b>3.4.9. ISO 6520-1</b> , Saldatura e processi affini - Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici - Parte 1: Saldatura per fusione .....	316
<b>3.4.10. ISO/TS 17845</b> Saldatura e processi affini - Sistema di designazione delle imperfezioni. ....	317
<b>3.4. Formazione pratica per l'identificazione della struttura del campione microscopico. ....</b>	<b>317</b>
3.5.1. Acciai al carbonio e bassolegati .....	317
<b>3.2.1.</b> Acciaio inossidabile austenitico .....	322
<b>3.2.2.</b> Acciaio inossidabile duplex .....	327
<b>3.2.3.</b> Struttura martensitica.....	328
<b>3.5. Dimostrazione di diversi tipi di strutture microscopiche (Mhte).....</b>	<b>330</b>
3.2.1. Analisi delle saldature .....	330
3.2.2. Analisi di fase .....	331
3.2.3. Analisi della porosità.....	331
3.2.4. Decarburazione .....	332
3.2.5. Strutture in rame .....	332
3.2.6. Strutture in alluminio.....	333



3.2.7.	Strutture in ghisa.....	334
3.6.	Dimostrazione delle modalità di preparazione dei campioni per l'esame metallografico...	336
3.2.1.	Test macroscopici delle fasi di preparazione dei campioni metallografici: .....	336
3.2.2.	Test microscopici delle fasi di preparazione dei campioni metallografici: .....	338



## Introduzione

La metallografia è lo studio della microstruttura delle leghe metalliche e può essere definita più precisamente come la disciplina scientifica che studia la distribuzione spaziale dei grani, dei costituenti, delle inclusioni o delle fasi nelle leghe metalliche, in relazione alle loro proprietà, nell'intero intervallo di temperatura.

Uno dei primi approcci a questa disciplina può essere fatto risalire intorno al 1860, quando Henry Clifton Sorby (10 maggio 1826 – 9 marzo 1908), cominciò ad applicare sui metalli alcune tecniche di preparazione e osservazione utilizzate nella petrografia e ne osservò la struttura.

Ora era possibile associare le caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche di un metallo o di una lega alla sua struttura metallografica; per la metallurgia segnava il passaggio da una scienza empirica ad una scienza vera e propria.

Tuttavia, i processi siderurgici dell'epoca non consentivano di controllare il tenore inclusivo e delle impurezze presenti all'interno delle leghe metalliche; pertanto, le caratteristiche sopra menzionate erano spesso casuali e non facilmente riproducibili. Di conseguenza, lo sviluppo delle tecniche metallografiche è avvenuto negli ultimi 50-60 anni, dopo lo sviluppo dell'industria del ferro e dei metalli.

Oggi il tecnico e analista metallografico trova rilevante spazio nell'industria, all'interno dei laboratori metallurgici, del controllo qualità, della ricerca e sviluppo; queste figure richiedono conoscenze poliedriche in vari settori scientifici e industriali, devono avere una buona conoscenza della metallurgia delle leghe metalliche e della loro saldabilità.

Questo testo si propone di fornire una guida sia pratica che teorica per tecnici metallografici, analisti, ingegneri e responsabili di laboratorio.

I principali esami metallografici si possono dividere in due grandi famiglie: gli esami macrografici e gli esami micrografici.

La prima fornisce informazioni macroscopiche, ad esempio imperfezioni di saldatura, mentre la seconda fornisce informazioni microscopiche, ad esempio il tipo di microstruttura, la dimensione dei grani, il contenuto di inclusioni e così via.

L'esame macrografico trova generalmente collocazione nelle seguenti attività:

- Certificazione delle procedure di saldatura e del personale di saldatura.
- Ottimizzazione del processo di saldatura.
- Controllo della qualità durante la produzione.
- Failure analysis.

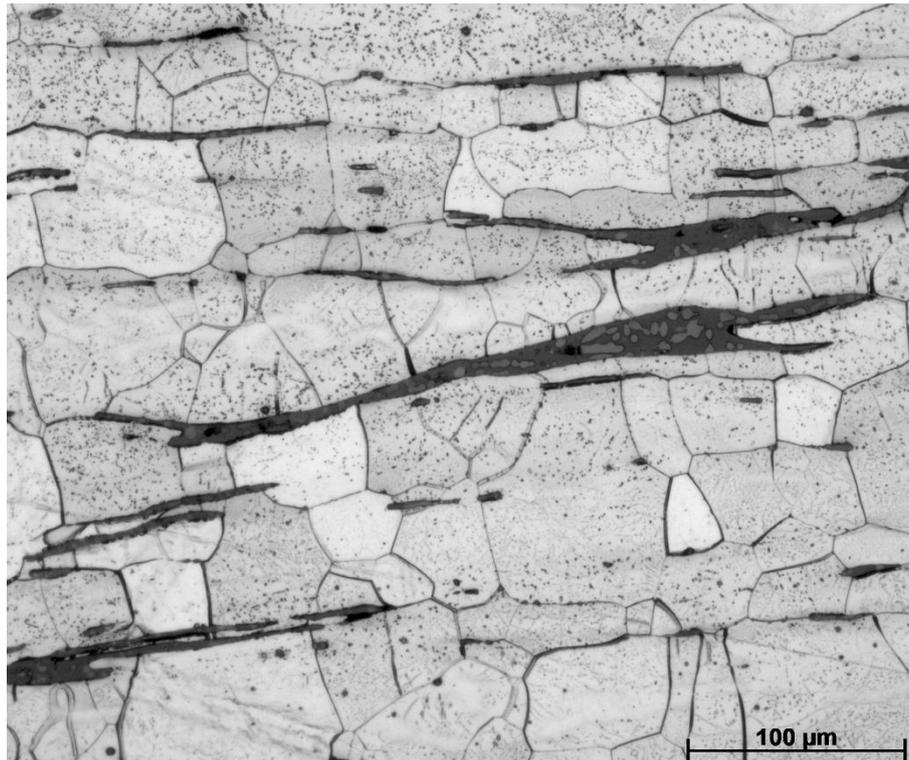
Invece l'esame micrografico nelle seguenti applicazioni:

- Ottimizzazione del processo di saldatura.
- Controllo della qualità durante la produzione.
- Valutazione della vita operativa a lungo termine per alcuni tipi di leghe.
- Failure analysis.
- Ricerca e sviluppo.

Le tecniche di preparazione, gli strumenti di analisi e le informazioni che possiamo ottenere dagli esami metallografici verranno trattati nei capitoli successivi.



*Fig. 1.1 - Henry Clifton Sorby (10 maggio 1826 – 9 marzo 1908).*



*Fig. 1.2 – dettaglio della struttura metallografica dell'acciaio di un ponte del 1880.*



## 1. Introduzione all'esame metallografico

La composizione chimica, la macrostruttura e la microstruttura dei materiali determinano le proprietà del materiale.

L'esame metallografico comprende la conoscenza della preparazione del campione metallografico e dei metodi di esame (microscopia ottica, analisi delle immagini, ecc). Lo specialista metallografico deve conoscere le norme e i regolamenti importanti in materia di sicurezza sul lavoro.

### 1.1. CU1: Le tipologie di esame metallografico; condizioni di sicurezza sul lavoro durante la preparazione dei provini per gli esami metallografici

La sicurezza e la salute sul lavoro sono importanti in un laboratorio metallografico considerando l'uso di strumentazione, prodotti chimici, plastica, ecc. Le attività di laboratorio richiedono tassativamente che tutte le norme e i regolamenti pertinenti in materia di sicurezza sul lavoro siano rispettati. Le operazioni di taglio, lucidatura e attacco metallografico comportano una serie di potenziali pericoli.

Di seguito vengono menzionate le precauzioni più importanti relative alla sicurezza e alla salute.

Tutti i materiali conservati in laboratorio devono avere una scheda dati di sicurezza del materiale. Una scheda di sicurezza è progettata per fornire sia al personale di laboratorio che al personale di emergenza le procedure adeguate a maneggiare una particolare sostanza. Le schede di sicurezza includono informazioni quali dati fisici, effetti sulla salute, pronto soccorso, reattività, conservazione, smaltimento, dispositivi di protezione e procedura in caso di fuoriuscite/perdite.

#### 1.2.1. Sicurezza del campionamento

Quando si lavora con macchine e strumenti è necessario utilizzare protezioni per gli occhi e guanti. Le troncatrici devono essere dotate di uno schermo protettivo per proteggere l'operatore dal liquido refrigerante, frammenti dei dischi da taglio, schegge, ecc.

Secondo le norme di sicurezza, le taglierine, tipicamente, possono essere avviate solo quando lo schermo protettivo è chiuso. Quando si tagliano certi materiali, come bachelite o gomma, possono svilupparsi dei fumi nocivi, per questa ragione nelle macchine più grandi, la camera di taglio deve essere collegata a un sistema di scarico.

#### 1.2.2. Sicurezza nell'inglobatura

Nell'inglobatura a caldo il pericolo principale sono le alte temperature utilizzate nelle presse inglobatrici. È necessario utilizzare guanti per maneggiare i supporti caldi e, quando si riempie la pressa con le resine, come polvere di bachelite, se ne deve evitare l'inalazione. Durante l'inglobatura a freddo esistono diversi potenziali pericoli.

Le resine a freddo sono potenzialmente pericolose per la salute; pertanto, tutta la loro manipolazione dovrebbe essere effettuata con guanti di gomma (lattice) per evitare il contatto con la pelle e la miscelazione dei componenti (resina e indurente) e la successiva reazione di polimerizzazione devono avvenire sotto un opportuno sistema di aspirazione per gas e fumi. Quando si utilizza un forno per accelerare l'indurimento della resina epossidica, è necessario utilizzare anche i guanti. Le informazioni della scheda dati di sicurezza dei materiali dovrebbero essere disponibili per tutte le resine utilizzate.



Di seguito sono riportati alcuni materiali per l'inglobatura a freddo:

**Epossidico:** può danneggiare la pelle, provocando reazioni allergiche. Il materiale non deve mai entrare in contatto con la pelle e i vapori non devono essere inalati. Dovrebbe essere utilizzato sotto cappa di aspirazione e utilizzando dispositivi di protezione individuale (DPI specificati nella scheda di sicurezza). Si consiglia di smaltire i contenitori e gli agitatori dopo la miscelazione. La resina epossidica non è pericolosa quando è completamente indurita; pertanto, non è necessaria alcuna protezione per la manipolazione del campione.

**Acrilici e Poliesteri:** La miscelazione deve sempre avvenire sotto una cappa di aspirazione e durante la manipolazione di questi materiali devono essere utilizzati guanti per evitare l'inalazione e il contatto con la pelle.

### 1.2.3. Sicurezza nella lucidatura meccanica

L'operatore deve utilizzare un camice da laboratorio, guanti, occhiali protettivi e maschere per evitare lesioni.

Durante la preparazione manuale, quando si utilizza un disco abrasivo/lucidante, è necessario adottare delle precauzioni. Il campione deve avere dimensioni adeguate a garantire una buona maneggevolezza durante la preparazione manuale.

Le macchine per la preparazione semiautomatiche sono sostanzialmente sicure da usare; tipicamente sono dotate di porta campioni, che consentono la preparazione di più campioni in contemporanea e impediscono che un campione possa essere scagliato lontano durante la rotazione dei dischi e del porta campioni stesso; ovviamente questo rende necessario che tutti i campioni siano inglobati e abbiano dimensioni standardizzate.

Per evitare contaminazioni e impurità, soprattutto quando si utilizzano dischi abrasivi e paste abrasive, che creano una morchia molto fine e difficile da rimuovere, è opportuno utilizzare guanti e cambiarli frequentemente, oppure lavare accuratamente le mani tra un passaggio e l'altro.

Quando si utilizzano lubrificanti infiammabili a base di alcol, la macchina deve essere collegata a un sistema di aspirazione dei fumi. Una soluzione migliore potrebbe essere quella di cambiare il lubrificante con uno a base d'acqua. I sistemi completamente automatici sono completamente chiusi e non funzionano se gli schermi protettivi non sono chiusi.

### 1.2.4. Sicurezza della lucidatura e dell'attacco elettrolitica

I pericoli potenzialmente più gravi durante la lucidatura elettrolitica sono la miscelazione, la manipolazione, l'uso e la conservazione degli elettroliti. Durante il processo di lucidatura, è necessario prendere precauzioni per evitare il riscaldamento dell'elettrolito che potrebbe causare un incendio o addirittura un'esplosione.

È importante mantenere un corretto livello di elettrolita nel contenitore perché un livello inferiore di elettrolita potrebbe generare sacche d'aria nella camera di lucidatura che potrebbero dare origine a scintille tra anodo e catodo, generando reazioni di combustione. Per questo tipo di operazioni è opportuno utilizzare camice da laboratorio, guanti e occhiali protettivi per evitare infortuni.



### 1.2.5. Sicurezza dell'attacco metallografico (materiali tossici e infiammabili)

L'attacco metallografico deve essere eseguito utilizzando guanti e protezione per gli occhi sotto una cappa di aspirazione.

I pericoli potenziali più gravi sono legati alla miscelazione, alla manipolazione e allo stoccaggio dei prodotti chimici utilizzati. L'operatore deve disporre di informazioni sufficienti su tutte le sostanze chimiche utilizzate dalla formazione e dalle schede tecniche di sicurezza dei materiali, che dovrebbero essere sempre disponibili in laboratorio.

Gli attacchi metallografici sono per lo più soluzioni di diversi reagenti miscelati in laboratorio. Durante la miscelazione si possono instaurare reazioni molto pericolose quali: incendio, esplosione e dissoluzione con creazione di sostanze e/o fumi pericolosi.

Di norma, la miscelazione dovrebbe iniziare sempre con l'acqua o l'alcol ai quali vanno poi aggiunte le altre sostanze (acidi o basi). Tuttavia, è spesso necessario seguire delle procedure speciali e alcune combinazioni di sostanze chimiche sono note per essere pericolose.

Le informazioni al riguardo devono essere disponibili nel laboratorio. I materiali più comuni per i laboratori di metallografia sono:

- Etanolo: L'etanolo utilizzato in un laboratorio presenta la seguente identificazione dei pericoli: i solventi organici possono essere assorbiti per inalazione e ingestione e causare danni permanenti al sistema nervoso. Il liquido può irritare la pelle, gli occhi e il tratto respiratorio.
- Acido acetico: è necessario prestare la massima attenzione quando si miscela con altri acidi come l'acido perclorico e l'acido nitrico. Dovrebbero essere evitate miscele di acido acetico e acido perclorico.
- Acido cromico: sostanza ossidante molto forte, una reazione molto forte con materiale organico o facile da ossidare e non può essere miscelata in modo sicuro con acido acetico e la maggior parte dei liquidi organici, come alcoli o glicerolo.
- Acido nitrico: acido fortemente ossidante, che crea gas con molti materiali organici e metallici. Non conservare soluzioni contenenti più del 5% di acido nitrico in etanolo.
- Acido perclorico: acido molto aggressivo che può causare gravi esplosioni a concentrazioni più elevate. Molto pericoloso il contatto con metalli che si ossidano facilmente, come il bismuto. Va evitato anche il contatto con materiale organico; se assorbito in materiale organico, il materiale deve essere posto in acqua. Il materiale organico non deve mai essere utilizzato per pulire l'acido perclorico.
- Acido picrico: ossidante aggressivo e deve essere sempre conservato in condizioni di umidità. In condizioni asciutte, il rischio di esplosione è elevato. Lo stoccaggio dovrebbe essere fresco e dovrebbe essere messo in atto condizioni di sicurezza per lo scoppio di incendi. I materiali tossici sono sostanze che, se inalate o ingerite, possono provocare la morte o gravi problemi di salute.

Diverse sostanze tossiche che vengono spesso utilizzate in un laboratorio metallografico sono:

- Prodotti chimici a base di metalli: Be, Pb, Cr, Cu, Ag, Sn, Zn, Ni (non ZnO<sub>2</sub>): velenoso in liquidi o vapori.
- Idrocarburi clorurati: questi solventi sono molto pericolosi da inalare.
- Cianuri: reagiscono fortemente con gli acidi, anche il contenuto di CO<sub>2</sub> nell'aria umida dà una reazione. Molto velenoso.



- Acido fluoridrico anidro: in concentrazioni superiori allo 0,5% l'acido è molto pericoloso e provoca danni ai tessuti molto gravi. Attacca quasi tutti i metalli e il vetro. Molto pericoloso.
- Mercurio: i legami chimici con il mercurio ei vapori di mercurio sono velenosi. · Metanolo: velenoso. · Acido ossalico (anidro) (diidrato): in concentrazioni superiori al 5%, l'acido ossalico è velenoso.
- Fosgene (Cloruro di Carbonile): molto pericoloso per il sistema respiratorio.

I liquidi infiammabili vengono utilizzati nella preparazione metallografica per la lucidatura elettrolitica, la lubrificazione, l'attacco e la pulizia. Il numero di liquidi infiammabili conservati nel laboratorio deve essere mantenuto al minimo e protetto attentamente dal calore.

Tutte le norme ei regolamenti devono essere seguite attentamente quando si maneggiano liquidi infiammabili.

Il riscaldamento in contenitori aperti deve essere effettuato con particolare attenzione, utilizzando una cappa di aspirazione e apposite piastre riscaldanti elettriche. Tutti i contenitori con materiali pericolosi devono essere contrassegnati; nella Tabella 1.1.5.1 sono riportati alcuni esempi di simboli di pericolo che possiamo trovare sulle sostanze chimiche.

Tabella 1.1.5.1. simboli dei pericolici.

Categoria di pericolo	Simbolo di pericolo
Esplosivo	
Ossidante	



Estremamente infiammabile		
Corrosivo		
Irritante		
Tossico		

Lo smaltimento può rappresentare un problema e dovrebbe essere effettuato secondo le norme e i regolamenti delle autorità locali.



#### Riferimenti:

[1.1.1] Bramfitt BL., Bescoter AO: Guida del metallografo, pratiche e procedure per ferri e acciai. 1°. Ed. ASM Internazionale, Materials Park, USA 2002. 169–244.

[1.1.2] McCall JL., Mueller WM: Preparazione dei campioni metallografici, microscopia ottica ed elettronica 1°. ed. Plenum Press, New York, Stati Uniti 1973. 1–348.

[1.1.3] Vander Voort GF: Principi e pratica della metallografia. 4°. ed. ASM Internazionale, Parco dei Materiali, 2007. 1–258.

[1.1.4] Kay Geels: preparazione di campioni metallografici e matellografici, microscopia ottica, analisi di immagini e test di durezza ASTM International, West Conshohocken, USA 2007. 1-761



## 1.2. Metodi di preparazione dei campioni per l'esame macro e microscopico

La preparazione dei campioni è mostrata in figura 1.2.1.

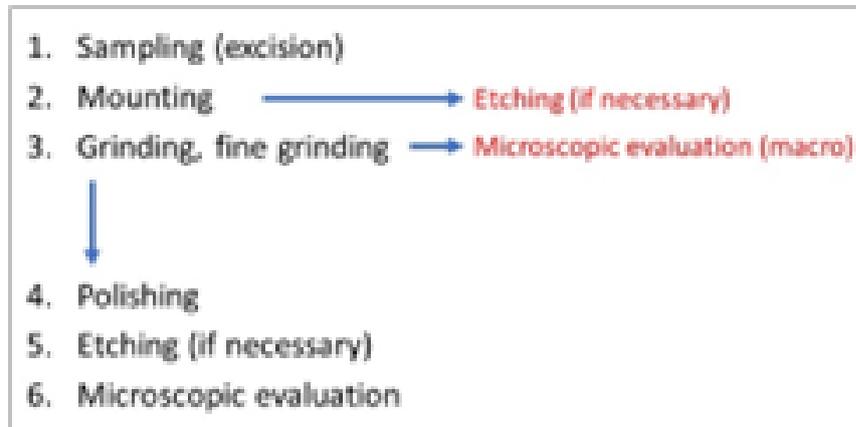


Figura 1.2.1. Il flusso di preparazione dei campioni macroscopici e microscopici

### 1.2.1. Campionamento

Nell'esame dei giunti saldati è consigliabile seguire le raccomandazioni delle rispettive norme. Durante il processo di taglio è importante garantire che la struttura del materiale del campione non venga alterata. Pertanto, il taglio non dovrebbe causare il riscaldamento o la deformazione plastica del campione, poiché entrambi possono portare cambiamenti nella struttura del materiale e false interpretazioni. La lavorazione può essere eseguita mediante taglio meccanico o lavorazione meccanica. In genere, i metallografi possono utilizzare dischi da taglio diamantati con velocità regolabile e raffreddamento ad acqua, oppure seghe a nastro meccaniche/elettriche con sistema di raffreddamento.

Per fogli e fogli sottili è anche possibile tagliare con cesoie. Tuttavia, in casi specifici, i laboratori utilizzano tecniche di taglio specializzate, ad esempio, per materiali con elevati livelli di durezza, i processi più comuni sono l'elettroerosione o il taglio ad acqua (water jet). La superficie di taglio subirà inevitabilmente una deformazione, quindi sarà necessario lavorare ulteriormente la superficie mediante fresatura/retifica.

### 1.2.2. Inglobatura

L'inglobatura si riferisce all'incapsulamento del campione in una resina per migliorarne la maneggevolezza durante la preparazione e l'osservazione.

A seconda del tipo di resina utilizzata e della natura del campione, è possibile applicare metodi di inglobatura a freddo o a caldo. L'obiettivo principale è garantire che né la struttura né la composizione chimica del campione vengano alterate durante il processo [1, 2, 3].

Nell'inglobatura a freddo viene generalmente utilizzata una resina bicomponente. Durante l'indurimento della resina avviene una reazione esotermica che, generalmente, non provoca modifiche strutturali ai metalli e alle loro leghe. Per evitare anomalie, è necessario seguire le specifiche consigliate fornite dal produttore.

Nell'inglobatura a caldo si usa tipicamente una resina polimerica termoindurente, applicando un ciclo di calore e pressione tramite l'ausilio di macchine specifiche.



È necessario prestare attenzione nel caso di campioni piccoli e fragili o con un basso punto di fusione (per esempio componenti di piccole dimensioni, brasature dolci e componenti non metallici).

### 1.2.3. Marcatura

La marcatura dei campioni metallografici è essenziale per una corretta identificazione del campione. La marcatura non deve in alcun modo influenzare la microstruttura della superficie da esaminare; pertanto, è necessario prestare attenzione.

La marcatura deve essere eseguita in una zona in cui non deve essere rimossa e/o danneggiata durante il processo di preparazione.

- Marcatura con inchiostro impermeabile: si consiglia di effettuare l'operazione sulla resina o il più lontano possibile dalla zona di analisi. Bisogna fare attenzione per evitare di rimuoverlo o montarlo parzialmente. In alternativa è possibile utilizzare inchiostro o matita per marcare.
- Targhetta identificativa: solitamente viene posizionata sul retro del campione e, nel caso di campioni inglobati, deve essere inserita in una resina ragionevolmente trasparente, così come all'esterno del campione/supporto. È necessario prestare attenzione per evitare di rimuovere la marcatura durante la pulizia in acqua e alcool.
- Incisione: uno dei metodi di marcatura più utilizzati è l'incisione a vibrazione. Un ago vibrante molto duro induce una deformazione visibile della superficie del supporto/campione. Questo metodo sollecita lo strato di materiale sotto la superficie e non deve essere utilizzato per campioni sottili come le lamine.
- Elettroincisione: danneggia meno la superficie, ma può essere utilizzata solo su materiali elettricamente conduttori. L'incisione su una superficie pulita e liscia avviene attraverso la fusione/evaporazione del metallo, causata da una scintilla ad alta temperatura. L'incisione manuale, utilizzando uno scalpello, è possibile anche per la maggior parte dei materiali che non presentano valori di durezza elevati.
- Stampaggio: è possibile ma non necessariamente consigliato poiché può essere facilmente rimosso durante la manipolazione o la lavorazione.

### 1.2.4. Pulizia durante le fasi di lucidatura

È importante che l'ambiente in cui avviene il processo sia privo di impurità e le mani dell'operatore siano pulite. Considerando che il processo di preparazione prevede spesso diverse granulazioni di carta abrasiva (grana da 80 a 5000), panni e sospensione diamantate (da 9 a 1  $\mu\text{m}$ ), è evidente che possono verificarsi diverse contaminazioni; pertanto, si consiglia di utilizzare ciascuna carta abrasiva solo una volta, perché i grani più grandi di una fase precedente produrranno una contaminazione su quelli successivi.

La mancanza di una pulizia accurata può impedire alle resine a freddo e a caldo di aderire alla superficie del campione.

Inoltre, l'ossidazione e altre contaminazioni dovrebbero essere rimosse a meno che questi prodotti non debbano essere esaminati.

Ad esempio, i metodi di pulizia più grossolani, come la pallinatura e la spazzolatura metallica, potrebbero danneggiare la superficie; pertanto, è opportuno considerare se ciò potrebbe influenzare il risultato finale della preparazione.



In linea di principio, il campione e il porta-campione (campioni fissi) dovrebbero essere puliti tra ogni fase del processo, utilizzando un flusso d'acqua costante; tuttavia, una pulizia maggiormente accurata è necessaria durante gli ultimi passaggi di lucidatura.

Esistono alcuni materiali o alcuni costituenti di materiali che vengono attaccati preferenzialmente dall'acqua (rivestimenti di zinco sugli acciai, inclusioni di piombo negli acciai da lavorazione, ecc.), pertanto, in questi casi, l'acqua deve essere completamente evitata nelle ultime fasi di preparazione.

Per pulire la maggior parte dei metalli e altri materiali senza pori, crepe, ecc., la pulizia manuale è il metodo più efficace. Il campione o il porta-campione devono essere sciacquati sotto acqua corrente o, eventualmente, puliti utilizzando una spazzola morbida o un batuffolo di cotone imbevuto di acqua con un detergente. In caso di materiali morbidi e dopo l'ultima fase di lucidatura, viene utilizzato un batuffolo di cotone per pulire la superficie preparata. La pulizia si conclude spruzzando alcool etilene da un flacone spray sulla superficie preparata ed eventualmente strofinando la superficie prima di portarla ad asciugare. È possibile utilizzare etanolo contenente un additivo di denaturazione purché l'additivo non lasci una pellicola sul campione.

Nel caso di campioni con pori, crepe o di campioni non perfettamente aderenti alla resina, si consiglia la pulizia ad ultrasuoni, ad eccezione dei materiali fragili. Nel caso dei campioni di prova polimerici, si consiglia di effettuare la pulizia con acqua distillata poiché l'etanolo può sciogliere alcuni materiali polimerici.

#### Pulizia ad ultrasuoni

La pulizia ad ultrasuoni è efficiente e relativamente veloce e rimuove lo sporco da pori, spazi vuoti, crepe, ecc. Il campione o il porta-campione viene collocato in un serbatoio con un liquido, acqua con un detergente, alcool o un solvente organico come l'acetone. In caso di sporco difficile da rimuovere si possono utilizzare acidi deboli e soluzioni basiche. Un trasduttore vibra sotto il fondo del serbatoio, con una frequenza di 20–40 kHz che crea bolle di gas (cavitazione) nel liquido. Queste bolle implodono e si verifica un effetto di sfregamento che rimuove lo sporco. Lo sporco contamina il liquido e pertanto il campione deve essere risciacquato, come accennato in precedenza, prima dell'asciugatura. Gli ultrasuoni penetrano nel vetro, quindi, è possibile posizionare uno o più bicchieri nel serbatoio con acqua con un detergente attorno ai bicchieri. Quando i campioni vengono posti solo nei bicchieri, in un liquido adatto, questo liquido può essere facilmente scambiato se contaminato. La pulizia richiede solitamente da 30 s a un 1 minuto. Alcuni materiali con bassa durezza, molto porosi e fragili non devono essere puliti con gli ultrasuoni o per tempi molto brevi (10-30 s).

L'asciugatura dovrebbe avvenire in un flusso di aria calda. È importante che lo strato di alcol non si secchi sulla superficie preparata ma venga spazzato via ed evapori dai lati del campione/supporto. L'aria può essere fornita da un apparecchio fisso che consente ad entrambe le mani di essere libere per pulire il campione con un batuffolo di cotone morbido e alcol.

È possibile utilizzare anche aria compressa, nel qual caso è necessario garantire aria pulita, asciutta e priva di olio.

#### 1.2.5. Preparazione meccanica delle superfici, rettifica

La superficie del campione viene macinata utilizzando dischi abrasivi progressivamente più fini. Il materiale abrasivo utilizzato può essere carta a base di carburo di silicio o pasta/sospensioni diamantate. I materiali abrasivi sono disponibili in commercio in varie granulometrie che vanno da P60 a P4000. Anche i materiali abrasivi con granulometrie da P2000 a P4000 sono considerati agenti



lucidanti. Sia che venga utilizzata la macinazione manuale o automatizzata, durante ogni fase, il campione dovrebbe essere ruotato di 90 gradi per rimuovere i graffi di macinazione precedenti (vedi Figura 1.2.2). La macinazione viene eseguita con una fornitura d'acqua continua, dove l'acqua aiuta a rimuovere particelle sciolte, detriti e calore generati dall'attrito.

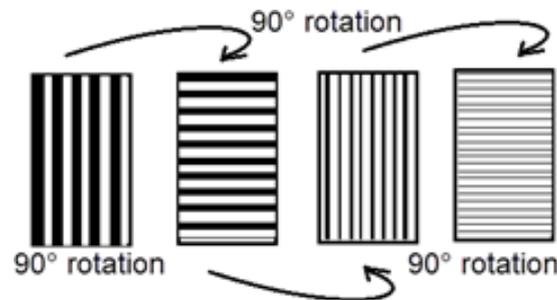


Figura 1.2.5.1. La preparazione della superficie mediante molatura

#### 1.2.6. Preparazione meccanica della superficie, Lucidatura

La lucidatura può essere eseguita mediante metodi meccanici, chimici o elettrolitici. La lucidatura meccanica viene eseguita utilizzando un disco o un panno da lucidatura.

Il materiale del panno lucidante può essere naturale o sintetico. Per la lucidatura si può utilizzare una pasta lucidante o una sospensione di acqua distillata contenente ossido di alluminio, ossido di magnesio o particelle di diamante di dimensioni comprese tra 0,05 e 15  $\mu\text{m}$ , che devono essere compatibili con il materiale e la durezza del panno.

Durante la lucidatura manuale, il campione deve essere spostato con un movimento circolare opposto al senso di rotazione del disco di lucidatura.

Dopo la lucidatura, la superficie viene lavata con acqua distillata seguita da alcool. L'applicabilità dell'alcool deve essere verificata per i campioni non metallici. La superficie viene quindi asciugata con aria calda soffiata.

#### 1.2.7. Lucidatura elettrolitica

La preparazione elettrolitica è un metodo rapido ed efficiente per la preparazione metallografica, poiché fornisce una superficie priva di deformazioni, mentre la rettifica e la lucidatura meccanica tendono a lasciare un sottile strato di deformazione sulla superficie. Utilizzando l'apparecchiatura di lucidatura elettrolitica, il campione viene configurato come anodo in un elettrolita adatto e il materiale viene rimosso mediante dissoluzione controllata della superficie del campione. La lucidatura elettrolitica può essere seguita da un processo di attacco elettrolitico per far emergere contrasti nella microstruttura del campione.

#### 1.2.8. Attacco metallografico

I principali attacchi metallografici sono descritti nella norma ISO 16060.

L'attacco deve essere selezionato in base alla famiglia di lega metallica da analizzare. L'attacco metallografico corrode selettivamente la superficie del campione a vari livelli, dai bordi grano a fasi intermetalliche, rendendoli visibili al microscopio. Anche le microstrutture alterate risultanti dal trattamento termico possono essere esaminate efficacemente. Le tecniche di attacco a colori forniscono maggiori informazioni e migliorano il riconoscimento. L'agente chimico forma una pellicola

di colore stabile sulla superficie del campione, che può essere un ossido, un solfuro, un cromato o un composto complesso. Durante la preparazione dell'attacco è essenziale attenersi rigorosamente all'ordine e ai rapporti di miscelazione. Per i materiali chimicamente resistenti è possibile utilizzare l'attacco elettrolitico. Nell'attacco convenzionale, la superficie del campione viene immersa nella soluzione chimica e mossa delicatamente. Dopo l'attacco, il campione viene risciacquato accuratamente con acqua, seguito da un risciacquo con alcol e infine asciugato con aria calda soffiata. Alcune soluzioni comuni per l'attacco sono raccolte nella Tabella 1.2.8.1.

Nome	Acquaforde	Area di applicazione
Nital	97 ml di alcool etilico; 3 ml di acido nitrico al 69%.	Acciaio non legato e bassolegato
Pikral	100 ml di alcool etilico; 4 g di acido picrico	Acciaio non legato e bassolegato
Acido cloridrico-cloruro di ferro	960 ml di alcool etilico; 20 ml di acido cloridrico al 35%; 50 g di cloruro di ferro (III).	Rame e sue leghe
Keller	950 ml di acqua distillata; 25 ml di acido nitrico al 69%, 15 ml di acido cloridrico al 35%; 10 ml di acido fluoridrico al 40%.	Titanio e sue leghe, alluminio e sue leghe
Kroll	10 ml di acido fluoridrico al 40%; 30 ml di acido nitrico al 69%; 960 ml di acqua distillata	Alluminio e sue leghe
Soluzione di acido ossalico	100 ml di acqua (H <sub>2</sub> O) e 10 g di acido ossalico (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	Acciaio inossidabile

## Riferimenti:

[1.2.1] Bramfitt BL., Benscoter AO: Guida del metallografo, pratiche e procedure per ferri e acciai. 1°. Ed. ASM Internazionale, Parco dei Materiali, 2002. 169–244.

[1.2.2] McCall JL., Mueller WM: Preparazione dei campioni metallografici, microscopia ottica ed elettronica 1a. ed. Plenum Press, New York, 1973. 1–348.

[1.2. 3] Vander Voort GF: principi e pratica della metallografia. 4°. ed. ASM Internazionale, Parco dei Materiali, 2007. 1–258.

[1.2. 4] EN ISO 17639:2022 Prove distruttive su saldature in materiali metallici — Esame macroscopico e microscopico delle saldature 2022.

[1.2. 5] ISO 15614-1:2017 Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici — Prova della procedura di saldatura — Parte 1: Saldatura ad arco e a gas di acciai e saldatura ad arco di nichel e leghe di nichel.

[1.2. 6] ISO/TR 16060:2003 Prove distruttive su saldature in materiali metallici — Agenti aggressivi per esame macroscopico e microscopico, 2003



## 1.3. Esame macroscopico e sua applicazione nella tecnologia di saldatura

### INTRODUZIONE

In questo capitolo esploreremo l'importanza dell'esame macroscopico nel campo della tecnologia di saldatura. La saldatura è un processo di giunzione ampiamente utilizzato in vari settori e la qualità e l'integrità dei giunti saldati svolgono un ruolo cruciale nelle prestazioni e nell'affidabilità di strutture e componenti. L'esame macroscopico fornisce preziose informazioni sulla struttura complessiva, sui difetti e sulla qualità delle saldature, consentendo a ingegneri e tecnici di valutare l'integrità delle saldature e prendere decisioni informate riguardo alla loro idoneità per applicazioni specifiche.

#### 1.2.1. Panoramica dell'esame macroscopico

In questo sottocapitolo forniamo una panoramica approfondita dell'esame macroscopico e della sua importanza nella tecnologia di saldatura. Discuteremo lo scopo e gli obiettivi dell'esame macroscopico, i suoi vantaggi rispetto ad altri metodi di prova e come integra altre tecniche di ispezione, come le prove non distruttive e l'esame microscopico. L'esame macroscopico è una tecnica fondamentale utilizzata nella tecnologia di saldatura per valutare la qualità, l'integrità e la lavorazione delle saldature e dei giunti saldati.

### SCOPO E DEFINIZIONI DELL'ESAME MACROSCOPICO

Lo scopo dell'esame macroscopico è identificare e analizzare le caratteristiche generali, i difetti e la lavorazione delle saldature. Ha lo scopo di garantire che le saldature soddisfino gli standard, le specifiche e i criteri di prestazione richiesti. Questo metodo di esame svolge un ruolo fondamentale nel controllo della qualità della saldatura, consentendo il rilevamento e la valutazione di problemi sia visibili che nascosti che possono influire sull'integrità strutturale, sulla funzionalità e sull'affidabilità dei componenti saldati. L'esame macroscopico riveste un'importanza significativa nella tecnologia di saldatura per diversi motivi:

**Rilevamento dei difetti:** consente il rilevamento di imperfezioni nelle saldature, come cricche, porosità, mancanza di fusione, penetrazione incompleta, sovrametallo eccessivo.

**Rapporto costo-efficacia:** è un metodo relativamente semplice ed economico rispetto ad altre tecniche di test avanzati. Fornisce preziose informazioni sulle condizioni generali delle saldature, aiutando nel processo decisionale relativo a ulteriori ispezioni o riparazioni necessarie.

**Complemento dei test non distruttivi (NDT):** integra altre tecniche di ispezione, inclusi metodi di test non distruttivi come i test a ultrasuoni, la radiografia e l'ispezione con particelle magnetiche. Aiuta a identificare potenziali aree problematiche per una valutazione più dettagliata utilizzando metodi NDT, ottimizzando così il processo di ispezione.

*L'esame macroscopico offre diversi vantaggi nella valutazione delle saldature:*

**Conveniente:** l'esame macroscopico è un metodo relativamente economico e accessibile che richiede attrezzature e formazione minima.

**Ampia applicabilità:** può essere applicato a vari tipi di saldatura, dimensioni e materiali, rendendolo versatile in diverse applicazioni di saldatura.

Tuttavia, è essenziale riconoscere i limiti dell'esame macroscopico:

**Soggettività:** l'interpretazione dei risultati dell'ispezione visiva può essere soggettiva, a seconda dell'esperienza, dell'abilità e dell'acuità visiva dell'ispettore.



Aiuta a garantire che le saldature soddisfino i requisiti specificati, tra cui geometria, tolleranze dimensionali, aspetto e assenza di difetti visibili. Combinando l'esame macroscopico con altre tecniche di ispezione, come le prove non distruttive e l'esame microscopico, è possibile ottenere una valutazione completa della qualità della saldatura.

Questo approccio integrato migliora l'affidabilità, le prestazioni e la sicurezza delle strutture, dei componenti e dei sistemi saldati. Nell'Unione Europea (UE), l'esame macroscopico nella tecnologia di saldatura è guidato da vari standard e linee guida che forniscono requisiti e raccomandazioni per il processo di ispezione.

Alcuni dei principali standard UE relativi all'esame macroscopico nella saldatura partecipano:

**EN ISO 5817 - Saldatura - Giunti saldati per fusione in acciaio, nichel, titanio e loro leghe (livelli di qualità per imperfezioni):** questa norma fornisce criteri per valutare le imperfezioni macroscopiche nei giunti saldati per fusione. Definisce diversi livelli di qualità e criteri di accettabilità in base alla tipologia e all'entità delle imperfezioni osservate durante l'esame macroscopico.

**EN ISO 17637 - Prove non distruttive delle saldature - Prove visive dei giunti saldati per fusione:** questa norma specifica i requisiti per l'esame dei giunti saldati per fusione. Delinea i principi generali, le attrezzature, le procedure per l'esame macroscopico.

**EN 970 - Esame non distruttivo dei giunti saldati per fusione:** questo standard fornisce linee guida per l'esame visivo dei giunti saldati per fusione. Copre i principi generali, le attrezzature, le tecniche e i criteri di accettazione per l'esame macroscopico per valutare le condizioni superficiali, i profili di saldatura e la presenza di difetti visibili.

**EN 1290 - Prove distruttive sulle saldature di materiali metallici - Esame macroscopico delle saldature:** questa norma specifica i requisiti per l'esame macroscopico dei giunti saldati attraverso metodi di prova distruttivi. Descrive le procedure di taglio, preparazione ed esame di macrosezioni di saldature per valutarne la qualità e per individuare eventuali difetti o discontinuità.

Questi standard forniscono indicazioni sulle tecniche di esame macroscopico, sui criteri di accettabilità e sui requisiti di documentazione nella tecnologia di saldatura all'interno dell'Unione Europea. La conformità a questi standard garantisce una valutazione coerente e affidabile delle saldature, promuove il controllo di qualità e supporta l'uso sicuro ed efficiente delle strutture e dei componenti saldati.

## L'IMPORTANZA DELL'ESAME MACROSCOPICO NELLA TECNOLOGIA DI SALDATURA

L'esame macroscopico svolge un ruolo cruciale nella tecnologia di saldatura, fornendo preziose informazioni sulla qualità, l'integrità e l'affidabilità dei giunti saldati.

L'importanza dell'esame macroscopico nella tecnologia di saldatura può essere compresa attraverso i seguenti aspetti:

**Controllo e garanzia di qualità:** l'esame macroscopico funge da strumento fondamentale per il controllo e la garanzia di qualità nella saldatura. Consente l'identificazione e la valutazione di imperfezioni, come cricche, mancanza di fusione, porosità, che potrebbero compromettere l'integrità strutturale e le prestazioni dei giunti saldati. Rilevando e affrontando tempestivamente questi difetti, l'esame macroscopico aiuta a garantire che le saldature soddisfino gli standard di qualità e i requisiti normativi specificati.

**Valutazione dell'integrità della saldatura:** l'esame macroscopico fornisce preziose informazioni sull'integrità complessiva dei giunti saldati. Consente l'ispezione del profilo di saldatura, compresa la forma, le dimensioni e il rinforzo, che sono fondamentali per ottenere la resistenza del giunto e la capacità di carico desiderata. Valutando la macrostruttura, la segregazione e le caratteristiche della



zona termicamente alterata (ZTA), l'esame macroscopico aiuta a valutare le proprietà meccaniche, come durezza, tenacità e suscettibilità alle cricche, e garantisce che le saldature siano adatte al loro funzionamento.

**Riparazione e valutazione delle saldature:** l'esame macroscopico fornisce informazioni critiche per valutare la necessità di riparazione delle saldature e valutare l'efficacia delle procedure di riparazione. Identificando i difetti e le loro cause profonde, l'esame macroscopico aiuta a pianificare ed eseguire strategie adeguate a correggere i problemi osservati. Consente inoltre l'esame post-riparazione per garantire che la saldatura riparata soddisfi gli standard di qualità richiesti e mantenga la sua integrità strutturale.

**Tecnica complementare:** l'esame macroscopico integra altre tecniche di ispezione utilizzate nella tecnologia di saldatura, come i metodi di controllo non distruttivo (NDT) e l'esame microscopico.

## **RUOLO DELL'ESAME MACROSCOPICO NEL CONTROLLO DELLA QUALITÀ DELLA SALDATURA**

L'esame macroscopico nel controllo della qualità della saldatura consente il rilevamento di imperfezioni. Consente agli ispettori di identificare discontinuità, come cricche, porosità, mancanza di fusione, penetrazione incompleta ecc. Esaminando la macrostruttura della saldatura, gli ispettori possono determinare la presenza e la gravità di difetti che possono compromettere le proprietà meccaniche e le prestazioni del giunto.

Valutazione del profilo di saldatura: l'esame macroscopico aiuta a valutare la geometria e il profilo della saldatura. Consente agli ispettori di valutare fattori quali la forma, le dimensioni e la consistenza del cordone di saldatura, nonché l'allineamento e la penetrazione del giunto. Deviazioni dal profilo di saldatura specificato possono causare problemi con la tecnica di saldatura, i parametri di saldatura o l'adattamento del giunto, che possono influenzare sulla qualità e sulla resistenza complessiva della saldatura.

I criteri di accettabilità, definiti dagli standard e dalle specifiche del settore, forniscono linee guida per determinare se una saldatura soddisfa gli standard di qualità e prestazioni richieste.

### **1.2.2. Caratteristiche macroscopiche dei giunti saldati**

Questo sottocapitolo si concentrerà sulle diverse caratteristiche macroscopiche che possono essere osservate nei giunti saldati. Esamineremo i profili di saldatura più comuni, come saldature d'angolo e saldature di testa e discuteremo le caratteristiche e le variazioni specifiche associate a ciascun tipo di giunto.

L'esame macroscopico è utilizzato per esaminare la saldatura o un manufatto metallico per identificare eventuali imperfezioni. Prevede l'uso dell'occhio nudo o di una lente di ingrandimento per osservare e identificare eventuali discontinuità, come cricche, porosità, mancanza di fusione, ecc.

Nella tecnologia di saldatura, l'esame macroscopico è uno strumento essenziale di controllo qualità che aiuta a garantire che i processi e le procedure di saldatura siano eseguiti correttamente e che il prodotto saldato finale soddisfi gli standard di qualità richiesti.

L'esame macroscopico può aiutare a identificare la causa di eventuali difetti, consentendo lo sviluppo di procedure di saldatura più efficaci.

Inoltre, l'esame macroscopico può essere utilizzato per valutare l'efficacia di una procedura di saldatura.

Ciò può aiutare a migliorare il processo di saldatura e a sviluppare procedure di saldatura più efficaci.



Inoltre, può essere utilizzato per analisi forensi in caso di failure analysis o incidenti di saldatura. Esaminando la superficie della saldatura o dell'oggetto metallico, è possibile identificare la causa del guasto o dell'incidente, il che può aiutare a prevenire il verificarsi di incidenti simili in futuro.

Nel complesso, l'esame macroscopico è uno strumento importante nella tecnologia di saldatura che aiuta a garantire la qualità e la sicurezza dei prodotti saldati.

Consente il rilevamento e la correzione tempestiva dei difetti, garantendo che il prodotto finale soddisfi gli standard di qualità richiesti e sia sicuro per l'uso. Consente il rilevamento e la correzione tempestiva dei difetti, migliora i processi e le procedure di saldatura e aiuta a prevenire guasti e incidenti di saldatura.

## INTRODUZIONE ALLE CARATTERISTICHE MACROSCOPICHE

Le caratteristiche macroscopiche sono le caratteristiche osservabili dei giunti saldati che possono essere esaminate senza l'ausilio dell'ingrandimento. Queste funzionalità forniscono preziose informazioni sulla struttura, sulla qualità e sulle prestazioni della saldatura. Esaminando attentamente le caratteristiche macroscopiche, ispettori e ingegneri possono valutare l'integrità del giunto e identificare eventuali problemi o deviazioni dalle specifiche desiderate. Le caratteristiche macroscopiche dei giunti saldati comprendono vari aspetti, tra cui la morfologia del cordone di saldatura, la zona di fusa (ZF), la zona alterata dal calore (ZTA) e il materiale di base. Esploriamo queste funzionalità in modo più dettagliato:

**Morfologia del cordone di saldatura:** la morfologia del cordone di saldatura si riferisce all'aspetto fisico e alla forma del metallo di saldatura depositato. Può variare a seconda del processo di saldatura, del materiale di riempimento e della configurazione del giunto. Le morfologie comuni dei cordoni di saldatura includono profili convessi, concavi, piatti o irregolari. La geometria e l'uniformità del cordone di saldatura forniscono informazioni sulla tecnica di saldatura, sull'apporto di calore e sul grado di penetrazione raggiunto durante il processo di saldatura.

**Zona fusa:** è la regione in cui il metallo di base e il metallo di saldatura hanno subito una fusione e miscelazione completa. Rappresenta la zona in cui è avvenuta la fusione del metallo base e del materiale d'apporto. La zona fusa deve presentare una fusione e una penetrazione adeguate, garantendo un giunto solido e resistente. L'esame della zona di fusa aiuta a determinare l'entità della fusione, l'assenza di difetti e la qualità complessiva della saldatura.

**Zona termicamente alterata (ZTA):** è la porzione del metallo base adiacente alla zona di fusa nella quale le temperature raggiunte durante la saldatura hanno comportato delle alterazioni metallurgiche, come crescita del grano, trasformazioni di fase e cambiamenti nelle proprietà meccaniche. Le dimensioni e le caratteristiche della ZTA sono influenzate da fattori quali parametri di saldatura, composizione del materiale e velocità di raffreddamento. L'esame della ZTA consente la valutazione di potenziali cambiamenti microstrutturali e la presenza di problemi legati al calore, come un'eccessiva crescita dei grani o variazioni di durezza.

**Materiale base:** il materiale di base, o materiale principale, si riferisce al metallo unito mediante saldatura. L'esame macroscopico del materiale di base fornisce un riferimento per valutare l'integrità della saldatura. Implica la valutazione della composizione del materiale di base, della struttura dei grani, delle condizioni della superficie e di eventuali caratteristiche o difetti preesistenti che potrebbero influire sulla qualità della saldatura. Il confronto delle caratteristiche macroscopiche del materiale di base con quelle della saldatura può aiutare a identificare discontinuità, deviazioni o disallineamenti.

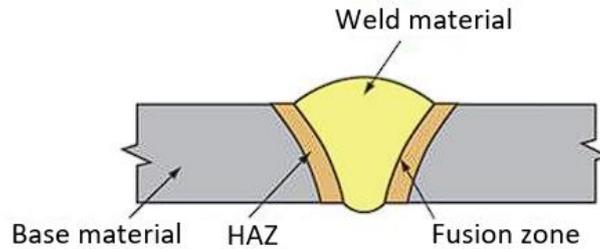


Fig. 1.3.1: Componenti dei giunti saldati. Fonte: <https://www.kobelco-welding.jp/education-center/medium/medium02.html>

L'esame macroscopico consente un'analisi completa di queste caratteristiche ispezionando visivamente il giunto di saldatura e le aree circostanti. Fornisce una comprensione a livello macro della qualità della saldatura, come l'entità della fusione, il rinforzo adeguato, l'assenza di crepe e la conformità generale alle specifiche desiderate. L'interpretazione delle caratteristiche macroscopiche richiede un occhio allenato e la comprensione del processo di saldatura, dei materiali e degli standard applicabili. Inoltre, è importante considerare i requisiti specifici del componente o della struttura saldata, poiché applicazioni diverse possono avere criteri unici per valutare le caratteristiche macroscopiche. Queste informazioni servono come base per valutare la conformità della saldatura alle specifiche, identificare eventuali problemi o deviazioni e prendere decisioni informate sull'accettabilità del giunto.

### PROFILI DI SALDATURA E CONFIGURAZIONI DEI GIUNTI

Nella tecnologia di saldatura, il profilo di saldatura e la configurazione del giunto svolgono un ruolo significativo nel determinare la resistenza, l'integrità e le prestazioni del giunto saldato. Il profilo di saldatura si riferisce alla forma e alle dimensioni della sezione trasversale saldata, mentre la configurazione del giunto descrive la disposizione e la geometria del giunto da saldare. Comprendere questi aspetti è essenziale per valutare la qualità della saldatura e garantirne l'idoneità all'applicazione prevista.

#### Configurazione della saldatura e profili dei giunti:

**Saldatura d'angolo:** è un tipo comune di profilo di saldatura utilizzato per unire due superfici approssimativamente perpendicolari tra loro. Forma una sezione trasversale di forma triangolare ed è spesso utilizzato per giunti a sovrapposizione, giunti a T e giunti angolari. La dimensione della saldatura d'angolo è specificata dal lato del cordone e dall'altezza di gola.

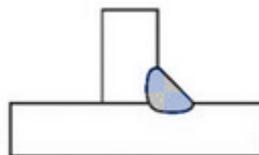


Fig. 1.3.2: Saldatura d'angolo

**Saldatura testa a testa con cianfrino:** viene utilizzata per unire due piastre o tubi testa a testa. Il cianfrino può essere preparato in varie forme, ad esempio a V, a U, a J, con la presenza o meno di una spalla. Queste preparazioni sono comunemente utilizzate nelle applicazioni strutturali e richiedono una preparazione e un controllo precisi per garantire un'adeguata qualità della saldatura.

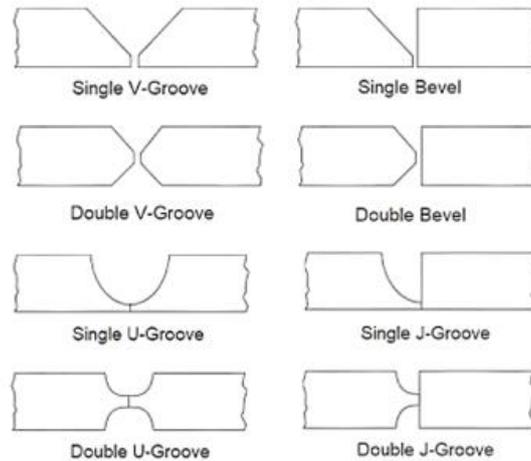


Fig. 1.3.3: Tipi di saldatura di scanalatura

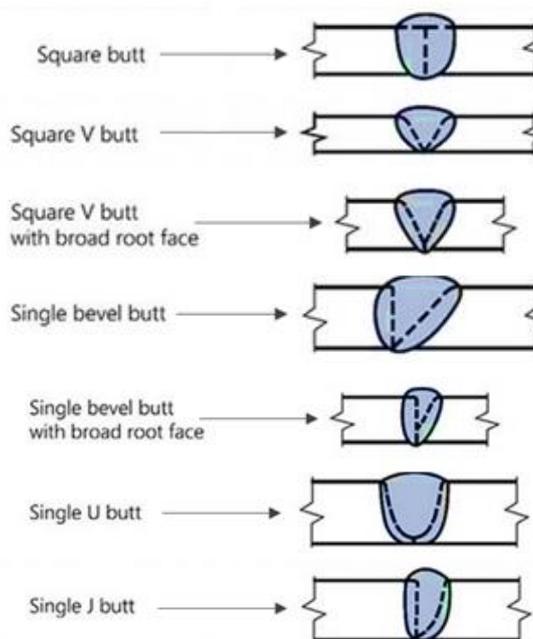


Fig. 1.3.4: Tipi di saldatura di testa



Fig. 1.3.5: Giunto di testa

**Giunto a sovrapposizione:** le due parti da saldare sono sovrapposte e vengono unite insieme mediante saldatura lungo la regione di sovrapposizione. Viene comunemente utilizzato per unire lastre sottili o componenti in lamiera. La resistenza di una giunzione a sovrapposizione dipende dalla dimensione della sovrapposizione, dalla lunghezza della saldatura e dal processo di saldatura utilizzato.



Fig. 1.3.6: Giunto a sovrapposizione

**Giunto a T:** si forma quando l'estremità di un pezzo viene saldata alla superficie di un altro pezzo, creando una configurazione a forma di T. I giunti a T sono ampiamente utilizzati nelle applicazioni strutturali e richiedono un'attenta considerazione dei parametri di saldatura e del rinforzo per garantire resistenza e trasferimento del carico adeguati.

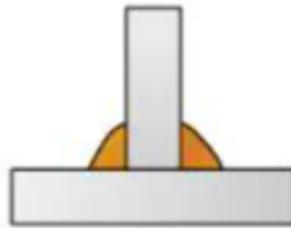


Fig. 1.3.7: Giunto a T

**Giunto angolare:** un giunto angolare viene creato quando due pezzi di materiale si incontrano con un angolo di 90 gradi e vengono saldati insieme. È comunemente usato in strutture scatolari, telai e sistemi di tubazioni. Una corretta preparazione, penetrazione e rinforzo della saldatura sono fondamentali nei giunti angolari per garantire l'integrità strutturale e la resistenza alle concentrazioni di sollecitazioni.

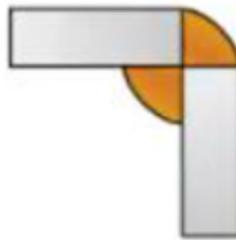


Fig. 1.3.8: Giunto angolare

La valutazione dei profili di saldatura e delle configurazioni dei giunti è fondamentale nella tecnologia di saldatura poiché influiscono direttamente sulla resistenza, sulla capacità di carico e sulla funzionalità del giunto saldato. L'esame di queste caratteristiche comporta l'ispezione visiva della sezione trasversale della saldatura, la misurazione delle dimensioni, la valutazione del rinforzo e la verifica della conformità ai requisiti specificati. È importante aderire agli standard, ai codici e alle specifiche applicabili quando si valutano i profili di saldatura e le configurazioni dei giunti. Questi standard forniscono linee guida per profili di saldatura, dimensioni, rinforzi e criteri di qualità accettabili in base all'applicazione specifica e al materiale da saldare. Esaminando attentamente i profili di saldatura e le configurazioni dei giunti, saldatori, ispettori e ingegneri possono garantire che la saldatura soddisfi i necessari requisiti di resistenza e integrità, riducendo al minimo il rischio di guasto e garantendo la longevità e le prestazioni della struttura o del componente saldato.

#### **DIMENSIONI, FORMA E PENETRAZIONE DELLA SALDATURA**



Le dimensioni, la forma e la penetrazione della saldatura sono parametri cruciali nella saldatura che influiscono direttamente sulla resistenza, sull'integrità e sulle prestazioni del giunto saldato. Valutare e comprendere questi aspetti è essenziale per valutare la qualità della saldatura e garantirne l'idoneità per l'applicazione prevista.

**Dimensione della saldatura:** le dimensioni della saldatura si riferiscono alle dimensioni della sezione trasversale della saldatura, comprese lunghezza, larghezza e profondità. Nelle saldature testa a testa la dimensione della saldatura viene generalmente specificata in termini di profondità di penetrazione, mentre nelle saldature ad angolo in termini di lato del cordone e profondità di gola. La dimensione corretta della saldatura è importante per ottenere la resistenza e la capacità di carico del giunto richieste. È determinato da fattori quali la progettazione del giunto, lo spessore del materiale, il processo di saldatura e i parametri di saldatura.

**Forma della saldatura:** la sezione trasversale della saldatura può variare a seconda della configurazione del giunto, del processo di saldatura e della tecnica di saldatura utilizzata. Le forme di saldatura comuni includono profili convessi, concavi e piatti. La forma desiderata è determinata dalla procedura di saldatura e dai requisiti dell'applicazione. La forma della saldatura può influenzare fattori quali la concentrazione delle sollecitazioni, la resistenza alla fatica e la capacità di sopportare i carichi applicati.

**Penetrazione della saldatura:** la penetrazione della saldatura si riferisce alla profondità alla quale il metallo saldato si estende nel materiale di base. Una corretta penetrazione della saldatura è essenziale per ottenere un giunto forte e affidabile. Una penetrazione insufficiente può provocare una fusione incompleta, una mancanza di resistenza del giunto e una ridotta capacità di carico. Una penetrazione eccessiva, d'altra parte, può portare a un eccessivo apporto di calore, distorsioni e potenziali imperfezioni geometriche.

La valutazione delle dimensioni, della forma e della penetrazione della saldatura prevede tecniche di ispezione visiva, misurazione e valutazione. L'ispezione visiva consente l'osservazione diretta della sezione trasversale della saldatura e l'identificazione di eventuali deviazioni dai requisiti specificati. Strumenti di misurazione come calibri di saldatura, calibri e tecniche al microscopio possono essere utilizzati per determinare con precisione le dimensioni e valutare la qualità della saldatura.

È importante consultare gli standard, i codici e le specifiche pertinenti quando si valutano le dimensioni, la forma e la penetrazione della saldatura; forniscono linee guida e criteri di accettabilità per le dimensioni di saldatura desiderate e la profondità di penetrazione in base all'applicazione specifica, al tipo di materiale e al processo di saldatura utilizzato. L'adesione a questi standard garantisce che la saldatura soddisfi i requisiti di resistenza e integrità necessari. Una corretta comunicazione e documentazione delle dimensioni, della forma e dei risultati della penetrazione della saldatura sono essenziali per il controllo di qualità e la tracciabilità. Questi registri fungono da riferimento per future ispezioni, riparazioni e attività di manutenzione. Esaminando e valutando attentamente le dimensioni, la forma e la penetrazione della saldatura, saldatori, ispettori e ingegneri possono garantire che il giunto saldato soddisfi i requisiti di resistenza e integrità necessari.

## PROFILI DI SALDATURA DI RINFORZO E D'ANGOLO

I profili delle saldature di rinforzo e d'angolo sono aspetti importanti dell'esame macroscopico nella tecnologia di saldatura. Forniscono informazioni preziose sulla qualità, resistenza e integrità strutturale del giunto saldato. Comprendere e valutare queste caratteristiche è fondamentale per garantire l'affidabilità e le prestazioni della saldatura.



## Rinforzo

Il rinforzo di saldatura o di saldatura si riferisce al metallo di saldatura in eccesso che si estende oltre la superficie originale del materiale di base. Si osserva tipicamente sul lato superiore di un giunto saldato, comunemente osservato nelle saldature d'angolo e di testa. Il rinforzo svolge un ruolo significativo nel migliorare la resistenza e la capacità di carico del giunto fornendo materiale aggiuntivo per la distribuzione delle sollecitazioni. Tuttavia, un rinforzo eccessivo può portare a problemi quali concentrazione delle sollecitazioni, ridotta durata a fatica e potenziale interferenza con componenti o strutture adiacenti.

Una corretta valutazione del rinforzo della saldatura comporta la misurazione della sua altezza o profondità, che può essere eseguita utilizzando l'ispezione visiva, calibri di saldatura o profilometri. I livelli accettabili di rinforzo sono solitamente specificati negli standard, nei codici o nelle specifiche di progetto pertinenti, tenendo conto di fattori quali il processo di saldatura, la progettazione del giunto e lo spessore del materiale. La valutazione del rinforzo garantisce il rispetto di questi requisiti e garantisce l'integrità strutturale del giunto saldato.

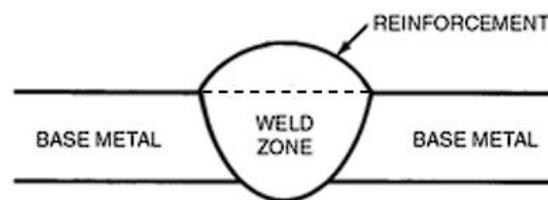


Fig. 1.3.9: Rinforzo nella saldatura

## Profili di saldatura d'angolo

Le saldature d'angolo sono comunemente utilizzate in varie applicazioni di saldatura, in particolare per unire componenti con giunti sovrapposti, giunti a T o giunti angolari. Il profilo della saldatura d'angolo si riferisce alla forma e alle dimensioni della sezione trasversale della saldatura in questi giunti. Svolge un ruolo fondamentale nel determinare la robustezza, la capacità di carico e la resistenza alla fatica del giunto.

Il profilo della saldatura d'angolo è tipicamente caratterizzato dalla lunghezza del lato del cordone ( $Z$ ) e dall'altezza di gola ( $a$ ) e il raggio di raccordo. Il lato del cordone si riferisce alla distanza dal vertice del giunto all'intersezione con il materiale di base. L'altezza di gola rappresenta la distanza più breve tra il vertice e la faccia della saldatura. Il raggio di raccordo si riferisce alla convessità/concavità del profilo del cordone.

La corretta valutazione dei profili di saldatura d'angolo comporta l'ispezione visiva e la misurazione accurata utilizzando strumenti come calibri per saldature d'angolo o calibri per profili. I valori misurati vengono quindi confrontati con i requisiti specificati delineati negli standard, nei codici o nelle specifiche di progetto applicabili. Deviazioni dai profili di saldatura d'angolo richiesti possono indicare problemi quali sezione resistente insufficiente, fusione inadeguata o tecniche di saldatura inadeguate. Affrontare queste deviazioni è necessario per garantire la forza e l'integrità del giunto desiderate. La valutazione dei profili di saldatura di rinforzo e d'angolo è essenziale per valutare la qualità e l'integrità strutturale dei giunti saldati.

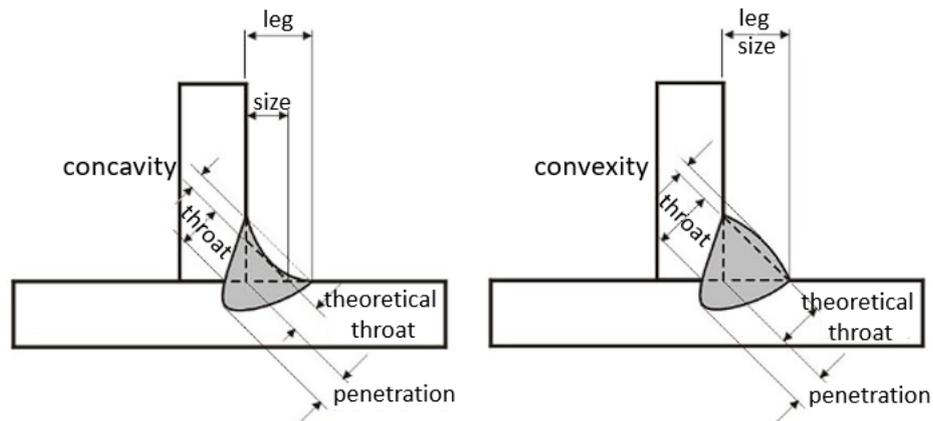


Fig. 1.3.10: Elementi geometrici dei profili di saldatura d'angolo [1.3.25]

## PROFILI DI SALDATURA

Per valutare la qualità del giunto saldato è fondamentale conoscere la forma iniziale del cianfrino di saldatura e rappresenta un aspetto importante dell'esame macroscopico.

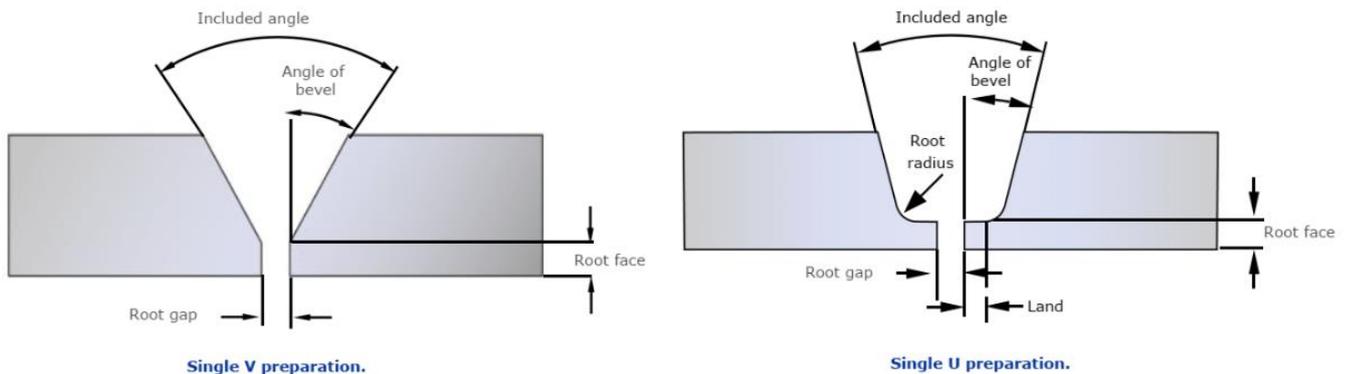


Fig. 1.3.11: Rappresentazione dell'angolo di smusso per profili di saldatura con scanalatura a V e a U [1.3.26]

### Profili di saldatura testa e testa con cianfrino

Le saldature con cianfrino sono comunemente utilizzate in varie applicazioni di saldatura in cui due o più componenti vengono uniti tra loro. Il profilo di saldatura si riferisce alla forma e alle dimensioni della sezione trasversale del giunto. Svolge un ruolo fondamentale nel determinare la robustezza, la capacità di carico e la resistenza alla fatica del giunto.

Il profilo di saldatura è tipicamente caratterizzato dalla sua profondità, larghezza e angolo delle pareti laterali. La profondità rappresenta la distanza dalla radice della saldatura alla superficie del materiale di base. La larghezza si riferisce alla distanza tra le pareti laterali del cianfrino. L'angolo delle pareti laterali, noto anche come angolo incluso, è l'angolo formato tra le pareti laterali del cianfrino

La corretta valutazione dei profili di saldatura prevede la misurazione accurata utilizzando strumenti come misuratori di profondità, misuratori di larghezza o misuratori di profilo. I valori misurati vengono quindi confrontati con i requisiti specificati delineati negli standard, nei codici o nelle specifiche di



progetto applicabili. Deviazioni dai profili di saldatura richiesti possono indicare problemi quali penetrazione e fusione insufficiente della saldatura o preparazione errata del cianfrino.

### **Profili con cianfrini con spalla**

La presenza della spalla è un aspetto essenziale nella preparazione dei cianfrini di saldatura, in particolare nei giunti con configurazione con cianfrino a V o a U. La forma e le dimensioni del cianfrino e dell'eventuale spalla influenza fattori quali la penetrazione della saldatura, il volume della saldatura e la facilità di saldatura.

I valori misurati vengono quindi confrontati con i requisiti specificati delineati negli standard, nei codici o nelle specifiche di progetto applicabili. Deviazioni dagli angoli di smussatura richiesti possono indicare problemi quali preparazione inadeguata della scanalatura, parametri di saldatura errati o adattamento improprio del giunto. La rettifica di queste deviazioni è necessaria per garantire la corretta penetrazione della saldatura, fusione e resistenza del giunto.

La valutazione dei profili di saldatura delle scanalature e degli angoli di smusso è fondamentale per valutare la qualità e l'integrità dei giunti di saldatura delle scanalature. Ispezionando visivamente e misurando accuratamente queste caratteristiche, saldatori, ispettori e ingegneri possono verificare la conformità delle saldature agli standard e alle specifiche pertinenti. Garantendo profili di saldatura e angoli smussati adeguati, è possibile mantenere la resistenza, l'affidabilità e le prestazioni del giunto saldato, riducendo al minimo il rischio di guasti e promuovendo la qualità complessiva della saldatura.

#### **1.2.3. Difetti nei giunti saldati**

I giunti saldati sono soggetti a vari tipi di difetti che possono comprometterne l'integrità strutturale e le prestazioni. In questo sottocapitolo esploreremo le diverse tipologie di difetti che possono essere individuati attraverso l'esame macroscopico. Discuteremo di difetti come porosità, mancanza di fusione, incollature, eccesso di sovrametallo, cricche e irregolarità superficiali. Comprendere le cause, le caratteristiche e le implicazioni di questi difetti è essenziale per valutare la qualità della saldatura e garantire l'affidabilità a lungo termine delle strutture saldate.

### **DIFETTI COMUNI DI SALDATURA E LORO CAUSE**

Nei seguenti paragrafi saranno descritti alcuni dei difetti di saldatura più comuni e i fattori che contribuiscono alla loro formazione.

#### **Porosità:**

La porosità è un difetto di saldatura prevalente caratterizzato dalla presenza di piccole sacche di gas o vuoti all'interno del metallo saldato. Può indebolire la saldatura e renderla suscettibile alla fessurazione. Le principali cause di porosità includono:

- Contaminanti sulla superficie del metallo di base o del materiale di riempimento, come olio, umidità o ruggine.
- Copertura inadeguata del gas di protezione o flusso di gas durante la saldatura, con conseguente protezione inadeguata dai gas atmosferici.
- Parametri di saldatura eccessivi, come corrente elevata o velocità di marcia, che possono provocare l'intrappolamento di gas.



Fig. 1.3.12.1: Porosità mostrata attraverso il disegno bidimensionale

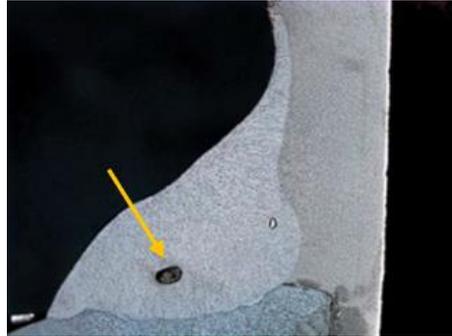


Fig. 1.3.12.2: Un esempio macrografico di porosità [1.3.25]

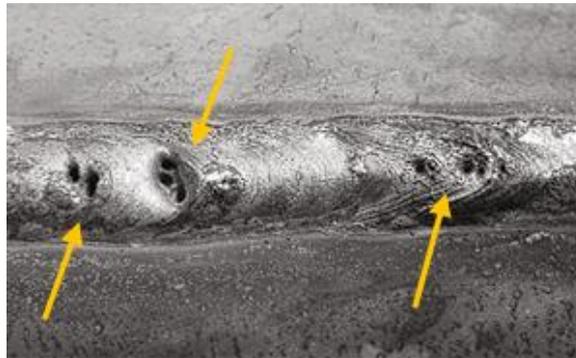


Fig. 1.3.12.3: Un esempio di porosità [1.3.27]

#### **Mancanza di fusione:**

La mancanza di fusione si verifica quando c'è un legame incompleto tra il metallo di base e il materiale d'apporto o tra strati adiacenti della saldatura. Causa una ridotta sezione resistente ed un possibile punto di innesco per fratture in esercizio. Alcune cause comuni di mancanza di fusione includono:

- Apporto di calore insufficiente, che impedisce la corretta fusione e adesione del metallo di base e del materiale di apporto.
- Scarso adattamento del giunto, con spazi vuoti o disallineamento che impediscono la corretta fusione tra le superfici metalliche.



Fig. 1.3.13.1: Mancanza di fusione mostrata attraverso il disegno bidimensionale

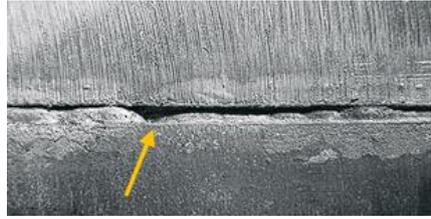


Fig. 1.3.13.2: Un esempio di mancanza di fusione [1.3.28]

#### **Cricche:**

Le cricche nei giunti saldati sono difetti che possono presentarsi in varie forme, si può trattare di cricche a caldo, cricche a freddo, cricche da sollecitazione in esercizio o dovute a fenomeni corrosivi. Le cricche possono compromettere in modo significativo l'integrità strutturale della saldatura e possono propagarsi sotto i carichi applicati o le condizioni di servizio. Le principali cause includono:

- Livelli elevati di stress residuo, che possono essere causati dai processi di saldatura, errato trattamento di preriscaldamento, raffreddamento troppo rapido.
- Progettazione inadeguata del giunto, che porta a zone con elevati livelli di concentrazioni di tensioni.
- Materiali di consumo per saldatura incompatibili o proprietà dei metalli di base non corrispondenti, con conseguente incompatibilità metallurgica e maggiore suscettibilità alle cricche.



Fig. 1.3.14.1: Fessura mostrata attraverso il disegno bidimensionale



Fig. 1.3.14.2: Un esempio di fessura [1.3.25]

#### **Incisioni marginali:**

Le incisioni marginali sono dei solchi che si verificano al margine del cordone di saldatura. Possono fungere da punto di concentrazione delle tensioni. Possono essere causate da:

- Eccessivo apporto di calore o correnti di saldatura elevate, che portano ad un'eccessiva fusione e rimozione di materiale sui bordi di saldatura.
- Tecnica di saldatura errata, come manipolazione impropria dell'arco di saldatura o tessitura eccessiva.



Fig. 1.3.15.1: Sottosquadri mostrati attraverso il disegno bidimensionale

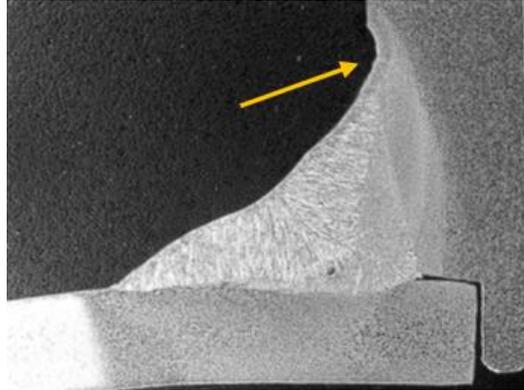


Fig. 1.3.15.2: Un esempio macrografico di sottosquadro [1.3.25]

#### **Spruzzi:**

Per spruzzi si intende l'espulsione di piccole goccioline di metallo fuso durante la saldatura, che possono depositarsi sulle superfici vicine. Anche se gli schizzi non influiscono direttamente sull'integrità della saldatura, possono creare problemi estetici e indicare condizioni di saldatura inadeguate o contaminazione degli elettrodi.

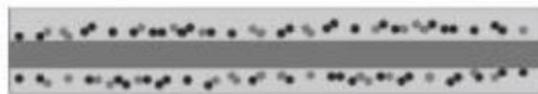


Fig. 1.3.16.1: Spruzzi mostrati attraverso un disegno bidimensionale

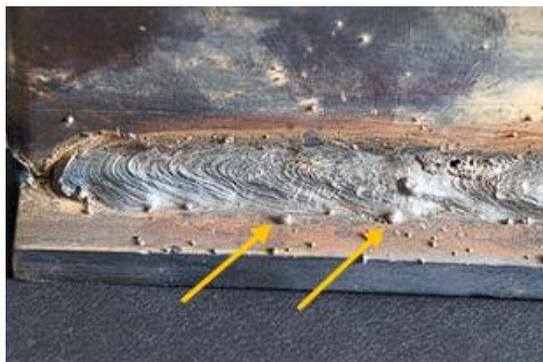


Fig. 1.3.16.2: Un esempio di schizzi [1.3.25]



### **Mancanza di penetrazione:**

La mancanza di penetrazione si verifica quando la saldatura non penetra completamente nello spessore del giunto. Può indebolire il giunto e comprometterne la capacità di carico. Le cause della mancanza di penetrazione includono:

- Apporto termico insufficiente o parametri di saldatura che non forniscono energia adeguata a fondere l'intero spessore del giunto.
- Preparazione impropria del giunto, come uno spazio articolare troppo stretto o lembi non adeguatamente puliti e preparati
- Processo di saldatura non corretto (angolo dell'elettrodo errato o manipolazione impropria dell'arco di saldatura).



Fig. 1.3.17.1: Penetrazione incompleta mostrata attraverso un disegno bidimensionale

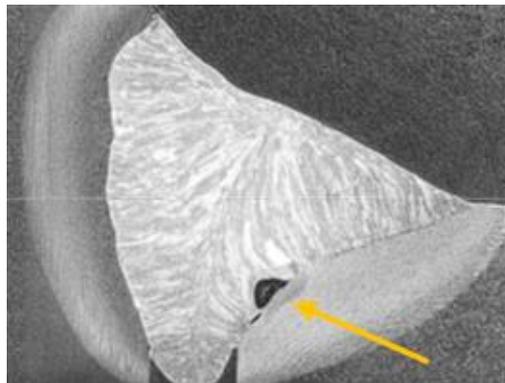


Fig. 1.3.17.2: Un esempio macrografico di penetrazione incompleta [1.3.25]

### **Eccesso di penetrazione:**

Per eccesso di penetrazione si intende un eccesso di fusione oltre il profilo metallo base. Può portare a distorsioni, perdita di resistenza del giunto e potenziali difetti sul lato posteriore della saldatura. Una penetrazione eccessiva è spesso causata da:

- Eccessivo apporto di calore o correnti di saldatura elevate, che causano un'eccessiva fusione e penetrazione nel metallo base.
- Progettazione o adattamento improprio del giunto, come giunti con spazio al vertice insufficiente o angolo di cianfrino errato.



Fig. 1.3.18.1: Penetrazione eccessiva mostrata attraverso il disegno bidimensionale

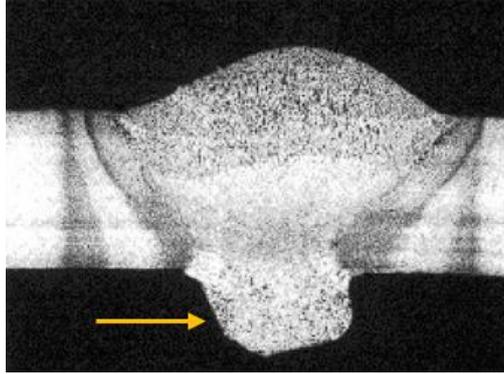


Fig. 1.3.18.2: Un esempio macrografico di eccessiva penetrazione [1.3.29]

### Inclusioni:

Le inclusioni sono materiali estranei, come scorie o particelle non metalliche, intrappolati nel metallo di saldatura. Possono indebolire la saldatura e fungere da punti di concentrazione delle tensioni. Le inclusioni possono essere causate da:

- Contaminazione dei consumabili di saldatura, come il materiale di apporto o il flusso, con sporco, ruggine o umidità.
- Processo di saldatura non corretto.



Fig. 1.3.19.1: Inclusioni mostrate attraverso il disegno bidimensionale

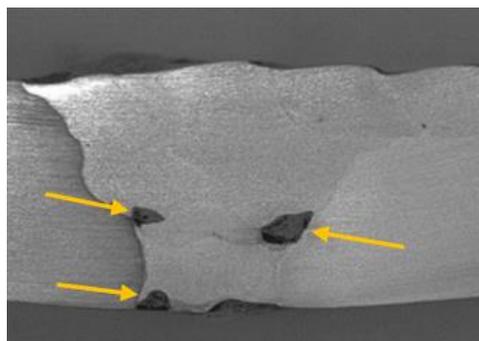


Fig. 1.3.19.2: Un esempio macrografico di inclusione di scorie [1.3.25]

### Ritiro angolare:

il ritiro angolare si riferisce alla deformazione o al disallineamento dei lembi di saldatura o del giunto saldato durante la saldatura. Ciò può provocare imprecisioni dimensionali e disallineamenti. Questa imperfezione è influenzata da vari fattori, tra cui:



- Dilatazione e contrazione termica durante la saldatura, soprattutto quando si saldano sezioni spesse o si utilizzano elevati apporti termici.
- Progettazione impropria del giunto, come misure inadeguate per l'espansione e la contrazione o uso inadeguato di dispositivi di fissaggio per controllare la distorsione.

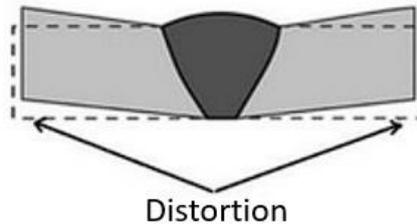


Fig. 1.3.20.1: ritiro angolare mostrato attraverso il disegno bidimensionale [1.3.30]

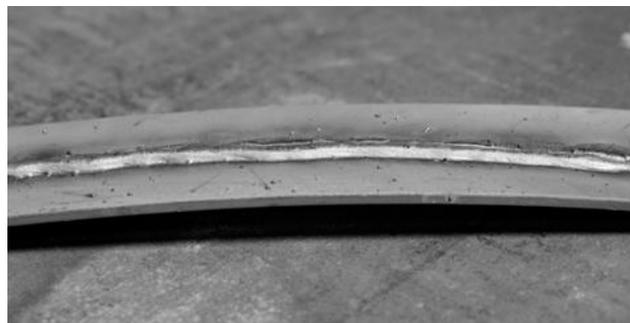


Fig. 1.3.20.2: Un esempio di ritiro angolare [1.3.31]

#### **Eccesso di sovrametallo:**

per eccesso di sovrametallo si intende l'accumulo di metallo d'apporto sul cordone di saldatura. Può influire sulla resistenza e sulla capacità di carico del giunto. Le cause dell'eccesso di sovrametallo includono:

- Dimensioni della saldatura insufficienti o tecnica di saldatura inadeguata, con conseguente deposizione inadeguata del metallo di saldatura.
- Selezione impropria dei parametri di saldatura o dei materiali di consumo, che porta a una fusione insufficiente o a una formazione incompleta del cordone di saldatura.



Fig. 1.3.21.1: eccesso di sovrametallo mostrata attraverso il disegno bidimensionale



Fig. 1.3.21.2: cordone concavo mostrato attraverso il disegno bidimensionale



## POROSITÀ E INCLUSIONI DI GAS

Porosità e inclusioni di gas sono difetti comuni che possono verificarsi nei giunti saldati e hanno un impatto significativo sulle loro proprietà meccaniche e prestazioni. Comprendere le cause, le caratteristiche e i metodi di rilevamento di questi difetti è fondamentale per garantire la qualità e l'affidabilità delle saldature. In questa sezione approfondiremo il tema della porosità e delle inclusioni gassose e le loro implicazioni nel campo della metallografia.

La porosità si riferisce alla presenza di piccoli vuoti o cavità all'interno del metallo saldato o sull'interfaccia di saldatura. Questi vuoti possono variare in dimensioni, forma e distribuzione. Sono tipicamente causati dall'intrappolamento di gas, come idrogeno, azoto o ossigeno, durante la solidificazione del metallo di saldatura. Le fonti di questi gas possono includere umidità, contaminanti sulle superfici da saldare o la decomposizione di alcuni composti presenti nel metallo di base o nei materiali di consumo per saldatura.

Le inclusioni di gas, d'altro canto, sono cavità discrete riempite di gas che sono tipicamente più grandi dei pori associati alla porosità. Possono essere di forma sferica, allungata o irregolare e si trovano spesso nel metallo di saldatura. Le inclusioni di gas possono derivare dall'intrappolamento dei gas durante la solidificazione o dal rilascio di gas disciolti mentre la saldatura si raffredda. La presenza di inclusioni di gas può avere effetti dannosi sulle proprietà meccaniche della saldatura, come ridurre la duttilità, aumentare la sua suscettibilità alle fessurazioni e comprometterne l'integrità strutturale.

### Cause di porosità e inclusioni di gas:

**Umidità e contaminanti:** l'umidità o i contaminanti presenti sulle superfici da saldare possono portare al rilascio di gas durante la saldatura, con conseguente porosità e inclusioni di gas.

**Schermatura impropria:** gas di protezione o flussi inadeguati possono non fornire una protezione sufficiente contro i gas atmosferici, con conseguente incorporazione nel metallo di saldatura.

**Metallo base:** alcuni metalli risultano particolarmente suscettibili alla formazione di porosità in saldatura a causa dell'elevata conducibilità termica che tende a influenzare la velocità di raffreddamento e conseguentemente la velocità di solidificazione in saldatura (per esempio leghe di rame).

**Parametri di saldatura:** parametri di saldatura non corretti, come un eccessivo apporto di calore o un controllo improprio dell'arco, possono generare livelli eccessivi di gas nel bagno di saldatura, causando porosità.

### Caratteristiche della porosità e delle inclusioni di gas:

**Dimensione e forma:** le porosità possono variare da piccoli vuoti sferici a cavità più grandi di forma irregolare. Le inclusioni di gas sono spesso più grandi e possono avere varie forme, tra cui sferiche, allungate o irregolari.

**Distribuzione:** porosità e inclusioni di gas possono essere distribuite in modo casuale durante la saldatura o concentrate in aree specifiche, a seconda delle condizioni di saldatura e delle proprietà del materiale.

**Connettività:** le porosità possono essere interconnesse, formando reti all'interno della saldatura, mentre le inclusioni di gas sono generalmente discrete e isolate.



**Effetto sulle proprietà meccaniche:** sia la porosità che le inclusioni di gas possono ridurre le proprietà meccaniche della saldatura, come resistenza, duttilità e tenacità, rendendola più soggetta a guasti.

#### **Metodi di rilevamento:**

**Ispezione visiva:** può rivelare la presenza di porosità o inclusioni di gas solo se affioranti in superficie.

**Esame metallografico:** consente una caratterizzazione precisa della porosità e delle inclusioni di gas, comprese le loro dimensioni, forma, distribuzione e connettività, ma solo su una singola sezione trasversale al giunto.

**Controlli non distruttivi (NDT):** tecniche come i controlli a ultrasuoni e radiografici possono rilevare e localizzare difetti interni, tra cui porosità e inclusioni di gas, senza la necessità di preparare o distruggere il campione.

Il rilevamento e la caratterizzazione accurati della porosità e delle inclusioni di gas consentono ai saldatori e agli ispettori di valutare la qualità della saldatura e intraprendere azioni correttive adeguate. Identificando le cause profonde di questi difetti, come la regolazione dei parametri di saldatura, l'ottimizzazione delle pratiche di schermatura o il miglioramento della pulizia dei materiali, è possibile adottare misure per ridurre al minimo la loro insorgenza e migliorare l'integrità e l'affidabilità dei giunti saldati.

#### **MANCANZA DI FUSIONE (INCOLLATURE) E INCOMPLETA PENETRAZIONE**

La mancanza di fusione e la penetrazione incompleta sono difetti di saldatura comuni che possono influire in modo significativo sull'integrità e sulla resistenza dei giunti saldati.

#### **Cause di mancanza di fusione e penetrazione incompleta:**

**Apporto di calore inadeguato:** un apporto termico insufficiente durante il processo di saldatura può impedire la corretta fusione tra il metallo di base e il metallo d'apporto, portando a una mancata fusione o a una penetrazione incompleta.

**Tecnica di saldatura non corretta:** una manipolazione errata della torcia di saldatura o dell'elettrodo, come una velocità di spostamento o un angolo dell'elettrodo errati, può comportare una fusione e una penetrazione inadeguate.

**Progettazione e adattamento dei giunti:** una progettazione inadeguata del giunto, compreso uno spazio eccessivo o uno scarso adattamento tra i metalli di base, può impedire la corretta fusione e penetrazione.

**Controllo del bagno di saldatura:** un controllo inadeguato del bagno di fusione, come un'eccessiva tessitura o una manipolazione impropria dell'arco, può contribuire a una fusione e penetrazione insufficienti.

#### **Caratteristiche della mancanza di fusione e penetrazione incompleta:**

**Mancanza di fusione (incollatura):** la mancanza di fusione si verifica quando non si riesce a fondere adeguatamente un lembo del metallo base. Appare come un'area non fusa tra il metallo base e la zona fusa.



**Penetrazione incompleta:** la penetrazione incompleta si riferisce all'incapacità del metallo saldato di penetrare attraverso l'intero spessore del giunto. È caratterizzato da una fusione parziale tra il metallo base e quello saldato, con conseguente mancanza di continuità nel giunto.

**Posizione ed estensione:** la mancanza di fusione e la penetrazione incompleta possono verificarsi in vari punti della saldatura, come la radice, le pareti laterali o la superficie. L'entità del difetto può variare da discontinuità localizzate a una porzione significativa dell'articolazione.

**Effetto sulla forza articolare:** la mancanza di fusione e la penetrazione incompleta possono ridurre significativamente la resistenza e la capacità di carico del giunto saldato. Questi difetti creano potenziali percorsi per l'innesco e la propagazione delle cricche, portando a guasti prematuri sotto sollecitazioni applicate.

#### **Metodi di rilevamento:**

**Ispezione visiva:** l'esame visivo della superficie della saldatura può spesso rivelare la presenza di mancata fusione o di penetrazione incompleta, tuttavia, necessità dell'accessibilità della zona da indagare. Non è sufficiente per rilevare imperfezioni in zone interne non accessibili o tra le passate, per esempio in giunti con ripresa al rovescio.

**Esame metallografico:** l'analisi della sezione trasversale della saldatura consente un'ispezione dettagliata della zona di saldatura. Questo metodo aiuta a identificare la presenza, l'entità e la posizione della mancanza di fusione e della penetrazione incompleta.

**Esame radiografico:** le tecniche di test non distruttivi come la radiografia a raggi X o gamma possono rilevare difetti interni, inclusa la mancanza di fusione e la penetrazione incompleta, fornendo un'immagine bidimensionale della saldatura. L'affidabilità dell'esame dipende dalla posizione dell'imperfezione bidimensionale rispetto alla sorgente radiografica e da quanto risulta favorevole al controllo

**Test ad ultrasuoni:** può rilevare efficacemente la mancanza di fusione e la penetrazione incompleta analizzando gli echi riflessi dai difetti; anche in questo caso la posizione dell'imperfezione può rendere necessaria l'utilizzo di sonde angolari e metodi di indagine più avanzati.

### **INCISIONI MARGINALI ED ECCESSI DI PENETRAZIONE**

Incisioni marginali ed eccesso di penetrazione sono difetti di saldatura comuni che possono verificarsi durante il processo di saldatura, possono compromettere l'integrità strutturale e le proprietà meccaniche dei giunti saldati. Esploriamo questi difetti, comprese le loro cause, caratteristiche e metodi di rilevamento.

#### **Cause che portano al verificarsi di incisioni marginali**

Sono generalmente causati da calore eccessivo o tecniche di saldatura inadeguate. Le cause comuni includono:

- Corrente o tensione di saldatura elevata comportano un apporto di calore eccessivo.
- Controllo inadeguato dei parametri di saldatura, come velocità di avanzamento e lunghezza dell'arco.
- Angolo della torcia errato o tecnica di manipolazione impropria.
- Selezione del metallo d'apporto insufficiente o impropria.

#### **Caratteristiche delle incisioni marginali:**



Sono caratterizzate da un'incisione lungo i margini del giunto saldato. La profondità e la larghezza possono variare a seconda della gravità del difetto. Possono indebolire il giunto riducendo lo spessore effettivo della sezione resistente, compromettendo la resistenza meccanica e fornire dei punti di innesco per fratture causate per fatica meccanica durante l'esercizio.

#### **Metodi di rilevamento delle incisioni marginali:**

**Ispezione visiva:** sono spesso visibili ad occhio nudo. L'ispezione visiva può aiutare a identificare la presenza e l'entità del difetto.

**Esame macroscopico:** permette di individuare e misurare la profondità e l'entità delle incisioni marginali su una singola sezione.

#### **Cause di penetrazione eccessiva:**

Una penetrazione eccessiva si riferisce al profilo della zona fusa che si estende oltre la profondità desiderata nel metallo base. Può verificarsi a causa di fattori quali:

- Corrente o tensione di saldatura elevata con conseguente apporto di calore eccessivo.
- Preparazione o adattamento improprio del giunto, che porta a un controllo inadeguato della forma e delle dimensioni del bagno di saldatura.
- Tecnica di saldatura errata o manipolazione impropria della torcia di saldatura.
- Copertura inadeguata del gas di protezione o del flusso.

#### **Caratteristiche della penetrazione eccessiva:**

La penetrazione eccessiva è caratterizzata da un'eccessiva penetrazione del metallo di saldatura nel metallo di base. Ciò può portare a problemi come, concentrazione delle tensioni al margine del cordone, punti di innesco di rotture in esercizio, accumulo di fasi acquose, ecc. L'eccessiva penetrazione può essere osservata visivamente esaminando la sezione trasversale del giunto di saldatura.

#### **Metodi di rilevamento della penetrazione eccessiva:**

**Ispezione visiva:** una penetrazione eccessiva può essere identificata visivamente esaminando la sezione trasversale del giunto saldato.

**Esame macroscopico:** permette di valutare la profondità e l'entità dell'eccessiva penetrazione su una singola sezione.

Comprendere le cause, le caratteristiche e i metodi di rilevamento delle incisioni marginali e dell'eccessiva penetrazione è fondamentale nel campo della metallografia. Questa conoscenza consente un controllo di qualità efficace e aiuta a garantire la produzione di saldature solide in vari settori.

## **CRICCHE NEI GIUNTI SALDATI**

Le cricche nei giunti saldati rappresentano difetti significativi che si possono verificare sia in zona fusa, sia nella zona termicamente alterata, compromettendo l'integrità strutturale e le proprietà



meccaniche. Comprendere le cause, le caratteristiche, il rilevamento e la valutazione di questi difetti è essenziale per garantire l'affidabilità e la sicurezza delle strutture saldate. Implementando misure preventive adeguate, conducendo ispezioni approfondite e impiegando metodi di riparazione efficaci, ingegneri e professionisti possono mitigare i rischi associati alle cricche, portando a una migliore qualità della saldatura, migliori prestazioni strutturali e maggiore sicurezza in vari settori e applicazioni.

#### **Tipi e caratteristiche delle crepe nei giunti saldati:**

- Cricche a caldo: cricche di liquefazione, cricche di solidificazione
- Cricche a freddo: cricche indotte da idrogeno.
- Cricche da tensocorrosione (SCC – Stress Corrosion Cracking)
- Cricche da fatica meccanica
- Fratture fragili
- Fratture duttili
- Microfessure e microvuoti

#### **Fattori che influenzano la formazione di cricche:**

- Parametri di saldatura: apporto termico, velocità di saldatura, preriscaldamento.
- Proprietà dei materiali: resistenza, tenacità, suscettibilità all'infragilimento da idrogeno
- Tensioni residue
- Processo di saldatura: progettazione del giunto, forma del cordone di saldatura, selezione del metallo d'apporto
- Condizioni ambientali: umidità, mezzi corrosivi, temperatura

#### **Rilevamento e valutazione delle cricche:**

**Ispezione visiva:** esame della superficie.

**Tecniche di controlli non distruttivi (NDT):** controllo ad ultrasuoni, controllo radiografico, controllo con particelle magnetiche, controllo con liquidi penetranti

**Esame metallografico:** esame macroscopico e microscopico.

**Analisi della superficie della frattura:** frattografia (determinazione dei modi di frattura)

### **IRREGOLARITÀ E SCHIZZI SUPERFICIALI**

Le irregolarità superficiali e gli spruzzi sono problemi comuni riscontrati nei processi di saldatura che possono influenzare l'aspetto, la funzionalità e la qualità dei giunti saldati. Le irregolarità superficiali si riferiscono a deviazioni dalla superficie liscia e uniforme desiderata, mentre gli schizzi si riferiscono all'espulsione di goccioline di metallo fuso durante la saldatura. Il presente testo tecnico fornisce una panoramica approfondita delle irregolarità superficiali e degli spruzzi nella saldatura, compresi i loro tipi, cause, tecniche di rilevamento, prevenzione e mitigazione.

#### **Cause di irregolarità superficiali e spruzzi:**

- Parametri di saldatura non corretti: corrente di saldatura, tensione, velocità di spostamento
- Selezione errata dell'elettrodo o del filo di apporto
- Scarso adattamento e preparazione del giunto



- Contaminanti sul pezzo o sui materiali di consumo della saldatura
- Copertura del gas di protezione o portata del gas inadeguata
- Presenza di umidità o olio sulla superficie del pezzo
- Pulizia insufficiente del pezzo prima della saldatura
- Tecnica di saldatura e abilità dell'operatore

#### **Rilevamento e valutazione delle irregolarità superficiali:**

**Ispezione visiva:** esame della superficie per irregolarità, spruzzi e difetti

#### **Prevenzione e controllo delle irregolarità superficiali e degli spruzzi:**

- Parametri di saldatura corretti e ottimizzazione della tecnica
- Adeguata preparazione e adattamento dei giunti
- Pulizia efficace e rimozione dei contaminanti
- Selezione del gas di protezione e della portata adeguati
- Utilizzo di agenti e rivestimenti antispruzzo
- Manutenzione e taratura delle apparecchiature di saldatura
- Formazione e qualificazione dei saldatori

#### **Mitigazione e riparazione delle irregolarità superficiali:**

- Levigatura e finitura superficiale
- Modifica e fusione del profilo di saldatura
- Rimozione dell'armatura in eccesso e dei sottosquadri
- Utilizzo di materiali di riempimento adeguati per la riparazione

#### **Reporting e documentazione:**

- Documentazione dettagliata delle irregolarità superficiali e degli spruzzi
- Formati e standard di reporting (ad esempio ISO, AWS)
- Comunicazione dei risultati della valutazione alle parti interessate
- Raccomandazioni per la prevenzione, la mitigazione e la riparazione

Le irregolarità superficiali e gli spruzzi durante la saldatura possono influire in modo significativo sulla qualità e sulle prestazioni dei giunti saldati. L'implementazione di parametri di saldatura adeguati, l'ottimizzazione della preparazione dei giunti, il mantenimento della pulizia e l'utilizzo di gas di protezione e misure antispruzzo adeguate sono fondamentali per ottenere superfici lisce e prive di difetti. Attraverso il miglioramento continuo, il monitoraggio e il rispetto degli standard stabiliti, i professionisti possono garantire saldature di alta qualità con estetica, funzionalità e affidabilità superiori.

#### **1.2.4. Valutazione della qualità della saldatura**

Valutare la qualità di una saldatura è un aspetto critico della tecnologia di saldatura. In questo capitolo discuteremo come viene utilizzato l'esame macroscopico per valutare la qualità complessiva di una saldatura. Esploreremo i criteri di accettazione, tra cui la dimensione, la posizione e la gravità dei difetti, nonché l'aspetto visivo e l'allineamento della saldatura. Seguendo le linee guida e gli standard stabiliti, possiamo effettuare valutazioni oggettive e determinare l'accettabilità o il rifiuto dei giunti saldati, per le applicazioni previste, sulla base dei risultati dell'esame macroscopico.

#### **CRITERI DI ACCETTABILITÀ DELLA QUALITÀ DELLA SALDATURA**



I criteri di accettabilità per la qualità della saldatura fungono da linee guida e standard per valutare l'idoneità e l'integrità dei giunti saldati. Questi criteri definiscono i limiti consentiti per varie imperfezioni di saldatura e garantiscono che la saldatura soddisfi i requisiti specificati e le aspettative prestazionali. Stabilire criteri di accettabilità chiari e coerenti è fondamentale per il controllo di qualità, la conformità agli standard di settore e per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle strutture saldate. Questa sezione fornisce una panoramica dei fattori chiave e dei parametri considerati nel determinare i criteri di accettabilità per la qualità della saldatura.

#### **Codici e standard di saldatura:**

Standard internazionali: ISO 3834, ISO 15614, ISO 9606, ecc.

Norme nazionali: AWS D1.1, ASME Sezione IX, EN ISO 15614, ecc.

Standard specifici del settore: API 1104, ASME B31.3, ecc.

#### **Attributi di saldatura e livelli di accettazione:**

Dimensioni della saldatura: dimensioni, forma, penetrazione e profili di saldatura d'angolo

Discontinuità: porosità, cricche, mancanza di fusione, penetrazione incompleta, incisioni marginali, ecc.

Aspetto visivo: irregolarità superficiali, schizzi, scolorimento e contaminazione

Proprietà meccaniche: resistenza alla trazione, resilienza, durezza, ecc.

#### **Livelli e criteri di accettabilità:**

Livelli di accettabilità: accettabile, riparabile o rifiutabile in base alla gravità e all'impatto delle imperfezioni.

Criteri di accettabilità: limiti e soglie specifici per ciascun attributo o parametro di saldatura.

Classificazione delle imperfezioni: categorizzazione delle imperfezioni in base a dimensione, posizione e tipo.

#### **Valutazione e interpretazione:**

Personale qualificato: Ispettori certificati o tecnici NDT per una valutazione accurata.

Documentazione e tenuta dei registri: documentazione adeguata dei risultati delle ispezioni, delle procedure e delle decisioni di accettazione.

Conformità agli standard: verifica della qualità della saldatura rispetto ai codici e alle specifiche applicabili.

#### **Riparazione della saldatura ed esame post-saldatura:**

Procedure di riparazione: metodi e requisiti definiti per affrontare le non conformità



Esame post-riparazione: convalida delle saldature riparate per garantire la conformità ai criteri di accettabilità

Nell'Unione Europea (UE), sono applicabili diversi standard per il rilevamento e la valutazione delle imperfezioni nei giunti saldati. Questi standard forniscono linee guida e requisiti per metodi di prova, criteri di accettabilità e procedure di controllo della qualità.

**EN ISO 5817 - Saldatura - Giunti saldati per fusione in acciaio, nichel, titanio e loro leghe (Livelli di qualità per le imperfezioni):** questa norma specifica i livelli di qualità per la mancanza di fusione e la penetrazione incompleta, tra le altre imperfezioni, nei giunti saldati per fusione. Fornisce criteri di accettazione basati sull'ispezione visiva e sull'esame radiografico.

**EN ISO 17636-2 - Prove non distruttive delle saldature - Prove radiografiche - Parte 2: Tecniche a raggi X e gamma con pellicola:** questa norma specifica i requisiti per i test radiografici delle saldature utilizzando tecniche a raggi X e gamma con pellicola. Copre il rilevamento e la valutazione della mancanza di fusione e della penetrazione incompleta, nonché di altri difetti di saldatura.

**EN ISO 17636-3 - Prove non distruttive delle saldature - Prove radiografiche - Parte 3: Tecniche digitali:** questo standard fornisce i requisiti per i test radiografici delle saldature utilizzando tecniche digitali. Comprende il rilevamento e la valutazione della mancanza di fusione e della penetrazione incompleta, insieme ad altri difetti di saldatura.

**EN ISO 16810 - Prove non distruttive - Prove ad ultrasuoni - Tecnica di diffrazione del tempo di volo come metodo per il rilevamento e il dimensionamento delle discontinuità:** questo standard specifica la tecnica di diffrazione del tempo di volo (TOFD) per il rilevamento e il dimensionamento delle discontinuità della saldatura, inclusa la mancanza di fusione e la penetrazione incompleta.

**EN ISO 23278 - Prove non distruttive delle saldature - Prove magnetoscopiche:** questo standard delinea i requisiti per l'utilizzo del test con particelle magnetiche per rilevare difetti superficiali e vicini alla superficie nelle saldature. Fornisce criteri per valutare le indicazioni e determinare la loro accettabilità in base a dimensioni, forma e posizione.

**EN ISO 3452 - Prove non distruttive - Prove con liquidi penetranti:** questo standard definisce i requisiti per l'esecuzione di prove con liquidi penetranti per rilevare difetti superficiali nelle saldature. Specifica i criteri di accettazione per valutare le indicazioni in base alla loro dimensione, forma e visibilità.

**EN ISO 10042 - Saldatura - Giunti saldati ad arco in alluminio e sue leghe - Livelli di qualità per le imperfezioni:** questa norma affronta specificatamente i livelli di qualità relativi alle imperfezioni nei giunti saldati ad arco in alluminio e sue leghe. Definisce i limiti e le dimensioni accettabili delle imperfezioni per garantire l'integrità della saldatura.

**EN ISO 15614-1 - Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici - Prova delle procedure di saldatura - Parte 1:** saldatura ad arco e gas di acciai e saldatura ad arco di nichel e leghe di nichel: questa norma si concentra sulla qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici. Fornisce linee guida per l'esecuzione di test sulle procedure di saldatura, compresi i criteri di accettazione per la qualità della saldatura. **Parte 2:** saldatura ad arco di alluminio e sue leghe: questa norma specifica come una specifica preliminare della procedura di saldatura viene qualificata mediante prove della procedura di saldatura.



**EN ISO 14731 - Coordinamento della saldatura - Compiti e responsabilità:** questo standard definisce i compiti e le responsabilità del personale di coordinamento della saldatura coinvolto nel garantire la qualità della saldatura. Delinea i requisiti per la gestione dei processi di saldatura, compresi i criteri di ispezione e accettazione.

**EN ISO 3834 - Requisiti di qualità per la saldatura per fusione di materiali metallici:** la norma specifica i requisiti di qualità per la saldatura per fusione di materiali metallici. Copre aspetti quali procedure di saldatura, qualifiche del personale, ispezione e criteri di accettazione per garantire la qualità complessiva dei giunti saldati.

## **ISPEZIONE VISIVA E STANDARD DI ACCETTABILITÀ**

L'ispezione visiva gioca un ruolo cruciale nella valutazione della qualità delle saldature ed esistono diversi standard europei che forniscono linee guida per l'ispezione visiva e i criteri di accettazione.

### **Norme UE relative all'ispezione visiva e agli standard di accettabilità:**

#### **EN ISO 17637 - Prove non distruttive delle saldature - Esame visivo dei giunti saldati per fusione**

Questa norma specifica i requisiti per le prove visive dei giunti saldati per fusione. Descrive le procedure, le attrezzature e i criteri di accettazione per valutare le condizioni superficiali, le dimensioni e l'aspetto generale delle saldature utilizzando tecniche di ispezione visiva.

#### **EN ISO 5817 - Saldatura - Giunti saldati per fusione in acciaio, nichel, titanio e loro leghe (Livelli di qualità per le imperfezioni)**

Come accennato in precedenza, questo standard fornisce livelli di qualità per le imperfezioni nei giunti saldati per fusione. Comprende criteri di accettazione visiva per vari tipi di imperfezioni come porosità, incisioni marginali, mancanza di fusione, ecc.

#### **EN ISO 13920 - Saldatura - Tolleranze generali per costruzioni saldate - Dimensioni per lunghezze e angoli - Forma e posizione**

Questo standard specifica le tolleranze generali per le costruzioni saldate e fornisce linee guida per le deviazioni dimensionali e geometriche nelle strutture saldate. Aiuta a definire i criteri di accettazione basati sulle deviazioni consentite dalle dimensioni e dagli angoli specificati.

#### **EN ISO 17635 - Prove non distruttive delle saldature - Regole generali per i materiali metallici**

La norma stabilisce le regole generali per le prove non distruttive delle saldature nei materiali metallici. Comprende disposizioni per l'ispezione visiva, nonché altri metodi di test come test radiografici, test ad ultrasuoni e test con particelle magnetiche.

#### **EN ISO 10275 - Saldatura - Preparazione dei giunti - Parte 3: Saldatura a gas inerte di metalli e saldatura a gas inerte di tungsteno di rame e sue leghe**

Sebbene sia specifico per il rame e le sue leghe, questo standard fornisce linee guida per la preparazione dei giunti nella saldatura con gas inerte di metallo (MIG) e nella saldatura con gas inerte di tungsteno (TIG). Include criteri di accettazione visiva per la qualità della saldatura, comprese le condizioni della superficie e la penetrazione.

#### **EN ISO 10042 - Saldatura - Giunti saldati ad arco in alluminio e sue leghe - Livelli di qualità per le imperfezioni**



La norma specifica i livelli di qualità per le imperfezioni nei giunti saldati ad arco in alluminio e sue leghe. Definisce i criteri di accettazione visiva per vari tipi di imperfezioni come porosità, mancanza di fusione, crepe e sottosquadri.

## REQUISITI DIMENSIONALI E ALLINEAMENTO

La valutazione della qualità della saldatura per i requisiti dimensionali e l'allineamento implica la valutazione della conformità dei giunti saldati alle tolleranze dimensionali e ai criteri di allineamento specificati. La valutazione mira a garantire che i componenti saldati soddisfino le dimensioni, il montaggio e l'allineamento previsti dal progetto, garantendo così l'integrità strutturale e la funzionalità del prodotto finale.

Nel campo della metallografia, è possibile impiegare diverse tecniche e metodi per valutare la qualità della saldatura in termini di requisiti dimensionali e allineamento. Questi includono:

**Ispezione visiva:** è il metodo più semplice e comunemente utilizzato per valutare i requisiti dimensionali e l'allineamento dei giunti saldati. Implica l'esame visivo del giunto di saldatura per eventuali deviazioni dalle dimensioni specificate. L'ispezione visiva aiuta anche a rilevare disallineamenti, deviazioni angolari o distorsioni che possono influenzare l'adattamento e il funzionamento complessivo del componente saldato.

**Misura e metrologia:** strumenti di misurazione di precisione, come calibri, micrometri, misuratori di altezza e sistemi di allineamento laser, possono essere utilizzati per misurare dimensioni critiche e allineamenti di giunti saldati. Queste misurazioni vengono confrontate con le tolleranze dimensionali specificate fornite nei disegni tecnici o negli standard applicabili per valutare la qualità della saldatura. Le tecniche di misurazione dovrebbero garantire accuratezza e ripetibilità per ottenere risultati affidabili.

**Macchine di misura a coordinate (CMM):** le CMM sono dispositivi metrologici avanzati che consentono misurazioni precise e automatizzate di geometrie complesse. Le CMM utilizzano sonde per acquisire le coordinate tridimensionali di caratteristiche specifiche o punti di riferimento sul giunto saldato. I dati acquisiti vengono confrontati con il modello CAD o con i requisiti dimensionali specificati per valutare la qualità della saldatura in termini di conformità dimensionale e allineamento.

**Tecniche di controlli non distruttivi (NDT):** per valutare i requisiti dimensionali e l'allineamento dei giunti saldati possono essere utilizzati anche metodi NDT, come i test a ultrasuoni, i test con particelle magnetiche o la scansione laser. Queste tecniche possono fornire informazioni dettagliate sulle caratteristiche interne ed esterne, identificare eventuali deviazioni dalle dimensioni specificate e valutare le caratteristiche di allineamento senza causare danni alla saldatura.

**Analisi statistica:** tecniche di analisi statistica, come studi sulla capacità del processo, possono essere impiegate per valutare la qualità complessiva della saldatura per quanto riguarda i requisiti dimensionali e l'allineamento. Queste analisi comportano la raccolta di dati da un campione rappresentativo di giunti saldati, l'analisi statistica dei dati e la determinazione della capacità del processo di soddisfare le tolleranze dimensionali e i criteri di allineamento specificati.

Gli standard europei, come EN ISO 13920, EN 1090-2 ed EN ISO 5817, forniscono criteri di accettazione e linee guida per valutare la qualità della saldatura in termini di requisiti dimensionali e allineamento. Questi standard definiscono limiti di tolleranza, metodi di ispezione e tecniche di misurazione per garantire la conformità ai requisiti dimensionali specificati. La valutazione della qualità della saldatura in termini di requisiti dimensionali e allineamento è essenziale per garantire la

funzionalità, le prestazioni e l'integrità strutturale dei componenti saldati e per soddisfare gli standard del settore e le aspettative dei clienti.

### VALUTAZIONE DELLA GRAVITÀ DEL DIFETTO E CLASSIFICAZIONE

La valutazione della qualità della saldatura per valutare la gravità e la classificazione dei difetti implica determinare il significato e l'impatto dei difetti sull'integrità strutturale, sulle prestazioni e sulla funzionalità dei giunti saldati. Questa valutazione mira a classificare i difetti in base ai loro livelli di gravità, dare priorità alle azioni correttive e garantire la conformità agli standard e alle specifiche applicabili.

Per valutare la gravità e la classificazione dei difetti di saldatura, nel campo della metallografia è possibile impiegare varie tecniche e metodi. Questi includono:

**Ispezione visuale:** l'ispezione visiva è il passo iniziale nella valutazione della gravità e della classificazione del difetto. Implica l'esame visivo del giunto saldato per la presenza di difetti quali crepe, porosità, mancanza di fusione, sottosquadri e spruzzi. L'ispettore valuta la dimensione, la forma, la posizione e la distribuzione dei difetti per determinarne la gravità e la classificazione.

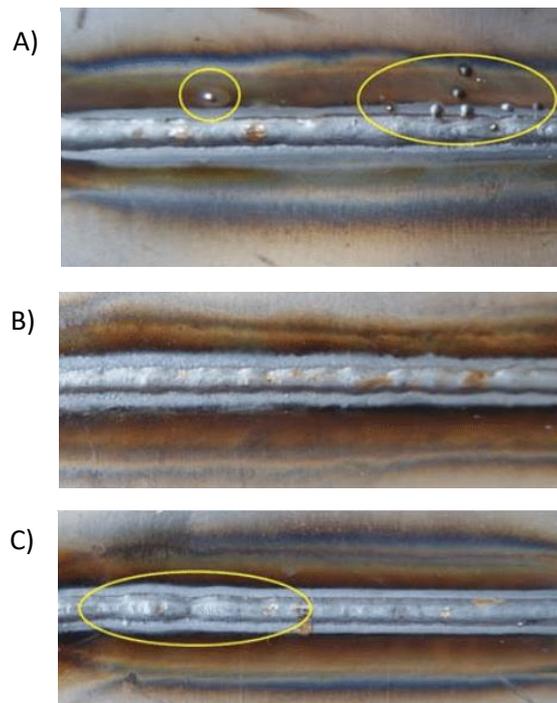


Fig 1.3.22: Imperfezioni riscontrate durante le ispezioni visive: spruzzi locali (a); zona alterata dal calore irregolare (b); riser locali e scanalatura non completamente riempita della faccia di saldatura (c) [1.3.32]

**Tecniche di controlli non distruttivi (NDT):** i metodi NDT, come i test a ultrasuoni, i test radiografici, i test con particelle magnetiche e i test con coloranti penetranti, sono comunemente utilizzati per valutare la gravità e la classificazione del difetto. Queste tecniche forniscono informazioni dettagliate sulla dimensione, forma, posizione ed estensione dei difetti all'interno del giunto saldato. I metodi NDT possono aiutare a identificare i difetti critici che potrebbero compromettere l'integrità della saldatura e classificarli in base ai loro livelli di gravità.

Tabella 1.3.1: Diverse tecniche utilizzate nelle prove non distruttive:

Difetto interno	RT: test radiografici
	UT: test ad ultrasuoni
	VI: Ispezione visiva
Difetto superficiale ET	MT: test delle particelle magnetiche
Difetto di apertura della superficie	PT: test con liquidi penetranti

**Esame macroscopico:** l'esame macroscopico prevede l'uso di macrografie e sezioni trasversali del giunto saldato per valutare la gravità e la classificazione del difetto. Le macrografie forniscono una rappresentazione visiva dettagliata dei difetti, consentendo una migliore valutazione delle loro dimensioni, distribuzione e relazione con la struttura di saldatura circostante. La sezione trasversale comporta il taglio del giunto saldato per esporre le caratteristiche interne e i difetti, consentendo un esame approfondito della loro natura, dimensione e posizione.

**Criteri e standard di accettazione:** la valutazione della qualità della saldatura per la gravità e la classificazione dei difetti si basa su criteri e standard di accettazione stabiliti. Gli standard europei, come EN ISO 5817 e EN ISO 10042, forniscono linee guida e specifiche per valutare i livelli di gravità di vari difetti di saldatura. Questi standard definiscono i livelli di accettazione e forniscono criteri per classificare i difetti in base alla loro dimensione, lunghezza, profondità e altri parametri.

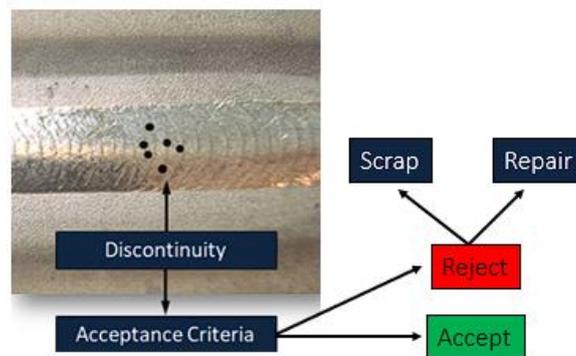


Fig. 1.3.23: Valutazione critica della saldatura: applicazione dei criteri di accettazione per la valutazione della qualità [1.3.33]

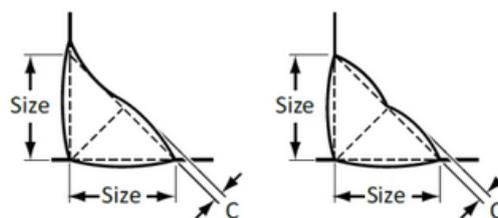


Fig. 1.3.24.1: Profili di saldatura d'angolo accettabili [1.3.33]

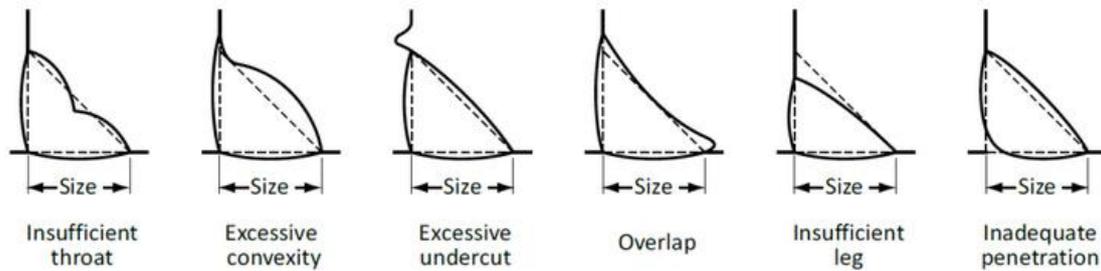


Fig. 1.3.24.2: Profili di saldatura d'angolo non accettabili [1.3.33]

**Giudizio esperto:** in alcuni casi, la competenza e l'esperienza del personale qualificato svolgono un ruolo cruciale nella valutazione della gravità e della classificazione delle imperfezioni. Metallurgi esperti, ispettori di saldatura e ingegneri con una profonda conoscenza dei processi di saldatura e delle caratteristiche dei difetti possono fornire preziosi approfondimenti e giudizi nel determinare la gravità delle imperfezioni e il loro impatto sulla qualità della saldatura.

Durante la valutazione della qualità della saldatura, le imperfezioni vengono generalmente classificate in diverse categorie, ad esempio difetti critici, maggiori e minori, in base a criteri di accettabilità predefiniti. La classificazione aiuta a stabilire la priorità delle azioni correttive, a determinare la necessità di riparazioni o rilavorazioni e a garantire la conformità agli standard e alle specifiche pertinenti. È importante notare che la gravità e la classificazione dei difetti possono variare a seconda dell'applicazione specifica, del tipo di saldatura, del materiale e dei requisiti del settore. Pertanto, la valutazione della qualità della saldatura dovrebbe considerare il contesto specifico e i criteri definiti dalle norme e dalle specifiche applicabili. Valutando la gravità e la classificazione del difetto, la valutazione della qualità della saldatura aiuta a identificare i difetti critici che potrebbero compromettere l'integrità del giunto saldato e garantisce l'implementazione di misure correttive adeguate. Questa valutazione svolge un ruolo cruciale nel mantenimento dell'integrità strutturale, delle prestazioni e della sicurezza dei componenti saldati in vari settori e applicazioni.

## PROVE NON DISTRUTTIVE PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLA SALDATURA

La valutazione della qualità della saldatura attraverso tecniche di test non distruttivi (NDT) è un aspetto cruciale per garantire l'integrità e l'affidabilità dei giunti saldati. I metodi NDT vengono impiegati per valutare la qualità delle saldature senza causare alcun danno ai componenti saldati, consentendo un'ispezione e una valutazione complete dei difetti di saldatura.

**Diverse tecniche NDT sono comunemente utilizzate nella valutazione della qualità della saldatura, tra cui:**

**Test ad ultrasuoni (UT):** UT utilizza onde sonore ad alta frequenza per rilevare e valutare difetti interni e superficiali nei giunti saldati. Le onde ultrasoniche vengono trasmesse nella saldatura e le onde riflesse vengono analizzate per identificare indicazioni quali mancanza di fusione, porosità, crepe e altre discontinuità. La dimensione, la posizione e la natura di queste indicazioni vengono valutate per determinarne l'impatto sulla qualità della saldatura.



Fig. 1.3.25: Controllo ad ultrasuoni della saldatura [1.3.34]

**Esami radiografici (RT):** La RT prevede l'uso di raggi X o raggi gamma per creare un'immagine della saldatura e rilevare difetti interni. Le immagini radiografiche forniscono una visione dettagliata delle discontinuità della saldatura, comprese crepe, mancanza di fusione, porosità e inclusioni. Le dimensioni, la forma e la densità di queste indicazioni vengono esaminate per valutarne la gravità e l'impatto sulla qualità della saldatura.

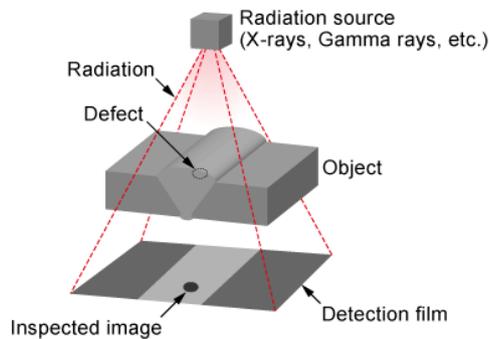


Fig. 1.3.26: Esame radiografico [1.3.35]

**Test con particelle magnetiche (MT):** la MT viene utilizzata principalmente per rilevare difetti superficiali nei materiali ferromagnetici. Implica la magnetizzazione dell'area di saldatura e l'applicazione di particelle magnetiche, che si raccolgono in aree con perdite di flusso magnetico causate da discontinuità superficiali come crepe e mancanza di fusione. Le indicazioni vengono esaminate visivamente per determinarne la gravità e l'influenza sulla qualità della saldatura.



Fig. 1.3.27: Test magnetico [1.3.36]

**Test con liquidi penetranti (PT):** la PT viene utilizzata per rilevare difetti superficiali in materiali non porosi. Un liquido penetrante viene applicato sulla superficie della saldatura e, dopo un tempo di permanenza specificato, il penetrante in eccesso viene rimosso e viene applicato uno sviluppatore. Il

penetrante che penetra nei difetti superficiali diventa visibile in condizioni di illuminazione adeguate, consentendo l'identificazione e la valutazione di difetti come crepe e porosità.



Fig. 1.3.28: Test con liquidi penetranti [1.3.37]

**Ispezione visiva (VT):** sebbene considerata un metodo di ispezione separato, l'ispezione visiva è una componente essenziale della valutazione della qualità della saldatura. Implica un esame visivo approfondito del giunto saldato per identificare difetti superficiali, come crepe, sottosquadri, spruzzi e fusione incompleta. L'ispezione visiva integra altre tecniche NDT e fornisce una valutazione qualitativa della qualità della saldatura.



Fig. 1.3.29: Ispezione visiva [1.3.38]

Durante gli NDT per la valutazione della qualità della saldatura, indicazioni e difetti vengono valutati in base a criteri di accettazione predefiniti forniti da standard pertinenti, come EN ISO 17636 e EN ISO 9712. Questi standard definiscono le dimensioni, le lunghezze, le posizioni e i tipi di indicazioni accettabili nelle saldature. I risultati dell'NDT vengono registrati e documentati, consentendo ulteriori analisi e decisioni in merito all'accettazione o al rifiuto della saldatura. Le tecniche NDT forniscono preziose informazioni sulle condizioni interne e superficiali dei giunti saldati, consentendo il rilevamento, la valutazione e la caratterizzazione dei difetti di saldatura. Utilizzando queste tecniche, la valutazione della qualità della saldatura può identificare i difetti critici, valutarne la gravità e determinare le azioni appropriate necessarie per mantenere l'integrità e l'affidabilità delle saldature. È importante notare che le tecniche NDT devono essere eseguite da personale qualificato che ha ricevuto un'adeguata formazione e certificazione in conformità con gli standard pertinenti, come EN ISO 9712. Ciò garantisce l'accuratezza e l'affidabilità della valutazione e migliora il controllo di qualità complessivo dei prodotti saldati. componenti in vari settori.

### 1.2.5. Riparazione della saldatura ed esame post-saldatura

Le riparazioni di saldatura sono spesso necessarie per correggere difetti o migliorare l'integrità di un giunto. Questo sottocapitolo si concentrerà sul ruolo dell'esame macroscopico nella valutazione dell'efficacia delle riparazioni delle saldature. Discuteremo le tecniche e le procedure utilizzate per valutare il giunto riparato, assicurando che soddisfi gli standard e le specifiche richieste. Inoltre,



esploreremo l'importanza dell'esame post-saldatura per verificare l'integrità e l'affidabilità del giunto riparato.

L'esame macroscopico è una tecnica fondamentale nella tecnologia di saldatura che consente la valutazione completa dei giunti saldati. Esaminando le caratteristiche macroscopiche, identificando i difetti, valutando la qualità della saldatura e garantendo l'efficacia delle riparazioni, possiamo migliorare le prestazioni, la sicurezza e l'affidabilità delle strutture e dei componenti saldati. Allora tuffiamoci nell'affascinante mondo dell'esame macroscopico e della sua applicazione nella tecnologia di saldatura!

Le specifiche dell'esame macroscopico per la tecnologia di saldatura possono variare a seconda del settore e dell'applicazione. Tuttavia, alcune specifiche comuni includono:

**1. Ingrandimento:** Il livello di ingrandimento utilizzato durante l'esame macroscopico deve essere adeguato alla dimensione del difetto esaminato. In genere, per l'esame generale delle saldature viene utilizzato un ingrandimento da 5x a 10x, mentre per un esame più dettagliato è possibile utilizzare un ingrandimento fino a 50x. Inoltre, è importante notare che l'ingrandimento non deve essere così elevato da rendere il campo visivo troppo piccolo, rendendo difficile l'identificazione della posizione o dell'entità del difetto. L'uso di ingrandimenti maggiori può anche aumentare la probabilità di falsi positivi, laddove le irregolarità superficiali che non sono difetti vengono identificate come tali. Pertanto, il livello di ingrandimento appropriato deve essere determinato in base alla dimensione e al tipo di difetti da esaminare, nonché alla finitura superficiale e alla struttura del materiale da ispezionare. Ciò può aiutare a garantire che i difetti vengano identificati accuratamente e che il processo di ispezione sia efficiente ed efficace

**2. Illuminazione:** Durante l'esame macroscopico dovrebbe essere utilizzata un'illuminazione adeguata per garantire che tutti i difetti superficiali siano visibili. L'illuminazione deve essere diretta verso la superficie da esaminare con un angolo che offra una visibilità ottimale. L'illuminazione utilizzata durante l'esame macroscopico dovrebbe essere sufficientemente intensa da illuminare tutti i difetti superficiali e ridurre al minimo le ombre o i riflessi che potrebbero oscurare la vista. Anche la direzione dell'illuminazione dovrebbe essere considerata attentamente per garantire che la superficie da esaminare sia illuminata con un angolo che offra una visibilità ottimale. Ciò può comportare l'uso di più fonti di luce o la regolazione dell'angolo di illuminazione per ridurre al minimo i riflessi e le ombre.

Inoltre, dovrebbe essere considerata anche la temperatura del colore dell'illuminazione. Diversi tipi di illuminazione, come quella fluorescente o LED, possono produrre temperature di colore diverse, che possono influenzare l'aspetto dei difetti superficiali. La temperatura di colore appropriata deve essere selezionata in base al materiale da ispezionare e al tipo di difetti da esaminare.

Nel complesso, un'illuminazione adeguata è essenziale per l'esame macroscopico per garantire che tutti i difetti superficiali siano visibili e identificati con precisione. L'illuminazione deve essere attentamente selezionata e posizionata per fornire una visibilità ottimale e ridurre al minimo eventuali riflessi o ombre che potrebbero oscurare la vista

**3. Preparazione della superficie:** La superficie da esaminare deve essere pulita e preparata secondo gli standard del settore. Eventuali contaminanti superficiali, come olio, grasso o ruggine, devono essere rimossi per garantire che tutti i difetti superficiali siano visibili. Campionamento di campioni

Per i giunti saldati è necessario eseguire esami su tutte le zone caratteristiche (BM, HAZ, WELD), per questo motivo i campioni metallografici comprendono l'intera sezione trasversale del giunto.

A seconda delle esigenze della ricerca, i campioni vengono prelevati in modo diverso. Soprattutto per la failure analysis, il campionamento viene effettuato tenendo conto della storia del componente e dei precedenti esami non distruttivi; in molti casi vengono esaminati campioni di riferimento per confronto provenienti da aree non interessate dai danneggiamenti.



Durante il controllo delle tecnologie di saldatura, dei materiali di base e dell'assimilazione dei materiali di saldatura, i campioni vengono prelevati in modo che siano rappresentativi dell'intero lotto esaminato. La mancata garanzia di questa condizione porta a interpretazioni errate con gravi conseguenze.

Il campionamento e la preparazione dei campioni metallografici vengono effettuati secondo STAS 4203.

L'ottenimento della superficie piana si ottiene mediante limatura, fresatura o lucidatura. La macinazione viene effettuata con l'ausilio di carte metallografiche che evidenziano una finezza crescente delle particelle abrasive formate dal carburo di silicio. A seconda della grana delle carte metallografiche utilizzate la macinazione può essere:

- grossolana quando si utilizzano carte metallografiche a grana grossa (80, 100, 180, 240, 320);
- fine quando si utilizzano carte metallografiche a grana fine (400, 500, 600, 800);
- molto fine quando si utilizzano carte metallografiche molto fini (1000, 1200, 1500, 2000, 2500).

La macinazione può essere eseguita manualmente o meccanicamente. Nella levigatura manuale (consigliata per campioni saldati di grandi dimensioni) la carta viene posizionata su una lastra di vetro montata su un supporto di legno. Il campione metallografico che viene leggermente pressato si muove sempre in una direzione, eseguendo un movimento avanti e indietro. Ad ogni cambio carta è necessario ruotare il campione di 90° in modo che le nuove grinze formino un angolo retto con le precedenti. La carteggiatura inizia con carta a grana grossa (300...400) e termina con carta a grana fine (800...900) ed extrafine (1000).

Nel caso della rettifica meccanica si utilizzano rettificatrici orizzontali o verticali dove la carta metallografica viene fissata su dischi rotanti. Durante l'operazione di macinazione è necessario osservare le seguenti regole:

- non passare ad altra carta metallografica se non dopo aver accertato che tutti i graffi della precedente levigatura siano scomparsi;
- la carta metallografica viene ripulita da polveri metalliche o abrasive ogni volta che viene utilizzata (se si esegue la carteggiatura a secco);
- durante la macinazione il pezzo non deve surriscaldarsi;
- le stesse carte non verranno utilizzate per le leghe ferrose e non ferrose;
- al termine dell'operazione di macinazione, il campione viene lavato per rimuovere tutte le inclusioni aderite durante la macinazione.

La lucidatura dei campioni saldati viene eseguita meccanicamente con la lucidatrice dotata di disco rotante su cui è fissato un feltro di lana merino. Durante la lucidatura sul feltro si deposita una sospensione di ossido di Al, ossido di Mg e polvere di diamante di diversa granulazione. Dopo la lucidatura, la superficie del campione deve avere un aspetto a specchio (senza rughe). Il campione lucidato viene lavato con acqua, sgrassato con alcool e quindi asciugato tamponando con cotone idrofilo o carta da filtro, si consiglia l'asciugatura con getto di aria calda.

Lo scopo dell'attacco metallografico è quello di evidenziare la struttura cristallina. La superficie lucida viene attaccata con opportuni reagenti che sciolgono o colorano selettivamente i costituenti presenti, rendendoli distinguibili gli uni dagli altri. L'attacco si effettua o per immersione oppure tamponando la superficie del campione con un pezzo di cotone imbevuto di reagenti. Se il campione non è sufficientemente attaccato si ripete l'operazione.

In pratica il campione si considera attaccato quando la superficie preparata ha perso la lucentezza metallica e le varie zone caratteristiche (zona fusa, zona termicamente alterata, materiale base) sono distinguibili. Un attacco troppo intenso distorce la struttura (struttura bruciata).

Dopo l'attacco metallografico, il campione viene lavato con acqua, poi con alcool ed essiccato mediante pressatura su carta da filtro o sotto un flusso di aria calda. La scelta del reagente per l'attacco metallografico viene effettuata secondo la norma SR CEN ISO/TR 16060.

**4. Criteri di accettabilità:** i criteri di accettabilità per i difetti superficiali dovrebbero essere definiti in base agli standard di settore e ai requisiti dell'applicazione. I criteri dovrebbero specificare



il tipo, la dimensione e la posizione dei difetti accettabili e di quelli non accettabili. I criteri di accettazione per i difetti superficiali dovrebbero essere stabiliti in base agli standard di settore e ai requisiti dell'applicazione. Ciò implica specificare il tipo, la dimensione e la posizione dei difetti accettabili e di quelli che non lo sono. I criteri di accettazione possono variare a seconda del materiale da ispezionare, della destinazione d'uso del prodotto e dell'importanza del giunto saldato nella struttura complessiva.

Ad esempio, nel settore aerospaziale, i criteri di accettabilità dei difetti superficiali nei giunti saldati possono essere molto più severi rispetto ad altri settori a causa del ruolo fondamentale che i componenti aerospaziali svolgono nel garantire la sicurezza. In questo caso i criteri di accettazione possono specificare che eventuali difetti superficiali, indipendentemente dalle dimensioni o dalla localizzazione, non sono accettabili.

Allo stesso modo, nell'industria automobilistica, i criteri di accettabilità per i difetti superficiali possono essere meno rigidi, ma richiedono comunque che i difetti rientrino entro determinati limiti di dimensione e posizione per garantire che il giunto saldato soddisfi gli standard di resistenza e durata richiesti.

Stabilire criteri di accettazione chiari è importante per garantire che i prodotti saldati soddisfino gli standard di qualità richiesti e siano sicuri per l'uso previsto. Ciò può aiutare a prevenire difetti e guasti, ridurre il rischio di incidenti e garantire che i prodotti soddisfino le aspettative dei clienti. I livelli di accettazione per le imperfezioni nei giunti saldati vengono eseguiti secondo la norma EN ISO 5817. La classificazione delle imperfezioni geometriche nei giunti saldati di materiali metallici viene effettuata secondo la norma EN ISO 6520-1.

**5. Reportistica:** dovrà essere fornita una relazione dettagliata che includa i risultati dell'esame macroscopico, compresi gli eventuali difetti riscontrati e la loro localizzazione. Il rapporto dovrebbe includere anche raccomandazioni per azioni correttive, se necessario. Dopo aver eseguito l'esame macroscopico, è necessario generare un rapporto dettagliato che includa i risultati dell'esame, eventuali difetti riscontrati e la loro posizione sul giunto saldato. Il rapporto dovrebbe includere anche raccomandazioni per azioni correttive, se necessarie, basate sui criteri di accettazione e sugli standard di settore.

Il rapporto deve essere chiaro e conciso e fornire una sintesi dei risultati dell'ispezione, compresi eventuali difetti riscontrati, la loro dimensione e posizione. Dovrebbe includere anche fotografie o diagrammi che illustrino la posizione e l'entità di eventuali difetti.

Se vengono identificati difetti che non soddisfano i criteri di accettazione, il rapporto dovrebbe includere raccomandazioni per azioni correttive, come la riparazione o la sostituzione del giunto saldato. Il rapporto dovrebbe inoltre fornire una tempistica chiara per le azioni correttive e le eventuali ispezioni di follow-up necessarie.

Nel complesso, un rapporto dettagliato è essenziale per documentare i risultati dell'ispezione e garantire che eventuali difetti siano identificati e affrontati in modo tempestivo ed efficace. Ciò può contribuire a migliorare la qualità e la sicurezza dei prodotti saldati e garantire che soddisfino gli standard di settore richiesti e le aspettative dei clienti.

## **METODI E TECNICHE PER LA RIPARAZIONE DELLA SALDATURA**

Quando si stabilisce che una saldatura necessita di riparazione a causa di difetti o discontinuità, è possibile impiegare vari metodi e tecniche per ripristinarne l'integrità e la funzionalità. La scelta del metodo di riparazione dipende da fattori quali il tipo e la gravità dei difetti, il materiale da saldare e i requisiti specifici dell'applicazione. Ecco alcuni metodi e tecniche comuni utilizzati per la riparazione delle saldature:

## **ESAME POST-SALDATURA PER LA VERIFICA DELLA QUALITÀ**



L'esame post-saldatura è una fase critica nel processo di saldatura che prevede la verifica della qualità e dell'integrità del giunto saldato dopo il completamento delle operazioni di saldatura. Questo esame mira a garantire che la saldatura soddisfi gli standard, le specifiche e i criteri di prestazione richiesti. Aiuta a identificare eventuali difetti, discontinuità o imperfezioni che potrebbero essersi verificati durante la saldatura e valuta la qualità complessiva della saldatura.

### **Aspetti chiave dell'esame post-saldatura per la verifica della qualità:**

**Ispezione visivo:** L'ispezione visiva è il metodo più basilare e comunemente utilizzato per l'esame post-saldatura. Si tratta di un esame visivo approfondito del giunto saldato per identificare eventuali difetti o imperfezioni visibili. L'ispettore valuta la saldatura per problemi come fusione incompleta, mancanza di penetrazione, sottosquadri, porosità, crepe, schizzi o qualsiasi altra irregolarità. L'ispezione visiva verifica, inoltre, il profilo complessivo della saldatura, il rinforzo e l'aspetto, garantendo che siano conformi ai requisiti specificati.

**Controlli Non Distruttivi (NDT):** vengono impiegate tecniche di controllo non distruttivo per valutare l'integrità interna e superficiale della saldatura senza causare danni. Vari metodi NDT come test a ultrasuoni, test radiografici, test con particelle magnetiche, test con liquidi penetranti o test con correnti parassite possono essere utilizzati per rilevare difetti del sottosuolo, discontinuità o altri difetti nascosti. I controlli NDT aiutano a garantire che la saldatura sia esente da difetti interni, come porosità, crepe, mancanza di fusione o inclusioni, che potrebbero comprometterne la resistenza e le prestazioni.

**Prove meccaniche:** le prove meccaniche vengono eseguite per valutare le proprietà meccaniche e la resistenza del giunto saldato. Prove di trazione, prove di durezza, prove di impatto o prove di piegatura possono essere condotte su provini estratti dalla saldatura per valutarne la resistenza, la duttilità, la tenacità e altre caratteristiche meccaniche. I test meccanici forniscono dati quantitativi sulle prestazioni della saldatura, consentendo il confronto con requisiti e standard specificati.

**Controllo dimensionale:** il controllo dimensionale verifica l'accuratezza dimensionale e la conformità della saldatura ai requisiti specificati. Si tratta di misurare le dimensioni chiave della saldatura, come lunghezza, larghezza, altezza e spessore della gola, utilizzando strumenti di misurazione di precisione. L'ispezione dimensionale garantisce che la saldatura sia conforme alle dimensioni richieste, alle tolleranze di adattamento e ai parametri geometrici necessari per l'applicazione prevista.

**Documentazione e tenuta dei registri:** la documentazione e la tenuta dei registri adeguate sono essenziali nell'esame post-saldatura. È necessario conservare registrazioni dettagliate, inclusi rapporti di ispezione, risultati dei test, qualifiche dei saldatori, specifiche delle procedure di saldatura e qualsiasi altro documento pertinente. Questa documentazione fornisce prova di conformità, consente la tracciabilità e funge da riferimento per future ispezioni, audit o valutazioni della qualità.

**Conformità agli standard e alle specifiche:** l'esame post-saldatura deve essere condotto in conformità con gli standard, i codici e le specifiche applicabili. Questi documenti definiscono i criteri di accettazione, i requisiti di qualità e le procedure di ispezione che devono essere seguite. Il rispetto delle norme garantisce che la saldatura soddisfi gli standard di qualità necessari e fornisce garanzia delle sue prestazioni e affidabilità in servizio.

L'esame post-saldatura svolge un ruolo fondamentale nel verificare la qualità e l'integrità dei giunti saldati. Eseguendo un'ispezione visiva approfondita, impiegando tecniche di test non distruttive appropriate, eseguendo test meccanici e dimensionali e conservando una documentazione adeguata, la qualità della saldatura può essere verificata in modo efficace. Questo processo di esame garantisce

che la saldatura soddisfi gli standard richiesti, ne migliora l'integrità strutturale e contribuisce al successo complessivo e all'affidabilità del componente o della struttura saldata.

### 1.2.6. Metodi per prove meccaniche di materiali metallici

Le prove meccaniche si riferiscono a tutte le determinazioni riguardanti il comportamento dei materiali metallici in specifiche condizioni imposte meccanicamente, stabilite convenzionalmente. Le prove meccaniche variano in base al tipo di deformazione macroscopica generata (tensione, compressione, flessione, torsione, durezza, ecc.), alla modalità di applicazione del carico (statica, dinamica, variabile in entità e direzione), alla temperatura alla quale viene effettuata la prova. condotti (caldo, freddo, a temperatura ambiente), ecc. Gli approcci più comuni comportano prove di trazione statica, prove di durezza e prove di flessione all'impatto dinamico.

#### a) Prove di trazione statica

Questi test vengono condotti su provini sotto forma di barre, fili o nastri di dimensioni standardizzate. La forma più utilizzata e le dimensioni primarie del provino di trazione sono presentate nella Figura 1.3.30.

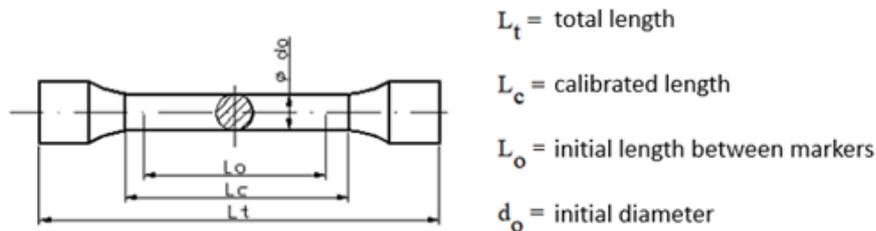


Fig. 1.3.30:Provino per prove statiche di trazione

La lunghezza iniziale  $L_0$  e il diametro iniziale  $d_0$  sono scelti in modo tale che il rapporto dimensionale, indicato come  $n = L_0/d_0$ , abbia un valore  $n = 5$  o  $n = 10$ . La lavorazione dei campioni è descritta nella STAS 7324 - 75, mentre la forma, le dimensioni e le condizioni per la preparazione del campione sono specificate nella STAS 200 - 87.

Le macchine utilizzate per le prove di trazione sono dotate di un registratore che traccia il rapporto tra la forza assiale  $F$  e l'allungamento del provino  $\Delta l$ . La Figura 1.3.31 illustra una curva sforzo-deformazione a trazione per un acciaio a basso tenore di carbonio.

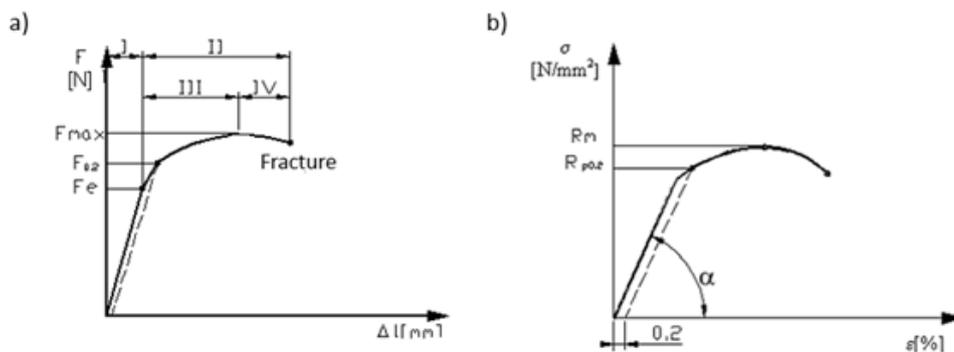


Fig. 1.3.31: a) Curva di trazione di un acciaio a basso tenore di carbonio; b) Curva di trazione convenzionale di un acciaio a basso tenore di carbonio.



Distinguiamo:

I - Il dominio della deformazione elastica.

II - Il dominio della deformazione plastica.

III - Deformazione uniforme.

IV - Deformazione non uniforme (strozzamento).

Nel dominio I avviene la deformazione elastica del materiale, secondo la legge di Hooke:  $\varepsilon = \sigma/E$ .

La curva di trazione convenzionale (Figura 1.3.32) rappresenta il rapporto tra la sollecitazione meccanica  $\sigma$ , definita come rapporto tra forza e area della sezione trasversale ( $\sigma = F/A$  [N/mm<sup>2</sup>]), e l'allungamento relativo  $\varepsilon$ , definito come rapporto tra l'allungamento del provino  $\Delta l$  e la sua lunghezza iniziale  $L_0$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Da questa curva si possono determinare le seguenti caratteristiche:

Resistenza alla trazione,  $R_m$ , definita come il rapporto tra il carico massimo e l'area della sezione trasversale iniziale del provino:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Carico di snervamento convenzionale,  $R_{p0,2}$ , ottenuto come rapporto tra il carico che produce una deformazione plastica dello 0,2% e l'area della sezione trasversale iniziale del provino:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Modulo elastico longitudinale,  $E$ , che rappresenta la pendenza della porzione lineare della curva di trazione convenzionale:  $\text{atg}E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ ;

Allungamento a rottura,  $A_n$ , definito come il rapporto tra l'allungamento del provino e la sua lunghezza iniziale:

$$A_n = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

dove  $L_f$  è la lunghezza del provino dopo la rottura e  $n$  è il fattore dimensionale.

Strizione a rottura,  $Z$ , espressa come differenza tra le aree della sezione trasversale iniziale e finale del provino rispetto all'area della sezione trasversale iniziale:

$$Z = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100[\%]$$

dove  $S_0$  è l'area della sezione trasversale iniziale del provino e  $S_f$  è l'area della sezione trasversale finale nella zona di rottura.

## b) Prove di durezza

La durezza è definita come la proprietà di un materiale di resistere alla deformazione plastica causata da carichi di contatto statici o dinamici localizzati sulla sua superficie. È una delle proprietà meccaniche più utilizzate per caratterizzare i materiali metallici e dipende dalla composizione chimica e dallo stato strutturale del materiale.

Esistono diversi metodi per determinare la durezza in base alla dimensione dell'impronta prodotta da un penetratore premuto con una forza specifica sulla superficie del materiale. La scelta del metodo di prova di durezza più idoneo considera:

La natura del materiale da testare.

La precisione del test.

Le dimensioni del campione.

Il rapporto costo-efficacia della determinazione.

Il metodo Brinell prevede di incidere la superficie del materiale con una sfera d'acciaio di diametro  $D$ , perpendicolare alla superficie, come mostrato nello schema di Figura 1.3.32.

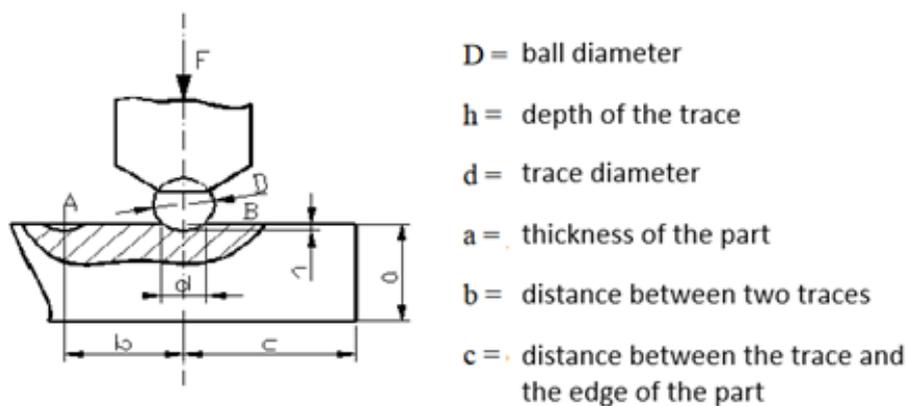


Fig. 1.3.32: Determinazione della durezza Brinell

La durezza è espressa come rapporto tra la forza applicata  $F$  e l'area  $S$  della calotta sferica dell'impronta lasciata dal penetratore sulla superficie in prova:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

La durata del carico, la distanza minima tra due tracce (b), e la distanza tra la traccia e il bordo del campione (c) dipendono dalla durezza del materiale.

Lo spessore minimo dei campioni sottoposti alla prova (a) dovrebbe essere 8 volte la profondità dell'impronta per evitare l'influenza del supporto dell'apparecchiatura sulla durezza.

In pratica, il valore di durezza si ricava da tabelle basate sul diametro della traccia, per una specifica forza di carico e diametro della sfera.

Questo metodo viene utilizzato per le leghe tenere (metalli non ferrosi e acciai ricotti).

La durezza è indicata dal valore misurato seguito dal simbolo HB e da un gruppo di tre numeri che indicano il diametro della sfera in mm, la forza di carico in N e la durata in secondi.

Esempio: 270HB5/700/5

Il metodo Rockwell permette la valutazione della durezza attraverso la profondità dell'impronta residua del penetratore. Il penetratore può essere un cono diamantato con angolo al vertice di 120° oppure una sfera di acciaio temprato.

Questo metodo si applica sia ai materiali duri e molto duri (acciaio temprato, ghisa bianca) che ai materiali teneri. La prova con un cono diamantato (HRC) o una sfera (HRB) viene eseguita secondo lo schema riportato nella Figura 1.3.33, il penetratore viene inizialmente premuto sulla superficie di misurazione con una forza iniziale  $F_0$ . Il dispositivo di misurazione della profondità viene impostato su zero e quindi viene applicata la forza  $F_1$ . Dopo un intervallo di 15, 30 o 60 secondi, la forza eccessiva  $F_1$  viene rimossa e la durezza HRC viene determinata sottraendo la profondità di penetrazione effettiva e dalla dimensione dell'unità Rockwell della costante convenzionale E.

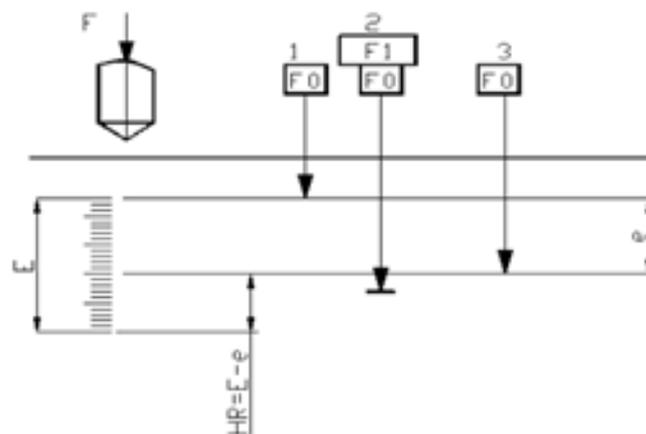


Fig. 1.3.33: Determinazione della durezza Rockwell

La notazione della durezza utilizzando questo metodo viene eseguita utilizzando il simbolo HRC (o HRB) seguito dal valore di durezza.

Esempio: 45 HRC

Il metodo Vickers (Figura 1.3.34) è simile in linea di principio al metodo Brinell, prevedendo l'applicazione di un penetratore a forma di piramide retta con base quadrata e angolo al vertice di 136° sulla superficie di prova. La durezza Vickers è indicata come HV ed è determinata come il rapporto tra la forza applicata F e l'area laterale dell'impronta lasciata dal penetratore. In pratica l'area viene determinata in base al valore medio della diagonale della traccia, secondo la formula:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Questo metodo è applicabile sia ai materiali morbidi che a quelli duri. Può anche essere utilizzato per misurare la microdurezza accoppiando un apparecchio di prova con un microscopio metallografico ottico. In questo modo è possibile determinare la durezza dei componenti strutturali e delle strutture molto fini. In questo caso la durezza HV viene determinata utilizzando la formula:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{(d + 1,5)^2}$$

Dove d è la diagonale della traccia e 0,25 è un fattore di correzione.

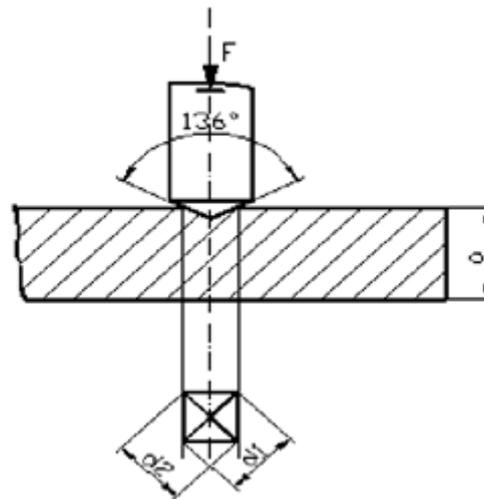


Fig. 1.3.34: Determinazione della durezza Vickers

### c) Prova di flessione all'impatto dinamico (prova di resilienza)

Costituisce un metodo per valutare la tenacità dei materiali.

La tenacità rappresenta la resistenza del materiale alla propagazione improvvisa delle cricche.

L'apparecchio più utilizzato è il martello a pendolo Charpy, dotato di un peso G che oscilla attorno al centro O (Figura 1.3.35).

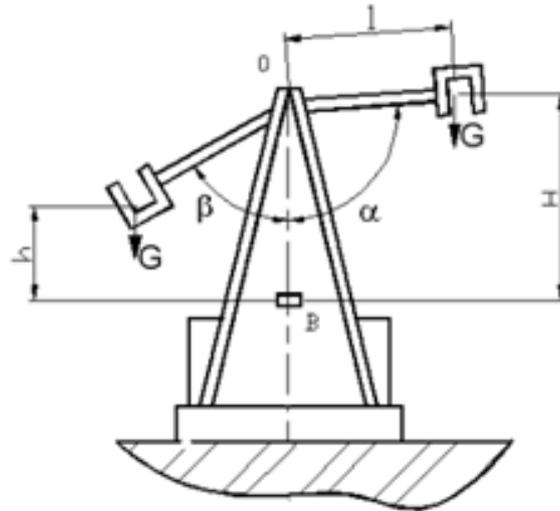


Fig. 1.3.35: Martello a pendolo Charpy.

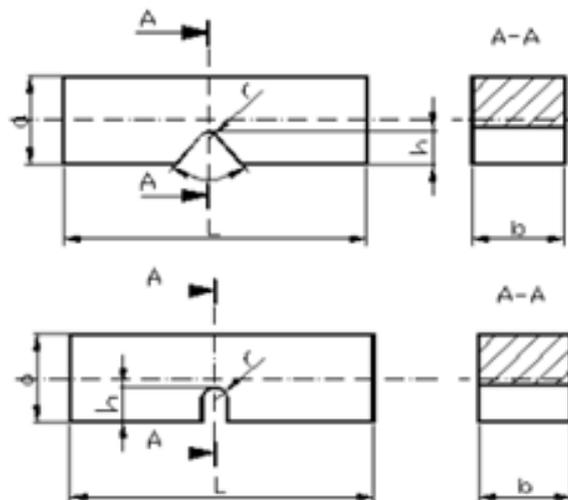


Fig. 1.3.36: Provini per la prova di flessione da impatto

I provini utilizzati sono tipicamente prismatici, con dimensioni di 10 x 10 x 55 mm e un intaglio a "U" o a "V" (Figura 1.3.36).

Per rompere il provino posto su due supporti del telaio, il martello cade dall'altezza inizialmente impostata H, e dopo la rottura del provino, viene sollevato fino all'altezza h.

L'energia consumata per rompere il provino è data dall'equazione:

$$W = W_0 - W_f = G \cdot (H - h)$$

Dove:

$W_0$  = energia potenziale del martello nella posizione iniziale.

$W_f$  = energia potenziale nella posizione finale.



In pratica l'apparecchio permette di determinare l'angolo  $\alpha$  che l'asta del martello di lunghezza  $l$  forma con la verticale quando si trova nella posizione iniziale, e l'angolo  $\beta$  che l'asta del martello forma con la verticale dopo che il provino si è rotto. Esprimendo le altezze  $H$  e  $h$  in termini di angoli  $\alpha$  e  $\beta$  e lunghezza  $l$ , l'energia consumata nel processo di rottura del provino può essere scritta come:

$$W = G \cdot l (\cos \beta - \cos \alpha) \text{ [J]}$$

Nel caso di provini con intaglio a "U", la resilienza è definita come il rapporto tra l'energia consumata per rompere il provino e l'area della sezione trasversale in corrispondenza dell'intaglio. È simboleggiato come KCU ed è espresso in  $\text{J}/\text{cm}^2$ . Pertanto la notazione KCU 150/2/5 =  $100 \text{ J}/\text{cm}^2$  indica un valore di resilienza di  $100 \text{ J}/\text{cm}^2$ , determinato con un martello a pendolo avente energia potenziale  $W_0 = 150 \text{ J}$ , su provini con intaglio a "U" di profondità  $h = 2 \text{ mm}$  e larghezza di  $b = 5 \text{ mm}$ .

Nella prova con provini con intaglio a "V" la resilienza rappresenta l'energia consumata per la rottura. In questo caso il simbolo è KV, ed è espresso in J. La notazione KV 300/5 =  $70 \text{ J}$  rappresenta il valore dell'energia di rottura ( $70 \text{ J}$ ) determinato con un martello avente energia potenziale  $W_0 = 300 \text{ J}$  su un " Campione con intaglio a V con una larghezza di  $b = 5 \text{ mm}$ .

I test di resilienza sono più rappresentativi se condotti a temperature diverse per determinare la temperatura di transizione dalla frattura duttile a quella fragile, poiché i materiali si comportano diversamente a varie temperature di esercizio.

Si può osservare che l'energia assorbita durante la frattura diminuisce al diminuire della temperatura (Figura 1.3.37).

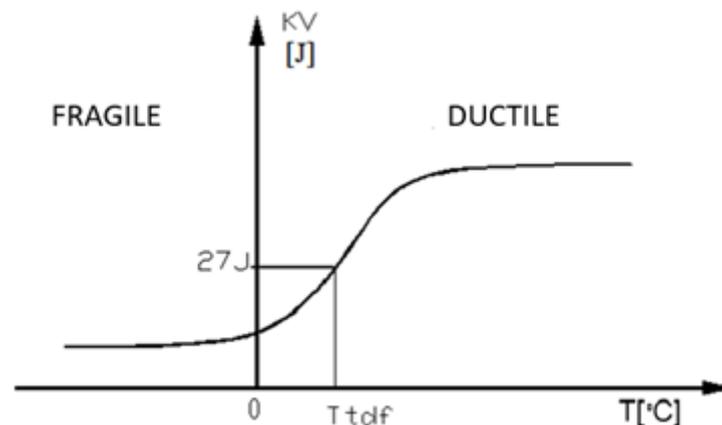


Fig. 1.3.37: Variazione della resilienza con la temperatura

In generale, si stima che la temperatura alla quale avviene la transizione duttile-fragile (TDBT) sia la temperatura alla quale il valore dell'energia di rottura è  $KV = 27 \text{ J}$ . Sui campioni di resilienza, la duttilità del materiale può essere valutata dalla proporzione tra la superficie cristallina e la superficie di frattura totale.

## RIFERIMENTI

[1.3.1] EN ISO 5817:2014 - Saldatura - Giunti saldati per fusione in acciaio, nichel, titanio e loro leghe (livelli di qualità per imperfezioni)



- [1.3.2] EN ISO 17637:2011 - Prove non distruttive delle saldature - Prove visive di giunti saldati per fusione
- [1.3.3] EN 970:1997 - Esame non distruttivo dei giunti saldati per fusione
- [1.3.4] EN 1290:1997 - Prove distruttive sulle saldature nei materiali metallici - Esame macroscopico delle saldature
- [1.3.5] GAMMON, Luther M., et al. Metallografia e microstrutture del titanio e sue leghe. Manuale ASM, 2004, 9: 899-917.
- [1.3.6] ZIPPERIAN, Donald C. Manuale metallografico. Direttore tecnico PACE Technologies: Tucson, AR, USA, 2011.
- [1.3.7] Hadzihafizovic, Dzevad. Imperfezioni di saldatura e procedure e tecniche di ispezione dei materiali, 2023.
- [1.3.8] PINTO-LOPERA, Jesús Emilio; ST MOTTA, José Mauricio; ABSI ALFARO, Sadek Crisostomo. Misurazione in tempo reale della larghezza e dell'altezza dei cordoni di saldatura nei processi GMAW. Sensori, 2016, 16.9: 1500.
- [1.3.9] EN ISO 17636-2:2013 - Prove non distruttive delle saldature - Prove radiografiche - Parte 2
- [1.3.10] EN ISO 17636-3:2013 - Prove non distruttive delle saldature - Prove radiografiche - Parte 3
- [1.3.11] EN ISO 16810:2004 - Prove non distruttive - Prove ad ultrasuoni - Tecnica di diffrazione del tempo di volo come metodo per il rilevamento e il dimensionamento delle discontinuità
- [1.3.12] EN ISO 23278: Prove non distruttive delle saldature - Prove magnetoscopiche
- [1.3.13] EN ISO 3452: Prove non distruttive - Prove penetranti
- [1.3.14] EN ISO 10042: Saldatura - Giunti saldati ad arco in alluminio e sue leghe - Livelli di qualità per le imperfezioni
- [1.3.15] EN ISO 15614-1: Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici - Prova della procedura di saldatura - Parte 1
- [1.3.16] EN ISO 14731: Coordinamento della saldatura - Compiti e responsabilità
- [1.3.17] EN ISO 3834: Requisiti di qualità per la saldatura per fusione di materiali metallici
- [1.3.18] EN ISO 17637: Prove non distruttive delle saldature - Prove visive dei giunti saldati per fusione
- [1.3.19] EN ISO 5817: Saldatura - Giunti saldati per fusione in acciaio, nichel, titanio e loro leghe (livelli di qualità per le imperfezioni)
- [1.3.20] EN ISO 13920: Saldatura - Tolleranze generali per costruzioni saldate - Dimensioni per lunghezze e angoli - Forma e posizione
- [1.3.21] EN 1290: Saldatura - Determinazione del numero di ferrite (FN) nei metalli di saldatura di acciaio inossidabile austenitico e duplex ferritico-austenitico Cr-Ni
- [1.3.22] EN ISO 17635: Prove non distruttive delle saldature - Regole generali per i materiali metallici
- [1.3.23] EN ISO 10275: Saldatura - Preparazione dei giunti - Parte 3: Saldatura a gas inerte di metalli e saldatura a gas inerte di tungsteno di rame e sue leghe



[1.3.24] EN ISO 10042: Saldatura - Giunti saldati ad arco in alluminio e sue leghe - Livelli di qualità per le imperfezioni

[1.3.25] BODEA, Marius. Sudare și procedee conexe. UT Press, 2016.

[1.3.26] Informazioni su:<https://amarineblog.com/2019/09/05/groove-design-bevel-preparation/>

[1.3.27] Informazioni su:<https://www.boconline.co.uk/it/processi/saldatura/difetti-di-saldatura/porosità.html>

[1.3.28] Informazioni su:<https://www.boconline.co.uk/it/processi/saldatura/difetti-di-saldatura/mancaanza-di-fusione.html>

[1.3.29] Informazioni su:<https://www.slideserve.com/anne-lott/visual-guide-to-weld-defects-discontinuities>

[1.3.30] Informazioni su:<https://in.pinterest.com/pin/types-of-welding-defects-causes-and-remedies-in-2023--838795499369764806/>

[1.3.31] Informazioni su:<https://www.boconline.co.uk/it/processi/saldatura/difetti-di-saldatura/distorsioni.html>

[1.3.32] Saldatura ad arco pulsato applicata alla giunzione robotizzata di lamiere sottili di acciaio per carrozzerie di automobili - Figura scientifica su ResearchGate. Disponibile da:[https://www.researchgate.net/figure/Imperfections-found-during-visual-inspections-local-spatters-ab-uneven\\_fig4\\_271390435](https://www.researchgate.net/figure/Imperfections-found-during-visual-inspections-local-spatters-ab-uneven_fig4_271390435)

[1.3.33] Informazioni su:[https://www.linkedin.com/pulse/csa-w59-18-weld-quality-acceptance-criteria-karsten-madsen?utm\\_source=share&utm\\_medium=guest\\_desktop&utm\\_campaign=copy](https://www.linkedin.com/pulse/csa-w59-18-weld-quality-acceptance-criteria-karsten-madsen?utm_source=share&utm_medium=guest_desktop&utm_campaign=copy)

[1.3.34] Informazioni su:<https://www.triquestndt.com/conventional/ultrasonic-testing>

[1.3.35] Informazioni su:<https://www.matsusada.com/column/words-ndt.html>

[1.3.36] Informazioni su:<https://wdbgroup.co.uk/blog/what-is-magnetic-particle-inspection-all-you-need-to-know/>

[1.3.37] Informazioni su:<https://encorus.com/2020/07/17/liquid-penetrant-testing/>

[1.3.38] Informazioni su:<https://resources.arcmachines.com/how-to-do-a-pipe-welding-visual-inspection-ami/>



#### 1.4. Esame microscopico e sua applicazione nella tecnologia di saldatura

Il microscopio ottico (luce) rimane lo strumento più importante per lo studio della microstruttura, nonostante l'evoluzione di sofisticati strumenti metallografici elettronici. Anche la microscopia elettronica a scansione (SEM) e la microscopia elettronica a trasmissione (TEM) sono strumenti preziosi; tuttavia, tutti gli esami della microstruttura dovrebbero iniziare con l'uso di un microscopio ottico, iniziando con un basso ingrandimento, come 25 $\times$ , seguito da ingrandimenti progressivamente più elevati per valutare in modo efficiente le caratteristiche di base della microstruttura.

La maggior parte delle microstrutture possono essere osservate al microscopio ottico e identificate in base alle loro caratteristiche. L'identificazione di costituenti discutibili o sconosciuti può essere aiutata dall'osservazione della loro durezza rispetto alla matrice, dal loro colore naturale, dalla loro risposta alla luce polarizzata e dalla loro risposta agli agenti aggressivi selettivi. Queste osservazioni vengono confrontate con i dettagli noti sulla metallurgia fisica del materiale esaminato. Se permangono dubbi o se la struttura è troppo fine per essere osservata, è necessario implementare tecniche più sofisticate utilizzate in combinazione con la microscopia ottica, piuttosto che come sostituto.

Il microscopio elettronico a scansione è uno degli strumenti più versatili per lo studio della microstruttura dei materiali metallici. Rispetto al microscopio ottico (luce), espande la gamma di risoluzione di oltre un ordine di grandezza **circa 10 nm (100) negli strumenti di routine, con valori finali inferiori a 3 nm (30)**. L'ingrandimento utile si estende quindi oltre 10.000 $\times$  fino a 150.000 $\times$ , colmando il divario tra il microscopio ottico e quello elettronico a trasmissione. Rispetto alla microscopia ottica, la profondità di fuoco, che va da 1 m a 10.000 $\times$  a 2 mm (0,08 pollici) a 10 $\times$ , è maggiore di oltre due ordini di grandezza, a causa dell'apertura del raggio molto piccola.

La microscopia elettronica a scansione (SEM) offre possibilità di formazione di immagini che di solito sono facili da interpretare e rivelano immagini chiare di sezioni trasversali lucide e incise, nonché di superfici ruvide. L'analisi a raggi X a dispersione di energia utilizzando apparecchiature abitualmente collegate al microscopio elettronico a scansione presenta un'analisi semiquantitativa e, in casi favorevoli, quantitativa della composizione da un piccolo volume con una buona risoluzione laterale.

Il SEM ha trovato un'ampia gamma di applicazioni nella ricerca sui materiali, nello sviluppo dei materiali, nell'analisi dei guasti e nel controllo di qualità.

Utilizzando l'esame microscopico è possibile vedere e analizzare diversi aspetti di una saldatura. Aspetti quali imperfezioni o difetti (Fig. 1.4.1.), microstrutture (Fig. 1.4.2.) e il regime termico del processo di saldatura.

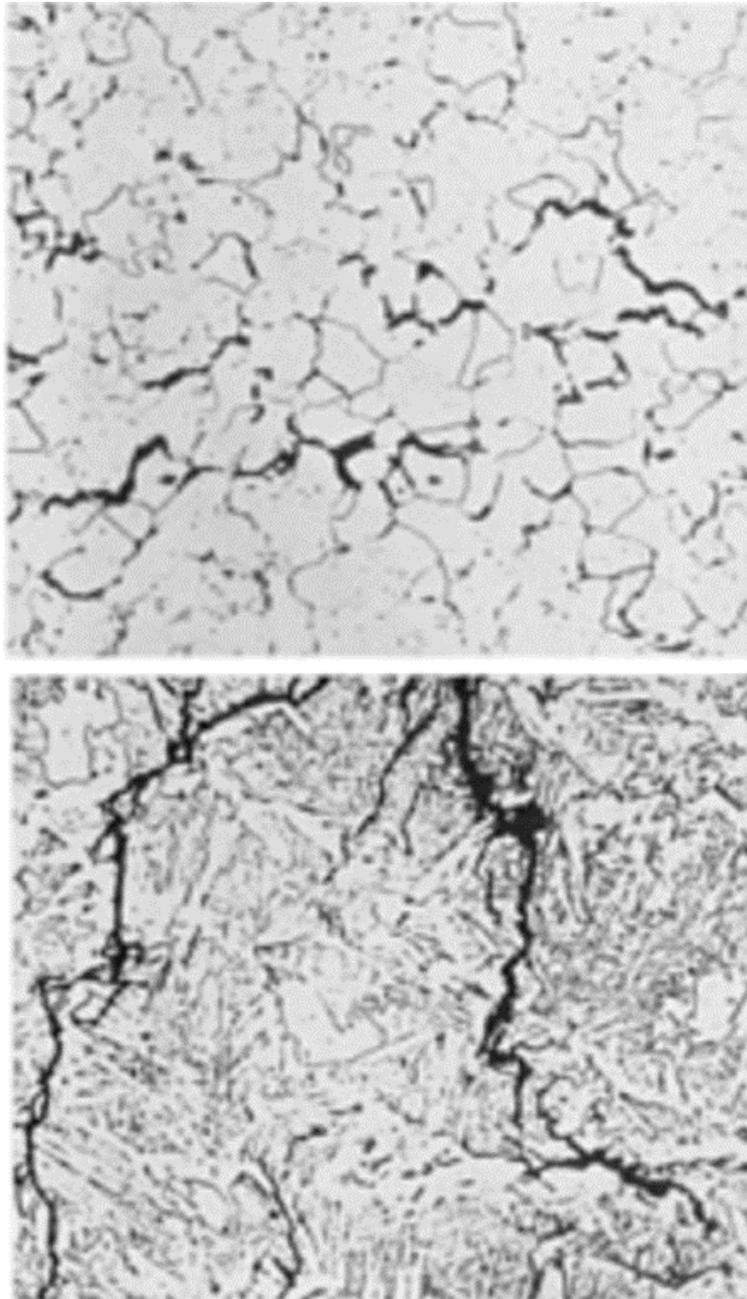


Figura 1.4.1. A. Crepe nel metallo saldato nella piastra di acciaio ASTM A285, grado C. Le crepe, risultanti dall'ingrassamento caustico, sono transgranulari e intergranulari.

Acquaforde: Nital. 275x. B. Fessure, nella piastra di acciaio ASTM A285 grado C che era stata in servizio un anno a 480°C in un recipiente di raffineria, causato dalla penetrazione



di idrogeno. Ferrite con solo poche particelle di carburo: risultato della decarburazione dell'idrogeno in servizio. Nital. 275x

(Fonte:Manuale ASM Volume 9. Metallografia e microstrutture)

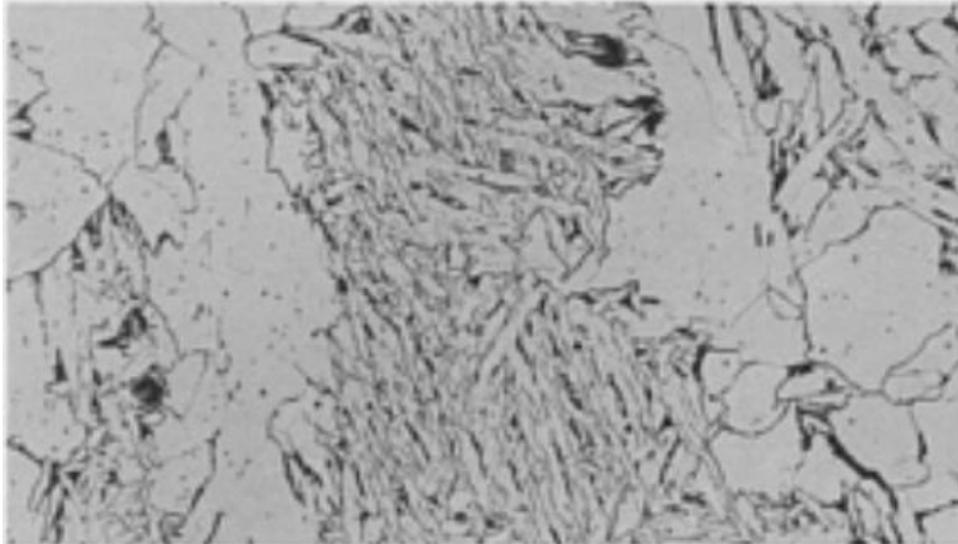


Figura 1.4.2. Piastra in acciaio A-36 da 16 mm, saldatura di testa a V singola con arco metallico schermato a passaggi multipli. Apporto termico: 1,3 kJ/mm. Filo di saldatura: AWS E7018. Microstruttura della zona di fusione contenente bainite e aggregato di ferrite-carburo nella ferrite limite a grana grossa. 2% nitale. 500x (Fonte:Manuale ASM Volume 9. Metallografia e microstrutture)

### 1.2.1. Fasi di equilibrio

La fase rappresenta una parte omogenea di un sistema che ha la stessa composizione chimica e lo stesso stato di aggregazione in tutto il suo volume, essendo separata dalle altre parti del sistema da interfacce di fase, come ad esempio i bordi di grano. La struttura della fase dipende dalla forma, dalla dimensione e dalla disposizione reciproca degli atomi.

I costituenti microstrutturali possono essere costituiti da due o più fasi che si separano contemporaneamente dal liquido alla temperatura di solidificazione più bassa del sistema (trasformazione eutettica) o che si manifestano come risultato di trasformazioni di fase allo stato solido (trasformazione eutettoide). Si identifica mediante microscopia ottica o elettronica e può contenere: metallo puro, soluzione solida, composto definito o miscela meccanica.

Durante i processi di riscaldamento o raffreddamento, o quando si cambia lo stato di aggregazione da liquido a solido, le leghe metalliche subiscono trasformazioni di fase nello stato solido. I principali tipi di trasformazioni sono: trasformazioni omogenee, che avvengono simultaneamente in tutto il volume del pezzo, senza processi di germinazione e crescita e trasformazioni eterogenee, che avvengono attraverso germinazione e crescita (con diffusione, senza diffusione).

Le principali fasi di equilibrio che si possono trovare negli acciai non legati o basso legati sono: ferrite, perlite e cementite.

**Ferrite alfa** è la forma stabile del ferro a temperatura ambiente. È morbido e ferromagnetico a temperature inferiori a 727°C e paramagnetico tra 727 e 912°C. La ferrite alfa è un componente importante dell'acciaio dolce ma è presente in tutti i composti di ferro e carbonio che sono stati raffreddati a temperatura ambiente, coesistendo con altre forme come la cementite.

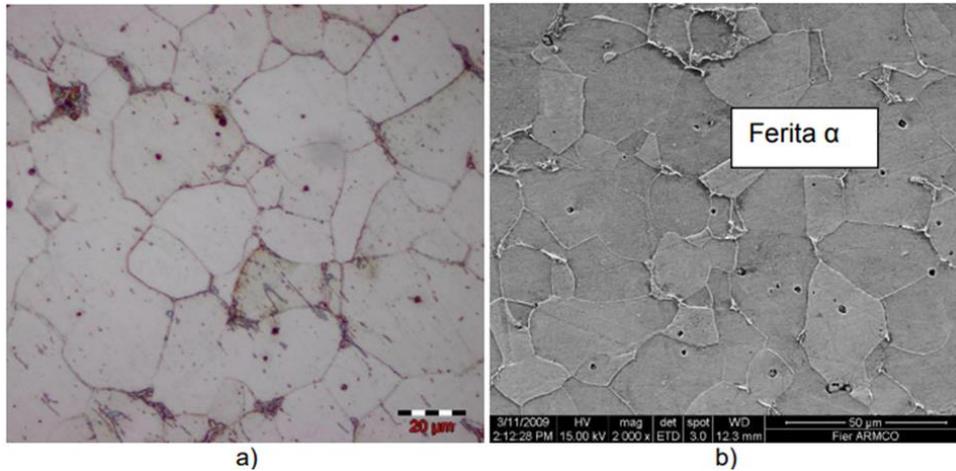


Figura 1.4.4. FERRITE ALFA: a) Microscopia ottica (200x); b) SEM(2000x).

**Austenite**, noto anche come ferro in fase gamma ( $\gamma$ -Fe), è un allotropo metallico e non magnetico del ferro o una soluzione solida di ferro con un elemento legante. Nell'acciaio al carbonio semplice, l'austenite esiste al di sopra della temperatura critica dell'eutettoide di 727 °C. Esiste a temperatura ambiente in alcuni acciai inossidabili a causa della presenza di nichel che stabilizza l'austenite a temperature più basse.

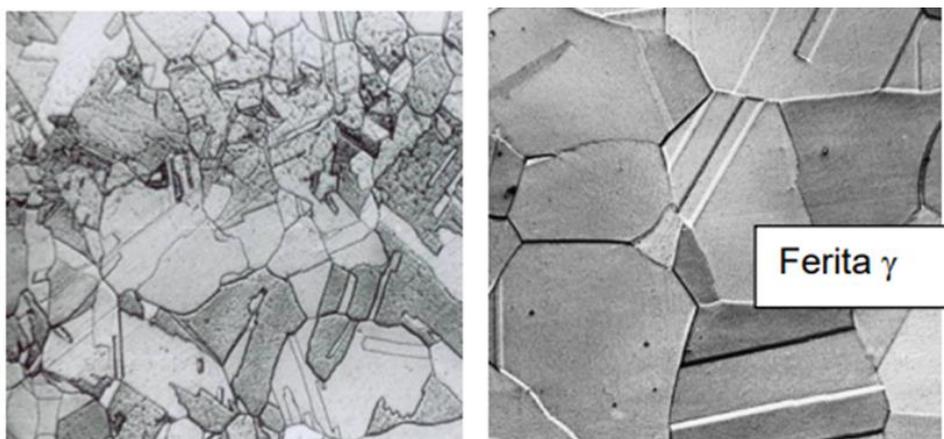


Figura 1.4.5. austenite

**Ferrite delta** è una fase stazionaria solo a temperature molto elevate, prossime al punto di fusione; diventa stabile se accoppiato con stabilizzanti di ferrite quali: Cr, Mo, Si, Nb. Quindi, delta



Figura 1.4.6. Perlite lamellare. Attacco metallografico: Nital 2%: a) Microscopia ottica (1000x); b) SEM (10000x)

**Cementite**(o carburo di ferro) è un composto di ferro e carbonio, più precisamente un carburo di metallo di transizione intermedio con formula  $Fe_3C$ . In peso, è composto per il 6,67% da carbonio e per il 93,3% da ferro. È una struttura dura e fragile, con una durezza Brinell solitamente di 700-750 HB. Negli acciai ipereutettoi si possono trovare grani circostanti di perlite mentre nella ghisa ha una struttura aghiforme o cristalli poliedrici.

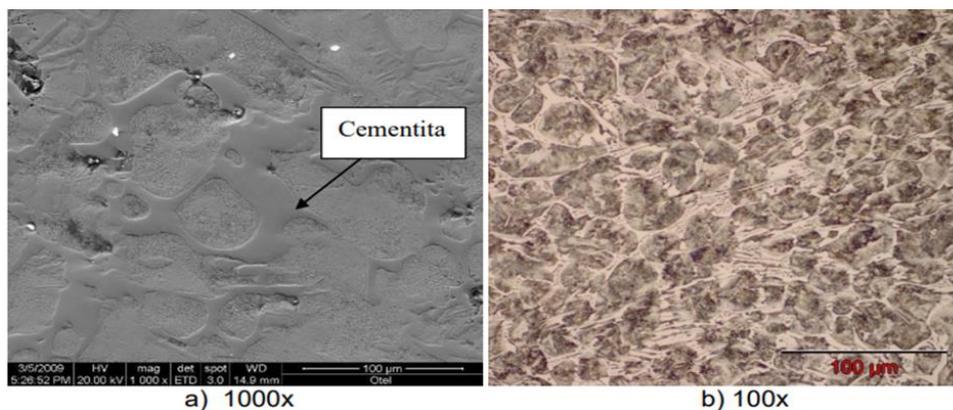


Figura 1.4.8. Acciaio ipereutettoide. a) Perlite e cementite (SEM); b) Microscopia ottica

### 1.2.2. Trattamenti termici

Il trattamento termico è il processo di riscaldamento e raffreddamento dei metalli, utilizzando metodi specifici predeterminati per ottenere le proprietà desiderate. In termini semplici, il trattamento termico è il processo di riscaldamento del metallo, di mantenimento a quella temperatura e quindi di raffreddamento. Durante il processo, la parte metallica subirà cambiamenti nelle sue proprietà meccaniche. Questo perché l'alta temperatura altera la microstruttura del metallo. E la microstruttura gioca un ruolo importante nelle proprietà meccaniche di un materiale.

Il risultato finale dipende da molti fattori diversi. Questi includono il tempo di riscaldamento, il tempo di mantenimento della parte metallica a una determinata temperatura, la velocità di raffreddamento, le condizioni circostanti, ecc. I parametri dipendono dal metodo di trattamento termico, dal tipo di metallo e dalle dimensioni della parte. Possono essere eseguite prove di durezza per verificare la buona riuscita del trattamento termico effettuato.

**Normalizzazione** è un trattamento termico il cui effetto principale è la ricristallizzazione della struttura al fine di affinare la dimensione dei grani, ma ha anche effetti positivi di deidrogenazione e distensione.

La normalizzazione può essere completa, se la temperatura di mantenimento viene scelta a valori leggermente superiori al valore del punto AC3:  $TH = AC3 + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\text{C}$ , che corrisponde ad un valore di circa  $950 \div 1050 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La scelta del valore di temperatura superiore deve essere scelta con molta attenzione per evitare surriscaldamenti. Il raffreddamento viene effettuato in aria ventilata o in olio,

la velocità di raffreddamento essendo superiore a quella di equilibrio secondo il diagramma Fe-C ma inferiore alla velocità di rinvenimento martensitico.

L'effetto affinante del grano è ottenuto dalla doppia trasformazione di fase in fase di riscaldamento (Pearlite→Austenite) e in fase di raffreddamento (Austenite→Ferrite + Perlite).

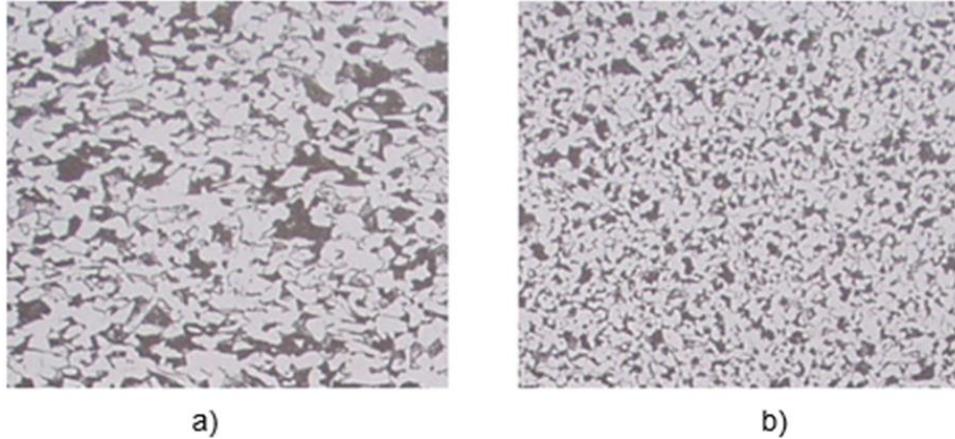


Figura 1.4.98. Affinazione del grano mediante normalizzazione di acciaio al carbonio tipo SA 515 Gr 70 spessore = 30mm: a) prima della normalizzazione; b) dopo la normalizzazione a 900°C/1 ora.

**Tempra** è un trattamento termico che mira ad ottenere una struttura martensitica, riscaldandolo ad elevata temperatura (superiore ad  $AC_3$ ) e successivamente raffreddandolo a velocità sufficientemente elevata da impedire totalmente o parzialmente la migrazione del carbonio e le trasformazioni microstrutturali che sarebbe avvenuta in condizioni di equilibrio. La struttura martensitica è caratterizzata da una struttura con durezza e caratteristiche elevate a scapito della plasticità e della tenacità.

Per ottenere un effetto ottimale riguardo al comportamento tecnologico in condizioni di lavoro, le parti temprate vengono sottoposte ad un successivo trattamento termico di rinvenimento (tempra + rinvenimento = bonifica).

**Rinvenimento** è un trattamento termico applicato dopo la tempra al fine di migliorare le caratteristiche che sono state indebolite a causa della tempra. Le parti vengono riscaldate fino a una temperatura inferiore a  $AC_1$  e quindi raffreddate ad aria.

Nelle Fig. 1.4.10a e 1.4.10b è possibile osservare l'acciaio C45 in condizioni commerciali. In queste condizioni, la microstruttura mostra ferrite e perlite come strutture principali. La Figura 1.4.10a è stata ottenuta con obiettivo ottico 200X e la Figura 1.4.10b è stata ottenuta con ingrandimento 100X. Le figure 1.4.10c e 1.4.10d sono state ottenute rispettivamente con ingrandimento 50X e 100X, condizione del materiale: raffreddato in acqua. Le figure mostrano una lunga struttura a forma di ago. Dopo il raffreddamento la struttura risultante è martensite. Le figure 1.4.10e e 1.4.10f sono state ottenute con ingrandimento 50X e 100X, condizione del materiale: bonificato (QT) e la struttura osservata era martensite rinvenuta.

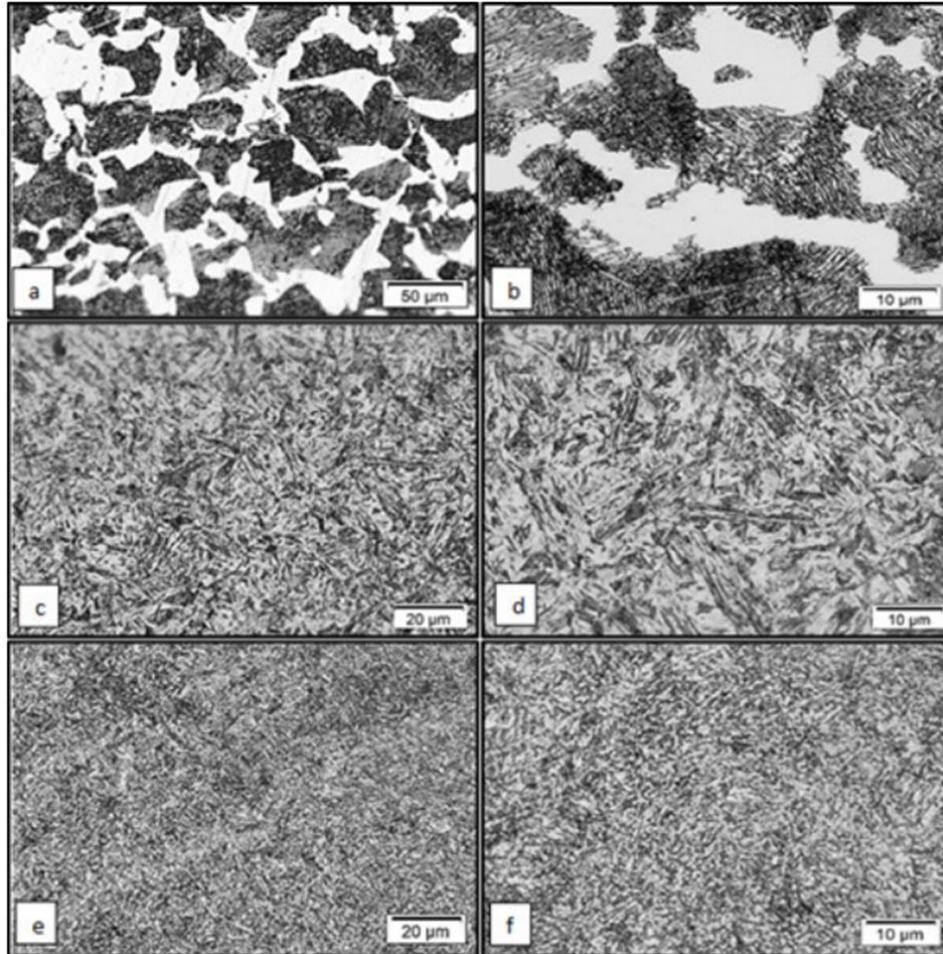


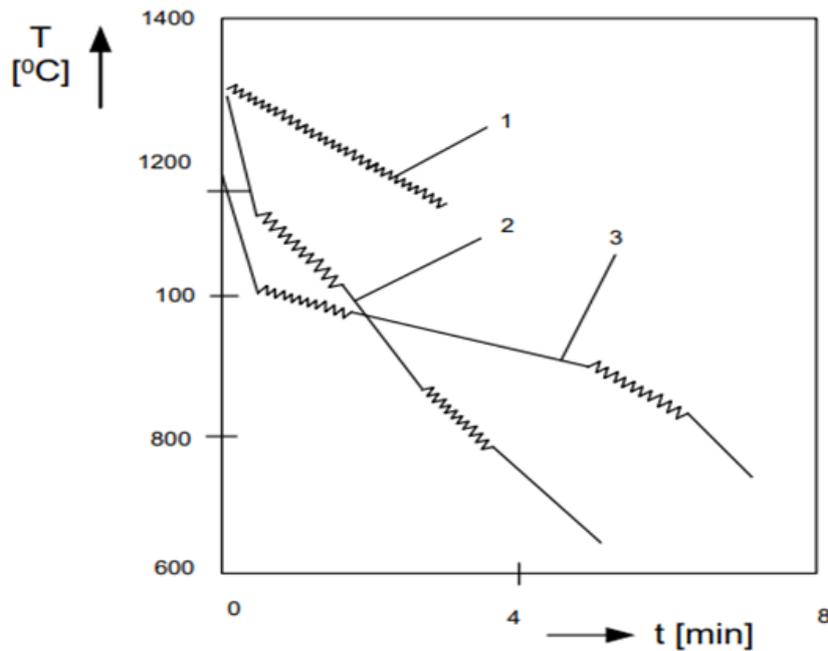
Fig. 1.4.9 Microstrutture ottiche ottenute per acciaio C45 bonificato in acqua. a) Condizione commerciale a 20x. b) Condizione commerciale a 100x. c) raffreddamento in acqua a 50x. d) raffreddamento in acqua a 100x. e) Bonificato a 50x. f) Bonificato a 100x. (Fonte:

<http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp> 146 editor@iaeme.com

Giornale internazionale di ingegneria meccanica e tecnologia (IJMET)

Volume 9, numero 7, luglio 2018, pagine 146–154, ID articolo: IJMET\_09\_07\_017)

**Processo controllato termomeccanicamente (TMCP)** gli acciai si ottengono combinando la deformazione plastica mediante laminazione con il trattamento termico (processo di laminazione termomeccanica). È un procedimento unico perché garantisce la migliore combinazione di resistenza e tenacia su bassi contenuti di carbonio, non ottenibile attraverso nessun altro tipo di trattamento termico.



1 – deformazione classica da laminazione a caldo, alte temperature durante tutto il processo; 2 – laminazione a caldo utilizzando la temperatura del controllore; 3- laminazione a caldo abbinata a trattamento termomeccanico, previo raffreddamento intermedio effettuato a temperatura inferiore.

Combinando gli effetti della microlega con la deformazione per laminazione a caldo a temperature sempre più basse, si ottiene una

diminuzione di circa 8 volte della dimensione del grano ferritico, che provoca un importante aumento del carico di snervamento e, soprattutto, un miglioramento essenziale della tenacità caratteristiche.

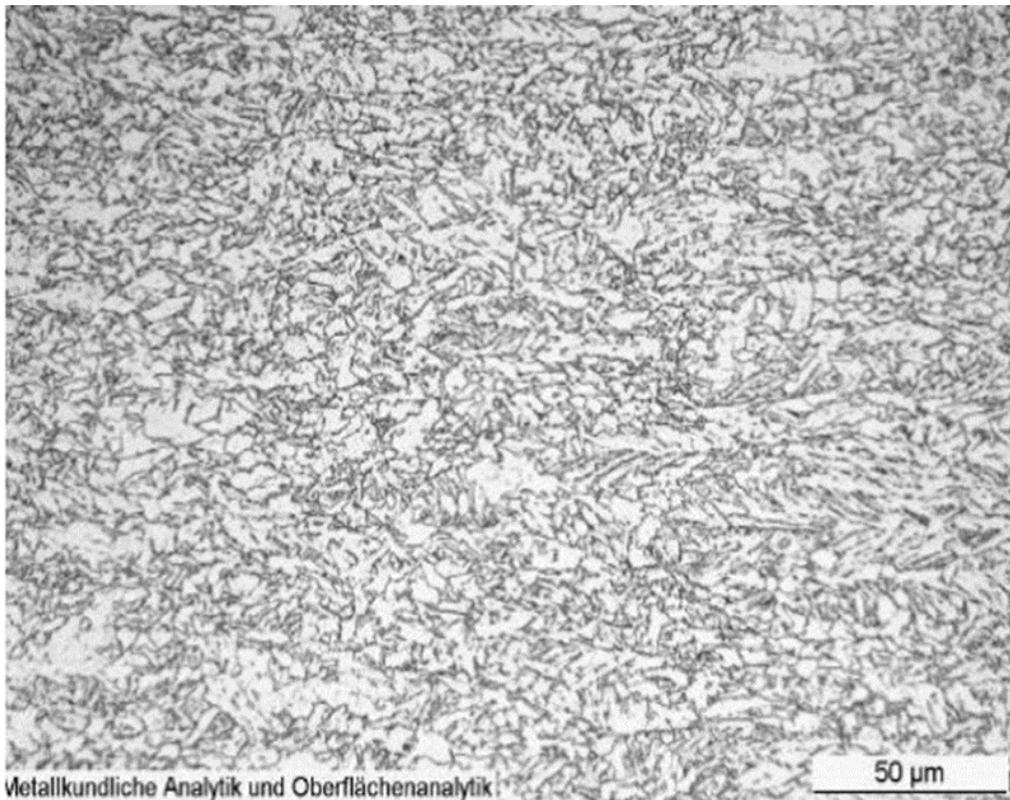


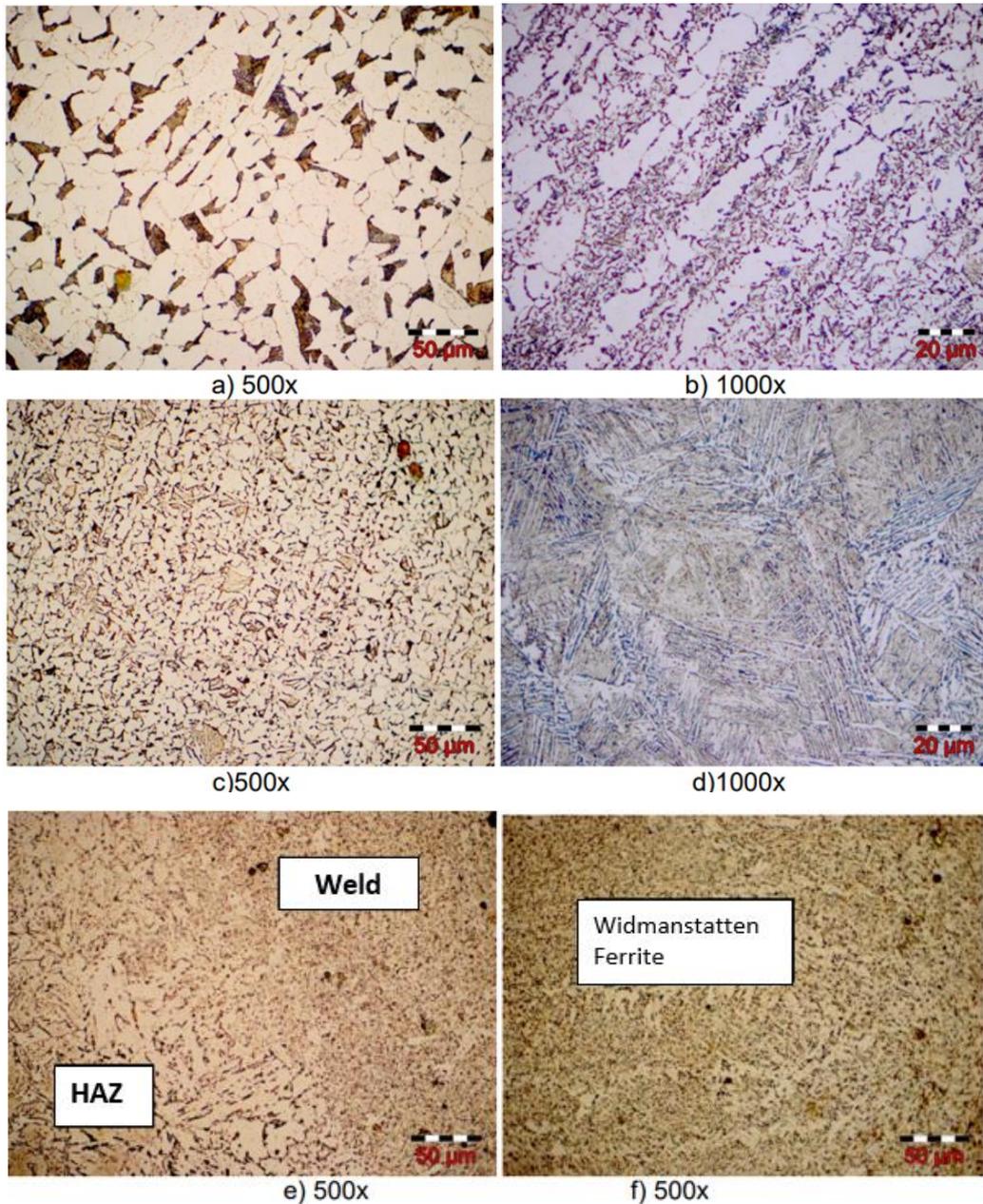
Figura 1.4.11. Microstruttura dell'acciaio TMCP



### 1.2.3. Aspetti microstrutturali di una saldatura

Nella seguente serie di immagini ottenute mediante microscopia ottica si possono vedere diverse aree di un giunto saldato in acciaio al carbonio e le loro strutture specifiche, come ad esempio:

- a) Materiale base: ferrite-poligonale (colore bianco) e perlite (disposizione lamellare, colore marrone-azzurro);
- b) Microarea di ricristallizzazione della ZTA: ferrite e perlite leggermente modificate;
- c) Microarea normalizzante: ferrite fine e perlite ricristallizzata;
- d) Microarea surriscaldata: perlite e ferrite di Widmanstatten;
- e) Linea di fusione: dove si può vedere la differenza granulometrica della HAZ;
- f) Cordone di saldatura: precipitati di ferrite fine, ferrite di Widmanstatten e carburi.



Quando il raffreddamento viene effettuato immediatamente al di sotto di  $AC_3$ , la ferrite inizia a nucleare sui bordi dei grani austenitici ed i grani formati aumentano sotto forma di blocchi massicci formando i cosiddetti limiti dei grani allotriomorfi.

Al crescere dei valori di raffreddamento, la tendenza alla crescita della ferrite comincia a manifestarsi sotto forma di strutture lamellari massicce, dette struttura di Widmanstätten, che poi si affinano all'aumentare della velocità di raffreddamento.



### Riferimenti:

[1.4.1] Voiculescu I, Geantă V, Vasile IM, 2016, Aliaje feroase pentru structuri sudate (Leghe ferrose per strutture saldate).

[1.4.2] Giornale internazionale di ingegneria meccanica e tecnologia (IJMET). Volume 9, numero 7, luglio 2018, pagine 146–154, ID articolo: IJMET\_09\_07\_017.

[1.4.3] Manuale ASM Volume 4. CaloreTrattare.

[1.4.4] Manuale ASM Volume 6. Saldatura, brasatura e brasatura.

[1.4.5] Manuale ASM Volume 9. Metallografia e microstrutture.



## 2. CU2: Metodi specifici per la preparazione dei campioni per esami macro e microscopici

### 2.1. Lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica, attacco metallografico colorato – scopo e applicazione

In questo capitolo discuteremo tre metodi essenziali utilizzati nel campo della metallografia: lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica e attacco metallografico colorato. Queste tecniche svolgono un ruolo fondamentale nell'esame e nell'analisi dei materiali metallici, offrendo approfondimenti unici sulle loro caratteristiche microstrutturali e superficiali.

#### 2.2.1. Introduzione alla lucidatura elettrolitica - Definizione, scopo e come funziona

Conosciuta anche come lucidatura elettrochimica, lucidatura anodica o lucidatura elettrolitica, l'elettrolucidatura è particolarmente utile per lucidare e sbavare parti fragili o con geometrie complesse. L'elettrolucidatura migliora la finitura superficiale riducendo la ruvidità superficiale fino al 50%. Il principio dell'elettrolucidatura è presentato nella figura 2.1.1.

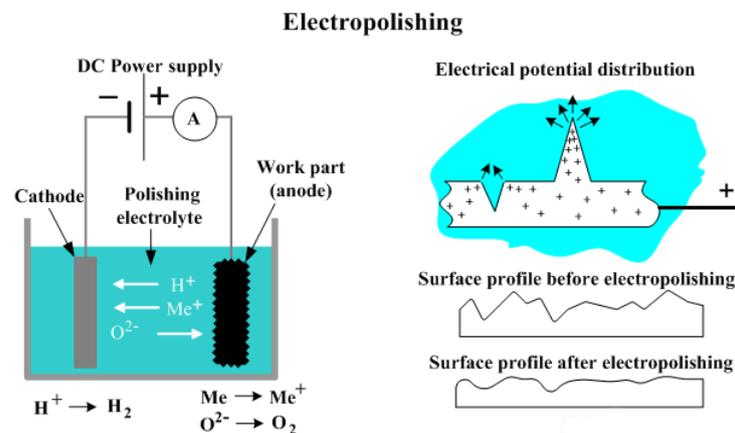


Figura 2.1.1 Principio della lucidatura elettrolitica [2.1.1]

Lo scopo della lucidatura elettrolitica è duplice: affinamento della superficie e preparazione della superficie. Sottoponendo il campione a una corrente elettrica in presenza di un elettrolita, questa tecnica elimina le irregolarità superficiali, come graffi, deformazioni e contaminanti superficiali. Il risultato è una superficie liscia e uniforme che facilita analisi e osservazioni microstrutturali accurate, come mostrato nella figura 2.1.2. L'obiettivo principale della lucidatura elettrolitica è creare una superficie che rifletta accuratamente la vera microstruttura del materiale.

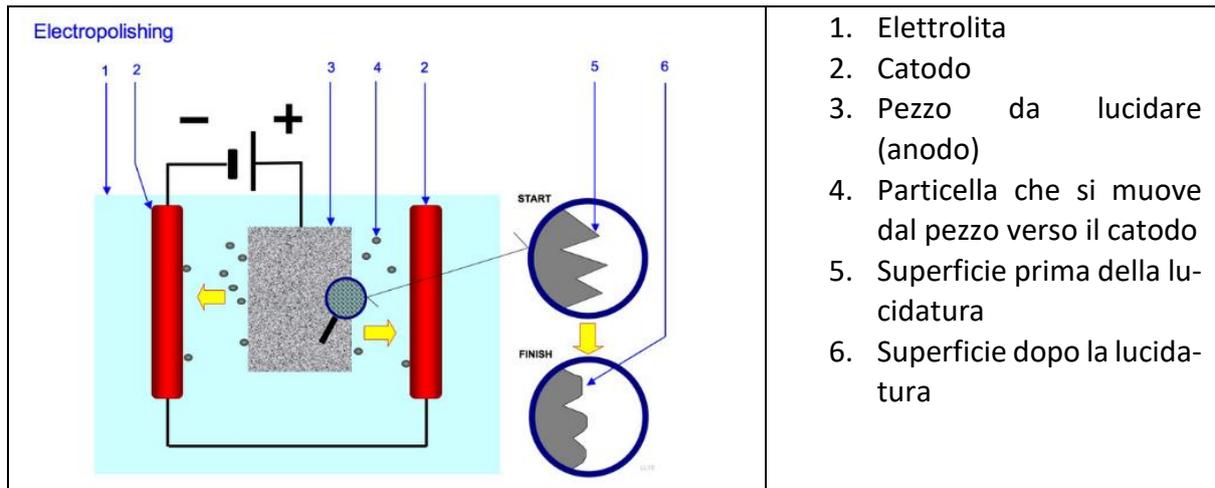


Figura 2.1.2. Come funziona l'elettrolucidatura [2.1.2]

Nell'elettrolucidatura, la parte metallica o il pezzo in lavorazione funge da anodo caricato positivamente. Il pezzo è collegato al terminale positivo di un raddrizzatore di potenza CC. Il catodo caricato negativamente, generalmente in acciaio inossidabile o zirconio, è collegato al terminale negativo del raddrizzatore di corrente continua.

Sia l'anodo che il catodo sono immersi in un bagno di soluzione elettrolitica a temperatura controllata. I prodotti chimici per l'elettrolucidatura dell'acciaio inossidabile sono generalmente costituiti da una miscela ad alta viscosità di acido solforico e acido fosforico.

La corrente elettrica proveniente dal raddrizzatore viene condotta dall'anodo al catodo attraverso l'elettrolita. La corrente elettrica fa sì che gli ioni metallici sulla superficie della parte si ossidino e si dissolvano nell'elettrolita. Questo processo può dissolvere quantità di metallo estremamente piccole e strettamente controllate, determinando uno spessore di rimozione superficiale dell'ordine dei micron, come possiamo vedere nel video della figura 2.1.3.



Fig. 2.1.3 Lucidatura della preparazione elettrolitica del campione [2.1.3]

Parametri importanti per un processo di elettrolucidatura di successo

La quantità di rimozione della superficie metallica è controllata dai seguenti fattori:



Composizione chimica dell'elettrolita;

Temperatura dell'elettrolita (tipicamente 76 °C – 82 °C);

Durata del tempo di esposizione alla corrente elettrica;

Densità della corrente elettrica (varia in base all'elettrolita; l'intervallo tipico è 140 – 250 A/m<sup>2</sup>);

Composizione della lega metallica sottoposta ad elettrolucidatura.

Nel processo di elettrolucidatura, bave e altri picchi di rugosità superficiale attirano una maggiore densità di corrente elettrica e sono i primi a erodersi, in un fenomeno noto come livellamento anodico. La rimozione preferenziale delle porzioni sporgenti della struttura superficiale porta ad una superficie metallica più liscia.

### **Flusso e agitazione degli elettroliti**

Mantenere un flusso di elettrolita costante e controllato è essenziale per un'efficace lucidatura elettrolitica. Il flusso dell'elettrolita aiuta a rimuovere i detriti e a prevenire l'accumulo di materiale disciolto sulla superficie del campione, che potrebbe ostacolare il processo di lucidatura. Promuove inoltre l'uniformità nella rimozione del materiale, garantendo una finitura superficiale uniforme.

Le tecniche di miscelazione, come l'agitazione meccanica o la miscelazione ad ultrasuoni, possono migliorare ulteriormente il flusso dell'elettrolita e migliorare i risultati di lucidatura. La miscelazione aiuta a rimuovere le bolle di aria/gas, promuove la distribuzione uniforme dell'elettrolita e migliora il trasferimento di massa sulla superficie del campione. Ciò garantisce che l'intera superficie sia esposta all'elettrolita, prevenendo effetti localizzati e ottenendo una rimozione più uniforme del materiale.

### **Configurazione degli elettrodi**

La configurazione e la disposizione degli elettrodi nella lucidatura elettrolitica influenzano la distribuzione della corrente elettrica e la rimozione del materiale sulla superficie del campione. Gli elettrodi fungono da conduttori per la corrente elettrica e la loro posizione e geometria possono essere regolate per controllare il processo di lucidatura.

In genere, vengono utilizzati due tipi di configurazioni degli elettrodi: elettrodo singolo e doppio elettrodo. In una configurazione a elettrodo singolo, il campione stesso funge da elettrodo, mentre viene utilizzato un contro elettrodo separato. In una configurazione a doppio elettrodo, sia il campione che un elettrodo ausiliario separato sono immersi nella soluzione elettrolitica. La scelta della configurazione dell'elettrodo dipende dai requisiti specifici del campione e dai risultati di lucidatura desiderati. Nelle figure seguenti vengono presentate le unità di attacco con due e tre elettrodi.

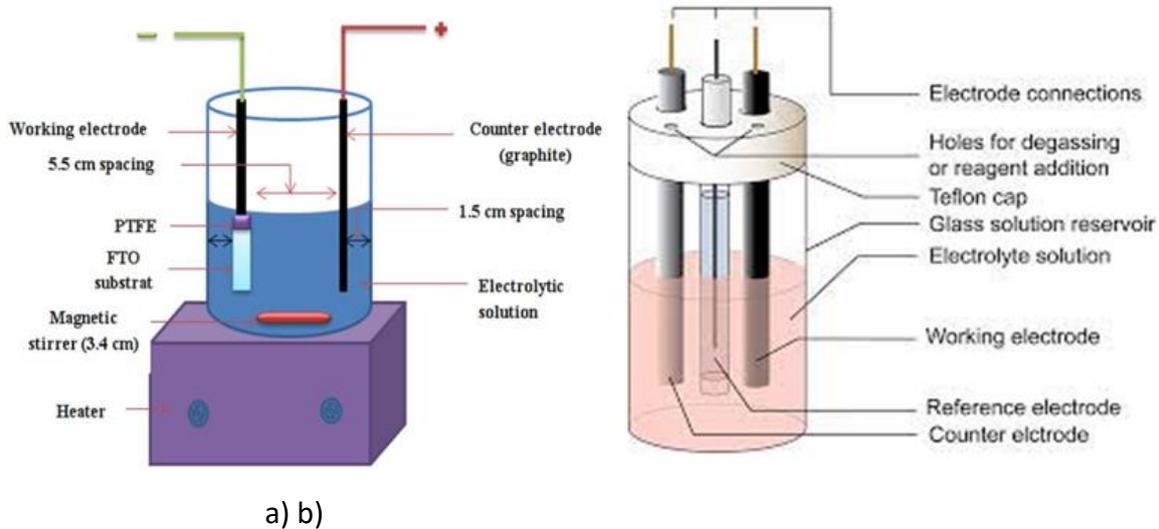


Figura 2.1.4. Configurazione degli elettrodi con: a) 2 elettrodi, b) tre elettrodi [2.1.4].

### Parametri di densità di corrente e tensione

I parametri di densità di corrente e tensione sono variabili critiche che governano la velocità di rimozione del materiale e la finitura superficiale durante la lucidatura elettrolitica. La densità di corrente si riferisce alla quantità di corrente elettrica applicata per unità di area della superficie del campione. Determina la velocità di rimozione del materiale, con densità di corrente più elevate che determinano una rimozione più rapida e superfici potenzialmente più ruvide. La densità di corrente viene controllata regolando la tensione applicata e l'area superficiale dell'elettrodo.

La tensione applicata influenza anche il processo di lucidatura elettrolitica. Determina la forza trainante per le reazioni elettrochimiche e la rimozione del materiale. Regolando la tensione, i ricercatori possono controllare la velocità di rimozione del materiale, la ruvidità della superficie e la selezione del processo di lucidatura. L'ottimizzazione dei parametri di densità di corrente e tensione richiede un'attenta considerazione del materiale del campione, della composizione dell'elettrolita e delle caratteristiche superficiali desiderate. Spesso comporta test e regolazioni iterativi per ottenere i risultati desiderati evitando un'eccessiva rimozione di materiale o danni alla superficie.

### Quanto materiale rimuove l'elettrolucidatura?

La quantità di materiale rimosso dai sistemi di elettrolucidatura è direttamente proporzionale al tempo di esecuzione/tempo del ciclo e agli ampere-minuto che attraversano la superficie del pezzo. Tutte queste variabili possono essere controllate per creare una finitura superficiale coerente e controllata in modo affidabile.

Lo spessore degli strati di materiale rimosso è generalmente compreso tra 0,0008 mm e 0,0018 mm per la maggior parte delle applicazioni di sbavatura e lucidatura dopo la lavorazione. Con un monitoraggio preciso, l'elettrolucidatura può rimuovere solo 0,00025 mm. Per un processo di elettrolucidatura con tempi di ciclo e ampere-minuto più lunghi, è possibile rimuovere da 0,008 mm a 0,0125 mm di materiale. Quanto più a lungo viene applicata la corrente elettrica, tanto più materiale viene rimosso ma meno uniforme è la finitura superficiale risultante. Pertanto, il processo si applica meglio alle microbave, ovvero a quelle che sporgono meno di circa 0,0038 mm dalla superficie della parte.

Esempi di specifiche di rimozione materiale per applicazione sono mostrati nella tabella 2.1.1.

Tabella 2.1.1. Specifiche di asportazione del materiale per applicazione

<b>Legge metallica</b>	<b>Controllo dell'asportazione del materiale nel processo</b>	<b>Minimo/pulizia</b>	<b>Microfinitura</b>	<b>Microsbatura</b>	<b>Resistenza alla corrosione</b>
Titanio	0,0254 mm per superficie	0,0254 mm per superficie	0,0635 mm per superficie	0,127 per superficie	N / A
Nitinolo	0,0254 mm per superficie	0,0254 mm per superficie	0,0635 mm per superficie	0,127 per superficie	N / A
Ottone	0,0635 mm per superficie	0,0635 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	N / A
Rame	0,0635 mm per superficie	0,0635 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	N / A
Acciaio	0,0635 mm per superficie	0,0635 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	N / A
Acciaio inossidabile	0,0254 mm per superficie	0,0254 mm per superficie	0,127 per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	0,127 mm per superficie
Alluminio	0,0635 mm per superficie	0,0635 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	0,127 - 0,254 mm per superficie	N / A

L'elettrolucidatura è un processo elettrochimico controllato che rimuove selettivamente il materiale superficiale, in genere da pochi micrometri a decine di micrometri di profondità. La velocità di rimozione del materiale nell'elettrolucidatura è influenzata da fattori quali la composizione e la concentrazione dell'elettrolita, la temperatura, la densità di corrente e la durata del processo. Questi parametri possono essere regolati per ottenere la finitura superficiale desiderata e per controllare la quantità di materiale rimosso. È importante notare che l'elettrolucidatura viene utilizzata principalmente per migliorare la finitura superficiale, migliorare la pulizia e ridurre i difetti superficiali piuttosto che per rimuovere quantità significative di materiale. Il processo è in genere più focalizzato sul livellamento e levigatura della superficie, sulla rimozione delle imperfezioni e sul miglioramento dell'estetica della superficie. Per determinare la quantità precisa di materiale rimosso durante l'elettrolucidatura per un'applicazione specifica, si consiglia di consultare le specifiche tecniche fornite dal produttore dell'apparecchiatura o di condurre prove sperimentali in condizioni controllate.

### Preparazione elettrolitica

La preparazione elettrolitica utilizza una cella di reazione elettrolitica contenente un elettrolita liquido con due elettrodi: un anodo e un catodo. Il campione da lucidare/incidere costituisce l'anodo. Viene applicata corrente che costringe il metallo dell'anodo a dissolversi, a muoversi e a depositarsi sul



catodo come rivestimento. Gli elettrodi sono collegati a un alimentatore esterno e viene applicata tensione per provocare una reazione all'interno della cella.

Di seguito nella figura 2.1.5 è mostrata la curva caratteristica di una cella elettrolitica. Questa curva dipende dall'elettrolita utilizzato e varierà per i diversi elettroliti. Il controllo della tensione e della densità di corrente sull'anodo, oltre alla composizione dell'elettrolita, alla temperatura e alla miscelazione sono tutti aspetti fondamentali per ottenere le caratteristiche di lucidatura/incisione desiderate. Stabilire un controllo adeguato di questi parametri può essere difficile e inoltre molti elettroliti sono pericolosi o addirittura esplosivi. In quest'ultimo caso, il controllo della temperatura è fondamentale. Non è possibile tentare la lucidatura o l'incisione elettrolitica senza la necessaria esperienza e senza le misure di sicurezza in atto.

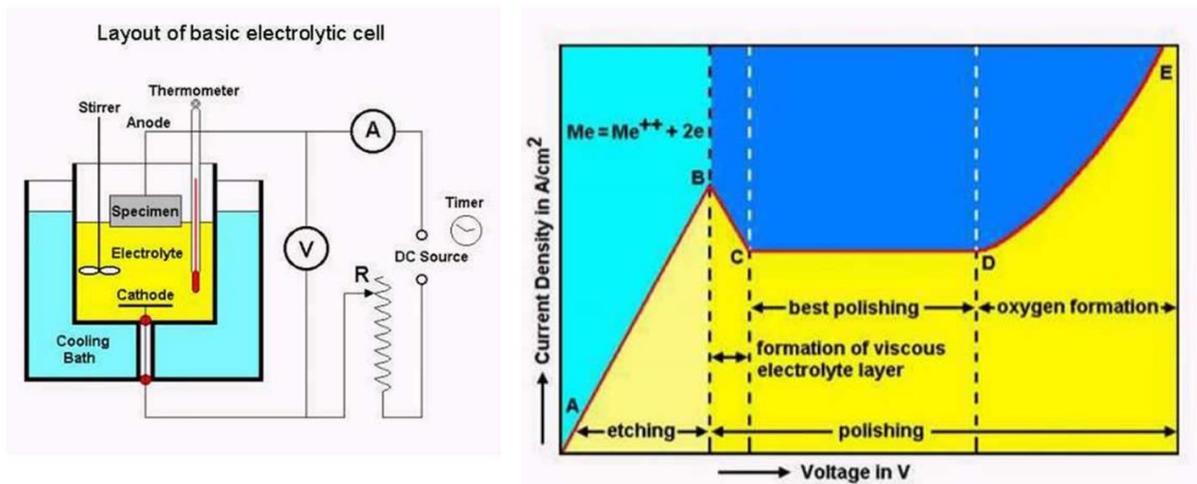


Fig. 2.1.5 Curva caratteristica di una cella elettrolitica [2.1.5]

I fattori che controllano le caratteristiche di incisione/lucidatura includono:

- Composizione dell'elettrolita;
- Temperatura dell'elettrolito;
- Agitazione dell'elettrolita;
- Area da lucidare/incidere (densità di corrente);
- Voltaggio.

### Vantaggi dell'elettrolucidatura

I tubi metallici vengono utilizzati principalmente per il trasporto di gas e liquidi. Esistono applicazioni domestiche, a basso costo e meno sensibili, come le linee di approvvigionamento idrico, fino ad applicazioni commerciali, ad alto costo e altamente sensibili, come le apparecchiature mediche. Le diverse applicazioni richiederebbero standard e qualità diversi. Oltre alle qualità meccaniche e chimiche a volte le dimensioni devono essere precise.

I tubi sono realizzati per essere senza giunture attraverso procedure di disegno per superare questo problema. I tubi senza saldatura sono dimensionalmente accurati e possono avere una rugosità assoluta inferiore. Ma quando l'applicazione è estremamente delicata e necessita che l'interno del tubo sia il più pulito e liscio possibile, viene applicata l'elettrolucidatura. La procedura viene eseguita mediante un processo chiamato elettrolisi in cui il prodotto perde atomo per atomo sulla superficie e arriva ad una finitura lucida.

Tabella 2.1.2 Vantaggi dell'elettrolucidatura

<b>Beneficio</b>	<b>Descrizione</b>
Aspetto decorativo	La finitura brillante e brillante, spesso altamente riflettente, è esteticamente gradevole ed uniforme, senza le sottili linee che si formano con la lucidatura abrasiva.
Levigatezza microscopica	Livella picchi e avvallamenti e fornisce un miglioramento fino al 50% della rugosità superficiale (Ra). La rugosità superficiale si riferisce alla struttura o all'aspetto di una superficie esterna, catturandone le irregolarità e le variazioni microscopiche in altezza o profondità. Svolge un ruolo cruciale nel determinare il modo in cui le superfici interagiscono tra loro, influenzando le proprietà di attrito, usura e tenuta. Al contrario, la rugosità interna si riferisce alla condizione di una superficie all'interno di un materiale o componente, tipicamente associata a imperfezioni o irregolarità non visibili esternamente. La ruvidità interna, come difetti o incoerenze microstrutturali, può influire sull'integrità strutturale e sulle proprietà meccaniche del materiale, ma è spesso più difficile da rilevare o valutare rispetto alla ruvidità superficiale, richiedendo spesso tecniche specializzate per la valutazione. A differenza della finitura meccanica, l'elettrolucidatura non imbratta, piega, sollecita o frattura la superficie metallica cristallina.
Sbavatura	A livello microscopico, l'elettrolucidatura rimuove piccoli pezzi di materiale superficiale spostato che possono impigliarsi e rompersi.
Finitura ultra pulita	Crea una superficie pulita più facile da sterilizzare. Rimuove i contaminanti incorporati che possono portare alla corrosione.
Rimuove i difetti superficiali	Aumenta la vita operativa rimuovendo le crepe dalla superficie, eliminando così i siti in cui la corrosione può prendere piede. Aiuta le parti che devono flettersi e piegarsi per durare più a lungo.



Riduce l'attrito	Prolunga la vita delle parti in costante movimento. Riduce il grippaggio sulle parti filettate, migliorando la tenuta.
Elimina le incrostazioni di ossido	Rimuove lo scolorimento della saldatura dalla tinta dovuta al calore e dalle incrostazioni di ossido.
Buono per le parti fragili	Funziona su parti delicate che potrebbero danneggiarsi durante il processo di burattatura. Può sostituire alcune tecniche di finitura meccanica come molatura, lucidatura, fresatura e sabbiatura.
Buono per parti complesse	Può lucidare aree inaccessibili con altri metodi di lucidatura senza causare danni. Tratta efficacemente superfici minuscole su componenti complessi.
Controllo delle dimensioni	Può essere utilizzato per ridurre leggermente le dimensioni delle parti, se necessario.

Tuttavia, il processo ha anche i suoi svantaggi. Anche con questo metodo la rugosità assoluta persiste in una certa misura. Il tempo necessario per il processo potrebbe essere tollerato, ma è costoso e alcuni acidi e altri prodotti chimici utilizzati avrebbero un impatto sul prodotto finito. Oltre alla rimozione degli strati superficiali, il processo rimuove anche le impurità, garantendo una maggiore resistenza alla corrosione.

### **Attacco metallografico**

Le superfici direttamente lucidate possono essere ispezionate utilizzando l'EBS (diffrazione di retrodiffusione elettronica), ma in molti casi la qualità del modello viene migliorata mediante attacco metallografico, come mostrato nella figura 2.1.6. Inoltre, l'attacco delinea la struttura dei grani, il che è di evidente vantaggio. Tuttavia, l'attacco può corrodere preferenzialmente una seconda fase o attaccare eccessivamente i bordi dei grani. È necessario prestare attenzione nella scelta e nell'utilizzo degli agenti mordenzanti. Ispezionare la superficie del campione utilizzando un microscopio ottico prima e dopo l'attacco per valutare l'effetto. I materiali difficili da lucidare possono trarre beneficio da ripetuti attacchi chimici e rilucidature. Questo metodo può esporre una superficie non danneggiata adatta all'EBS quando la lucidatura e l'attacco convenzionali non riescono a ottenere una superficie adeguata. Utilizzando speciali panni resistenti agli acidi o agli alcali è anche possibile aggiungere agenti mordenzanti diluiti al panno durante la lucidatura. Anche se questo può essere efficace, può essere difficile da controllare.

Qualsiasi reagente utilizzato deve dissolvere la superficie del campione in modo uniforme e non lasciare dietro di sé ossidi o strati di prodotti di reazione. Tali strati possono sopprimere completamente la diffrazione.

Molti agenti di attacco elencati nei libri di testo metallografici sono "attacchi a contrasto" che si basano sulla formazione di strati di ossido di diverso spessore per generare colori visibili utilizzando un microscopio ottico. Pertanto, tali agenti di attacco generalmente non sono adatti per EBS.

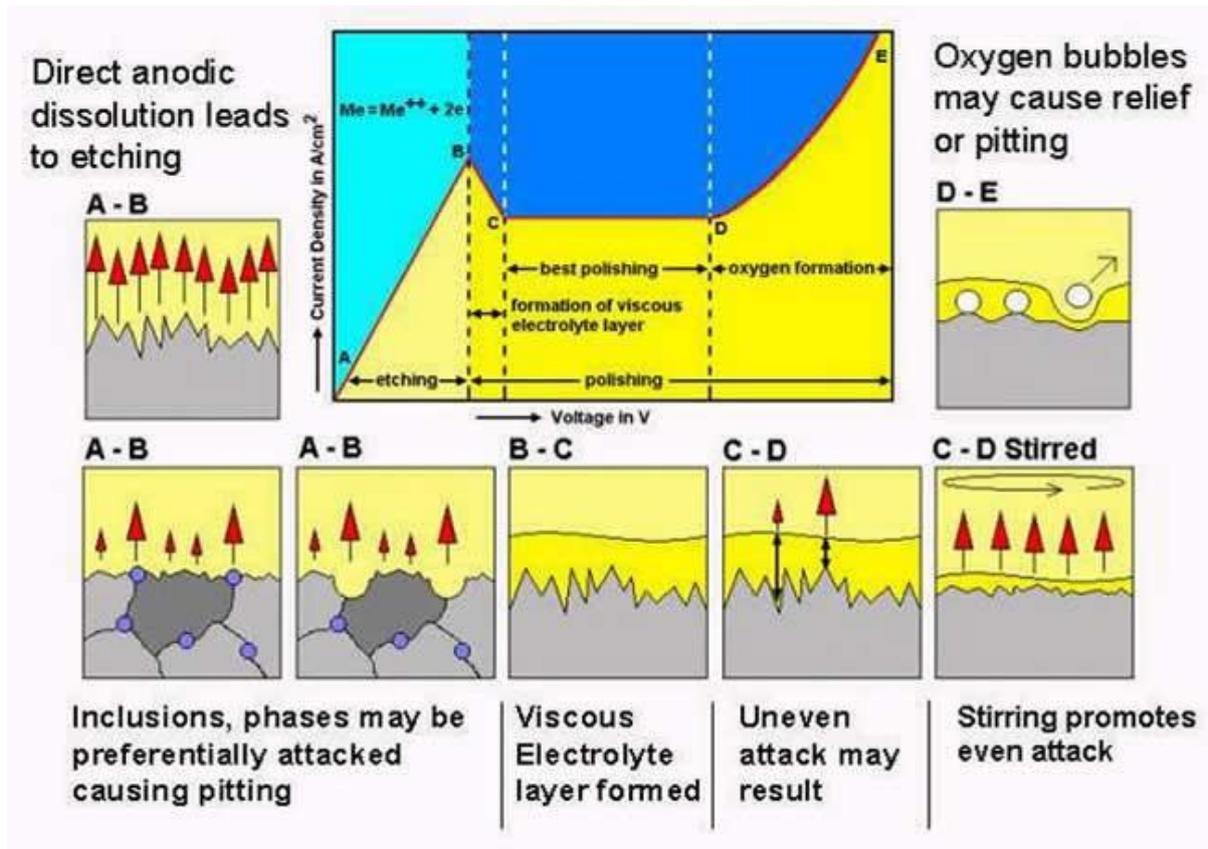


Fig. 2.1.6 Funzione di superficie del campione rispetto alla tensione e alla densità di corrente [2.1.5]

### Applicazioni comuni per l'elettrolucidatura

Sin dagli anni '50, gli scienziati hanno utilizzato commercialmente la combinazione di elettricità e sostanze chimiche per migliorare la finitura superficiale dei metalli. Si tratta di una procedura di finitura comune in un'ampia varietà di settori, inclusi i seguenti:

Chirurghi e dentisti utilizzano l'elettrolucidatura per mantenere i loro strumenti puliti e funzionanti.

Le aziende di lavorazione di alimenti, bevande e prodotti farmaceutici traggono vantaggio dalle caratteristiche di sterilizzazione dell'elettrolucidatura.

I produttori di elettrodomestici utilizzano l'elettrolucidatura in elettrodomestici come frigoriferi e lavatrici per far sì che le parti durino più a lungo e abbiano un aspetto migliore.

I produttori aerospaziali utilizzano l'elettrolucidatura su parti critiche per il volo per ridurre l'attrito e garantire prestazioni ottimali.

I produttori di semiconduttori utilizzano l'elettrolucidatura con prodotti fragili e di forma irregolare.

Le case automobilistiche e l'industria delle corse elettrolucidano ingranaggi e tubi del carburante per ridurre l'attrito, aumentare le prestazioni e garantire una lunga durata dei componenti.

Esempi di parti metalliche comunemente elettrolucidate:

Tubazioni e tubazioni

## Elementi di fissaggio

## Sorgenti

## Griglie metalliche

## Lame

La lucidatura elettrolitica trova ampia applicazione in settori quali quello aerospaziale, medico, alimentare, automobilistico e nella ricerca sui materiali, aiutando a valutare i bordi dei grani, i difetti superficiali e la distribuzione di fase.

## Quali metalli funzionano con l'elettrolucidatura?

Elettrolucidatura Acciaio Inossidabile: è l'utilizzo più comune dell'elettrolucidatura. Come è presentato nella figura 2.1.7. L'acciaio inossidabile elettrolucidato ha una finitura liscia, lucida e ultrapulita che resiste alla corrosione. Sebbene quasi tutti i metalli funzionino, i metalli elettrolucidati più comunemente sono l'acciaio inossidabile delle serie 300 e 400.

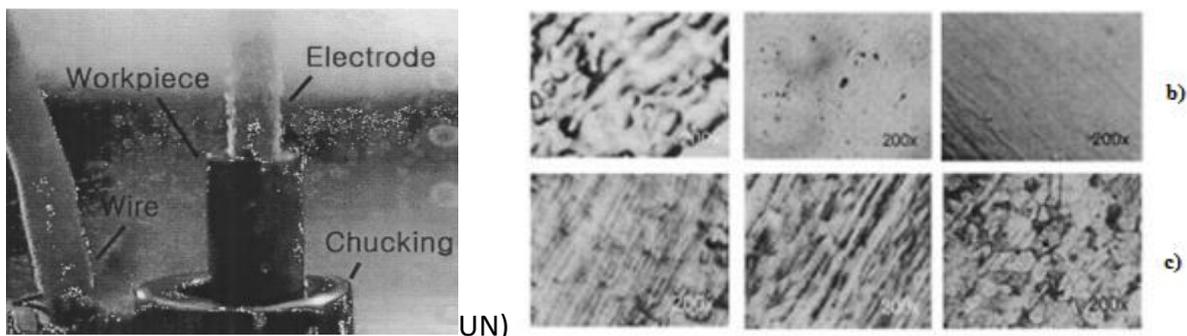


Fig.2.1.7 Elettrolucidatura per tubi in acciaio inossidabile (STS316L): a) L'apparato sperimentale, b) micrografie ottiche, c) micrografie metallografiche [2.1.6]

Le parti realizzate in acciaio inossidabile serie 400 (SS) presentano il vantaggio di maggiore durezza e resistenza a scapito di una maggiore suscettibilità alla corrosione. Grazie all'elettrolucidatura dell'acciaio inossidabile, gli ingegneri possono utilizzare gli SS della serie 400 e continuare a fornire protezione dalla corrosione. Se utilizzi l'acciaio inossidabile della serie 400, passare alla elettrolucidatura delle parti in acciaio inossidabile può offrirti il meglio di entrambi i mondi: resistenza alla corrosione, durezza e resistenza.

L'elettrolucidatura dell'acciaio inossidabile dopo la saldatura può rimuovere le incrostazioni di ossido tenace e la tinta dovuta al calore che possono formarsi nell'acciaio inossidabile dopo la saldatura. L'elettrolucidatura flash è una tecnica per rimuovere incrostazioni o ossidazioni dalla superficie di un metallo trattato termicamente. Ad esempio, alcuni strumenti chirurgici in acciaio inossidabile (SS) 17-4 appariranno marroni dopo la saldatura e/o il trattamento termico. Per eliminare l'aspetto marrone, le parti vengono elettrolucidate a flash. Il "flash" si riferisce alla rapidità con cui avviene la lucidatura: solo 10 secondi di elettrolucidatura contro un minimo di 2 minuti per la maggior parte delle applicazioni.

L'elettrolucidatura flash dell'acciaio inossidabile è l'unico modo per rimuovere le incrostazioni senza un processo ad alta intensità di manodopera e ha l'ulteriore vantaggio di ottenere risultati costanti. Al contrario, l'utilizzo della sabbiatura per rimuovere le incrostazioni su uno strumento SS 17-4 richiederà 4 volte più tempo e spesso produce risultati incoerenti e ondulati nella finitura superficiale dopo la pulizia. Si noti che l'elettrolucidatura flash è distinta dall'"attacco flash", un difetto che può verificarsi in un processo di passivazione.

Oltre all'acciaio inossidabile, altri metalli compatibili con l'elettrolucidatura includono:

- Alluminio;
- Ottone;
- Acciai al carbonio;
- Cromo cobalto;
- Leghe di rame (figura 2.1.8);
- Leghe di nichel;
- Titanio;
- Nitinolo.

Si possono ottenere solo risultati limitati con i metalli fusi, come le leghe contenenti quantità significative di silicio, zolfo o carbonio. L'elettrolucidatura delle pressofusioni di alluminio e zinco non funziona bene, ma la maggior parte delle altre leghe di alluminio danno buoni risultati. Titanio e nitinol sono compatibili anche con l'elettrolucidatura; tuttavia, la soluzione elettrolitica per questi metalli è altamente infiammabile e richiede sistemi di raffreddamento per impedire la combustione dell'elettrolita a temperatura ambiente.

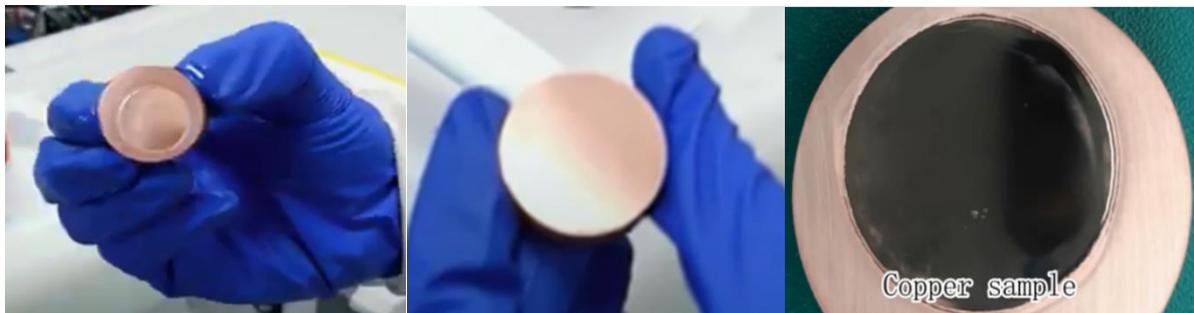


Figura 2.1.8. Campione di elettrolucidatura del rame [2.1.7]

Nella tabella 2.1.3 sono presentati i principali parametri coinvolti nel processo di Elettrolucidatura per l'acciaio inossidabile e nella tabella 2.1.4 per il rame.

Tabella 2.1.3 Parametri comuni del processo di elettrolucidatura su pezzi in acciaio inossidabile:

Elettrolita	Tipo in acciaio inossidabile	Temperatura	Intervallo di densità di corrente	Intervallo di tensione
Miscela di acido fosforico, acido solforico e glicerolo	304	da 30 a 700°C	da 0,5 a 1 A/cm <sup>2</sup>	Non specificato
Miscela di acido fosforico, acido solforico e glicerolo	304	da 5 a 800 °C	da 0,5 a 1 A/cm <sup>2</sup>	Non specificato



Miscela di acido fosforico, acido solforico e glicerolo	304	da 30 a 700°C	da 0,5 a 1 A/cm <sup>2</sup>	Non specificato
Acido fosforico, acido solforico e acqua	Fe13Cr	da 25 a 700 °C	da 0,01 a 0,225 A/cm <sup>2</sup>	da -0,81 a 1,45 V
Quattro elettroliti (miscele di acido solforico, acido fosforico e glicerolo)	316L	da 50 a 800 °C	Non specificato	Velocità di scansione della tensione 5 mV/s
Miscele di acido solforico, acido fosforico e acqua con/senza glicerina	316L	da 50 a 950 °C	da 0,5 a 2,5 A/cm <sup>2</sup>	Non specificato
Miscele di acido solforico, acido fosforico e acqua glicerolo	316L	da 65 a 700 °C	Non specificato	da 2,5 a 10 V

Tabella 2.1.4 Parametri comuni del processo di elettrolucidatura sul pezzo in rame:

Elettrolita	Temperatura	Intervallo di densità di corrente	Intervallo di tensione
Acido ortofosforico anidro	250°C	Non specificato	Non specificato
Soluzione di acido ortofosforico (soluzione non agitata)	Da -5,60°C a 530°C	da 0,2 a 1,5 A/dm <sup>2</sup>	da 0,7 a 0,9 V
Soluzione di acido ortofosforico/acqua (soluzione agitata)	Da -5,60°C a 530°C	da 0,2 a 1,5 A/dm <sup>2</sup>	Non specificato
Soluzione di acido ortofosforico/acqua	250°C	0,0625 A/cm <sup>2</sup>	da 0,8 a 1,2 V
Soluzione di acido fosforico/acqua con/senza glicerolo, glicole etilenico	da 170 a 250 °C	da 2 a 4,2 mA/cm <sup>2</sup>	da 0,25 a 1,5 V
Soluzione di acido fosforico/fosfato di rame/acqua	250°C	da 50 a 1000 mA/cm <sup>2</sup>	da 0,2 a 0,8 V
Soluzione di acido ortofosforico/acido solforico/acqua	250°C	0,1 A/cm <sup>2</sup>	da 1,8 a 2,2 V



## Osservazioni conclusive

L'elettrolucidatura è un trattamento superficiale metallico distintivo utilizzato per rimuovere irregolarità ruvide dalle superfici metalliche. Sebbene la teoria sia semplice, molteplici parametri influenzano la densità di corrente superficiale del pezzo e i risultati dell'elettrolucidatura, come il tipo di elettrolita, la temperatura, la concentrazione, la tensione, la distanza anodo/catodo, ecc. La regolazione precisa di questi parametri è essenziale per ottenere le finiture superficiali desiderate per pezzi metallici di diverse forme e dimensioni, con particolare attenzione all'elettrolucidatura elettrolitica.

Nel corso del tempo, i metalli che richiedono l'elettrolucidatura si sono evoluti, con gli acciai inossidabili che ora rappresentano il 95% del mercato attuale rispetto al rame e alle leghe di rame del passato. Inizialmente le osservazioni empiriche hanno modellato la tecnica, ma sono state sviluppate diverse teorie per comprendere i meccanismi sottostanti.

Per ottenere risultati ottimali di elettrolucidatura, le superfici dei pezzi vengono spesso sottoposte a processi sia di pretrattamento che di posttrattamento. La valutazione delle finiture superficiali viene effettuata attraverso varie tecniche microscopiche, a seconda della rugosità superficiale richiesta e della scala di osservazione.

I vantaggi dell'elettrolucidatura includono il miglioramento della levigatezza della superficie metallica, dell'aspetto, della resistenza alla corrosione, della rimozione dei contaminanti e del perfezionamento dello strato di ossidazione superficiale.

Oltre agli scopi decorativi, l'elettrolucidatura ha trovato applicazioni più ampie in vari settori, tra cui quello alimentare, delle bevande, farmaceutico, biomedico, elettronico, dei semiconduttori, automobilistico, aerospaziale e altro ancora. Con il passare del tempo, l'elettrolucidatura continuerà a svolgere un ruolo cruciale nella lavorazione di diverse finiture superficiali metalliche.

### 2.2.2. Il principio della lucidatura chimica

La lucidatura chimica, nota anche come incisione chimica, è un processo di trattamento superficiale che utilizza reazioni chimiche per rimuovere selettivamente il materiale da una superficie metallica. Lo scopo della lucidatura chimica è produrre una finitura a specchio, eliminare i difetti superficiali e migliorare la visibilità delle caratteristiche microstrutturali.

Il trattamento chimico è altamente efficiente nel rimuovere un sottile strato di materiale dall'intera superficie immersa di una parte, ottenendo una superficie liscia e impeccabile, che rivela dettagli microstrutturali per ulteriori analisi e fornisce una soluzione sicura ed economica semplicemente immergendo le parti in vasche speciali. Questo processo rimuove efficacemente particelle, pori, detriti, contaminanti e danni strutturali presenti nello strato superficiale. In particolare raggiunge velocità di asportazione più elevate lungo i piani ed i bordi, rimuovendo efficacemente bave fino ad una dimensione di circa 0,5 mm. La velocità di rimozione può essere regolata in base alla concentrazione dei prodotti chimici nel serbatoio, alla temperatura della soluzione e alla corrente sulla superficie del pezzo. Controllando questi parametri è possibile garantire la ripetibilità della lavorazione.

La Figura 2.1.9 illustra il processo di lucidatura chimica. Quando una superficie metallica viene immersa in una soluzione lucidante chimica, si dissolve in ioni metallici e questi ioni si diffondono all'interno della soluzione lucidante. Nelle situazioni in cui il metallo si dissolve a una velocità maggiore rispetto alla diffusione degli ioni, gli ioni metallici si accumulano nelle regioni concave. Come illustrato nella Figura 2.1.9 (a), la densità dei cationi, principalmente degli ioni idrogeno (H<sup>+</sup>), nella soluzione

lucidante diminuisce nelle aree concave. Ciò si traduce in una superficie liscia poiché la velocità di incisione nelle porzioni convesse è maggiore rispetto alle parti concave, come mostrato nella Figura 2.1.9 (b) e (c).

Inoltre, la lucidatura chimica può rimuovere efficacemente le sostanze che non sono state eliminate dalla pulizia di precisione, come indicato nella Figura 2.1.9 (a) e (b). Queste sostanze persistenti possono includere impurità aderenti come strati superficiali chimicamente alterati come scaglie di ossidazione formate durante la saldatura, come rappresentato nella Figura 2.1.9 (a) –  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

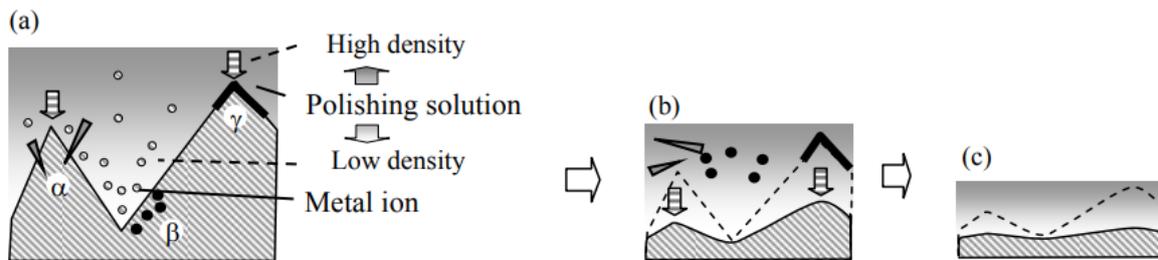


Figura 2.1.9 Rappresentazione del principio di lucidatura chimica [2.1.8]

La lucidatura chimica è comunemente utilizzata come metodo rapido per ottenere risultati soddisfacenti piuttosto che puntare a una superficie impeccabile. Tuttavia, nei casi in cui preparare una superficie priva di deformazioni utilizzando altre tecniche risulta impegnativo, soprattutto quando si ha a che fare con metalli teneri o quando si incontrano varie difficoltà, la lucidatura chimica può offrire l'approccio più adatto per la preparazione preliminare o finale.

Per i metalli refrattari, la lucidatura chimica viene spesso condotta dopo la lucidatura meccanica per migliorare la risposta alla luce polarizzata (ad esempio, per Zr, Hf) o per eliminare deformazioni minori (ad esempio, Nb, Ta, V). La tecnica è progettata per produrre una superficie liscia e piatta sciogliendo o incidendo selettivamente specifici costituenti microstrutturali lasciando gli altri per lo più inalterati.

Il raggiungimento della velocità di rimozione del materiale, della selettività e della qualità della superficie desiderate dipende dalla regolazione della composizione specifica del mordenzante e dei parametri di processo. La lucidatura chimica rappresenta un metodo prezioso per rifinire le superfici in situazioni difficili, garantendo risultati ottimali per varie applicazioni. Nella figura 2.1.10 è presentato un sistema elettrico per la lucidatura chimica.



Fig. 2.1.10 Sistema di lucidatura chimica [2.1.9]

I processi chimici di sbavatura e lucidatura vengono utilizzati nelle seguenti applicazioni: singoli componenti in vasche di immersione utilizzando cestelli o attrezzature di sospensione, tubi e fori lunghi pompando la soluzione attraverso i componenti, piccole parti, per lo più sfuse, a condizione che non possano danneggiarsi a vicenda; fili e piattine mediante lavorazione continua su apparecchiature da bobina a bobina o in fascio sfuso, grandi contenitori mediante spruzzatura o aspersione.



### Attacco chimico a base acida

I reagenti a base acida sono comunemente usati nella lucidatura chimica grazie alla loro elevata reattività e capacità di dissolvere un'ampia gamma di materiali metallici come in figura 2.1.11. Esempi di attacchi chimici a base acida includono acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ), acido cloridrico ( $\text{HCl}$ ) e acido solforico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Questi agenti mordenzanti sono efficaci nella rimozione di ossidi, incrostazioni e impurità superficiali. I reagenti a base acida sono particolarmente utili per materiali come acciai inossidabili, leghe di alluminio e leghe di titanio. La composizione e la concentrazione degli agenti mordenzanti a base acida possono essere regolate per ottenere diversi livelli di selettività e finiture superficiali.

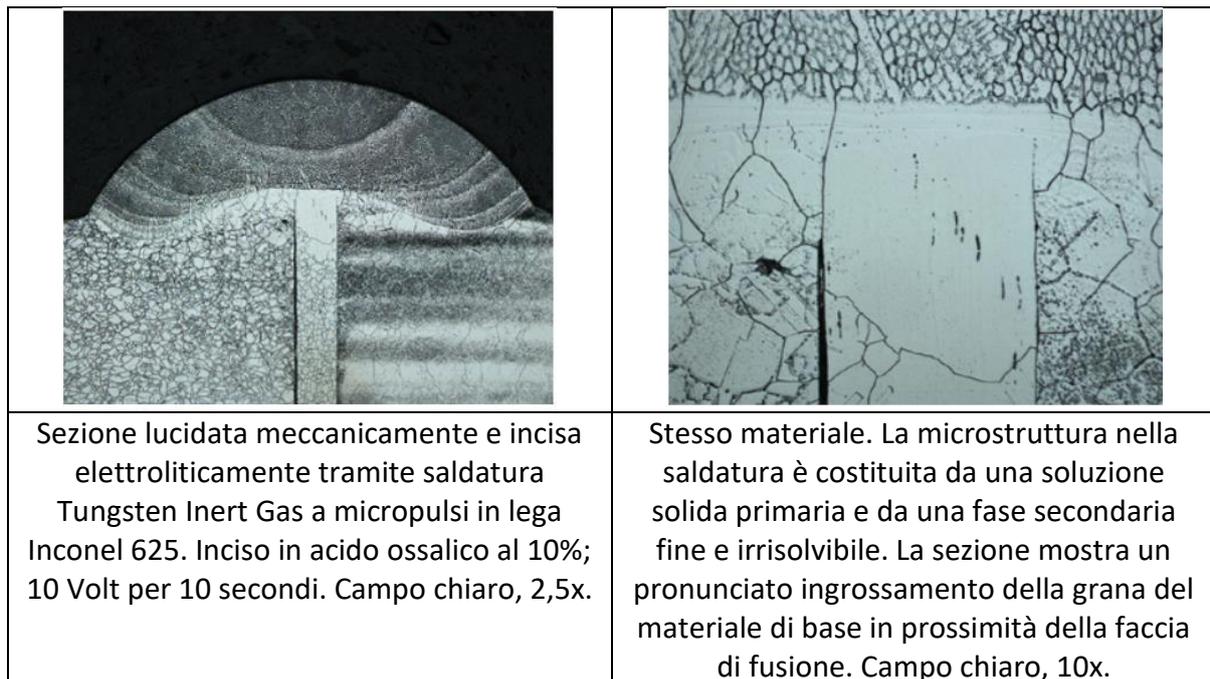


Fig. 2.1.11 Lega Inconel 625 prima e dopo l'attacco chimico [2.1.10]

### Attacchi metallografici a base alcalina

I reagenti a base alcalina vengono spesso utilizzati per la lucidatura chimica di metalli e leghe. L'idrossido di sodio ( $\text{NaOH}$ ) e l'idrossido di potassio ( $\text{KOH}$ ) sono comuni attacchi chimici a base alcalina utilizzati in metallografia. Gli attacchi metallografici alcalini sono efficaci nella rimozione degli strati di ossido e possono fornire superfici lisce e lucenti. Gli attacchi a base alcalina sono adatti per materiali come l'acciaio inossidabile come nella figura 2.1.12, rame, ottone e alcune leghe di alluminio. La concentrazione e la temperatura degli agenti di attacco alcalini possono essere regolate per controllare la velocità di attacco e la selettività.

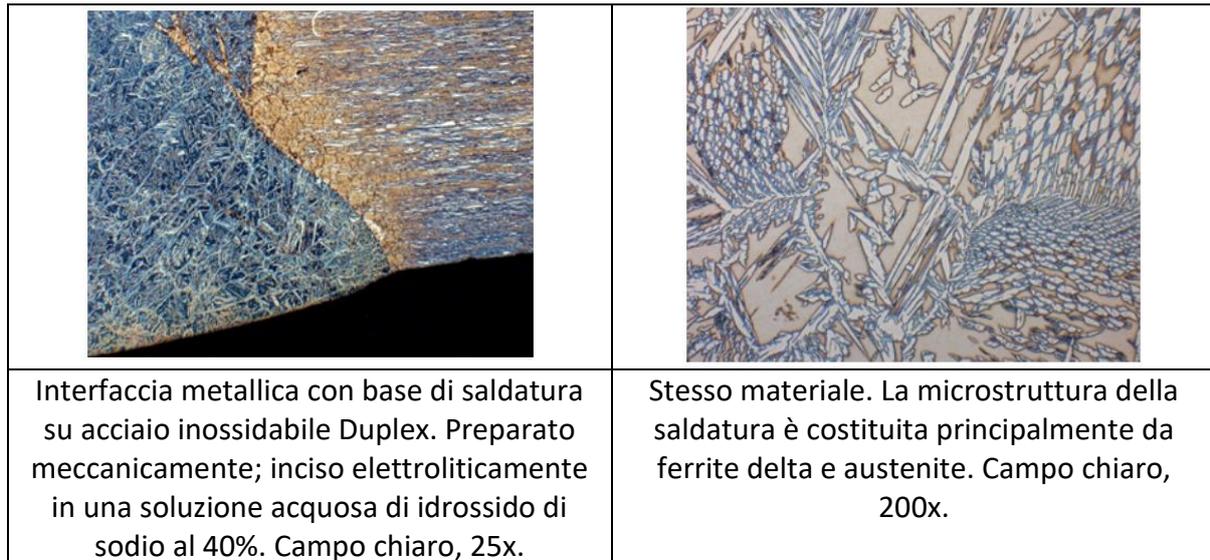


Fig. 2.1.12 Acciaio inossidabile duplex prima e dopo l'attacco chimico [2.1.10]

### Attacchi chimici misti

Gli attacchi metallografici misti sono costituiti da una combinazione di composti chimici, offrendo una gamma più ampia di capacità di attacco rispetto ai singoli agenti reagenti acidi o alcalini. Gli attacchi misti possono fornire una migliore selettività e tassi di rimozione del materiale controllati per specifici costituenti microstrutturali, come presentato nella figura 2.1.13. Un esempio è il reagente di Kroll, che è una miscela di acido nitrico e acido fluoridrico. È comunemente usato per la lucidatura chimica del titanio e delle leghe di titanio, fornendo una finitura superficiale brillante e riflettente.

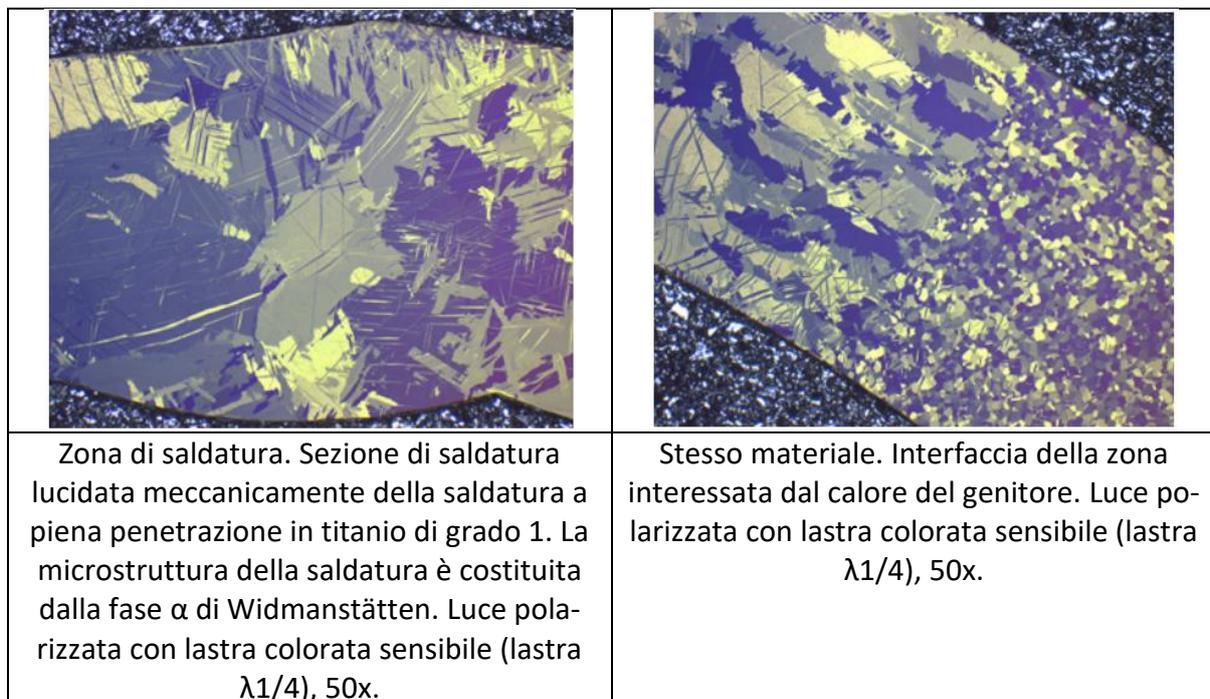


Fig. 2.1.13 Titanio grado 1 prima e dopo l'attacco chimico [2.1.10]

## Attacchi metallografici speciali per leghe specifiche

Alcune leghe possono richiedere attacchi metallografici speciali adattati alle loro microstrutture e composizioni uniche. Questi attacchi speciali sono progettati per rivelare selettivamente caratteristiche o fasi microstrutturali specifiche. Gli esempi includono Nital (figura 2.1.14), che è una miscela di acido nitrico ed etanolo utilizzata per rivelare i bordi di grano negli acciai, e il reagente Beraha, utilizzato per rivelare i bordi di grano nel rame e nelle leghe di rame.



Fig. 2.1.14 Acciaio al carbonio prima e dopo l'attacco chimico [2.1.10]

La temperatura e il tempo svolgono un ruolo importante nella lucidatura chimica. La velocità di attacco dipende fortemente dalla temperatura del mordenzante. Temperature più elevate generalmente determinano velocità di rimozione del materiale più elevate, sebbene temperature eccessivamente elevate possano portare ad un'incisione incontrollata e non uniforme. Il tempo di incisione è un altro parametro critico che influenza l'entità della rimozione del materiale e della finitura superficiale. Tempi di incisione più lunghi possono comportare una maggiore rimozione del materiale e superfici più lisce. Tuttavia, il tempo di mordenzatura deve essere attentamente controllato per evitare un'eccessiva mordenzatura e un'eccessiva rimozione delle caratteristiche microstrutturali desiderate. L'ottimizzazione dei parametri di temperatura e tempo di incisione è fondamentale per ottenere la finitura superficiale, la selettività e la conservazione dei dettagli microstrutturali desiderati.

In generale, un campione macinato viene immerso nell'agente lucidante, o tamponato con la soluzione, fino ad ottenere una lucidatura, e viene quindi inciso o lavato ed asciugato, a seconda dei casi. I reagenti sono elencati nella Tabella 2.1.5 [2.1.11].

Tabella 2.1.5: Reagenti chimici per lucidatura

Metallo	Reagente*	Quantità	Tempo	Temp. (0C)	Osservazioni
Alluminio e leghe	Acido solforico (1,84)	25 ml	30 secondi-2 minuti	85	Molto utile per studiare le leghe contenenti composti intermetallici, ad esempio le leghe Al-Cu, Al-Fe, Al-Si
	Acido ortofosforico	70 ml			
	Acido nitrico	5 ml			
	Acido nitrico	5 ml			
Berillio	Acido solforico (1,84)	1 ml	Diversi minuti	49-50	La velocità di rimozione del metallo è di circa. 1 µm/min-1. La pellicola passiva formata può essere rimossa mediante immersione per 15-30 s in acido solforico al 10%
	Acido ortofosforico (1,75)	14 ml			
	Acido cromico	20 g			
	Acqua	100 ml			
Cadmio	Acido nitrico (1.4)	75 ml	5-10 secondi	20	Si effettuano cicli di immersione della durata di pochi secondi, seguiti immediatamente da un lavaggio in un rapido getto d'acqua, fino all'ottenimento di una superficie brillante.
	Acqua	25 ml			
Rame	Acido nitrico	33 ml	1-2 minuti	60-70	La finitura è migliore quando è assente l'ossido di rame
	Acido ortofosforico	33ml			
	Acido acetico glaciale	33ml			
Leghe di rame	Acido nitrico	30 ml	1-2 minuti	70-80	I campioni devono essere misti
	Acido cloridrico	10 ml			
	Acido ortofosforico	10 ml			
	Acido acetico glaciale	50 ml			
	Acido nitrico (1,40)	80 ml	5 secondi	40	Utilizzare periodi di immersione di 5



Leghe rame-zinco	Acqua	20 ml			secondi seguiti immediatamente da un lavaggio con un rapido getto d'acqua. Sono necessarie leggere variazioni nella composizione per gli ottoni $\alpha$ - $\beta$ e $\beta$ - $\gamma$ per prevenire attacchi differenziali. Con le leghe $\beta$ - $\gamma$ si forma una pellicola opaca che può essere rimossa mediante immersione in una soluzione satura di acido cromico in acido nitrico fumante per alcuni secondi seguita da lavaggio.
Germanio	Acido fluoridrico +	15 ml	5-10 secondi	20	-
	Acido nitrico	25 ml			
	Acido acetico glaciale	15 ml			
Afnio	Acido nitrico	45 ml	5-10 secondi	20	Per quanto riguarda lo zirconio
	Acqua	45 ml			
	Acido fluoridrico +	8-10 ml			
Ferro	Acido nitrico	3ml	2-3 minuti	60-70	Sulla superficie si forma un denso strato viscoso marrone; lo strato è solubile in soluzione. Gli acciai a basso tenore di carbonio possono anche essere lucidati, ma la cementite viene attaccata preferenzialmente.
	Acido fluoridrico (40%)+	7 ml			
	Acqua	30 ml			
Ferri e acciai	Acqua distillata	80 ml	15 minuti	35	La soluzione deve essere preparata fresca prima dell'uso. È necessario un accurato lavaggio prima del trattamento. Si ottiene una microstruttura
	Acido ossalico (100 gl-1)	28 ml			
	Perossido di idrogeno (30%)	4ml			



					simile a quella prodotta dalla lucidatura meccanica, seguita dalla mordenzatura con nital.
Guida	Perossido di idrogeno (30%)	80 ml	Periodi di 5-10 s	20	Utilizzare il reagente di Russel per verificare che eventuali strati fluiti siano stati rimossi prima della lucidatura finale con questo reagente.
	Acido acetico glaciale				
Magnesio	Acido nitrico fumante	75 ml	Periodi di 3 s	20	La reazione raggiunge una violenza quasi esplosiva dopo circa un minuto, ma se lasciata proseguire cessa dopo diversi minuti, lasciando una superficie lucida pronta per l'esame.
	Acqua	25 ml			Il campione deve essere lavato immediatamente dopo la rimozione dalla soluzione.
Nichel	Acido nitrico (1,40)	30 ml	1/2 – 1 minuto	85-95	Questa soluzione fornisce un'ottima lucidatura
	Acido solforico (1,84)	10 ml			
	Acido orto-fosforico (1.70)	10 ml			
	Acido acetico glaciale	50 ml			
Silicio	Acido nitrico (1,40)	20 ml	5-10 secondi	20	Viene utilizzata anche la miscela 1:1
	Acido fluoridrico (40%)+	5 ml			
Tantalio	Acido solforico (1,84)	50 ml	5-10 secondi	20	La soluzione è utile per preparare le superfici prima dell'anodizzazione
	Acido nitrico (1,40)	20 ml			
	Acido fluoridrico (40%)+	20 ml			
Titanio	Acido fluoridrico (40%)+	10 ml	30-60 anni	-	Tampone fino a quando soddisfacente



	Perossido di idrogeno (30%)	60 ml			Da pochi secondi a diversi minuti per legare
	Acqua	30 ml			
	Acido fluoridrico (40%)+	10 ml			
	Acido nitrico (1,40)	10 ml			
	Acido lattico (90%)	30 ml			
Zinco	Acido nitrico fumante	75 ml	5-10 secondi	20	Per quanto riguarda il cadmio
	Acqua	10 ml			
	Triossido di cromo	20 g	3-30 minuti	20	La soluzione deve essere sostituita frequentemente
	Solfato di sodio	1,5 g			
	Acido nitrico (1,40)	5 ml			
	Acqua	100 ml			
Zirconio (anche afnio)	Fluoruro acido di ammonio	10 g	1/2 -1 minuto	30-40	La velocità di dissoluzione varia notevolmente con la temperatura ed è di circa 20-60 $\mu\text{m min}^{-1}$ nell'intervallo indicato
	Acido nitrico (1,40)	40 ml			
	Acido flousilicico	20 ml			
	Acqua	100 ml			
	Acido nitrico (1,40)	40-45	5-10 ml	-	La reazione è vigorosa all'interfaccia aria/soluzione e pertanto il campione viene tenuto vicino alla superficie del liquido. Al posto dell'acqua è possibile utilizzare il perossido di idrogeno (30%).
	Acqua	40-45 ml	Ripetuto		
	Acido fluoridrico (40%)+	10-15 ml			

\*Gli acidi sono concentrati, salvo diversa indicazione.

L'acido fluoridrico produce danni irreversibili alle ossa e presenta una serie di altri pericoli. Anche le soluzioni diluite di acido fluoridrico devono essere maneggiate con grande cura. L'acido fluoridrico attacca la vetreria da laboratorio.

La composizione chimica della soluzione utilizzata determina il tipo di reazioni che si verificano durante la lucidatura chimica. Ad esempio, i reagenti aggressivi a base acida comportano tipicamente la donazione di protoni e la formazione di sali metallici solubili. I reagenti a base alcalina, invece, si affidano alle reazioni degli ioni idrossido per dissolvere la superficie. Anche i meccanismi di passivazione e inibizione della superficie possono influenzare il processo di attacco. Questi fenomeni comportano la formazione di strati protettivi di ossido o la presenza di inibitori che rallentano o



arrestano la reazione di attacco in determinate regioni. Il controllo di questi meccanismi è fondamentale per ottenere una rimozione uniforme del materiale e la finitura superficiale desiderata.

## **Meccanismi di lucidatura chimica**

I meccanismi di lucidatura chimica comportano la dissoluzione selettiva o l'attacco di diversi costituenti microstrutturali in base alla loro reattività con la soluzione utilizzata. Questa selettività dipende da fattori quali l'orientamento cristallografico, la composizione chimica e i difetti superficiali.

In alcuni casi, l'attacco attacca preferenzialmente i bordi dei grani o altri piani cristallografici, portando alla rimozione di materiale da queste regioni. Altri agenti aggressivi possono prendere di mira fasi o costituenti specifici, determinandone la dissoluzione preferenziale. La selettività è influenzata dalla composizione dell'attacco, dalla temperatura e dai parametri di processo.

A. Esame della microstruttura: la lucidatura chimica è ampiamente utilizzata per l'esame della microstruttura. Fornendo una superficie liscia e lucida, consente una chiara osservazione e analisi delle caratteristiche microstrutturali, inclusi bordi dei grani, fasi, inclusioni e precipitati. L'esame della microstruttura facilitato dalla lucidatura chimica aiuta a comprendere la composizione del materiale, la dimensione dei grani, la morfologia dei grani e la distribuzione delle fasi. È fondamentale per valutare gli effetti della lavorazione, del trattamento termico e della lega sulla microstruttura e sulle conseguenti proprietà meccaniche.

B. Determinazione della dimensione del grano: la lucidatura chimica svolge un ruolo importante nel determinare la dimensione del grano nei materiali metallici. Rivelando chiaramente i confini dei grani, consente misurazioni e analisi accurate della dimensione dei grani mediante microscopia ottica o elettronica. La determinazione della dimensione del grano è essenziale per valutare le proprietà meccaniche del materiale, come resistenza, durezza e resistenza alla fatica.

C. Analisi dei rilievi superficiali: la lucidatura chimica viene utilizzata per l'analisi dei rilievi superficiali, in particolare nei materiali con microstrutture complesse. Rimuovendo selettivamente il materiale e migliorando la visibilità delle caratteristiche superficiali, consente l'esame delle variazioni dei rilievi superficiali, come ondulazioni superficiali, modelli di deformazione e struttura. L'analisi del rilievo superficiale facilitata dalla lucidatura chimica aiuta a comprendere i meccanismi di deformazione superficiale, l'efficacia dei trattamenti superficiali e l'impatto dei processi meccanici e termici sulla morfologia superficiale.

D. Rilevamento di particelle di seconda fase: la lucidatura chimica è utile per il rilevamento e l'analisi di particelle di seconda fase all'interno di materiali metallici. Dissolvendo preferenzialmente la fase matrice, migliora la visibilità e il contrasto delle particelle della seconda fase, consentendone l'identificazione, la misurazione e la caratterizzazione. Il rilevamento delle particelle della seconda fase facilitato dalla lucidatura chimica consente di comprendere la distribuzione, le dimensioni, la morfologia e la frazione volumetrica delle particelle della seconda fase. Fornisce preziose informazioni sulla resistenza, tenacità, resistenza all'usura e altre proprietà meccaniche del materiale.

La lucidatura chimica è una tecnica versatile con varie applicazioni in metallografia. Consente l'esame della microstruttura, la determinazione della dimensione dei grani, l'analisi del rilievo superficiale e il rilevamento delle particelle nella seconda fase. Rimuovendo selettivamente il materiale e rivelando le caratteristiche microstrutturali, la lucidatura chimica contribuisce alla comprensione e alla caratterizzazione dei materiali metallici.



### 2.2.3. Attacco metallografico colorato. Definizione e scopo

#### Introduzione all'attacco metallografico colorato

L'attacco metallografico colorato si riferisce al processo di colorazione di specifici costituenti microstrutturali all'interno di un campione di metallo utilizzando attacchi metallografici specifici. Lo scopo dell'attacco è quello di migliorare la visibilità e il contrasto delle diverse fasi, inclusioni, bordi dei grani e altre caratteristiche microstrutturali. Colorando selettivamente questi componenti, la tecnica ne consente l'identificazione, la caratterizzazione e l'analisi.

La tecnica migliora la visibilità e il contrasto di varie fasi, inclusioni e bordi dei grani, come mostrato nella figura 2.1.15.

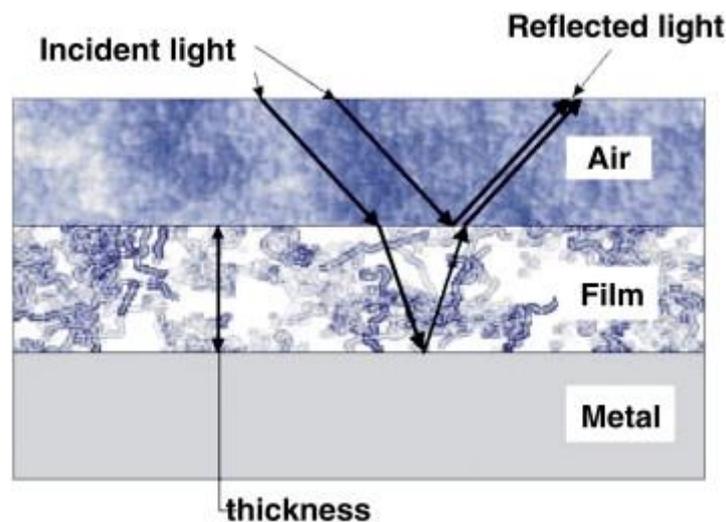


Fig. 2.1.15 le soluzioni di attacco vengono manipolate chimicamente per ottenere una colorazione precisa formando uno strato stabile, tipicamente di 0,04–0,5  $\mu\text{m}$  di spessore sulla superficie del campione. Questi film sottili sono costituiti da ossidi, solfuri o composti complessi di molibdato e presentano una gamma di colori attribuiti agli effetti di interferenza [2.1.12]

Questo tipo di attacco svolge un ruolo significativo nell'analisi e nella caratterizzazione dei materiali, fornendo preziose informazioni sulle loro caratteristiche microstrutturali.

#### Meccanismi dell'attacco metallografico colorato

Interazione degli attacchi metallografici con i costituenti microstrutturali

I meccanismi dell'attacco colorato implicano l'interazione selettiva con specifici costituenti microstrutturali, come mostrato nella figura 2.1.16. Diversi agenti di attacco mostrano affinità diverse verso diverse fasi, inclusioni o bordi dei grani, con conseguente formazione di colore distinta.

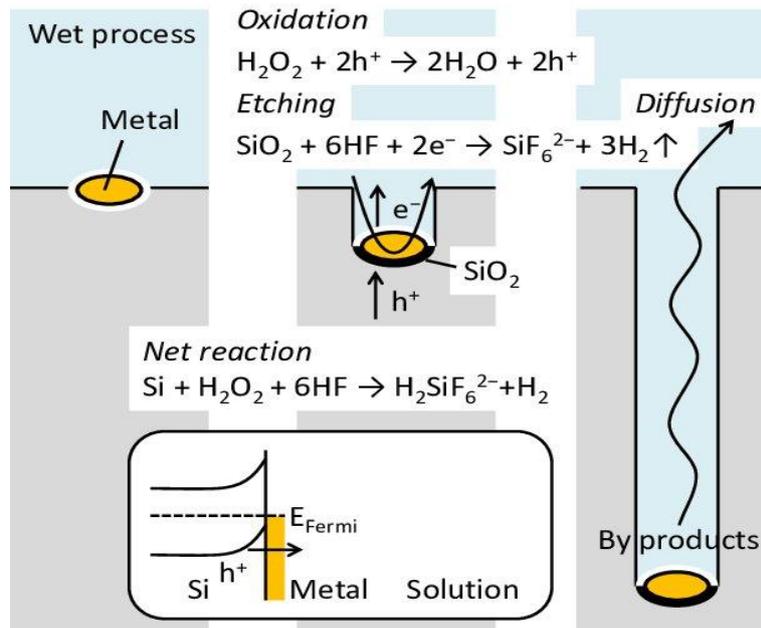


Fig. 2.1.16 Meccanismo semplificato per l'attacco chimico assistito da metalli (MaCE) del silicio in soluzione mista di HF e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [2.1.13].

Gli attacchi possono reagire in modo diverso con i costituenti a causa di fattori quali la composizione chimica, l'orientamento cristallografico e le condizioni della superficie. Queste interazioni possono portare alla formazione di composti o complessi colorati sulla superficie delle caratteristiche microstrutturali, rendendole più visibili e distinguibili.

### Principi di formazione del colore

Il colore si forma a causa dell'assorbimento, della riflessione o dell'interferenza di specifiche lunghezze d'onda della luce da parte dei composti o complessi colorati formati sulla superficie, come mostrato nelle figure 2.1.17 (a sinistra) e 2.1.18 (a destra).

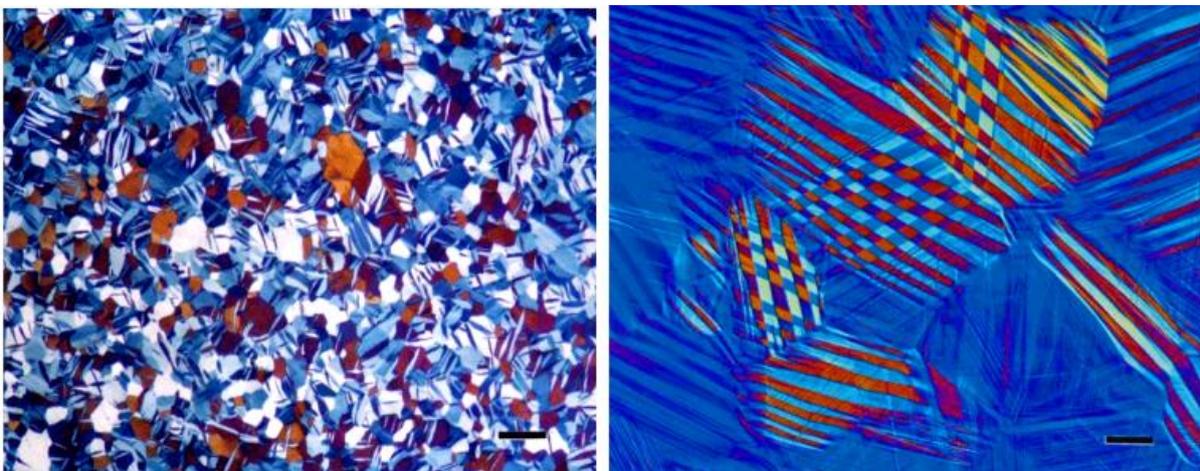


Fig. 2.1.17 (a sinistra) e 2.1.18 (a destra): struttura del grano su Zr ad elevata purezza (a sinistra) lavorato a caldo e trafilato a freddo (notare i gemelli meccanici) e visto in luce

polarizzata e di Spangold (Au – 19Cu -5Al) che è stato lucidato e sottoposto a ciclo attraverso l'effetto memoria di forma per produrre martensite e l'illuminazione ad interferenza differenziale Nomarski è stata utilizzata per visualizzare lo sconvolgimento della superficie dovuto alla reazione di taglio sulla superficie libera. Le barre di ingrandimento sono rispettivamente 100 e 50  $\mu\text{m}$  [2.1.14].

I colori prodotti dall'attacco (tinta) sono visibili sotto illuminazione a campo chiaro e in molti casi si ottiene un ulteriore miglioramento utilizzando la luce polarizzata. I colori vengono sviluppati per interferenza allo stesso modo della colorazione a caldo o della deposizione sottovuoto. Come notato, il colore è determinato dallo spessore della pellicola, solitamente nella sequenza giallo, rosso, viola, blu e verde se osservata utilizzando la luce bianca. Con i sistemi anodici il film si forma solo sulla fase anodica, ma il suo spessore può variare con l'orientamento cristallografico della fase. Per i sistemi catodici, poiché lo spessore del film sulla fase catodica è generalmente costante, viene prodotto un solo colore, che varierà man mano che il film cresce durante l'attacco. Pertanto, per ottenere ogni volta lo stesso colore, la durata dell'attacco deve essere costante. Ciò può essere ottenuto cronometrando l'attacco e osservando il colore macroscopico del campione durante la colorazione.

### Fattori che influenzano lo sviluppo del colore

Diversi fattori possono influenzare lo sviluppo del colore nell'acquaforte colorata. Questi includono la composizione e la concentrazione dell'attacco metallografico, la temperatura, il tempo di attacco e la preparazione della superficie del campione, come nelle figure 2.1.19 e 2.1.20. Inoltre, la presenza di elementi di lega, impurità o orientamenti cristallografici specifici possono influenzare l'intensità e il contrasto del colore.

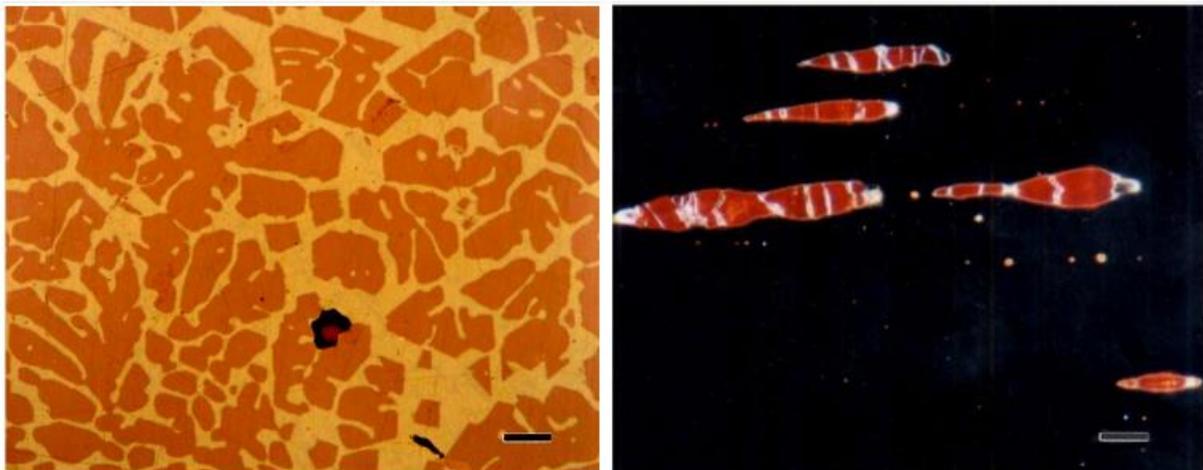


Fig. 2.1.19 (a sinistra) e 2.1.20 (a destra) che mostrano il colore naturale rossastro-viola dell'intermetallico  $\text{AuAl}_2$  (a sinistra) in campo chiaro e il caratteristico colore rosso rubino dell'ossido rameoso nell'illuminazione in campo scuro (campione di rame arsenicale a passo duro) . Le barre di ingrandimento sono rispettivamente 50 e 10  $\mu\text{m}$  [2.1.14].

Comprendere questi fattori è fondamentale per ottenere uno sviluppo del colore e un contrasto ottimali. Per ottenere risultati affidabili e riproducibili sono necessari un attento controllo e l'ottimizzazione dei parametri.

L'attacco colorato è particolarmente utile quando le caratteristiche microstrutturali di interesse non sono chiaramente distinguibili nel campione. Consente una migliore osservazione ed esame al microscopio ottico, facilitando una migliore comprensione della composizione, della struttura e delle proprietà del materiale.

Molti metalli incisi con reagenti standard per rivelare i confini dei grani spesso producono solo un'alta percentuale dei confini, piuttosto che tutti i confini. I coloranti, tuttavia, rivelano completamente la struttura della grana. Nel caso dei metalli con grani contenenti geminati, può essere molto difficile valutare la dimensione del grano quando un agente di attacco standard rivela una porzione del grano e i confini dei geminati. Infatti, con un campione del genere può essere piuttosto difficile effettuare una misurazione precisa della dimensione del grano, anche manualmente, in quanto distinguere tra confine del grano e confine gemello (quest'ultimo deve essere ignorato nella misurazione) non è semplice. Tuttavia, con una microstruttura incisa a colori è relativamente facile separare i grani dai confini gemelli, almeno manualmente. Inoltre, i film crescono in funzione dell'orientamento dei cristalli. Pertanto, è possibile rilevare qualsiasi orientamento cristallografico preferito dalla ristrettezza della gamma di colori presente. Un'ampia gamma di colori è presente in uno schema casuale nella figura 2.1.21.



Fig. 2.1.21 L'orientamento del cristallo anodizzato di alluminio superpuro è evidenziato con il reagente Barker (30 Vcc, 2 minuti). La barra di ingrandimento è lunga 200  $\mu\text{m}$  [2.1.14]

L'orientamento del cristallo anodizzato in alluminio super puro è casuale. Se nei grani è presente una gamma ristretta di colori, viene evidenziato un orientamento preferito. Le composizioni di tintura sono riportate alla fine del capitolo. La preparazione dei campioni deve essere migliore quando si utilizzano metodi a colori rispetto ai metodi in bianco e nero perché le pellicole cresciute epitassialmente sono sensibili al danno residuo indotto dalla preparazione che non è stato rimosso. Questo livello di preparazione è richiesto nel lavoro di analisi delle immagini e può essere facilmente ottenuto da un metallografo esperto con l'attrezzatura adeguata. La lucidatura elettrolitica non è necessaria per ottenere superfici prive di danni. Gli attacchi più comuni sono quelli che depositano una pellicola di interferenza a base di solfuro sul campione, come mostrato nelle Figure 2.1.22 e 2.1.23.

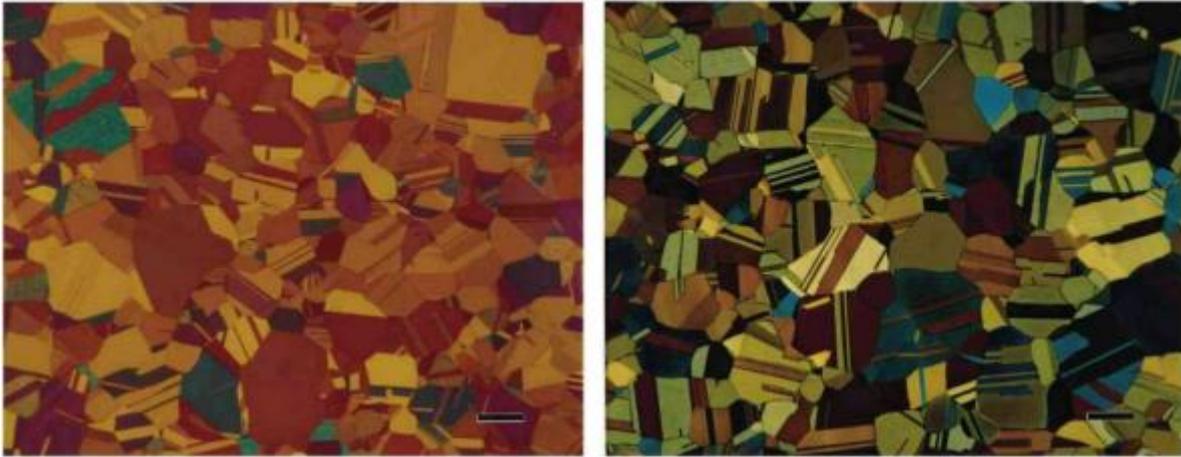


Fig. 2.1.22 e 2.1.23: Struttura a grana gemellata FCC di cartuccia di ottone, Cu - 30% Zn, dopo riduzione a freddo e ricottura completa, tinta mordenzata con i reagenti di Klemm I (a sinistra) e III di Klemm (a destra) e vista con polarizzazione tinta leggera e sensibile. Le barre di ingrandimento sono lunghe 200  $\mu\text{m}$  [2.1.14]

Klemm e Beraha hanno sviluppato gli attacchi a base di solfuro più utilizzati utilizzando tiosolfato di sodio,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , e metabisolfito di potassio,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ . I reagenti I, II, III di Klemm (Figure 2.1.22 e 2.1.23) e uno dei reagenti di Berahas utilizzano entrambi gli ingredienti (Figura 2.1.24), mentre Beraha raccomanda un intervallo di concentrazioni di HCl utilizzate con il metabisolfito di potassio (Figura 2.1.25) per incidendo una varietà di leghe a base di ferro.

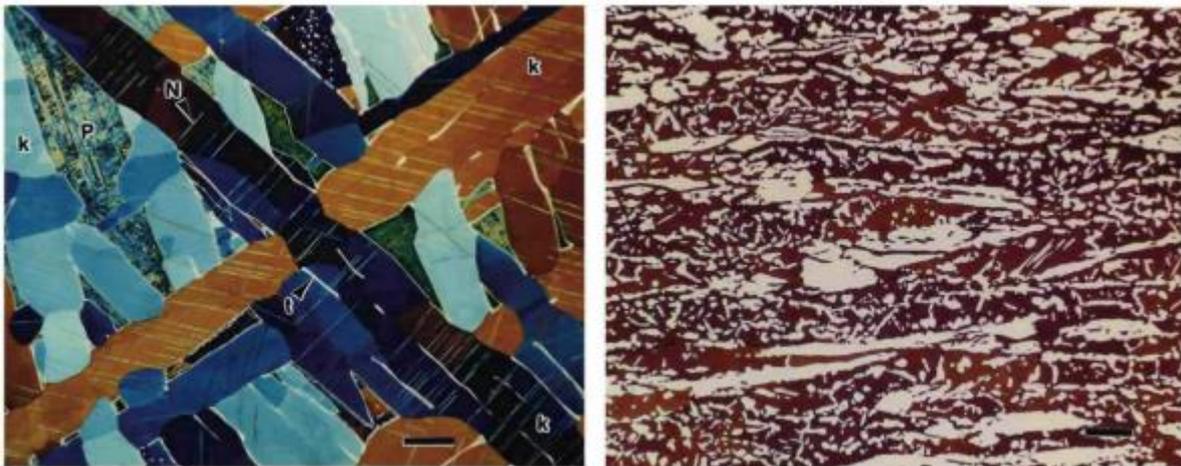


Fig. 2.1.24 e 2.1.25: Struttura a grana fine di ottaedrite del meteorite Gibeon (a sinistra) rivelata con il reagente Berahas (100 mL di acqua, 10 g di  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  e 3 g di  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) e ferrite in una piastra di acciaio inossidabile duplex 7 Mo PLUS rivelata utilizzando il reagente di Berahas (85 ml di acqua, 15 ml di HCl, 1 g di  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ). Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 500 e 50  $\mu\text{m}$  [2.1.14].

Questi agenti aggressivi possono essere utilizzati per colorare ferrite e martensite in ghisa, acciai al carbonio e basso legati. I reagenti a base di HCl variano ampiamente in concentrazione e possono essere utilizzati per colorare le strutture dei grani degli acciai inossidabili (Figura 2.1.26), leghe a base di Ni e a base di Co. Il metabisolfito di sodio è stato utilizzato in diverse concentrazioni, da circa 1 a 20 g per 100 ml di acqua, ed è un agente chimico sicuro, affidabile e utile per ferri e acciai (Figura 2.1.27).

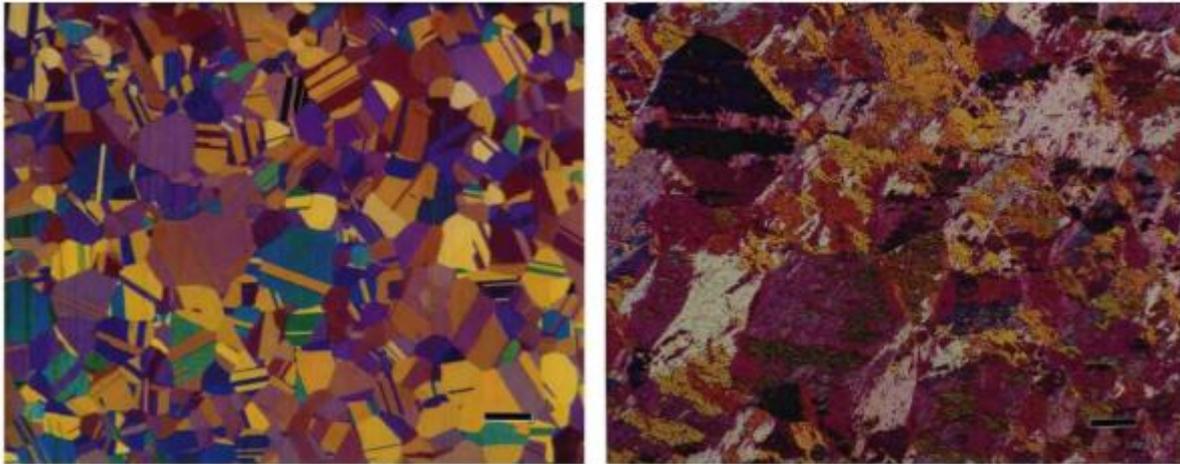


Fig. 2.1.26 e 2.1.27: Struttura a grani gemellati FCC dell'acciaio inossidabile di qualità Custom Flo 302 rivelata utilizzando il reagente Berahas BI e struttura a grani martensitici di acciaio ultra-austenitizzato (1093 °C) AerMet 100 ad altissima resistenza rivelata utilizzando Metabisolfito di sodio al 10%. Entrambi visualizzati con luce polarizzata più tinta sensibile. Le barre di ingrandimento sono lunghe 100  $\mu\text{m}$  [2.1.14]

Beraha ha sviluppato attacchi a base di acido solfamminico, un acido organico debole, che non è stato utilizzato molto, sebbene siano abbastanza utili, affidabili e facili da impiegare. I reagenti a base di acido solfamminico sono applicabili alla ghisa, agli acciai a basso tenore di carbonio e legati, agli acciai per utensili e agli acciai inossidabili martensitici (Figura 2.1.27).

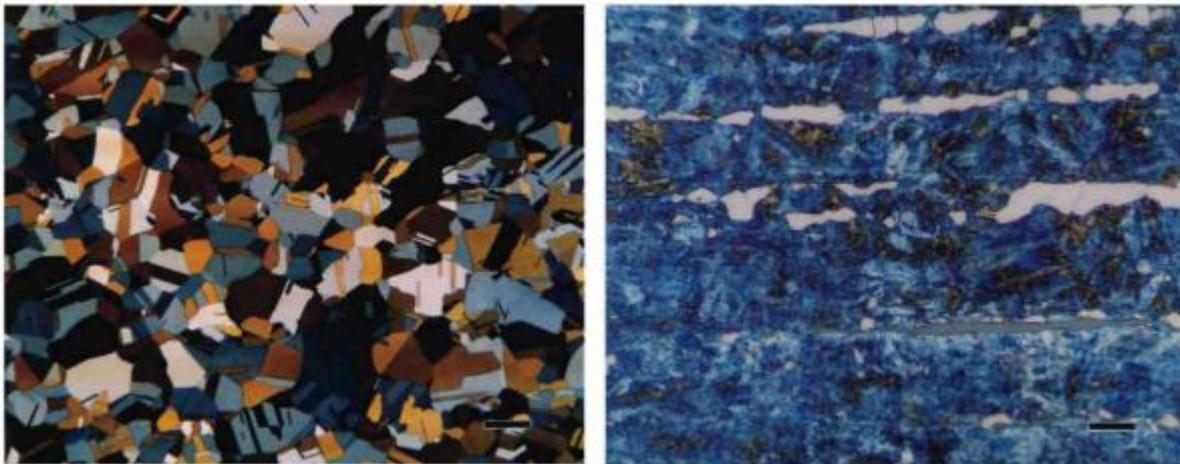


Fig. 2.1.27 e 2.1.28: Struttura del grano FCC gemellato in Fe-39% Ni rivelata dal reagente acido solfamminico di Beraha (a sinistra) e struttura del grano martensite temperato dell'acciaio inossidabile martensitico tipo 416 del Carpenter Project 70 rivelata con il reagente CdS di Beraha (a destra). I grani bianchi sono ferrite delta e le inclusioni grigie sono solfuri. Visto con luce polarizzata più tinta sensibile. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 100 e 200  $\mu\text{m}$ . [2.1.14]

Inoltre, Beraha ha anche sviluppato due attacchi colorati piuttosto specifici che depositano pellicole di solfuro di cadmio (Figura 2.1.28) o di solfuro di piombo (Figura 2.1.29) sulle superfici degli acciai e di 4 leghe a base di rame. Questi due agenti di attacco sono piuttosto utili, anche se noiosi da realizzare.



Fig. 2.1.29 e 2.1.30: Micrografia a cartuccia in ottone mostrata nelle Figure 2.1.22 e 2.1.23 tinta incisa con il reagente PbS di Beraha (a sinistra) e cementite in una lega binaria Fe-1% C laminata a caldo colorata con molibdato di sodio di Beraha reagente (a destra). Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 200 e 20  $\mu\text{m}$  [2.1.14].

Il suo reagente CdS è utile per acciai al carbonio e legati, acciai per utensili e acciai inossidabili ferritici, martensitici e temprabili per precipitazione, mentre il reagente PbS svolge un lavoro eccellente sulle leghe a base di rame e può essere utilizzato per colorare di bianco i solfuri negli acciai (il campione viene premordenzato con nital e l'attacco colora la matrice annerita, in modo che siano visibili i solfuri bianchi). Infine, ha inoltre sviluppato due attacchi che utilizzano ioni molibdato nell'acido nitrico. Colorano la cementite negli acciai (Figura 2.1.30).



Fig. 2.1.31 e 2.1.32: Cementite nella superficie di fusione in conchiglia di ghisa grigia incisa con il reagente acido selenico di Beraha per ghisa (a sinistra) e fase alfa e fase beta FCC gemellate (chiazze e delineate) in Cu-40% Zn rivelato utilizzando il reagente acido selenico di Beraha per le leghe di rame. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 50 e 20  $\mu\text{m}$  [2.1.14].

Esistono anche attacchi che depositano il selenio elementare sulla superficie degli acciai (Figura 2.1.31), leghe a base di nichel e leghe a base di rame (Figura 2.1.32). Esistono numerosi altri reagenti che sono stati sviluppati da una varietà di metallografi. Lichtenegger e Bloch, ad esempio, hanno



sviluppato un reagente insolito che colorerà l'austenite (Figura 2.1.33) negli acciai inossidabili duplex, anziché la ferrite (come fanno quasi tutti gli altri).

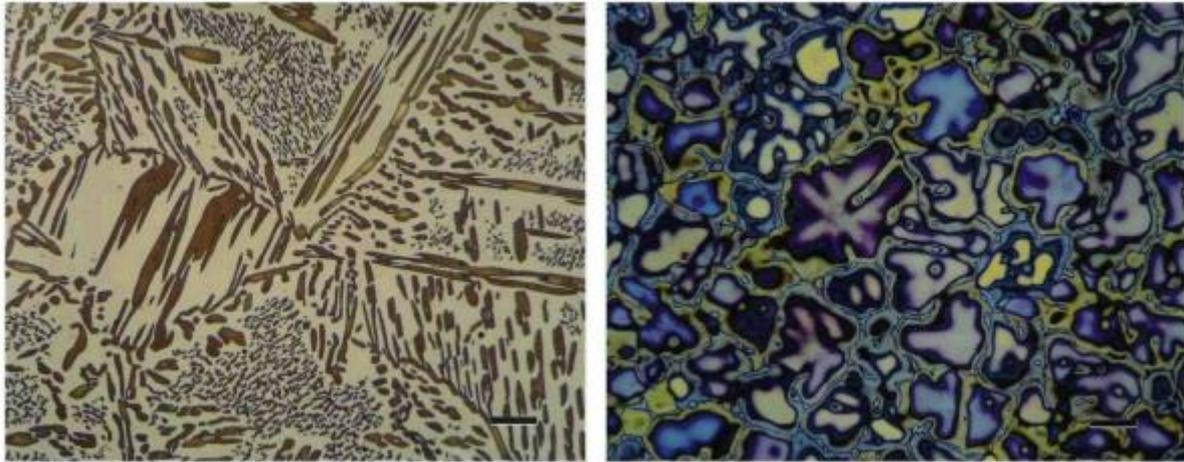


Fig. 2.1.33 e 2.1.34: Austenite colorata in acciaio inossidabile duplex colato di grado 5A ASTM A890 con il reagente LBI (a sinistra) e la struttura dei grani fusi dell'alluminio 206 rivelata utilizzando il reagente di Week per le leghe di Al (a destra). Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 100 e 50  $\mu\text{m}$  [2.1.14].

Week ha sviluppato una serie di attacchi, utilizzandone molti nella ricerca. Diversi sono stati sviluppati per colorare l'alluminio (Figura 2.1.34) o le leghe di titanio (Figura 2.1.35).

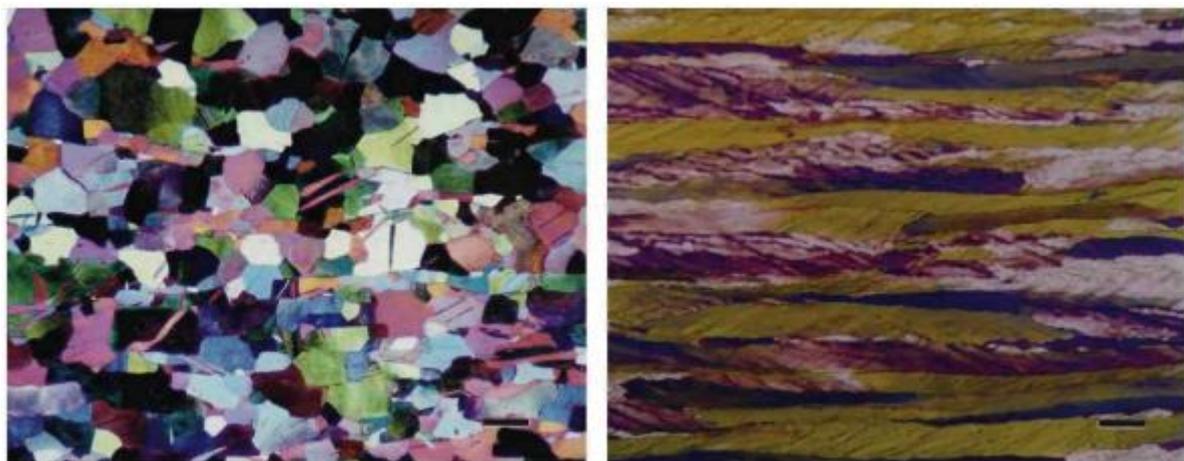


Fig. 2.1.35 e 2.1.36: Struttura del grano di CP Ti laminato a freddo (ASTM F67, Grado 2) contenente gemelli meccanici (a sinistra) incisi con il reagente di Week modificato e molibdeno puro laminato a freddo (a destra) colorato con il reagente sviluppato da Laboratorio nazionale di Oak Ridge. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 100 e 20  $\mu\text{m}$  [2.1.14]

In ogni caso, è più facile sviluppare un buon colore con le leghe fuse che con le leghe lavorate. Due agenti di attacco si sono rivelati utili per colorare la fase theta,  $\text{AlCu}_2$ , nelle leghe Al-Cu; Lienard ha sviluppato uno dei più facili da usare. Sono stati sviluppati diversi agenti mordenzanti colorati per il molibdeno (Figura 2.1.36) e per il tungsteno [2.1.15].



## Applicazioni dell'attacco metallografico colorato

Nel contesto della metallurgia e dei giunti saldati, l'attacco metallografico colorato è una tecnica preziosa che può essere utilizzata per applicazioni specifiche:

**Analisi dei difetti di saldatura:** può essere utilizzata per rivelare ed evidenziare difetti nei giunti saldati, come porosità, crepe, inclusioni e mancanza di fusione. Utilizzando attacchi specifici, è possibile enfatizzare diverse caratteristiche della saldatura, aiutando nella valutazione della qualità e dell'integrità della saldatura.

**Esame microstrutturale:** consente l'esame della microstruttura della saldatura e della zona alterata dal calore (ZTA). Diversi costituenti microstrutturali possono reagire in modo diverso ai vari agenti di attacco, consentendo ai ricercatori e agli ispettori di distinguere tra le fasi e identificare potenziali problemi legati alla struttura e alla distribuzione dei grani.

**Identificazione della fase:** in alcuni casi, le saldature possono essere costituite da più fasi o leghe. L'attacco può aiutare a differenziare queste fasi rivelando selettivamente le loro caratteristiche microstrutturali uniche. Queste informazioni sono cruciali per comprendere la composizione e le proprietà del giunto saldato.

**Rilevamento di composti intermetallici:** la saldatura può portare alla formazione di composti intermetallici, che possono avere effetti significativi sulle proprietà meccaniche della saldatura. L'incisione colorata può aiutare a identificare e caratterizzare questi composti, aiutando a valutare il loro potenziale impatto sulle prestazioni della saldatura.

**Analisi delle tensioni residue:** l'attacco colorato combinato con tecniche specifiche, come i metodi di rimozione degli strati, può essere utilizzata per analizzare e visualizzare la distribuzione delle tensioni residue nei giunti saldati. Queste informazioni sono vitali per valutare l'integrità strutturale e il potenziale di cedimento correlato allo stress.

**Esame dei confini del grano:** l'attacco colorato può rivelare i confini del grano nel metallo saldato e nella ZTA. La caratterizzazione dei bordi del grano è essenziale per valutare la suscettibilità alla corrosione intergranulare e per determinare le proprietà meccaniche complessive della saldatura.

Vale la pena notare che la selezione degli attacchi e dei metodi di preparazione appropriati è fondamentale per applicazioni metallurgiche. Leghe e processi di saldatura diversi possono richiedere soluzioni e condizioni di attacco specifiche per ottenere risultati accurati e significativi. Inoltre, nella metallurgia moderna, altre tecniche quantitative e non distruttive, come la microscopia, la microscopia elettronica e la diffrazione dei raggi X, vengono spesso utilizzate insieme a questo tipo di attacchi per un'analisi completa dei giunti saldati.

### Conclusioni

Gli esempi mostrati hanno dimostrato il grande valore del colore e dell'incisione a tinta per l'esame delle microstrutture dei metalli. Esistono soluzioni per sviluppare il colore con la maggior parte dei sistemi di leghe commerciali. Gli esempi dimostrano chiaramente il valore di questi reagenti nel rivelare completamente la struttura dei grani, anche per i campioni più difficili da attaccare. Inoltre, sono di natura selettiva e possono essere molto utili per studi metallografici quantitativi. Gli attacchi rivelano la segregazione in modo molto chiaro e sia EDS che WDS possono essere eseguiti su una superficie mordenzata senza problemi dovuti allo strato superficiale di interferenza.

### Composizioni attacchi metallografici colorati

Le tabelle 2.1.6 e 2.1.7 presentano le ricette per i comuni reagenti [2.1.15].

Tabella 2.1.6

Reagenti colorati	Reagenti per ricette
Klemm	50 mL di soluzione madre, 1 g di $K_2S_2O_5$ (la soluzione madre è satura di acqua con $Na_2S_2O_3$ )
Klemm III	5 mL di soluzione madre, 45 mL di acqua, 20 g di $K_2S_2O_5$ (soluzione madre come per Klemm's I)
Beraha 10/3	10 g di $Na_2S_2O_3$ , 3 g di $K_2S_2O_5$ e 100 ml di acqua
Beraha BI	100 mL di soluzione madre (1000 mL di acqua, 200 mL di HCl, 24 g di $NH_4FHF$ ) più 0,1 – 0,2 g di $K_2S_2O_5$ per l'acciaio inossidabile martensitico e 0,3 – 0,6 g di $K_2S_2O_5$ per gli acciai inossidabili austenitici e ferritici.
Reagente acido solfammico di Beraha n. III	100 mL di acqua, 3 g di $K_2S_2O_5$ , 2 g di $NH_2SO_3H$ (sono state pubblicate altre due composizioni simili) per acciai al carbonio e legati.
Reagente acido solfammico di Beraha n. IV	100 mL di acqua, 3 g $K_2S_2O_5$ , 1 g $NH_2SO_3H$ , 0,5 – 1 g $NH_4FHF$ per acciai per utensili ad alto contenuto di Cr e acciai inossidabili martensitici.
Reagenti CdS e PbS di Beraha	Soluzione madre di CdS: 1000 mL di acqua, 240 g di $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ , 20-25 g di cloruro di cadmio (o acetato di cadmio), 30 g di acido citrico; Soluzione madre di PbS: 1000 mL di acqua, 240 g di $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ , 30 g di acido citrico, 24 g di acetato di piombo.

Mescolare ciascuna soluzione nell'ordine preciso indicato.

Tabella 2.1.7

Reagenti colorati	Reagenti per ricette
Reagente per molibdato di sodio di Beraha	Soluzione madre: 1000 ml di acqua, 10 g di $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ . Eliminare circa 100 ml della soluzione madre e aggiungere $HNO_3$ per portare il pH a 2,5 – 3,0. Per gli acciai, aggiungere piccole quantità di $NH_4FHF$ per controllare la colorazione (nessuna quantità per la ghisa). Colori cementite.
Reagente acido selenico di Beraha per ghisa	100 mL di etanolo, 2 mL di HCl, 1 mL di acido selenico
Reagente acido selenico di Beraha per leghe di Cu	300 ml di etanolo, 2 ml di HCl, 0,5-1 ml di acido selenico
Reagente Lichtenegger e Blöch LB1	20 g di bifluoruro di ammonio, $NH_4FHF$ e 0,5 g di metabisolfito di potassio, $K_2S_2O_5$ , sciolti in 100 mL di acqua (usare acqua calda). Mordenzare a 25-30 °C.
Reattivo di Weck per Al	100 ml di acqua, 4 g di $KMnO_4$ e 1 g di NaOH
Reagente di Weck modificato per Ti	100 mL di acqua, 25 mL di etanolo e 2 g di bifluoruro di ammonio. La formula originale specificava 50 ml di etanolo, ma questo produce artefatti da incisione.

## 2.2.4. Differenze tra lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica, attacco colorato

La lucidatura elettrolitica, la lucidatura chimica e l'attacco colorato sono tre diverse tecniche di trattamento superficiale utilizzate per i metalli, ciascuna con principi e applicazioni distinti, vale a dire:

### Rilevamento e valutazione dei difetti superficiali

Il rilevamento e la valutazione dei difetti superficiali sono fondamentali nell'analisi dei materiali per valutare la qualità e l'integrità della superficie. Ciascuna delle tecniche di trattamento superficiale (lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica e attacco colorato) offre vantaggi e considerazioni specifici per il rilevamento e la valutazione dei difetti superficiali:

rilevamento e valutazione dei difetti superficiali:

A. Rilevamento e valutazione dei difetti superficiali dopo la lucidatura elettrolitica: la lucidatura elettrolitica generalmente produce superfici lisce e prive di difetti grazie alla rimozione delle irregolarità superficiali durante il processo. Difetti superficiali come graffi, cavità e cricche hanno meno probabilità di essere introdotti durante la lucidatura elettrolitica, rendendola adatta per analisi sensibili ai difetti.

Dopo la lucidatura elettrolitica, come mostrato nella figura 2.1.37, la superficie può essere ispezionata visivamente o osservata al microscopio per rilevare eventuali difetti rimanenti. Per una valutazione più dettagliata dei difetti, è possibile utilizzare tecniche avanzate come la microscopia elettronica a scansione (SEM) per esaminare la superficie lucida a ingrandimenti maggiori.



Fig. 2.1.37 Rilevamento dei difetti superficiali prima e dopo la lucidatura elettrolitica per il rame 101 [2.1.16]

B. Rilevamento e valutazione dei difetti superficiali dopo la lucidatura chimica: la lucidatura chimica può introdurre difetti superficiali, soprattutto se il processo non viene controllato attentamente. Difetti superficiali come cavità di incisione, rugosità superficiale e altre irregolarità possono essere introdotti durante la lucidatura chimica, influenzando potenzialmente la valutazione del difetto. Particolare attenzione dovrebbe essere prestata per evitare di interpretare erroneamente i difetti derivanti dal processo di lucidatura chimica stesso piuttosto che i difetti intrinseci del materiale, come

illustrato nella figura 2.1.38. Tecniche avanzate come la profilometria ottica o la microscopia a forza atomica (AFM) possono essere utilizzate per valutare quantitativamente la rugosità superficiale e rilevare i difetti introdotti durante la lucidatura chimica.

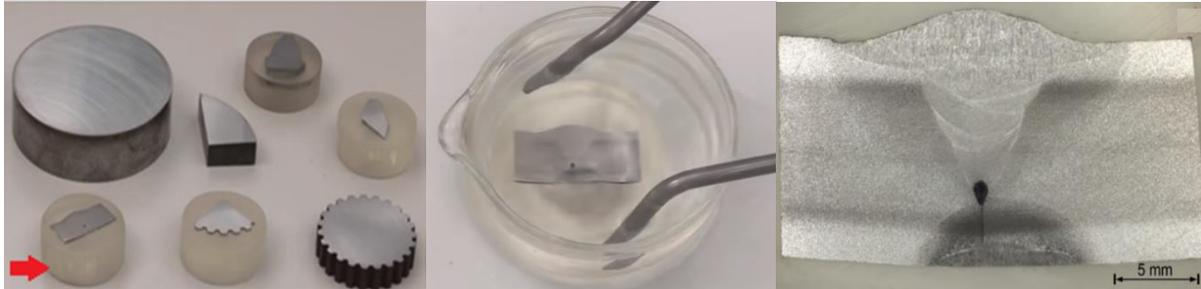


Fig. 2.1.38 Rilevamento dei difetti superficiali prima e dopo la lucidatura chimica dell'acciaio inossidabile [2.1.17]

C. Rilevamento e valutazione dei difetti superficiali dopo l'attacco colorato: l'attacco colorato può aiutare a evidenziare e rivelare difetti sulla superficie metallica dovuti ai colori o alle sfumature contrastanti prodotti da attacchi specifici, come presentato nella figura 2.1.39. Difetti come crepe, inclusioni e porosità possono essere identificati e valutati più facilmente dopo l'attacco colorato. La tecnica è particolarmente utile per l'analisi sensibile ai difetti di giunti saldati e altri componenti critici. Tuttavia, è essenziale garantire che il mordenzante colorato non mascheri o interferisca con il rilevamento di alcuni tipi di difetti.

In tutti i casi, la scelta della tecnica di trattamento superficiale dipende dai requisiti specifici di rilevamento e valutazione dei difetti. È importante considerare il potenziale impatto del trattamento superficiale stesso sull'introduzione dei difetti e garantire che siano attuati controlli adeguati durante il processo di preparazione del campione. Inoltre, tecniche complementari, come metodi di test non distruttivi (NDT), come test ad ultrasuoni, test con liquidi penetranti e ispezione a raggi X, possono essere utilizzate insieme al trattamento superficiale per fornire una valutazione completa dei difetti superficiali e della qualità del materiale.

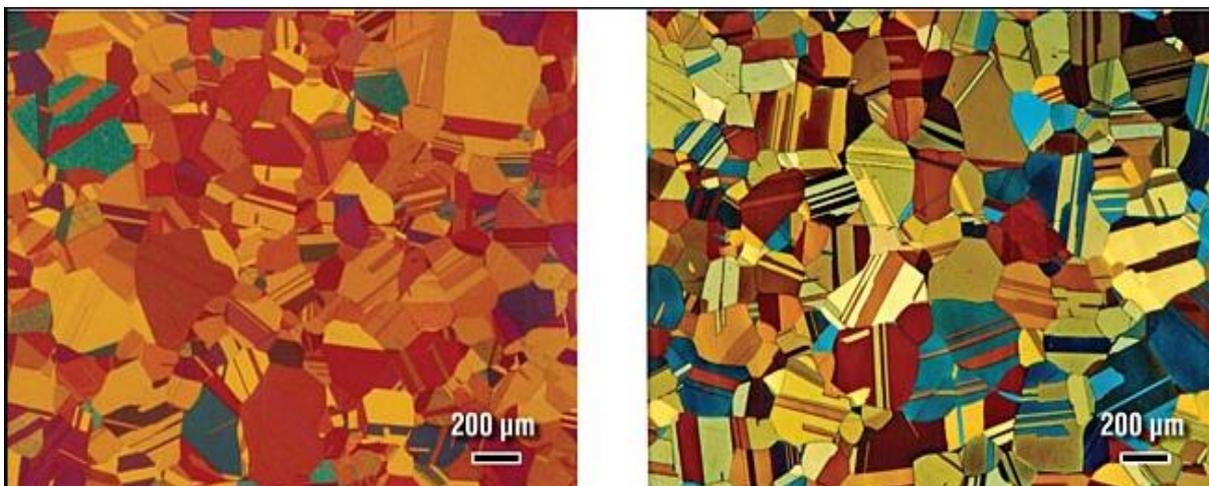


Fig. 2.1.39 Osservare la microstruttura del campione, l'attacco con la soluzione Berahal (3 g  $K_2S_2O_5$ , 10 g  $Na_2S_2O_3$  in 100 mL di acqua distillata) è stato eseguito dopo una tecnica tradizionale di preparazione del campione [2.1.14]

### Valutazione dei confini del grano

La valutazione dei bordi dei grani è un aspetto importante dell'analisi microstrutturale, soprattutto nella metallurgia e nella scienza dei materiali. Ciascuna delle tecniche di trattamento superficiale (lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica e incisione colorata) presenta vantaggi e considerazioni per la valutazione del confine dei grani:

A. Valutazione dei bordi dei grani dopo la lucidatura elettrolitica: i bordi dei grani sono generalmente ben conservati e chiaramente visibili dopo la lucidatura elettrolitica, rendendolo adatto per l'analisi dei bordi dei grani, come presentato nella figura 2.1.40.

La microscopia ottica di alta qualità può essere utilizzata per osservare e analizzare i confini dei grani, consentendo l'identificazione della dimensione, della forma e della distribuzione dei grani. La diffrazione di retrodiffusione elettronica (EBSD) viene spesso utilizzata per ottenere informazioni dettagliate sull'orientamento cristallografico e sul carattere del bordo del grano dopo la lucidatura elettrolitica.



Fig. 2.1.40 Valutazione del limite del grano dopo la lucidatura elettrolitica per il rame 101  
[2.1.7]

B. Valutazione dei confini del grano dopo la lucidatura chimica: è necessario prestare attenzione per garantire che il processo di lucidatura chimica non alteri in modo significativo i confini del grano. Potrebbero essere necessarie tecniche di microscopia ad alta risoluzione, come SEM e TEM, per valutare i confini dei grani dopo la lucidatura chimica, come mostrato nella Figura 2.1.41. L'analisi dei bordi dei grani può essere complessa in alcuni materiali a causa della possibilità di un'incisione preferenziale lungo i bordi dei grani.



Fig. 2.1.41 Valutazione del limite del grano dopo la lucidatura chimica per l'acciaio inossidabile

[2.1.17]

C. Valutazione del contorno del grano dopo l'attacco colorato: può essere vantaggioso per la valutazione del confine del grano poiché evidenzia i confini del grano con colori o sfumature contrastanti. La tecnica consente la visualizzazione e l'identificazione dei confini dei grani, facilitando l'analisi delle dimensioni e della distribuzione dei grani. L'attacco può essere particolarmente utile per valutare il comportamento dei bordi dei grani nelle saldature e in altri materiali multifase. Tuttavia, è necessario prestare attenzione per garantire che l'attacco colorato non oscuri o distorca i bordi dei grani, come mostrato nella figura 2.1.42.

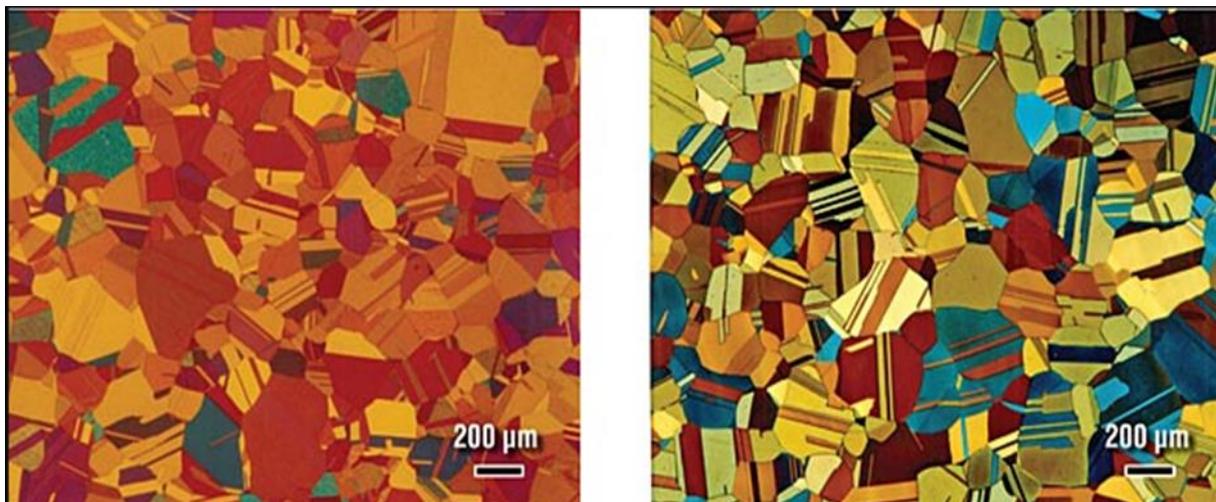


Fig. 2.1.42 Struttura a grana gemellata FCC di cartuccia in ottone, Cu-30% Zn, dopo riduzione a freddo del 50% e ricottura completa, incisa con i reagenti di Klemm I (a sinistra) e di Klemm III (a destra) e osservata con luce polarizzata più tinta sensibile. Le barre di ingrandimento sono lunghe 200  $\mu\text{m}$ . [2.1.14].

In generale, tutte e tre le tecniche di trattamento superficiale possono essere utilizzate per la valutazione del bordo grano, ma è necessaria un'attenta considerazione per scegliere il metodo più appropriato in base al tipo di materiale, agli obiettivi di analisi e al potenziale impatto del trattamento superficiale stesso. Tecniche di microscopia avanzate come SEM, TEM ed EBSD vengono spesso

utilizzate per ottenere informazioni dettagliate sui bordi dei grani, sull'orientamento cristallografico e sulle caratteristiche dei bordi dei grani dopo il trattamento superficiale. Inoltre, è fondamentale utilizzare procedure standardizzate e tecniche convalidate per garantire un'analisi dei bordi dei grani affidabile e accurata.

### Differenze tra i processi

Inoltre, presenteremo un confronto tra i processi di lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica e attacco colorato:

LUCIDATURA ELETTROLITICA	LUCIDATURA CHIMICA	ACQUAFORTE COL- ORATA

### Principio:

Lucidatura elettrolitica: processo elettrochimico che utilizza una corrente elettrica per levigare la superficie metallica mediante la dissoluzione controllata delle irregolarità superficiali.

Lucidatura chimica: processo chimico che prevede la dissoluzione selettiva di un sottile strato di metallo attraverso una reazione chimica per ottenere una superficie lucida e brillante.

Attacco colorato: Tecnica metallografica che utilizza agenti mordenzanti specifici per rivelare ed evidenziare diverse caratteristiche microstrutturali con colori o sfumature contrastanti.

### Finitura superficiale:

Lucidatura elettrolitica: produce una superficie liscia a specchio con una deformazione meccanica minima.

Lucidatura chimica: crea un aspetto lucido e brillante, ma la superficie può essere interessata da artefatti o irregolarità introdotte.

Attacco colorato: Fornisce una superficie con colori o sfumature contrastanti, evidenziando le caratteristiche microstrutturali senza alterare significativamente la finitura superficiale.

LUCIDATURA ELETTROLITICA	LUCIDATURA CHIMICA	ATTACCO COLORATO

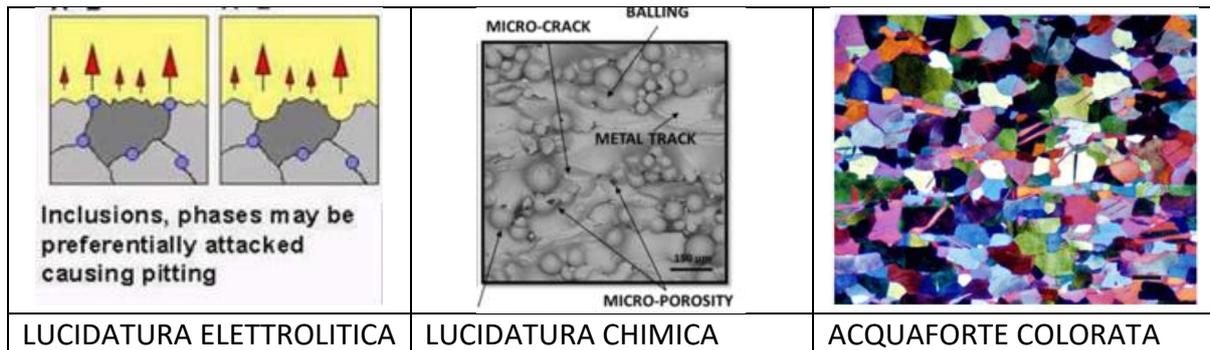


### Introduzione del difetto:

Lucidatura elettrolitica: riduce al minimo l'introduzione di difetti superficiali a causa della sua natura non meccanica.

Lucidatura chimica: può introdurre difetti superficiali o motivi di incisione a seconda del controllo della reazione chimica.

L'attacco colorato: in genere non introduce difetti, ma è necessario prestare attenzione per garantire che l'attacco colorato non oscuri alcuni già presenti



### Valutazione dei confini del grano:

Lucidatura elettrolitica: adatta per l'analisi dei bordi dei grani, fornendo bordi dei grani ben conservati e visibili come nella figura 2.1.43.

Lucidatura chimica: difficile per la valutazione del confine del grano a causa di potenziali artefatti introdotti durante il processo di attacco chimico.

Attacco colorato: utile per evidenziare i bordi dei grani con colori contrastanti, aiutando la valutazione dei bordi dei grani.

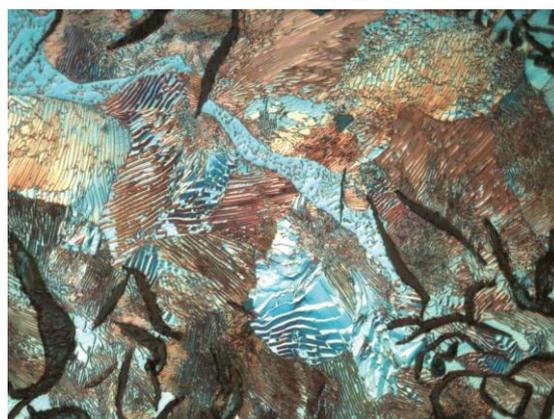


Fig. 2.1.43 Spaziatura interlamellare della perlite in una ghisa grigia [2.1.18]

### Rilevamento dei difetti superficiali:

Lucidatura elettrolitica: consente un rilevamento efficace dei difetti su superfici lisce con artefatti minimi.

Lucidatura chimica: può introdurre difetti superficiali, rendendo la valutazione dei difetti più complessa.

Attacco colorato: facilita l'identificazione dei difetti mediante colori contrastanti, come si può vedere nella figura 2.1.44, particolarmente utile per rilevare difetti in componenti critici.

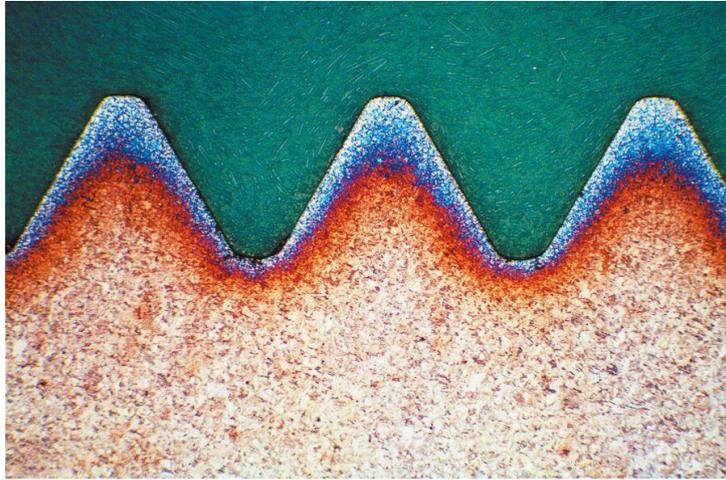


Fig. 2.1.44 Indurimento superficiale degli acciai [2.1.18]

#### **Analisi della microstruttura:**

Lucidatura elettrolitica: consente un esame microstrutturale accurato con interferenze minime.

Lucidatura chimica: richiede un attento controllo per evitare di interpretare erroneamente i difetti introdotti durante il processo.

Attacco colorato: utile per l'analisi microstrutturale, in particolare nelle saldature e nei materiali multifase, come si può vedere nella figura 2.1.45, evidenziando i costituenti microstrutturali.

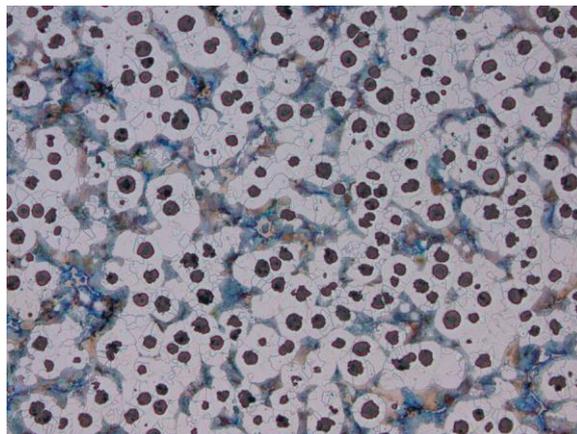


Fig. 2.1.45 Ghisa duttile con grafite sferoidale (obiettivo HC PL Fluotar 10x, campo chiaro).  
[2.1.18]

#### **Applicazioni:**

Lucidatura elettrolitica: utilizzata principalmente in metallografia per la preparazione di campioni per la microscopia e l'analisi microstrutturale.

Lucidatura chimica: applicata nell'industria elettronica, ottica, gioielleria e aerospaziale per ottenere finiture superficiali di alta qualità.

Attacco colorato: ampiamente utilizzata nella metallurgia e nella scienza dei materiali per l'esame microstrutturale di vari componenti metallici, come mostrato nella figura 2.1.46.



Fig. 2.1.46 Elettrolucidatura delle superfici: teoria e applicazioni [2.1.19]

In sintesi, ogni processo ha i suoi punti di forza e di debolezza e la scelta della tecnica dipende dai requisiti specifici dell'analisi, dal tipo di materiale e dal livello desiderato di finitura superficiale e precisione.

### Osservazioni finali

Questo capitolo ha fornito un'esplorazione approfondita della lucidatura elettrolitica, della lucidatura chimica e dell'attacco colorato, concentrandosi sulle loro definizioni, scopi, meccanismi e applicazioni nella scienza e nell'ingegneria dei materiali. Le reazioni elettrochimiche controllate della lucidatura elettrolitica offrono preziose informazioni sull'analisi della microstruttura, sul rilevamento dei difetti superficiali, sulla valutazione dei bordi dei grani e sulla preparazione del rivestimento superficiale, supportando lo sviluppo di materiali metallici avanzati.

La lucidatura chimica si è dimostrata efficace nella caratterizzazione della microstruttura, nel miglioramento della finitura superficiale, nell'identificazione delle fasi e nella valutazione dei materiali, con la sua capacità di rimuovere selettivamente il materiale migliorando la visibilità delle caratteristiche microstrutturali e delle caratteristiche dei difetti.

L'incisione colorata, attraverso l'interazione con i costituenti microstrutturali, è una tecnica preziosa per l'identificazione di fase, il rilevamento delle inclusioni e l'analisi della dimensione dei grani, fornendo un mezzo per visualizzare e differenziare varie caratteristiche microstrutturali in base al colore.

Queste tecniche offrono approcci complementari allo studio dei materiali metallici, con applicazioni che vanno dalla ricerca sui materiali all'analisi dei guasti e all'ottimizzazione dei processi.



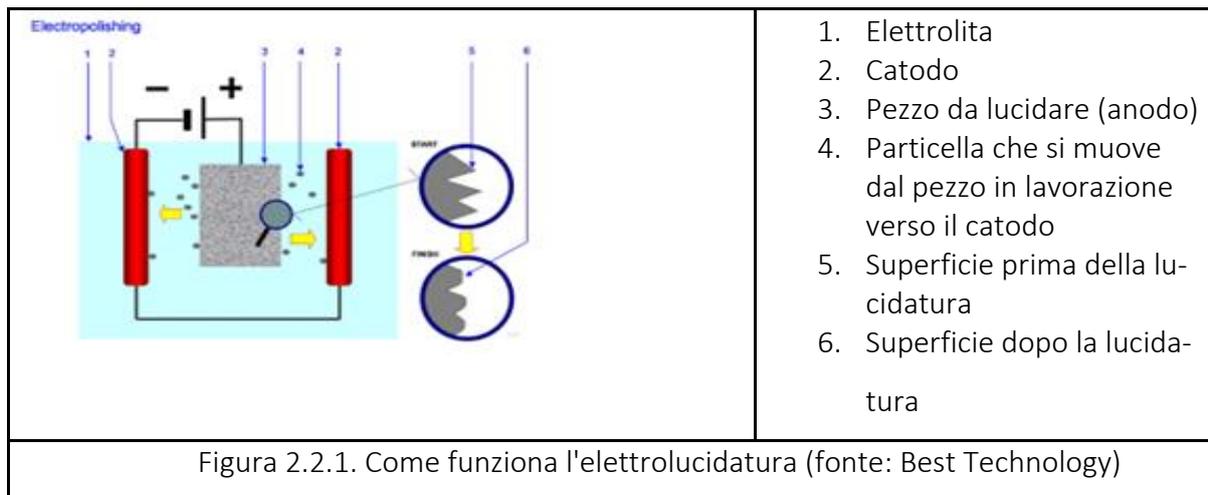
## Riferimenti

- [2.1.1] <https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=elettrolucidatura>;
- [2.1.2] <https://www.besttechnologyinc.com/electropolishing-equipment/how-does-electropolishing-work>;
- [2.1.3] <https://www.youtube.com/watch?v=H28Ebg2igbM>;
- [2.1.4] <https://www.quora.com/Perché-do-we-use-a-tre-elettrodi-sistema-per-analitica-elettrochimica>;
- [2.1.5] <https://www.ebsd.com/hints-and-tips/ebsd-sample-preparation/electrolyte-polishing-and-etching>;
- [2.1.6] Caratteristiche di lavorazione dell'elettrolucidatura dell'acciaio inossidabile (STS316L) E.-S. Lee, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2000) 16:591–599;
- [2.1.7] <https://www.youtube.com/watch?v=CaD-4m4RJLs>;
- [2.1.8] Effetto della lucidatura chimica nei materiali in titanio per un basso degassamento K. Ishizawa, H. Kurisu, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 100 (2008) 092023, IVC-17/ICSS-13 e ICN+T2007;
- [2.1.9] <https://logitech.uk.com/product/chemical-polishing-systems>;
- [2.1.10] <https://www.struers.com/Knowledge/Grinding-and-polishing/#grinding-polishing-methods>;
- [2.1.11] Smithells Metals Reference Book, 8a edizione - 9 dicembre 2003, Editori: William F. Gale, Terry C. Totemeier, eBook ISBN: 9780080480961;
- [2.1.12] Peter J. Szabo, I. Kardos, Correlazione tra l'orientamento della grana e la tonalità dell'incisione del colore, Caratterizzazione dei materiali, Volume 61, Numero 8, 2010, Pagine 814-817, ISSN 1044-5803, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.05.005>;
- [2.1.13] Kenji Ishikawa, Kazuhiro Karahashi, Tatsuo Ishijima, Keizo Kinoshita, &co. Progressi nei processi a secco su scala nanometrica per la fabbricazione di caratteristiche ad alto rapporto d'aspetto: How can we control critical dimension uniformity at the bottom, giugno 2018, Japanese Journal of Applied Physics 57(6S2):06JA01, DOI: 10.7567/JJAP.57.06JA01;
- [2.1.14] <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/991-color-metallography.html>;
- [2.1.15] GF Vander Voort, Metallografia: principi e pratica, McGraw-Hill Book Co., NY, 1984 e ASM International, Materials Park, Ohio, 1999;
- [2.1.16] [https://www.youtube.com/watch?v=yOScziqA4\\_8](https://www.youtube.com/watch?v=yOScziqA4_8);
- [2.1.17] <https://www.youtube.com/watch?v=fc8zrgYJCJw>;
- [2.1.18] <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/applied/metallography-an-introduction>;
- [2.1.19] <https://www.tandfonline.com>.

## 2.2. DIMOSTRAZIONE DI LUCIDATURA ELETTROLITICA E ATTACCO COLORATO

### 2.2.1 Lucidatura elettrolitica: scopo, applicazione e dimostrazione

La lucidatura elettrolitica è una tecnica specializzata utilizzata per rimuovere materiale da una superficie metallica attraverso reazioni elettrochimiche controllate. Questo processo viene comunemente utilizzato per preparare campioni per microscopia, metallografia e altre applicazioni in cui è richiesta una finitura superficiale di alta qualità. Viene utilizzato per migliorare la qualità della superficie dei campioni metallici per l'esame microscopico. Implica l'applicazione controllata di corrente elettrica e di una soluzione elettrolitica per rimuovere selettivamente il materiale dalla superficie del campione, ottenendo una finitura superficiale lucida e pulita.



Nell'elettrolucidatura, la parte metallica o il pezzo da lavorare funge da anodo caricato positivamente. Il pezzo è collegato al terminale positivo di un raddrizzatore di potenza CC. Il catodo caricato negativamente, generalmente in acciaio inossidabile o zirconio, è collegato al terminale negativo del raddrizzatore di corrente continua.

Sia l'anodo che il catodo sono immersi in un bagno di soluzione elettrolitica a temperatura controllata. La corrente elettrica proveniente dal raddrizzatore viene condotta dall'anodo al catodo attraverso l'elettrolita. La corrente elettrica fa sì che gli ioni metallici sulla superficie della parte si ossidino e si dissolvano nell'elettrolita. Questo processo può dissolvere quantità di metallo estremamente piccole e strettamente controllate, con conseguente rimozione della superficie con uno spessore di micron.

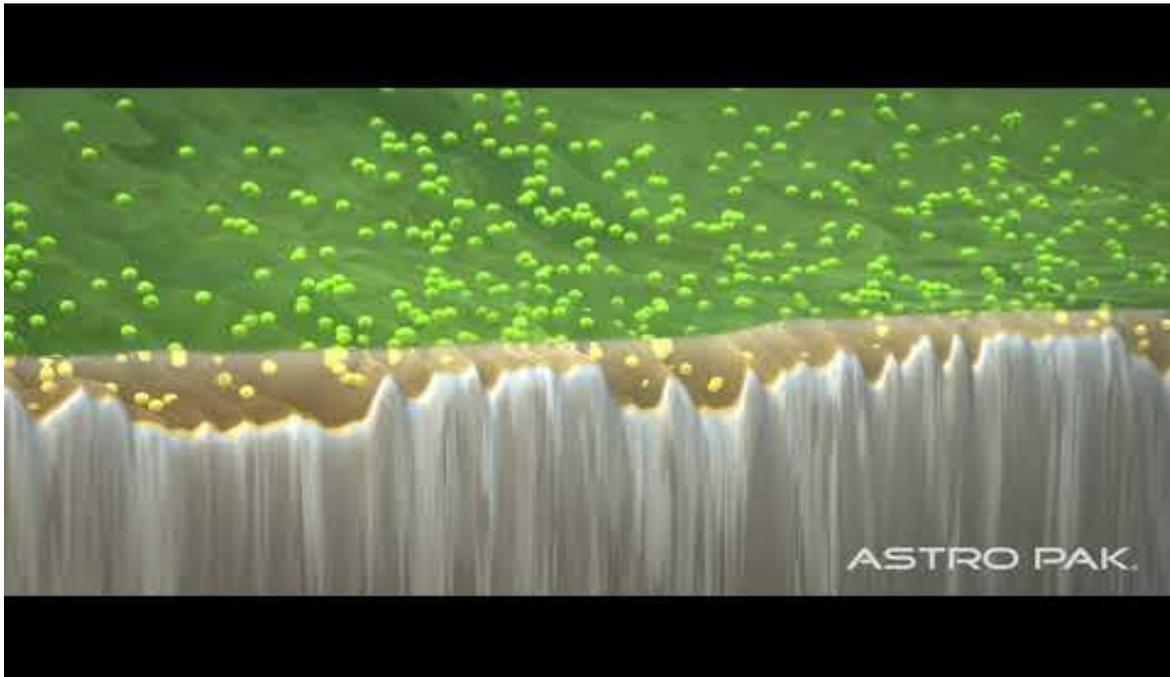


Figura 2.2.2. Cos'è l'elettrolucidatura? | Come funziona l'elettrolucidatura? (fonte: AstroPaK)

La quantità di rimozione della superficie metallica è controllata dai seguenti fattori: composizione chimica dell'elettrolita, temperatura dell'elettrolita (tipicamente 76 °C – 82 °C), durata del tempo di esposizione alla corrente elettrica, densità della corrente elettrica (varia in base all'elettrolita; composizione di lega metallica sottoposta a elettrolucidatura. Le leghe metalliche supportate per l'elettrolucidatura sono alluminio, acciaio al carbonio, acciaio inossidabile, leghe di rame, nitinol, titanio, acciaio per utensili, leghe speciali/esotiche. I prodotti chimici per l'elettrolucidatura dell'acciaio inossidabile sono generalmente costituiti da una miscela ad alta viscosità di acido solforico e acido fosforico.

### 2.2.2 Esercitazioni pratiche con la lucidatura elettrolitica

Viene tipicamente condotto in ambienti di laboratorio o industriali allo scopo di migliorare la finitura superficiale dei campioni di metallo. La lucidatura elettrolitica è una tecnica specializzata utilizzata per rimuovere materiale da una superficie metallica attraverso reazioni elettrochimiche controllate. Questo processo viene comunemente utilizzato per preparare campioni per microscopia, metallografia e altre applicazioni in cui è richiesta una finitura superficiale di alta qualità.

Prima di iniziare il processo, assicurati di seguire tutte le precauzioni di sicurezza. Ciò include indossare dispositivi di protezione individuale adeguati, lavorare in un'area ben ventilata e aderire alle linee guida di sicurezza fornite dalla propria istituzione o luogo di lavoro.



### Materiali e attrezzature utilizzati nella lucidatura elettrolitica:

- Campioni di metallo da lucidare

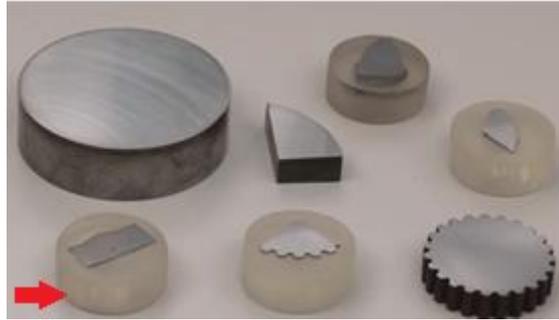


Figura 2.2.3. Campioni pronti per l'elettrolucidatura (fonte:Kemet Internazionale Ltd)

- Attrezzatura per la lucidatura elettrolitica, compreso un alimentatore, una soluzione elettrolitica ed elettrodi



Figura 2.2.4. Attrezzatura per lucidatrice elettrolitica con scopri cella elettrolitica  
(fonte:American Buehler Instrument Co., Ltd.)





Figura 2.2.5. Attrezzatura per lucidatrice elettrolitica con cella elettrolitica sovrastante  
(fonte:Kemet Internazionale Ltd)

- Occhiali protettivi, guanti e camice da laboratorio
- Contenitori in vetro per soluzione elettrolitica



Figura 2.2.6. Soluzioni elettrolitiche (fonte: Micro Lit)

- Panno o tamponi per lucidare
- Acqua distillata
- Misuratori di tensione e amperaggio



Figura 2.2.7. Misuratori di tensione e amperaggio (fonte: Pulsivo USA)

- Attrezzatura per lucidatura (ad esempio smerigliatrice o carta vetrata) per la preparazione iniziale del campione



Figura 2.2.8. Attrezzature per la lucidatura (fonte: AzOm)

### Procedura di lavoro di lucidatura elettrolitica:

#### Preparazione del campione:

- L'operatore deve iniziare con un campione di metallo che necessita di lucidatura e assicurarsi che sia pulito e privo di contaminanti.
- Se il campione presenta imperfezioni superficiali significative, l'operatore potrebbe dover eseguire una lucidatura meccanica iniziale utilizzando una smerigliatrice o carta vetrata per eliminare i difetti principali.
- Successivamente, il campione deve essere risciacquato accuratamente con acqua distillata per eliminare eventuali detriti e contaminanti.

Il più comunemente usato in settore della elettrolucidatura sono ASTM B912 [EASTM E1558-09](#). La norma fornisce indicazioni su come elettrolucidare l'acciaio inossidabile.

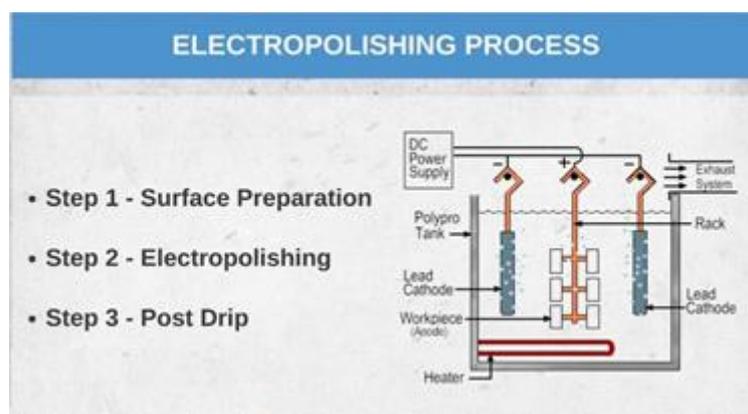


Figura 2.2.9. Fasi del processo di elettrolucidatura (fonte: Best Technology Ltd.)

In questa fase di preparazione, l'operatore deve rimuovere contaminanti come olio e grasso che interferiscono con l'uniformità quando viene applicata la corrente elettrica. Dopo la pulizia fare

attenzione che le parti in acciaio inox evitino il contatto con le mani o con le attrezzature. Una pulizia impropria è una causa comune di scarto delle parti.

**Preparazione della soluzione elettrolitica:**

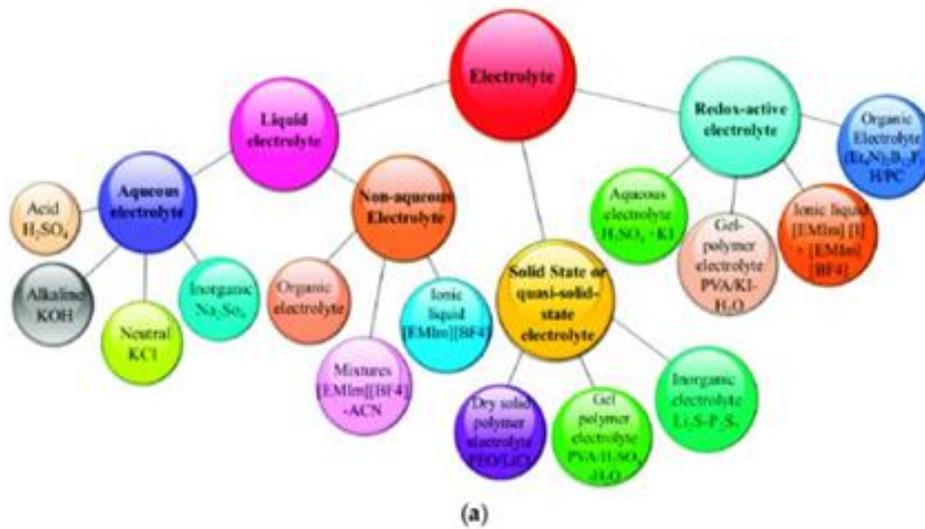
- È necessario preparare una soluzione elettrolitica adeguata per il metallo e l'applicazione specifici. La composizione dell'elettrolita varierà in base al materiale da lucidare.
- L'operatore deve versare la soluzione elettrolitica in un contenitore di vetro.

Tabella 2.2.1 Tipologie di soluzione elettrolitica (fonte: Quora)

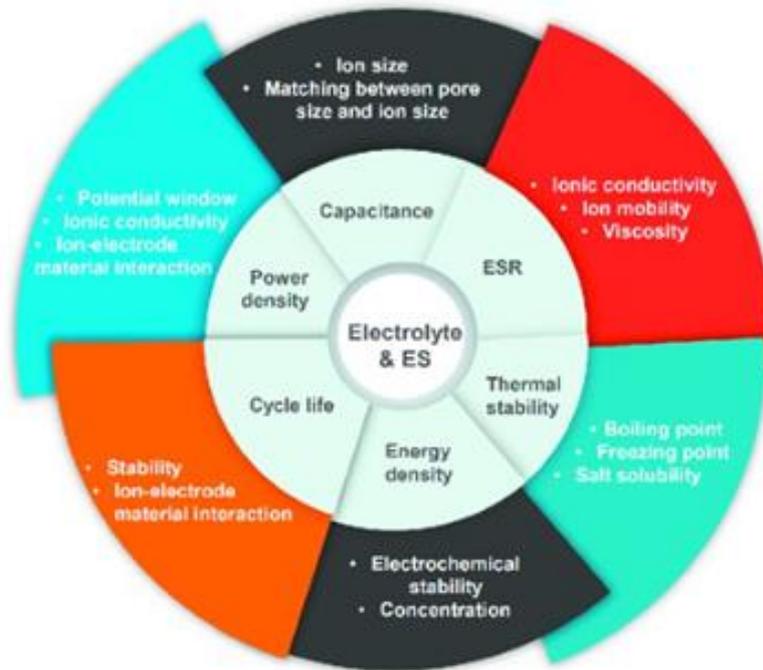
Acciaio inossidabile	10 g di acido ossalico, 100 ml di acqua
	5 ml di acido solforico, 100 ml di acqua
Per acciai austeno-ferritici (duplex)	Soluzione acquosa di idrossido di sodio al 20-40%.
Per la misurazione automatica della dimensione del grano degli acciai austenitici	60% acqua distillata 40% acido nitrico

Ad esempio, in questa fase vengono eseguite le fasi vere e proprie di elettrolucidatura dell'acciaio inossidabile per levigare, lucidare e sbavare il metallo.

- Parti in acciaio inossidabile elettrolucidato: i tempi di trattamento possono variare da 10 secondi a 20 minuti.
- Ebollizione/Risciacquo a spruzzo o Risciacquo morto: questo serbatoio cattura la soluzione elettrolitica usata.



(a)



(b)

Figura 2.2.10. (a) Diversi tipi di elettroliti adatti per specifiche applicazioni SC e (b) impatto dell'elettrolita sulle prestazioni degli SC elettrochimici. (fonte: Tiwari, Santosh & Thakur, Anukul & De Adhikari, Amrita & Zhu, Yanqiu & Wang, Nannan. (2020). Ricerca attuale sui nanocompositi basati sul grafene e sulla loro applicazione per i supercondensatori. 10. 2046. 10.3390/nano10102046.)

#### Configurazione della cella elettrolitica:

- L'elettrodo positivo (anodo) e l'elettrodo negativo (catodo) devono essere collegati all'alimentazione.



- L'operatore deve immergere il campione di metallo nella soluzione elettrolitica e collegarlo al catodo.
- L'anodo deve essere costituito da un materiale che non si dissolve nell'elettrolita. Le scelte comuni includono platino o grafite.

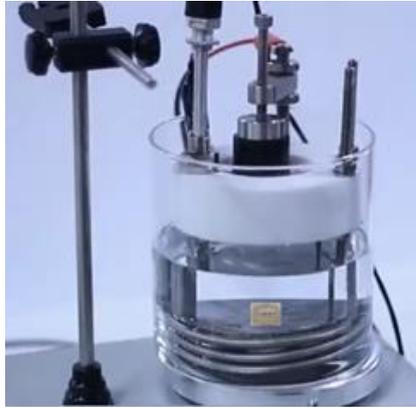


Figura 2.2.11. Cella unitaria speciale per elettrolucidatura (fonte: American Buehler Instrument Co., Ltd.)

#### **Lucidatura elettrolitica:**

- L'operatore deve accendere l'alimentazione e impostare la tensione e l'ampere sui valori desiderati per la propria applicazione. I parametri specifici dipenderanno dal metallo e dall'entità della lucidatura richiesta.
- L'operatore osserverà la rimozione del materiale dal campione di metallo. Il metallo si dissolve all'anodo e si deposita al catodo. Il processo deve essere attentamente monitorato per ottenere la finitura desiderata.
- L'operatore deve mantenere la tensione e l'ampere entro l'intervallo consigliato per evitare il surriscaldamento o il danneggiamento del campione.



Figura 2.2.12. Macchina per lucidatura e incisione elettrolitica DPF-2 (fonte: Micro Lit)



### **Risciacquo e Pulizia Finale:**

- Una volta ottenuta la lucidatura desiderata, l'operatore deve spegnere l'alimentazione.
- L'operatore deve rimuovere con attenzione il campione dalla soluzione elettrolitica.
- L'operatore deve sciacquare il campione con acqua distillata per rimuovere eventuali residui di elettrolita.
- L'operatore deve utilizzare un panno o un tampone lucidante per dare al campione una lucidatura finale e rimuovere eventuali imperfezioni rimanenti.

### **Ispezione finale:**

L'operatore deve esaminare il campione lucidato al microscopio o per altri scopi di controllo qualità per garantire che sia stata ottenuta la finitura desiderata.

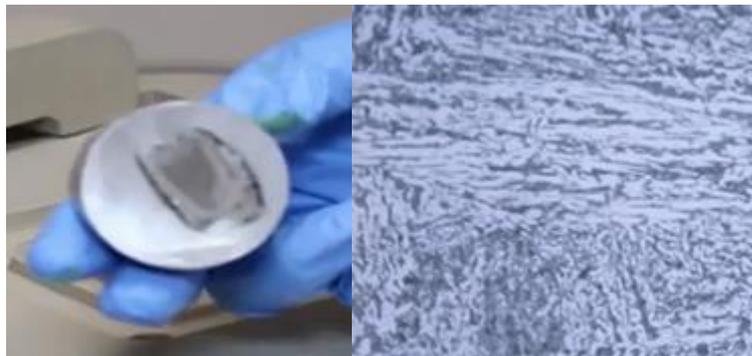


Figura 2.2.13. La struttura al microscopio del campione di acciaio inossidabile dopo l'elettrolucidatura (fonte:Kemet Internazionale Ltd)

### 2.2.3. Problemi comuni e soluzioni quando si utilizza la tecnica di elettrolucidatura per la preparazione dei campioni metallografici

La lucidatura elettrolitica è un processo elettrochimico preciso utilizzato per ottenere una finitura superficiale di alta qualità su campioni di metallo, tuttavia, può incontrare diversi problemi comuni che possono influenzare la qualità dei risultati, di seguito presenteremo i più comuni:

#### **Lucidatura non uniforme**

Problema: il campione di metallo potrebbe subire una lucidatura non uniforme, con conseguente finitura superficiale non uniforme.



Figura 2.2.14. Lucidatura disomogenea su lamiera inox (fonte: AzOm)

Soluzione: l'operatore deve assicurarsi che il campione sia adeguatamente fissato e posizionato nella soluzione elettrolitica, mescolare la soluzione per mantenere l'uniformità e regolare i parametri elettrici (tensione e corrente) per fornire una lucidatura uniforme dell'intero campione.

#### **Lucidatura eccessiva**

Problema: la lucidatura eccessiva si verifica quando il campione viene lucidato per troppo tempo, con conseguente rimozione eccessiva di materiale e potenziali danni al campione.

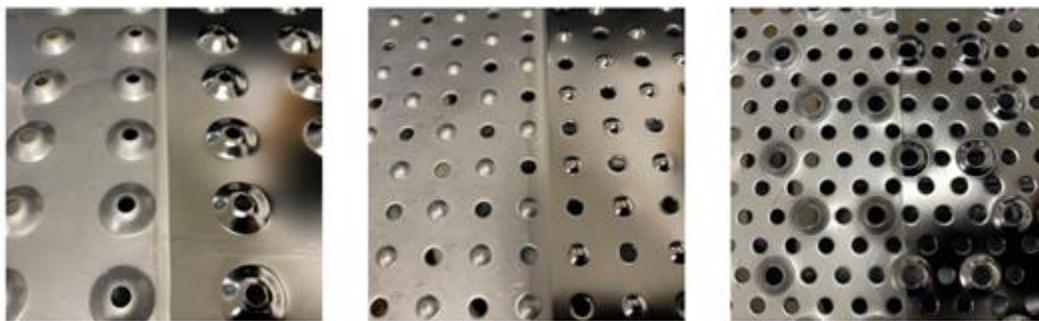


Figura 2.2.15. Graepels/Graepels in acciaio inossidabile (fonte: Perforators & Weavers  
Ltd/Graepel Perforators Ltd)

Soluzione: l'operatore deve monitorare attentamente il processo di lucidatura e rispettare i tempi di lucidatura consigliati e regolare le impostazioni di tensione e corrente per controllare la velocità di rimozione del materiale. Dovrebbe essere implementato un timer per evitare una lucidatura eccessiva.

#### **Vaiolature e cavità**

Problema: vaiolature e cavità sono il risultato della corrosione localizzata durante la lucidatura elettrolitica, che causa depressioni irregolari sulla superficie del campione.

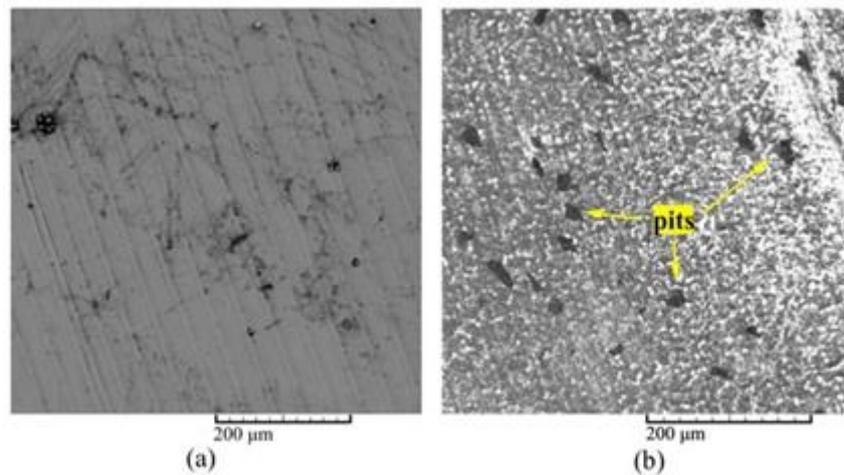


Figura 2.2.16. Immagine SEM di (a) una superficie del disco in acciaio rettificato e (b) una superficie del disco in acciaio elettrolucidato. (fonte:Mašović, R.; Miler, D.; Čular, I.; Jakovljević, S.; Šercer, M.; Žeželj, D. L'effetto dell'elettrolucidatura dell'acciaio sul comportamento tribologico di una coppia acciaio-bronzo nei regimi di lubrificazione misti e limite. *Lubrificanti* 2023, 11, 325. <https://doi.org/10.3390/lubrificanti11080325>)

Soluzione: L'operatore deve controllare la composizione e la temperatura della soluzione elettrolitica, nonché la distanza anodo-catodo e assicurarsi che l'elettrolita sia ben miscelato. Pulire e preparare adeguatamente il campione prima della lucidatura per rimuovere eventuali contaminanti.

### **Superficie ruvida o graffiata**

Problema: se la superficie del campione appare ruvida o graffiata dopo la lucidatura elettrolitica, ciò potrebbe essere dovuto a una preparazione meccanica inadeguata o all'attrezzatura di lucidatura sporca.

Soluzione: l'operatore deve assicurarsi che il campione sia adeguatamente preparato con la lucidatura meccanica iniziale, utilizzare attrezzature di lucidatura pulite e ben mantenute e controllare la qualità del panno o del tampone di lucidatura per eventuali particelle abrasive che potrebbero graffiare la superficie.

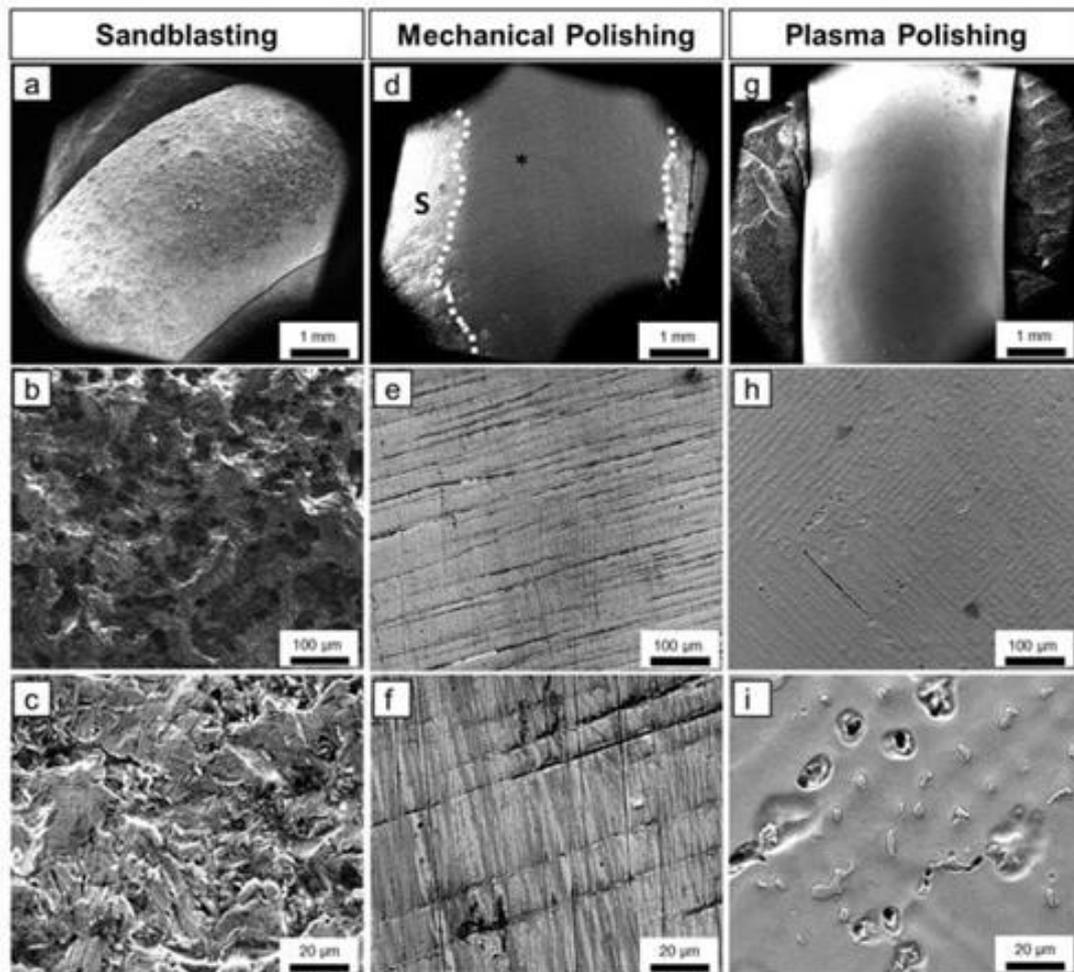


Figura 2.2.17. Micrografie SEM che rivelano il confronto tra leghe Co-Cr sabbiate, lucidate meccanicamente e lucidate elettroliticamente al plasma. (a) Panoramica della sabbia raffigurante una morfologia superficiale ruvida. (b) Vista ravvicinata del pezzo sabbia che mostra una superficie ruvida e fessurata. (c) Un ingrandimento elevato rivela una superficie irregolare con creste, bordi e porosità più profonde. (d) Panoramica del campione lucidato meccanicamente raffigurante un confine chiaro tra l'area lucidata meccanicamente (\*) e l'area sabbia (S). (e,f) Un elevato ingrandimento del campione lucidato meccanicamente rivela una superficie liscia con numerosi segni di lucidatura. (g) Panoramica del campione di plasma lucidato elettroliticamente che mostra una superficie liscia e completa. (h) Primo piano del campione di plasma lucidato elettroliticamente che mostra una superficie liscia con numerose disomogeneità. (i) Un elevato ingrandimento del campione di plasma lucidato elettroliticamente rivela una superficie liscia con strutture insulari intervallate. (fonte: Witzke, Katharina & Kensbock, Renko & Willsch, Caroline &

Fricke, Katja & Bekeschus, Sander & Metelmann, Hans-Robert. (2023). Lucidatura elettrolitica meccanica e al plasma di leghe dentali. *Materials*. 16. 6222. 10.3390/ma16186222.)

### Bolle di gas e crescita dendritica

Problema: durante la lucidatura elettrolitica può verificarsi la formazione di bolle di gas o crescita dendritica sulla superficie del campione.

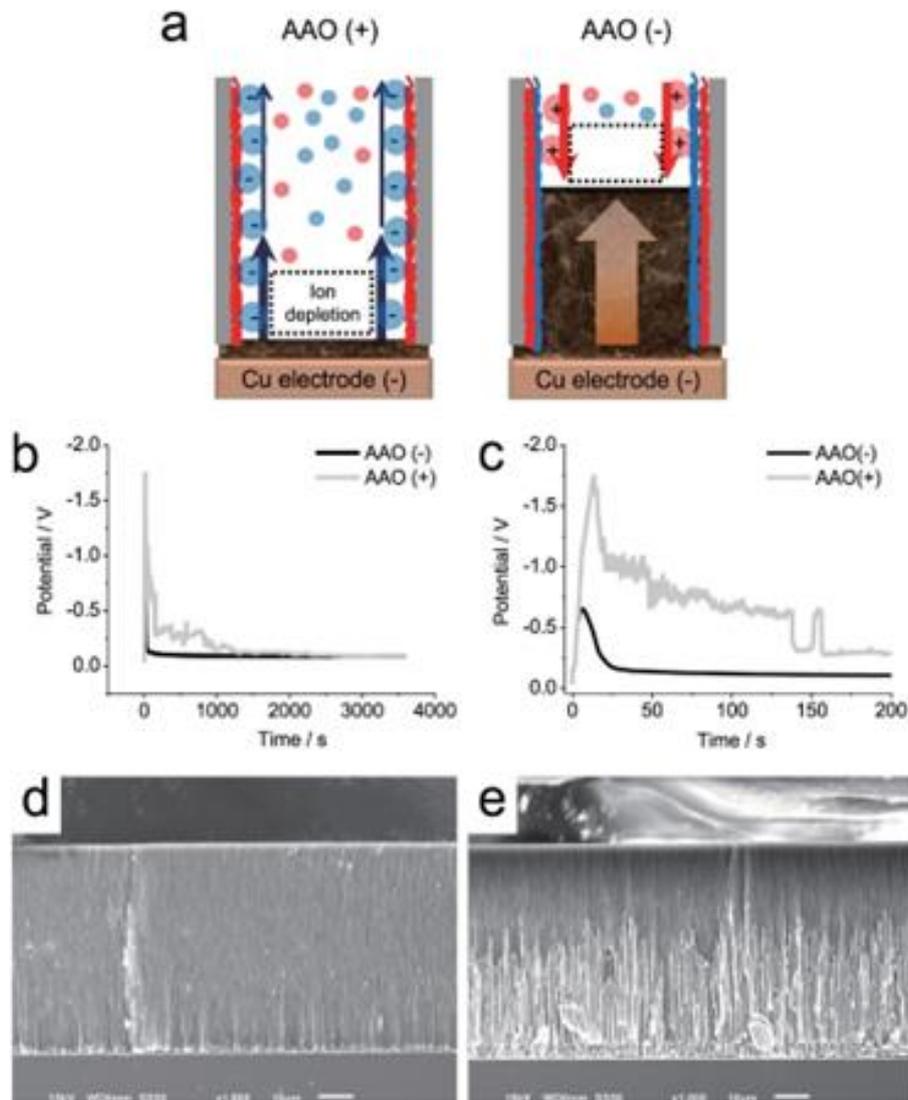


Figura 2.2.18. (a) Effetto di SC sull'elettrodeposizione in nanopori carichi durante OLC. (b) Curve Vt di AAO(+) e AAO(-) per una corrente applicata di  $-6$  mA. (c) Ingrandimento dei dati di (b) per i primi 200 s. Immagini SEM di nanofili di Cu elettrodepositati in (d) AAO (+) e (e) AAO (-). (fonte: Han, Ji-Hyung e Khoo, Edwin e Bai, Peng e Bazant, Martin. (2014). Corrente eccessivamente limitata e controllo della crescita dendritica mediante conduzione superficiale nei nanopori. *Rapporti scientifici*. 4.10.1038/srep07056.)

Soluzione: l'operatore deve assicurarsi che il campione sia privo di bolle d'aria o di gas intrappolate prima di iniziare il processo di lucidatura, quindi regolare l'agitazione e la temperatura dell'elettrolita per evitare la formazione di bolle.

### **Incisioni**

Problema: sulla superficie lucida possono apparire motivi di incisione o striature indesiderate, spesso a causa di condizioni di lucidatura incoerenti.



Figura 2.2.19. [Striature su SS304 lavorato dopo elettrolucidatura](#) (fonte: Global Spec)

Soluzione: l'operatore deve mantenere parametri elettrici costanti e controllare il flusso dell'elettrolita per garantire una distribuzione uniforme. Pulire e preparare adeguatamente il campione per evitare variazioni nella composizione della superficie.

### **Lucentezza o luminosità inadeguata**

Problema: se la superficie lucidata non presenta la lucentezza o la brillantezza desiderate, ciò potrebbe derivare da una composizione o da condizioni dell'elettrolita non ottimali.

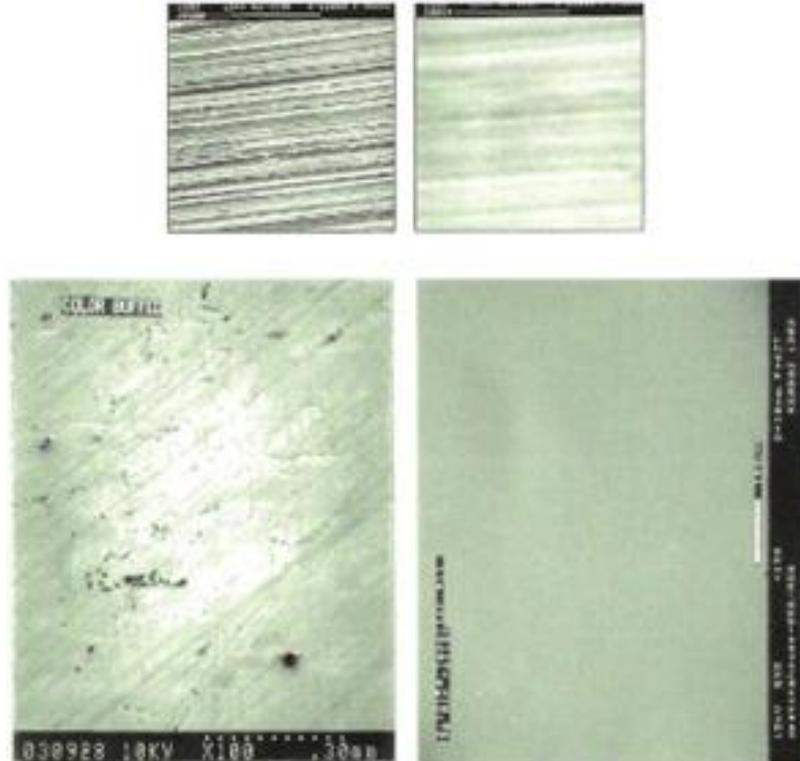


Figura 2.2.20. Microfotografie ottiche (in alto) e SEM (in basso) che mostrano la trasformazione della superficie ruvida lucidata meccanicamente a sinistra in una finitura liscia dopo l'elettrolucidatura (fonte: Global Spec)

Soluzione: L'operatore deve modificare la composizione della soluzione elettrolitica per migliorare il risultato della lucidatura. Sperimenta diversi parametri, come temperatura, tensione e corrente, per ottenere la finitura desiderata.

#### **Problemi di sicurezza**

Problema: possono sorgere problemi di sicurezza se non vengono seguite le opportune precauzioni di sicurezza quando si lavora con prodotti chimici e apparecchiature elettriche.



Figura 2.2.21. Dispositivi di protezione (fonte: Micro Lit)

Soluzione: l'operatore deve sempre seguire le linee guida sulla sicurezza e indossare i dispositivi di protezione individuale adeguati, lavorare in un'area ben ventilata ed essere addestrato sulla corretta gestione di prodotti chimici e attrezzature.

#### 2.2.4. Manipolazione e smaltimento degli elettroliti derivanti dalla lucidatura elettrolitica

Un operatore o uno specialista metallografico deve seguire procedure specifiche per la manipolazione e lo smaltimento in sicurezza degli elettroliti utilizzati nella lucidatura elettrolitica.



Figura 2.2.22. Soluzioni elettrolitiche (fonte: Micro Lit)

#### **Manipolazione degli elettroliti dalla lucidatura elettrolitica**

L'operatore o lo specialista deve eseguire la manipolazione dell'elettrolito in un'area ben ventilata, come una cappa aspirante o uno spazio con una buona ventilazione, per ridurre al minimo l'esposizione a fumi o vapori. I contenitori contenenti elettroliti devono essere chiaramente etichettati con i relativi nomi, composizioni, pericoli e qualsiasi precauzione necessaria per la manipolazione. Dovrebbero essere utilizzate etichette specifiche e i registri dovrebbero essere conservati. È

importante conservare gli elettroliti in contenitori resistenti agli agenti chimici progettati per questo scopo. Contenitori in vetro o plastica sono scelte comuni.



Figura 2.2.23. Elettrolita C+ (fonte: Micro Lit)

Gli operatori o gli specialisti devono evitare il contatto diretto della pelle con l'elettrolita. In caso di contatto è essenziale sciacquare immediatamente la zona interessata con abbondante acqua. Durante la manipolazione degli elettroliti l'operatore deve astenersi dal mangiare, bere o fumare per evitare l'ingestione accidentale. Durante il trasferimento o la miscelazione degli elettroliti, prestare attenzione per evitare schizzi o incidenti. È consigliabile aggiungere gli acidi all'acqua e non viceversa. L'operatore o lo specialista deve assicurarsi che i materiali utilizzati per la manipolazione degli elettroliti (contenitori, agitatori, ecc.) siano compatibili con l'elettrolita specifico e non reagiscano con esso.

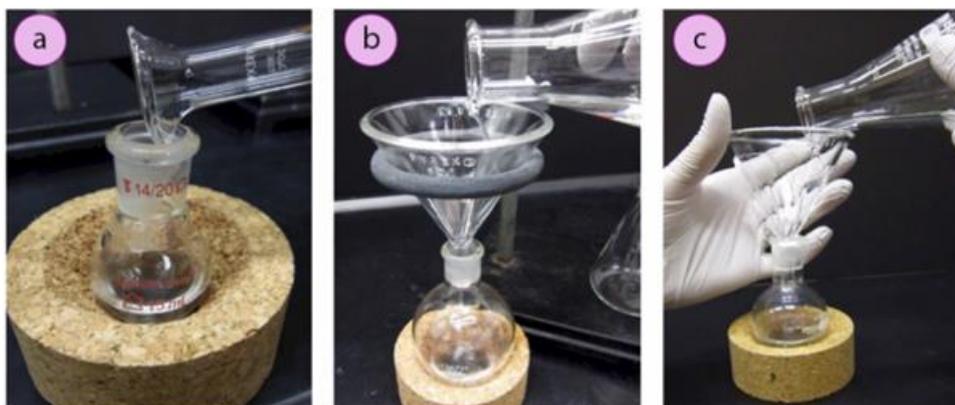


Figura 2.2.24. Versare il liquido, b) Versare in un imbuto tenuto con una fascetta ad anello, c) Versare in un imbuto tenuto con la mano. (fonte: MicroLit)



Tutto il personale che lavora con gli elettroliti derivanti dalla lucidatura elettrolitica deve essere istruito sui rischi e sulle procedure di sicurezza. La formazione continua e la sensibilizzazione sono cruciali.

### **Conformità normativa allo smaltimento degli elettroliti derivanti dalla lucidatura elettrolitica**

Gli operatori o gli specialisti metallografici devono rispettare le normative locali, statali e federali che regolano lo smaltimento dei rifiuti pericolosi. Queste normative possono variare in base alla località. I diversi elettroliti devono essere tenuti separati e si deve evitare la miscelazione durante lo smaltimento. Nei casi in cui è necessaria la neutralizzazione, l'individuo deve seguire le linee guida sulla compatibilità chimica per una neutralizzazione sicura. In caso di incertezza sui metodi di smaltimento corretti, gli operatori o gli specialisti devono consultare un chimico qualificato, un esperto di smaltimento dei rifiuti o il dipartimento di salute e sicurezza ambientale della propria organizzazione. I contenitori dei rifiuti devono essere chiaramente etichettati con il loro contenuto e gli eventuali pericoli per garantire una manipolazione sicura durante lo smaltimento.

È fondamentale garantire che i contenitori dei rifiuti siano sigillati ermeticamente per evitare perdite o fuoriuscite. Gli operatori o gli specialisti devono provvedere al ritiro e allo smaltimento dei rifiuti pericolosi attraverso servizi o strutture di smaltimento rifiuti autorizzati e autorizzati. Si sconsiglia di tentare di smaltire i rifiuti pericolosi in modo indipendente.

Mantenere un registro del processo di smaltimento, comprese le date, i metodi di smaltimento e le relative schede di sicurezza (SDS), è essenziale per riferimento e conformità. Gli operatori o gli specialisti devono essere preparati per le emergenze e disporre di kit di risposta alle fuoriuscite, docce di sicurezza e stazioni per il lavaggio degli occhi nell'area in cui vengono manipolati gli elettroliti derivanti dalla lucidatura elettrolitica.

#### 2.2.5. Risoluzione dei problemi e suggerimenti nella lucidatura elettrolitica dei campioni metallografici

La lucidatura elettrolitica dei campioni metallografici è un passaggio cruciale nella preparazione dei materiali per l'esame microscopico. Tuttavia, potrebbero sorgere problemi durante il processo (vedere la sezione precedente), quindi in questa sezione menzioneremo la contaminazione del campione, un problema comune che si verifica nei laboratori metallografici. Il problema sono i contaminanti sul campione che possono interferire con il processo di lucidatura. Per ottenere un processo di successo, l'operatore deve garantire che il campione sia privo di contaminanti, pulire tutte le apparecchiature e utilizzare soluzioni elettrolitiche pulite. Altri difetti superficiali, come graffi, crepe

e cavità, possono influire in modo significativo sulle prestazioni e sull'affidabilità dei materiali metallici. La lucidatura elettrolitica svolge un ruolo fondamentale nel rilevamento dei difetti superficiali fornendo una superficie pulita e liscia che ne facilita la visibilità e la caratterizzazione.

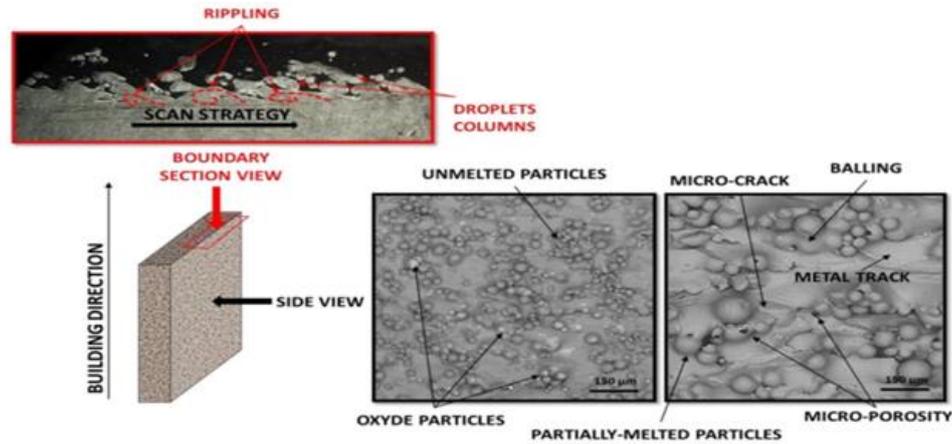


Figura 2.2.25. Rappresentazione dei difetti superficiali di oggetti fabbricati in modo additivo (fonte: Acquesta, Annalisa & Monetta, Tullio. (2023). Green Approach for Electropolishing Surface Treatments of Additive Manufactured Parts: A Comprehensive Review.

Metals. 13. 874. 10.3390/met13050874.)

Rimuovendo irregolarità e contaminanti superficiali, la lucidatura elettrolitica migliora il contrasto tra i difetti e il materiale circostante. Ciò consente l'identificazione, la misurazione e la valutazione precisa dei difetti superficiali.

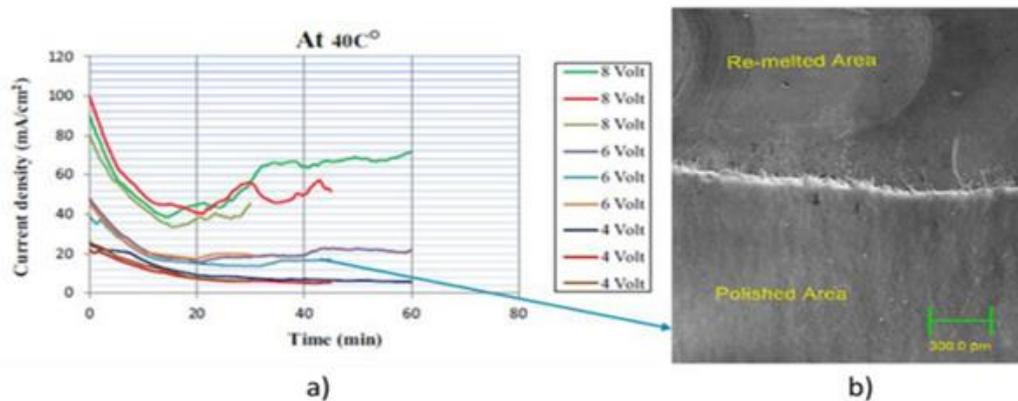


Figura 2.2.26. Crono – Curve amperometriche ottenute eseguendo il trattamento EP a 6 V a 40 °C per una durata compresa tra 30 e 60 min. (b) Immagine SEM del campione elettrolucidato che applica una tensione di 6 V a una temperatura di 40 °C per una durata di 45 minuti.(fonte:Acquista, A.; Monetta, T. Approccio verde per i trattamenti superficiali di

elettrolucidatura di parti prodotte con additivi: una revisione completa. Metalli 2023, 13,  
874.<https://doi.org/10.3390/met13050874>)

La capacità di rilevare e caratterizzare i difetti superficiali è fondamentale per valutare la qualità, la  
durabilità e l'idoneità del materiale per applicazioni specifiche.

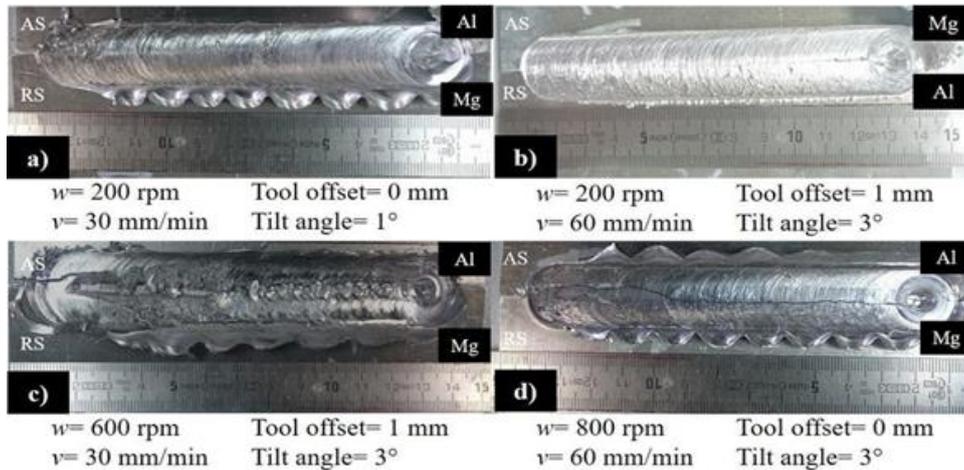


Figura 2.2.27. Difetti delle saldature, a) bava eccessiva, b) fessura, c) mancanza di riempimento superficiale ed eccessiva bava, d) fessura ed eccessiva bava. (Lato che avanza: AS e lato che si ritira: RS) (fonte: Hernández-García, D. & Saldaña Garcés, Rocio & Vázquez, FJ & Gutiérrez-Castañeda, EJ & Deaquino-Lara, R. & Verdera, David. (2017) . Saldatura per attrito di leghe diverse da AA7075-T6 a AZ31B-H24. MRS Advances. 2. 1-9. 10.1557/adv.2017.609.)

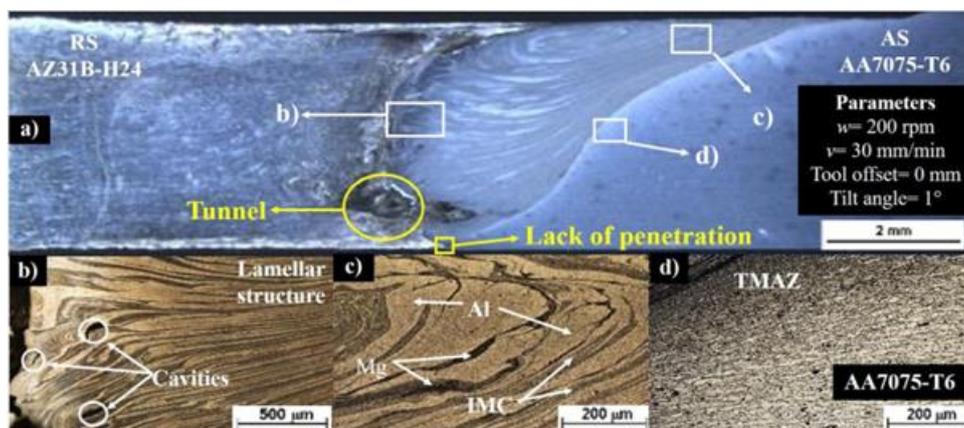


Figura 2.2.28. Micrografie della sezione trasversale del giunto dissimile AA7075-T6-AZ31B-H24 di FSW, con difetti interni come tunnelling, mancanza di penetrazione (a) e cavità (b), in (c) mostra la dispersione tra Mg e Al nella SZ; e in (d) è possibile osservare una



diminuzione di circa il 70% nella dimensione dei grani della zona interessata termomeccanica (TMAZ) (fonte: Hernández-García, D. & Saldaña Garcés, Rocio & Vázquez, FJ & Gutiérrez-Castañeda, EJ e Deaquino-Lara, R. e Verdera, David. (2017). Friction Stir Welding of Dissimilar AA7075-T6 to AZ31B-H24 Alloys. MRS Advances. 2. 1-9. 10.1557/adv.2017.609.)

### **Suggerimenti generali**

- ✓ L'operatore deve preparare adeguatamente il campione rimuovendo eventuali contaminanti superficiali ed eseguendo la lucidatura meccanica iniziale per eliminare i difetti principali.
- ✓ L'operatore deve adattare la composizione dell'elettrolita al metallo specifico da lucidare; metalli diversi possono richiedere elettroliti diversi.
- ✓ L'operatore deve garantire una distribuzione uniforme dell'elettrolita agitandolo per evitare ristagni o formazione di bolle di gas.
- ✓ L'operatore deve monitorare continuamente il processo di lucidatura per ottenere la finitura desiderata e, se necessario, utilizzare i timer per evitare una lucidatura eccessiva.
- ✓ L'operatore deve attenersi alle linee guida sulla sicurezza, indossare dispositivi di protezione individuale adeguati e lavorare in un'area ben ventilata quando maneggia prodotti chimici e apparecchiature elettriche.
- ✓ L'operatore dovrebbe sperimentare le impostazioni di tensione, corrente e temperatura per trovare le condizioni ideali per i requisiti specifici di metallo e finitura.
- ✓ L'operatore deve conservare registrazioni dettagliate del processo di lucidatura, inclusi parametri, composizione dell'elettrolita ed eventuali problemi riscontrati, per facilitare la risoluzione dei problemi e il miglioramento del processo.
- ✓ La manutenzione dovrebbe mantenere e pulire regolarmente l'attrezzatura di lucidatura, compresi gli elettrodi e l'alimentatore, per garantire prestazioni costanti.

### 2.2.6. Esempi reali di lucidatura elettrolitica e attacchi colorati

La lucidatura elettrolitica è comunemente utilizzata in varie applicazioni del mondo reale per ottenere una finitura superficiale di alta qualità su campioni di metallo. Nei laboratori metallurgici, la lucidatura elettrolitica viene utilizzata per preparare campioni metallografici per l'esame microscopico. Questa tecnica consente ai metallurgisti di studiare la microstruttura dei metalli, esaminando ad esempio i bordi dei grani, le fasi e le inclusioni, che è essenziale per il controllo di qualità e l'analisi dei materiali. Le industrie aerospaziale e automobilistica utilizzano la lucidatura elettrolitica per preparare campioni di metallo per i test non distruttivi (NDT). Ciò include l'ispezione dell'integrità di materiali, saldature e

componenti attraverso tecniche come il test con liquidi penetranti e l'ispezione con particelle magnetiche. La lucidatura elettrolitica viene utilizzata nella produzione di semiconduttori per preparare sottili pellicole metalliche o wafer per l'ispezione, la microscopia elettronica e la diffrazione elettronica. Garantisce che i componenti del semiconduttore abbiano una superficie liscia e priva di difetti.



Figura 2.2.29. Sistema di lucidatura e incisione elettrolitica (fonte: Metkton USA)

La lucidatura elettrolitica viene utilizzata nell'industria elettronica per creare una superficie liscia e priva di difetti sui componenti metallici, inclusi connettori e PCB. Ciò è importante per garantire collegamenti elettrici affidabili e ridurre le interferenze del segnale. Nella produzione di pannelli solari e componenti di turbine eoliche, la lucidatura elettrolitica viene utilizzata per preparare le superfici metalliche, come alluminio o rame, per una migliore efficienza energetica e resistenza alla corrosione.

La lucidatura elettrolitica viene utilizzata per preparare componenti metallici per sistemi ottici e strumenti astronomici. Le superfici lisce e riflettenti sono vitali per telescopi, specchi e lenti per ottenere osservazioni e immagini accurate.



Figura 2.2.30. Demo di lucidatura e incisione di ElectroMet 4 (fonte: BuehlerMaterials)

I produttori di impianti e dispositivi medici utilizzano la lucidatura elettrolitica per migliorare la finitura superficiale dei componenti metallici. Ciò è fondamentale per ridurre il rischio di adesione batterica e garantire la biocompatibilità dei materiali. Nel campo dell'odontoiatria, la lucidatura elettrolitica viene utilizzata per rifinire la superficie delle protesi dentali come corone, ponti e impianti dentali. Una superficie liscia e lucida aiuta a ridurre il rischio di accumulo di placca e migliora il comfort del paziente.

#### 2.2.7. Attacco colorato: scopo, applicazione e dimostrazione

L'attacco colorato è una tecnica utilizzata in metallografia per colorare selettivamente diversi costituenti microstrutturali all'interno di un materiale metallico. Utilizzando attacchi specifici, la tecnica migliora la visibilità e il contrasto di varie fasi, inclusioni e bordi dei grani.



Figura 2.2.30. Tecniche macroscopiche (fonte: MaterialScience2000)

L'attacco svolge un ruolo cruciale nella metallografia fornendo un mezzo per differenziare ed evidenziare vari costituenti microstrutturali. Aiuta nell'identificazione di fasi, inclusioni, bordi dei grani e altre caratteristiche che potrebbero essere difficili da distinguere in campioni non attaccati. Questa visibilità migliorata consente un'analisi e una comprensione più complete della struttura e delle proprietà del materiale. Oltre all'identificazione della fase, l'attacco colorato consente la caratterizzazione della dimensione dei grani, dei bordi dei grani, delle particelle della seconda fase e di altri parametri microstrutturali. Facilita la valutazione dell'omogeneità microstrutturale, il rilevamento di fasi di segregazione o intermetalliche e l'analisi di difetti o anomalie dei materiali. Consente una migliore osservazione ed esame al microscopio ottico o elettronico, facilitando una migliore comprensione della composizione, della struttura e delle proprietà del materiale.

### **Principi di formazione del colore**

I reagenti possono reagire in modo diverso con i costituenti a causa di fattori quali la composizione chimica, l'orientamento cristallografico e le condizioni della superficie. Queste interazioni possono portare alla formazione di composti o complessi colorati sulla superficie delle caratteristiche microstrutturali, rendendole più visibili e distinguibili.

I principi della formazione del colore nell'attacco colorato si basano sull'interazione tra reagenti e i componenti microstrutturali. Il colore si forma a causa dell'assorbimento, della riflessione o dell'interferenza di specifiche lunghezze d'onda della luce da parte dei composti o complessi colorati formati sulla superficie.

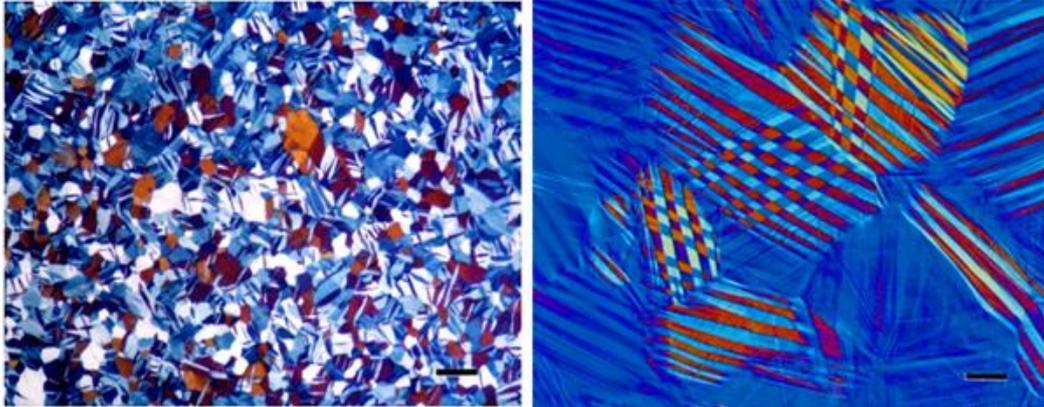


Figura 2.2.31.(a sinistra) eFigura 2.2.32.(a destra): struttura del grano su Zr ad elevata purezza (a sinistra) che è stato lavorato a caldo e trafilato a freddo (notare i gemelli meccanici) e visto in luce polarizzata e di Au - 19Cu-5Al che è stato lucidato e sottoposto a ciclo attraverso l'effetto memoria di forma per produrre martensite e l'illuminazione ad interferenza differenziale Nomarski è stata utilizzata per visualizzare lo sconvolgimento della superficie dovuto alla reazione di taglio sulla superficie libera. Le barre di ingrandimento sono rispettivamente 100 e 50  $\mu\text{m}$ (fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

I colori prodotti dagli agenti mordenzanti (tinta) sono visibili sotto illuminazione a campo chiaro e in molti casi si ottiene un ulteriore miglioramento utilizzando la luce polarizzata. I colori vengono sviluppati per interferenza allo stesso modo della colorazione a caldo o della deposizione sotto vuoto. Come notato, il colore è determinato dallo spessore della pellicola, solitamente nella sequenza giallo, rosso, viola, blu e verde se osservata utilizzando la luce bianca. Con i sistemi anodici il film si forma solo sulla fase anodica, ma il suo spessore può variare con l'orientamento cristallografico della fase. Per i sistemi catodici, poiché lo spessore del film sulla fase catodica è generalmente costante, viene prodotto un solo colore, che varierà man mano che il film cresce durante l'attacco. Pertanto, per ottenere ogni volta lo stesso colore, la durata dell'attacco deve essere costante. Ciò può essere ottenuto cronometrando l'attacco e osservando il colore macroscopico del campione durante la colorazione.

#### **Attacco colorato: Preparazione del campione**

Le fasi di preparazione metallografica sono le stesse del processo precedente seguite dall'attacco metallografico.



Figura 2.2.33. Preparazione del campione per l'incisione a colori (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

L'incisione metallografica viene effettuata sulla superficie lucida mediante attacco con reagenti adeguati ai materiali del campione saldato che sciolgono o colorano selettivamente i costituenti presenti, rendendoli distinguibili gli uni dagli altri. L'attacco viene effettuato tamponando la superficie della provetta con un batuffolo di cotone imbevuto di reagenti. Lo scopo dell'operazione è rivelare la struttura cristallina.

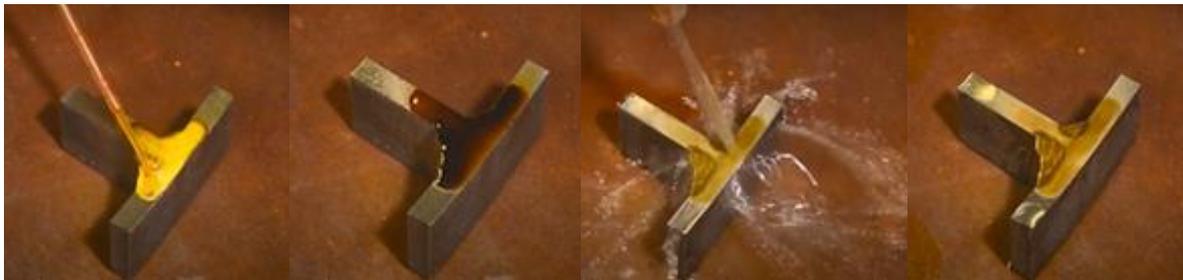


Figura 2.2.34. Acquaforse del colore della saldatura (fonte: Vac Aero Coloured Metallography)

#### 2.2.8. Pratica pratica con l'incisione colorata

Materiali e attrezzature utilizzati durante l'incisione a colori dei campioni metallografici:

- ✓ campioni metallografici (tipicamente campioni di metallo preparati, montati e lucidati);

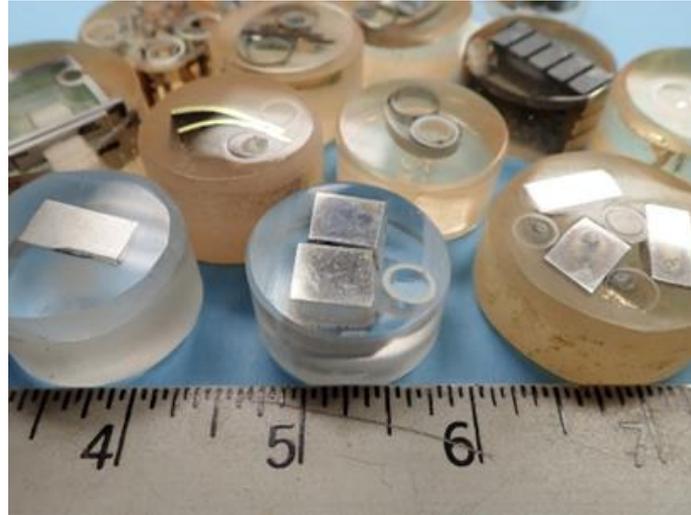


Figura 2.2.35. Campioni metallografici (fonte: Metallurgical Engineering Services, Inc.)

- ✓ reagenti chimici specificatamente formulati per reagire con diverse fasi o costituenti del metallo per produrre colori;

Name	Chemical Composition
Nital	4% solution of nitric acid in ethanol
Pikral	4% solution of picric acid in ethanol
Klemm	50 ml ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ w $\text{H}_2\text{O}$ ) + 1g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$
LePera reagent	1:1 – pikral + 1% solution $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ w $\text{H}_2\text{O}$
Sodium metabisulfite	10% water solution $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$



Figura 2.2.36. Reagenti chimici (fonte: Micro Lit)

- ✓ macchine o attrezzature per la smerigliatura e la lucidatura, carte abrasive e panni o tamponi per lucidare,



Figura 2.2.37. Macchine o attrezzature per la smerigliatura e lucidatura, carte abrasive  
(fonte:Kemet Internazionale Ltd)



- ✓ dispositivi di protezione individuale (DPI) come occhiali protettivi, guanti e camice da laboratorio,
- ✓ microscopio per esaminare i campioni incisi,



Figura 2.2.38. Microscopio metallografico (fonte: Olympus)

- ✓ vetreria da laboratorio per la conservazione e la manipolazione degli agenti mordenzanti,



Figura 2.2.39. Vetreria da laboratorio (fonte:Kemet Internazionale Ltd)

- ✓ acqua distillata per il risciacquo dei campioni,



Figura 2.2.40. Acqua distillata (fonte: Micro Lit)

- ✓ timer o orologio per garantire tempi di incisione accurati,
- ✓ materiali resistenti agli agenti chimici, come contenitori in polietilene o polipropilene per la manipolazione degli agenti mordenzanti,



Figura 2.2.41. Bottiglie di plastica PET con incisione acida Barattolo di plastica da 13 g con tappo a vite in PP (fonte: Micro Lit)

- ✓ spazio di lavoro ventilato per ridurre al minimo l'esposizione ai fumi e garantire un corretto smaltimento dei prodotti chimici,

#### Procedura per l'incisione colorata

#### Preparazione del campione:

UN. Lo specialista dovrebbe iniziare con campioni metallografici ben preparati, montati e lucidati con un elevato livello di finitura.

B. Lo specialista deve garantire che i campioni siano puliti e privi di contaminanti o residui.



Figura 2.2.42. Preparazione del campione ed esempio del campione (fonte:Kemet Internazionale Ltd)

### Selezione di mordenzanti colorati:

UN. Lo specialista dovrebbe scegliere il mordenzante colorato appropriato in base al metallo specifico e alle caratteristiche che si desidera rivelare.

B. Lo specialista dovrebbe fare riferimento alle linee guida del produttore o alle risorse pubblicate per informazioni sugli agenti mordenzanti adatti alla propria applicazione.

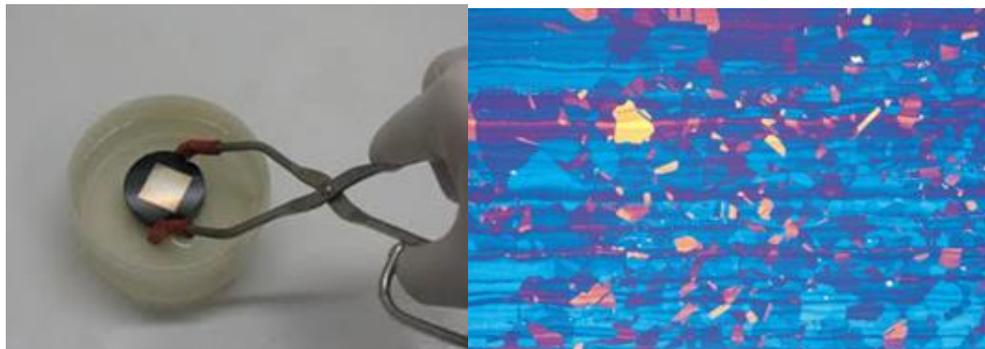


Figura 2.2.43. Esempio di attacco (a destra) e acciaio altolegato (a sinistra) inciso con mordenzanti colorati (Beraha, Lichtenegger), con lisciva V2A o mordenzante Adler contenente acido cloridrico (fonte: Struers)

### Preparazione dell'agente mordenzante:

UN. Lo specialista deve seguire attentamente le istruzioni del produttore per la preparazione del mordenzante colorato.

B. Potrebbe essere necessario miscelare alcuni agenti mordenzanti con un solvente specifico o prepararli a una concentrazione particolare.

### Tipi comuni di incisioni colorate (vedere l'appendice)



Molti metalli incisi con reagenti standard per rivelare i confini dei grani spesso producono solo un'alta percentuale dei confini, piuttosto che tutti i confini. I coloranti, tuttavia, rivelano completamente la struttura della grana. Nel caso dei metalli con ricottura twin, può essere molto difficile valutare la dimensione del grano quando un agente di attacco standard rivela una porzione del grano e i confini del twin. Infatti, con un campione del genere può essere piuttosto difficile effettuare una misurazione precisa della dimensione del grano, anche manualmente, in quanto distingue tra confine del grano e confine gemello (quest'ultimo deve essere ignorato nella misurazione). Tuttavia, con una microstruttura incisa a colori è relativamente facile separare i grani dai confini gemelli, almeno manualmente.

Inoltre, i film crescono in funzione dell'orientamento dei cristalli. Pertanto, è possibile rilevare qualsiasi orientamento cristallografico preferito dalla ristrettezza della gamma di colori presente. Se è presente un'ampia gamma di colori in uno schema casuale, l'orientamento dei cristalli è casuale. Se nei grani è presente una gamma ristretta di colori, allora è presente un orientamento preferito.

La preparazione dei campioni deve essere migliore quando si utilizzano metodi a colori rispetto ai metodi in bianco e nero perché le pellicole cresciute epitassiali sono sensibili al danno residuo indotto dalla preparazione che non è stato rimosso. Questo livello di preparazione è richiesto nel lavoro di analisi delle immagini e può essere facilmente ottenuto da un esperto metallografico esperto con l'attrezzatura adeguata. La lucidatura elettrolitica non è necessaria per ottenere superfici prive di danni.

Gli agenti mordenzanti più comuni sono quelli che depositano una pellicola di interferenza a base di solfuro sul campione. Queste sono le incisioni colorate più conosciute e solitamente le più facili da usare. Klemm e Beraha hanno sviluppato i mordenzanti a base di solfuro più utilizzati utilizzando tiosolfato di sodio,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , e metabisolfito di potassio,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ .



Figura 2.2.44. E Figura 2.2.45. Struttura a grana gemellata FCC di cartuccia in ottone, Cu - 30% Zn, dopo riduzione a freddo del 50% e ricottura completa, tinta incisa con i reagenti di Klemm I (a sinistra) e III di Klemm (a destra) e visualizzata con luce polarizzata più tinta sensibile. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 200  $\mu\text{m}$  (fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

I reagenti I, II, III di Klemm (Figure 2.2.12 e 2.2.13) e uno dei reagenti di Beraha utilizzano entrambi gli ingredienti (Figura 2.2.13) mentre Beraha consiglia un intervallo di concentrazioni di HCl da utilizzare con metabisolfito di potassio (Figura 2.2.14) per l'attacco una varietà di leghe a base di ferro.

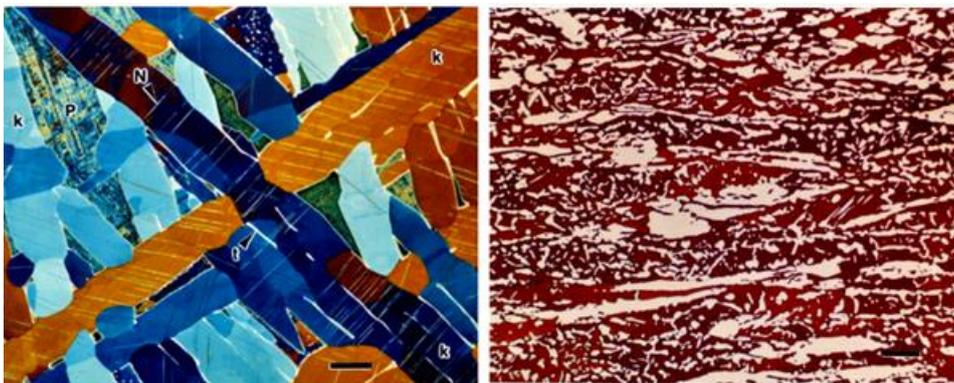


Figura 2.2.46. e Figura 2.2.47. : Struttura a grana fine di ottaedrite del meteorite Gibeon (a sinistra) rivelata con il reagente di Beraha (100 mL di acqua, 10 g di  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  e 3 g di  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) e ferrite in una piastra di acciaio inossidabile duplex 7 Mo PLUS rivelata usando il reagente di Beraha (85 mL di acqua, 15 mL HCl, 1 g  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ). Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 500 e 50  $\mu\text{m}$  [2.2.10].

Questi agenti aggressivi possono essere utilizzati per colorare ferrite e martensite in ghisa, acciai al carbonio e bassoalegati. I reagenti a base di HCl variano ampiamente in concentrazione

e possono essere utilizzati per colorare le strutture dei grani di acciai inossidabili (2.2.15), leghe a base di Ni e a base di Co. Il metabisolfito di sodio è stato utilizzato in diverse concentrazioni, da circa 1 a 20 g per 100 ml di acqua, ed è un agente chimico sicuro, affidabile e utile per ferri e acciai. (fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

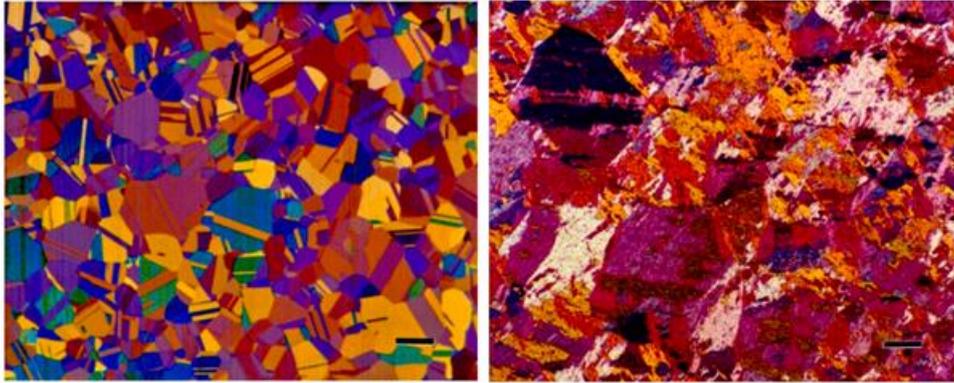


Figura 2.2.48.e 2.2.49: struttura a grani gemellati FCC dell'acciaio inossidabile Custom Flo 302 di qualità della voce rivelata utilizzando il reagente B1 di Beraha e struttura a grani martensitici di acciaio ultra-austenitizzato (1093 °C) AerMet 100 ad altissima resistenza rivelata utilizzando metabisolfito di sodio al 10%. Entrambi visualizzati con luce polarizzata più tinta sensibile. Le barre di ingrandimento sono lunghe 100  $\mu\text{m}$ (fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

Beraha ha anche sviluppato agenti mordenzanti a base di acido solfamminico, un acido organico a bassa concentrazione, che non è stato utilizzato molto, sebbene siano abbastanza utili, affidabili e facili da usare. I reagenti a base di acido solfamminico sono applicabili alla ghisa, agli acciai a basso tenore di carbonio e legati, agli acciai per utensili e agli acciai inossidabili martensitici (Figura 2.2.17). Beraha ha inoltre sviluppato due colorazioni piuttosto specializzate che depositano pellicole di solfuro di cadmio (Figura 2.2.18) o di solfuro di piombo (Figura 2.2.19) sulle superfici di acciai e leghe a base di rame. Questi due agenti mordenzanti sono piuttosto utili, sebbene tossici con cui lavorare. Il suo reagente CdS è utile per acciai al carbonio e legati, acciai per utensili e acciai inossidabili ferritici, martensitici e temprabili per precipitazione, mentre il reagente PbS svolge un lavoro eccellente sulle leghe a base di rame e può essere utilizzato per colorare i solfuri negli acciai, bianchi (il campione viene premordenzato con nital e l'attacco colora la matrice scurita, in modo che siano visibili i solfuri bianchi).

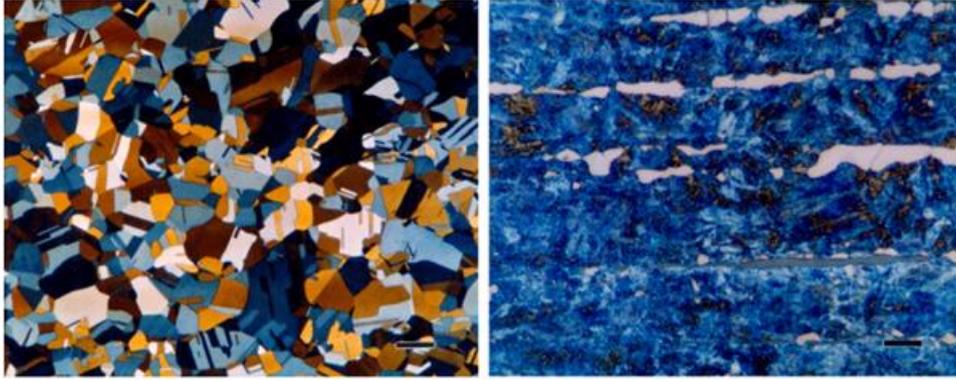


Figura 2.2.50.e 2.2.51: struttura del grano FCC gemellato in Fe-39% Ni rivelata dal reagente acido solfammonico di Beraha (a sinistra) e struttura del grano martensite temperato dell'acciaio inossidabile martensitico 416 rivelata con il reagente CdS di Beraha (a destra). I grani bianchi sono ferrite delta e le inclusioni grigie sono solfuri. Visto con luce polarizzata più tinta sensibile. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 100 e 200  $\mu\text{m}$ (fonte: Struers)



Figura 2.2.52.e 2.2.53: micrografia a cartuccia in ottone mostrata nelle figure 2.2.11 e 2.2.12, tinta incisa con il reagente PbS di Beraha (a sinistra) e cementite in una lega binaria Fe-1% C laminata a caldo colorata con il reagente al molibdato di sodio di Beraha (a destra). Le barre di ingrandimento sono rispettivamente 200 e 20  $\mu\text{m}$ ,(fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

Beraha ha inoltre sviluppato due agenti mordenzanti che utilizzano ioni molibdato nell'acido nitrico. Colorano la cementite negli acciai (Figura 2.2.52). Ha inoltre sviluppato agenti coloranti che depositano il selenio elementare sulla superficie degli acciai (Figura 2.2.53), leghe a base di nichel e leghe a base di rame (Figura 2.2.54).

Esistono numerosi altri agenti mordenzanti che sono stati sviluppati da una varietà di metallografie. Lichtenegger e Blöch, ad esempio, hanno sviluppato un reagente insolito che

colorerà l'austenite (Figura 2.2.56) negli acciai inossidabili duplex, anziché la ferrite (come fanno quasi tutti gli altri).

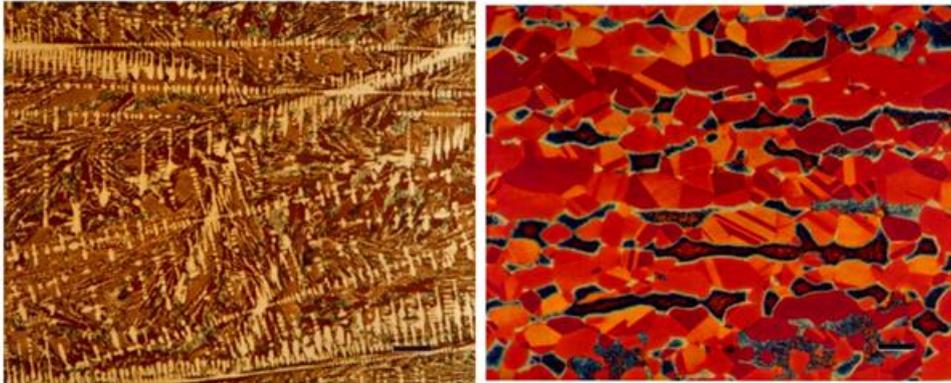


Figura 2.2.54.e 2.2.55: cementite nella superficie colata in conchiglia di ghisa grigia incisa con il reagente acido selenico di Beraha per la ghisa (a sinistra) e fase alfa e fase beta FCC gemellate (chiazze e delineate) in Cu-40% Zn rivelate utilizzando acido selenico di Beraha reagente per leghe di rame. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 50 e 20  $\mu\text{m}$ (fonte: Struers)

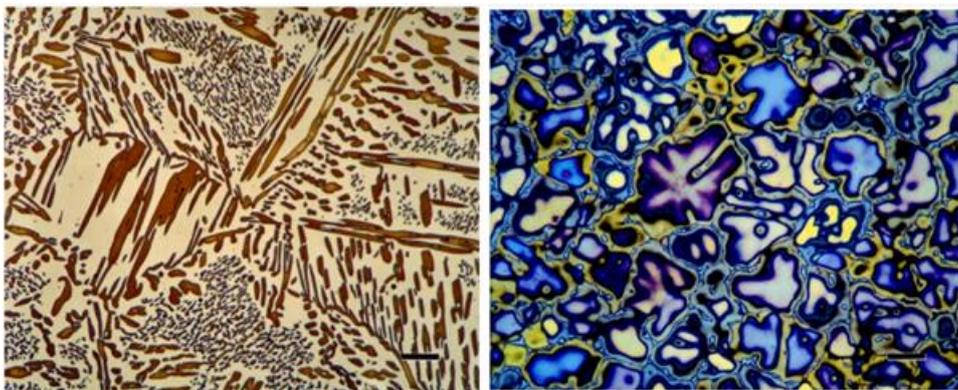


Figura 2.2.56.e 2.2.57: Austenite colorata in acciaio inossidabile duplex fuso ASTM A890 grado 5A con il reagente LB1 (a sinistra) e la struttura del grano fuso dell'alluminio 206 rivelata utilizzando il reagente Weck per le leghe di Al (a destra). Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 100 e 50  $\mu\text{m}$ ,(fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

Weck ha sviluppato una serie di agenti mordenzanti, utilizzandone molti nella sua ricerca. Diversi sono stati sviluppati per colorare l'alluminio (Figura 2.2.57) o le leghe di titanio (Figura 2.2.58). In ogni caso, è più facile sviluppare un buon colore con le leghe fuse che con le leghe lavorate. Due agenti di attacco si sono rivelati utili per colorare la fase theta,  $\text{AlCu}_2$ , nelle leghe

Al-Cu; Lienard ha sviluppato uno dei più facili da usare. Sono stati sviluppati diversi mordenzanti colorati

. Lichtenegger e Blöch, ad esempio, hanno sviluppato un reagente insolito che colorerà l'austenite (Figura 2.2.56) negli acciai inossidabili duplex, anziché la ferrite (come fanno quasi tutti gli altri).

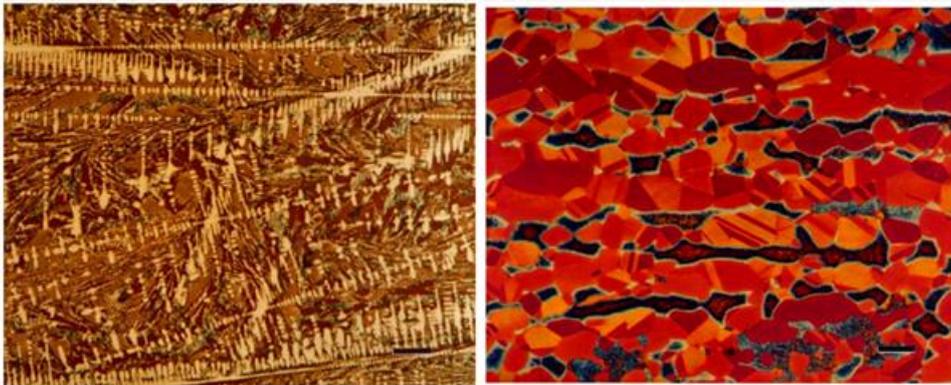


Figura 2.2.54.e 2.2.55: cementite nella superficie colata in conchiglia di ghisa grigia incisa con il reagente acido selenico di Beraha per la ghisa (a sinistra) e fase alfa e fase beta FCC gemellate (chiazze e delineate) in Cu-40% Zn rivelate utilizzando acido selenico di Beraha reagente per leghe di rame. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 50 e 20  $\mu\text{m}$ (fonte: Struers)

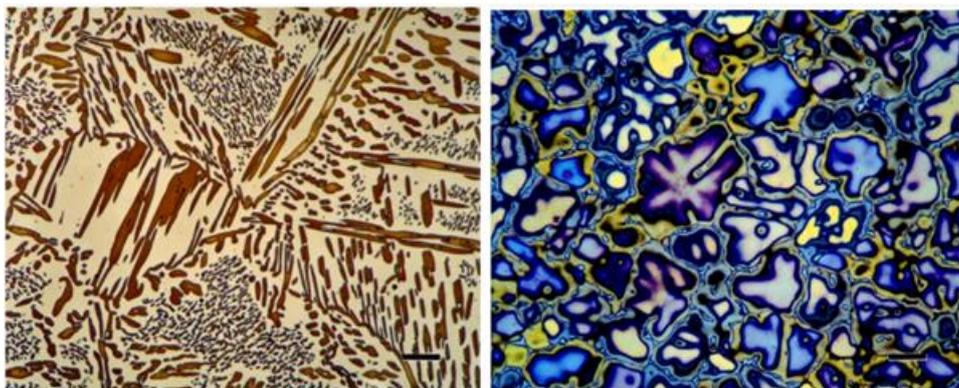


Figura 2.2.56.e 2.2.57: Austenite colorata in acciaio inossidabile duplex fuso ASTM A890 grado 5A con il reagente LB1 (a sinistra) e la struttura del grano fuso dell'alluminio 206 rivelata utilizzando il reagente Weck per le leghe di Al (a destra). Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 100 e 50  $\mu\text{m}$ ,(fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

Weck ha sviluppato una serie di agenti mordenzanti, utilizzandone molti nella sua ricerca. Diversi sono stati sviluppati per colorare l'alluminio (Figura 2.2.57) o le leghe di titanio (Figura 2.2.58). In ogni caso, è più facile sviluppare un buon colore con le leghe fuse che con le leghe lavorate. Due agenti di attacco si sono rivelati utili per colorare la fase theta, AlCu<sub>2</sub>, nelle leghe Al-Cu; Lienard ha sviluppato uno dei più facili da usare. Sono stati sviluppati diversi agenti mordenzanti colorati per il molibdeno (Figura 2.2.59) e per il tungsteno.

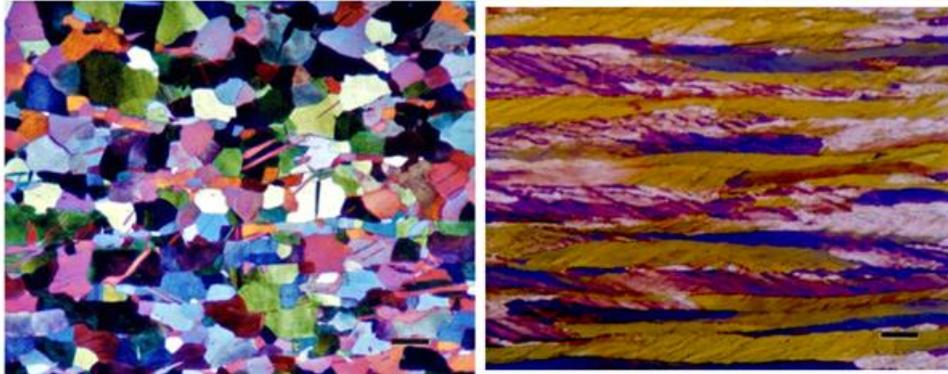


Figura 2.2.58.e 2.2.59: struttura del grano di CP Ti laminato a freddo (ASTM F67, grado 2) contenente gemelli meccanici (a sinistra) incisi con il reagente di Weck modificato e molibdeno puro laminato a freddo (a destra) colorato con il reagente sviluppato dall'Oak Ridge National Laboratory. Le barre di ingrandimento sono lunghe rispettivamente 100 e 20  $\mu\text{m}$ (fonte: Metallografia colorata Vac Aero)

#### **Processo di incisione:**

UN. Lo specialista dovrà immergere il campione metallografico lucidato nella soluzione mordenzante colorata.

B. Lo specialista dovrebbe monitorare attentamente il processo di incisione, il tempo necessario per l'incisione varia in base al metallo e allo specifico mordenzante utilizzato.

C. Lo specialista dovrebbe utilizzare un timer per garantire che il tempo di incisione sia preciso.

D. Lo specialista dovrebbe rimuovere il campione dal mordenzante al termine del tempo di mordenzatura predeterminato.

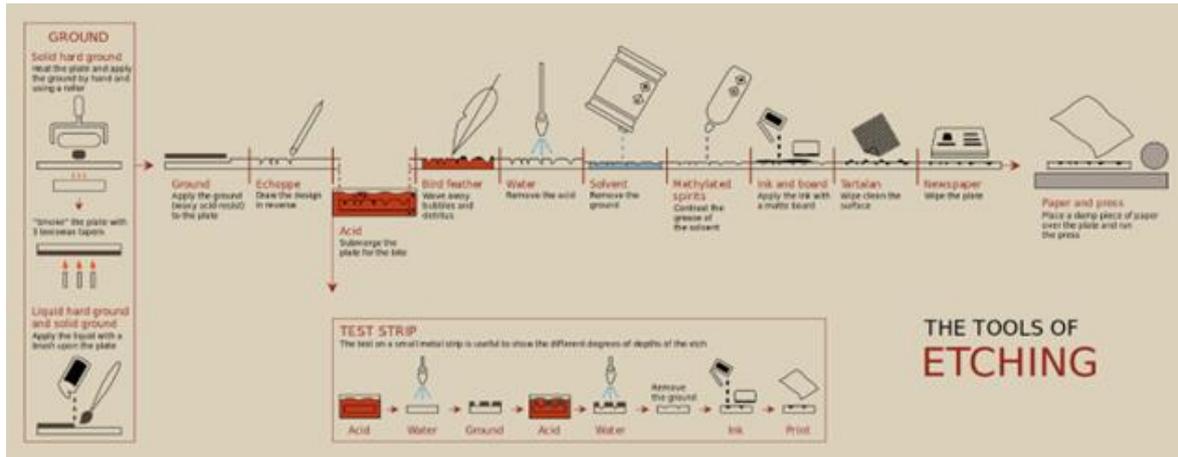


Figura 2.2.60. Gli strumenti della tecnica moderna dell'acquaforte (fonte: Wikipedia)

### Risciacquo e Pulizia:

UN. Lo specialista dovrebbe sciacquare accuratamente il campione mordenzato con acqua distillata per rimuovere eventuali residui di mordenzante.

B. Lo specialista dovrebbe utilizzare una spazzola morbida o una spugnetta per pulire delicatamente la superficie, se necessario.



Figura 2.2.61. Acqua distillata per il risciacquo dei campioni (fonte: Mirco Lit)

### Esame microscopico:

UN. Lo specialista dovrebbe consentire al campione di asciugarsi o utilizzare aria compressa per rimuovere l'umidità in eccesso.

B. Lo specialista dovrebbe esaminare il campione mordenzato al microscopio per osservare le caratteristiche microstrutturali colorate.

C. Lo specialista dovrebbe documentare e fotografare i risultati per l'analisi e la tenuta dei registri.



Figura 2.2.62. Microscopi metallurgici (fonte: Nikon)

#### Ripetibilità e ottimizzazione:

Se necessario, lo specialista dovrebbe ripetere il processo variando il tempo di mordenzatura o la concentrazione del mordenzante per ottimizzare i risultati e migliorare il contrasto.

La corretta preparazione del campione e il rispetto delle precauzioni di sicurezza sono essenziali per ottenere risultati accurati e significativi.

#### 2.2.9. Problemi comuni e soluzioni quando si utilizza l'attacco colorato per la preparazione dei campioni metallografici

Quando si utilizza l'attacco colorato per la preparazione del campione metallografico, è essenziale controllare attentamente le condizioni dell'attacco, comprendere la chimica dell'agente mordenzante e mantenere una preparazione meticolosa del campione per ottenere i risultati desiderati e un'analisi microstrutturale accurata. La sperimentazione e la pratica sono spesso necessarie per ottimizzare il processo di incisione per materiali e microstrutture specifici.

#### Problemi comuni

##### Contrasto o sviluppo del colore inadeguati

**Problema:** Il campione inciso non presenta il contrasto o i colori attesi.

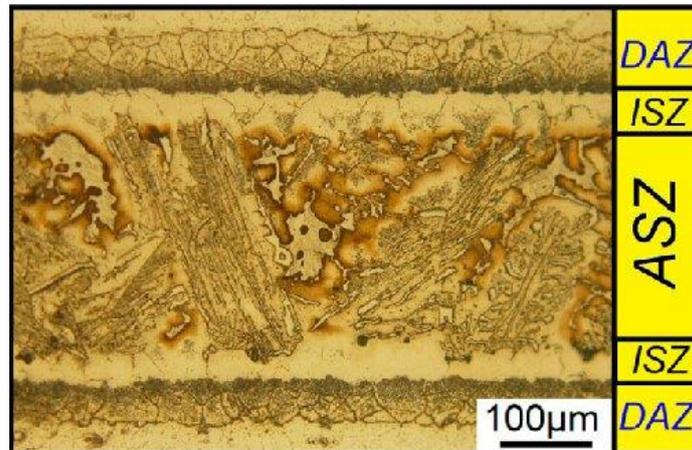


Figura 2.2.63. Micrografia ottica che mostra il gradiente microstrutturale nel giunto brasato HX/Ni-13Cr-4.5Si-4.2Fe-2.8B/HX. (fonte: Ghasemi, Ali & Pouranvari, Majid. (2018). Formazione di fase intermetallica durante la brasatura di una lega di nichel utilizzando una lega di materiale quinario Ni-Cr-Si-Fe-B. Scienza e tecnologia della saldatura e della giunzione. 24. 1 -10.10.1080/13621718.2018.1553280.)

**Soluzione:** Lo specialista verifica la compatibilità del mordenzante con il metallo e la microstruttura specifici, deve garantire che la concentrazione del mordenzante e il tempo di mordenzatura siano appropriati per il campione. Prendere in considerazione agenti di attacco alternativi che potrebbero fornire risultati migliori.

#### Eccessiva incisione

**Problema:** L'eccesso di mordenzatura si verifica quando il campione mostra un eccessivo sviluppo di colore, rendendo difficile il discernimento delle caratteristiche microstrutturali.

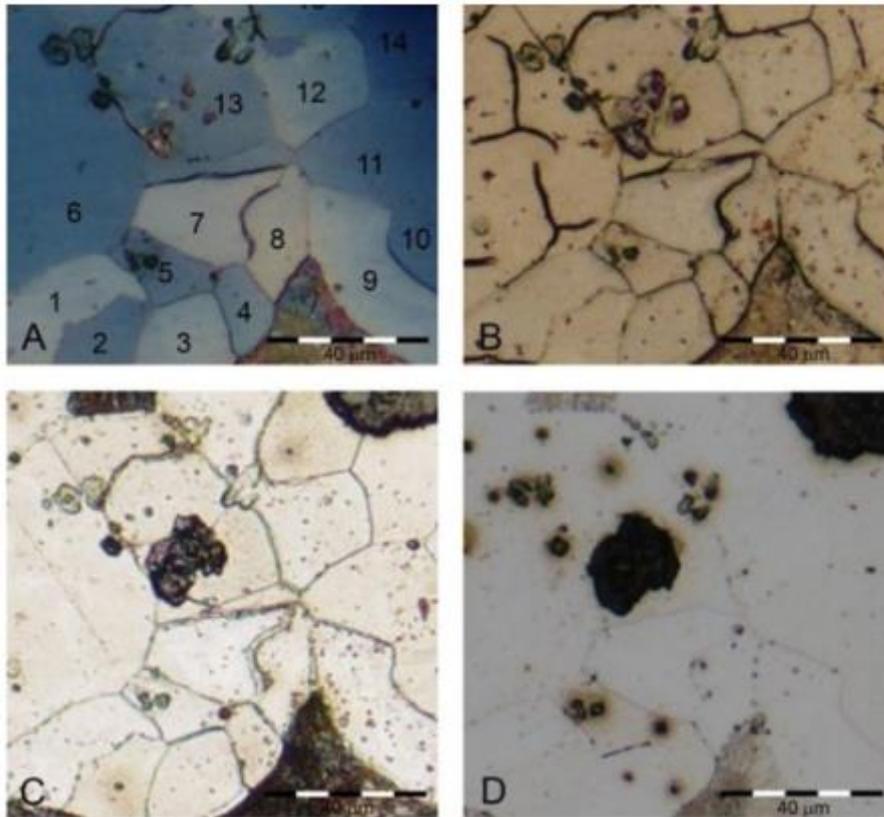


Figura 2.2.64. Micrografie ottiche del campione (A) dopo l'attacco del colore con la soluzione Beraha-I, (B) dopo l'attacco eccessivo con la soluzione Beraha-I, (C) dopo la rimozione dello strato interferente con acido solforico all'1% e (D) dopo l'attacco di Nital. (fonte: Ghasemi, Ali & Pouranvari, Majid. (2018). Formazione di fase intermetallica durante la brasatura di una lega di nichel utilizzando una lega di materiale quinario Ni–Cr–Si–Fe–B. Scienza e tecnologia della saldatura e della giunzione. 24. 1 -10.10.1080/13621718.2018.1553280.)

**Soluzione:** Lo specialista dovrebbe ridurre il tempo o la concentrazione dell'attacco per evitare un mordenzamento eccessivo e monitorare attentamente il campione durante l'attacco per evitare uno sviluppo eccessivo del colore.

**Sotto-incisione**

**Problema:** Il campione non mostra il livello di colore o contrasto desiderato.

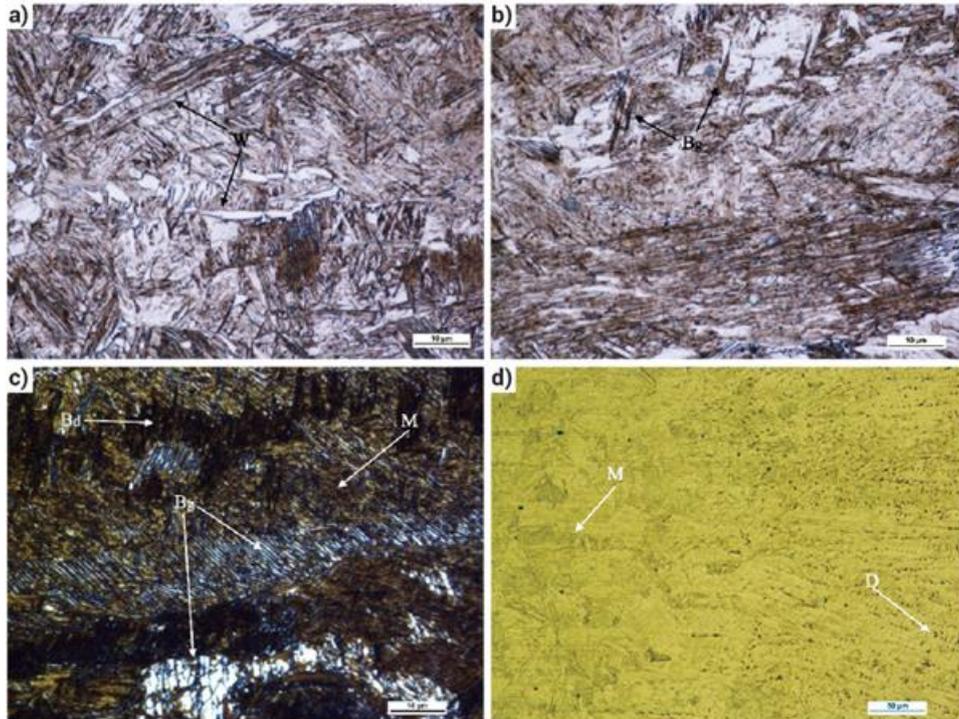


Figura 2.2.65. Microstruttura in acciaio TRIP, LOM: a) HAZ, Nital inciso, b) Zona di fusione, Nital inciso, c) Zona di fusione, Nital + reagente Klemm inciso, d) Zona di fusione e HAZ, Pikral inciso (fonte: Dobras, Daniel & Rutkowska-Gorczyca, Małgorzata. (2018). Applicazione dell'incisione a colori per studiare la microstruttura dell'acciaio TRIP dopo la rifusione laser. Revisione della tecnologia di saldatura. 90.10.26628/wtr.v90i12.984.)

**Soluzione:** Lo specialista dovrebbe aumentare il tempo di mordenzatura o la concentrazione per ottenere il contrasto desiderato. Lui/lei deve assicurarsi che la superficie del campione sia adeguatamente pulita e priva di contaminanti prima dell'attacco.

**Distribuzione del colore non uniforme**

**Problema:** I colori non sono distribuiti uniformemente sul campione, con conseguenti variazioni di contrasto.



Figura 2.2.66. Colorazione di diverse zone di grana o cristalli misti e strati di solfato di diverso spessore - Collegamento tramite saldatura laser di vari fili di acciaio austenitico (B) (fonte: Leica Microsystems)

**Soluzione:** Lo specialista dovrebbe migliorare la preparazione del campione, garantendo una finitura uniforme prima dell'attacco e agitando la soluzione mordenzante durante il processo per mantenere una distribuzione uniforme del colore.

#### Macchie o scolorimenti

**Problema:** Il campione potrebbe presentare macchie o scolorimenti indesiderati durante il processo di attacco.

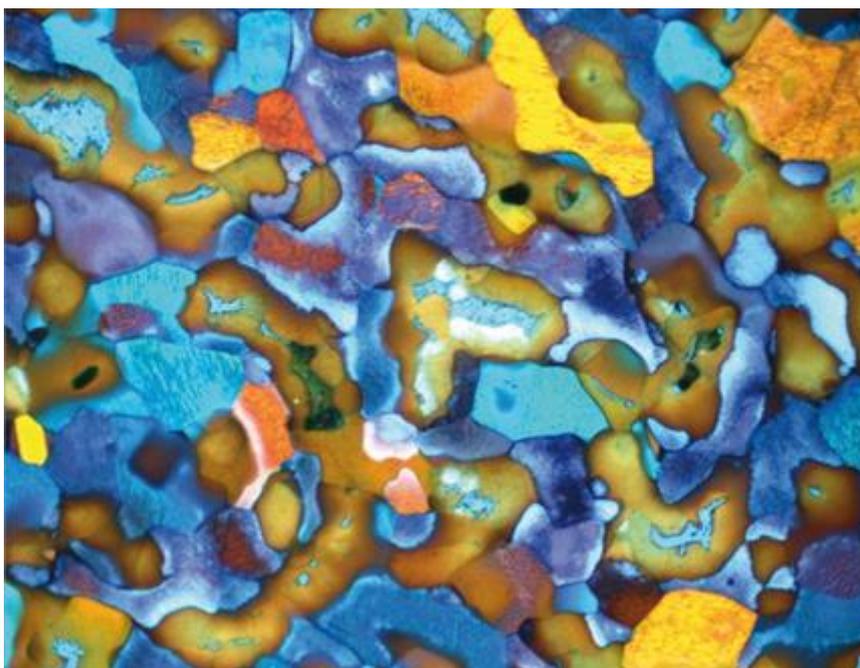


Figura 2.2.67. Differenze di concentrazione in un filo di bronzo (K) (fonte: Leica Microsystems)

**Soluzione:**Lo specialista dovrebbe verificare la compatibilità del mordenzante con il metallo e la microstruttura e assicurarsi che il campione sia adeguatamente pulito prima dell'attacco per evitare contaminanti che possano causare macchie.

### Contaminazione

**Problema:**I contaminanti sulla superficie del campione possono interferire con il processo di attacco.

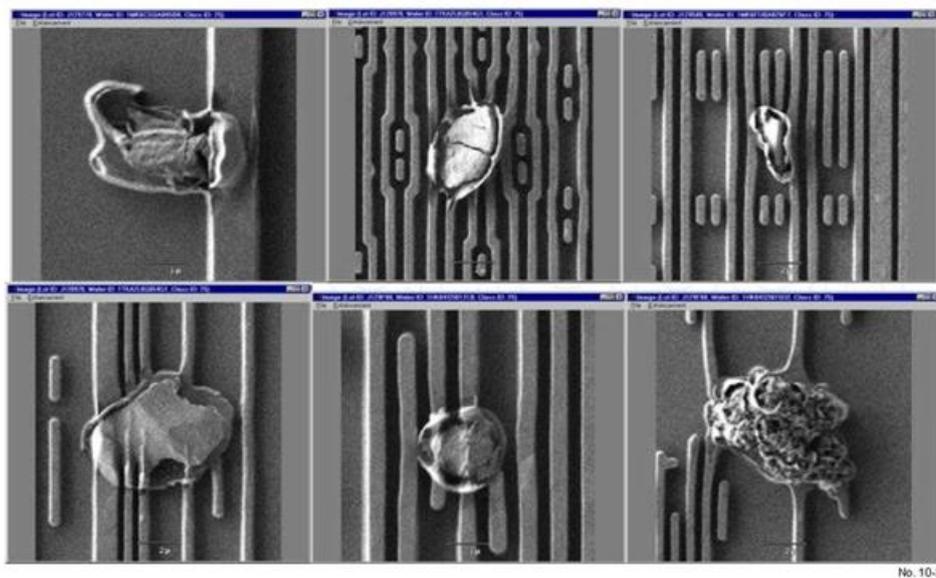


Figura 2.2.68. Difetti killer generati nei processi di incisione del metallo dell'alluminio. (fonte: Dati sull'acciaio)

**Soluzione:**Lo specialista deve pulire e sgrassare accuratamente il campione prima dell'attacco per rimuovere i contaminanti. Utilizzare attrezzature di laboratorio pulite, come contenitori e spazzole, per ridurre al minimo il rischio di contaminazione.

### Misure di sicurezza

**Problema:**Precauzioni di sicurezza inadeguate possono portare all'esposizione personale a agenti aggressivi pericolosi.



Figura 2.2.69. Dispositivi di Protezione Individuale (DPI) (fonte: MicroLit)

**Soluzione:** Il tecnico deve aderire ai protocolli di sicurezza adeguati e utilizzare dispositivi di protezione individuale (DPI), inclusi occhiali di sicurezza, guanti e camice da laboratorio e lavorare in un'area ben ventilata o sotto una cappa aspirante per ridurre l'esposizione ai fumi.

#### Risultati incoerenti

**Problema:** Quando ottenere risultati coerenti su campioni diversi può essere difficile.

**Soluzione:** Il tecnico deve mantenere un controllo preciso della concentrazione dell'agente mordenzante, del tempo di attacco e delle tecniche di preparazione del campione per garantire la ripetibilità e documentare e standardizzare il processo di attacco per ottenere risultati coerenti.

#### Conservazione dei registri inadeguata

**Problema:** Una scarsa documentazione rende difficile analizzare e replicare i risultati.

**Soluzione:** Il tecnico deve conservare registrazioni dettagliate del processo di attacco, inclusa la composizione dell'agente mordenzante, la concentrazione, il tempo di attacco e le caratteristiche del campione, per facilitare l'analisi futura e la risoluzione dei problemi.

### 2.2.10. Manipolazione e smaltimento dei reagenti da Coloured Etching

La manipolazione e lo smaltimento dei reagenti utilizzati nell'incisione colorata sono aspetti critici delle pratiche di laboratorio sicure e rispettose dell'ambiente. I reagenti per l'incisione colorati spesso contengono sostanze chimiche che possono essere pericolose, quindi è essenziale seguire le procedure corrette sia per la manipolazione che per lo smaltimento di questi materiali. La corretta manipolazione e smaltimento dei reagenti utilizzati nell'incisione colorata sono essenziali per mantenere un laboratorio sicuro e responsabile dal punto di vista ambientale. Dai sempre la priorità alla sicurezza e al rispetto delle normative locali quando lavori con materiali pericolosi.

### **Manipolazione dei reagenti per l'attacco colorato**

**Dispositivi di protezione individuale (DPI):**Lo specialista deve indossare dispositivi di protezione individuale adeguati, inclusi occhiali di sicurezza, guanti, camice da laboratorio o indumenti protettivi ed eventualmente uno schermo facciale per proteggersi dagli schizzi o dal contatto con i reagenti.

**Ventilazione:**Lo specialista deve eseguire la manipolazione dei reagenti in un'area ben ventilata, come una cappa aspirante o uno spazio con una buona ventilazione, per ridurre al minimo l'esposizione a fumi o vapori.

**Etichettatura:**Lo specialista deve garantire contenitori chiaramente etichettati che contengano i reagenti, con i loro nomi, composizioni, pericoli e tutte le necessarie precauzioni per la manipolazione. È obbligatorio l'uso di etichette specifiche e la tenuta dei registri.

**Utilizzare contenitori adeguati:**Lo specialista deve conservare i reagenti in contenitori resistenti agli agenti chimici progettati per questo scopo; contenitori di vetro o plastica sono scelte comuni.

**Ridurre al minimo il contatto con la pelle:**Lo specialista deve evitare il contatto diretto della pelle con il reagente; in caso di contatto, sciacquare immediatamente la zona interessata con abbondante acqua.

**Non mangiare né bere:**Lo specialista deve assicurarsi di non mangiare, bere o fumare durante la manipolazione dei reagenti per evitare l'ingestione accidentale.

**Maneggiare con cura:**Lo specialista deve essere cauto durante il trasferimento o la miscelazione dei reagenti per evitare schizzi o incidenti.

**Verifica compatibilità:**Lo specialista deve garantire che i materiali utilizzati per la manipolazione dei reagenti (contenitori, agitatori, ecc.) siano compatibili con il reagente specifico e non reagiscano con esso.

**Istruzione e formazione:**Tutto il personale che lavora con i reagenti utilizzati nell'incisione colorata deve essere istruito sui rischi e sulle procedure di sicurezza; la formazione e la sensibilizzazione continue sono cruciali.

### **Smaltimento dei reagenti dall'attacco colorato**

**Conformità normativa:**Il laboratorio deve rispettare le normative locali, statali e federali che regolano lo smaltimento dei rifiuti pericolosi; tali normative possono variare in base al luogo. Lo specialista deve tenere separati i diversi reagenti e non mescolarli durante lo smaltimento. In alcuni casi, lo specialista potrebbe dover neutralizzare il reagente prima dello smaltimento. Dovrebbe seguire le linee guida sulla compatibilità chimica per una neutralizzazione sicura.

**Consultare gli esperti:**Se lo specialista non è sicuro dei metodi di smaltimento corretti, consultare un chimico qualificato, un esperto di smaltimento dei rifiuti o il dipartimento di salute e sicurezza ambientale della propria organizzazione.

**Etichettare i contenitori dei rifiuti:**Lo specialista deve etichettare chiaramente i contenitori dei rifiuti con il loro contenuto ed eventuali pericoli per garantire una manipolazione sicura durante lo smaltimento. Dovrebbe garantire che i contenitori dei rifiuti siano sigillati ermeticamente per evitare perdite o fuoriuscite.

**Servizi di smaltimento rifiuti:**Il laboratorio deve organizzare il ritiro e lo smaltimento dei rifiuti pericolosi attraverso servizi o strutture di smaltimento rifiuti autorizzati e autorizzati; non deve tentare di smaltire i rifiuti pericolosi da solo. Il laboratorio deve conservare la documentazione del processo di smaltimento, comprese le date, i metodi di smaltimento e qualsiasi scheda di dati di sicurezza (SDS) pertinente come riferimento. I laboratori devono essere preparati per le emergenze e disporre di kit di risposta alle fuoriuscite, docce di sicurezza e stazioni per il lavaggio degli occhi nell'area in cui vengono manipolati i reagenti dell'attacco colorato.

2.2.11. Risoluzione dei problemi e suggerimenti nei campioni metallografici incisi colorati  
Diversi fattori possono influenzare lo sviluppo del colore nell'acquaforte colorata. Questi includono la composizione e la concentrazione dell'agente mordenzante, la temperatura, il tempo di attacco e la preparazione della superficie del campione. Inoltre, la presenza di elementi di lega, impurità o orientamenti cristallografici specifici possono influenzare l'intensità e il contrasto del colore.

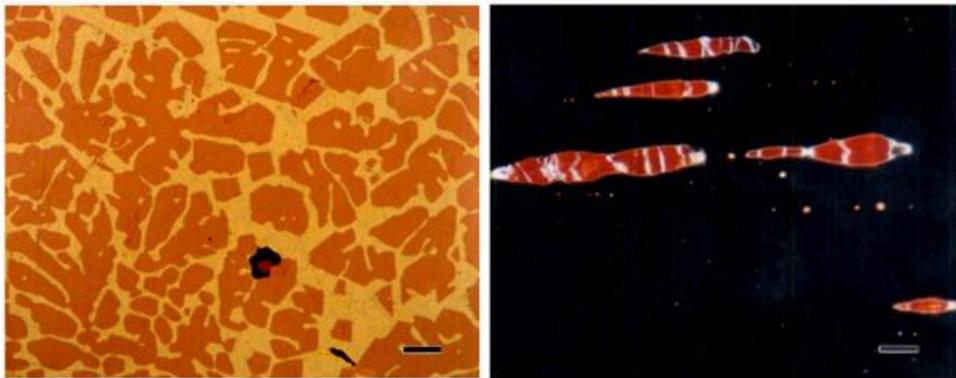


Figura 2.2.70.(a sinistra) e 2.2.71 (a destra) che mostrano il colore naturale rossastro-viola dell'intermetallico AuAl<sub>2</sub> (a sinistra) in campo chiaro e il caratteristico colore rosso rubino dell'ossido rameoso nell'illuminazione in campo scuro (campione di rame elettrolitico). Le barre di ingrandimento sono rispettivamente 50 e 10  $\mu\text{m}$ (fonte: metallografia colorata Vac Aero)

Comprendere questi fattori è fondamentale per ottenere uno sviluppo del colore e un contrasto ottimali nell'incisione colorata. Per ottenere risultati affidabili e riproducibili sono necessari un attento controllo e l'ottimizzazione dei parametri di attacco.

#### 2.2.12. Esempi reali di incisione colorata

L'incisione colorata è una tecnica utilizzata nel campo della metallografia per rivelare ed evidenziare specifiche caratteristiche microstrutturali nei materiali metallici. Nei settori automobilistico e aerospaziale, l'incisione colorata viene spesso utilizzata per ispezionare le saldature in materiali come alluminio e acciaio. Questa tecnica aiuta a rivelare l'integrità della saldatura, la presenza di difetti e la qualità del cordone di saldatura e della zona alterata dal



calore. L'incisione colorata è uno strumento importante nell'ingegneria forense e nell'analisi dei guasti. Aiuta a identificare le cause dei guasti dei componenti, come la presenza di crepe, vuoti o inclusioni all'interno di un materiale. Nei settori dell'edilizia e dell'ingegneria civile, l'incisione colorata viene utilizzata per ispezionare i componenti strutturali in acciaio. Aiuta a valutare la qualità dell'acciaio e la presenza di eventuali inclusioni, segregazioni o difetti che potrebbero compromettere l'integrità strutturale. L'incisione colorata viene utilizzata per esaminare i componenti del motore, come pistoni e alberi a gomiti. Aiuta a valutare la qualità del materiale e a rilevare eventuali difetti o irregolarità che potrebbero influire sulle prestazioni.

I produttori di aeromobili e le strutture di manutenzione utilizzano l'incisione colorata per ispezionare componenti critici come le pale delle turbine e il carrello di atterraggio. Questa tecnica aiuta a identificare i problemi microstrutturali che potrebbero portare al guasto dei componenti. Nella produzione di impianti e dispositivi medici, l'incisione colorata viene utilizzata per valutare la qualità e l'integrità di materiali come acciaio inossidabile, titanio e leghe di cobalto-cromo. Aiuta a garantire che i dispositivi medici soddisfino rigorosi standard di sicurezza e prestazioni.

Nell'industria dei semiconduttori, l'incisione colorata viene utilizzata per verificare la qualità dei wafer di silicio. La tecnica può rivelare difetti cristallografici, bordi di grano e altre caratteristiche che possono influenzare le prestazioni dei dispositivi a semiconduttore. L'incisione colorata viene utilizzata nei test non distruttivi dei materiali utilizzati nel settore petrolifero e del gas. Aiuta a identificare difetti o punti deboli in componenti come tubazioni, recipienti a pressione e saldature, garantendone l'affidabilità e la sicurezza.

Ricercatori e ingegneri utilizzano l'incisione colorata per studiare la microstruttura di vari materiali, inclusi metalli e leghe. Viene utilizzato per identificare i bordi, le fasi e le inclusioni dei grani, che sono essenziali per comprendere le proprietà e il comportamento dei materiali. Nella metallurgia e nella scienza dei materiali si utilizza l'acquaforte colorata per studiare la microstruttura e la composizione di fase di vari metalli e leghe. Queste informazioni sono cruciali per la progettazione e il miglioramento dei materiali per applicazioni specifiche.

## Appendice

### Composizioni incise

L'lo di Klemm	50 mL di soluzione madre, 1 g di K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (la soluzione madre è saturata in acqua con Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
III di Klemm	5 mL di soluzione madre, 45 mL di acqua, 20 g di K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (soluzione madre come per Klemm's I)
Reagente 10/3 di Beraha	10 g di Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 3 g di K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e 100 ml di acqua
BI di Beraha	100 mL di soluzione madre (1000 mL di acqua, 200 mL di HCl, 24 g di NH <sub>4</sub> FHF) più 0,1 – 0,2 g di K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> per acciaio inossidabile martensitico
BI di Beraha	100 mL di soluzione madre (1000 mL di acqua, 200 mL di HCl, 24 g di NH <sub>4</sub> FHF) più 0,3 – 0,6 g di K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> per acciai inossidabili austenitici e ferritici.
Reagente solfammico Beraha n. III	100 mL di acqua, 3 g di K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 2 g di NH <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> H (sono state pubblicate altre due composizioni simili) per acciai al carbonio e legati.
Reagente solfammico Beraha n. IV	100 mL di acqua, 3 g K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 1 g NH <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> H, 0,5 – 1 g NH <sub>4</sub> FHF per acciai per utensili ad alto contenuto di Cr e acciai inossidabili martensitici.
Reagenti di Beraha	Soluzione madre di CdS: 1000 mL di acqua, 240 g di Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • 5H <sub>2</sub> O, 20-25 g di cloruro di cadmio (o acetato di cadmio), 30 g di acido citrico; Soluzione madre di PbS: 1000 mL di acqua, 240 g di Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> • 5H <sub>2</sub> O, 30 g di acido citrico, 24 g di acetato di piombo
Reagente selenico per ghisa	100 mL di etanolo, 2 mL di HCl, 1 mL di acido selenico

### 2.2.13. Comprendere e descrivere le differenze in termini dei loro effetti sulla finitura superficiale e sulla microstruttura del campione

Analisi della microstruttura ed esame di campioni preparati mediante la tecnica dell'attacco colorato



L'analisi e l'esame della microstruttura sono passaggi essenziali nello studio dei materiali per comprenderne la struttura interna, i confini dei grani, le fasi, i difetti e altre caratteristiche microstrutturali.

Ciascuna delle tecniche di trattamento superficiale (lucidatura elettrolitica, incisione colorata) offre vantaggi e considerazioni unici per l'analisi della microstruttura:

<b>Analisi della microstruttura dopo la lucidatura elettrolitica:</b>	<b>Analisi della microstruttura dopo l'attacco colorato:</b>
<p>La lucidatura elettrolitica produce superfici lisce e a specchio su campioni metallici senza introdurre deformazioni meccaniche.</p> <p>Le microstrutture rivelate dopo la lucidatura elettrolitica hanno meno probabilità di essere alterate da artefatti superficiali rispetto ad altre tecniche.</p> <p>Dopo la lucidatura elettrolitica, il campione di metallo può essere osservato direttamente al microscopio ottico o elettronico per l'analisi microstrutturale.</p> <p>I confini dei grani, i confini delle fasi e le inclusioni possono essere chiaramente identificati e analizzati.</p>	<p>L'incisione colorata utilizza agenti mordenzanti specifici per rivelare ed evidenziare diverse caratteristiche microstrutturali sulle superfici metalliche, fornendo un contrasto di colori o sfumature.</p> <p>L'incisione colorata è particolarmente utile per distinguere diverse fasi, bordi dei grani e composti intermetallici nella microstruttura.</p> <p>Il contrasto fornito dall'incisione colorata facilita l'identificazione e la caratterizzazione dei costituenti microstrutturali.</p> <p>È necessario prestare attenzione nell'utilizzare agenti mordenzanti appropriati e procedure standardizzate per garantire risultati affidabili e accurati.</p>

Nel complesso, le due tecniche – lucidatura elettrolitica e incisione colorata – svolgono un ruolo importante nell'analisi della microstruttura. La scelta della tecnica dipende dai requisiti specifici dell'analisi, dal materiale studiato e dal livello desiderato di finitura superficiale e precisione. In alcuni casi, è possibile combinare più tecniche per ottenere una comprensione completa della microstruttura del materiale. Inoltre, è necessario prestare attenzione per evitare l'introduzione di artefatti che potrebbero fuorviare l'analisi microstrutturale. Tecniche



di microscopia avanzate, come la microscopia elettronica a scansione (SEM) e la microscopia elettronica a trasmissione (TEM), vengono spesso impiegate per ottenere un esame della microstruttura ad alta risoluzione dopo il trattamento superficiale.

## Riferimenti

1. <https://www.besttechnologyinc.com/electropolishing-equipment/how-does-electropolishing-work/>
2. <https://www.kemet-international.com/ca/products/metallography>
3. <http://www.ral.neu.edu.cn/RAL/2012/1001/c4716a91534/pagem.htm>
4. <http://www.ral.neu.edu.cn/RAL/2012/1001/c4716a91534/pagem.htm>;
5. <https://www.steeldata.info/ms/demo/semi/help/defects/10.html>
6. <https://www.microlit.com/a-beginners-guide-to-understanding-liquid-handling/>
7. <https://www.plusivo.com/>
8. <https://www.pbo.co.uk/expert-advice/how-to-lucid-stainless-steel-in-the-workshop-at-home-64115>
9. <https://cr4.globalspec.com/thread/49091/Streaks-on-Machined-SS304-after-Electropolishing>
10. <https://en.wikipedia.org/wiki/Etching>
11. <https://www.quora.com/What-are-the-different-types-of-electrolytes>
12. <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/991-color-metallography.html>
13. [<https://www.kemel.com>];
14. <https://www.valencesurfacetech.com/the-news/electropolishing-for-aerospace>;
15. <https://www.youtube.com/watch?v=fc8zrgYJCJw>;
16. <https://www.buehler.com/products/grinding-and-polishing/>;
17. <https://www.youtube.com/watch?v=NI06GygDpSA>;
18. <https://www.struers.com/Knowledge/Materials/Stainless-Steel#etching>;
19. [https://www.youtube.com/watch?v=LihfJ8uyh\\_w](https://www.youtube.com/watch?v=LihfJ8uyh_w);
20. <https://www.youtube.com/watch?v=9VpOldhTBXA>;
21. <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/991-color-metallography.html>;



22. GF Vander Voort, Metallografia: principi e pratica, McGraw-Hill Book Co., NY, 1984 e ASM International, Materials Park, Ohio, 1999;
23. <https://www.youtube.com/watch?v=Qfgf35wPWgo&t=11s>;
24. [https://www.keyence.eu/landing/lpc/1807-vh-metallurgical-micro-scope.jsp?aw=KIB01kw0\\_11629853&gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCdtbWTwPZtL6jzu6Ayh0c9LwKbVysrpf7MCHirLbaR1t\\_ntJveeSBxoCCWkQAvD\\_BwE](https://www.keyence.eu/landing/lpc/1807-vh-metallurgical-micro-scope.jsp?aw=KIB01kw0_11629853&gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCdtbWTwPZtL6jzu6Ayh0c9LwKbVysrpf7MCHirLbaR1t_ntJveeSBxoCCWkQAvD_BwE);
25. Yang, G., Wang, B., Tawfiq, K., Wei, H., Zhou, S., & Chen, G. (2016). Elettrolucidatura delle superfici: teoria e applicazioni. *Ingegneria delle superfici*, 33(2), 149–166;
26. [Acquesta, A.; Monetta, T. Approccio verde per i trattamenti superficiali di elettrolucidatura di parti prodotte con additivi: una revisione completa. *Metalli* 2023, 13, 874. <https://doi.org/10.3390/met13050874>;
27. Alrbaey, K.; Wimpenny, DI; Al-Barzinjy, AA; Moroz, A. Elettrolucidatura di parti in acciaio inossidabile 316L SLM rifuse utilizzando solventi eutettici profondi: progettazione fattoriale completa 3 × 3. *J.Mater. L'Ing. Eeguire*. 2016, 25, 2836–2846;
28. Hernández-García, D. Saldaña Garcés, R. Vázquez, Saldatura per attrito di leghe diverse da AA7075-T6 a AZ31B-H24, *MRS Advances*, (2017), 2. 1-9. 10.1557/avv.2017.609.

#### 2.4. L'analisi dell'immagine come strumento nell'esame metallografico

I metallurgisti si sono affidati, in generale, a descrizioni qualitative delle microstrutture, per alcuni campioni l'accuratezza di tale valutazione, sebbene limitata, è adeguata allo scopo previsto, ma in molti casi è molto importante ottenere informazioni quantitative; oggi, i moderni software di analisi delle immagini collegati ai microscopi ottici consentono la formazione di un output quantitativo, come misurazioni lineari o di area o fasi o percentuali di porosità.

In metallografia, l'analisi delle immagini si riferisce molto spesso alla valutazione quantitativa digitale di un'immagine della microstruttura. I moderni sistemi di analisi delle immagini sono diventati uno strumento importante per misurazioni quantitative di aspetti microstrutturali; le misurazioni quantitative sono tipicamente lunghezza, larghezza e area e vengono utilizzate per la valutazione di caratteristiche metallografiche come dimensione del grano, inclusioni, strati, fasi o altri costituenti.



In passato le misurazioni dovevano essere effettuate su proiettori di immagini, con ingrandimento pari agli obiettivi, o su microfotografie, per le quali era importante il concetto di ingrandimento reale. Oggi i moderni programmi permettono di associare l'immagine visualizzata all'obiettivo e di poter effettuare misurazioni dirette sullo schermo del monitor. Ciò consente di effettuare analisi quantitative immediate evitando l'utilizzo di parametri di correzione.

In generale, per ottenere risultati affidabili e ripetibili è necessario seguire le seguenti precauzioni.

### **2.2.1. Campionamento e preparazione dei campioni**

I campioni devono essere selezionati e preparati adeguatamente. Il campionamento casuale viene spesso utilizzato per ottenere dati staticamente significativi, perché ciò implica che tutte le regioni e gli orientamenti di un oggetto metallico abbiano la stessa opportunità di essere tagliati e testati. Spesso però ciò non è possibile, ed il campionamento deve essere effettuato su valutazione in base al componente indagato (es. Giunto di saldatura).

È difficile stabilire regole rigide riguardo al numero e alla posizione dei campioni di prova.

Dopo che i campioni sono stati tagliati e identificati, devono essere preparati per l'esame. La preparazione del campione (lucidatura e mordenzatura) deve essere eseguita con attenzione per evitare artefatti come distorsioni, incisioni, bordi arrotondati, ecc.

Si consigliano dispositivi automatici di molatura e lucidatura per ottenere planarità e ripetibilità dei risultati.

### **2.2.2. Selezione del campo**

Per molti tipi di misurazione, il tecnico/operatore deve decidere quanti campi misurare, come distanziarli e l'ingrandimento migliore, per altri tipi è riportato nei metodi standard o nelle specifiche del prodotto (ad esempio, ASTM E562).

In generale, all'aumentare dell'ingrandimento, l'area del campo diminuisce; se l'ingrandimento viene aumentato da 100X a 200X, è necessario misurare un numero di campi quattro volte superiore per coprire la stessa area.

L'area di misurazione necessaria per ottenere una certa precisione di misurazione dipende dall'omogeneità della struttura. Il numero dei campi osservati influenza l'accuratezza delle misurazioni; in generale, per ridurre la precisione osservata alla metà del valore ottenuto dopo un numero  $x$  di misurazioni, è necessario eseguire in aggiunta quattro volte  $x$  misurazioni.



### 2.2.3. Misurazioni 2D

I principali output quantitativi che possono essere richiesti nell'analisi metallografica sono misurazioni lineari o di area. Solitamente tutti i programmi di acquisizione immagini permettono di effettuare misurazioni dirette in tempo reale sul monitor, associando il corretto ingrandimento in base all'oggetto utilizzato.

In genere sono necessarie misurazioni lineari come la lunghezza, lo spessore o la misurazione dell'area tramite linee chiuse o l'elaborazione dell'immagine (per contrasto).

Tali misurazioni sono da considerarsi soggette ad un errore statistico calcolabile sulla base di procedure di controllo periodico con micrometri certificati e dati forniti dal produttore del microscopio.

Di seguito sono elencati i principali casi in cui può essere richiesto.

- Misure caratteristiche dei giunti di saldatura (gola saldatura a, lati saldatura Z, lunghezza imperfezioni)
- Profondità di decarburazione.
- Profondità dei trattamenti termici superficiali (indurimento superficiale, cementazione, nitrurazione, cianurazione, ecc.).
- Spessore del rivestimento (rivestimento metallico, rivestimento organico, rivestimento ceramico, spruzzo termico).
- Profondità della corrosione (dopo la manutenzione o il test di corrosione).

È opportuno effettuare più misurazioni ad intervalli distanziati per ottenere una stima statistica della profondità reale.

#### 2.4.3.1. *Decarburazione*

Di solito, la profondità della decarburazione viene misurata mediante microscopio ottico per aumentare la precisione della misurazione, è possibile eseguire anche l'analisi della microdurezza o del carbonio.

Spesso lo strato di decarburazione non ha uno spessore uniforme, ad esempio, gli angoli delle sezioni rettangolari mostrano una profondità di decarburazione maggiore rispetto alle facce, rispetto a quando diversi campioni vengono selezionati da diverse posizioni di prova.

Prima della lucidatura, il campione deve essere montato con bachelite o altra resina dura per evitare l'arrotondamento dei bordi.

La microstruttura viene rivelata utilizzando "Nital" o "Picral" o altri reagenti secondo necessità.



La profondità di decarburazione viene misurata utilizzando il software di acquisizione del microscopio, dopo aver opportunamente verificato che l'ingrandimento sullo schermo sia corretto.

L'ingrandimento viene scelto in base alla struttura osservata e il tecnico/operatore deve eseguire almeno cinque misurazioni, in punti casuali lungo la superficie di ciascun campione, quindi può calcolare la media e la deviazione standard.

Se è presente uno strato di ferrite libera, la misurazione dello spessore è più semplice perché c'è un buon contrasto tra questa zona e lo strato adiacente parzialmente decarburato.

In un campione di acciaio perlite e ferrite ipoeutettoide, l'operatore cerca la profondità alla quale la quantità di perlite e ferrite sembra diventare costante.

Mentre la valutazione è più difficile in un campione il cui strato parzialmente decarburato è costituito da martensite e/o bainite, dove non si osserva alcuna differenza netta.

#### *2.4.3.2. Profondità dei trattamenti termici superficiali*

I trattamenti di carburazione, nitrurazione, cianurazione e tempra alla fiamma o ad induzione possono essere misurati con lo stesso metodo della decarburazione. L'accuratezza del metodo microscopico dipende dalle microstrutture della superficie e del nucleo. Ad esempio, la carburazione è più facile da valutare nell'acciaio non temprato, mentre la nitrurazione può essere difficile da stimare.

Spesso è preferibile determinare la profondità mediante misurazioni della microdurezza o analisi chimiche.

#### *2.4.3.3. Spessore del rivestimento*

Esistono diversi tipi di rivestimento, possiamo avere rivestimenti metallici, come zincatura, cromatura, nichelatura, rivestimenti organici, rivestimenti ceramici, e ottenuti con diversi processi come il Thermal Spray.

In generale l'efficacia del rivestimento è determinata dal suo spessore e la misurazione deve essere effettuata in più campi, con particolare attenzione ai bordi e agli angoli.

#### *2.4.3.4. Profondità di corrosione*

Il comportamento alla corrosione di una lega metallica è spesso stimato in penetrazione per unità di tempo (mm/anno). Per questo motivo spesso è richiesta la misurazione della profondità di corrosione, al di sopra delle prove di servizio o di corrosione volte a prevedere il comportamento di una specifica lega.

Se si vuole stimare la corrosione generale è necessario conoscere lo spessore di partenza. La misurazione di una corrosione non uniforme o localizzata è più semplice di una corrosione generale.

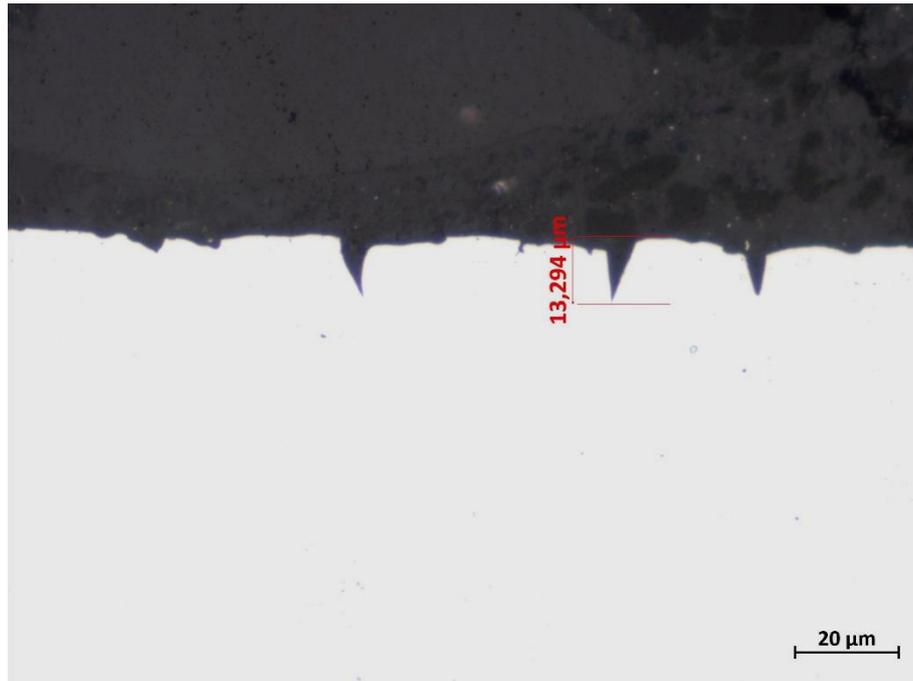


Fig. 2.3.1– misurazione della profondità di corrosione localizzata su un provino dopo prove di corrosione in laboratorio. Fonte: Laboratorio IIS

#### 2.2.4. Determinazione della frazione volumetrica

La determinazione della frazione volumetrica di fasi, costituenti e porosità in una microstruttura è l'uso più importante e più comune dell'analisi delle immagini.

Tipicamente, questa stima può essere effettuata mediante due metodi principali:

- Determinazione della frazione volumetrica mediante metodo del conteggio dei punti (ASTM E562).
- Determinazione della frazione volumetrica mediante analisi di immagine (ASTM E1245).

La determinazione è una stima della frazione di area ed è soggetta a errori.

##### 2.4.4.1. *Conteggio dei punti*

Il metodo di conteggio dei punti per la determinazione della frazione volumetrica è descritto nella norma ASTM E562. Fu proposto da tre diversi scienziati in modo indipendente (Thomson nel 1933, Glasgolev nel 1933 e Chalkley nel 1943).

Una griglia di punti bidimensionale (o unidimensionale) viene posizionata sopra l'immagine, quindi viene determinato il numero di punti della griglia presenti nella fase. Attualmente la griglia viene applicata utilizzando i programmi di acquisizione delle immagini.



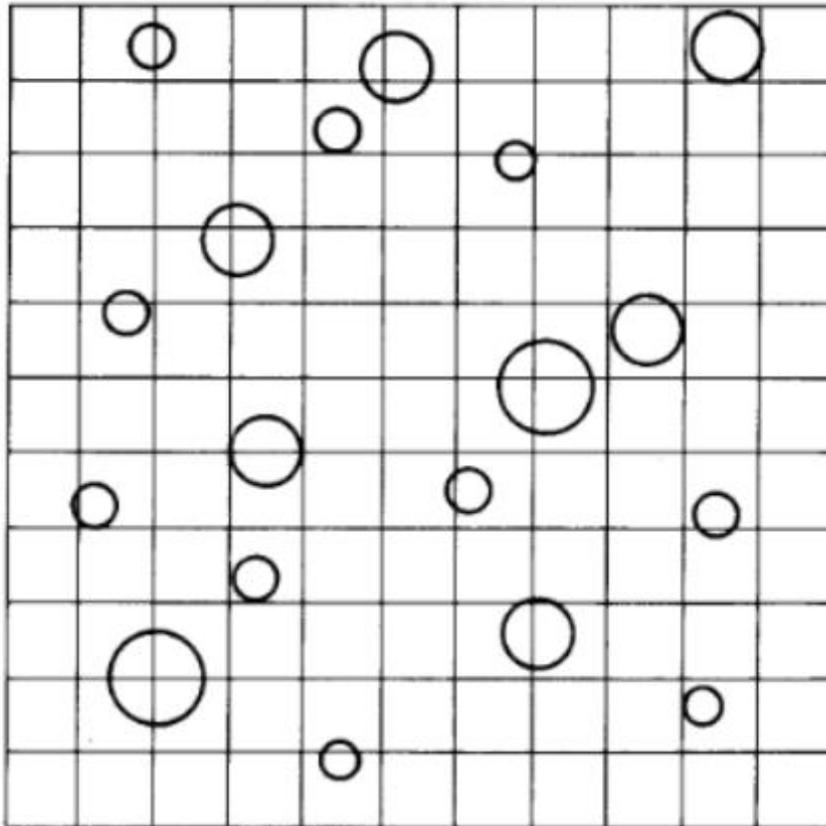
L'ingrandimento dovrebbe essere sufficientemente elevato in modo che la posizione dei punti di prova rispetto agli elementi possa essere chiaramente individuata; è importante scegliere un compromesso tra risoluzione e dimensione del campo.

La griglia di punti va applicata ad un campo scelto a caso; si contano i punti che giacciono nella fase di interesse  $P_\alpha$  (ad esempio ferrite delta), i punti che giacciono nel confine della particella o della fase si contano come la metà. La frazione di punti viene calcolata come mostrato di seguito.

$$P_P = \frac{\sum P_\alpha}{P_T} = \frac{\sum P_\alpha}{nP_0}$$

Dove  $n$  è il numero di campi,  $P_0$  è il numero dei punti della griglia.

Solitamente vengono utilizzate griglie di punti da 16, 25, 49, 64 o 100 punti; per misurare una fase pari a circa il 50% si può utilizzare una griglia di 16 punti. Se la frazione di fase diminuisce, è necessario utilizzare una griglia di punti maggiore (vedi scheda 5.1).



$$A_T = 12,100 \text{ mm}^2$$

$$L_T = 2200 \text{ mm}$$

$$P_T = 100$$

#### Areal analysis

$$V_{V\alpha} = \frac{\sum A_{\alpha}}{A_T} = \frac{\text{areas of circles}}{\text{frame area}} = \frac{884,75}{12,100} = 0.073$$

#### Lineal analysis

$$L_{La} = \frac{\sum L_{\alpha}}{L_T} = \frac{\sum \text{intercept lengths}}{\text{total line length}} = \frac{152,3}{2200} = 0.069$$

#### Point count

$$P_{Pa} = \frac{\sum P_{\alpha}}{P_T} = \frac{\sum \text{points in } \alpha}{\text{total points}} = \frac{5 + 2 \left(\frac{1}{2}\right)^*}{100} = 0.06$$

\*Tangents to particles counted as  $\frac{1}{2}$

Fig. 2.3.2– esempio che illustra tre metodi per stimare VV utilizzando una microstruttura idealizzata di forma sferica intersecata da un piano di sezione. Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 – Metodi di prova standard per la determinazione della frazione di volume mediante conteggio manuale sistematico dei punti



<i>Stima della frazione dell'area visiva Espresso in percentuale</i>	<i>Dimensione della griglia (numero di punti, PT)</i>
dal 2 al 5%	100
dal 5 al 10%	49
dal 10 al 20%	25
>20%	16

Tab. 2.3.1 – linee guida per la scelta della dimensione della griglia. Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 – Metodi di prova standard per la determinazione della frazione di volume mediante conteggio manuale sistematico dei punti.

Questo metodo può essere utilizzato per determinare la frazione di una fase metallica, un precipitato, inclusioni non metalliche o porosità.

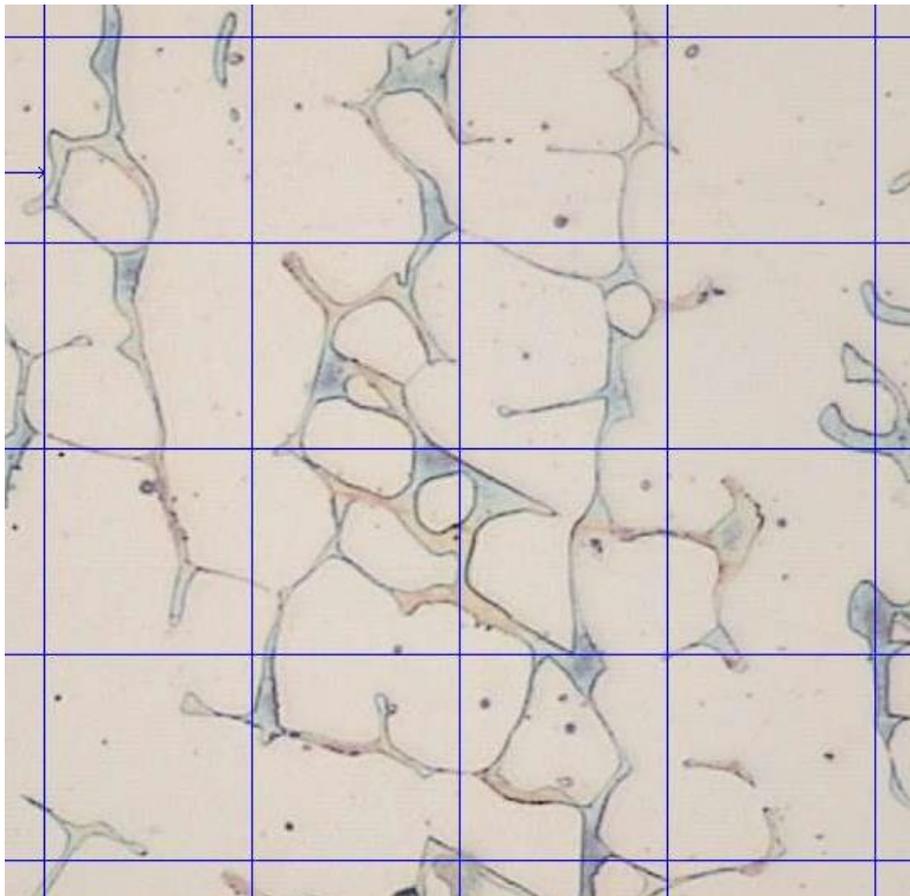


Fig. 2.3.3– esempio di determinazione della frazione volumetrica della ferrite delta mediante una griglia a 25 punti. Fonte: Laboratorio IIS.

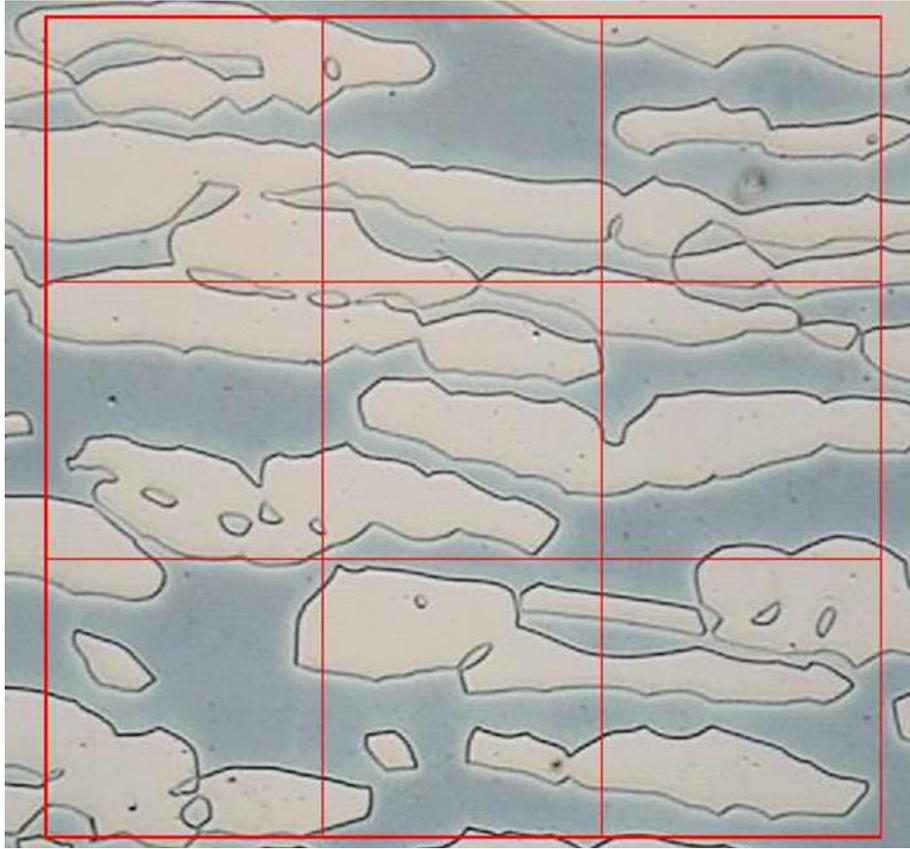


Fig. 2.3.4– esempio di determinazione della frazione volumetrica della ferrite delta mediante una griglia a 16 punti. Fonte: Laboratorio IIS.

#### 2.4.4.2. *Determinazione della frazione volumetrica mediante analisi dell'immagine*

In alternativa al metodo di conteggio dei punti, è possibile utilizzare un analizzatore automatico di immagini; questo metodo è descritto nella norma ASTM E1245.

L'immagine viene rilevata utilizzando un tubo scanner di tipo televisivo e visualizzata su un monitor video ad alta risoluzione. Inclusioni, fasi e porosità vengono rilevate ed evidenziate in base alle differenze di intensità del livello di grigio rispetto tra loro e alla matrice non incisa.

Le misurazioni vengono effettuate in base alla natura degli elementi punti immagine discriminati nell'immagine. Queste misurazioni vengono effettuate su ciascun campo visivo selezionato. Valutazione statistica o variabilità da caratteristica a caratteristica delle misurazioni.

Questa procedura non è adatta per valutare le inclusioni esogene negli acciai e negli altri metalli. A causa della natura sporadica e imprevedibile della distribuzione delle inclusioni esogene, è necessario utilizzare altri metodi che comportano un'ispezione completa, ad esempio gli ultrasuoni, per individuarne la presenza.



In generale, l'orientamento del provino dovrebbe essere parallelo all'asse di lavorazione a caldo e, più comunemente, preso nella posizione di un quarto di spessore. È possibile campionare anche altre posizioni di prova, ad esempio la posizione del sottosuolo e del centro, come desiderato o richiesto.

La superficie da lucidare dovrebbe essere abbastanza grande da consentire la misurazione di almeno 100 campi all'ingrandimento necessario. È preferibile una superficie minima di 160 mm<sup>2</sup>.

La preparazione dei campioni metallografici deve essere attentamente controllata per produrre una superficie di qualità accettabile per l'analisi delle immagini. La procedura di lucidatura non deve alterare il vero aspetto dei componenti sul piano di lucidatura producendo eccessivi rilievi, vaiolature, screpolature o sfilacciamenti. Piccoli graffi sottili, come quelli provocati da un abrasivo diamantato da 1 µm, di solito non interferiscono con il rilevamento delle inclusioni, ma i graffi più pesanti devono essere evitati. È necessaria un'adeguata pulizia del campione. Si consiglia di utilizzare un dispositivo automatico di levigatura e lucidatura.

È necessario verificare il corretto allineamento della sorgente luminosa del microscopio e regolare l'intensità dell'illuminazione al livello richiesto dal monitor.

Regolazione del sistema di ingrandimento per fornire un'adeguata risoluzione dei componenti/fasi con la massima dimensione di campo possibile. La scelta dell'ingrandimento ottimale è un compromesso tra risoluzione e variabilità della misurazione da campo a campo. Gli obiettivi con ingrandimento più elevato hanno un valore di apertura numerico più elevato e forniscono una risoluzione migliore. Tuttavia, all'aumentare dell'ingrandimento, aumenta la variabilità delle misurazioni da campo a campo, il che aumenta la deviazione standard della misurazione. Inoltre, all'aumentare dell'ingrandimento, l'area del campo diminuisce. Ad esempio, se l'ingrandimento è doppio, è necessario misurare un numero di campi quattro volte superiore per coprire la stessa area di prova.

Evitare l'uso di obiettivi con ingrandimento inferiore che non consentiranno il rilevamento dei componenti più piccoli.

Le impostazioni della soglia del livello di grigio vengono selezionate per consentire il rilevamento indipendente di una specifica fase secondaria discreta, utilizzando un "metodo dello sfarfallio" nel passaggio avanti e indietro tra l'immagine di inclusione e l'immagine della soglia. L'impostazione della soglia può richiedere un piccolo compromesso tra il rilevamento dei costituenti più piccoli e il rilevamento eccessivo di quelli più grandi. Le impostazioni di soglia scelte dovrebbero essere provate sui componenti in diversi campi prima di iniziare l'analisi. Ad esempio, l'intervallo di soglia per gli ossidi è vicino all'estremità nera della scala di riflettanza mentre l'intervallo per i solfuri è leggermente



più alto. Un approccio alternativo per stabilire le impostazioni di soglia consiste nello sviluppare un istogramma di riflettanza a livello di grigio dell'inclusione o dei tipi di costituenti presenti, nonché della matrice (solitamente nella condizione lucidata). L'istogramma viene utilizzato per identificare l'inizio (grigio più scuro) e la fine (grigio più chiaro) dell'intervallo per ciascun tipo di inclusione, al livello di grigio dell'intersezione per due inclusioni o tipi costituenti con intervalli di livelli di grigio sovrapposti. Verificare queste impostazioni utilizzando il metodo dello sfarfallio per diversi campi selezionati casualmente.

Il numero di campi misurati dovrebbe essere basato sulla precisione relativa delle misurazioni come definito nel capitolo successivo o in base ad un accordo tra produttore e utente finale.

Il programma per computer sviluppato per il controllo, la misurazione e l'analisi dei dati dell'analizzatore di immagini in ingresso viene letto nell'unità di elaborazione centrale per avviare l'analisi. Vengono immessi i dati di input riguardanti l'identificazione del campione, il richiedente dei dati, la costante di calibrazione, la data, il numero di campi, la spaziatura dei campi e così via.

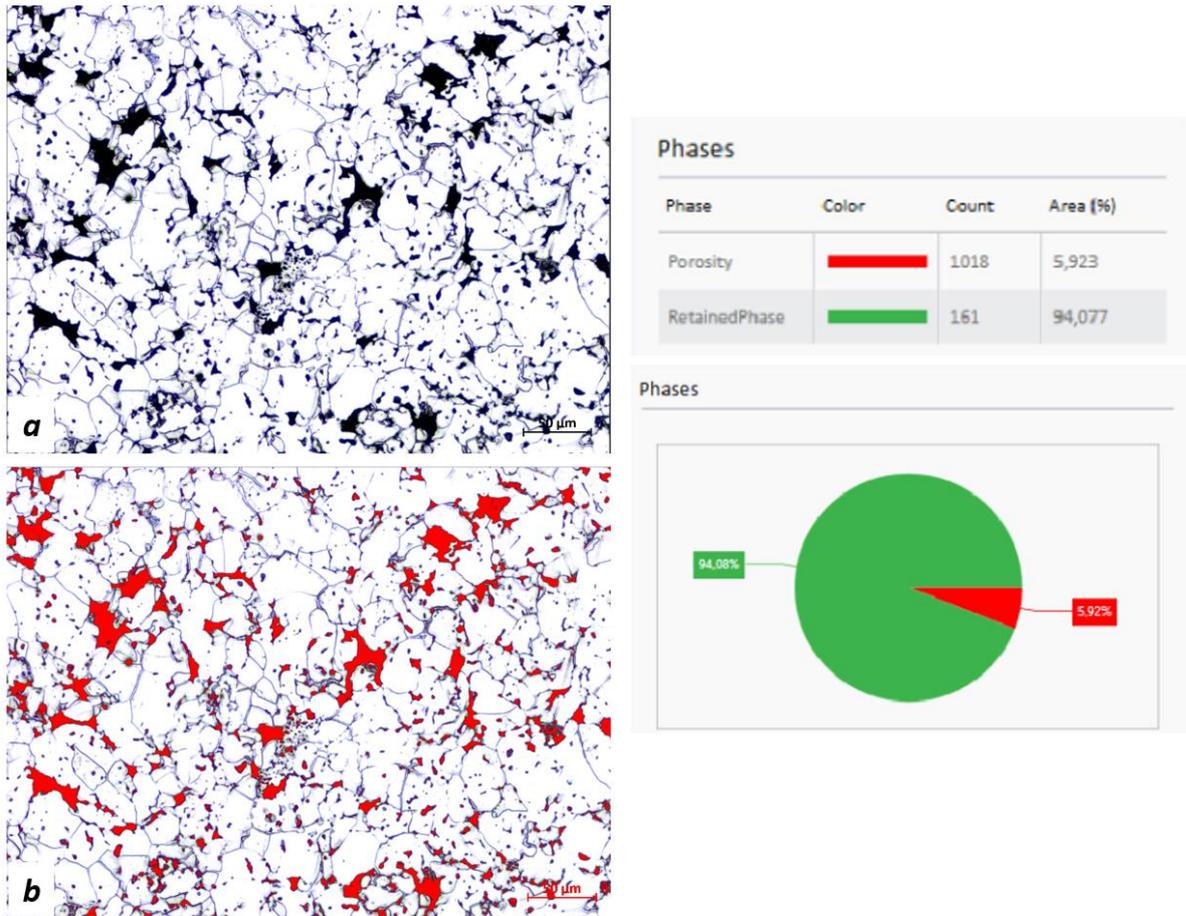


Fig. 2.3.5– determinazione della percentuale di porosità in un acciaio sinterizzato mediante analisi di immagine. Dettaglio della microstruttura prima (a) e dopo (b) l'elaborazione dell'immagine. Fonte: Laboratorio IIS

#### 2.4.4.3. *analisi statistica*

Gli errori di analisi possono essere introdotti da numerose fonti; alcuni di questi sono riportati di seguito:

- Il campione selezionato potrebbe non essere rappresentativo dell'intera microstruttura.
- Preparazione del campione non corretta.
- Competenze e abilità dell'operatore (ad esempio, capacità inadeguata di identificare microstrutture).
- L'omogeneità del campione, l'ingrandimento e il numero di campi misurati influiscono sulla dispersione e sulla ripetibilità dei dati.

La variabilità microstrutturale non è una misura degli errori, ma influenza i risultati dei test, poiché all'aumentare della variabilità aumenta lo sforzo richiesto per ottenere una stima statistica affidabile dei parametri strutturali.

Di seguito sono riportati il calcolo della stima percentuale del volume e l'accuratezza relativa percentuale. Il valore del moltiplicatore  $t$  può essere trovato nel seguito tabella estratta dalla ASTM E562.

<b><i>N. Campi n</i></b>	<b><i>T</i></b>	<b><i>N. Campi n</i></b>	<b><i>T</i></b>
5	2.776	19	2.101
6	2.571	20	2.093
7	2.447	21	2.086
8	2.365	22	2.080
9	2.306	23	2.074
10	2.262	24	2.069
11	2.228	25	2.064
12	2.201	26	2.060
13	2.179	27	2.056
14	2.160	28	2.052
15	2.145	29	2.048
16	2.131	30	2.020
17	2.120	40	2.000
18	2.110	60	1.960

Tab. 2.3.2 – Moltiplicatori dell'intervallo di confidenza al 95%. [3] ASTM E562:2011 – Metodi di prova standard per la determinazione della frazione di volume mediante conteggio sistematico manuale dei punti. Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 – Metodi di prova standard per la determinazione della frazione di volume mediante conteggio manuale sistematico dei punti



La media, lo stimatore della deviazione standard  $S$ , l'intervallo di confidenza al 95% 95%CI, devono essere calcolati e registrati per ciascun insieme di campi; le equazioni utilizzate per calcolare questi valori sono mostrate di seguito.  $\bar{P}_p$

$$\bar{P}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_p(i)$$
$$s = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [P_p(i) - \bar{P}_p]^2 \right]^{1/2}$$
$$95\% \text{ CI} = t \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

La stima della percentuale del volume è data come:

$$V_v = \bar{P}_p \pm 95\% \text{ CI}$$

Una stima della percentuale di accuratezza relativa associata alla stima può essere ottenuta come:

$$\% \text{ RA} = \frac{95\% \text{ CI}}{\bar{P}_p} \times 100$$

Le stime per il numero di campi necessari per ottenere una precisione relativa percentuale del 10, 20 o 33% con percentuale di volume e dimensione della griglia diverse sono fornite nella seguente tabella tratta da ASTM E562. Questi valori sono stati calcolati presupponendo che le caratteristiche abbiano una distribuzione casuale sulla sezione metallografica.

	<i>Precisione relativa del 33%.</i>				<i>Precisione relativa del 20%.</i>				<i>Precisione relativa del 10%.</i>			
	<i>Numero di campi n per una griglia di PT</i>				<i>Numero di campi n per una griglia di PT</i>				<i>Numero di campi n per una griglia di PT</i>			
<i>Quantità della frazione di volume Vv in percentuale</i>	<i>16 punti</i>	<i>25 punti</i>	<i>49 punti</i>	<i>100 punti</i>	<i>16 punti</i>	<i>25 punti</i>	<i>49 punti</i>	<i>100 punti</i>	<i>16 punti</i>	<i>25 punti</i>	<i>49 punti</i>	<i>100 punti</i>
<b>2</b>	110	75	35	(20)	310	200	105	50	1250	800	410	200
<b>5</b>	50	30	(15)	(8)	125	80	40	(20)	500	320	165	80
<b>10</b>	(25)	(15)	(10)	(4)	65	40	(20)	(10)	160	160	85	40
<b>20</b>	(15)	(5)	(5)	(4)	30	(20)	(10)	(5)	80	80	40	(20)

Tab. 2.3.3 – previsione del numero di campi (n) da osservare in funzione della precisione relativa desiderata e della grandezza stimata della frazione volumetrica del costituente.

Fonte: [2.3.3] ASTM E562:2011 – Metodi di prova standard per la determinazione della frazione di volume mediante conteggio manuale sistematico dei punti

La percentuale di accuratezza relativa riportata deve essere sempre calcolata dai dati del campione e non deve essere presa dalla tabella precedente.

### 2.2.5. Granulometria

Le proprietà e il comportamento delle leghe metalliche sono direttamente influenzati dalla dimensione del grano. Infatti, la misurazione della dimensione del grano in un metallo policristallino è uno dei fattori più importanti da determinare, soprattutto durante la produzione e il controllo qualità.

Solitamente, a parità di analisi chimica, un acciaio a grana fine presenta caratteristiche di trazione e resistenza agli urti più elevate rispetto ad un acciaio a grana grossa. Al contrario, un acciaio a grana grossa potrebbe avere un comportamento migliore in regime di scorrimento viscoso rispetto ad un acciaio a grana fine.



Le dimensioni dei grani osservate su una sezione trasversale attraverso la struttura vengono utilizzate per determinare la dimensione planare dei grani. È possibile utilizzare diverse misurazioni per esprimere la dimensione del grano:

- Diametro medio
- Zona media
- Numero di grani per unità di superficie
- Numero medio di lunghezze di intercettazione di grani per unità di volume
- Diametro medio basato sul volume medio dei grani

Per determinare la dimensione dei grani, le sezioni devono essere preparate mediante un'accurata molatura e lucidatura per rivelare il confine dei grani mediante incisione metallografica. Di seguito sono descritti esempi di procedure:

- I grani ferritici dovranno essere rivelati mediante attacco con “Nital”, o con apposito reagente.
- Per gli acciai con struttura austenitica monofase o bifase (grani di ferrite delta in una matrice austenitica) a temperatura ambiente, il grano deve essere rivelato con gliceregia, “Reagente di Kallings”, “Reagente di marmo”, o soluzione elettrolitica acquosa al 10% acido ossalico
- Per gli acciai con struttura martensitica o bainitica talvolta si può rilevare il grano pre-austenitico. Deve essere rilevato con il seguente metodo riportato nella norma UNI EN ISO 643:
  - Metodo “Bechet-Beaujard” mediante attacco con soluzione acquosa satura di acido picrico.
  - Metodo “Kohn” mediante ossidazione controllata.
  - Metodo “McQuaid-Ehn” mediante carburazione.

La descrizione dei metodi menzionati al punto precedente non è trattata in questo capitolo. Ulteriori informazioni sono fornite nella norma UNI EN ISO 643.

Entrambe le norme UNI EN ISO 643 e ASTM E112 riportano tre metodi per determinare la dimensione media del grano. Essi sono riportati nei seguenti punti e di seguito descritti:

- Procedura di confronto.
- Procedura planimetrica (o di Jeffries).
- Procedura di intercettazione: procedura di intercettazione lineare (Heyn) e procedura di intercettazione circolare.

ASTM E112 definisce la dimensione del grano mediante un indice G, noto come dimensione del grano ASTM, come mostrato nella tabella 5.4; L'indice granulometrico G dell'ASTM è utilizzato anche dalla norma europea UNI EN ISO 643.

<i>Granu- lo- metria n. G</i>	<i>Grani/Area unitaria</i>		<i>Area media del grano</i>		<i>Diametro medio</i>		<i>Intercetta media</i>		<i>Paesi Bassi</i>
	<i>No/ln2 a 100x</i>	<i>N./mm2 a 1x</i>	<i>mm2</i>	<i>µm2</i>	<i>mm</i>	<i>µm</i>	<i>mm</i>	<i>µm</i>	<i>N./mm</i>
<b>00</b>	0,25	3.88	0,2581	258064	0,5080	508.0	0,4525	454,5	2.21
<b>0</b>	0,50	7,75	0,1290	129032	0,3592	359.2	0,3200	320,0	3.12
<b>0,5</b>	0,71	10.96	0,0912	91239	0,3021	302.1	0,2691	269.1	3.71
<b>1.0</b>	1.00	15.50	0,0645	64516	0,2540	254.0	0,2263	226.3	4.42
<b>1.5</b>	1.41	21.92	0,0456	45620	0,2136	213.6	0,1903	190.3	5.26
<b>2.0</b>	2.00	31.00	0,0323	32258	0,1796	179,6	0,1600	160,0	6.25
<b>2.5</b>	2.83	43.84	0,0228	22810	0,1510	151.0	0,1345	134,5	7.43
<b>3.0</b>	4.00	62,00	0,0161	16129	0,1270	127.0	0,1131	113.1	8.84
<b>3.5</b>	5.66	87,68	0,0114	11405	0,1068	106,8	0,0951	95.1	10.51
<b>4.0</b>	8.00	124,00	0,00806	8065	0,0898	89,8	0,0800	80,0	12.50
<b>4.5</b>	11.31	175,36	0,00570	5703	0,0755	75,5	0,0673	67.3	14.87
<b>5.0</b>	16.00	248,00	0,00403	4032	0,0635	63,5	0,0566	56.6	17.68
<b>5.5</b>	22.63	350,73	0,00285	2851	0,0534	53.4	0,0476	47.6	21.02
<b>6.0</b>	32.00	496,00	0,00202	2016	0,0449	44.9	0,0400	40.0	25.0
<b>6.5</b>	45.25	701.45	0,00143	1426	0,0378	37.8	0,0336	33.6	29.73
<b>7.0</b>	64,00	99,00	0,00101	1008	0,0318	31.8	0,0283	28.3	35.36
<b>7.5</b>	90,51	1402.9	0,00071	713	0,0267	26.7	0,0238	23.8	42.04
<b>8.0</b>	128,00	1884.0	0,00050	504	0,0225	22.5	0,0200	20.0	50,00
<b>8.5</b>	181.02	2805.8	0,00036	356	0,0189	18.9	0,0168	16.8	59.46
<b>9.0</b>	256,00	3968.0	0,00025	252	0,0159	15.9	0,0141	14.1	70.71
<b>9.5</b>	364.04	5611.6	0,00018	178	0,0133	13.3	0,0119	11.9	84.09
<b>10.0</b>	512,00	7936.0	0,00013	126	0,0112	11.2	0,0100	10.0	100,0
<b>10.5</b>	724.08	11.223.2	0,000089	89.1	0,0094	9.4	0,0084	8.4	118,9
<b>11.0</b>	1024,00	15872.0	0,000063	63.0	0,0079	7.9	0,0071	7.1	141.4
<b>11.5</b>	1448.15	22446.4	0,000045	44.6	0,0067	6.7	0,0060	5.9	168.2
<b>12.0</b>	2048,00	31744.1	0.000032	31.5	0,0056	5.6	0,0050	5.0	200,0
<b>12.5</b>	2896.31	44892.9	0,000022	22.3	0,0047	4.7	0,0042	4.2	237,8



<b>13.0</b>	4096,00	63488.1	0,000016	15.8	0,0040	4.0	0,0035	3.5	282,8
<b>13.5</b>	5792.62	89785.8	0,000011	11.1	0,0033	3.3	0,0030	3.0	336.4
<b>14.0</b>	8192	126976.3	0.000008	7.9	0,0028	2.8	0,0025	2.5	400,0

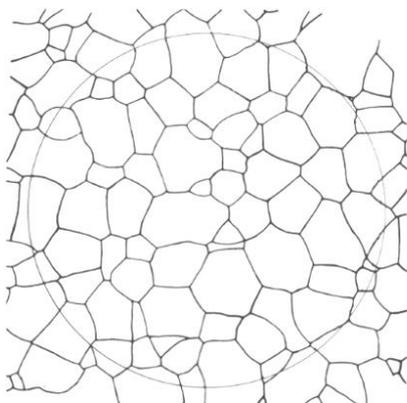
Tab. 2.3.4 – Relazione dimensionale dei grani Calcolata per grani uniformi, orientati casualmente, equiassici. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 – Metodi di prova standard per la determinazione della dimensione media del grano

#### **2.4.5.1. Procedura di confronto**

L'immagine esaminata sullo schermo viene confrontata con una serie di grafici standard. Le carte standard, ad un ingrandimento di 100 x, sono numerate da -07 a 17 in modo che equivalgano all'indice G. La procedura di confronto si applica a materiali completamente ricristallizzati o fusi con grani equiassici.

Quando le stime della dimensione dei grani vengono effettuate con il metodo di confronto più conveniente, ripetuti controlli da parte di specialisti e/o test interlaboratorio, hanno dimostrato che, a meno che l'aspetto dello standard non rifletta quello del campione, può verificarsi un errore. L'ASTM E 112 mostra quattro tipi di grafici comparativi che riducono al minimo tali errori.

È molto importante verificare che l'ingrandimento che stiamo confrontando sia lo stesso. Il software attuale contiene applicazioni con grafici caricati che consentono il confronto diretto.



**a**



**b**

Fig. 2.3.6 – esempio del metodo di confronto. Immagine di una tabella comparativa (a) e dettaglio di un acciaio austenitico ottenuto da OM. Fonte: Laboratorio IIS

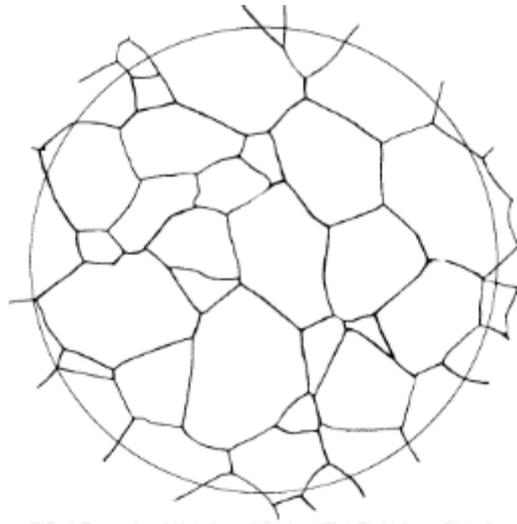


Fig. 2.3.7– esempio di grani non intrecciati (Flat Etchs) dalla tavola I – Granulometria n. 3 a 100X – immagine tratta da ASTM E112. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 – Metodi di prova standard per la determinazione della dimensione media del grano

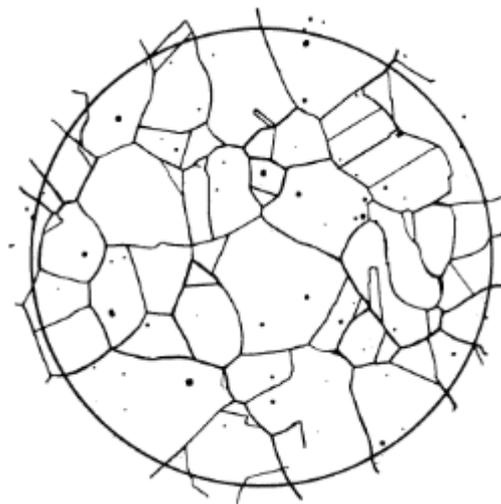


Fig. 2.3.8– esempio di grana doppia (Flat Etchs) dalla tavola II – Granulometria n. 3 a 100X – immagine tratta da ASTM E112. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 – Metodi di prova standard per la determinazione della dimensione media del grano



Fig. 2.3.9– esempio di grana doppia (incisioni a contrasto) dalla tavola III – Granulometria 4 a 75X – immagine tratta da ASTM E112. Fonte: [2.3.6] ASTM E112 – Metodi di prova standard per la determinazione della dimensione media del grano

#### **2.4.5.2. Procedura di intercettazione**

Per questa procedura, il numero di grani intercettati,  $N$ , o il numero di intersezioni dei bordi dei grani,  $P$ , devono essere contati utilizzando una linea di prova di lunghezza nota sul monitor di un computer o su una microfotografia di un rappresentante di un campione ad un ingrandimento noto.

La procedura di intercetta è consigliata per tutte le strutture che si discostano dalla forma equiassica uniforme. Per le strutture anisotrope, sono disponibili procedure per effettuare stime dimensionali separate in ciascuna delle tre direzioni principali per stimare la dimensione media.

La linea di misurazione può essere dritta o circolare. La griglia deve essere applicata in modo casuale a un numero adeguato di campi per ottenere un risultato statistico.

Non esiste una relazione matematica diretta tra il numero della dimensione dei grani ASTM,  $G$ , e l'intercetta lineare media, a differenza dell'esatta relazione tra l'intercetta lineare media,  $l$ , e l'area media dei grani che è esatta per i cerchi ma non del tutto esatta per una struttura di equiassico uniforme.

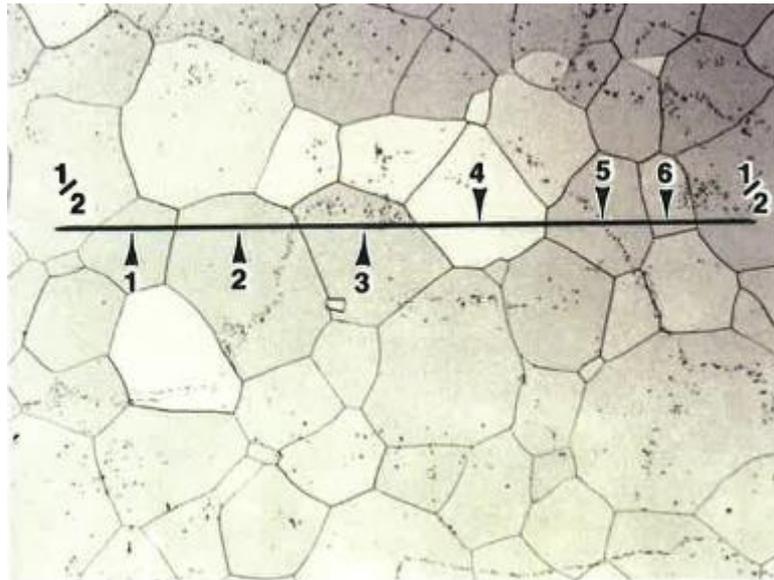


Fig. 2.3.10 – esempio di intersezione N (intercette). [2.3.7]

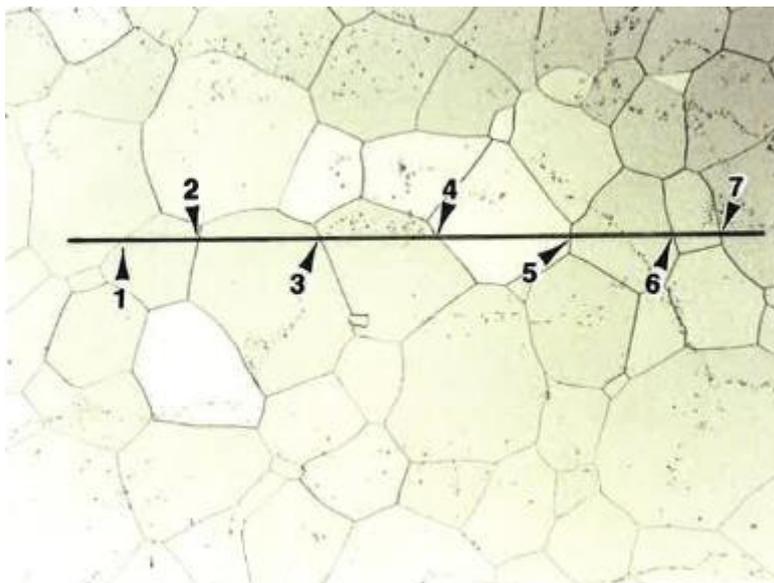


Fig. 2.3.11 – esempio di intersezione P. Fonte: [2.3.7] UNI EN ISO 643 – Acciai –  
Determinazione micrografica della dimensione del grano apparente

#### **Metodo dei segmenti di intercetta lineare:**

Per stimare la dimensione media dei grani, si consiglia di contare il numero di grani intercettati, lungo una o più linee rette sufficientemente lunghe da produrre almeno 50 intercettazioni. È preferibile



selezionare una combinazione di lunghezza della linea di test e ingrandimento tale che un singolo campo produca il numero richiesto di intercettazioni.

La precisione delle stime della dimensione dei grani mediante il metodo dell'intercetta è una funzione del numero di intercettazioni dei grani conteggiate.

Un'intercetta è un segmento della linea di test sovrapposto a un grano. Un'intersezione è un punto in cui una linea di prova viene tagliata dai bordi dei grani. Può essere conteggiato con gli stessi risultati anche nel metallo monofase.

Gli effetti di una deviazione moderata da una struttura equiassica possono essere eliminati effettuando conteggi di intercetta, su un line array, contando le linee aventi quattro o più orientamenti.

#### **Metodo dell'intercetta circolare:**

La linea di misurazione è composta da tre cerchi concentrici. L'ingrandimento o il diametro del cerchio deve essere scelto in modo tale che vi siano da 40 a 50 intercetta quando la griglia di misurazione supera il campo da esaminare.

Il metodo del segmento intercettato circolare tende a fornire valori del segmento intercettato leggermente più alti e quindi un numero di intersezioni leggermente inferiore. Per minimizzare questo, le intersezioni causate da un punto triplo devono essere conteggiate come due intersezioni invece di 1,5, come nel caso del metodo del segmento intercettato lineare.

#### **Risultati:**

Il valore medio del numero di intercetta, o intersezione, si calcola con la seguente formula:  $\bar{N}\bar{P}$

$$\bar{N}_L = \bar{N}/LT \text{ e } /LT\bar{P}_L = \bar{P}$$

Per i bordi dei grani non equiassici si possono utilizzare tre linee orientate parallelamente alle tre linee principali dei piani di prova (longitudinale, trasversale e planare). Il numero medio di intercetta, o il numero medio di intersezioni, è determinato dalla radice cubica del prodotto di tre misurazioni, secondo:

$$\bar{N}_L = (\bar{N}/LT_x \times /LT_y \times /LT_z)^{1/3} \text{ e } /LT_x \times /LT_y \times /LT_z)^{1/3} \bar{N}\bar{P}_L = (\bar{P}\bar{P}\bar{P})$$

I moderni metodi di misurazione della dimensione dei grani, come l'analisi automatica delle immagini, possono essere utilizzati per misurare la dimensione dei grani dei materiali applicabili, a condizione

che l'accuratezza dei metodi sia stata precedentemente dimostrata da un'ampia correlazione incrociata.

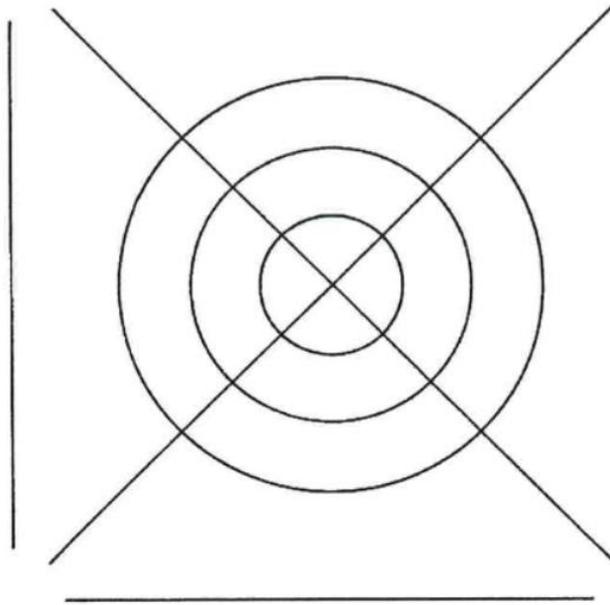
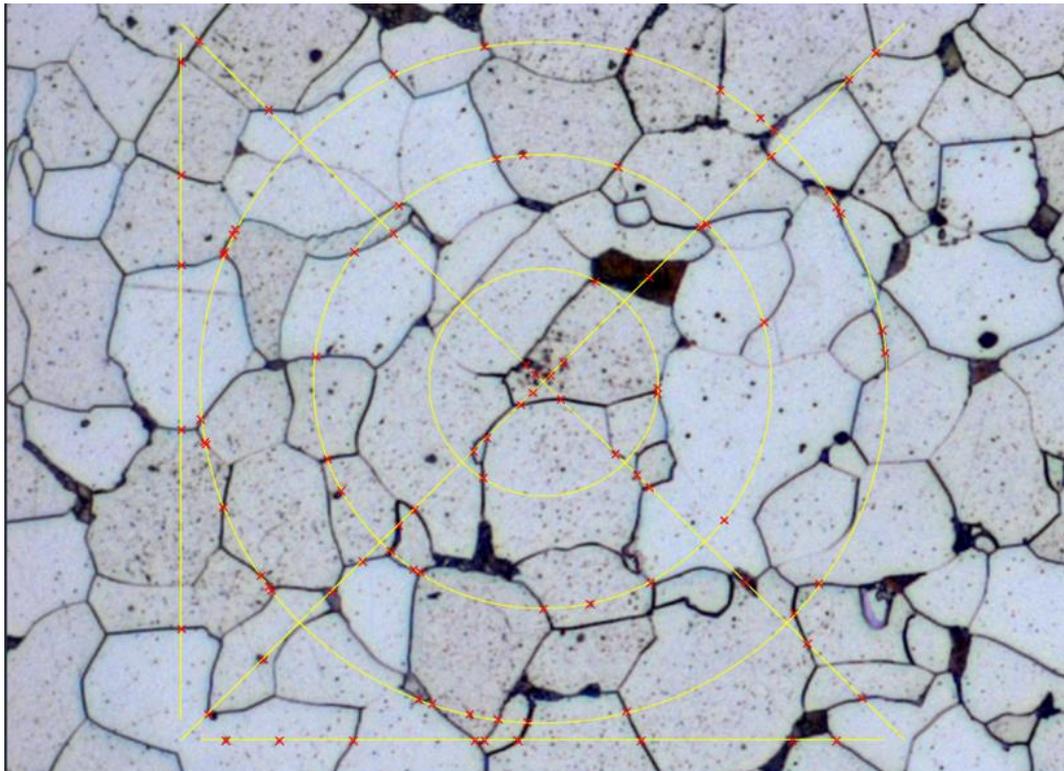


Fig. 2.3.12– griglia di misura consigliata per la procedura del segmento di intercetta.  
Fonte: [2.3.7] UNI EN ISO 643 – Acciai – Determinazione micrografica della dimensione apparente del grano.



#### Additional Results

Grain Size No.  
5,0

Number of Intersections  
94

Pattern Length [ $\mu\text{m}$ ]  
5770,000

Fig. 2.3.13– esempi di misura di intercetta eseguita su un acciaio al carbonio. Fonte: Laboratorio IIS.

#### 2.4.5.3. *Metodi planimetrici*

Il metodo planimetrico è il meno utilizzato, storicamente su un'immagine live veniva sovrapposto un cerchio di 79,8 mm di diametro e sullo schermo dell'apparecchiatura veniva visualizzato l'ingrandimento reale. L'ingrandimento deve essere regolato in modo che l'area circolare contenga almeno 50 grani.

Si fanno due conteggi:

- $n_1$  è il numero di grani completamente all'interno del cerchio di prova
- $n_2$  è il numero di grani intersecati dal cerchio di prova.



Il numero totale equivaleva a:

$$N_{100} = n_1 + 0,5n_2$$

Il numero di grani,  $m$ , per  $\text{mm}^2$  sulla superficie del provino viene calcolato da:

$$m = 2n_{100}$$

oppure, nel caso di qualsiasi ingrandimento,  $g$ :

$$m = (g^2/5000)ng$$

dove 5000 è l'area del cerchio di prova in  $\text{mm}^2$ .

Questo approccio presuppone che, in media, metà dei grani intersecati dal cerchio di prova siano all'interno del cerchio mentre la restante metà sia all'esterno del cerchio. Questa ipotesi è valida per una struttura rettilinea attraverso i grani, ma non per una linea curva. La deviazione creata da questa ipotesi aumenta al diminuire del numero di grani all'interno del cerchio di prova. Se il numero di grani all'interno del cerchio di prova è almeno 50, la deviazione è di circa il 2%.

Un modo semplice per evitare questo problema è immaginare un quadrato o un rettangolo considerando che i grani che intersecano ciascuno dei quattro angoli sono un quarto all'interno della figura e tre quarti all'esterno. Questi quattro grani d'angolo insieme rappresentano un grano all'interno della scatola di prova. Tralasciando i grani dei quattro angoli, si conta su  $n_1$  - i grani completamente all'interno della scatola; e  $n_2$  - i grani intersecati dai quattro lati della scatola. L'equazione diventa:

$$N_{100} = n_1 + 0,5n_2 + 1$$

Il numero di grani,  $m$ , per  $\text{mm}^2$  sulla superficie del provino viene calcolato da:

$$m = (g^2/A_f)ng$$

dove  $A_f$  è l'area apparente del valore di prova utilizzato per il conteggio dei cereali in  $\text{mm}^2$ .

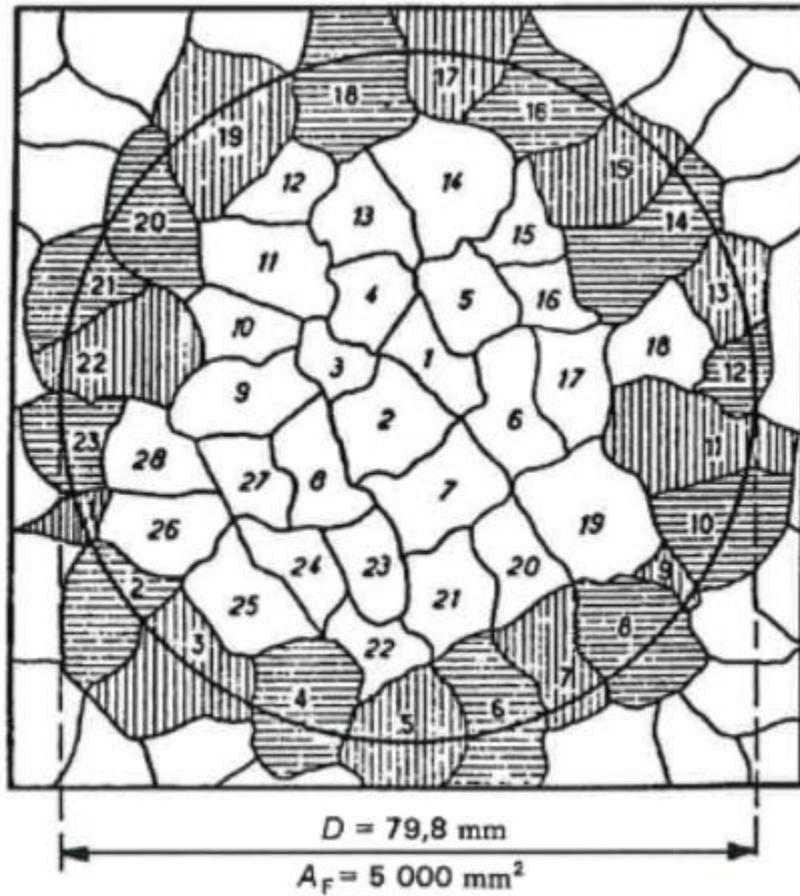


Fig. 2.3.14– valutazione del numero di grani in un'area racchiusa da un cerchio. Fonte: [2.3.7] UNI EN ISO 643 – Acciai – Determinazione micrografica della dimensione apparente del grano

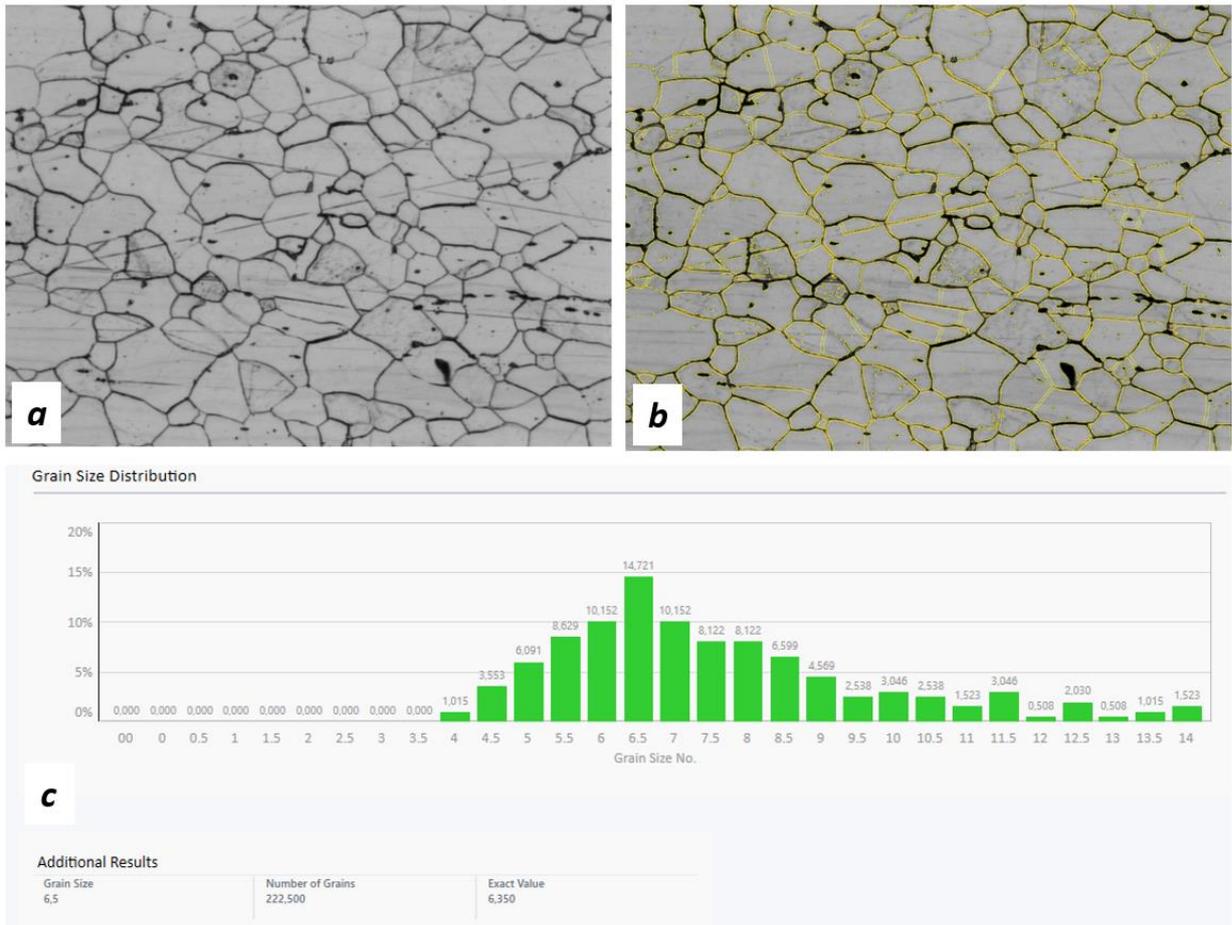


Fig. 2.3.15– esempi di misurazione planimetrica. Dettaglio della struttura micrografica prima (a) e dopo (b) l'immagine elaborata tramite software e l'istogramma della distribuzione granulometrica ottenuto (c). Fonte: Laboratorio IIS

#### Riferimenti:

[2.3.1] MANUALE ASM – Volume 9 – Metallografia e microstrutture.

[2.3.2] Metallografia – Principi e pratica – George F. Vander Voort – Direttori, Ricerca e tecnologia Buehler, Ltd. Lake Bluff, Illinois.

[2.3.3] ASTM E562:2011 – Metodi di prova standard per la determinazione della frazione di volume mediante conteggio sistematico manuale dei punti.

[2.3.4] ASTM E1245:2003 - Pratica standard per determinare l'inclusione o il contenuto costitutivo di seconda fase dei metalli mediante analisi automatica delle immagini

[2.3.5] Guida del metallografo – Pratiche e procedure per ferro e acciaio – Bruce L. Bramfitt, Arlan O. Benschoter.



*[2.3.6] ASTM E112 – Metodi di prova standard per determinare la dimensione media del grano.*

*[2.3.7] UNI EN ISO 643 – Acciai – Determinazione micrografica della dimensione apparente del grano.*



## 2.5. Dimostrazione delle capacità del programma per l'analisi delle immagini

In questo capitolo esploreremo i concetti chiave e gli strumenti utilizzati per eseguire l'analisi delle immagini metallografiche, delineando il processo dall'acquisizione delle immagini alla loro elaborazione e interpretazione dei risultati ottenuti.

Verranno illustrate le varie fasi di preparazione dei campioni metallografici, fondamentali per ottenere immagini chiare e dettagliate. Successivamente esamineremo l'importanza dei microscopi nell'acquisizione di immagini e discuteremo le varie tecniche di illuminazione che aiutano a evidenziare specifiche caratteristiche microstrutturali. Infine, approfondiremo l'ambiente digitale, esplorando software specializzati che consentono l'analisi quantitativa delle immagini metallografiche, fornendo un'interpretazione accurata e approfondita delle strutture osservate.

### 2.5.1.1. Preparazione dei campioni

Per ottenere una buona qualità della superficie analizzata, è necessario eseguire una lucidatura meccanica, poiché altri processi di lucidatura (ad esempio, lucidatura elettrochimica) possono comportare bordi arrotondati e artefatti.

Gli ultimi passaggi di lucidatura possono essere eseguiti con una sospensione di diamante di 3  $\mu\text{m}$  o meno; è consigliabile rifinire l'ultima fase di lucidatura con sospensioni a base di silice colloidale (diametro delle particelle di abrasione inferiore a 0,1  $\mu\text{m}$ ). La procedura di molatura e lucidatura deve essere scelta in base al tipo di lega da preparare.

Una tipica procedura per acciai al carbonio o basso legati è mostrata nel punto seguente:

- Prima fase: macinazione con carta abrasiva SiC (grana 220) o disco abrasivo equivalente per alcuni minuti con acqua, al fine di ottenere la corretta planarità dei campioni.
- Secondo passo: macinazione con disco abrasivo con sospensione diamantata con particelle di diametro 9  $\mu\text{m}$ .
- Terza fase: lucidatura utilizzando panni lucidanti con sospensione diamantata con particelle di diametro di 3  $\mu\text{m}$ .
- Quarta fase: lucidatura mediante panni lucidanti con sospensione di silice colloidale contenente particelle di diametro inferiore a 0,1  $\mu\text{m}$ .

Se disponibili, sono preferibili sistemi automatici per ottenere le giuste superfici specchianti finali del campione metallico.

Per alcune analisi, come i campioni caratterizzati da elevata fragilità e deterioramento, possono essere adottate altre precauzioni. Precauzioni tipiche includono misurazioni dello spessore degli strati di ossido (ad esempio magnetite nel tubo della caldaia) o valutazione della porosità durante il rivestimento a spruzzo termico, in cui le fasi di molatura e lucidatura potrebbero rompere lo strato



generando errori di misurazione. In questi casi, può essere necessaria una fase di taglio più precisa (ad esempio, macchina da taglio automatica) e un doppio montaggio (dopo e prima del taglio).

I graffi sulla sezione micrografica possono essere rilevati come aree scure utilizzando il software di analisi delle immagini e causano una sovrastima della fase misurata. Questo tipo di difetti richiedono una supervisione costante del processo di analisi dell'immagine da parte dell'operatore/tecnico.

#### *2.5.1.2. Dimostrazione di alcuni casi pratici di determinazione della Ferrite Delta*

Le applicazioni più comuni del metodo per determinare la frazione volumetrica sono elencate di seguito:

- Determinazione di una percentuale di ferrite delta nel metallo di apporto di acciai inossidabili austenitici.
- Determinazione di una percentuale di ferrite Delta in un acciaio inossidabile Duplex.
- Valutazione del contenuto di inclusioni in un acciaio o altre leghe.
- Valutazione della percentuale di porosità nella fusione, saldatura, brasatura e rivestimento.

La quantità di ferrite delta prevista nei giunti saldati di acciaio inossidabile austenitico è compresa tra il 5 e il 15%. Una piccola quantità di ferrite Delta riduce la sensibilità alla rottura a caldo del giunto saldato; tuttavia, una quantità maggiore, riduce la tenacità alle basse temperature e la resistenza alla corrosione.

L'osservazione delle sezioni micrografiche viene eseguita al microscopio ottico, solitamente vengono selezionati obiettivi 100x, 200x o 500x.

Dopo una prima valutazione qualitativa della quantità di Ferrite Delta, si può utilizzare una griglia da 25 o 49 punti, come indicato nella norma ASTM E562. A volte è possibile eseguire una misurazione preliminare con un endoscopio in ferrite per selezionare la griglia corretta.

Di seguito è mostrato un esempio di misurazioni della Delta Ferrite mediante il metodo di conteggio dei punti tramite software.

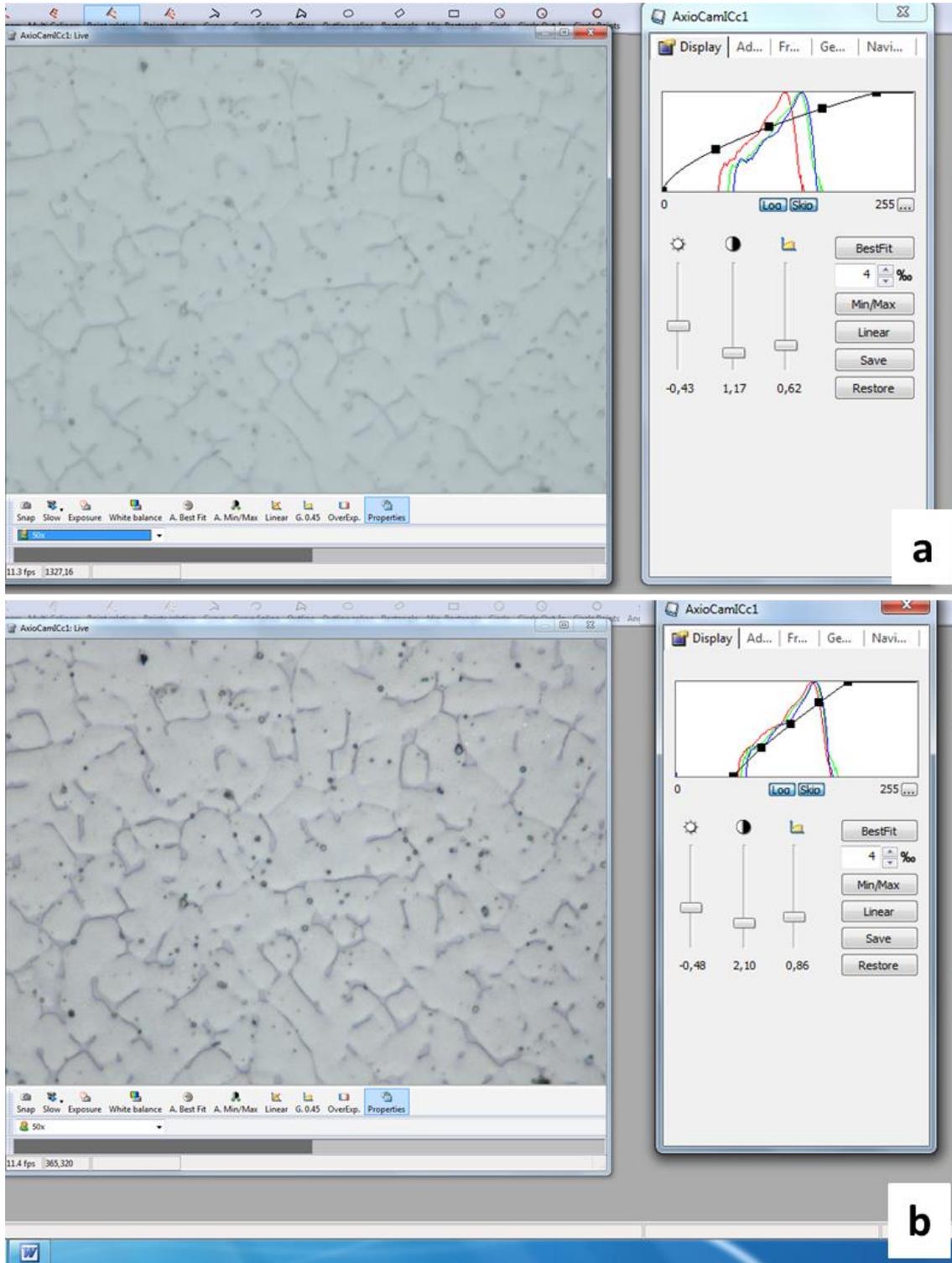


Fig. 2.4.1– Dettagli della zona saldata di un acciaio inossidabile austenitico tipo 316L. Le figure mostrano prima (a) e dopo (b) l'ottimizzazione della tabella di ricerca (LUT). Fonte: Laboratorio IIS.

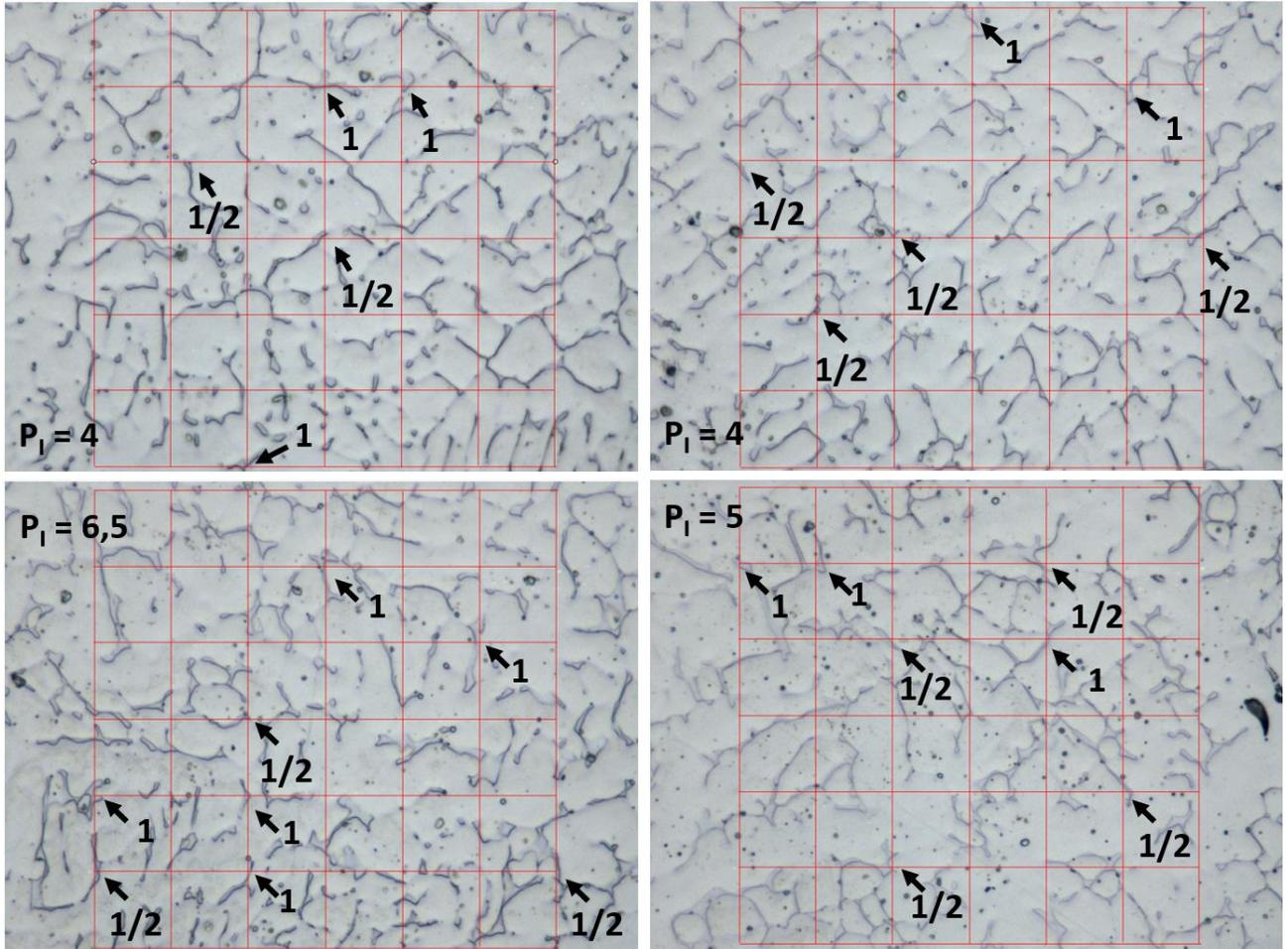


Fig. 2.4.2– Esempi di alcuni campi analizzati con il metodo del conteggio punti con una griglia da 49 punti. Fonte: Laboratorio IIS.



PT = 49			
<b>Numero di campi contati n</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>85</b>
<b>Percentuale di punti della griglia Pp</b>	10,41	10,31	10,17
<b>Intervallo di confidenza del 95%.</b>	1,52	1,02	0,57
<b>Precisione relativa % Ra</b>	14,56	9,94	5,65
<b>Deviazione standard</b>	2,40	2,29	2,59

Tabella 2.4.1– La percentuale di ferrite misurata tramite conteggio punti corrisponde a Pp. La tabella mostra come la precisione della misurazione aumenta all'aumentare del numero di campi misurati. Fonte: Laboratorio IIS.

Un'altra applicazione del metodo del conteggio dei punti è la determinazione di una percentuale di ferrite delta presente in acciaio inossidabile duplex.

Gli acciai inossidabili duplex uniscono i vantaggi degli acciai inossidabili ferritici e austenitici. Le proprietà vengono determinate dalla composizione chimica e dal bilancio di fase. L'alto contenuto di cromo e la lega con l'azoto contribuiscono all'elevata robustezza e alla resistenza alla corrosione intergranulare. La tenso corrosione è superiore rispetto ad altri gradi austenitici.

Gli acciai inossidabili duplex si basano sul sistema di leghe Fe-Cr-Ni-N. La composizione chimica di questi acciai è stata modificata in modo tale che la microstruttura del metallo di base sia costituita per circa il 50% da ferrite e per il 50% da austenite. Tuttavia, tutti gli acciai inossidabili duplex solidificano virtualmente come ferrite al 100% e dipendono dalla trasformazione parziale dello stato solido in austenite per una microstruttura equilibrata. L'azoto viene aggiunto come elemento di lega per accelerare la formazione della fase austenite e stabilizzarla.

In generale, gli acciai inossidabili duplex hanno un rapporto più elevato tra elementi promotori della ferrite e elementi promotori dell'austenite rispetto agli acciai inossidabili austenitici. La figura seguente indica che le leghe il cui equivalente di cromo WRC-1992 è circa 1,85 volte il loro equivalente di nichel, o più, si solidificherebbero come ferrite al 100%; gli acciai inossidabili duplex hanno solitamente rapporti compresi tra 2,25 e 3,5.

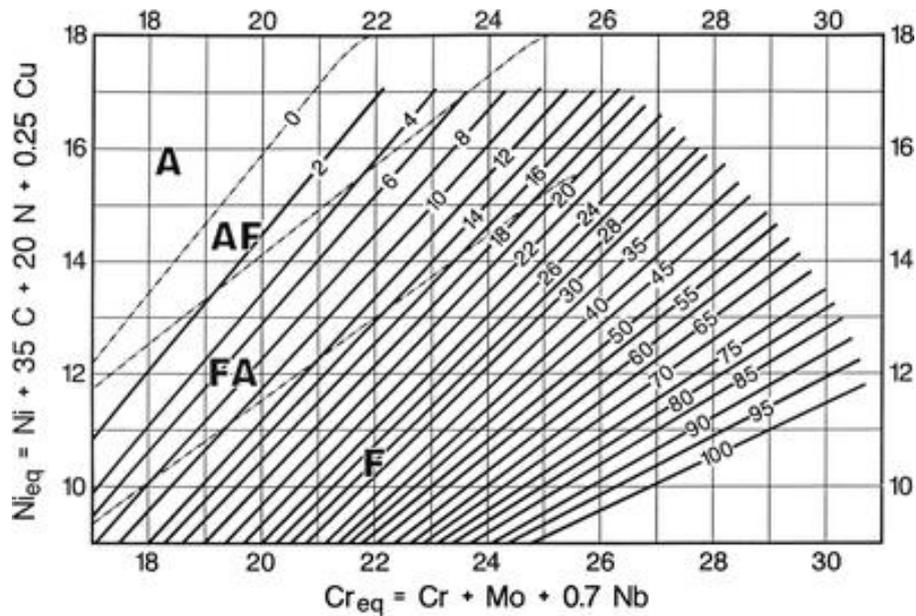


Fig. 2.4.3– Diagramma WRC 1992, utilizzato per stimare il numero di ferrite basato su  $C_{req} = Cr + Mo + 0,7 Nb$  e  $Ni_{eq} = Ni + 35 C + 20 N + 0,25 Cu$ . Fonte: [2.4.2] WRC-1992 Diagramma costitutivo per i metalli saldati in acciaio inossidabile

A temperature elevate (sopra il solvus ferritico), le leghe rimangono ferrite al 100%. L'austenite può nucleare e crescere solo al di sotto del solvus di ferrite. Le operazioni di ricottura e lavorazione a caldo di questi acciai vengono eseguite a temperature inferiori al solvus della ferrite, dove ferrite e austenite possono coesistere. Controllando la temperatura di lavorazione e la velocità di raffreddamento da tale temperatura, è possibile controllare la proporzione e la distribuzione di ferrite e austenite nel prodotto lavorato.

Per questi motivi, molto spesso, oltre alle analisi chimiche, è richiesta la verifica della distribuzione della ferrite e dell'austenite per valutarne la qualità e le prestazioni. Solitamente viene utilizzata una griglia da 16 punti, come indicato dalla norma ASTM E562. Di seguito è mostrato un esempio di misurazioni di ferrite/austenite con il metodo del conteggio dei punti tramite software.

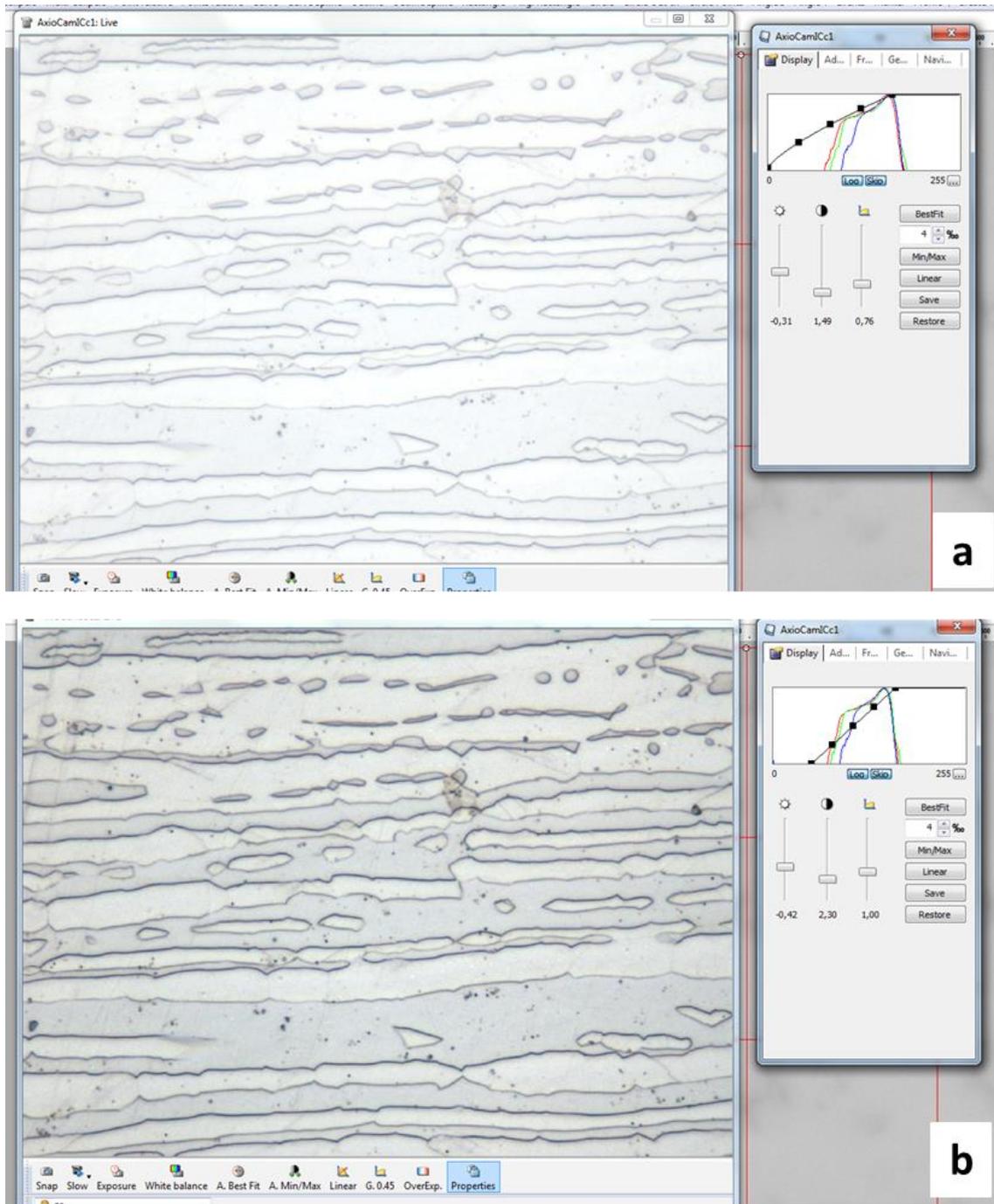


Fig. 2.4.4– Dettagli di un Duplex in acciaio inossidabile tipo 2205. (a) Come preso. (b) Dopo l'ottimizzazione della tabella di ricerca (LUT). Fonte: Laboratorio IIS.

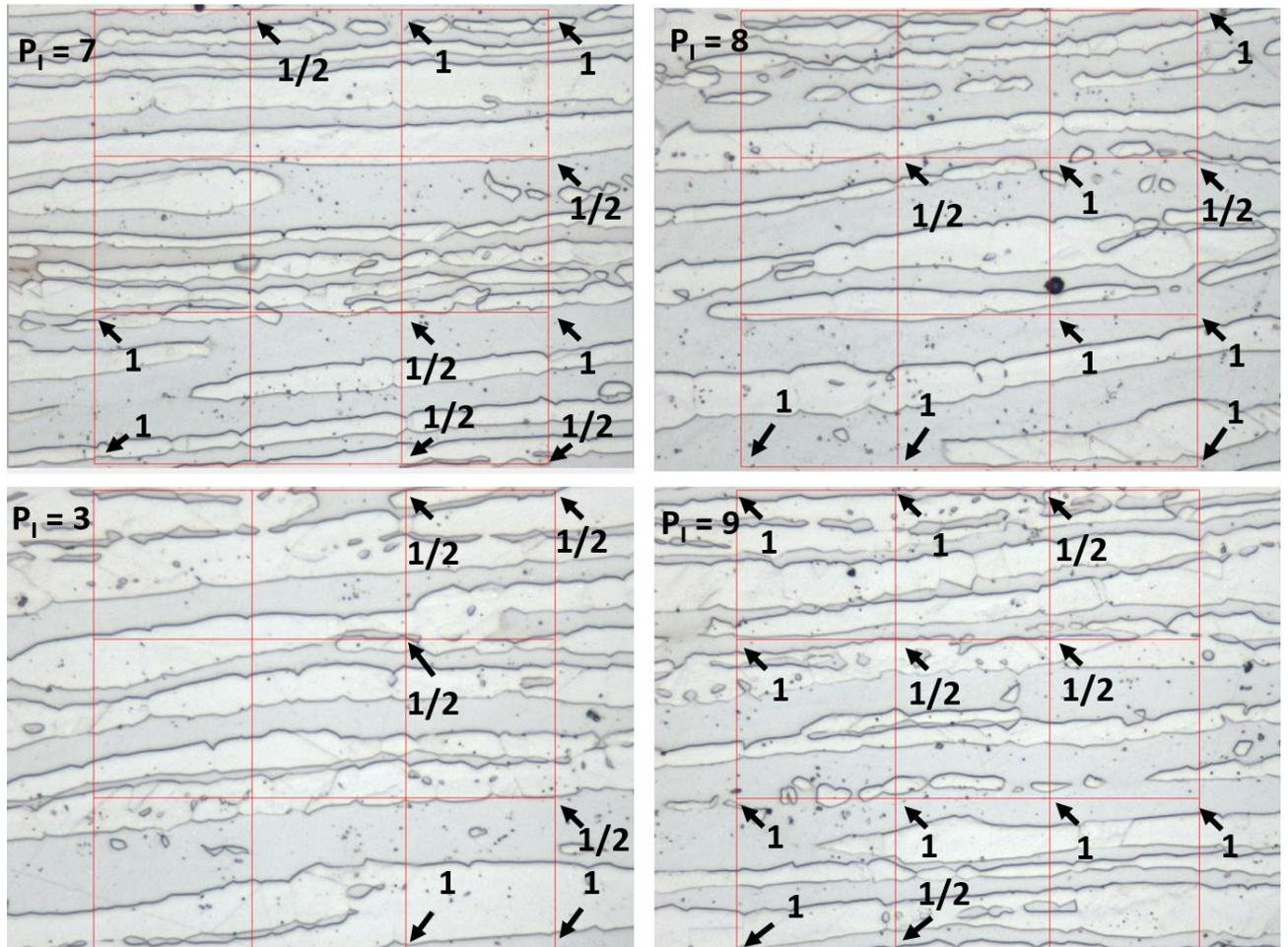


Fig. 2.4.5– Esempi di alcuni campi analizzati con il metodo del conteggio punti con una griglia da 16 punti. Fonte: Laboratorio IIS



PT = 49			
<b>Numero di campi contati n</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>85</b>
<b>Percentuale di punti della griglia Pp</b>	42,19	44,53	44,53
<b>Intervallo di confidenza del 95%.</b>	7,17	4,77	2,16
<b>Precisione relativa % Ra</b>	17,00	10,72	4,84
<b>Deviazione standard</b>	11,34	10,68	9,65

Tabella 2.4.2– La percentuale di ferrite misurata tramite conteggio punti corrisponde a Pp. La tabella mostra come la precisione della misurazione aumenta all'aumentare del numero di campi misurati. Fonte: Laboratorio IIS

#### 2.5.1.1. Dimostrazione di alcuni casi pratici di valutazione percentuale della Porosità

L'immagine di analisi trova un'altra importante applicazione, non solo nella determinazione delle fasi, ma anche nella valutazione della porosità e/o discontinuità all'interno di una matrice. La porosità può essere presente nella saldatura, nella brasatura o in qualche tipo di rivestimento (ad esempio, rivestimento a spruzzo termico).

Nei giunti di saldatura o brasatura la porosità è un'imperfezione (n. 200 nella norma UNI EN ISO 6520-1) e necessita quindi di essere valutata attraverso criteri di accettabilità scelti in base al componente. La valutazione della percentuale di porosità va effettuata sull'area proiettata valutata anche mediante esame radiografico (vedi ISO 5817); è tuttavia possibile effettuare la valutazione mediante esame micrografico, che è complementare.

I programmi di analisi delle immagini consentono di ottenere misurazioni lineari del diametro massimo e delle aree dei pori e delle cavità.

La procedura per la misurazione della porosità può essere riassunta nei seguenti passaggi:

- Acquisizione di immagini: acquisisci immagini ad alta risoluzione dell'area interessante utilizzando un microscopio ottico o elettronico. Assicurati che le immagini siano chiare e ben focalizzate.



- Preparazione dell'immagine: caricare l'immagine acquisita in un software di elaborazione delle immagini (ad esempio, ImageJ o altro software specifico) e applicare un filtro per ridurre il rumore dell'immagine, come un filtro gaussiano o mediano.
- Binarizzazione: applicare un algoritmo di binarizzazione per separare le aree porose dalle altre parti dell'immagine e scegliere una soglia appropriata per distinguere tra pori e matrice.
- Misurazione della Porosità: calcolare il rapporto tra l'area totale dei pori e l'area totale della zona di brasatura, esprimendo la porosità in percentuale.
- Validazione e correzione: rivedere manualmente i risultati ottenuti per correggere eventuali errori di segmentazione o misurazione.
- Reporting e interpretazione: genera un report che include le immagini elaborate, la porosità calcolata e qualsiasi altra informazione rilevante.

Questa procedura fornisce un quadro generale per analizzare la porosità nei giunti di saldatura o brasatura o altri dettagli utilizzando l'elaborazione delle immagini. Tuttavia, è importante personalizzare questa procedura per adattarla ai requisiti specifici di un caso specifico e all'attrezzatura disponibile.

Un esempio di analisi applicata alla porosità presente in un giunto brasato su una lega di rame è mostrato nelle immagini seguenti.

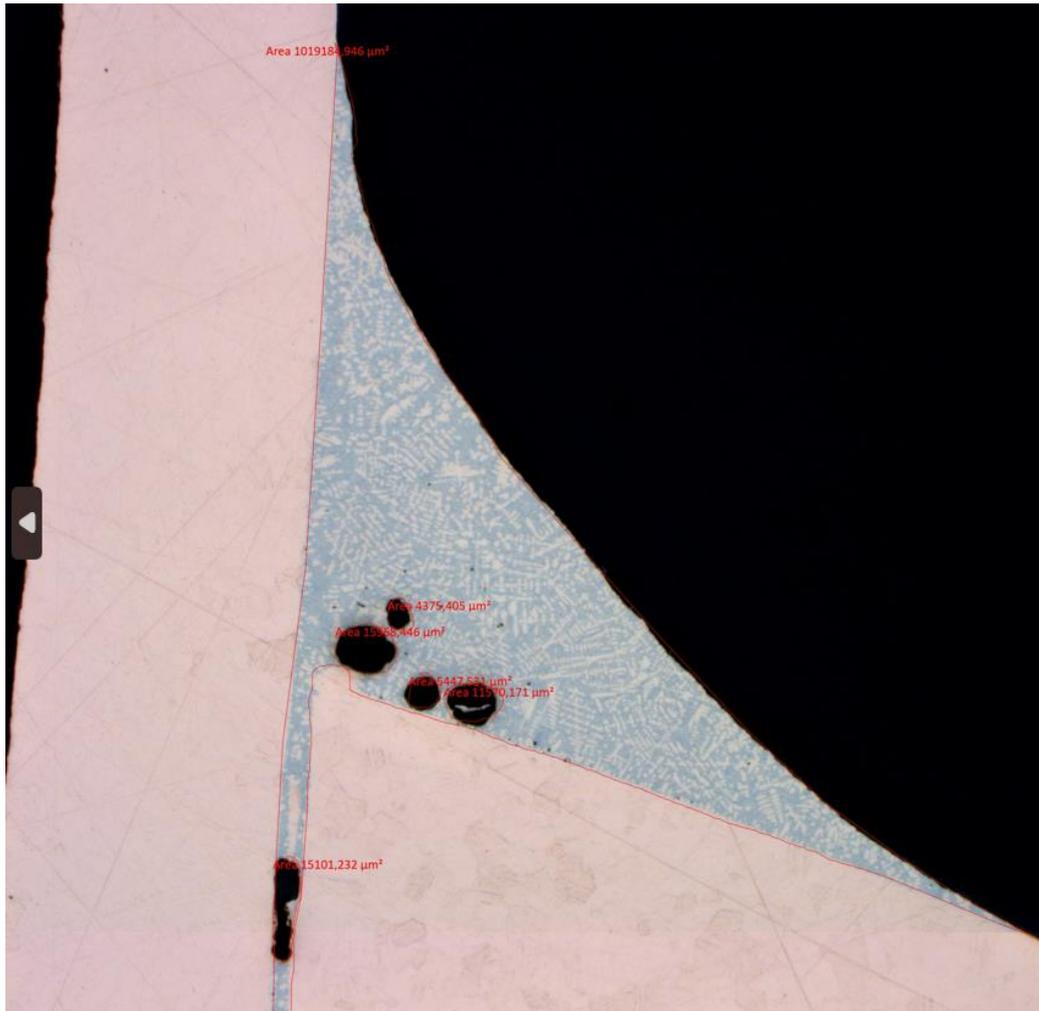


Fig. 2.4.6– Particolare di un giunto di brasatura su un componente in lega di rame. Aree di porosità misurate dal programma di analisi delle immagini. Fonte: Laboratorio IIS

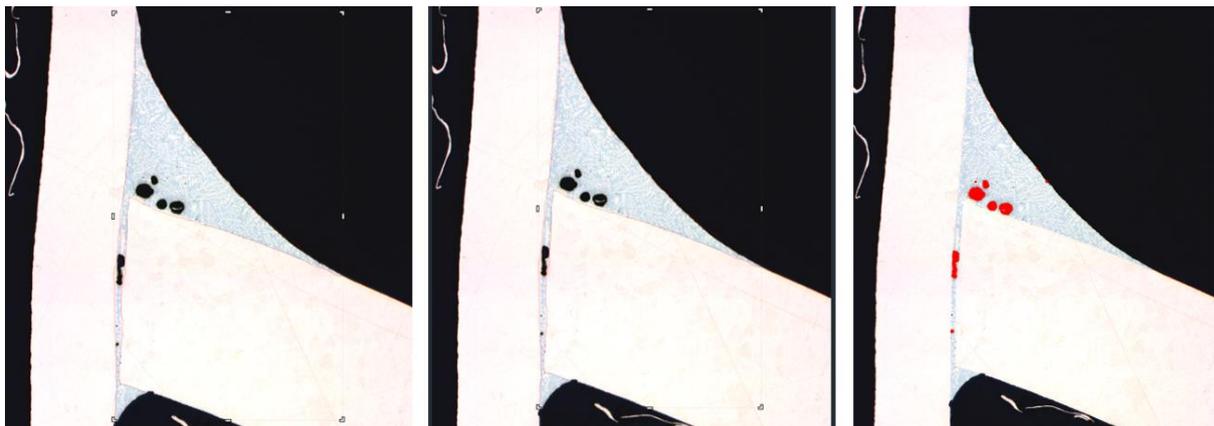


Fig. 2.4.7– Particolare di un giunto di brasatura su un componente in lega di rame. Percentuale di porosità misurata dal programma di analisi delle immagini. Fonte: Laboratorio IIS

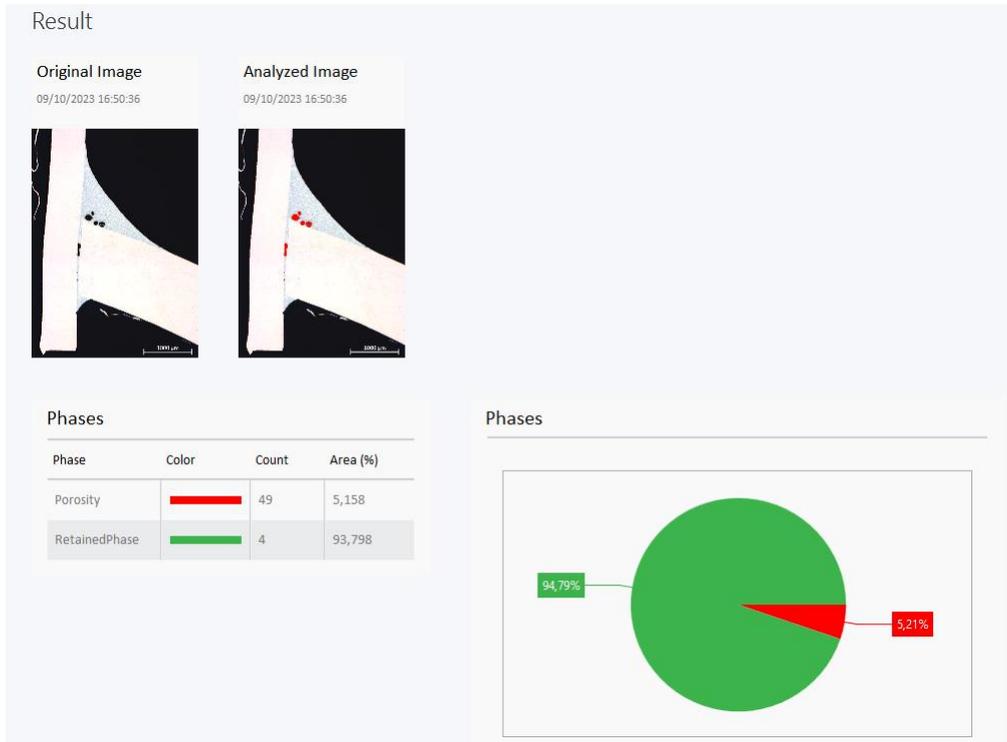


Fig. 2.4.8– Dettaglio di un report ottenuto dal programma di analisi di immagini. La percentuale di porosità sul giunto di brasatura è di circa il 5,2%. Fonte: Laboratorio IIS

Di seguito è riportata l'analisi della porosità presentata in un rivestimento ottenuto con il metodo dello spruzzo termico, osservata in sezione.

La valutazione della porosità in un rivestimento prodotto mediante processo di spruzzatura termica è fondamentale per garantire qualità, durata e prestazioni ottimali del rivestimento. Ciò contribuisce a preservare l'integrità e l'efficacia dell'oggetto rivestito nel suo contesto operativo.

Porosità e discontinuità influenzano le seguenti caratteristiche:

- Durezza e resistenza;
- Adesione e Coesione;
- Resistenza alla corrosione.

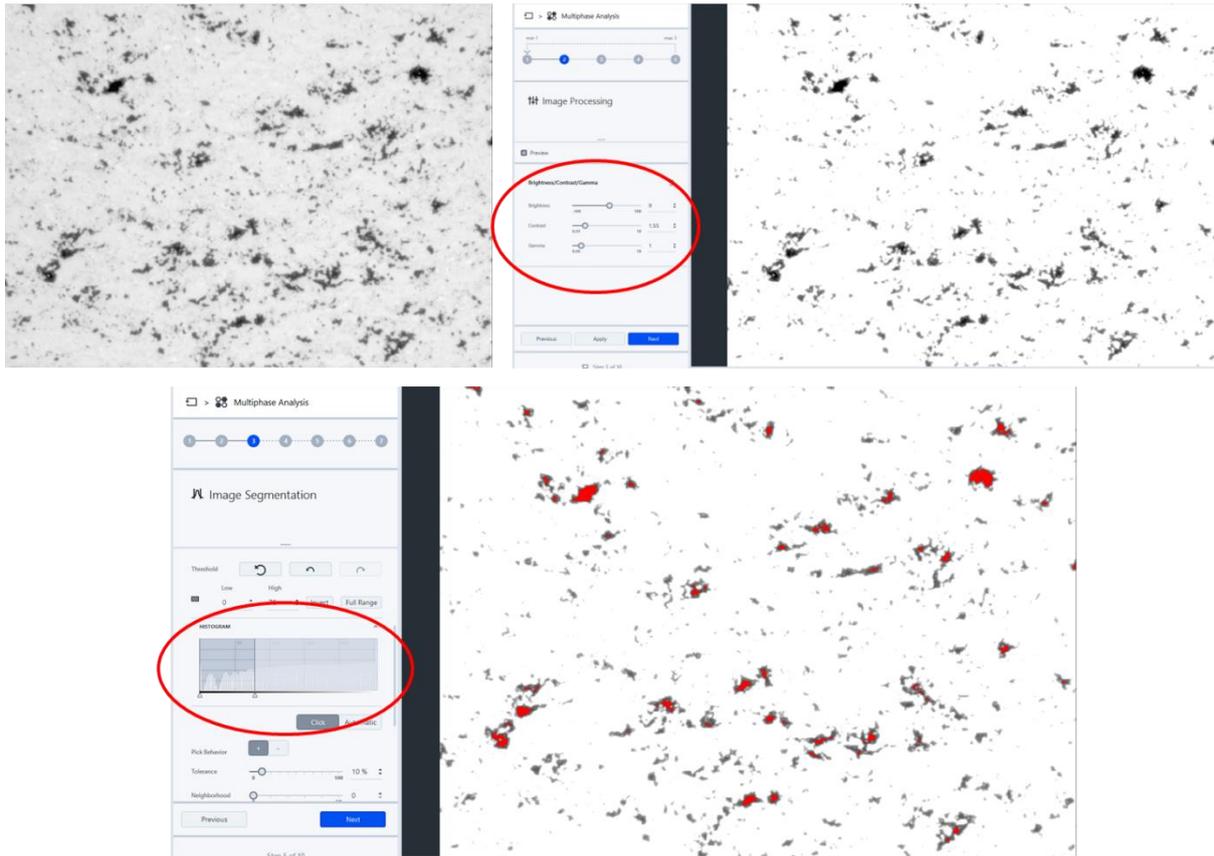


Fig. 2.4.9– Particolare di uno strato di termospruzzatura. Percentuale di porosità misurata dal programma di analisi delle immagini. Le figure mostrano i vari passaggi per ottimizzare l'immagine. Fonte: Laboratorio IIS



Fig. 2.4.10– Dettaglio di un report ottenuto dal programma di analisi di immagini. La percentuale di porosità sul rivestimento a spruzzo termico è di circa lo 0,53%. Fonte: Laboratorio IIS.

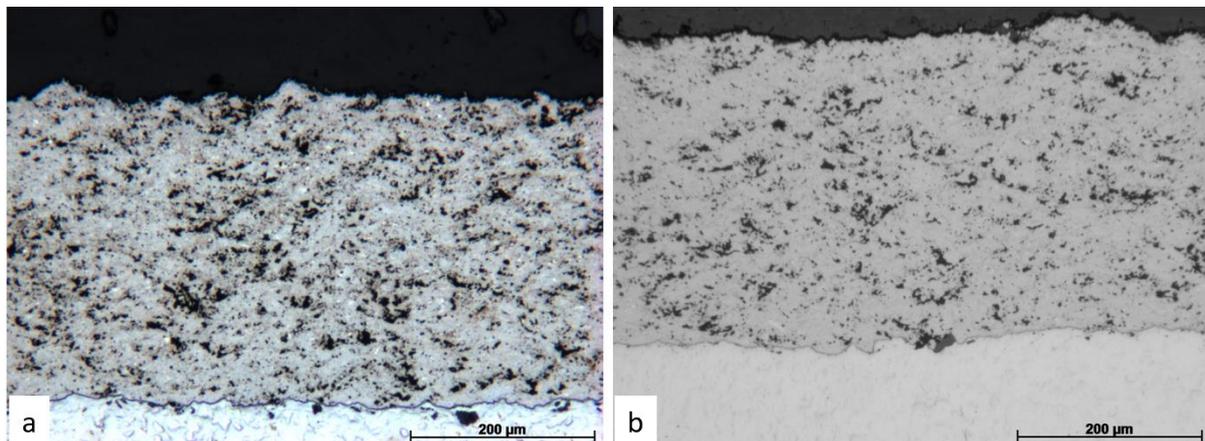


Fig. 2.4.11– Confronto tra due sezioni micrografiche prelevate dallo stesso rivestimento a spruzzo termico con una preparazione metallografica convenzionale(a) e con una preparazione metallografica più accurata(b) come l'uso di sistemi di taglio automatici, montaggio e molatura a pressione di lucidatura ridotto, ecc. Fonte: Laboratorio IIS.



### 2.5.1.2. Dimostrazione di alcuni casi pratici di misure granulometriche

La misurazione granulometrica nel settore è un processo fondamentale per diversi motivi:

- Consentire il controllo di qualità durante la produzione per garantire che il materiale soddisfi gli standard e le specifiche richiesti.
- L'ottimizzazione delle proprietà meccaniche e fisiche dei materiali, poiché la dimensione e la distribuzione dei grani può influenzare fattori chiave come durezza, resistenza, duttilità e resistenza alla fatica.
- Sviluppo di metodi di lavorazione e trattamento termico appropriati determinando parametri ottimali per ottenere la microstruttura desiderata e migliorare le prestazioni del materiale.
- Previsione del comportamento a lungo termine del materiale in diverse condizioni operative e ambienti.
- Ricerca e sviluppo di nuovi materiali e ottimizzazione di quelli esistenti, consentendo la progettazione di materiali con prestazioni superiori per applicazioni specifiche.

In sintesi, la misurazione della grana metallografica è fondamentale per comprendere la struttura microscopica dei materiali metallici e ottimizzare le proprietà dei materiali, migliorando quindi la qualità, l'efficienza del processo produttivo e i progressi nella metallurgia e nelle applicazioni industriali.

La dimensione del grano può essere un requisito specifico per alcuni standard europei o americani, come i seguenti esempi:

- Gli acciai da cementazione hanno spesso specifiche relative alla dimensione del grano per garantire una struttura controllata ed uniforme dopo il trattamento termico di cementazione (EN 10084).
- Gli acciai legati al cromo-molibdeno richiedono spesso controlli sulla dimensione del grano per garantire una migliore lavorabilità e prestazioni meccaniche (ASTM A519).
- Le specifiche per gli acciai che devono essere sottoposti a trattamento termico possono includere requisiti relativi alla dimensione del grano per garantire la corretta microstruttura dopo il trattamento (ASTM A304).
- Gli acciai utilizzati nella produzione di molle ad alta resistenza spesso richiedono un rigoroso controllo della dimensione del grano per garantire prestazioni costanti e affidabili (EN 10270).

Spesso la dimensione del grano può essere specificata come requisito nelle specifiche del prodotto in base al know-how aziendale.

Le immagini seguenti mostrano alcuni esempi di misurazione del grano con i vari metodi descritti nel paragrafo precedente.

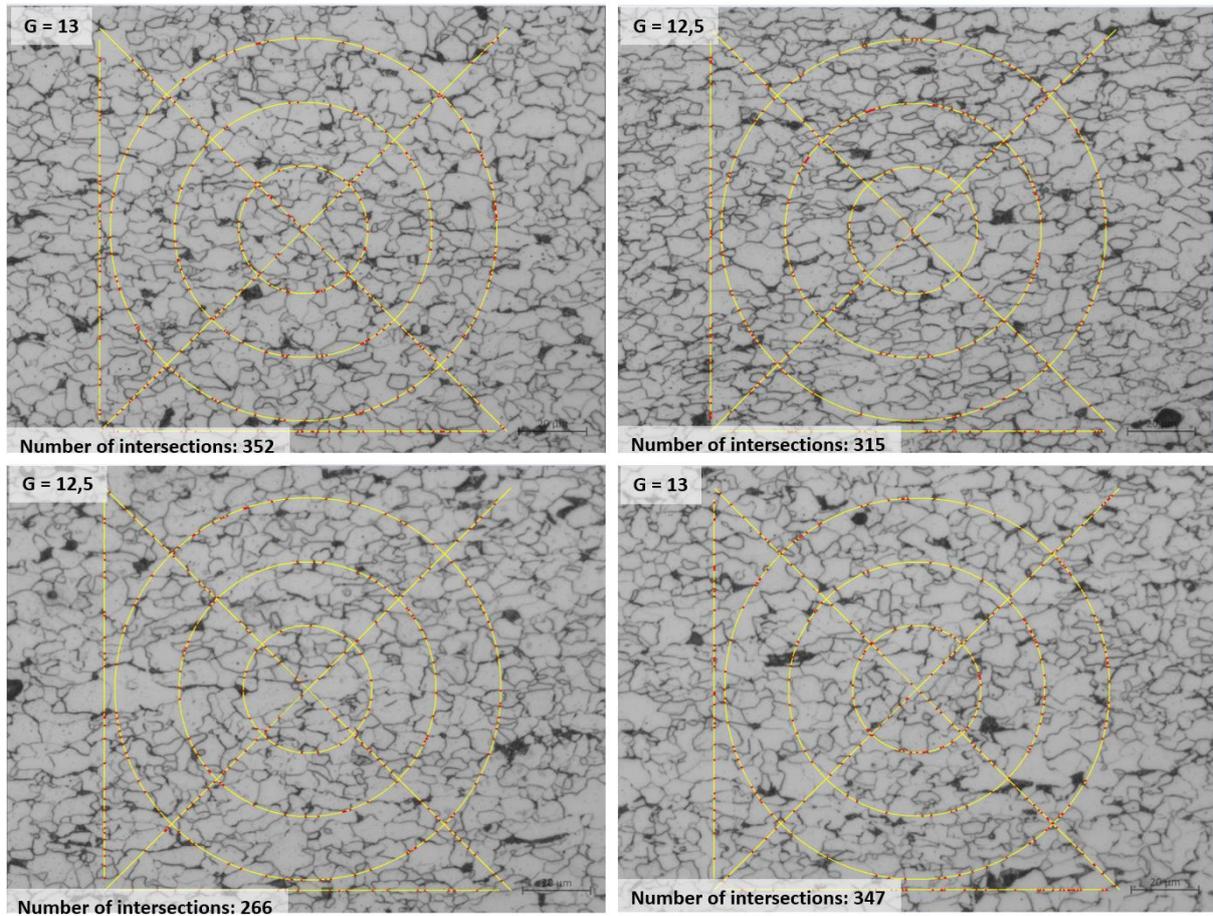


Fig. 2.4.12– Dettaglio di alcuni campi analizzati con metodo di intercettazione su un acciaio al carbonio a grana fine, secondo la norma UNI EN ISO 643. Fonte: Laboratorio IIS.

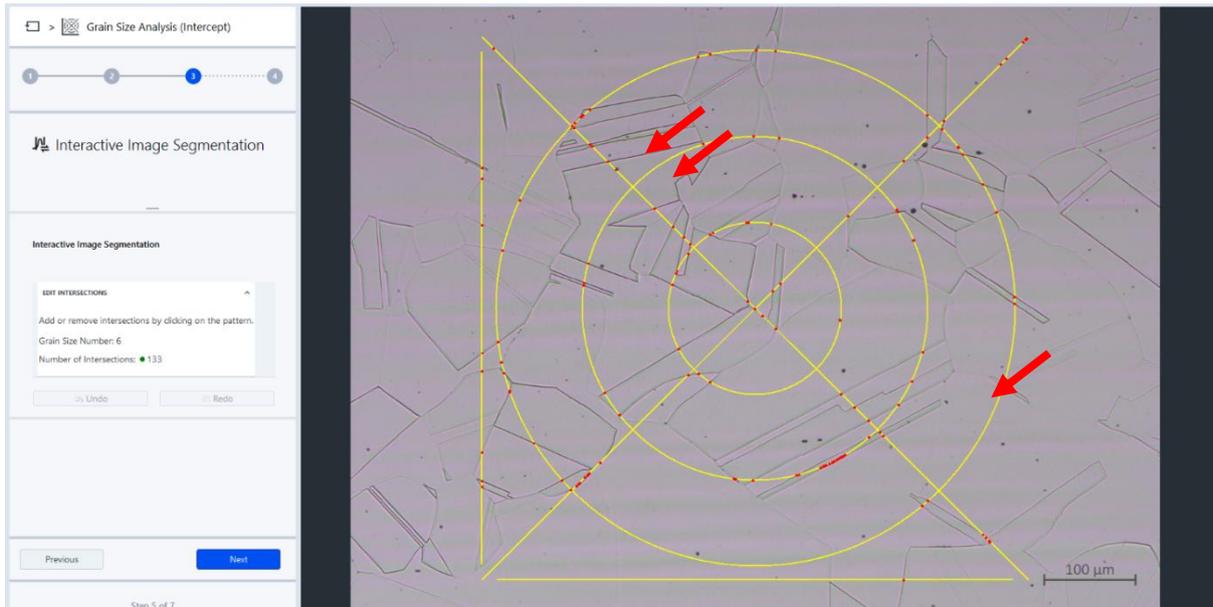


Fig. 2.4.12– Dettagli della misurazione della dimensione del grano mediante metodo di intercettazione su un acciaio inossidabile super austenitico (Tipo AISI 310LMO), secondo la norma UNI EN ISO 643. La figura mostra un errore di misurazione dell'analisi dell'immagine dovuto all'impossibilità di distinguere il grano confini dai gemelli del grano. Fonte: Laboratorio IIS.

+

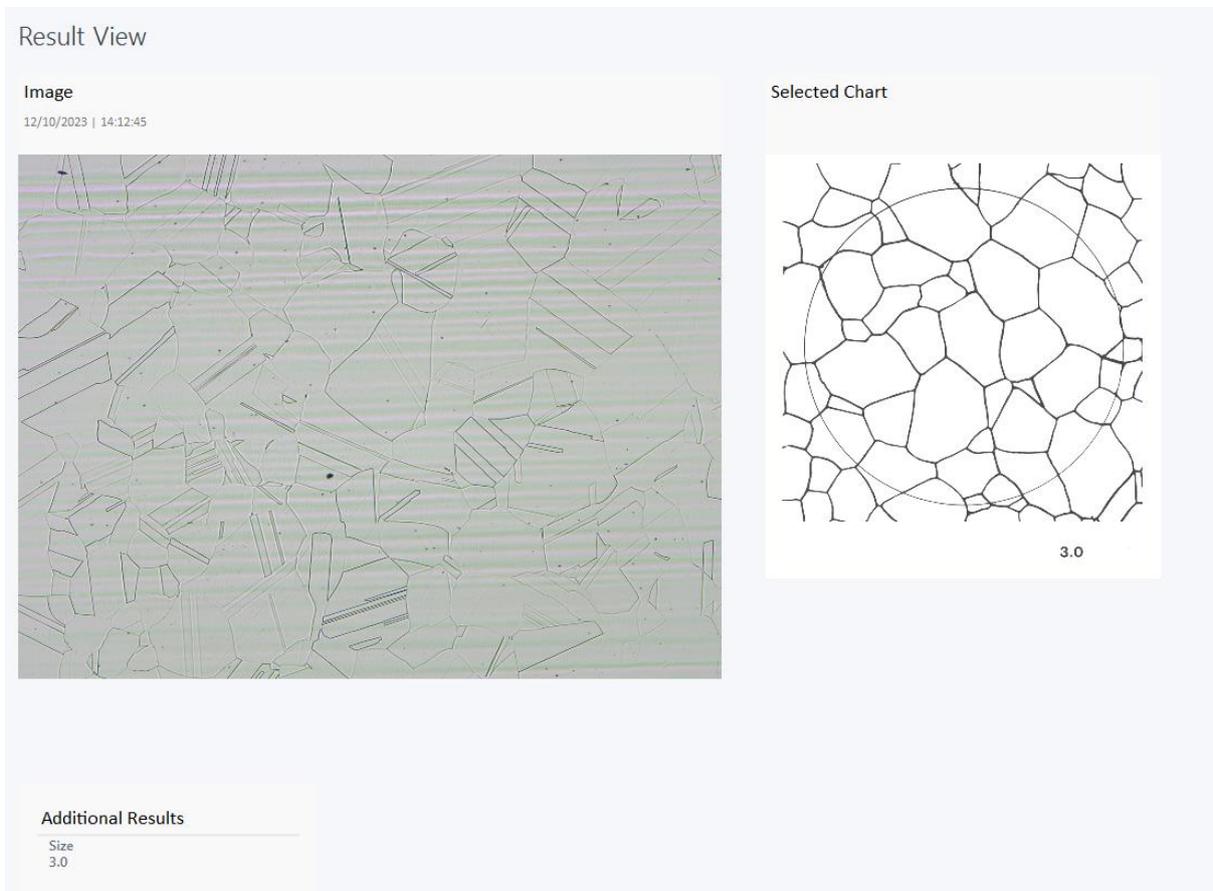




Fig. 2.4.13– Dettagli della misurazione della dimensione del grano mediante metodo comparativo su un acciaio inossidabile super austenitico (Tipo AISI 310LMO), secondo la norma UNI EN ISO 643. Grani non intrecciati (Flat Etchs). Fonte: Laboratorio IIS.

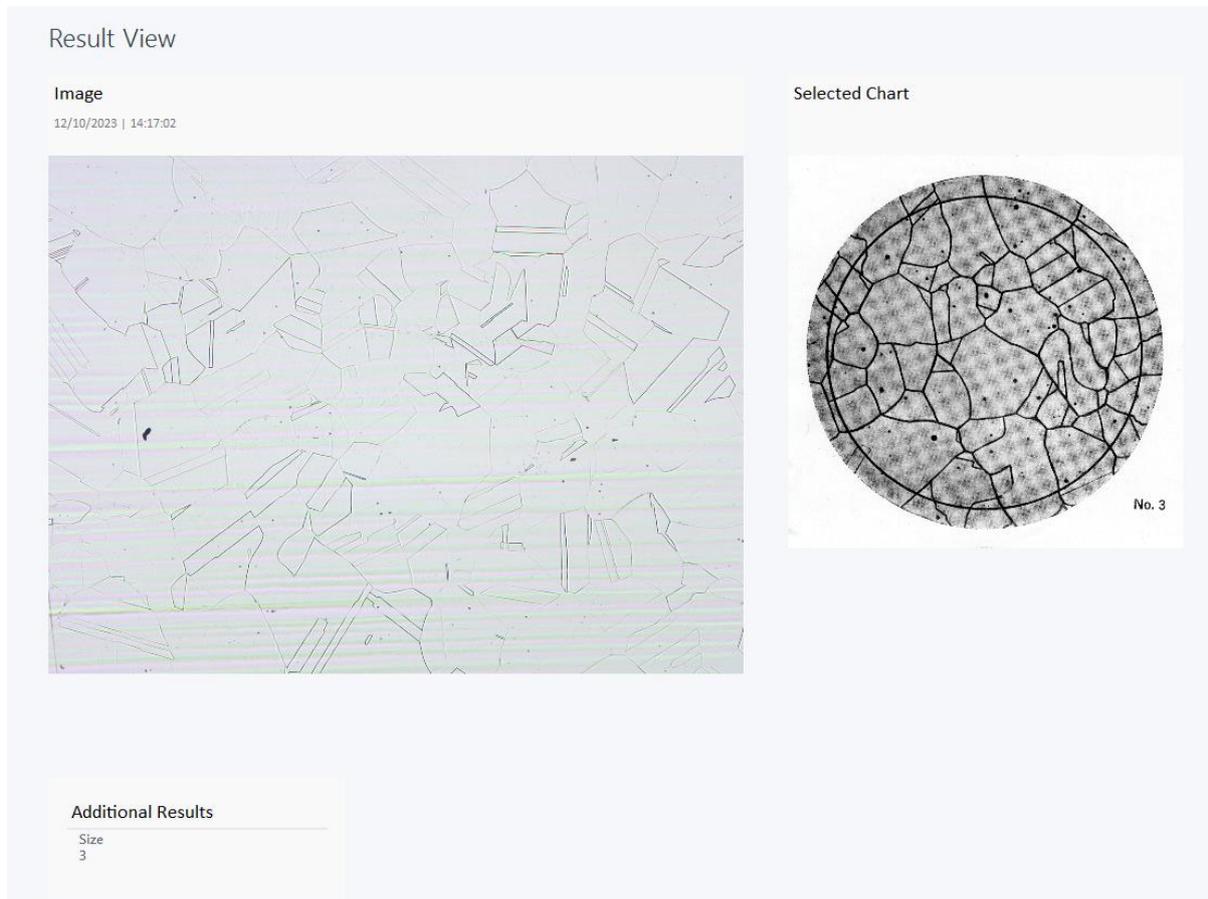


Fig. 2.4.14– Dettagli della misurazione della dimensione del grano mediante metodo comparativo su un acciaio inossidabile super austenitico (Tipo AISI 310LMO), secondo ASTM E112. Piastra a doppia grana utilizzata. Fonte: Laboratorio IIS.

#### Riferimenti:

[2.4.1] *Metallurgia della saldatura e saldabilità degli acciai inossidabili* – John C. Lippold e Damian J. Kotecki.

[2.4.2] *Diagramma costitutivo WRC-1992 per i metalli saldati in acciaio inossidabile*

[2.4.3] *ASTM E562:2011 – Metodi di prova standard per la determinazione della frazione di volume mediante conteggio sistematico manuale dei punti.*

[2.4.4] *ASTM E1245:2003 - Pratica standard per determinare l'inclusione o il contenuto costituente di seconda fase dei metalli mediante analisi automatica delle immagini.*



*[2.4.5] ASTM E112 – Metodi di prova standard per determinare la dimensione media del grano.*

*[2.4.6] UNI EN ISO 643 – Acciai – Determinazione micrografica della dimensione del grano apparente.*

*[2.4.7] UNI EN 10084 – Acciai da cementazione – Condizioni tecniche di fornitura.*

*[2.4.8] ASTM A519 - Specifiche standard per tubi meccanici senza saldatura in acciaio al carbonio e legato.*

*[2.4.9] ASTM A304 - Specifiche standard per barre di acciaio al carbonio e legato soggette a requisiti di temprabilità finale.*

*[2.4.10] UNI EN 10270 – Filo di acciaio per molle meccaniche – filo di acciaio per molle non legato trafilato a freddo brevettato.*

## 2.6. Introduzione alla microscopia a scansione

Il microscopio elettronico a scansione (SEM) consente l'osservazione e la caratterizzazione di materiali organici e inorganici eterogenei su scala da nanometrica a micrometrica. Il SEM viene utilizzato per osservare e caratterizzare le caratteristiche superficiali su aree grandi (o piccole) del campione. In metallografia, il SEM fornisce informazioni sulle microstrutture, sulla caratterizzazione delle fasi secondarie/intermetalliche, sui meccanismi di rottura, ecc.

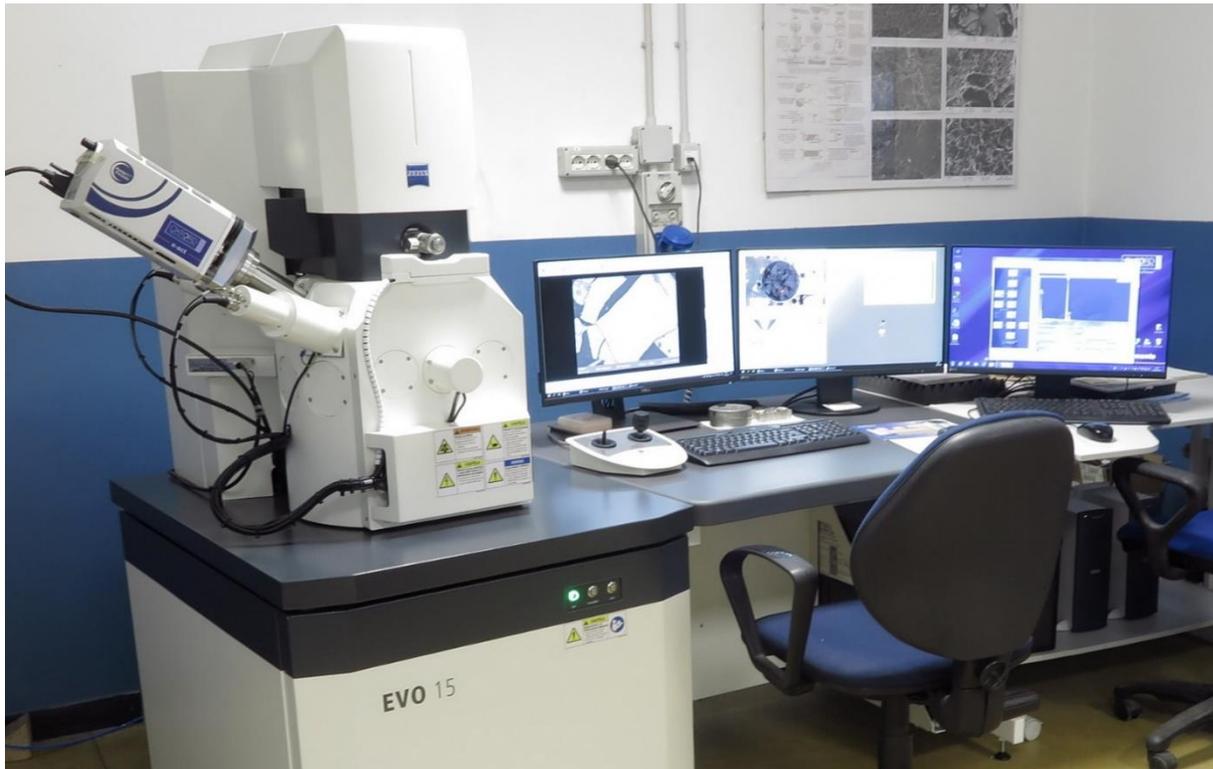


Fig. 2.5.1– vista generale di un microscopio elettronico a scansione. Fonte: Laboratorio IIS

Un SEM produce immagini di un campione scansionando la superficie con un raggio focalizzato di [elettroni](#). Il fascio di elettroni è generato da un catodo e viene accelerato verso il campione da un'elevata tensione (da 1000 a 30000 V); il catodo può essere un catodo caldo che emette elettroni per effetto termoionico (filamento di tungsteno, esaboruro di lantanio LaB6), oppure un catodo freddo che emette per effetto [campo elettrostatico](#) (pistola ad emissione di campo FEG).

Quando gli elettroni (elettroni primari) colpiscono la superficie metallica del campione, vengono generati i seguenti segnali:

- Gli elettroni secondari (SE) generati dalle interazioni anelastiche tra il fascio di elettroni e il campione, influenzano solo gli strati superficiali o sotterranei. Consentono la formazione di un'immagine morfologica e topografica della superficie del campione.
- Gli elettroni retrodiffusi (BSD) generati da collisioni elastiche tra elettroni e atomi, inducono cambiamenti nella traiettoria degli elettroni, gli atomi grandi diffondono più elettroni rispetto agli atomi piccoli, dando un segnale maggiore all'aumentare del numero atomico (Z). Questo principio permette di ottenere immagini con informazioni qualitative delle composizioni chimiche.



- Fotoni di raggi X generati dall'interazione degli elettroni con gli atomi. Ogni fotone di raggi X è caratterizzato da una frequenza ( $\nu$ ) e da una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) caratteristiche dell'atomo dell'elemento da cui è stato generato.

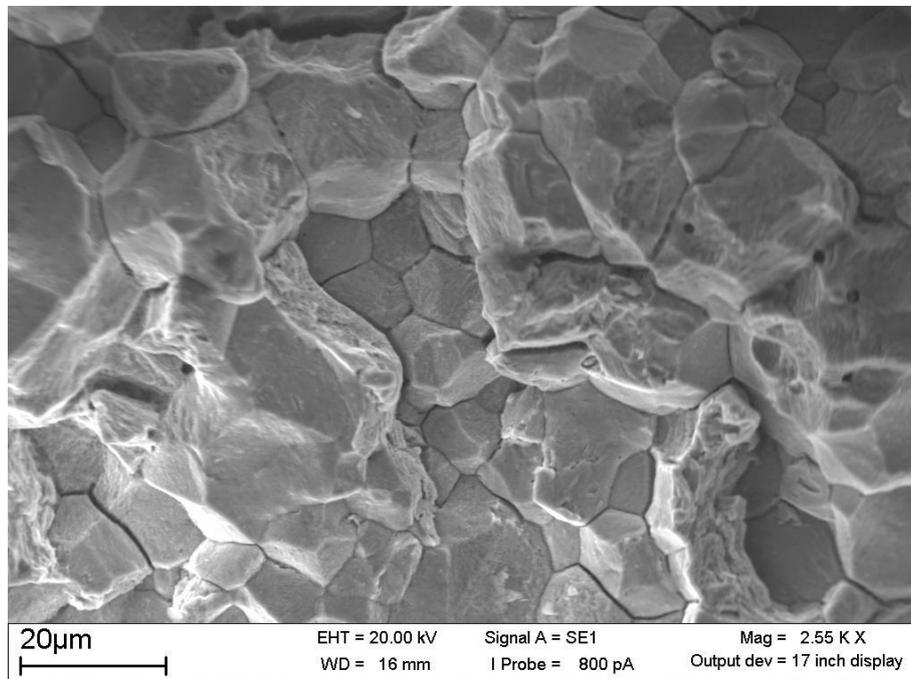


Fig. 2.5.2– dettaglio di una frattura intergranulare ottenuta al SEM con elettroni secondari (SE). Fonte: Laboratorio IIS.

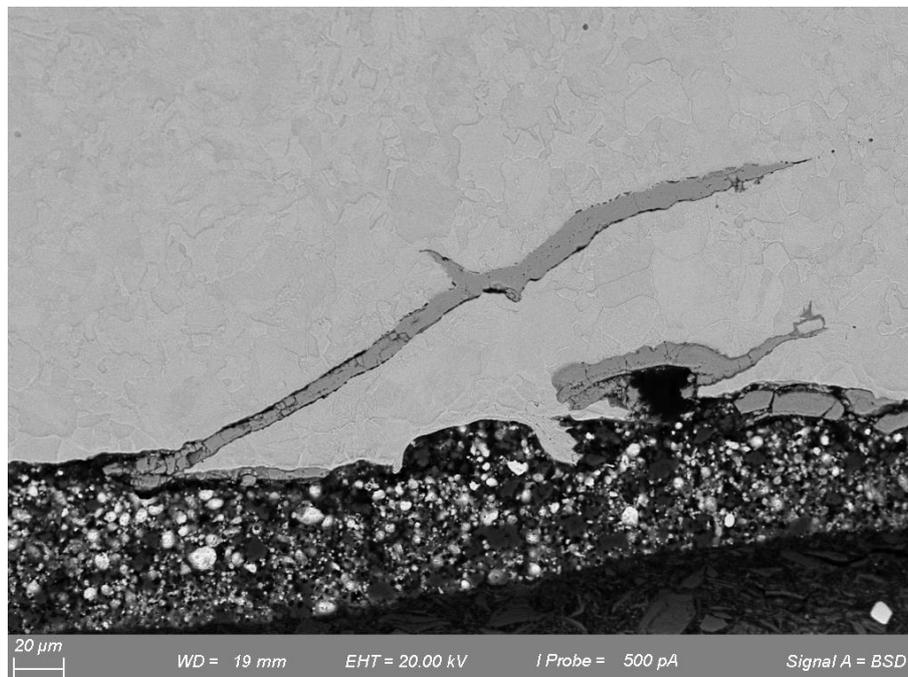


Fig. 2.5.3– dettaglio di una sezione micrografica ottenuta al SEM con elettroni retrodiffusi (BSD). Fonte: Laboratorio IIS.

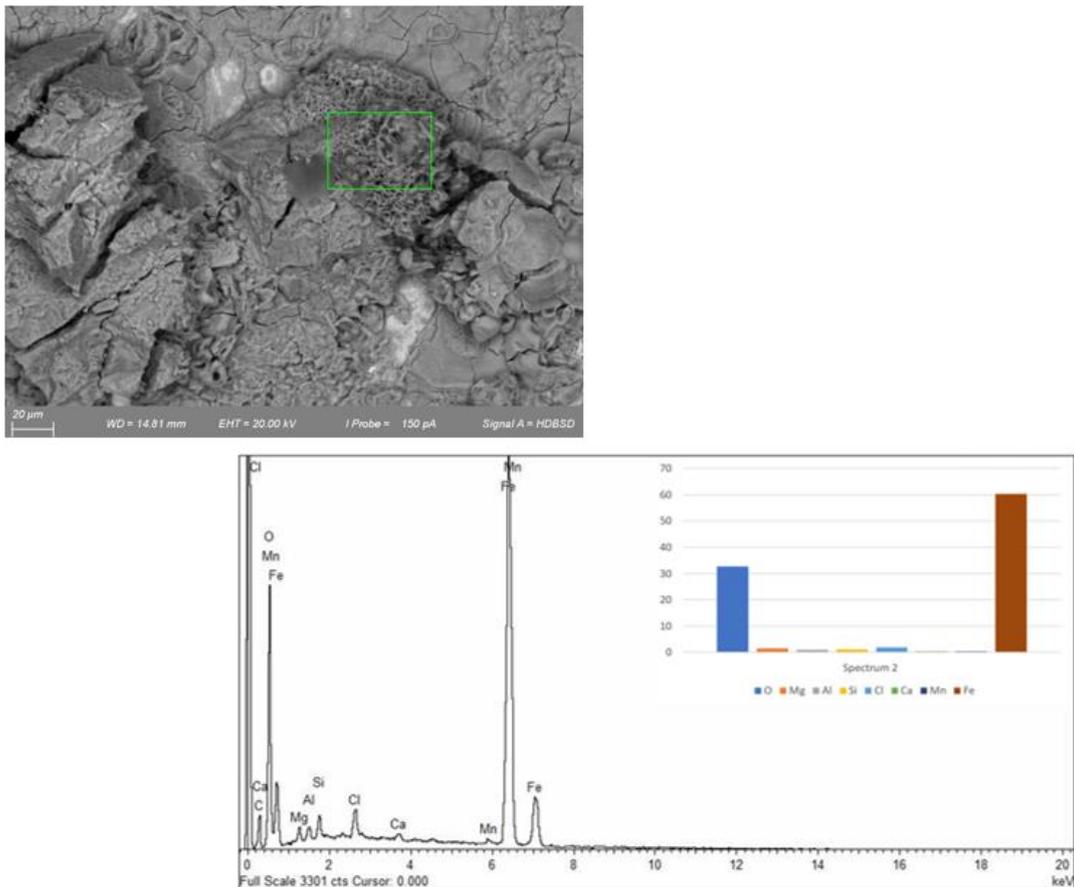


Fig. 2.5.4– esempio di analisi EDS dei depositi. Fonte: Laboratorio IIS.

Le sonde presenti nel SEM captano il segnale e inviano i dati al sistema di acquisizione (console di controllo) dove vengono elaborati per ottenere immagini tridimensionali e informazioni sulla composizione.

I vantaggi del SEM rispetto alla microscopia ottica (OM), sono riportati nei seguenti punti:

- Elevata profondità di campo (DOF): immagini 3D con informazioni topografiche.
- Ingrandimenti molto elevati (> 150000x).
- Immagini ad alta risoluzione (3-10 nm).

Inoltre, la strumentazione SEM è spesso dotata di un sistema EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) che consente l'analisi della composizione chimica delle caratteristiche osservate sul monitor.

Il SEM può essere equipaggiato con altri tipi di sonde come:

- EBSD (diffrazione retrodiffusa di elettroni)

- SAN (nanosonde a coclea a scansione)
- WDS (spettroscopia a raggi X dispersiva in lunghezza d'onda).

### 2.2.1. Modalità di funzionamento

I due componenti principali di un SEM sono la colonna di elettroni e la console di controllo. La colonna elettronica è costituita da un cannone elettronico e da lenti elettroniche, che influenzano il percorso degli elettroni che viaggiano lungo la colonna a vuoto. La base della colonna è solitamente occupata da pompe a vuoto che producono un vuoto di circa  $10^{-4}$  Pa. La console di controllo è costituita da un tubo a raggi catodici (CRT), schermo di visualizzazione, manopole e tastiera del computer che controlla il fascio di elettroni.

Il cannone elettronico genera elettroni e li accelera a una tensione di accelerazione compresa tra 1.000 e 30.000 V. La dimensione del punto di un cannone a filamento di tungsteno è troppo grande per produrre un'immagine nitida a meno che non vengano utilizzate lenti elettroniche per abbassare l'ingrandimento, creerà un'immagine nitida. punto elettronico focalizzato molto più piccolo sul campione.

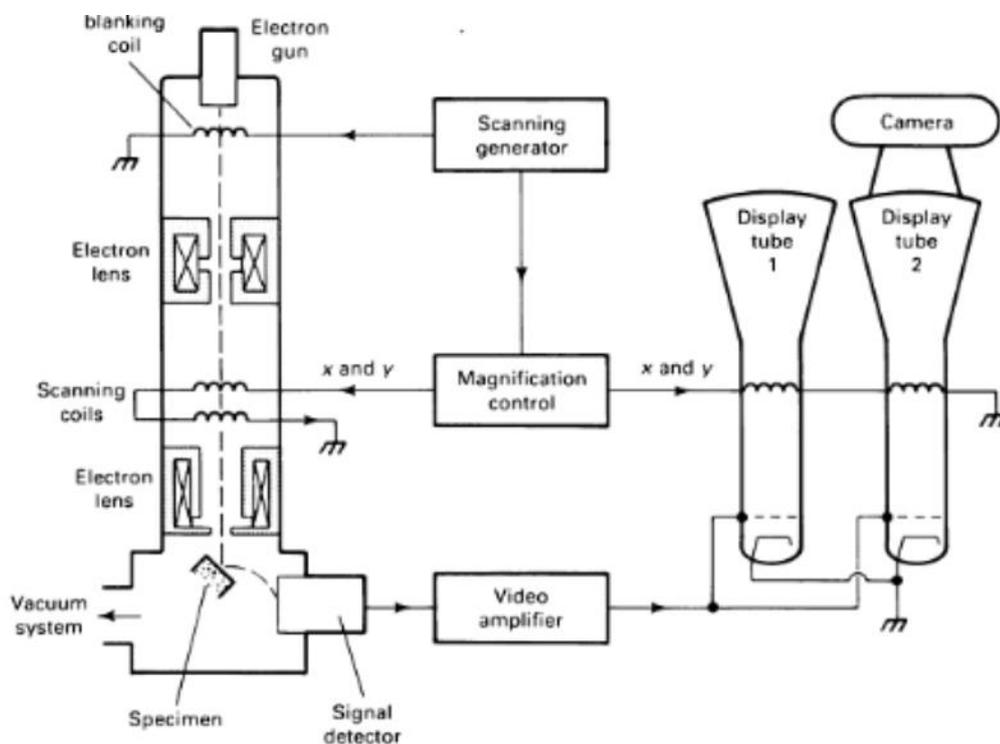


Fig. 2.5.5– Struttura tipica del microscopio elettronico a scansione. Fonte: [2.5.1] ASM



L'immagine scansionata viene formata punto per punto. Il sistema di deflessione fa sì che il raggio si sposti in una serie di posizioni distinte lungo una linea, quindi lungo un'altra linea che si trova sotto la prima e così via, fino a quando sul provino viene generato un "raster" rettangolare.

Allo stesso tempo, lo stesso generatore di scansione crea un raster simile sullo schermo di visualizzazione.

Due coppie di bobine di deflessione elettromagnetica vengono utilizzate per spostare il raggio sul provino.

La prima coppia di bobine devia il raggio fuori dall'asse ottico del microscopio e la seconda coppia piega nuovamente il raggio sull'asse nel punto cardine della scansione. L'ingrandimento  $M$  dell'immagine è il rapporto tra la lunghezza del raster e la visione schermo alla lunghezza corrispondente del raster sul campione. Ad esempio, un raster di  $100\ \mu\text{m}$  di larghezza sul campione visualizzato su uno schermo di visualizzazione di  $10\ \text{cm}$  di larghezza genera un'immagine con un ingrandimento di  $10.000\times$ .

Quando l'operatore necessita di un aumento dell'ingrandimento dell'immagine, le bobine di scansione sono meno eccitate e il raggio viene deviato su una distanza minore sul campione.

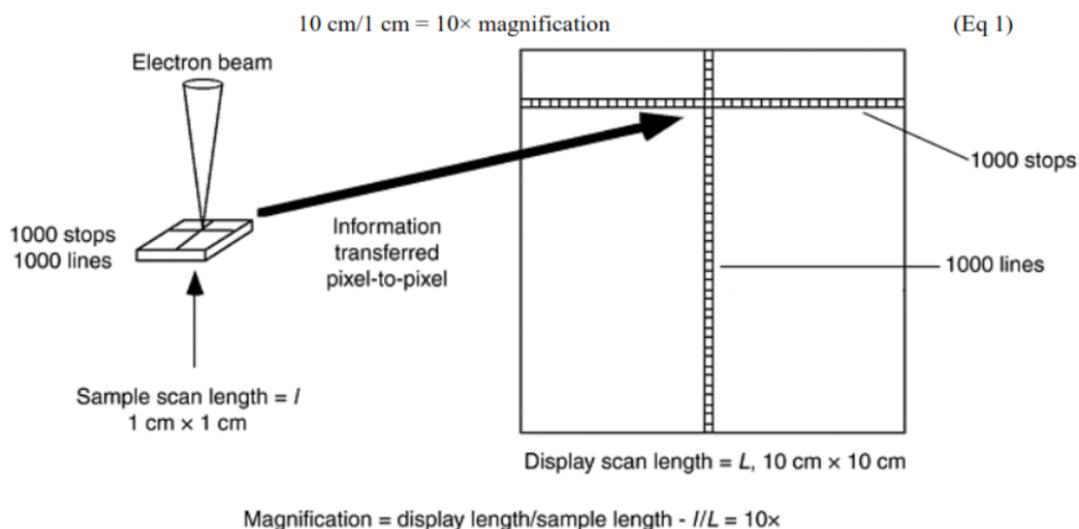


Fig. 2.5.5 – illustrazione di come le informazioni ottenute da un reticolo quadrato sul campione vengono trasferite allo schermo di visualizzazione per produrre l'ingrandimento. [2.5.2] Microscopia elettronica a scansione e microanalisi a raggi X – Terza edizione – Joseph Goldstein. Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer e Joseph Michael.

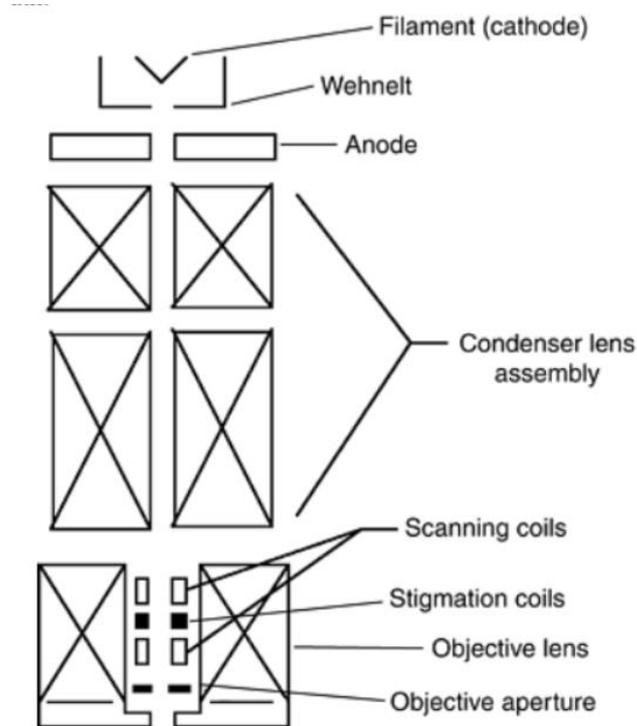


Fig. 2.5.6– schizzo di un tipico microscopio elettronico a scansione. Fonte: [2.5.3] MANUALE ASM – Volume 11 – Analisi e prevenzione dei guasti

I due segnali più utilizzati per produrre immagini SEM sono gli elettroni secondari (SE) e gli elettroni retrodiffusi (BSE); entrambi i segnali vengono raccolti quando viene applicata una tensione positiva allo schermo del collettore davanti al rivelatore. Gli elettroni catturati dallo scintillatore/fotomoltiplicatore vengono quindi amplificati per la visualizzazione.

Quando gli elettroni del fascio colpiscono il campione, interagiscono come particelle caricate negativamente con il campo elettrico degli atomi del campione. La carica positiva dei protoni è concentrata nel nucleo, mentre la carica negativa degli elettroni atomici è molto più dispersa in un fascio di elettroni con struttura a guscio. L'interazione tra il fascio di elettroni e gli atomi può deviare gli elettroni del fascio lungo una nuova traiettoria ("scattering elastico" senza perdita di energia cinetica), lo scattering elastico può abbandonare il campione (backscattering); la probabilità di diffusione elastica aumenta in correlazione con il numero atomico (Z). Gli atomi più pesanti hanno una

carica positiva molto più forte, l'energia degli elettroni aumenta al diminuire del numero atomico ( $Z$ ), approssimativamente come  $1/E^2$ .

Contemporaneamente allo scattering elastico, gli elettroni del fascio perdono energia e la trasferiscono in vari modi agli atomi del campione (scattering anelastico), generando segnali di imaging utili come elettroni secondari e segnali di analisi come i raggi X.

Gli elettroni retrodispersi sono quegli elettroni che vengono dispersi dai campioni e possono essere raccolti mentre il fascio primario scansiona la superficie del campione. L'immagine raccolta degli elettroni retrodispersi della superficie del campione viene visualizzata su un tubo a raggi catodici (CRT) e può essere catturata. C'è una certa perdita di energia degli elettroni durante il processo di retrodiffusione. Quanto più alto è il numero atomico degli elementi nel campione, tanto maggiore è il grado di retrodiffusione (minore perdita di energia). Ciò significa che gli elementi con numeri atomici più alti, come il ferro ( $Z = 26$ ), appariranno più luminosi sull'immagine degli elettroni retrodiffusi del CRT rispetto agli elementi con numeri atomici più bassi, come l'ossigeno ( $Z = 8$ ). Un esempio di un'immagine elettronica retrodiffusa della penetrazione delle scaglie di ossido è mostrato nella figura 2.5.5.

L'acciaio appare come un costituente grigio chiaro e l'ossido appare come due costituenti grigio più scuro.

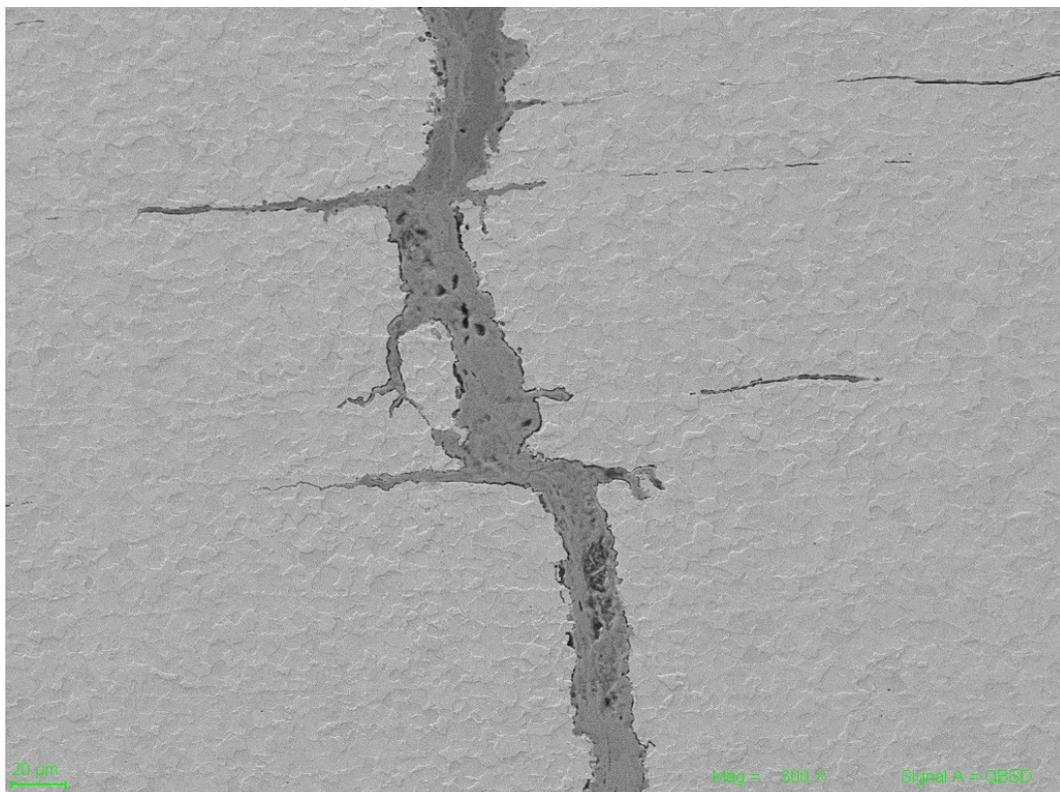


Fig. 2.5.7– dettaglio di una fessura ottenuta al microscopio elettronico a scansione con segnale BSE. Fonte: Laboratorio IIS.



Gli elettroni secondari, d'altra parte, sono il risultato dell'interazione degli elettroni primari (fascio) con gli elettroni contenuti negli atomi del campione. Gli elettroni primari possono spostare gli elettroni orbitali trattenuti liberamente dagli atomi. Questi elettroni spostati sono chiamati elettroni secondari. Gli SE hanno un'energia molto inferiore rispetto agli elettroni retrodiffusi, precedentemente descritti. Ciò significa che gli elettroni secondari vengono rilevati solo dalle regioni superficiali e vicine alla superficie del campione, poiché quelli provenienti dalle regioni più profonde vengono facilmente assorbiti dal campione. Pertanto, gli elettroni secondari producono un'immagine elettronica secondaria sul tubo a raggi catodici che rivela la topografia superficiale e produce un'immagine con una maggiore profondità di campo.

In questa micrografia, si possono vedere inclusioni in molti dei vuoti sulla superficie fessurata.

Anche i raggi X vengono emessi dal campione, a causa dell'interazione degli elettroni primari e retrodiffusi con gli elettroni del guscio interno degli atomi nel campione. Gli elettroni primari/retrodifusi hanno energia cinetica sufficiente per spostare gli elettroni del guscio interno fuori dall'orbita. Quando un elettrone viene spostato da un particolare guscio elettronico interno, viene emesso un fotone di raggi X quando un elettrone si sposta al suo posto. Questi raggi X hanno un'energia (e lunghezze d'onda) caratteristiche per particolari atomi. Per questo motivo vengono chiamati raggi X caratteristici. Ciò significa che ogni raggio X raccolto ha un'energia e una lunghezza d'onda uniche per il particolare elemento presente nel campione. L'importanza della raccolta di questi raggi X è che in questo modo è possibile ottenere informazioni sulla composizione.

Generalmente in un SEM viene analizzata solo l'energia dei raggi X. La tecnica è chiamata spettroscopia a dispersione di energia o EDS. L'intensità è tracciata sull'asse verticale e l'energia dei raggi X è tracciata sull'asse orizzontale. Questa analisi indica gli elementi presenti ma non rivela la distribuzione degli elementi. Alcuni SEM possono fornire una mappa a raggi X EDS degli elementi contenuti sulla superficie del campione.

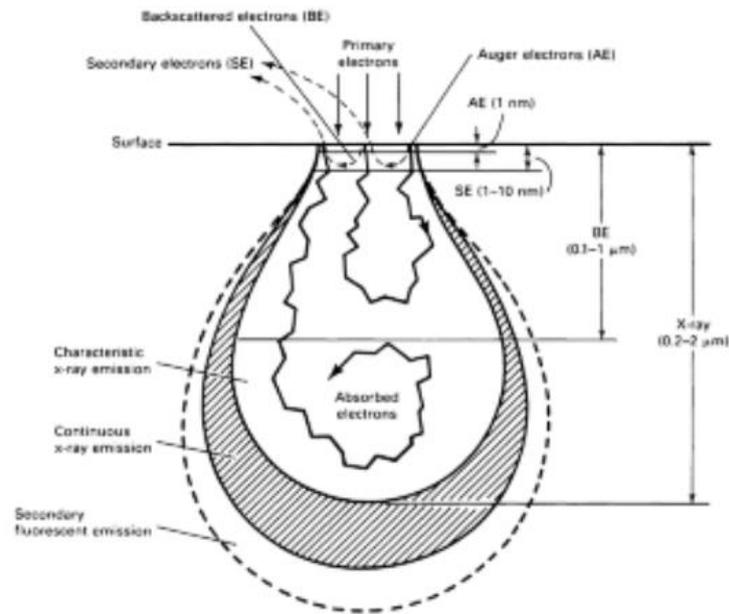


Fig. 2.5.8 – tipologie di elettroni emessi dal fascio di elettroni e radiazione utilizzata nel SEM.  
Fonte: [2.5.1] ASM HANBOOK – Volume 9 – Metallografia e microstrutture

## 2.2.2. Forme di contrasto

### 2.6.2.1. Contrasto topografico

Gli effetti di contrasto topografico più pronunciati risultano dalla dipendenza della resa degli elettroni secondari e del coefficiente di retrodiffusione dall'angolo tra l'elemento di superficie e il fascio di elettroni primari. Il contrasto risultante è analogo ad un'immagine ottica in cui la luce è generata dal rivelatore e la direzione di osservazione è quella del fascio di elettroni incidente. L'impressione stereoscopica è rafforzata dalle ombre nelle regioni nascoste al rivelatore.

### 2.6.2.2. Contrasto materico

Il contrasto materiale, o contrasto del numero atomico, influenza i risultati dell'interazione anelastica tra l'elettrone retrodiffuso e gli atomi nel campione.

Il contrasto del materiale è utile per l'identificazione qualitativa delle fasi ed è particolarmente adatto per la valutazione quantitativa della geometria microstrutturale mediante analisi delle immagini. Il contrasto del numero atomico è solitamente oscurato dal contrasto topologico e, per gli elettroni secondari, è sufficientemente forte solo in casi favorevoli, come superfici idealmente piatte.



Il contrasto topografico per gli elettroni retrodiffusi è molto meno pronunciato che per gli elettroni secondari e può essere significativamente ridotto utilizzando rilevatori a forma di anello, anche se la superficie è ruvida. Gli effetti dei bordi possono rimanere un problema e, idealmente, la lucidatura piatta è necessaria per i campioni metallografici in cui le fasi hanno una composizione chimica simile.

Una differenza nel numero atomico medio inferiore a 1 è sufficiente per un leggero contrasto materiale, almeno nell'intervallo inferiore di numeri atomici dove il contrasto è più pronunciato.

#### *2.6.2.3. Modelli di canalizzazione degli elettroni*

Gli elettroni primari penetrano nel reticolo cristallino ad una profondità che dipende dalla densità di impaccamento atomico lungo diverse direzioni cristallografiche. Se gli elettroni seguono i canali tra le file di atomi, la probabilità della loro fuga diminuisce. Molte condizioni di Bragg sono soddisfatte con piccole variazioni angolari. Facendo oscillare il fascio di elettroni primari attorno a un punto sul campione si creano linee di diffrazione da una piccola area ( $< 10 \mu\text{m}$ ). Questi modelli di canalizzazione elettronica dell'area selezionata sono come i modelli Kikuchi ottenuti utilizzando TEM.

Le informazioni sull'orientamento dei cristalli, sul confine dei grani, sui gemelli e su altre caratteristiche dei cristalli sono ottenute da uno strato superficiale di spessore inferiore a 50 nm.

#### *2.6.2.4. Contrasto dei bordi*

Ai bordi, la regione di fuga degli elettroni è deformata e più elettroni secondari ed elettroni retrodiffusi possono uscire dal campione sui bordi positivi attraverso l'area più alta della superficie troncata; sui fronti negativi, la resa elettronica viene ridotta dall'ulteriore assorbimento. Questo effetto offusca la forma esatta dei bordi e può essere attenuato riducendo l'energia degli elettroni primari. Tuttavia, il contrasto dei bordi a volte è vantaggioso. Possono essere rilevati bordi tra sfaccettature e fasi di identica luminosità e piccole particelle. I bordi del grano appaiono come linee scure dopo l'incisione. Il contrasto tra fasi di diversa durezza può essere ottenuto producendo vari gradi di microrugosità mediante lucidatura.

### **2.2.3. Risoluzione e miglioramento del contrasto**

Ogni elemento del SEM ha le proprie caratteristiche in termini di risoluzione e rumore, che determinano la qualità dell'immagine. L'operatore SEM deve conoscere i dettagli per ottimizzare la qualità dell'immagine per un campione specifico e per lo scopo dell'indagine.

Ad esempio, il rapporto segnale-rumore degli elettroni secondari aumenta insieme all'intensità del fascio di elettroni primari, quindi porta ad un aumento della resa degli elettroni e del tempo di scansione.



La corrente delle lenti del condensatore che controllano la dimensione dello spot, la tensione di accelerazione, la distanza di lavoro e il tempo di scansione possono essere impostati dall'operatore.

### **2.6.3.1. Imaging degli elettroni secondari**

La risoluzione della profondità delle immagini prodotte in modalità SE è dovuta al piccolo volume da cui vengono eccitati gli elettroni secondari. La risoluzione di un'immagine SE ottenuta da un microscopio a scansione dipende dall'ampiezza della distribuzione energetica degli elettroni primari che controllano l'aberrazione cromatica, l'aberrazione della lente, la precisione del sistema di scansione, l'efficienza dei rilevatori e la qualità degli amplificatori. Altri fattori come le vibrazioni del pavimento o del sistema di pompaggio possono deteriorare la qualità dell'immagine.

I fattori che devono essere ottimizzati dall'operatore includono l'intensità ( $I$ ) e la tensione di accelerazione (EHT) del raggio primario, la dimensione dell'apertura finale e la sua distanza dalla superficie del campione (WD), la velocità di scansione e l'inclinazione del campione superficie. Per un'ampia profondità di messa a fuoco, che di solito è richiesta per superfici fratturate a basso ingrandimento, vengono selezionate un'apertura piccola e un'ampia distanza di lavoro. Per un ingrandimento maggiore, è necessario utilizzare una distanza di lavoro breve e una corrente dell'obiettivo elevata per ridurre al minimo la dimensione dello spot.

Una piccola dimensione dello spot provoca l'emissione di una piccola corrente di elettroni dalla superficie del campione, che riduce il rapporto segnale-rumore.

La scelta ottimale della tensione di accelerazione del raggio primario dipende dal tipo di campione. A basse tensioni di accelerazione, il raggio diventa sensibile alla contaminazione e all'aberrazione del campo del vassoio. Tuttavia, l'energia degli abbaglianti è meno adatta per produrre contrasto topografico ad alta risoluzione.

Tipicamente, è necessario ridurre la tensione di accelerazione per osservare campioni non conduttivi o per migliorare la risoluzione topografica.

### **2.6.3.2. Imaging elettronico retrodiffuso**

La risoluzione della modalità retrodiffusa è molto inferiore alla risoluzione della modalità secondaria a causa della maggiore ampiezza e profondità di fuga degli elettroni. La profondità dell'informazione dipende fortemente dalla tensione di accelerazione e diminuisce con il numero atomico o la densità.

Immagini BE ad alta risoluzione possono essere ottenute riducendo la tensione di accelerazione; tuttavia, la profondità delle informazioni provenienti dalle superfici metalliche che utilizzano BE è



almeno un ordine di grandezza maggiore di quella dell'elettrone secondario a 5 KeV e l'energia di accelerazione deve essere ulteriormente ridotta. Ciò richiede rilevatori ad alta efficienza.

#### **2.2.4. Requisiti del campione**

Di solito non sono necessarie tecniche speciali per preparare il campione per il SEM. I campioni di frattura devono essere tagliati a una dimensione, senza contaminare la superficie, adatta alla camera dei campioni del microscopio.

Il campione può essere incollato su un moncone metallico che si inserisce nella camera del campione.

Di solito, è possibile posizionare più di un campione nella campanatura.

I campioni metallografici montati vengono utilizzati anche nel SEM, coloranti conduttivi appositamente preparati vengono utilizzati per "collegare" il campione metallico al portacampione metallico per mettere a terra elettricamente il campione. Se non viene effettuata la messa a terra elettrica, le cariche elettriche si accumuleranno sulla superficie del campione e causeranno problemi di imaging. Infatti su alcuni campioni, come l'oro, data la sua eccellente conduttività elettrica, viene depositato sulla superficie mediante sputtering per drenare gli elettroni in eccesso e migliorare l'immagine secondaria. Lo sputtering conduttivo è essenziale per la superficie non conduttiva.

Se è necessaria l'analisi EDS per analizzare qualitativamente la composizione delle inclusioni non metalliche, è importante non lucidare il campione con composti lucidanti di allumina o silice, poiché possono contaminare il campione. Un composto per lucidatura al diamante è solitamente più appropriato a meno che non si stiano analizzando i carburi.

#### **2.2.5. Analisi dell'EDS**

L'EDS (spettroscopia a raggi X a dispersione energetica), nota anche come analisi a raggi X a dispersione di energia, è una tecnica analitica utilizzata nei microscopi elettronici a scansione (SEM) per determinare la composizione chimica dei campioni. Questa tecnica è particolarmente utile per ottenere informazioni sulla distribuzione degli elementi all'interno di un campione e per identificare gli elementi presenti.

Quando gli elettroni del fascio di elettroni ad alta energia colpiscono il campione, possono rimuovere elettroni dalle orbite degli atomi del campione. Questa interazione crea posti vacanti nei gusci atomici. Gli elettroni mancanti nei gusci atomici vengono sostituiti da elettroni provenienti da gusci superiori. Quando ciò avviene, viene rilasciata energia sotto forma di raggi X caratteristici degli elementi coinvolti. Gli elettroni che cadono per riempire le orbite interne vacanti rilasciano raggi X con energie specifiche per ciascun elemento.



Gli spettri dei raggi X, costituiti da picchi di energia specifica, vengono rilevati da un rivelatore a dispersione di energia. Questo rivelatore misura l'energia dei raggi X emessi dal campione dopo l'interazione con il fascio di elettroni.

Ogni elemento ha uno spettro di raggi X unico con picchi di energia distinti (il proprio picco identificativo). I picchi di energia misurati nel rivelatore consentono l'identificazione degli elementi presenti nel campione.

I raggi X analizzati al SEM hanno solitamente energie comprese tra 0,1 e 20 KeV.

L'elettrone del fascio incidente lascia l'atomo avendo perso almeno  $E_K$ , dove  $E_K$  è l'energia di legame dell'elettrone al guscio K. Gli elettroni orbitali espulsi lasciano l'atomo con un'energia cinetica compresa tra pochi eV e diversi KeV, a seconda dell'interazione. L'atomo stesso viene lasciato in uno stato eccitato con un elettrone mancante nel guscio interno. L'atomo ritorna al suo stato fondamentale (energia più bassa) entro circa 1 ps attraverso un insieme limitato di transizioni consentite di elettroni del guscio esterno che riempiono il posto vacante del guscio interno. Le energie degli elettroni nei gusci (livelli di energia atomica) sono nettamente definite con valori caratteristici di un elemento specifico. La differenza di energia tra i gusci elettronici è un valore specifico o caratteristico per ciascun elemento.

L'energia in eccesso può essere rilasciata dall'atomo durante il rilassamento in due modi. Nel processo Auger, la differenza nelle energie degli orbitali può essere trasmessa a un altro elettrone dell'orbitale esterno, espellendolo dall'atomo come un elettrone con un'energia cinetica specifica. Nel caratteristico processo a raggi X, la differenza di energia è espressa come un fotone di radiazione elettromagnetica che ha un'energia nettamente definita.

Gli elettroni di un atomo occupano orbitali elettronici attorno all'atomo che hanno un'energia specifica. In ordine crescente di distanza dal nucleo atomico, questi orbitali sono designati con K, L, M ecc.

Le caratteristiche linee di raggi X risultano dalle transizioni tra di essi.

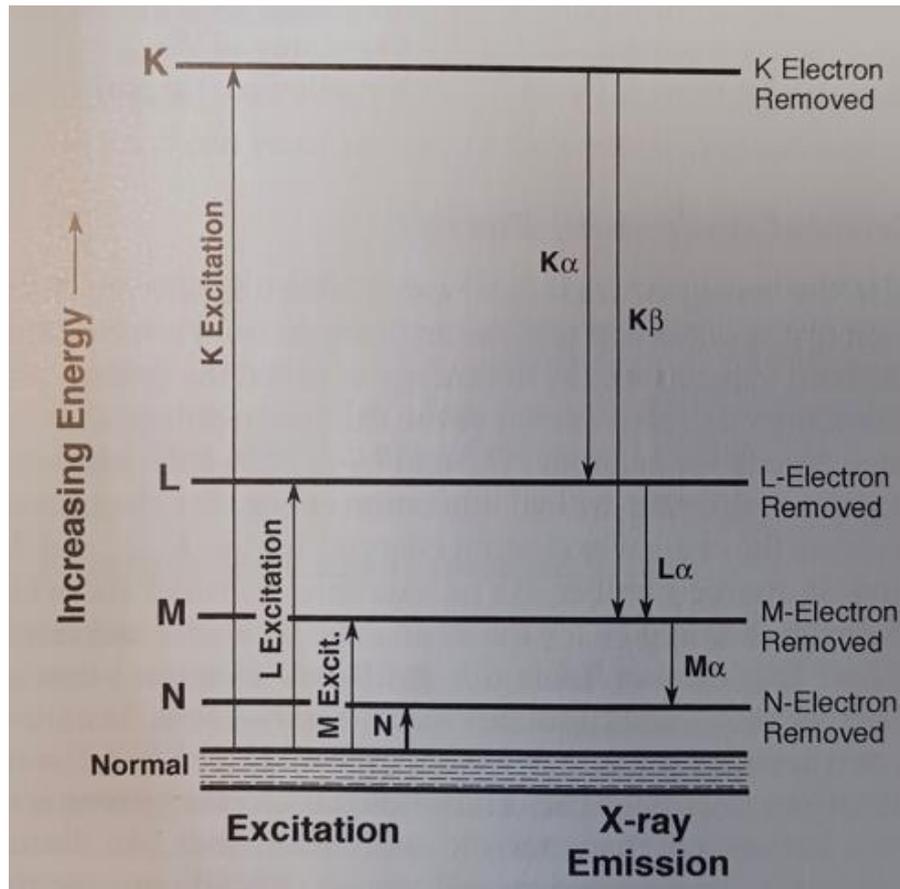


Fig. 2.5.9 – diagramma del livello energetico di un atomo. L'energia dell'atomo aumenta con la ionizzazione del guscio K, L, M o N (eccitazione). Fonte: [2.5.2] Microscopia elettronica a scansione e microanalisi a raggi X – Terza edizione – Joseph Goldstein. Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer e Joseph Michael.

Oltre a identificare gli elementi, l'EDS può essere utilizzato per mappare la distribuzione spaziale degli elementi all'interno del campione. Ciò fornisce informazioni sulla composizione chimica in diverse parti del campione. Inoltre, l'EDS può offrire informazioni quantitative sulla percentuale di ciascun elemento presente nel campione.

In sintesi, l'EDS in un microscopio elettronico a scansione consente l'identificazione degli elementi chimici presenti in un campione analizzando gli spettri di raggi X emessi durante l'interazione del fascio di elettroni con il campione. Questa tecnica è preziosa nella metallografia, nella frattografia e in altri tipi di analisi in cui è importante comprendere la composizione chimica dei campioni a livello microscopico.

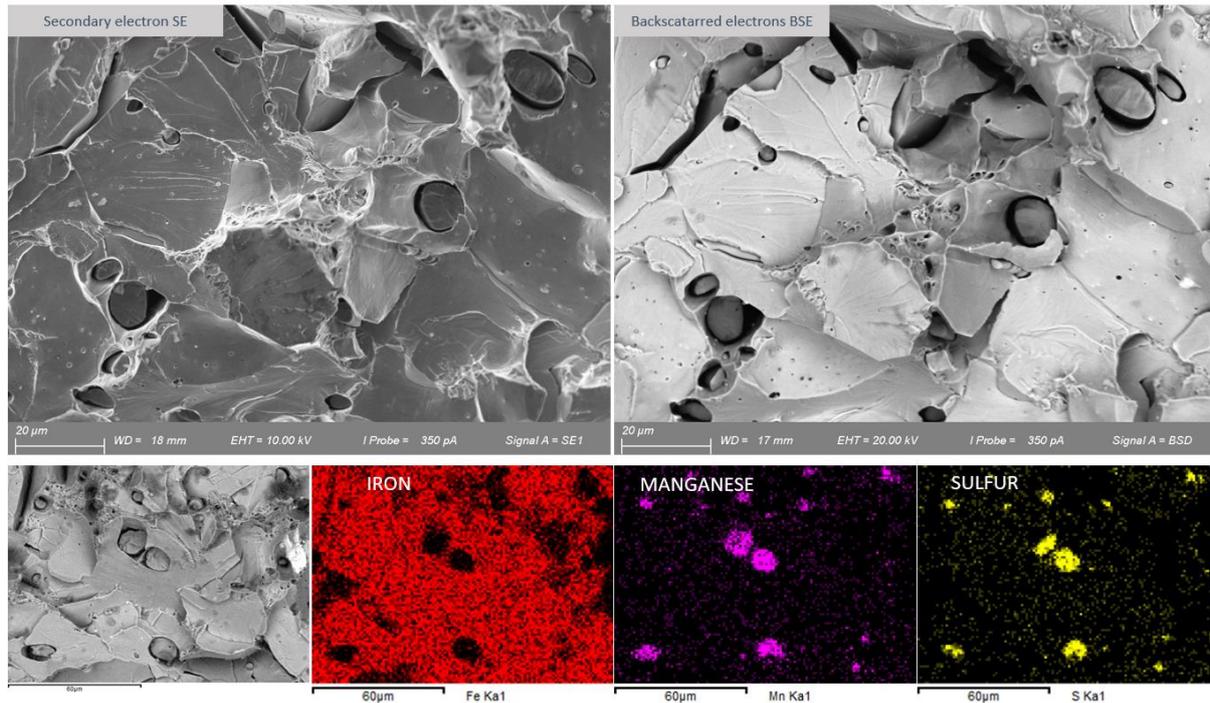


Fig. 2.5.9 – esempio di mappatura di elementi ottenuta tramite EDS. Fonte: Laboratorio IIS

## Riferimenti:

[2.5.1] *MANUALE ASM – Volume 9 – Metallografia e Microstrutture*

[2.5.2] *Microscopia elettronica a scansione e microanalisi a raggi X – Terza edizione – Joseph Goldstein. Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer e Joseph Michael.*

[2.5.3] *MANUALE ASM – Volume 11 – Analisi e prevenzione dei guasti*

## 2.7. Dimostrazione delle capacità del microscopio a scansione

### 2.2.1. Esame delle superfici di frattura

La microscopia elettronica a scansione trova nella frattografia uno dei suoi principali utilizzi. Le superfici delle fratture sono caratterizzate da una morfologia frastagliata e tipicamente dovrebbero essere osservate mediante elettroni secondari (SE) per ottenere informazioni sulla morfologia e sulla topografia.

Una frattura può essere duttile, fragile, intergranulare o propagata a causa di fenomeni di fatica meccanica. Le fratture duttili sono caratterizzate dalla lacerazione del metallo dopo la deformazione

plastica e l'accumulo di energia interna. Le fratture duttili da trazione nella maggior parte dei materiali hanno un aspetto fibroso e sono classificate su scala macroscopica come piane (perpendicolari alla massima sollecitazione di trazione) o di taglio (a circa 45° rispetto alla massima sollecitazione di trazione). Le fratture duttili avvengono per formazione di microvuoti e coalescenza, nella letteratura tecnica questi microvuoti vengono chiamati “dimples”.

L'esame SEM delle superfici di frattura duttile fornisce informazioni sul tipo di sollecitazione, sulla direzione di propagazione delle cricche e sulla duttilità relativa del materiale. La forma dei dimples è determinata dal tipo di carico subito dal componente durante la frattura. L'orientamento dei dimples rivela la direzione della propagazione della cricca. I microvuoti equiasiali sono a forma di coppa e si formano in condizioni di deformazione plastica uniforme nello stress uniaassiale (ad esempio, prova di trazione). In confronto, dimples allungati a forma di parabole risultano da condizioni di deformazione plastica non uniformi (ad esempio, flessione o sovraccarico di taglio).

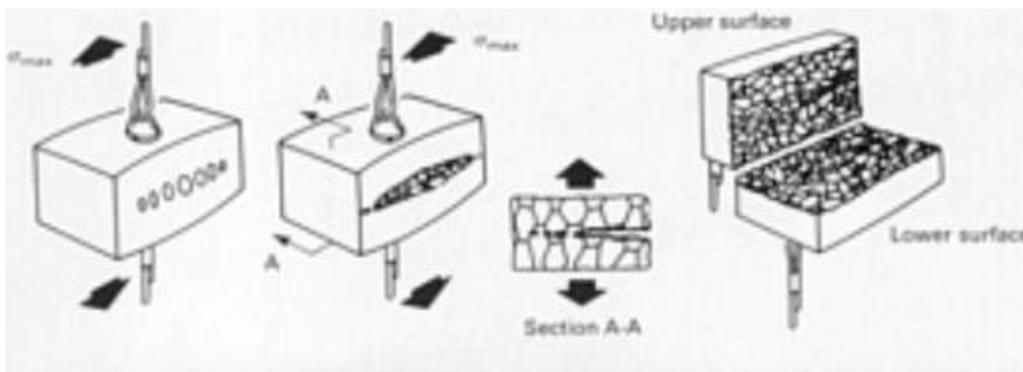


Fig. 2.6.1 – Meccanismo di frattura duttile. Formazione di fossette.

Fonte: [2.6.2] MANUALE ASM – Volume 12 – Frattografia

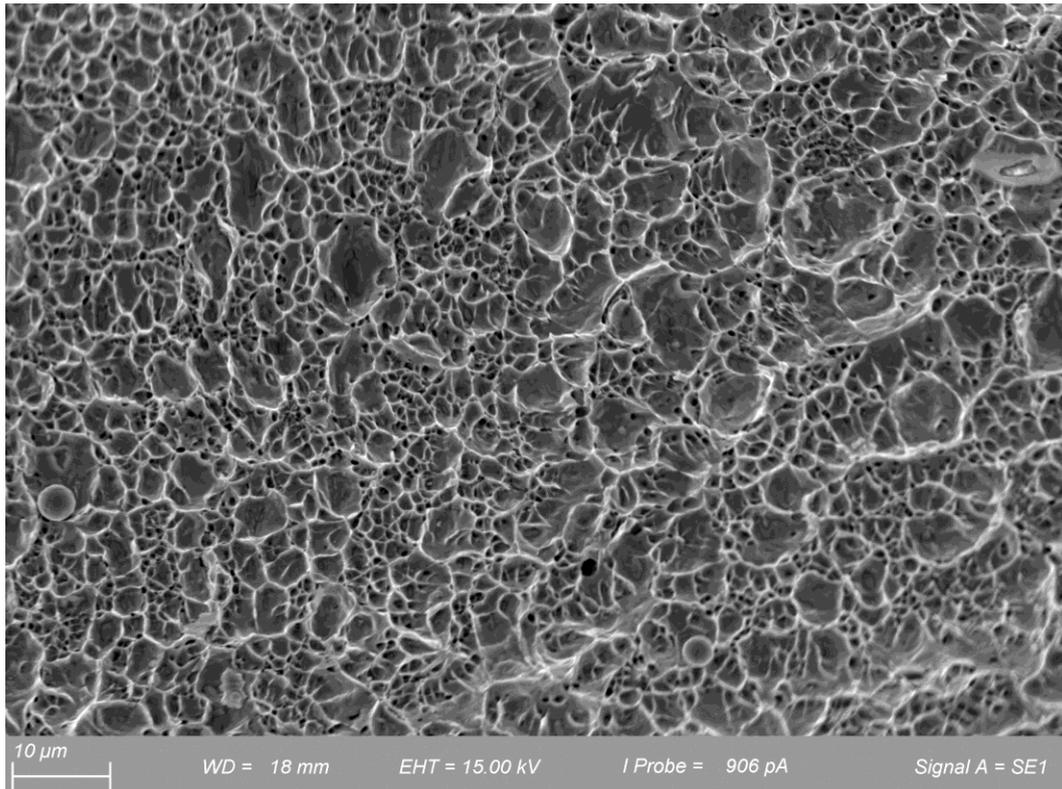


Fig. 2.6.2 – esempio di superficie di frattura duttile osservata al SEM (Elettroni secondari). Fonte: Laboratorio IIS.

Le fratture fragili sono caratterizzate da una rapida propagazione delle cricche con minor impiego di energia rispetto alle fratture duttili e senza deformazione plastica. Le fratture fragili hanno un aspetto brillante e granulare e potrebbero non presentare strizioni; tipicamente hanno un percorso pianeggiante e sono perpendicolari alla direzione della massima sollecitazione a trazione. Sulla superficie della frattura può essere presente un disegno a chevron, che punta verso l'origine della cricca, specialmente nelle fratture fragili di componenti piatti simili a piastre. Ad alto ingrandimento, l'osservazione della frattura fragile mediante SEM rivela superfici molto piatte note come piani di clivaggio.

La scissione è una frattura a bassa energia che si propaga lungo piani cristallografici a basso indice ben definiti noti come piani di scissione. Una frattura di scissione dovrebbe avere facce perfettamente lavorabili e dovrebbe essere completamente piatta e priva di caratteristiche. Tuttavia, le leghe metalliche sono policristalline e contengono bordi dei grani e altre imperfezioni che modificano l'orientamento del reticolo cristallino, come la possibile mancata corrispondenza dei piani a basso indice tra i grani. Queste leghe producono piani di clivaggio distinti.

I modelli fluviali rappresentano passaggi tra diverse sfaccettature di clivaggio locali ad altezze leggermente diverse ma lungo lo stesso piano di clivaggio generale. Poiché la struttura cristallografica

locale può modificare la direzione locale della propagazione della cricca, la direzione complessiva viene assegnata solo dopo aver confermato l'orientamento dei modelli fluviali in diverse aree sulla superficie di frattura.

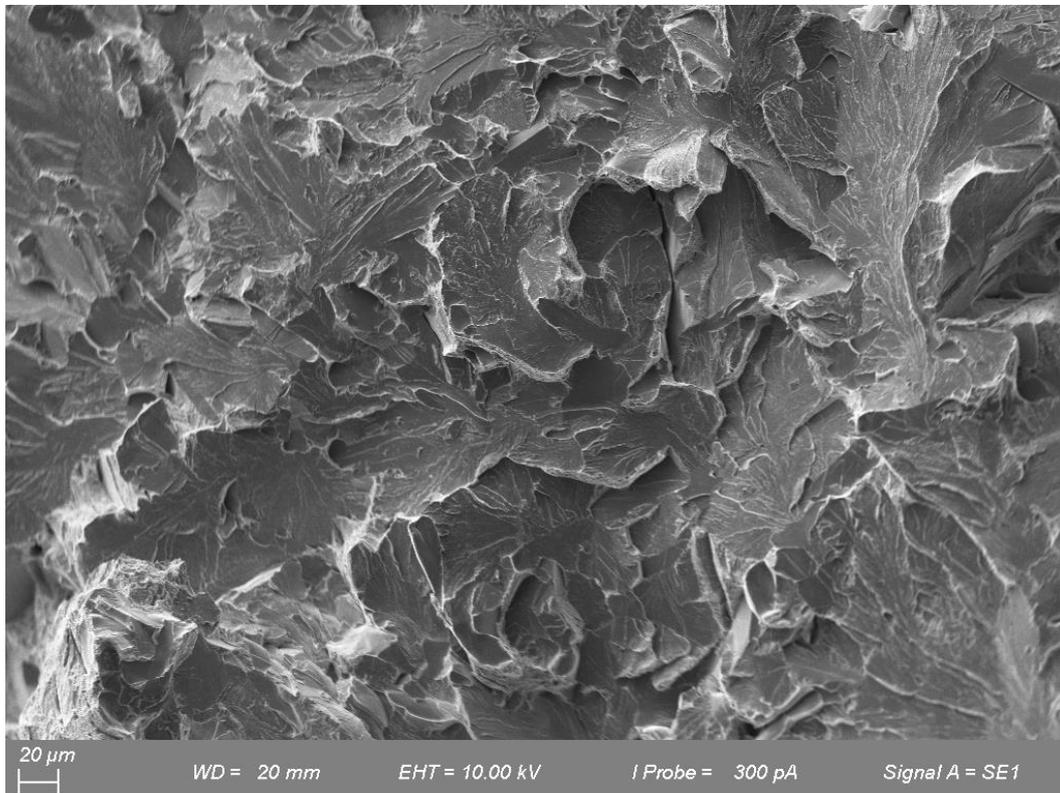


Fig. 2.6.3 – Esempio di superficie di frattura fragile osservata al SEM (Elettroni secondari). Fonte: Laboratorio IIS.

La frattura fragile intergranulare denominata decoesione del bordo grano è promossa dall'effetto sinergico delle condizioni ambientali e dello stress di trazione, oppure è il risultato della presenza dei costituenti con il punto di fusione più basso ai bordi del grano. È facile riconoscere la frattura intergranulare, ma più complessa è l'individuazione delle cause della frattura.

Il processo decoesivo che comporta l'indebolimento dei legami atomici, la riduzione dell'energia superficiale richiesta per la deformazione localizzata, la pressione molecolare del gas, l'esaurimento dei film protettivi e la dissoluzione anodica nei siti attivi è associato all'infragilimento da idrogeno e alla tensocorrosione (SCC).

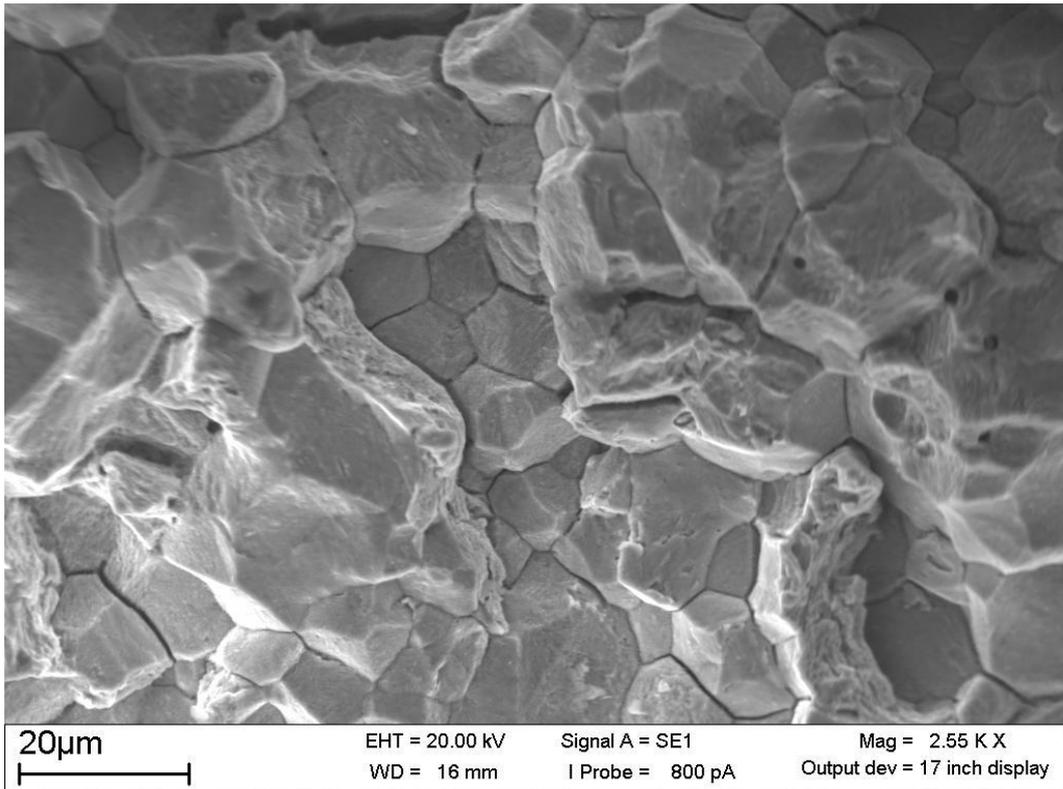


Fig. 2.6.4 – Esempio di superficie di frattura intergranulare osservata al SEM (Elettroni secondari). Fonte: Laboratorio IIS.

La fatica è un meccanismo dipendente dal tempo che può essere suddiviso in tre fasi che presentano caratteristiche diverse:

- Stadio I: inizio della cricca o nucleazione della cricca.
- Stadio II: propagazione delle cricche.
- Stadio III: frattura finale da sovraccarico.

Lo stadio I è un punto (o punti) che solitamente si trova in superficie, dove la deformazione ciclica è maggiore o dove i difetti del materiale o le tensioni residue riducono la resistenza alla fatica del componente. La fessura tipicamente inizia in una piccola zona e si propaga attraverso una frattura a linea di scorrimento, che si estende verso l'interno dalla superficie a 45° rispetto all'asse di sollecitazione.

La posizione dell'origine è definita interpretando le caratteristiche della zona di propagazione della cricca di stadio II. I segni macroscopici della spiaggia si irradiano dall'origine in semicerchi concentrici. Questi sono i segni di progressione comunemente associati alla fatica. Quando la zona di propagazione viene esaminata al SEM ad un ingrandimento maggiore (> 5000x), i segni della spiaggia possono essere risolti in centinaia o migliaia di striature di fatica.

Le striature sono tipicamente parallele tra loro e ad angolo retto rispetto alla direzione locale di propagazione della cricca. Variano nella spaziatura da striatura a striatura con l'intensità dello stress ciclico, sono in numero uguale al numero di cicli di carico. Inoltre, le striature di fatica non si incrociano tra loro, ma possono unirsi e formare una nuova zona di propagazione locale della cricca.

Se il componente è stato sottoposto a carichi applicati uniformemente di entità sufficiente, un singolo avanzamento del fronte della fessura (la distanza tra due striature adiacenti, è una misura della velocità di propagazione per ciclo di sollecitazione). Tuttavia, se il carico non è uniforme, ci sono ampie variazioni tra una data serie di cicli di sollecitazione e la spaziatura delle striature, sebbene un ciclo di sollecitazione non presenti striature.

Nonostante la presenza di striature che indicano la fatica come modalità di fallimento, la loro assenza non elimina la fatica come possibilità. Ad esempio, la striatura a fatica è ben definita nelle leghe di alluminio ma spesso è poco definita nelle leghe ferrose; inoltre, l'ossidazione, la corrosione o il danneggiamento meccanico possono eliminare le striature.



Fig. 2.6.5 – Esempio di albero in lega di nichel fratturato da fenomeni di fatica. Fonte: Laboratorio IIS.

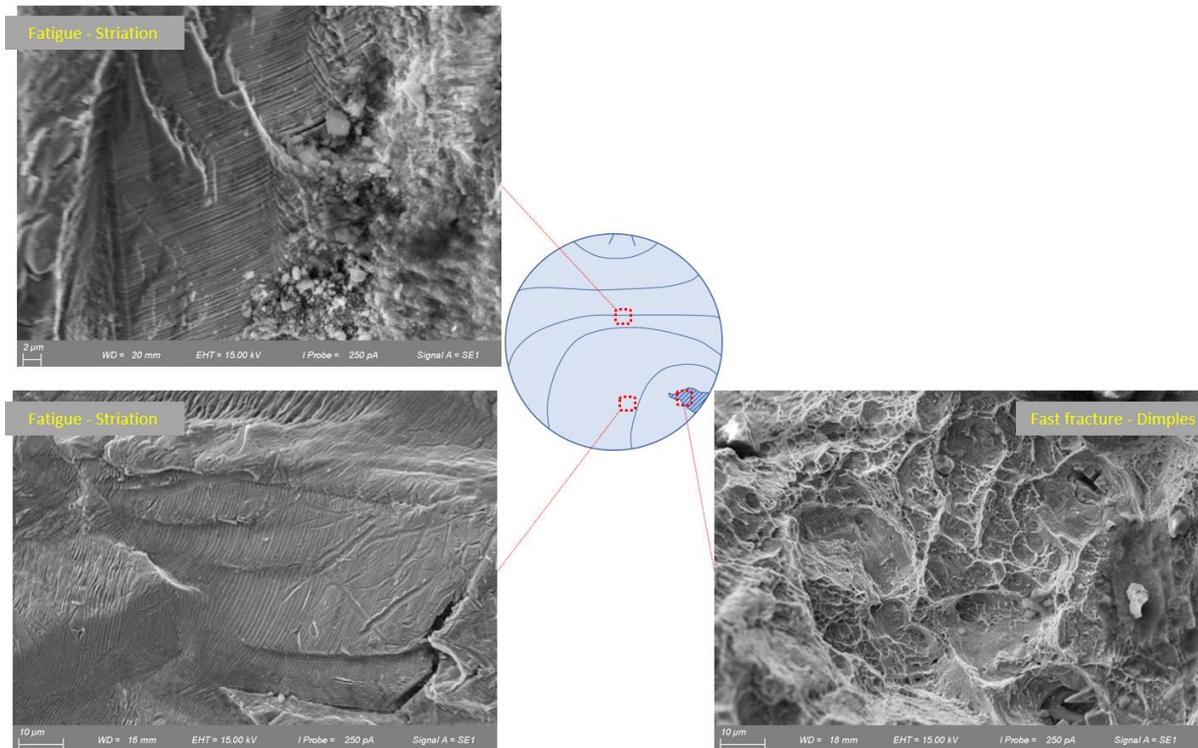


Fig. 2.6.6 – Particolare della superficie di frattura nella zona di propagazione con striature e frattura finale rapida con meccanismo duttile (fossette). Fonte: Laboratorio IIS.

### 2.2.2. SEM applicato all'analisi di rottura delle leghe metalliche e dei loro giunti di saldatura

Secondo il paragrafo precedente è facile comprendere perché il SEM sia così importante per lo studio dei meccanismi di danno. Oltre all'analisi della morfologia della frattura, consente di analizzare fasi, composti intermetallici, depositi/prodotti della corrosione e di eseguire analisi chimiche puntuali tramite sonda EDS. Di seguito sono riportati alcuni casi pratici.

#### **Esempio 1:**

Indagine su una cricca osservata nel metallo di saldatura di un giunto saldato dissimile tra acciaio al carbonio e acciaio inossidabile super-duplex eseguita adottando un metallo d'apporto in lega a base di Ni (Inconel 625) e un processo di saldatura SAW.

Le immagini BSE (Back Scattered Electron) hanno rivelato la presenza di una fase bianca lamellare (eutettica), localizzata in corrispondenza delle superfici e degli apici delle cricche (vedi foto 2.6.7).



La microanalisi qualitativa EDS ha dimostrato che questi composti sono costituiti da fasi intermetalliche ricche di Nb/Mo. Questi composti sono caratterizzati da un basso punto di fusione.

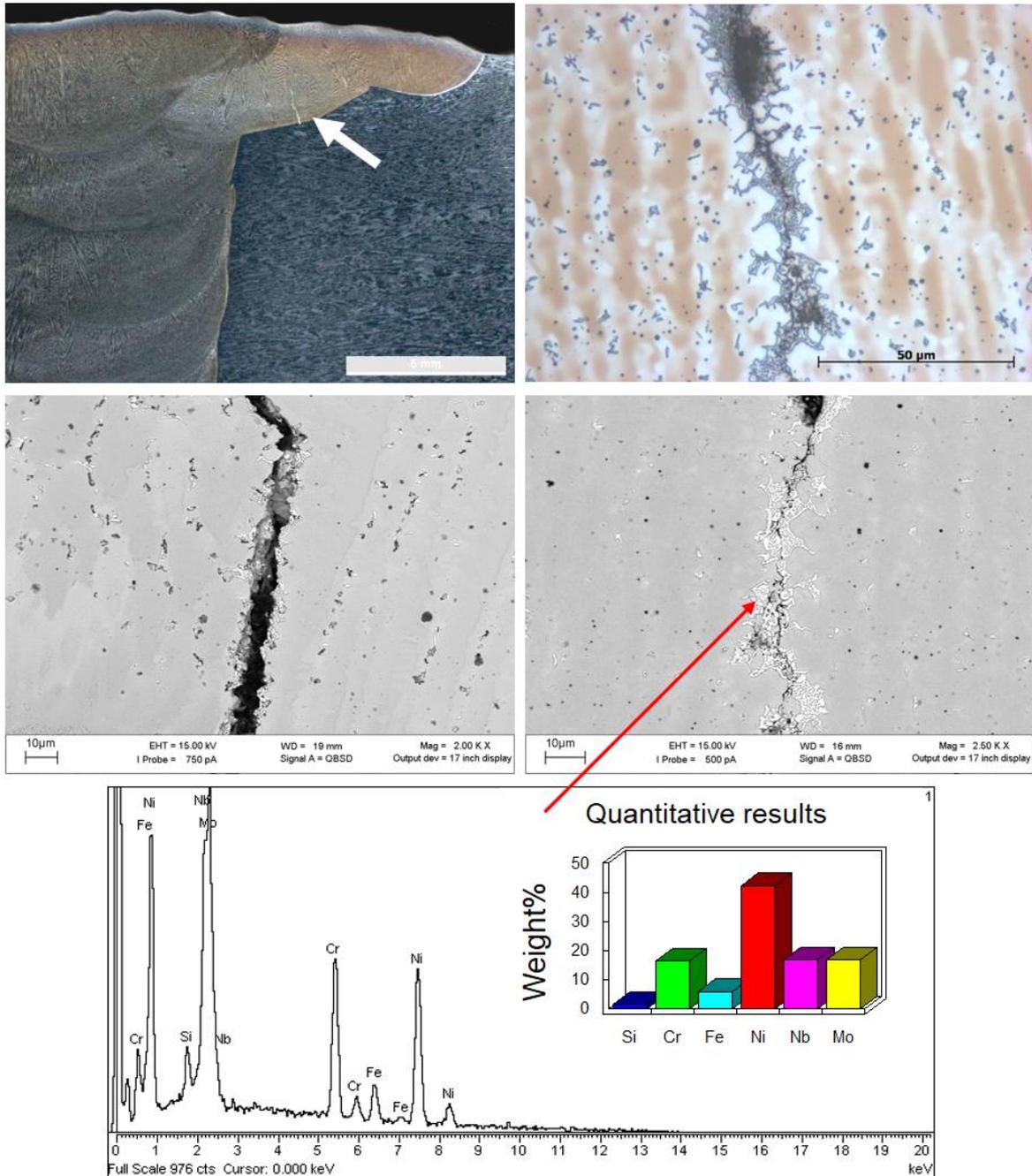


Fig. 2.6.7 – Cricca a caldo osservata nel metallo di saldatura di un giunto saldato dissimile tra acciaio al carbonio e acciaio inossidabile super-duplex eseguito adottando un metallo d'apporto in lega a base di Ni.

Fonte: Laboratorio IIS.

### Esempio 2:

Indagine su una cricca osservata in prossimità di un giunto di brasatura di un componente in lega di nichel tipo Incoloy 800. La lega di brasatura era una lega CuAgZn.

L'indagine al SEM eseguita su una sezione micrografica ha evidenziato la presenza di fessurazioni intergranulari. Le analisi EDS eseguite all'interno delle fessure hanno rivelato principalmente rame, argento e zinco, attribuibili alla lega di brasatura. Il meccanismo di guasto era dovuto all'infragilimento del metallo liquido (LME).

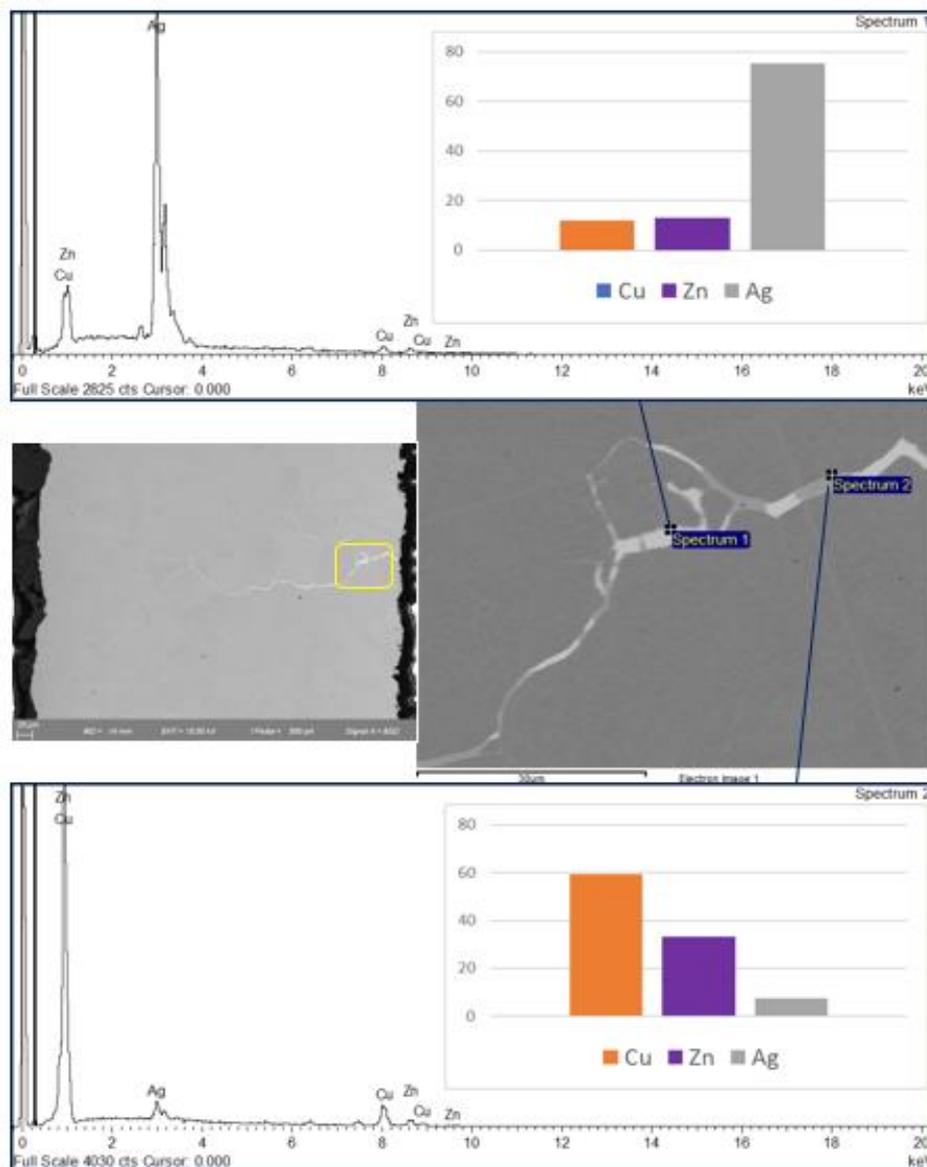


Fig. 2.6.8 – LME osservato in un componente brasato – Fonte: Laboratorio IIS.

### Esempio 3:

Indagine su una frattura avvenuta su un tubo scambiatore di calore in lega di acciaio inossidabile austenitico tipo AISI 316L.

L'esame micrografico aveva evidenziato una rete di fessurazioni transgranulari e ramificate su tutta la sezione indagata. Le analisi SEM ed EDS hanno rilevato cloro ed altri elementi riconducibili al materiale base. Il meccanismo di guasto era dovuto alla tensocorrosione da cloro (Cl-SCC).

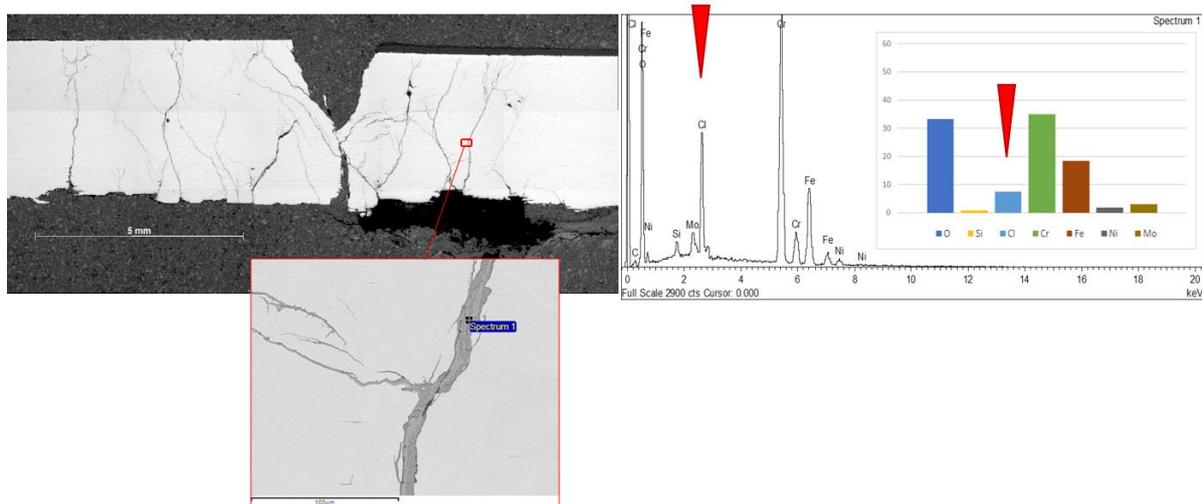


Fig. 2.6.9 – Corrosione selettiva di un acciaio inossidabile duplex in ambiente alcalino. Fonte: Laboratorio IIS.

### Esempio 4:

Indagine sui fenomeni di corrosione osservati su un giunto di saldatura Duplex in Acciaio Inossidabile. Sia l'esame micrografico che quello frattografico, effettuato al SEM, hanno evidenziato una corrosione selettiva delle fasi austenitiche nella zona duplex termicamente alterata. Questo fenomeno è tipico di un ambiente alcalino.

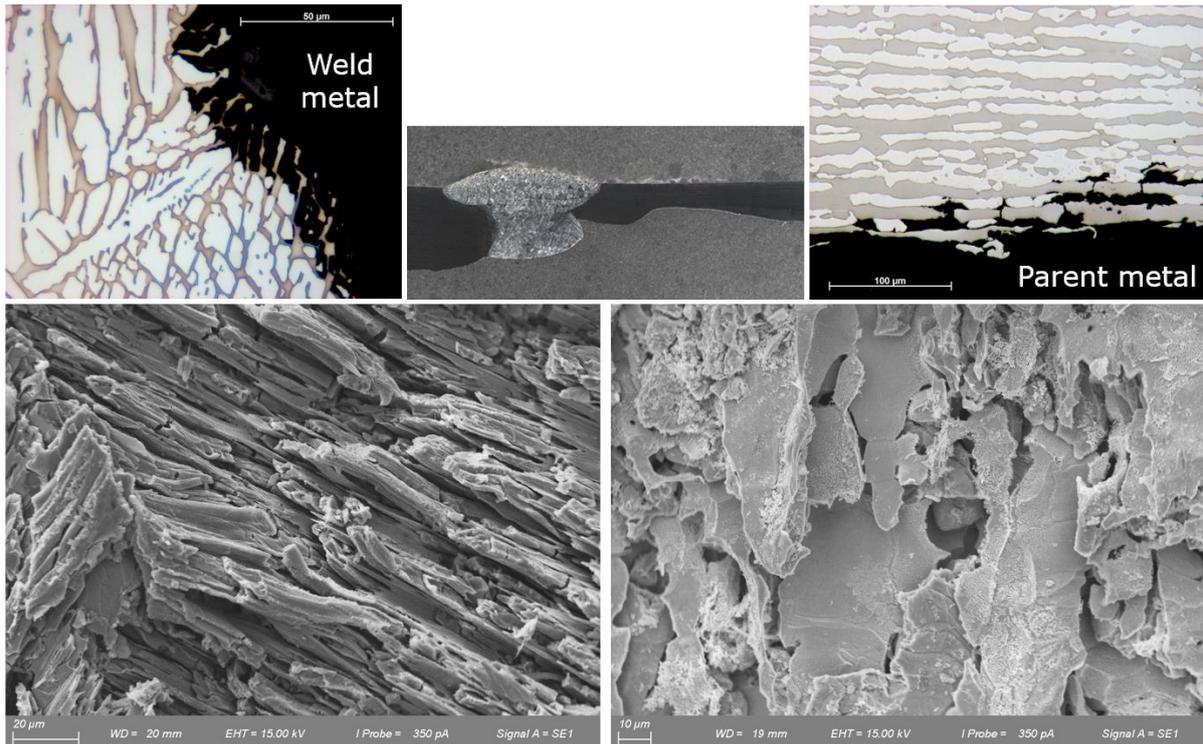


Fig. 2.6.10 – Corrosione selettiva di un acciaio inossidabile duplex in ambiente alcalino. Fonte: Laboratorio IIS.

### Esempio 5:

Indagine su un campione prelevato da un “Inlet cabinet” di una turbina, interessato da numerose fessurazioni.

L'involucro è stato realizzato in acciaio inossidabile austenitico tipo AISI 304 H.

La turbina è stata sottoposta a forti cicli termici, con numerosi avviamenti e spegnimenti.

La temperatura del flusso in ingresso era di circa 800 °C; all'interno veniva immesso vapore dai tubi posti nel cono centrale, con il duplice scopo di preriscaldare la carcassa prima dell'avviamento e di raffreddarla durante il funzionamento. La temperatura di servizio doveva essere inferiore a 732 °C il vapore viene iniettato con una portata di circa 45 Kg/ora, ma per alcuni periodi raggiunge circa 800 Kg/ora.

Gli esami micrografici hanno evidenziato fessurazioni con andamento ramificato ed intergranulare, caratterizzate dalla presenza di depositi al loro interno. Le analisi EDS dei depositi hanno evidenziato elementi riconducibili al materiale base e quantità variabili di zolfo.

Il fenomeno di corrosione verificatosi è imputabile a tensocorrosione causata da acidi politionici (Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking – PASCC). I solfuri possono reagire con l'umidità presente nel vapore e formare acidi politionici (H<sub>2</sub>SnO<sub>6</sub>). Il PASCC si verifica generalmente durante i periodi di arresto o durante il funzionamento se nel vapore è presente condensa. Il grano sensibilizzato

dell'acciaio inossidabile austenitico costituisce inoltre un punto debole preferenziale che favorisce lo sviluppo del fenomeno.

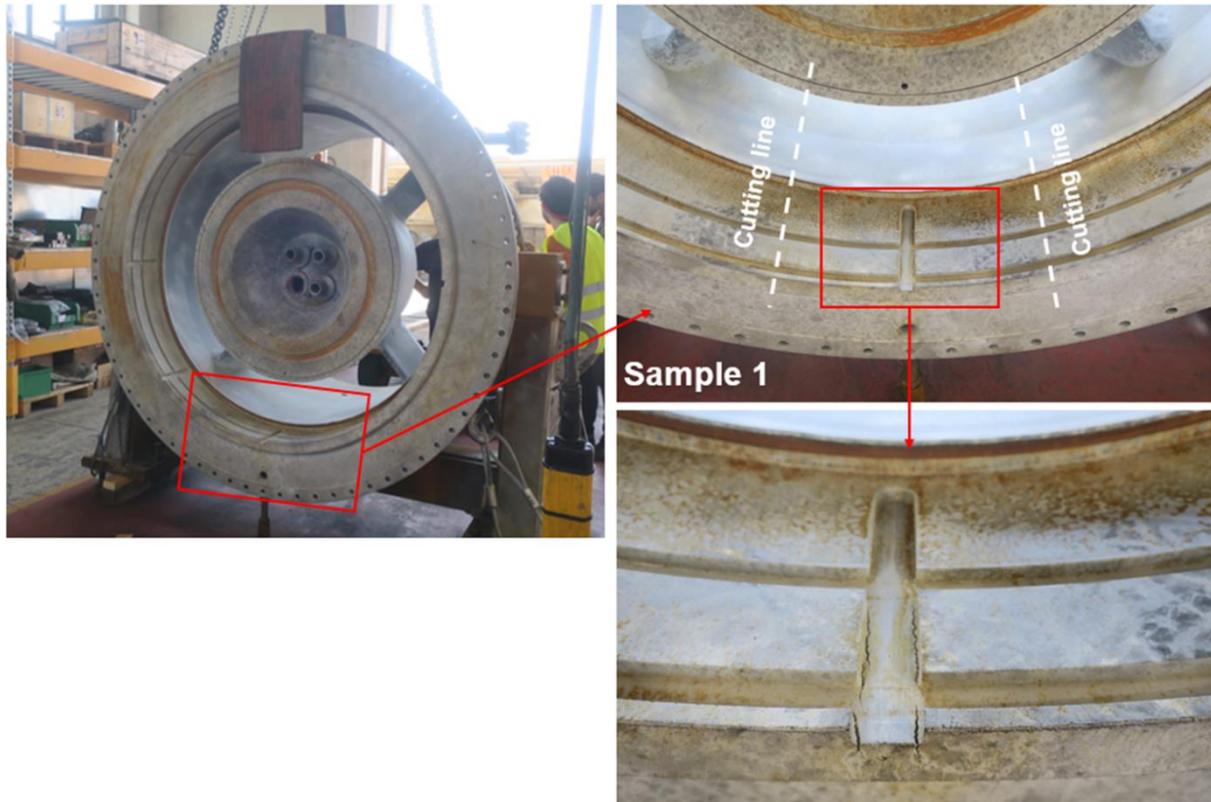


Fig. 2.6.11 – dettagli della cassa di aspirazione di una turbina realizzata in acciaio inossidabile austenitico tipo AISI 304H. Fonte: Laboratorio IIS.

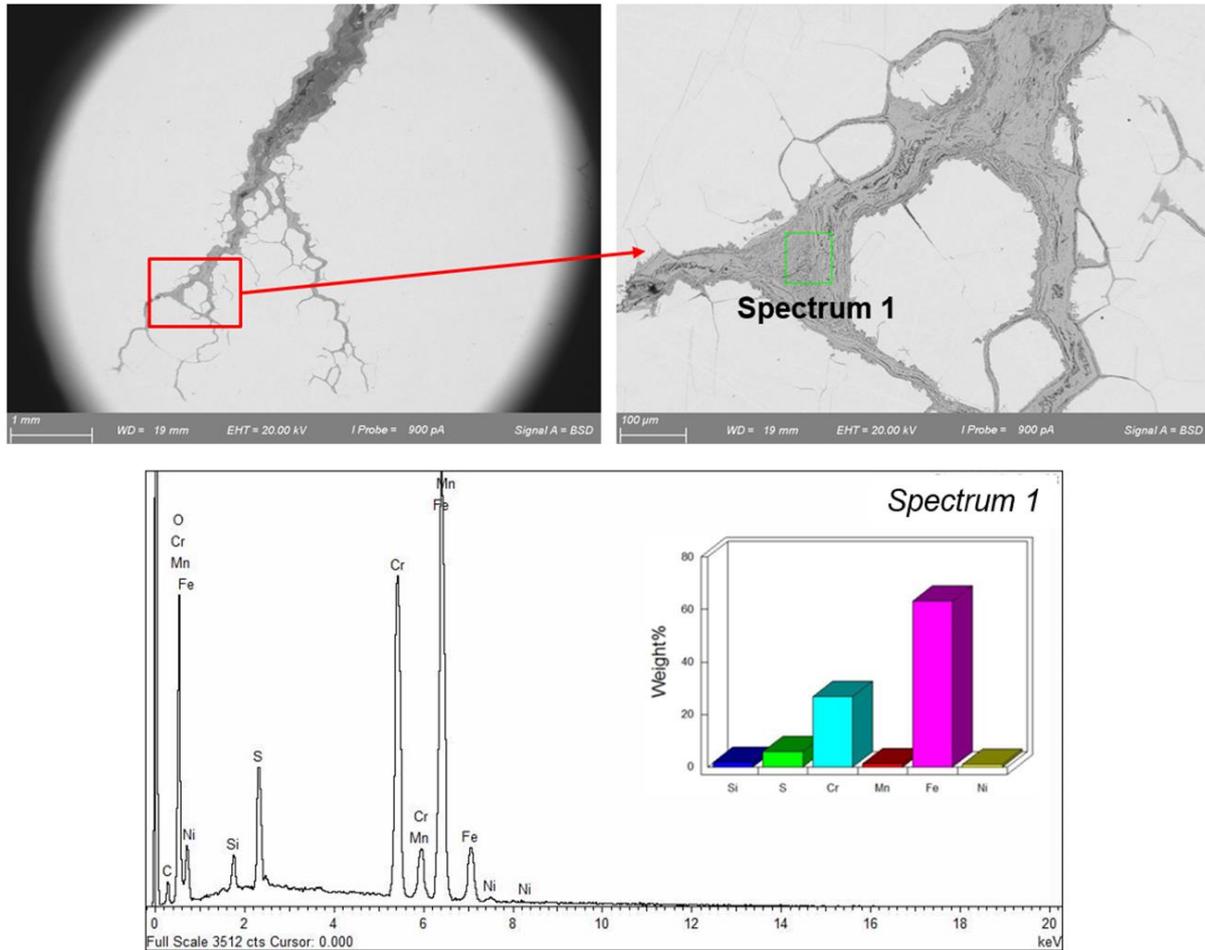


Fig. 2.6.12 – dettaglio della sezione micrografica prelevata dal tubo di ingresso in corrispondenza di alcune fessure osservate al Microscopio Elettronico a Scansione. L'analisi EDS evidenzia la presenza di elementi riconducibili a metalli vili e zolfo. Fonte: Laboratorio IIS.

## Riferimenti:

[2.6.1] MANUALE ASM – Volume 9 – Metallografia e Microstrutture

[2.6.2] MANUALE ASM – Volume 12 – Frattografia

[2.6.3] MANUALE ADM – Volume 11 – Analisi e prevenzione dei guasti

[2.6.4] Microscopia elettronica a scansione e microanalisi a raggi X – Terza edizione – Joseph Goldstein, Dale Newbury, David Joy, Charles Lyman, Patrick Echlin, Eric Lifshin, Linda Sawyer e Joseph Michael.



### 3. CU3: Dimostrazioni in esame macro e microscopico

#### 3.1. Dimostrazione di valutazione di campioni macroscopici di articolazioni 1

##### 3.2.1. Considerazioni generali

Preparazione dei campioni metallografici

##### 3.2.2. Analisi macroscopica su superfici non preparate

3.2.3. L'analisi macroscopica dei materiali metallici su superfici non preparate consente l'esame e la valutazione di queste caratteristiche strutturali

##### 3.2.4. Analisi macroscopiche su superfici preparate

Preparazione dei campioni metallografici

Preparazione dei campioni – Operazioni

Analisi macroscopica

Aspetti dei giunti saldati

Attrezzature, materiali e procedure di lavoro

##### 3.2.5. Esame macroscopico di materiali metallici su superfici preparate

##### 3.2.6. Domande

#### 3.1. Dimostrazione di valutazione di campioni macroscopici di articolazioni

##### 3.1.1. Considerazioni generali

La metallografia è una parte della metallurgia fisica che si occupa dello studio della macrostruttura e della microstruttura dei materiali metallici.

L'analisi macroscopica rappresenta un metodo rapido e semplice per la ricerca dei materiali. Si tratta dell'esame di ampie superfici, evidenziando difetti locali o generali, trascurando i dettagli. È il metodo più semplice e veloce per la ricerca dei metalli e delle leghe metalliche. Tipicamente precede qualsiasi analisi strutturale e consiste nell'osservazione visiva ad occhio nudo o con un ingrandimento massimo di 50:1 dei campioni in esame.

Attraverso l'analisi macroscopica si possono evidenziare aspetti legati alla solidificazione dei materiali metallici (dendriti, cavità da ritiro, cricche, ecc.), alla loro frattura, alle disomogeneità meccaniche e strutturali e alla struttura dei giunti saldati. Viene eseguita direttamente sull'aspetto esterno del campione (materiale) senza alcuna preparazione preventiva o su superfici risultanti da fratture (involucri), siano esse non preparate o preparate mediante molatura e attacco chimico. Indipendentemente dal tipo di analisi macroscopica, la sua esecuzione prevede una serie di operazioni: selezione del luogo di campionamento e ottenimento del campione, sezionamento, macinazione e, se necessario, attacco chimico.



## Preparazione dei campioni metallografici

La preparazione dei campioni metallografici si compone di tre fasi:

1. **Campionamento**(*estrazione dei campioni*)- Il luogo del campionamento deve essere scelto in modo che il campione sia rappresentativo del materiale in esame. Poiché non esiste una regola generale per la scelta di questa ubicazione, essa dipenderà dalla natura, forma e dimensione del campione, nonché dai trattamenti meccanici o termici a cui è stato sottoposto il materiale. Le istruzioni su come prelevare e preparare i campioni metallografici sono fornite nella norma ISO/TR 20580:2022 "Preparazione dei campioni metallografici".
2. **Preparazione della superficie d'esame**- La superficie preparata dei campioni deve essere piana e priva di segni di impatto, graffi o corpi estranei introdotti durante il processo di preparazione. Le tre fasi di preparazione della superficie sono:
  - livellamento - ottenuto mediante molatura o lucidatura. Se il campione è stato tagliato utilizzando macchine utensili o una sega a mano, questo passaggio potrebbe non essere necessario. È necessario prestare attenzione per evitare il surriscaldamento e la deformazione della superficie.
  - molatura - effettuata utilizzando materiali abrasivi (carte abrasive) con granulometrie abrasive sempre più fini. La macinazione dei campioni può essere eseguita manualmente o automaticamente.
  - lucidatura - ha lo scopo di rimuovere gli ultimi graffi molto fini e creare una perfetta lucentezza sulla superficie preparata. Questa operazione può essere eseguita mediante rettificatrici meccaniche oppure attraverso un processo elettrolitico.
3. **Acquaforte metallografica**- A seconda del materiale del campione, viene utilizzata un'ampia varietà di agenti di attacco metallografici. Quando questi incontrano la superficie lucida del campione, dissolvono o colorano diversamente i costituenti strutturali, rivelandone la struttura. L'incisione può essere effettuata immergendo il pezzo nel mordenzante oppure tamponando con un batuffolo di cotone imbevuto di mordenzante. Normalmente il campione si considera inciso quando ha perso la sua lucentezza metallica. Dopo aver rivelato la struttura mediante incisione, i campioni vengono lavati con acqua, poi con alcool e asciugati mediante tamponamento delicato su carta da filtro o in un flusso di aria calda.

### 3.1.2. Analisi macroscopica su superfici non preparate

Si riferisce all'esame e all'analisi dei materiali a livello macroscopico senza alcuna preparazione preliminare della superficie. In questo approccio, la superficie del materiale viene osservata e valutata nel suo stato naturale o come trovata, senza alcuna lucidatura, molatura o attacco chimico.

L'analisi macroscopica su superfici non preparate può fornire preziose informazioni sulle condizioni generali, sui difetti e sulle caratteristiche di un materiale. Consente una rapida

valutazione delle proprietà e delle caratteristiche dei materiali senza la necessità di un'approfondita preparazione del campione.

Questo metodo è particolarmente utile quando è necessaria una valutazione rapida, oppure quando si vuole studiare le caratteristiche esterne ed i difetti del materiale senza alterarne lo stato naturale. Tuttavia, potrebbe presentare limitazioni nel rivelare dettagli strutturali fini rispetto alle tecniche di microscopia più avanzate che implicano la preparazione del campione.

In sintesi, l'analisi macroscopica su superfici non preparate è uno strumento prezioso nell'analisi dei materiali, offrendo un modo semplice per valutare le condizioni e le caratteristiche dei materiali senza la necessità di un'approfondita preparazione del campione.



Figura 3.1.1. Campione di acciaio ricotto. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

Gli acciai carburati e bonificati presentano una struttura a grana più fine all'esterno rispetto alla zona centrale della sezione, e la tonalità del grigio varia dall'esterno verso l'interno (Figura 2).

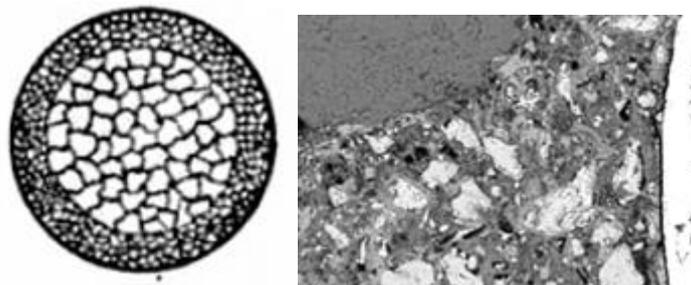


Figura 3.1.2. Campione di acciaio carburato. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

Il colore delle parti che si sono fratturate durante l'uso può potenzialmente indicare la causa della frattura. Se in una zona il colore risulta più scuro rispetto al resto della superficie, suggerisce la presenza di una fessura preesistente prima della frattura definitiva.

La formazione e l'aspetto di una superficie fessurata forniscono informazioni sulle cause della frattura e sul tipo di stress che l'ha provocata. Una superficie di frattura a forma di cono e coppa in prossimità della strizione indica cricche duttili, mentre una superficie di frattura senza deformazioni di strizione suggerisce cricche fragili. Le propagazioni della fatica sono riconosciute dal loro aspetto specifico sulla superficie della frattura (Figura 3). Sotto l'influenza di sollecitazioni dinamiche variabili, si formano piccole crepe che si propagano dall'esterno verso l'interno, raramente nella direzione opposta, riducendo la sezione trasversale portante

e portando infine a un improvviso cedimento del materiale. La zona in cui si propaga gradualmente la cricca ha un aspetto liscio e lucido (a causa dell'attrito delle superfici a contatto), mentre la zona di frattura finale appare granulosa. Le prime crepe possono avere origine da imperfezioni superficiali (graffi, solchi, brusche transizioni di sezione, ecc.), che agiscono come concentratori di tensioni.



Figura 3.1.3. Superficie di frattura per fatica. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

Fratturando un lingotto metallico intergranulare, la superficie risultante può rivelare le tre zone formatesi durante la cristallizzazione primaria.

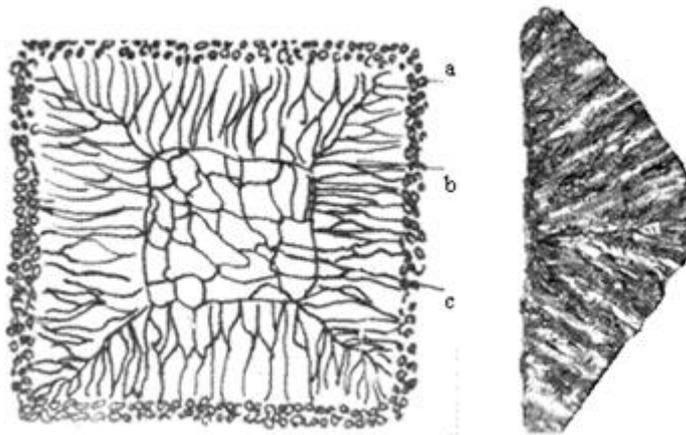


Figura 3.1.4. Zone formate durante la cristallizzazione primaria:

- a) Zona di grani fini equiassici; b) Zona di grani colonnari;
- c) Zona di grani grossi equiassici. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

La zona 1 è costituita da grani piccoli, sferici ed equiassici. In questa zona, la velocità di raffreddamento è molto elevata a causa del contatto tra il liquido (fuso) e la parete fredda dello stampo, determinando una rapida velocità di cristallizzazione e un'elevata capacità di cristallizzazione. Inoltre, le particelle di rugosità e impurità sulle pareti dello stampo agiscono come nuclei di cristallizzazione estranei, portando ad una struttura a grana fine.

La zona 2 è la regione dei grani colonnari (la zona della transcristallizzazione). La formazione di grani allungati lungo il gradiente di temperatura è causata dall'elevata velocità di

raffreddamento, con conseguente elevata velocità di cristallizzazione lineare. Tuttavia, la capacità di cristallizzazione è inferiore in questa zona a causa dell'assenza di nuclei di cristallizzazione estranei.

La zona 3 è costituita da grani grossolani, sferici ed equiassici non orientati. Questa zona si trova al centro del lingotto, dove la velocità di raffreddamento è molto bassa a causa dello strato esterno solidificato, con conseguente basso grado di sottoraffreddamento e, di conseguenza, capacità e velocità di cristallizzazione basse e uniformi.

Un materiale metallico con una struttura così disomogenea può essere utilizzato solo dopo aver subito un processo di trattamento termico per ricottura e omogeneizzazione della struttura.

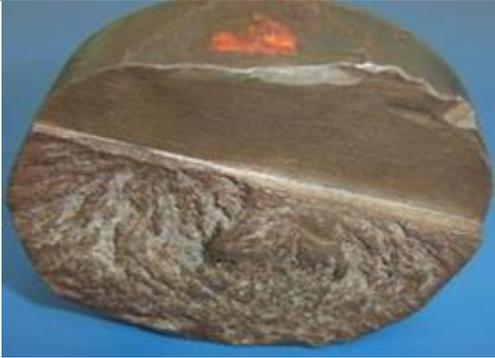
3.1.3. L'analisi macroscopica dei materiali metallici su superfici non preparate consente l'esame e la valutazione di queste caratteristiche strutturali

NO.	<i>Campione studiato</i>	<i>Osservazioni</i>
1		<p><b>Ghisa bianca allo stato grezzo</b></p> <p>Il campione proviene da un blocco di rifusione; materiale metallico fragile.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Frattura bianco-argento con grani colonnari grossolani (aspetto scistoso).</li> <li>- I pori (soffiature esterne) sono visibili sulla superficie esterna e all'interno della frattura si possono vedere soffiature interne.</li> </ul>
2		<p><b>Ghisa grigia grezza</b></p> <p>Il campione proviene da un blocco di rifusione.</p> <p>La frattura è di colore grigio e al suo interno si può osservare:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grani fini equiassici (globulari) di dimensioni non uniformi.</li> <li>- Vuoti ellissoidali causati dai gas intrappolati nel metallo fuso durante la solidificazione (soffiature interne).</li> </ul>



		<ul style="list-style-type: none"><li>- Una disomogeneità chimica di colore nero derivante dalla segregazione del carbonio di grafite (segregazione zonale).</li><li>- I pori sono visibili sulla superficie esterna.</li></ul>
3		<p><b>Ghisa chiazzata</b></p> <p>Il campione proviene da un blocco di rifusione.</p> <p>È un tipo di ghisa che passa dalla ghisa bianca alla ghisa grigia, come conferma la sua frattura:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Esternamente presenta il colore e la struttura macroscopica tipici della ghisa bianca, mentre verso la base corrisponde alla ghisa grigia (tra queste due zone tipiche vi è una miscela di grani di ghisa bianca colonnare con grani di ghisa grigia equiassici cereali).</li><li>- Sono visibili soffiature (pori) interni ed esterni, nonché una chiusura fredda di forma sferica.</li></ul>
4		<p><b>Ghisa grigia meccanica</b></p> <p>Il campione proviene da un componente prodotto per fusione di ghisa grigia fusa secondaria.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Il colore della frattura è grigio, ed i grani sono equiassici, molto fini ed uniformi.</li><li>- Non ci sono soffiature interne o esterne (pori).</li></ul>
5		<p><b>Acciaio fuso</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Il campione proviene da una barra fusa.</li><li>- La superficie esterna è irregolare.</li><li>- La frattura ha un colore bianco-argenteo.</li><li>- I chicchi sono grandi e di forma globosa.</li></ul>



6		<p><b>Acciaio laminato a caldo</b></p> <p>Il campione proviene da un profilo rotondo che è stato laminato a caldo e dentellato per facilitarne la frattura.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- La superficie esterna è liscia.</li><li>- La frattura ha colore bianco-argenteo e presenta grani globosi fini e lucenti.</li><li>- All'interno della fessura si possono osservare anche le direzioni di deformazione plastica del materiale, che si è fratturato per flessione, disposti radialmente sotto forma di ammassi di materiale metallico.</li></ul>
7		<p><b>Acciaio con difetto</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Il campione presenta crepe (superfici di frattura).</li><li>- Le fessurazioni possono derivare sia da una vigorosa tempra (frattura grigia con grani molto fini, impercettibili ad occhio nudo, vellutati) sia da un prolungato surriscaldamento (combustione - ossidazione intergranulare), seguito da deformazione plastica.</li></ul>
8		<p><b>Campione da un blocco di zinco</b></p> <p>Frattura bianco-argentata, lucida con grana grossolana.</p>



9		<p><b>Campione con usura meccanica</b></p> <p>Il campione proviene da un ugello di sabbia- tura utilizzato in un impianto di pulizia per pezzi fusi.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- All'interno del pezzo è presente un'irregolarità nella sua forma circolare dovuta all'usura.</li></ul>
10		<p><b>Campione con usura meccanica</b></p> <p>Il campione proviene da un cuscinetto sco- rrevole, nello specifico un semicuscinetto.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Si osserva esfoliazione della lega an- tiattrito.</li></ul>

### 3.1.4. Analisi macroscopiche su superfici preparate

Lo scopo di questa analisi è quello di determinare le disomogeneità chimiche e strutturali dei materiali metallici.

#### **Preparazione dei campioni metallografici**

Il campione deve essere prelevato da una zona del materiale che consenta la massima acquisizione di informazioni sul materiale, sui suoi processi produttivi e sugli eventuali trattamenti a cui è stato sottoposto. Questa operazione viene effettuata mediante rottura, taglio (segatura manuale o meccanica, ecc.) o fratturazione (se il materiale è fragile).

L'analisi dei materiali metallici al microscopio viene condotta su piccoli campioni, che vengono preventivamente preparati per differenziare i costituenti metallografici.

I materiali metallici sono corpi solidi, cristallini, opachi, che necessitano di essere esaminati al microscopio ottico secondo il principio della riflessione della luce. Per consentire ai raggi luminosi di essere riflessi in modo differenziale dai vari costituenti metallografici, è necessario preparare la superficie di studio del campione. La preparazione dei campioni per l'esame con un microscopio metallografico ottico prevede le seguenti operazioni: estrazione del campione, preparazione della superficie di lavoro e attacco chimico.

I campioni metallografici sono pezzi relativamente piccoli con superfici che vanno da (0,5...30) x (30...0,5) mm<sup>2</sup>, appositamente preparato dai materiali metallici da studiare al microscopio ottico.

#### **Preparazione dei campioni – Operazioni**



In laboratorio verranno prelevati campioni da vari materiali utilizzando un disco abrasivo molto sottile. Una superficie campione verrà preparata mediante livellatura, molatura, lucidatura, attacco chimico e infine verrà esaminata ad occhio nudo o al microscopio metallografico con la struttura da disegnare.

Per l'analisi macroscopica è necessario eseguire una serie di operazioni: scelta del luogo di campionamento e prelievo del campione, livellamento, molatura, lucidatura e, se necessario, attacco chimico.

1. *Raccolta campioni:* Per ottenere informazioni più accurate sul materiale in esame, il campione raccolto deve essere rappresentativo e idoneo allo scopo previsto. La scelta del luogo di campionamento dovrebbe essere fatta in modo che il campione includa la struttura caratteristica del materiale metallico, nonché eventuali effetti di precedenti lavorazioni meccaniche, termiche, termochimiche, difetti esistenti, ecc. I campioni metallografici non devono essere troppo grandi, a seconda dei semilavorati o delle parti oggetto di studio, i campioni possono avere dimensioni diverse. I campioni prelevati da lamine sottili, fili, piccole parti come leghe mediche o campioni che necessitano di essere studiati sui bordi devono essere fissati in un supporto o incorporati in resina sintetica o materiale facilmente fusibile. L'estrazione del campione da materiali metallici può essere effettuata mediante taglio manuale o meccanico utilizzando una sega o un disco abrasivo. Possono essere utilizzate anche macchine come fresatrici, torni o altre attrezzature, garantendo che la struttura iniziale del campione non venga alterata a causa del riscaldamento o della deformazione. Sono pertanto da evitare il taglio ossiacetilenico alla fiamma, il taglio elettrico, che producono un riscaldamento eccessivo, oppure la cesoiatura e la cesellatura che provocano deformazioni. Quando non esiste altra soluzione, la parte alterata del materiale dovuta al processo di estrazione deve essere rimossa mediante fresatura, tornitura, molatura, ecc. I materiali duri devono essere tagliati con dischi abrasivi sottili con abbondante raffreddamento, mentre per materiali fragili i campioni devono essere fratturati.
2. *Scivolare:* i campioni metallografici lavorati sono sottoposti a livellamento della superficie di studio, che viene eseguito utilizzando una smerigliatrice, un tornio o una fresatrice, assicurando che i campioni non si surriscaldino, soprattutto quelli che sono stati temprati o trattati termicamente.
3. *Rettifica* viene effettuata su carta metallografica, sulla quale sono fissati su un lato, in ordine decrescente, grani abrasivi di varie dimensioni. Questa può essere effettuata manualmente attraverso un movimento lineare avanti e indietro (con la carta fissata su una lastra di vetro) oppure automaticamente su macchine molatrici dotate di uno o due dischi rotanti ad una velocità di 10-15 m/s, a cui il è allegata carta metallografica. Se la superficie del campione è stata rifinita mediante un'operazione di lavorazione



meccanica, la macinazione deve iniziare con abrasivo a grana media (25 centesimi di mm) o n. 60 (la dimensione lineare delle maglie del vaglio attraverso il quale è stato setacciato l'abrasivo), seguito da grana fine (16, 12, 10), grana molto fine (8, 6, 4), ed infine carte contenenti micropolveri extrafini (M40, M28...M7). Il passaggio da una carta con una certa grana ad un'altra con grana più fine dovrebbe avvenire quando i graffi della precedente molatura saranno scomparsi, assicurando che il campione venga ruotato di 90 gradi rispetto alla posizione precedente. I campioni di dimensioni normali possono essere tenuti direttamente in mano, mentre quelli più piccoli possono essere montati o inglobati in resine sintetiche o materiali più morbidi. Durante la molatura è opportuno esercitare una leggera pressione sulla carta abrasiva per evitare surriscaldamenti superiori a 50-60°C ed ossidazione della superficie.

4. *Lucidatura* della superficie di studio del campione viene eseguita per rimuovere i graffi finali della molatura e ottenere una superficie liscia e con una perfetta lucentezza. Si effettua su lucidatrice, dove si utilizza un disco rotante con velocità maggiore rispetto alla molatura (15-20 m/s) e un panno di lana (feltro) inumidito continuamente con una soluzione di sospensione abrasiva 1:20 (ossido di alluminio, ossido di magnesio, ecc.) è attaccato. Per la lucidatura, il campione viene tenuto con la mano e premuto delicatamente sul panno fino alla scomparsa di tutti i graffi (max. 5 minuti). Durante la lucidatura il campione viene ruotato lentamente per evitare la lacerazione delle inclusioni e la formazione di nuovi graffi. L'allungamento del tempo di lucidatura provoca il sollevamento della struttura a causa dell'usura dei costituenti strutturali morbidi. Dopo la lucidatura, il campione viene risciacquato con un getto d'acqua per eliminare eventuali tracce di abrasivo, poi con alcool, e talvolta viene effettuata una neutralizzazione delle tracce acide utilizzando una soluzione basica (carbonato di sodio). Il campione viene essiccato con un flusso di aria calda o mediante tamponamento delicato con carta da filtro. Il campione, così preparato, può essere sottoposto ad esame microscopico per individuare inclusioni non metalliche (scorie, ossidi, solfuri, grafite, ecc.), eventuali difetti (microfessurazioni, microreticolazioni, ecc.), oppure può essere inciso chimicamente per differenziare i costituenti strutturali.
5. *Incisione chimica*: I reagenti chimici non reagiscono in modo uniforme con tutti i costituenti strutturali del materiale metallico sottoposto ad attacco. Alcuni costituenti (soprattutto quelli eterogenei) sono corrosivi (disciolti) o colorati, mentre altri rimangono lucidi. Se la superficie lucidata contiene lo stesso tipo di costituenti metallografici, il reagente chimico corroderà solo i confini tra i grani dello stesso tipo perché ai bordi dei grani sono presenti zone eterogenee (con impurità, inclusioni, strati amorfi, ecc.) che non sono resistenti all'azione chimica dei reagenti. I prodotti chimici comunemente utilizzati sono acidi o soluzioni di acidi in acqua o alcool (vedi tabella) e l'incisione può essere eseguita a temperatura ambiente o con riscaldamento. Dopo l'attacco chimico,



i campioni metallografici vengono risciacquati con un getto d'acqua, poi con alcool (per rimuovere eventuali residui di acidi o grassi dalla superficie di studio). A volte viene applicata la neutralizzazione delle tracce acide con una soluzione basica (carbonato di sodio). Il campione viene essiccato con un flusso di aria calda o mediante tamponamento delicato con carta da filtro. Al microscopio i confini tra i grani corrosi e quelli colorati verso tonalità più scure appaiono scuri perché i raggi di soglia vengono assorbiti dalle superfici nere. I raggi luminosi possono essere deviati anche altrove (secondo le leggi della riflessione) rispetto al sistema ottico del microscopio, come si vede in Figura 5 (con illuminazione verticale - campo chiaro). I componenti non incisi (lucidi) (a) riflettono i raggi luminosi nell'oculare del microscopio e appaiono di colore bianco. I costituenti corrosi (b) o i confini tra i grani possono avere una superficie lucida, nel qual caso i raggi vengono riflessi lateralmente (l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione), oppure possono avere una superficie opaca quando i raggi vengono assorbiti totalmente o parzialmente. In entrambi i casi, i componenti appaiono scuri al microscopio. I componenti colorati (c), che assorbono i raggi luminosi, si osservano al microscopio come scuri con vari gradi di oscurità.

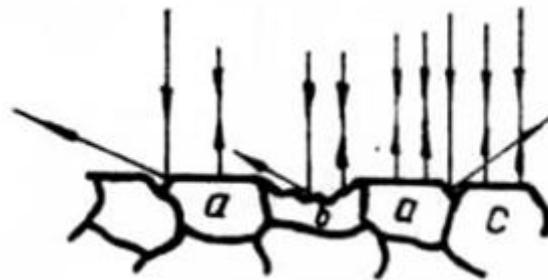


Figura 3.1.5. Evidenziazione dei costituenti al microscopio ottico.

Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

L'attacco viene eseguito immergendo il campione nel reagente oppure bagnando la superficie con un batuffolo di cotone imbevuto del reagente chimico fino a quando la superficie lucida del campione diventa leggermente opaca. L'azione del reagente viene interrotta risciacquando il campione con un getto d'acqua e successivamente con alcool. I campioni vengono asciugati utilizzando un flusso di aria calda o premendo delicatamente una carta da filtro sulla superficie lavata. L'incisione può essere eseguita a temperatura ambiente o a temperature elevate (fino a 400°C).

I reagenti metallografici vengono selezionati in base alla natura del materiale metallico in esame e agli aspetti specifici oggetto di studio:

- Per gli acciai comuni e le ghise si utilizza il Nital (2-5% HNO<sub>3</sub> in alcool etilico). Per gli acciai legati inossidabili si utilizza acqua regia (20-30 ml HCl, 10 ml HNO<sub>3</sub>, 30-70 ml glicerolo).
- Le leghe mediche nobili, seminobili e non nobili a base di Cr-Ni o Cr-Mo utilizzano il reagente Aqua Regia (20-30 ml HCl + 10 ml HNO<sub>3</sub> + 30-70 ml glicerolo). Un altro



reagente per questi tipi di materiali è composto da 3 parti di HCl e 1 parte di HNO<sub>3</sub>, oppure si può utilizzare il reagente di Groesbeck (4 g di permanganato di potassio + 4 g di NaOH + 100 ml di acqua). Questi reagenti possono essere utilizzati anche per gli acciai inossidabili e refrattari.

- Le leghe mediche a base di rame utilizzano reagenti come 50 ml di biossido di ammonio (NH<sub>4</sub>BiO<sub>3</sub>) + 20-50 ml (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) + 50 ml di acqua (H<sub>2</sub>O), oppure 30-50 ml (HNO<sub>3</sub>) + 70-50 ml di acqua (H<sub>2</sub>O) , oppure 5 g di persolfato di ammonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) + 90 ml di acqua (H<sub>2</sub>O).
- Per evidenziare la struttura del platino si utilizzano 100 ml HCl + 10 ml HNO<sub>3</sub> + 50 ml acqua (H<sub>2</sub>O). Per le strutture in argento, viene utilizzata una soluzione di 50 ml di cianuro di potassio (KCN) con una concentrazione del 5% + 50 ml di persolfato di ammonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) con una concentrazione del 5%. Per le strutture in titanio si utilizzano 25 ml HNO<sub>3</sub> + 25 ml HF + 50 ml glicerolo (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>).

### Analisi macroscopica

A seguito della deformazione plastica del materiale metallico, la struttura dei grani viene riorganizzata in base alla direzione della deformazione (flusso dei grani). Nel processo di deformazione plastica a freddo ( $T_{\text{deformazione}} < T_{\text{recristallizzazione}}$ ) con elevati gradi di deformazione (trafilatura, laminazione, ecc.), i grani del materiale metallico si allungano nella direzione di massima deformazione. La sezione longitudinale ottenuta (trattata con reagente chimico) è caratterizzata da grani allungati ottenuti per deformazione plastica a freddo (Figura 6).

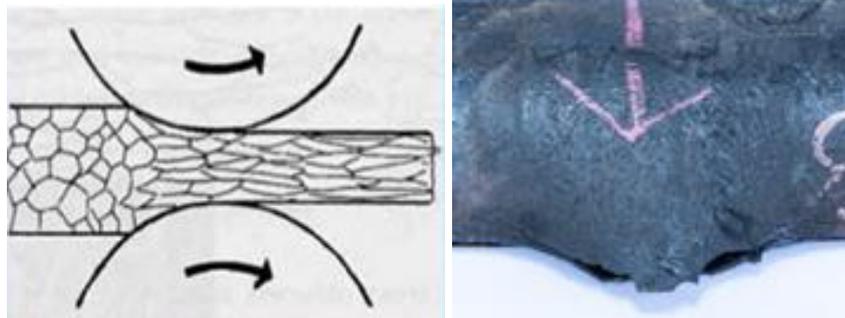


Figura 3.1.6. La struttura del grano ottenuta per deformazione plastica a freddo.

Fonte: <https://learnmech.com/hot-rolling-vs-cold-rolling-difference-between-hot-rolling-and-cold-rolling/>

In seguito alla deformazione plastica a caldo ( $T_{\text{deformazione}} > T_{\text{recristallizzazione}}$ ) il flusso dei grani che appare nelle sezioni longitudinali non è più caratterizzato dalla forma allungata dei grani. Questo perché la ricristallizzazione avviene a causa della temperatura della deformazione plastica che supera la temperatura di ricristallizzazione, facendo sì che i grani diventino equiassici. In questo caso lo scorrimento del grano è evidenziato dalla distribuzione delle inclusioni a strati. Si può osservare nella Figura 7 che il flusso della venatura segue il

contorno del pezzo. In assenza di inclusioni non metalliche, il materiale metallico deformato a caldo non presenta un aspetto fibroso.

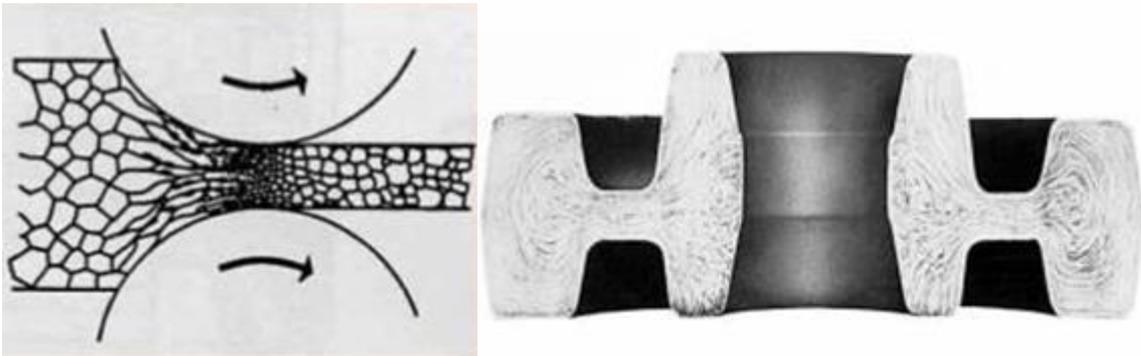


Figura 3.1.7. La struttura del grano ottenuta a seguito della deformazione plastica a caldo.

Fonte: <https://learnmech.com/hot-rolling-vs-cold-rolling-difference-between-hot-rolling-and-cold-rolling/>

### Aspetti dei giunti saldati

È inoltre possibile evidenziare diversi aspetti dei giunti saldati, come la forma del cordone di saldatura (a X, V, U, ecc.), i diversi strati di saldatura, la zona termicamente alterata (HAZ) - che appare di colore più scuro, e la zona del metallo saldato (WMZ). Inoltre, l'esame in sezione trasversale dei giunti saldati può rivelare zone caratteristiche (Figura 8) dopo la molatura e l'attacco chimico: la zona del metallo di base (BMZ), la zona alterata dal calore (HAZ), che è di colore più scuro, e la zona di saldatura zona metallica (WMZ). Altre caratteristiche che possono essere osservate includono la forma della sezione trasversale della saldatura (forma a V, a X, a U, ecc.), strati di saldatura distinti, la zona di ricristallizzazione (cristalli colonnari) e difetti (pori, segregazioni, mancate fusioni, fessurazioni, ecc.).

La zona del metallo base si trova sufficientemente lontano dall'operazione di saldatura per evitare cambiamenti fisico-chimici significativi.

La zona alterata dal calore rappresenta un'area in cui gli effetti termici durante un processo di saldatura hanno indotto cambiamenti strutturali e di proprietà nel metallo di base.

Il cordone di saldatura è la zona fusa e solidificata dove il massimo effetto termico ha consentito temporaneamente la fusione dei bordi del materiale di base, eventualmente con la partecipazione del materiale d'apporto o del solo materiale d'apporto stesso.

Le diverse zone presenti nella sezione del cordone di saldatura vengono evidenziate attraverso un'adeguata preparazione e attacco chimico (per gli acciai si utilizza ad esempio il reagente Adler).

Pertanto, l'esame macroscopico della sezione trasversale dei giunti saldati rivela le seguenti zone:



- zona dei metalli di base (BMZ)
- zona termicamente alterata (ZTA)
- zona del metallo saldato (WMZ)

La zona del metallo base, essendo sufficientemente distante, non subisce significative variazioni fisico-chimiche dovute all'operazione di saldatura. Tuttavia, la zona influenzata dal calore rappresenta un'area in cui si sono verificati cambiamenti strutturali e di proprietà nel metallo di base a causa della temperatura elevata durante il processo di saldatura. Il cordone di saldatura (cordone di saldatura) è la zona fusa e solidificata dove il massimo effetto termico ha portato alla temporanea fusione dei bordi dei pezzi da saldare, con o senza la partecipazione di materiale d'apporto. Il profilo e le dimensioni di queste zone possono variare per lo stesso materiale metallico, a seconda del tipo di saldatura e degli eventuali trattamenti termici applicati prima, dopo o durante la saldatura.

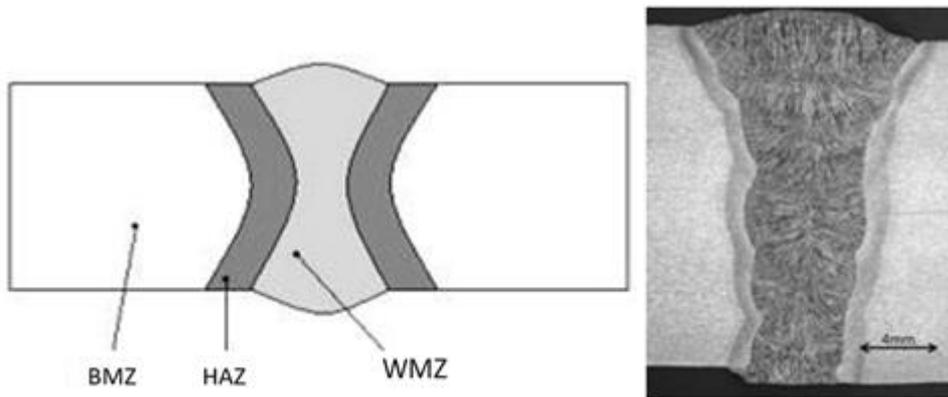


Figura 3.1.8. Zone del giunto di saldatura nella classica saldatura ad arco elettrico con materiale d'apporto. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2021/05/Laborator SM 2020.pdf>

Disomogeneità chimiche derivanti da colate, deformazioni plastiche o trattamenti termochimici possono essere evidenziate anche attraverso l'esame macroscopico. Ad esempio, la struttura dendritica può essere enfatizzata mediante opportuni attacchi chimici (reagente Oberhoffer per gli acciai e reagente Keller per le leghe di alluminio). La Figura 9 mostra la struttura dendritica primaria di una lega Al-Si (AlSi12), dove è evidente la disomogeneità chimica derivante dalla fusione.

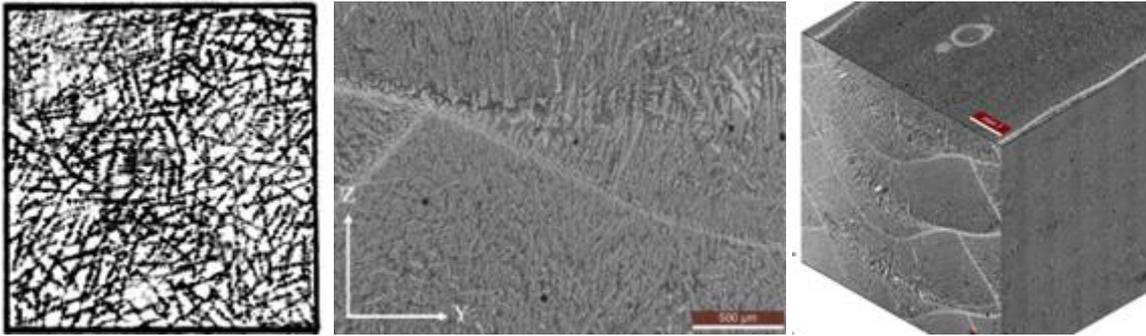


Figura 3.1.9. Struttura dendritica primaria di una lega Al-Si. Fonte: <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2015/03/MF1-Laboratoare.pdf>

Inoltre, attraverso l'attacco chimico di una superficie in sezione trasversale di un pezzo trattato termicamente mediante cementazione, si può osservare lo strato esterno arricchito in carbonio (di colore più scuro), consentendo la valutazione macroscopica della profondità di diffusione del carbonio nello strato superficiale del pezzo. il pezzo.

Durante l'esame macroscopico di superfici preparate e incise chimicamente di materiali metallici, possono essere rilevati alcuni difetti, come inclusioni di scorie, sovrapposizioni di materiale, pori, soffiature, crepe, ecc.

### **Attrezzature, materiali e procedure di lavoro**

L'analisi macroscopica prevede l'esame visivo di superfici fratturate o preparate, o superfici incise chimicamente di campioni costituiti da vari materiali metallici (ghise, acciai, leghe non ferrose). Si consiglia l'uso di lenti di ingrandimento (Figura 10) per evidenziare alcuni aspetti macrostrutturali difficilmente osservabili ad occhio nudo. I campioni metallografici verranno analizzati con particolare attenzione alla loro forma, al colore e al tipo di frattura, alle disomogeneità strutturali, ai difetti derivanti da sollecitazioni di lavorazione o ai materiali e così via, oppure alla sezione saldata.



Figura 3.1.10. Lenti d'ingrandimento per esame macroscopico.

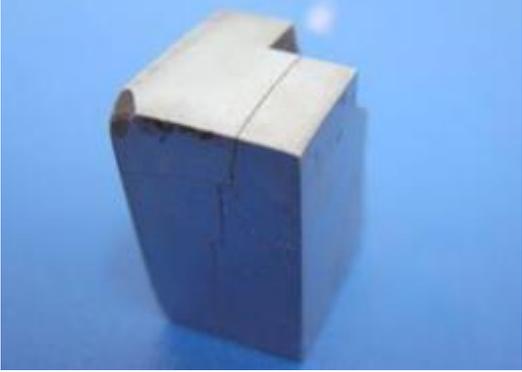
Fonte: [https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2021/05/Laborator\\_SM\\_2020.pdf](https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2021/05/Laborator_SM_2020.pdf)

Inoltre, verranno analizzate le superfici di frattura di campioni realizzati con vari materiali metallici per determinare il tipo di frattura e il comportamento del materiale sotto deformazione plastica. Sulla base dell'analisi condotta si trarranno conclusioni riguardo se il materiale esaminato presenta un comportamento duttile o fragile e in quali condizioni può essere utilizzato praticamente.

### 3.1.5 Esami macroscopici di materiali metallici su superfici preparate

NO.	Campione studiato	Osservazioni
1		<b>Leghe di alluminio fuse</b> Il campione è prelevato da un piccolo lingotto di lega: <ul style="list-style-type: none"><li>- Sulla superficie preparata e incisa chimicamente si osservano i dendriti.</li><li>- Nella parte superiore del campione è presente una cavità di ritiro e una fessura causata dalla contrazione del materiale durante la solidificazione.</li></ul>



		<ul style="list-style-type: none"><li>- Al centro del campione è visibile un vuoto interno (sfiatatoio).</li></ul>
2		<b>Campione di acciaio incrinato</b> In seguito al trattamento termico di tempra, il campione si è rotto a causa delle elevate sollecitazioni interne indotte dalla presenza di concentratori di sollecitazioni meccaniche (ad esempio, una scanalatura per chiavetta non collegata) o di impurità disposte in file.
3		<b>Campione di un componente saldato sotto carico</b> In una vista in sezione, incisa chimicamente, si possono osservare le tre zone caratteristiche della saldatura: <ul style="list-style-type: none"><li>- Zona del materiale di base (BMZ).</li><li>- Zona influenzata dal calore (di colore più scuro - HAZ).</li><li>- Zona del metallo saldato (WMZ).</li></ul>
4		<b>Campione di acciaio saldato a V</b> In una vista in sezione trasversale, incisa chimicamente, si può osservare la zona del materiale solidificato e il materiale di base. <ul style="list-style-type: none"><li>- La saldatura è stata creata mediante il completamento della passata di radice.</li></ul>
5		<b>Deformazione a freddo del campione</b> Si può osservare la struttura delle venature che segue il contorno del pezzo.

### 3.1.6. Domande



1. Qual è lo scopo della Dimostrazione di valutazione di campioni macroscopici di articolazioni in questo contesto?
2. Quali sono le fasi coinvolte nella preparazione dei campioni metallografici?
3. Quali sono le fasi di preparazione della superficie per l'esame?
4. In cosa differisce l'analisi macroscopica su superfici non preparate dall'analisi macroscopica su superfici preparate?
5. Perché è importante l'analisi macroscopica dei materiali metallici su superfici non preparate e quali caratteristiche strutturali possono essere esaminate attraverso questo metodo?
6. Quali sono le zone della sezione trasversale dei giunti saldati che si possono evidenziare?
7. Esistono tecniche o strumenti specifici discussi per l'analisi macroscopica?
8. Quali sono le potenziali applicazioni o settori in cui questa analisi macroscopica dei materiali metallici è rilevante?

### **3.2. Formazione pratica per l'identificazione senza ausilio di imperfezioni di saldatura su campioni macroscopici**

#### **3.2.1. Introduzione alle imperfezioni di saldatura**

Panoramica delle imperfezioni comuni della saldatura

Importanza di identificare le imperfezioni di saldatura

#### **3.2.2. Tecniche di ispezione visiva per l'identificazione delle imperfezioni di saldatura**

Attrezzature e strumenti per l'ispezione visiva

Procedure di ispezione e migliori pratiche

#### **3.2.3. Esame macroscopico dei giunti saldati**

Preparazione e valutazione dei campioni macroscopici

#### **3.2.4. Formazione pratica nell'identificazione senza aiuto delle imperfezioni di saldatura**

Pratica pratica con tecniche di ispezione visiva

Esame e analisi di campioni macroscopici

#### **3.2.5. Documentazione e segnalazione delle imperfezioni di saldatura**

Importanza di una documentazione accurata

Formati e requisiti di reporting

#### **3.2.6. Precauzioni di sicurezza durante l'ispezione della saldatura**

Requisiti dei dispositivi di protezione individuale (DPI).

Pericoli e misure di sicurezza



### 3.2.1 Introduzione alle imperfezioni di saldatura

Le imperfezioni di saldatura sono deviazioni o irregolarità in una saldatura che possono comprometterne l'integrità, la resistenza e la qualità complessiva. Queste imperfezioni possono derivare da vari fattori, tra cui parametri del processo di saldatura, proprietà dei materiali, capacità dell'operatore e condizioni ambientali. Identificare e affrontare queste imperfezioni è fondamentale per garantire l'affidabilità e la sicurezza delle strutture saldate.

#### Panoramica delle imperfezioni comuni della saldatura

- **Porosità** si riferisce alla presenza di piccole cavità o vuoti all'interno del metallo saldato causati da gas intrappolati, come idrogeno o azoto. Questi vuoti possono indebolire la saldatura e renderla più suscettibile alle fessurazioni.



Figura 3.2.1. Cavità gassose. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

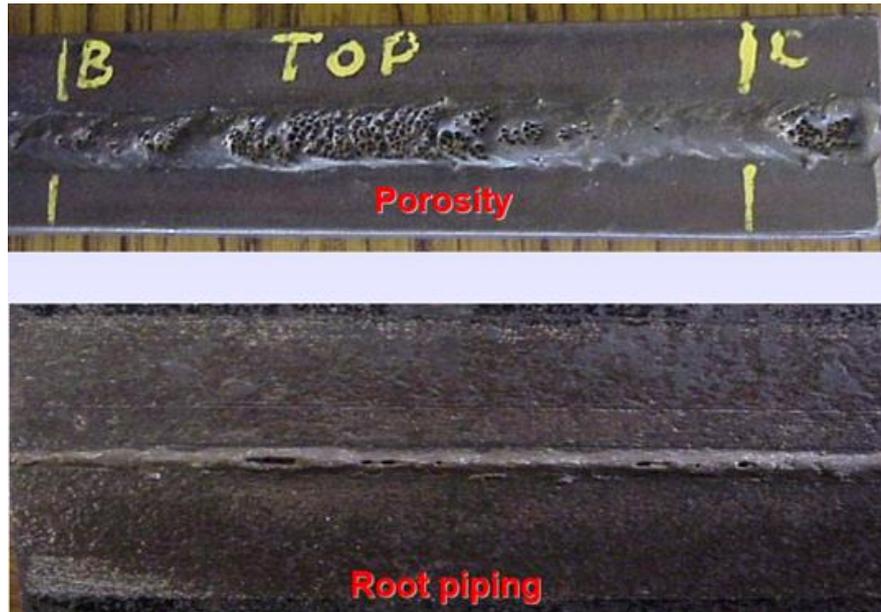


Figura 3.2.2. Caratteristiche visive delle cavità gassose. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Mancanza di fusionesi** verifica quando vi è un legame inadeguato tra il metallo di saldatura e il metallo di base o tra diversi passaggi di saldatura. Può risultare in un'articolazione debole che potrebbe non essere in grado di resistere alle forze applicate.

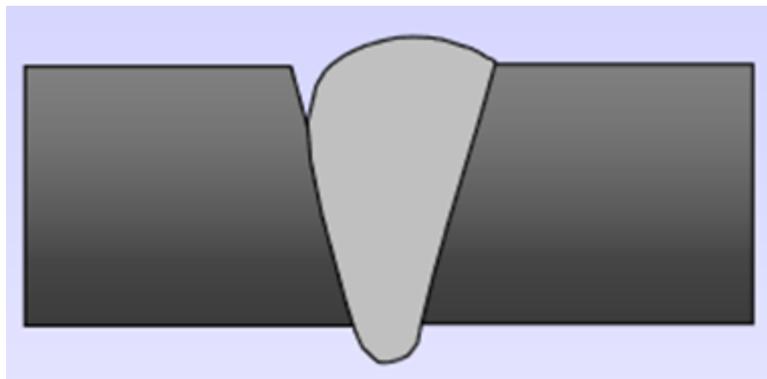


Figura 3.2.3. Scanalatura riempita incompleta. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Penetrazione incompletasi** verifica quando il metallo di saldatura non penetra completamente nel giunto o non si estende attraverso l'intero spessore del metallo di base. Ciò può portare a una riduzione della resistenza e dell'integrità.

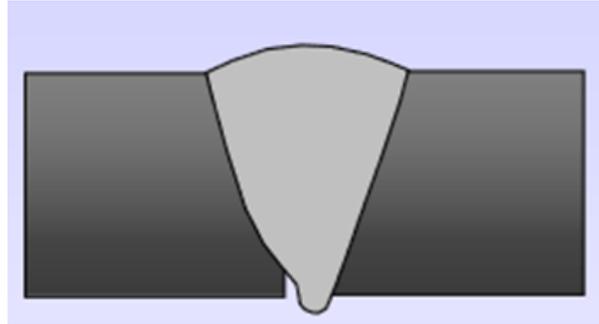


Figura 3.2.4. Fusione radicale incompleta. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

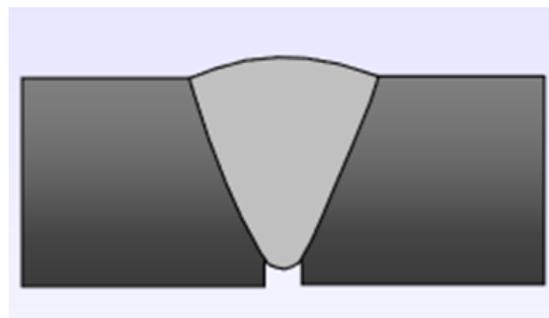


Figura 3.2.5. Penetrazione radicale incompleta. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Sottoquotazione** è la formazione di una scanalatura lungo il metallo base in prossimità della saldatura a causa del calore eccessivo o di una tecnica di saldatura inadeguata. Può creare concentrazioni di stress e indebolire l'articolazione.

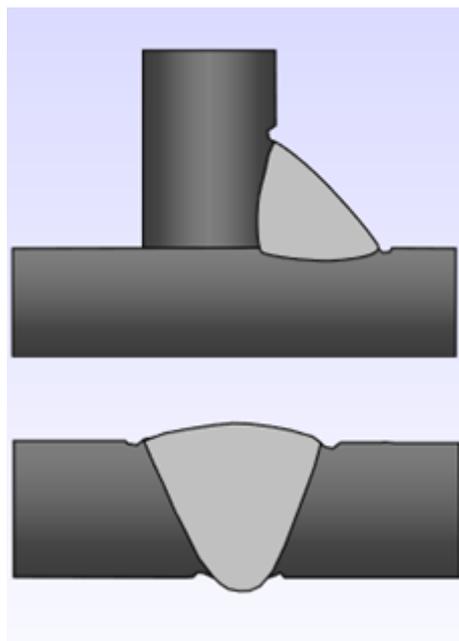


Figura 3.2.6. Radice e cappello sotto taglio. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Sovrapposizioni** si verifica quando il metallo saldato si estende sulla superficie del metallo base senza un'adeguata fusione. Ciò può comportare una mancanza di resistenza e una maggiore suscettibilità alle fessurazioni.

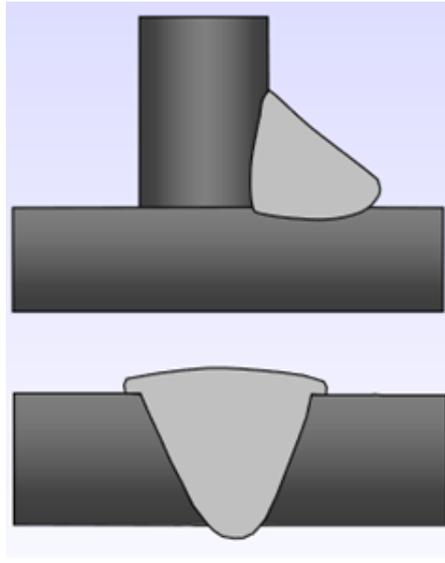


Figura 3.2.7. Sovrapposizione delle punte nella saldatura di testa/d'angolo. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Crepe** possono formarsi in vari orientamenti e posizioni all'interno della saldatura. I tipi comuni includono crepe longitudinali lungo l'asse della saldatura, crepe trasversali attraverso la saldatura e crepe nella zona interessata dal calore. Le crepe possono compromettere l'integrità strutturale della saldatura.

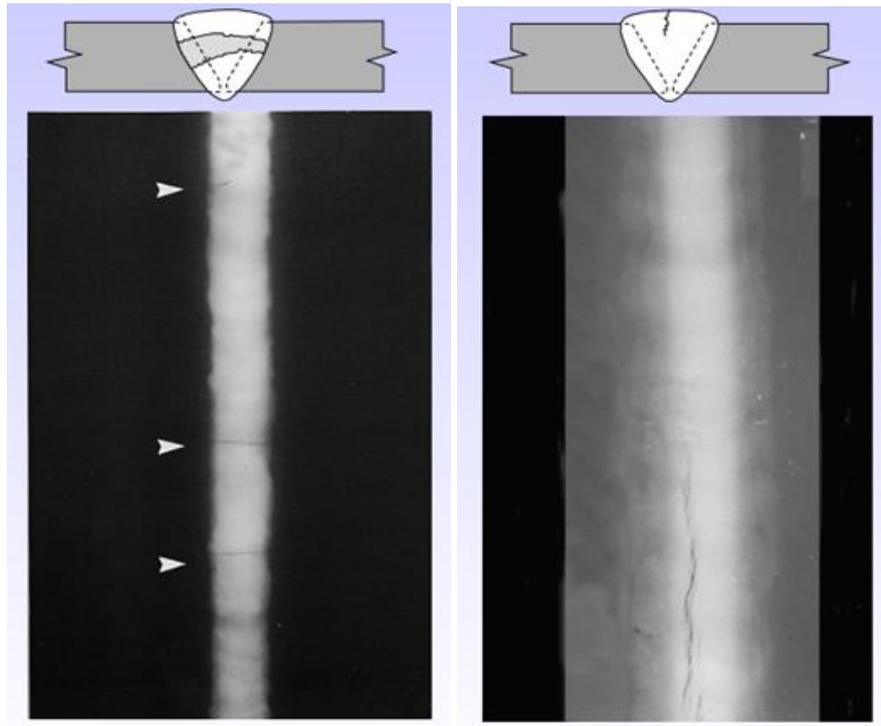


Figura 3.2.8. Fessura trasversale Fig. 3.2.9. Crepa longitudinale

Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Spruzzi di saldatura** si riferisce alle piccole goccioline di metallo fuso espulse dall'arco di saldatura che possono aderire alla superficie della saldatura. Sebbene non siano sempre strutturalmente dannosi, gli schizzi eccessivi possono influire sull'aspetto e potenzialmente causare punti deboli.



Figura 3.2.10. Caratteristiche visive degli schizzi. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Inclusioni** sono materiali estranei, come scorie, ossidi, tungsteno o flusso, che rimangono intrappolati nella saldatura. Possono causare aree di debolezza e ridotta resistenza alla corrosione.

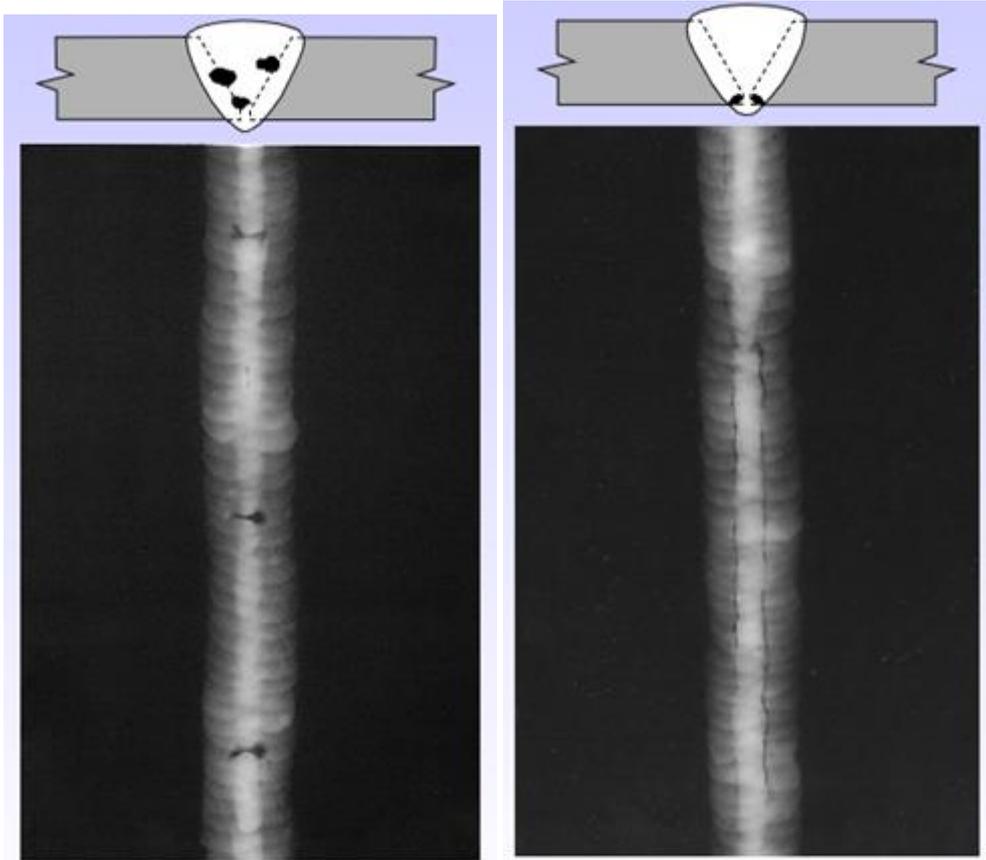


Figura 3.2.11. Inclusioni di scorie interpass Fig. 3.2.12. - linee di scorie

Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Disallineamenti** si verifica quando il giunto di saldatura non è correttamente allineato prima della saldatura, portando a saldature irregolari e deboli.

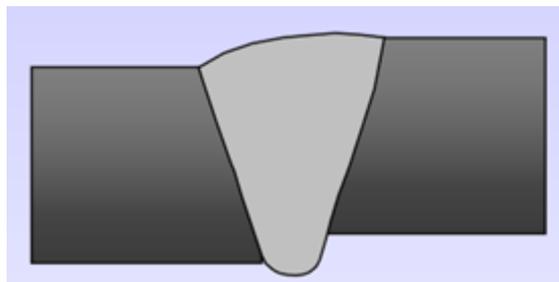


Figura 3.2.13. Disallineamento lineare. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

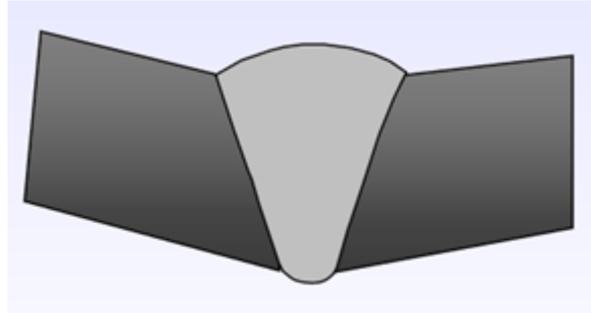


Figura 3.2.14. Disallineamento angolare. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Rinforzo eccessivo** avviene quando il cordone di saldatura si estende oltre le dimensioni richieste. Ciò può portare a concentrazioni di sollecitazioni e potrebbe non soddisfare le specifiche di progettazione.

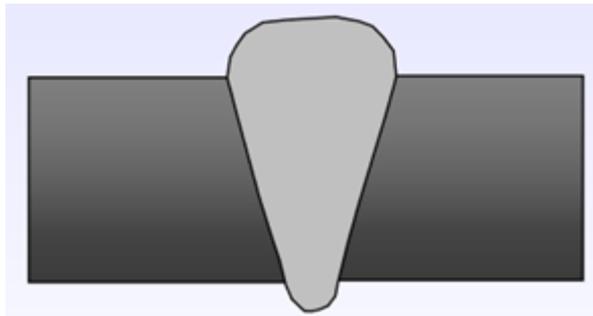


Figura 3.2.15. Altezza del cappuccio eccessiva. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

- **Burn-Through** si verifica quando il calore di saldatura è eccessivo, provocando la fusione del metallo di base e creando potenzialmente fori.

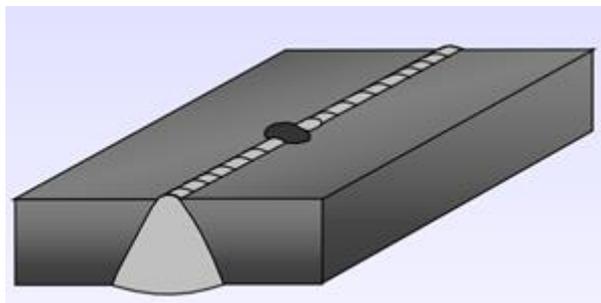


Figura 3.2.16. Burn-through. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.



- **Distorsioni** si riferisce alla deformazione o deformazione della struttura saldata dovuta all'apporto di calore durante la saldatura. Sebbene non sia necessariamente un difetto, una distorsione eccessiva può comprometterne l'adattamento e il funzionamento.

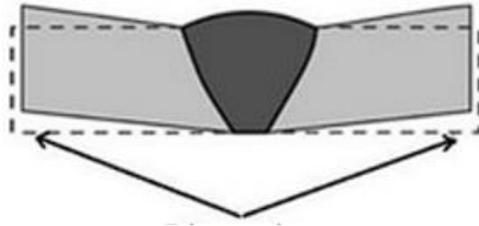


Figura 3.2.17. Distorsione. Fonte: MS Rogers, Riferimento al corso Ispezione difetti/riparazioni di saldatura WIS 5, 2003.

Le imperfezioni di saldatura possono essere correlate al tipo di processo di saldatura utilizzato a causa delle caratteristiche e dei parametri specifici associati a ciascun metodo di saldatura. Diversi processi di saldatura hanno fonti di calore, velocità di deposizione e tecniche distinte, che possono influenzare i tipi di imperfezioni che hanno maggiori probabilità di verificarsi.

**Saldatura ad arco di metallo schermato** può essere più soggetto a inclusioni di scorie, soprattutto se non vengono eseguite un'adeguata pulizia e rimozione delle scorie tra i passaggi. Porosità e mancanza di fusione possono verificarsi anche a causa della natura manuale del processo, che può portare a una copertura incoerente e a un controllo termico inadeguato.

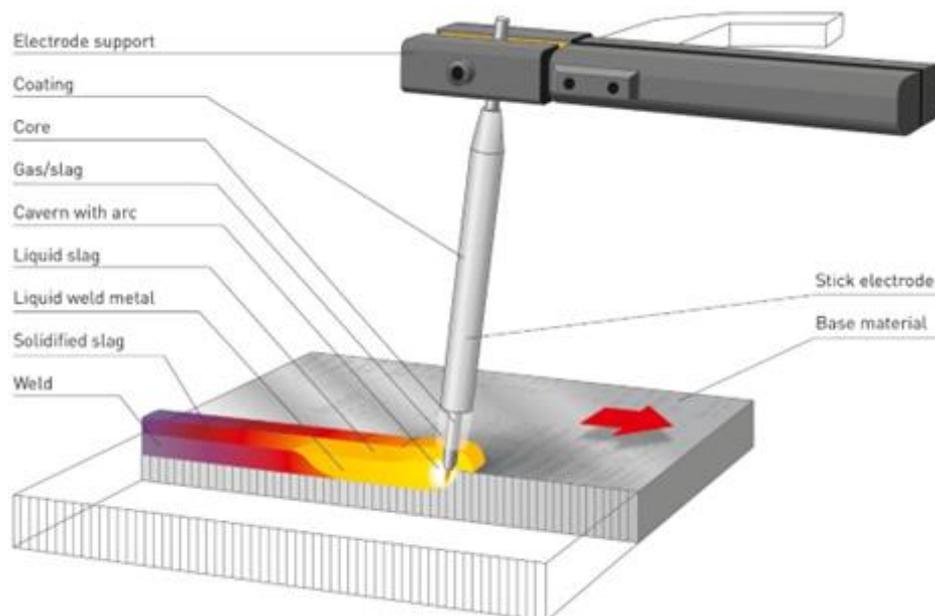


Figura 3.2.18. Saldatura ad arco di metallo schermato. Fonte: <https://www.kjellberg.de/gas-shielded-metal-arc-welding.html>

*Saldatura ad arco di metalli sotto protezione di gas* è generalmente meno soggetto a imperfezioni legate alle scorie, ma può presentare problemi di porosità e fusione incompleta se il gas di protezione non è adeguatamente controllato. Potrebbero essere presenti anche spruzzi di saldatura dovuti all'uso di filo dell'elettrodo consumabile.

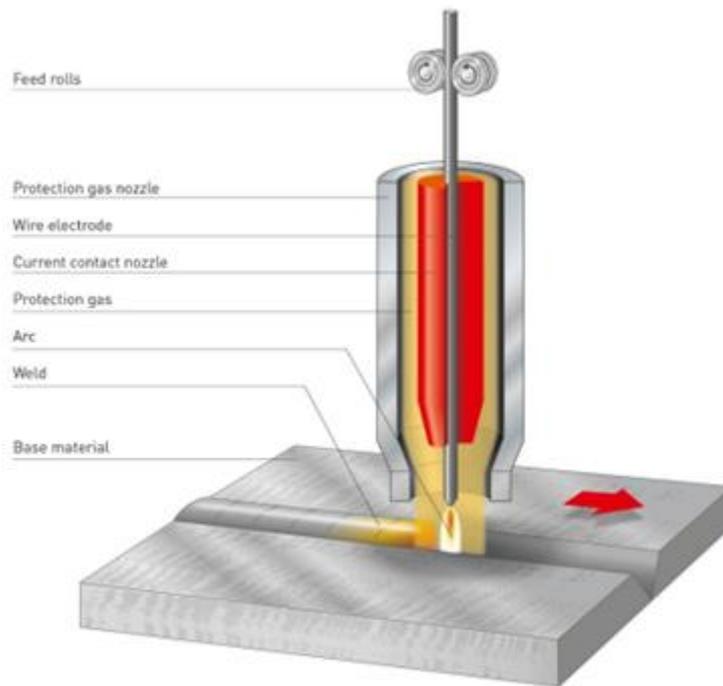


Figura 3.2.19. Saldatura ad arco di metalli sotto protezione di gas.

Fonte: <https://www.kjellberg.de/manual-metal-arc-welding.html>

**Saldatura ad arco di tungsteno a gas** è noto per la produzione di saldature di alta qualità, ma se l'apporto di calore non è controllato adeguatamente possono verificarsi mancanza di fusione e penetrazione incompleta. Anche le inclusioni di tungsteno possono rappresentare un problema se l'elettrodo di tungsteno entra in contatto con il bagno di saldatura.

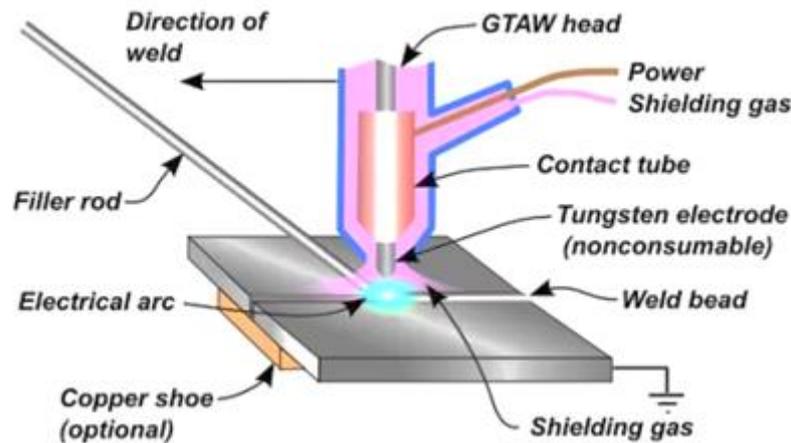


Figura 3.2.20. Saldatura ad arco di tungsteno a gas. Fonte: <https://www.weldingis.com/gtaw-welding/>

**Saldatura ad arco con filo animato** possono verificarsi inclusioni di scorie e porosità se il nucleo del flusso non è adeguatamente compatibile con il metallo base o se il gas di protezione è insufficiente. Analogamente a GMAW, gli schizzi potrebbero costituire un problema a causa dell'uso di filo di apporto consumabile.

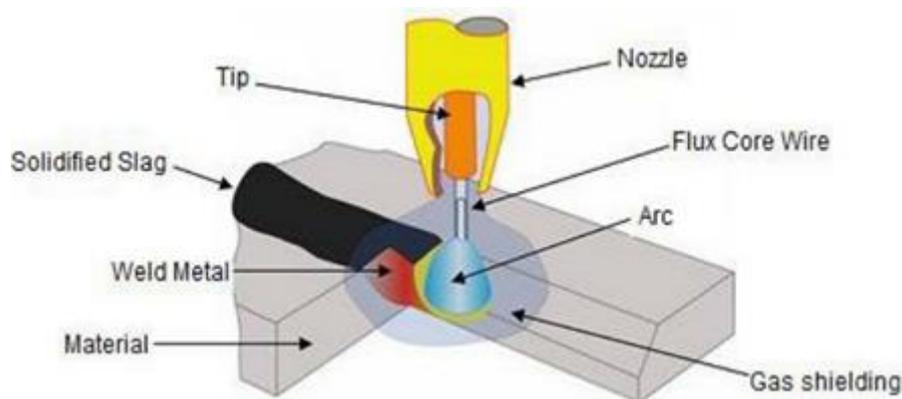


Figura 3.2.21. Saldatura ad arco con filo animato. Fonte: Celso, Alves Correa; Niederauer, Mastelari (2014). Effetto dei parametri di saldatura nella saldatura ad arco con nucleo (FCAW) con corrente convenzionale e pulsata sull'efficienza e sulla velocità di fusione del rivestimento fondente. Ricerca scientifica e saggi.

**Saldatura ad arco sommerso** è generalmente associato a saldature profonde e di alta qualità, ma possono verificarsi fusioni incomplete e mancanza di fusione delle pareti laterali se la preparazione e l'allineamento del giunto non sono ben controllati.

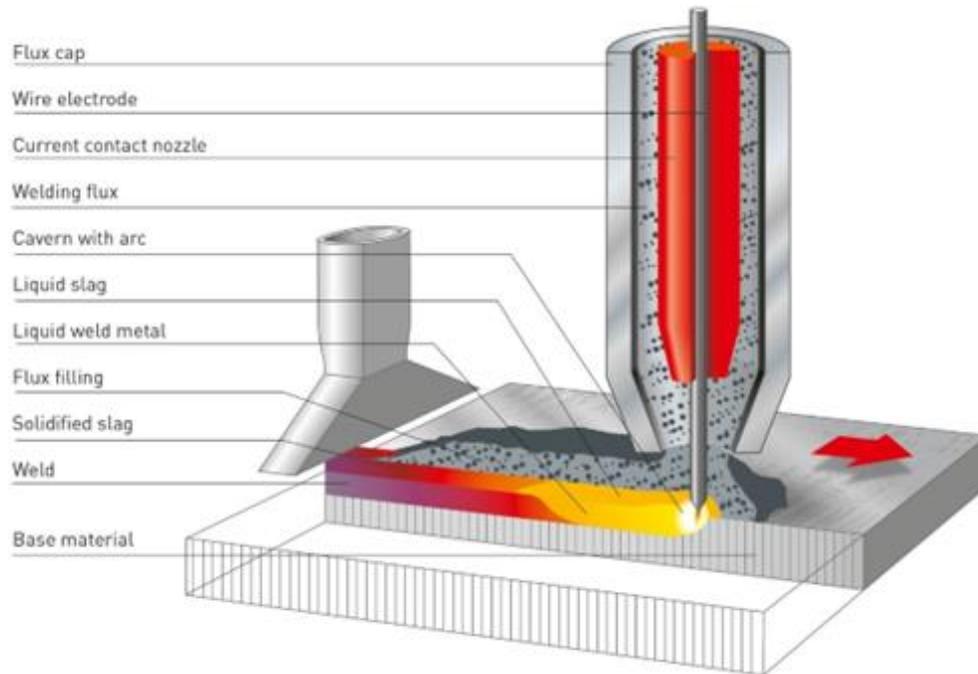


Figura 3.2.22. Saldatura ad arco sommerso. Fonte: <https://www.kjellberg.de/submerged-arc-welding-2.html>

**Saldatura ad arco plasma** riduce le saldature precise e controllate, ma se i parametri non sono opportunamente impostati si possono verificare penetrazioni inadeguate e mancate fusioni. Anche le inclusioni di tungsteno e un controllo improprio del buco della serratura possono portare a difetti.

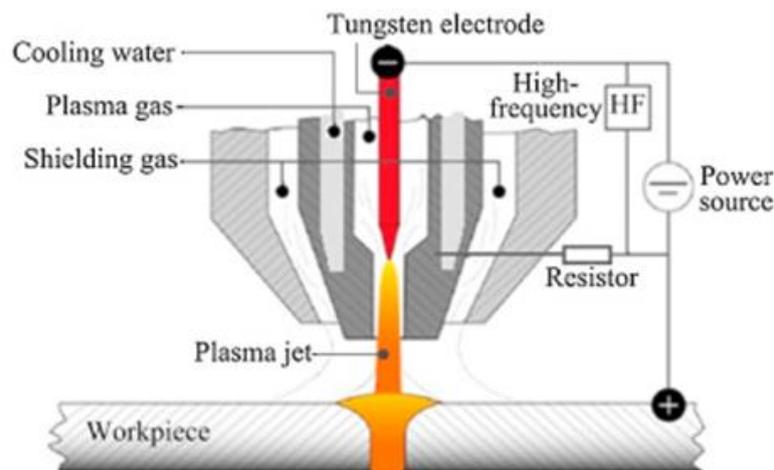


Figura 3.2.23. Saldatura ad arco plasma. Fonte: Liu, Zu Ming; Cui, Shuang Lin; Luo, Zhen; Zhang, ChangZhen; Wang, Zheng Ming; Zhang, Yu Chen (2016). Saldatura ad arco plasma: varianti di processo e suoi recenti sviluppi di rilevamento, controllo e modellazione. Giornale dei processi produttivi.

**Saldatura a fascio di elettroni** è noto per il processo ad alta densità di energia, che di solito provoca imperfezioni minime. Tuttavia, un adattamento inadeguato del giunto, l'instabilità del buco della serratura e problemi di focalizzazione del raggio possono portare a difetti di saldatura come mancanza di fusione e porosità.

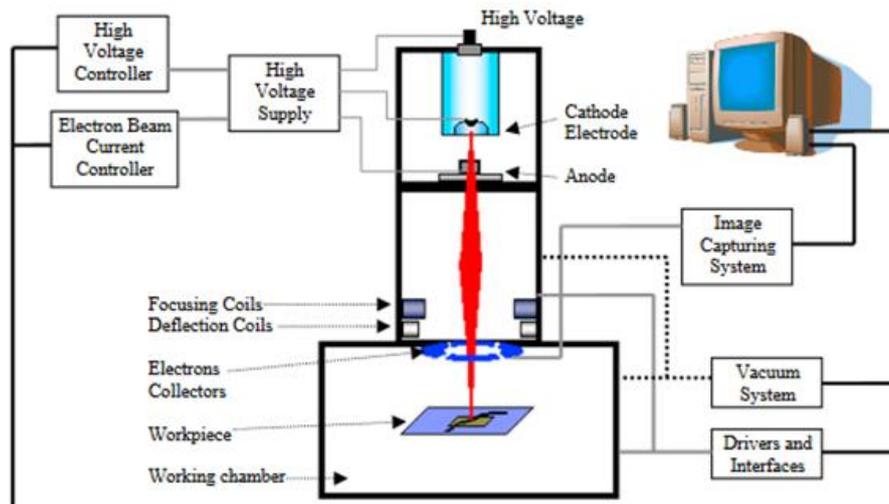


Figura 3.2.24. Saldatura a fascio di elettroni. Fonte: Oltean, Stelian-Emiliano (2018). Strategie di monitoraggio e controllo con tracciamento del cordone nella saldatura a fascio di elettroni.

Procedia Manufacturing, 22(), 605–612.

### 3.2.2 Tecniche di ispezione visiva per l'identificazione delle imperfezioni di saldatura

L'ispezione visiva è un metodo cruciale per identificare le imperfezioni della saldatura. Implica un esame visivo dettagliato della saldatura e dell'area circostante per rilevare irregolarità, difetti e imperfezioni.

**Preparazione e pulizia:** prima di iniziare l'ispezione visiva, assicurarsi che l'area di saldatura sia pulita e priva di detriti, vernici o contaminanti che potrebbero nascondere le imperfezioni. Potrebbe essere necessario pulire la superficie con una spazzola metallica o un solvente appropriato.

**Illuminazione adeguata:** un'adeguata illuminazione è essenziale per un'accurata ispezione visiva. Utilizza un'illuminazione brillante e diffusa per ridurre al minimo le ombre e i riflessi che possono nascondere le imperfezioni.



**Angolo di osservazione:** esaminare la saldatura da più angolazioni, comprese le viste perpendicolari e oblique. Cambiare l'angolo di osservazione può rivelare imperfezioni che potrebbero non essere visibili da un'unica prospettiva.

**Norme di riferimento:** disporre di standard di riferimento o campioni di saldature accettabili e non accettabili per il confronto. Questi standard possono aiutare a determinare se le imperfezioni osservate superano i limiti accettabili.

**Strumenti di aiuto visivo:** a seconda delle dimensioni e del dettaglio della saldatura, utilizzare strumenti di ausilio visivo come lenti di ingrandimento, binocoli, calibri o boroscopi per migliorare la capacità di individuare piccole imperfezioni.

**Ispezione sistematica:** seguire una procedura di ispezione sistematica, esaminando il giunto di saldatura in una sequenza strutturata. Inizia da un'estremità e procedi verso l'altra, assicurandoti che nessuna area venga trascurata.

**Distinguere le imperfezioni accettabili da quelle inaccettabili:** sviluppare la capacità di distinguere tra imperfezioni accettabili, come irregolarità superficiali, piccole increspature o schizzi, e difetti effettivi, come crepe, sottosquadri o mancanza di fusione, in base alle informazioni fornite nello standard appropriato.

**Conoscenza dei processi di saldatura:** familiarizzare con lo specifico processo di saldatura utilizzato, poiché ciascuno presenta caratteristiche uniche e potenziali imperfezioni o difetti ad esso associati. Comprendere il processo può aiutare a identificare i difetti.

**Conformità al codice e agli standard:** essere consapevoli dei codici e degli standard di settore pertinenti che specificano le tolleranze accettabili per le imperfezioni di saldatura. Il rispetto di questi standard è obbligatorio.

**Formazione ed esperienza:** l'esperienza gioca un ruolo significativo nel diventare abili nell'ispezione visiva. La formazione continua, la pratica e l'esposizione a vari tipi di saldature e imperfezioni migliorano le tue capacità.

**Controlli non distruttivi (NDT):** capire quando integrare l'ispezione visiva con tecniche NDT più avanzate, come test radiografici, test a ultrasuoni, test con particelle magnetiche o test con coloranti penetranti, per una valutazione più completa, soprattutto nelle applicazioni critiche.



## Procedure di ispezione e migliori pratiche

Procedure di ispezione efficaci e migliori pratiche sono fondamentali per garantire valutazioni accurate e approfondite delle saldature e di altri materiali. Procedure di ispezione adeguate aiutano a mantenere la qualità, la sicurezza e la conformità agli standard di settore.

### Sicurezza:

- Dare priorità alla sicurezza indossando dispositivi di protezione individuale (DPI) adeguati come occhiali di sicurezza, guanti, elmetti e indumenti.
- Essere consapevoli di eventuali rischi potenziali nell'ambiente di ispezione, soprattutto durante l'ispezione in ambienti industriali.

### Pianifica e prepara:

- Sviluppare un piano di ispezione chiaro che delinei l'ambito, gli obiettivi e i criteri di accettazione dell'ispezione.
- Raccogliere tutte le attrezzature, gli strumenti, gli standard di riferimento e la documentazione necessari per l'ispezione prima di iniziare l'ispezione.

### Sequenza di ispezione visiva:

- Seguire una sequenza sistematica assicurando che tutte le aree della saldatura siano esaminate attentamente.
- Inizia da un'estremità e procedi verso l'altra per evitare di perdere nessuna sezione.

**Pulizia e preparazione:** Assicurarsi che le superfici da ispezionare siano pulite, prive di contaminanti e adeguatamente preparate. Rimuovere sporco, ruggine, vernice o altri detriti che potrebbero nascondere le imperfezioni.

### Illuminazione adeguata:

- Utilizzare condizioni di illuminazione adeguate che forniscano un'illuminazione adeguata dell'area di ispezione.
- Angola la luce per ridurre al minimo ombre e riflessi.

**Ausili per l'ispezione:** Utilizzare strumenti di ispezione adeguati come strumenti di ingrandimento, endoscopi e specchi per migliorare la visibilità e l'accesso alle aree difficili da raggiungere.



### Reporting e tenuta dei registri:

- Genera rapporti di ispezione dettagliati che includono risultati dell'ispezione, fotografie, disegni ed eventuali raccomandazioni per riparazioni o azioni correttive.
- Mantenere un registro completo di tutte le ispezioni per riferimento futuro.

### 3.2.3 Esame macroscopico dei giunti saldati

L'ispezione macroscopica dei giunti di saldatura è una tecnica di test distruttivo utilizzata per valutare visivamente la qualità complessiva, l'integrità e le caratteristiche di un giunto saldato. Questo metodo di ispezione prevede un esame visivo dettagliato della saldatura e delle sue immediate vicinanze utilizzando l'occhio nudo o ausili a basso ingrandimento. Lo scopo principale dell'ispezione macroscopica è identificare e valutare difetti macroscopici, irregolarità o discontinuità nella saldatura, garantendo che soddisfino gli standard e i requisiti specificati.

#### Preparazione e valutazione dei campioni macroscopici

La preparazione dei campioni di prova per l'ispezione macroscopica implica la preparazione e il sezionamento accurato di campioni rappresentativi dei giunti saldati o dei componenti che devono essere esaminati. L'obiettivo è creare sezioni trasversali che consentano una valutazione visiva chiara e dettagliata della saldatura e di eventuali difetti. I passaggi per preparare i campioni di prova per l'ispezione macroscopica sono i seguenti:

**Selezione campioni rappresentativi:** Scegli i campioni di prova che rappresentano accuratamente il tipo di giunti saldati o componenti che desideri ispezionare. I campioni dovrebbero contenere le saldature o le aree di interesse.

#### Taglio:

- Utilizzare un'attrezzatura da taglio adeguata, come una sega a nastro, un seghetto o un disco da taglio abrasivo, per eseguire tagli puliti e precisi attraverso i campioni di prova. L'obiettivo è creare sezioni trasversali delle saldature o dei componenti.
- Assicurarsi che il processo di taglio non provochi ulteriori danni o difetti ai campioni.

#### Orientamento:



- Contrassegnare i provini per indicare l'orientamento del giunto saldato o dell'area di interesse. Ciò aiuta a mantenere la coerenza durante l'ispezione e l'analisi.
- Se possibile, tagliare i provini per rivelare sia il cordone di saldatura che il materiale di base adiacente e la zona alterata dal calore (HAZ).

**Montaggio:** A seconda delle dimensioni e della forma dei provini, potrebbe essere necessario montarli in un materiale adatto per facilitarne la manipolazione, la molatura e la lucidatura. I materiali di montaggio comuni includono resina epossidica o acrilica.

**Rettifica:** Utilizzare una serie di carte abrasive o ruote con grana progressivamente più fine per rimuovere il materiale in eccesso e creare una superficie piana e liscia sui provini. Questo passaggio è fondamentale per ottenere una superficie lucida che consenta un'ispezione chiara.

**Lucidatura:** Utilizzare composti lucidanti a grana fine o paste diamantate per migliorare ulteriormente la qualità della superficie. Continuare a lucidare fino a quando la superficie raggiunge una finitura a specchio.

**Acquaforte (facoltativa):** In alcuni casi, l'applicazione di un mordenzante appropriato sulla superficie del campione può rivelare dettagli microstrutturali ed evidenziare caratteristiche come i confini della saldatura, la struttura dei grani e la presenza di difetti. La scelta del mordenzante dipende dal materiale da ispezionare.

Nelle ispezioni macroscopiche, gli agenti acidi sono sostanze chimiche utilizzate per rivelare ed evidenziare dettagli microstrutturali nei materiali metallici. Questi agenti mordenzanti vengono applicati sulla superficie dei provini preparati per distinguere tra vari costituenti strutturali, bordi dei grani, fasi e potenziali difetti. La scelta del mordenzante dipende dal materiale da ispezionare e dalle specifiche caratteristiche microstrutturali di interesse.



Video 3.2.1: Tecniche macroscopiche Parte 1. Fonte: Prof. Dr. Ing. Rainer Schwab, Hochschule  
Karlsruhe, Università di Scienze Applicate, Karlsruhe, Germania

[\[https://www.youtube.com/watch?v=fc8zrgYJCJw\]](https://www.youtube.com/watch?v=fc8zrgYJCJw)



Video 3.2.2: Tecniche macroscopiche Parte 2. Fonte: Prof. Dr. Ing. Rainer Schwab, Hochschule  
Karlsruhe, Università di Scienze Applicate, Karlsruhe, Germania

[\[https://www.youtube.com/watch?v=UuHofNW40Yw&t=14s\]](https://www.youtube.com/watch?v=UuHofNW40Yw&t=14s)



### Classificazione degli mordenzanti:

1. Nital (soluzione di acido nitrico): il nital è un agente mordenzante comunemente utilizzato per rivelare i bordi dei grani e la microstruttura complessiva dei materiali ferrosi, come l'acciaio. Tipicamente è costituito da acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ) miscelato con etanolo o metanolo.
2. Picral Etchant, costituito da acido picrico disciolto in etanolo o metanolo, viene spesso utilizzato per rivelare i bordi dei grani nell'alluminio e nelle leghe di alluminio.
3. Il reagente di Keller è una miscela di acido nitrico e alcol ed è comunemente usato per rivelare la struttura del grano e la struttura dendritica nelle leghe di alluminio e magnesio.
4. Il reagente di Vilella è una miscela di acqua, acido cloridrico e acido nitrico. Viene utilizzato per rivelare la macrostruttura del rame e delle leghe di rame.
5. Il Reagente per Marmo viene utilizzato per incidere l'ottone e le leghe di rame. È composto da una soluzione di cloruro di rame in acido cloridrico.
6. Aqua Regia è una miscela di acido nitrico concentrato e acido cloridrico concentrato. Viene utilizzato per incidere l'oro e alcuni metalli del gruppo del platino per rivelare caratteristiche macroscopiche.
7. Gli agenti mordenzanti all'idrossido di sodio vengono utilizzati per l'alluminio e le sue leghe per rivelare caratteristiche macroscopiche. Solitamente sono costituiti da una soluzione di idrossido di sodio ( $\text{NaOH}$ ) o soda caustica.
8. Il reagente di Fry è una miscela di acido acetico e perossido di idrogeno e viene utilizzato per rivelare la macrostruttura dell'acciaio inossidabile e di alcune leghe a base di nichel.
9. Il nital-etanolo è una miscela di nital ed etanolo che viene spesso utilizzata per esaminare le saldature, poiché aiuta a evidenziare la struttura della saldatura e i potenziali difetti nell'area di saldatura.
10. L'attacco mordenzante n. 2 di Kalling viene utilizzato per rivelare la macrostruttura delle ghise.

È fondamentale scegliere il mordenzante appropriato in base al materiale da ispezionare e alle specifiche caratteristiche macrostrutturali di interesse. Il processo di mordenzatura deve essere attentamente controllato per ottenere i risultati desiderati senza mordenzare



eccessivamente o danneggiare il campione. È necessario osservare le opportune precauzioni di sicurezza quando si maneggiano gli agenti mordenzanti, poiché molti di essi sono corrosivi o potenzialmente pericolosi.

**Pulizia:** pulire accuratamente i campioni preparati per rimuovere eventuali residui dei processi di taglio, molatura e lucidatura. Assicurarsi che la superficie sia priva di contaminanti.

**Conservazione ed etichettatura:**

- Etichettare correttamente ciascun provino con le informazioni essenziali, tra cui la data di preparazione, il tipo di provino, l'orientamento e tutti i dettagli rilevanti sulla saldatura o sul componente.
- Conservare i campioni in un ambiente controllato per prevenire la corrosione o il degrado finché non sono pronti per l'ispezione.

**Documentazione:** Conservare registrazioni dettagliate del processo di preparazione del campione, comprese fotografie e note, per fornire una cronologia completa di ciascun campione di prova.

Una volta preparati, i campioni di prova sono pronti per l'ispezione macroscopica. Durante l'ispezione, utilizzare illuminazione, strumenti di ingrandimento e procedure di ispezione adeguati per esaminare attentamente le sezioni trasversali e valutare la qualità della saldatura e la presenza di eventuali difetti. I campioni adeguatamente preparati sono essenziali per ottenere risultati di ispezione accurati e affidabili.



Video 3.2.3: Preparazione del campione per metallografia.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=ok42dVq2CU0>

### 3.2.4 Formazione pratica per l'identificazione delle imperfezioni di saldatura

L'identificazione delle imperfezioni di saldatura è una componente fondamentale per garantire la qualità, la sicurezza e l'affidabilità delle strutture e dei componenti saldati. Questo programma di formazione pratica fornisce ai partecipanti le competenze e le conoscenze essenziali necessarie per identificare le imperfezioni di saldatura senza l'assistenza di strumenti o tecnologie avanzati. Il programma è strutturato per fornire una comprensione completa delle imperfezioni di saldatura, delle tecniche di ispezione, delle misure di sicurezza e delle pratiche di documentazione.

Il programma di formazione pratica comprende diversi componenti chiave. In primo luogo, ai partecipanti viene presentato il compito fondamentale di identificare le imperfezioni di saldatura e comprenderne il potenziale impatto strutturale, con una panoramica delle imperfezioni comuni come porosità e crepe. Quindi, approfondiscono il mondo degli strumenti e delle attrezzature per l'ispezione visiva, imparando come utilizzare in modo efficace strumenti come illuminazione, lenti di ingrandimento e cabine per esami per valutazioni approfondite. Vengono trattate le migliori pratiche per ispezioni coerenti e affidabili, seguite

da un'esplorazione approfondita dell'esame macroscopico delle imperfezioni della saldatura a punti. Gli esercizi pratici offrono un'esperienza reale nell'identificazione e nella caratterizzazione delle imperfezioni. Il programma guida inoltre i partecipanti nell'esame di campioni macroscopici e nell'interpretazione dei risultati per effettuare valutazioni informate della qualità della saldatura. Viene posta enfasi sull'importanza di una documentazione accurata e di un reporting trasparente, insieme al rispetto delle precauzioni di sicurezza, compresi i requisiti dei dispositivi di protezione individuale (DPI) e le misure di mitigazione dei rischi durante le ispezioni delle saldature.

## Pratica pratica con tecniche di ispezione visiva

### 1. Familiarizzazione con le apparecchiature di ispezione visiva:

I partecipanti iniziano acquisendo familiarità con le attrezzature e gli strumenti di ispezione visiva che utilizzeranno durante gli esercizi. Ciò include illuminazione, lenti di ingrandimento, specchi e cabine per esami.

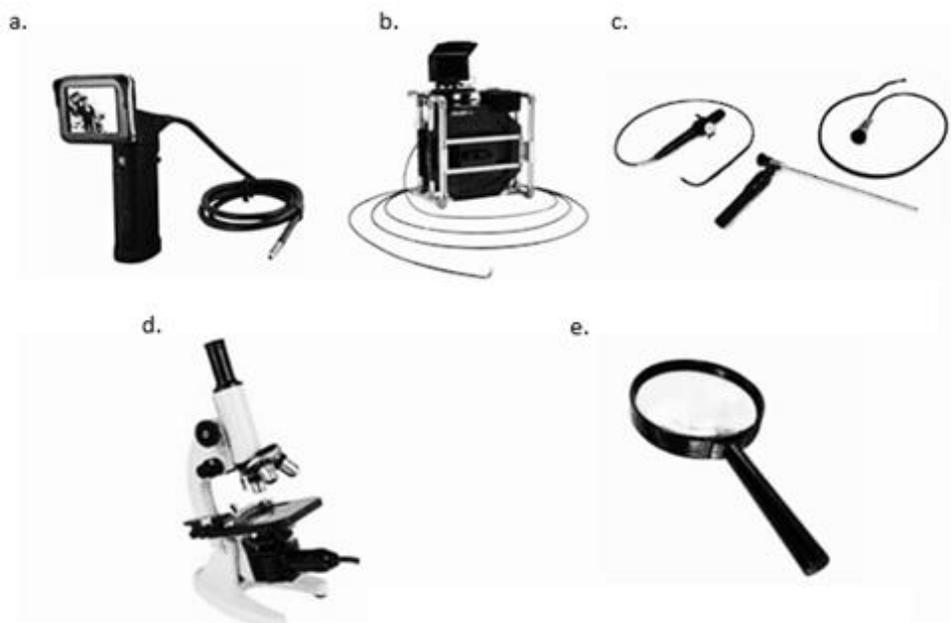




Fig 3.2.25: Videoscopio (a); videoscopio avanzato (b); boroscopi(c); lente d'ingrandimento (d); microscopio (e). Fonte:<https://worldofndt.com/introduction-to-visual-testing/>

## 2. Esempi dei giunti saldati:

Per l'ispezione vengono forniti esempi fisici di giunti di saldatura o campioni con imperfezioni di saldatura introdotte intenzionalmente. Questi campioni rappresentano scenari del mondo reale e servono come base per la pratica pratica.

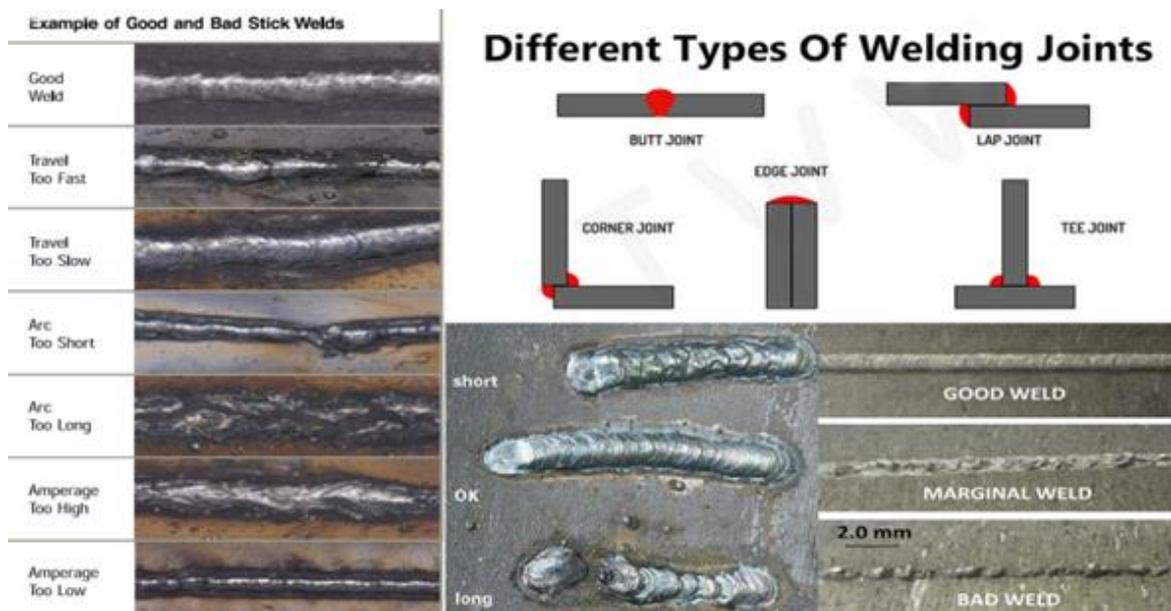


Fig. 3.2.26: Diversi tipi di giunti di saldatura.

Fonte:<https://engineeringdiscoveries.com/different-types-of-welding-joints/>

## 3. Esercizi pratici:

I partecipanti vengono guidati attraverso una serie di esercizi pratici, ciascuno incentrato su aspetti specifici dell'ispezione visiva. Questi esercizi possono includere:

- **Identificazione della porosità:** I partecipanti imparano a riconoscere e distinguere tra diversi tipi di porosità, come fori di spillo, porosità superficiale e porosità sotterranea. Si esercitano a valutare l'entità e la gravità della porosità nelle saldature.



Fig. 3.2.27: Porosità. Fonte: <https://www.mechanicwiz.com/porosità-in-saldatura/>

- **Rilevamento crepe:** I partecipanti si esercitano nell'identificazione delle crepe, sia superficiali che sotterranee. Imparano a distinguere tra tipi di crepe, come crepe longitudinali, trasversali e a cratere.



Fig. 3.2.28: Crepa. Fonte: <https://www.rapiddirect.com/blog/types-of-welding-defects/>

- **Mancanza di fusione e penetrazione incompleta:** Gli esercizi prevedono l'individuazione di aree in cui si è verificata mancanza di fusione o penetrazione incompleta. I partecipanti valutano le implicazioni di queste imperfezioni sulla qualità della saldatura.



Fig. 3.2.29: Mancanza di fusione. Fonte: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/what-is-lack-of-fusion-in-welds>

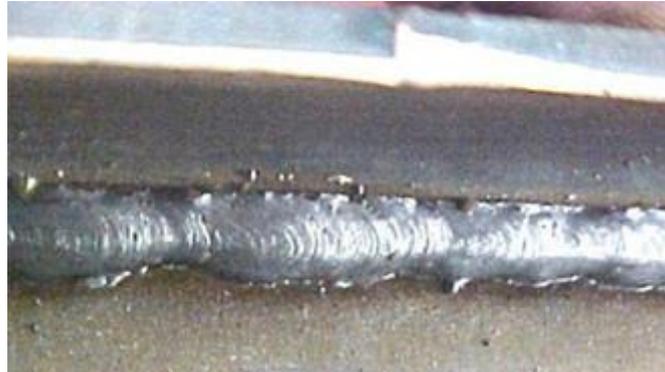


Fig. 3.2.30: Penetrazione incompleta. Fonte: <https://allgas.us/b/what-are-welding-defects--types-causes-and-remedies>

- **Valutazione del sottosquadro:** I partecipanti imparano a identificare il sottosquadro, la sua posizione sulle saldature e il suo potenziale impatto sull'integrità strutturale.



Fig. 3.2.31: Sottosquadri. Fonte: <https://weldguru.com/undercut-in-welding/>

- **Esame del profilo di saldatura:** I partecipanti analizzano i profili di saldatura per garantire che soddisfino gli standard e le dimensioni specificati.



Video 3.2.4: Ispezione della saldatura.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=nKHI7JI9p7E>

#### 4. Valutazione della gravità:

I partecipanti non solo identificano le imperfezioni, ma si esercitano anche a valutarne la gravità. Questo è fondamentale per determinare se una saldatura è accettabile o richiede un'azione correttiva.



Fig. 3.2.32: Differenza tra saldatura buona e cattiva, esempio 1. Fonte: <https://waterwelders.com/good-weld-vs-bad-weld/>

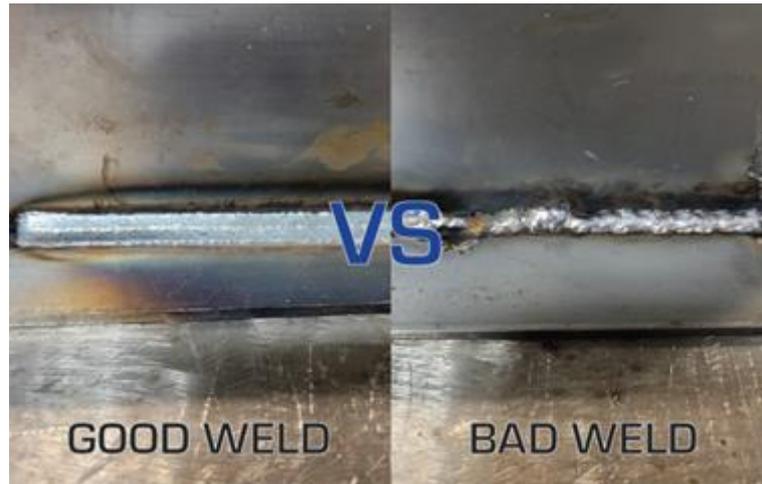


Fig. 3.2.33: Differenza tra saldatura buona e cattiva, esempio 2. Fonte: <https://blog.daihen-usa.com/why-welding-parameters-are-so-important-to-finished-quality>

## 5. Pratica di documentazione:

I partecipanti documentano i loro risultati durante le esercitazioni di ispezione. Ciò include la registrazione del tipo e della posizione delle imperfezioni, delle loro dimensioni e di qualsiasi osservazione rilevante.

YOUR LOGO GOES HERE

Organisation: Template Library  
Project: Example Project  
Team: Example Team

Template ID: DP-QUAL-0017  
Template Version: 4 Form Version: 2  
Form created: Tuesday, 23 October 2018, 4:08:44 pm

### Visual Weld Inspection

Automated Form Number: Template Library-Example Project-Example Team-DP-QUAL-0017 -3  
Date: Tuesday, 03 April 2018, 12:00:00 am

**Inspection Overview**

Traveler No.	Item Description Part #	Acceptance Criteria	L/I	Inspector	Type of Report	Welder ID
NA 1000-8575	NA-706	W + 5/16 in. (8mm)	125-758	Jimmy Summers	Pre-up	NA13000

**Inspection Details**

Defect No.	Defect Description	Sheet/Zone	Photo
12	Slag	1 of 2	See full page photos attached at end of PDF
13	Hot tears	2 of 2	

Disposition: Have all defects been reported?  Yes

Comments: Reported back to project manager because impacts timeframe

Inspector's Signature: Dave Hodgson, Tuesday, 23 October 2018, 4:28:50 pm

**Key**

- P - Porosity
- LF - Lack of Fusion
- C - Crack
- UF - Underfill
- US - Undersized
- UC - Undercut
- CS - Cold Shut
- AS - Arc Strike

Generated with [sitemate.com](http://sitemate.com) Printed version is uncontrolled Page 1 of 3 This PDF was created at Tuesday, 23 October 2018, 4:38:23 pm

Fig. 3.2.34: Esempio pratico di documentazione 1/3.

Fonte: <https://sitemate.com/templates/quality/forms/visual-weld-inspection-template/>



YOUR LOGO GOES HERE

Organisation: Template Library  
Project: Example Project  
Team: Example Team

Template ID: DP-QUAL-0017  
Template Version: 1 Form Version: 2  
Form created: Tuesday, 23 October 2018, 4:38:46 pm

BB - Spatter  
PH - Pin Hole

Generated with [datahound.com](#) Printed version is uncontrolled Page 2 of 3 This PDF was created at Tuesday, 23 October 2018, 4:38:23 pm

Fig. 3.2.35: Esempio pratico di documentazione 2/3.

Fonte: <https://sitemate.com/templates/quality/forms/visual-weld-inspection-template/>

YOUR LOGO GOES HERE

Organisation: Template Library  
Project: Example Project  
Team: Example Team

Template ID: DP-QUAL-0017  
Template Version: 1 Form Version: 2  
Form created: Tuesday, 23 October 2018, 4:38:46 pm

No GPS information available  
Captured by: Dave Hodgson  
Captured on: Tuesday, 23 October 2018  
Tags:  
Description:  
Comments:



Generated with [datahound.com](#) Printed version is uncontrolled Page 3 of 3 This PDF was created at Tuesday, 23 October 2018, 4:38:23 pm

Fig. 3.2.36: Esempio pratico di documentazione 3/3.

Fonte: <https://sitemate.com/templates/quality/forms/visual-weld-inspection-template/>

## 6. Guida dell'istruttore:

Durante gli esercizi, istruttori esperti forniscono indicazioni, rispondono a domande e offrono feedback per aiutare i partecipanti a migliorare le proprie capacità di ispezione.

## 7. Riconoscimento e correzione degli errori:

I partecipanti sono incoraggiati a riconoscere e correggere eventuali errori che potrebbero commettere durante il processo di ispezione. Ciò promuove il miglioramento continuo e la precisione.

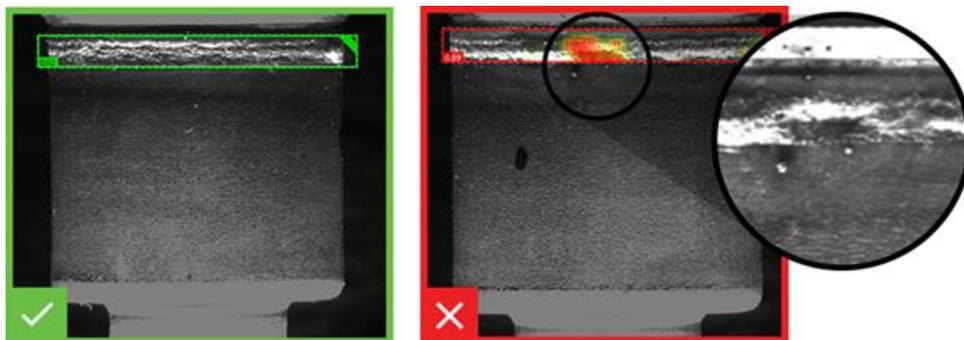


Fig. 3.2.37: Ispezione del cordone di saldatura.

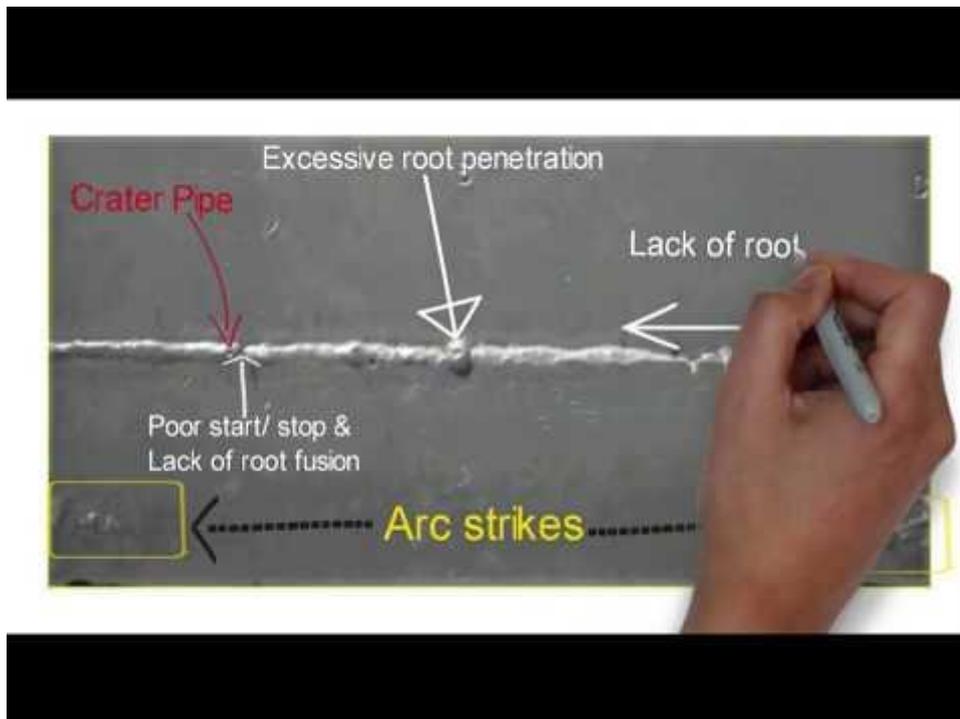
Fonte: <https://www.cognex.com/industries/automotive/powertrain-systems/welding-seam-inspection>

## Esame e analisi di campioni macroscopici

L'esame e l'analisi di campioni macroscopici, in particolare nel contesto della scienza e dell'ingegneria dei materiali, comporta l'ispezione visiva e la valutazione approfondite di campioni o componenti preparati per raccogliere informazioni sulle loro caratteristiche fisiche, difetti e qualità complessiva.

Il processo di esame del materiale comprende diversi passaggi chiave. Inizia con la preparazione dei campioni, che prevede il taglio, il montaggio, la molatura e la lucidatura per garantire superfici ben preparate per l'analisi. Successivamente viene effettuata un'ispezione visiva per identificare caratteristiche visibili e anomalie. Può seguire l'esame microstrutturale,

utilizzando i microscopi per esaminare le dimensioni dei grani, i confini e la composizione del materiale. Le fotografie vengono scattate per la documentazione, il che si rivela prezioso per analisi e confronti successivi. Difetti, irregolarità e dimensioni vengono meticolosamente registrati, seguiti da una valutazione della struttura complessiva e delle condizioni della superficie. I risultati vengono poi confrontati con gli standard, i codici e le specifiche del settore, determinando la conformità ai requisiti di qualità e sicurezza. Sulla base di questa analisi viene effettuata una valutazione dell'idoneità dei campioni per lo scopo previsto. Viene creato un rapporto di ispezione completo, che comprende descrizioni, misurazioni, fotografie e raccomandazioni. Infine, i campioni e la relativa documentazione vengono archiviati e conservati per riferimento futuro, mantenendo un solido sistema di controllo qualità e gestione dei record.



Video 3.2.5: Difetti di saldatura, loro aspetto e identificazione.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=lgeUT5EIH5o>

### 3.2.5 Documentazione e segnalazione delle imperfezioni di saldatura

La documentazione e la segnalazione delle imperfezioni di saldatura sono aspetti essenziali del controllo e della garanzia della qualità nei progetti di saldatura. Documentare e segnalare



adeguatamente le imperfezioni aiuta a garantire la trasparenza, la tracciabilità e la conformità agli standard di settore e alle specifiche del progetto.

#### Guida alla documentazione:

Inizia utilizzando moduli o modelli standardizzati creati allo scopo di documentare le imperfezioni/difetti di saldatura. Questi moduli in genere comprendono campi per dettagli vitali ed elenchi di controllo per identificare i difetti prevalenti.

Contrassegnare chiaramente il rapporto di ispezione o di prova con informazioni cruciali, che includono il nome del progetto, l'ubicazione, la data, l'identità dell'ispettore e un identificatore univoco per l'elemento esaminato.

Fare un'osservazione specifica su ogni imperfezione o difetto di saldatura individuato. Questa osservazione dovrebbe comprendere informazioni specifiche riguardanti il tipo di difetto, la sua precisa posizione sulla saldatura, le dimensioni e qualsiasi osservazione contestuale pertinente.

Classificare ogni imperfezione/difetto in conformità con gli standard o i codici riconosciuti dal settore. Diversi difetti potrebbero comportare diversi livelli di gravità e questa categorizzazione aiuta a valutare il loro potenziale impatto sull'integrità strutturale.

Incorpora fotografie esplicite o documentazione visiva di ogni imperfezione. L'evidenza visiva si rivela spesso più efficace nel chiarire la natura e l'entità di ciascun difetto.

Utilizzare schizzi o diagrammi per rappresentare visivamente il posizionamento e le misurazioni delle imperfezioni di saldatura. Questi ausili grafici migliorano la comprensione.

Fare riferimento ai criteri di accettazione o agli standard utilizzati per la valutazione delle imperfezioni. Ciò facilita una chiara determinazione se il difetto rientra nei parametri accettabili.

Documentare i metodi di ispezione e le attrezzature utilizzate per rilevare e misurare le imperfezioni di saldatura. Queste informazioni contestuali forniscono informazioni dettagliate sul processo di ispezione.



Proporre raccomandazioni per azioni correttive, procedure di riparazione o ulteriori valutazioni in base alle imperfezioni identificate. Questi suggerimenti servono come guida nel processo decisionale.

Incorporare spazi designati per la firma dell'ispettore e qualsiasi approvazione obbligatoria da parte delle parti interessate. Questo passaggio convalida l'accuratezza del report e autorizza le azioni proposte.

Inviare tempestivamente i rapporti di ispezione al termine dell'ispezione. Una segnalazione tempestiva garantisce che le misure necessarie possano essere adottate senza indebiti ritardi.

Trasmettere i risultati e le raccomandazioni a tutte le parti interessate pertinenti, inclusi saldatori, supervisori, ingegneri e project manager.

Stabilire un sistema efficiente per la conservazione e l'archiviazione ordinata dei rapporti di ispezione e della relativa documentazione. Una conservazione adeguata garantisce l'accessibilità dei documenti storici.

Mantenere un registro completo di tutti i rapporti di ispezione, sia per riferimento futuro che come componente integrale di un'iniziativa di controllo e garanzia della qualità.

Esaminare periodicamente i rapporti di ispezione per identificare tendenze, problemi ricorrenti o aree in cui è possibile applicare miglioramenti ai processi. Utilizzare queste informazioni per perfezionare le pratiche di saldatura.

## Formati e requisiti di reporting

I formati e i requisiti di reporting possono variare notevolmente a seconda del settore specifico, dell'organizzazione e della natura delle informazioni riportate. Tuttavia, esistono alcuni elementi e considerazioni comuni che si applicano a molti tipi di report.

- **Titolo e copertina:** i report in genere iniziano con un frontespizio che include il titolo del report, la data di invio, il nome dell'autore o dell'organizzazione ed eventuali loghi o marchi pertinenti.



- **Sintesi:** molti rapporti iniziano con un riepilogo esecutivo, che fornisce una panoramica concisa dei principali risultati, raccomandazioni e conclusioni del rapporto. Spesso è la prima sezione che i decisori leggono.
- **Sommario:** un sommario elenca le principali sezioni e sottosezioni del rapporto, insieme ai numeri di pagina. Aiuta i lettori a navigare facilmente nel documento.
- **introduzione:** pone le basi per il rapporto spiegandone lo scopo, la portata e gli obiettivi. Fornisce inoltre informazioni di base e contesto per il contenuto del rapporto.
- **Metodologia:** nei rapporti tecnici o di ricerca, la sezione relativa alla metodologia spiega come sono stati raccolti, analizzati i dati e eventuali metodi di ricerca o test utilizzati.
- **Risultati o risultati:** questa sezione presenta i principali risultati, risultati o osservazioni del rapporto. Spesso include dati, grafici, diagrammi o altri supporti visivi per supportare i risultati.
- **Discussione:** questa sezione interpreta i risultati e fornisce l'analisi. Può affrontare le implicazioni dei risultati, delle tendenze, dei confronti e di qualsiasi teoria o quadro rilevante.
- **Raccomandazioni:** Se applicabile, deve fornire raccomandazioni chiare e attuabili basate sui risultati. Le raccomandazioni dovrebbero essere specifiche, pratiche e in linea con gli obiettivi del rapporto.
- **Conclusione:** riassumere i punti chiave del rapporto e riaffermare le principali conclusioni. Ciò rafforza i principali punti del rapporto.
- **Requisiti di formattazione:** seguire le linee guida di formattazione come dimensione del carattere, interlinea, margini e numerazione delle pagine. La coerenza nella formattazione garantisce un aspetto professionale e raffinato.
- **Grafica e immagini:** utilizzare grafica, diagrammi, tabelle e altri elementi visivi quando appropriato per migliorare la presentazione di dati e informazioni. Assicurarsi che le immagini siano etichettate e referenziate correttamente.
- **Linguaggio e stile:** utilizzare un linguaggio chiaro e conciso e mantenere uno stile di scrittura coerente in tutto il rapporto. Evita termini tecnici o gergali che potrebbero non essere familiari al pubblico.
- **Considerazione del pubblico:** Adattare il contenuto, il tono e il livello di dettaglio tecnico del report alle esigenze e alle aspettative del pubblico previsto.





Figura 3.2.39. Equipaggiamento per la protezione personale.

Fonte: <https://safetyculture.com/topics/ppe-safety/>

- **Protezione respiratoria e misure di ventilazione** sono essenziali quando si ha a che fare con una potenziale esposizione a fumi di saldatura, gas o particolato. È necessario indossare respiratori adeguatamente selezionati per affrontare il tipo e il livello specifico di contaminanti presenti, garantendo al tempo stesso che l'area di ispezione mantenga una buona ventilazione per abbassare la concentrazione di fumi di saldatura, riducendo così il rischio di esposizione per inalazione.
- **Protezione dal rumore:** I processi di saldatura possono generare elevati livelli di rumore. È obbligatorio l'uso di protezioni per l'udito, come tappi per le orecchie o cuffie antirumore, per prevenire danni all'udito.
- **Protezione per gli occhi:** Per proteggersi da potenziali pericoli, quali detriti volanti, scintille e radiazioni ultraviolette (UV) o infrarosse (IR), sono essenziali occhiali o caschi per saldatura con lenti adeguate.
- **Illuminazione adeguata:** Un'illuminazione adeguata è fondamentale per un'ispezione accurata; l'area di ispezione dovrebbe essere ben illuminata; si consiglia di utilizzare una lampada da lavoro portatile o lampade da ispezione quando necessario.
- **Sicurezza elettrica:** Dovrebbero essere considerati i rischi elettrici associati alle apparecchiature di saldatura; i cavi di alimentazione, le spine e i collegamenti elettrici devono essere ispezionati per eventuali danni. È obbligatoria una corretta messa a terra delle apparecchiature di saldatura.



- **Prevenzione della caduta di oggetti:** Quando si lavora in quota o in posizioni elevate, è necessario utilizzare dispositivi di protezione anticaduta come imbracature e corde di sicurezza per prevenire incidenti.
- **Movimentazione di strumenti e attrezzature:** gli strumenti e le attrezzature devono essere utilizzati con attenzione per evitare tagli, abrasioni o lesioni; gli strumenti devono essere mantenuti in buone condizioni di lavoro.
- **Sicurezza antincendio:** I rischi di incendio devono essere evitati; è quindi necessario che gli estintori siano nelle vicinanze dell'area di lavoro e che il personale sia istruito sul loro utilizzo; tutti i materiali infiammabili devono essere rimossi dall'area di lavoro.
- **Superfici calde:** I componenti saldati e le superfici vicine possono diventare estremamente caldi, evitare il contatto con queste superfici calde per evitare ustioni; quando necessario è necessario utilizzare barriere termiche o materiali isolanti.
- **Accesso sicuro:** Deve essere garantito un accesso sicuro alle aree di ispezione, utilizzando piattaforme stabili, scale o impalcature secondo necessità per raggiungere aree di lavoro elevate.
- **Esposizione chimica:** I prodotti chimici o i detersivi utilizzati nel processo di ispezione rappresentano potenziali pericoli, pertanto si consiglia di seguire le corrette procedure di manipolazione e smaltimento, nonché di indossare guanti adeguati quando necessario.
- **Comunicazione:** Dovrebbe essere garantita una comunicazione chiara con tutto il personale nelle vicinanze dello spazio di lavoro, è incoraggiato l'uso di segnali, segnali o comunicazioni verbali per garantire che tutti siano consapevoli delle attività in corso.
- **Procedure di emergenza:** Il personale deve avere familiarità con il piano di risposta alle emergenze (ubicazione delle uscite di emergenza, kit di pronto soccorso, stazioni per il lavaggio degli occhi e docce di emergenza).
- **Formazione:** sono essenziali aggiornamenti regolari della formazione sulla sicurezza; è obbligatorio che il personale operante nell'area di lavoro abbia ricevuto un'adeguata formazione sui protocolli di sicurezza e ispezione della saldatura.
- **Valutazione del rischio:** La valutazione del rischio è necessaria prima di iniziare qualsiasi attività, vale a dire la necessità di identificare i potenziali pericoli e implementare misure di controllo che attenueranno i rischi.

Requisiti dei dispositivi di protezione individuale (DPI).

I requisiti dei dispositivi di protezione individuale (DPI) per l'ispezione delle saldature, come quelli per la saldatura stessa, sono fondamentali per garantire la sicurezza e il benessere delle persone coinvolte nel processo di ispezione. I requisiti specifici dei DPI possono variare in base a fattori quali il tipo di saldatura da ispezionare, l'ambiente di ispezione e i potenziali pericoli presenti.

Protezione per gli occhi:

- **Occhiali o occhiali protettivi:** Proteggono gli occhi da detriti volanti, scintille e altri potenziali pericoli per gli occhi.

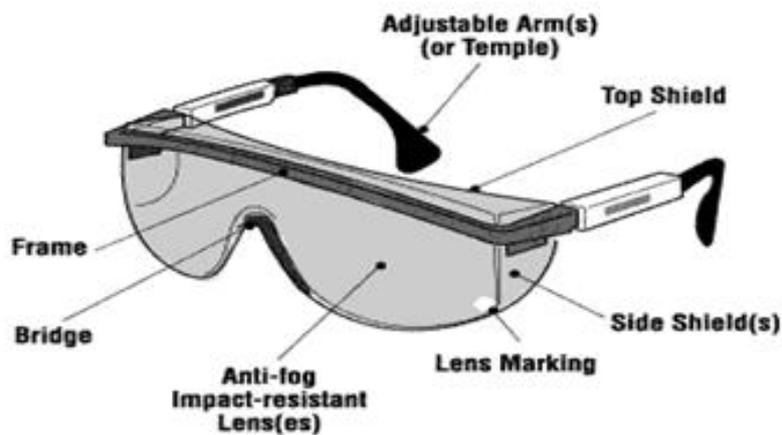


Figura 3.2.40. Occhiali per saldatura.

Fonte: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/prevention/ppe/glasses.html>

- **Casco per saldatura:** Uno schermo per saldatura con un paraluce adeguato protegge dalla luce intensa, dai raggi UV e IR prodotti durante le ispezioni di saldatura.

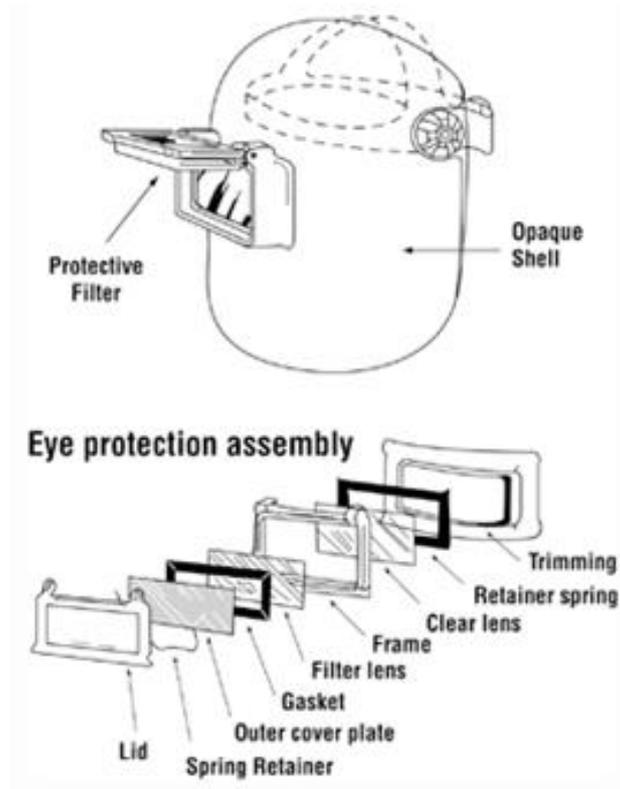


Figura 3.2.41. Casco per saldatura.

Fonte: [https://www.ccohs.ca/oshanswers/safety\\_haz/welding/ppe.html](https://www.ccohs.ca/oshanswers/safety_haz/welding/ppe.html)

- **Visiera:** Quando è necessaria una protezione aggiuntiva per il viso, è possibile indossare una visiera sopra occhiali o occhiali protettivi.

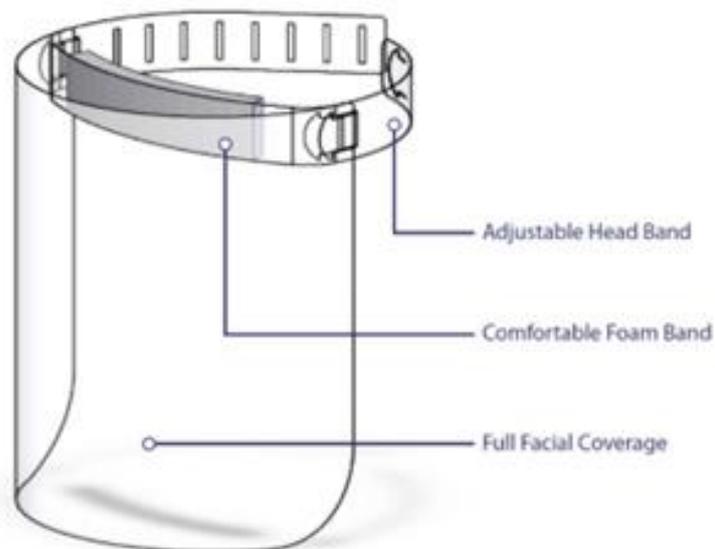


Figura 3.2.42. Visiera. Fonte: <https://www.ardentdisplays.com/protective-face-shields/>



### Protezione respiratoria:

- **Respiratori:** A seconda dell'ambiente di ispezione, gli ispettori della saldatura potrebbero aver bisogno di respiratori per proteggersi da fumi di saldatura, gas o particolato. Il tipo di respiratore richiesto dipende dagli specifici contaminanti presenti.

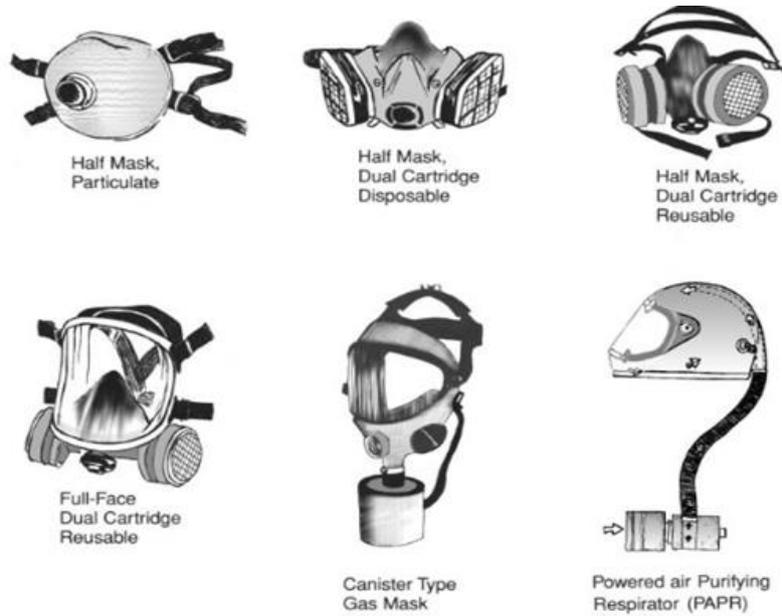


Figura 3.2.43. Protezione respiratoria. Fonte: <https://pesticidestewardship.org/respirators/air-purifying-respirators/>

### Protezione dell'udito:

- **Tappi per le orecchie o paraorecchie:** Le ispezioni delle saldature possono avvenire in ambienti rumorosi. La protezione dell'udito aiuta a prevenire danni all'udito derivanti dall'esposizione prolungata a livelli di rumore elevati.

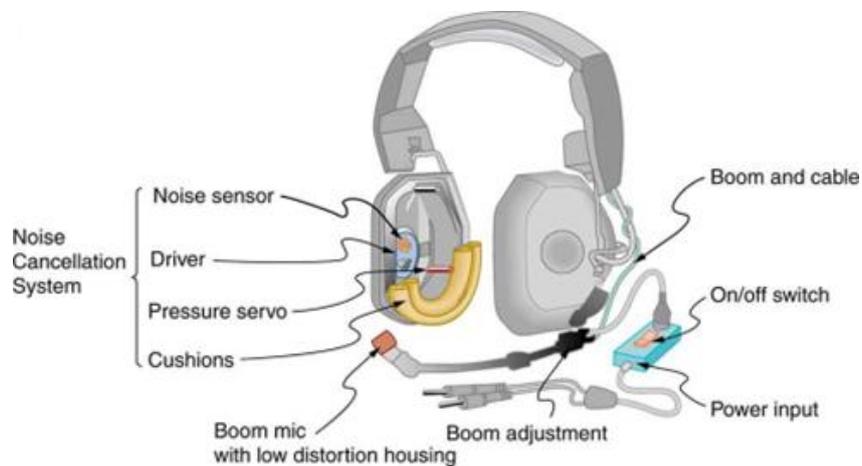


Figura 3.2.44. Cuffie antirumore per la protezione dell'udito. Fonte: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/ear-defenders-guide>

Figura 3.2.42. Visiera. Fonte: <https://www.ardentdisplays.com/protective-face-shields/>

#### Protezione respiratoria:

- **Respiratori:** A seconda dell'ambiente di ispezione, gli ispettori della saldatura potrebbero aver bisogno di respiratori per proteggersi da fumi di saldatura, gas o particolato. Il tipo di respiratore richiesto dipende dagli specifici contaminanti presenti.



Figura 3.2.43. Protezione respiratoria. Fonte: <https://pesticidestewardship.org/respirators/air-purifying-respirators/>

#### Protezione dell'udito:

- **Tappi per le orecchie o paraorecchie:** Le ispezioni delle saldature possono avvenire in ambienti rumorosi. La protezione dell'udito aiuta a prevenire danni all'udito derivanti dall'esposizione prolungata a livelli di rumore elevati.

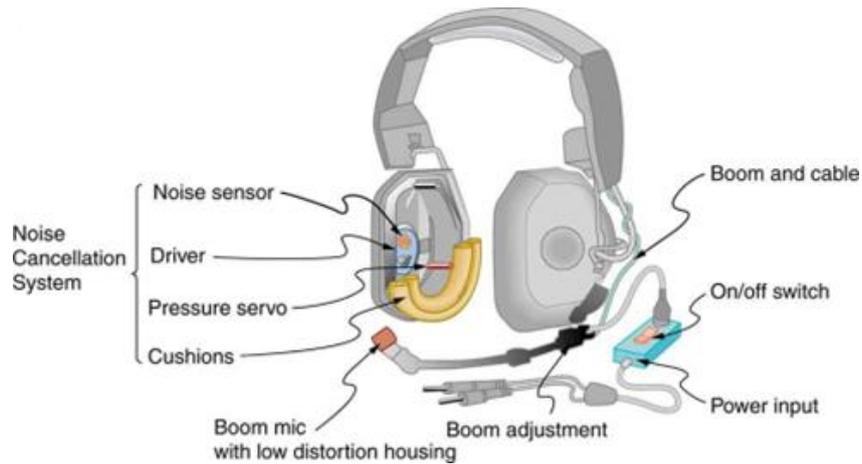


Figura 3.2.44. Cuffie antirumore per la protezione dell'udito. Fonte: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/ear-defenders-guide>

### Protezione della mano

- **Guanti da saldatura:** Sono essenziali per proteggere le mani da ustioni, scintille e superfici calde. Potrebbero essere necessari guanti isolanti per maneggiare componenti caldi.



Figura 3.2.45. Guanti da saldatura. Fonte: <https://www.amazon.de/YEZIHJ-Schwei%C3%9Fhandschuhe-H%C3%A4ndeschuttschwei%C3%9Fhandschuhe-Lederarbeitsschwei%C3%9Ferhandschuhe-Hitzebest%C3%A4ndiger/dp/B0B7R39GGC>

### Protezione del corpo:

- **Indumenti ignifughi:** Gli ispettori devono indossare indumenti ignifughi per proteggersi da ustioni e scintille. Ciò include camicie, pantaloni e tute ignifughe.

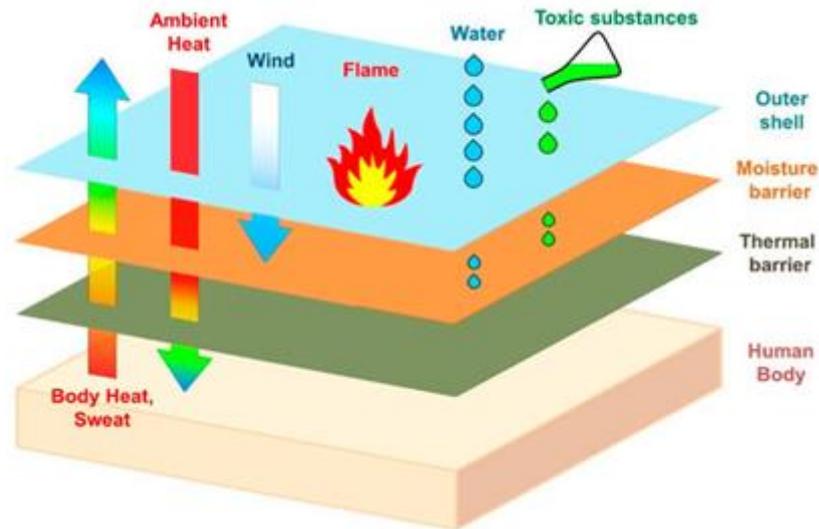


Figura 3.2.46. Schema di costruzione di un assemblaggio multistrato utilizzato negli indumenti protettivi dei vigili del fuoco. Fonte: Renard M, Puzkarz AK. Modellazione del trasferimento di calore attraverso indumenti protettivi multistrato dei vigili del fuoco utilizzando la fluidodinamica computazionale assistita da microtomografia a raggi X e termografia. Materiali. 2022

- **Giacca per saldatura:** Una giacca per saldatura fornisce una protezione aggiuntiva per la parte superiore del corpo.



Figura 3.2.47. Giacca per saldatura. Fonte: <https://www.eskosafety.com/shop/esko-fusion-leather-welders-jacket/>



### Protezione del piede:

- **Stivali di sicurezza con punta in acciaio:** Gli stivali di sicurezza con punta in acciaio proteggono i piedi dalla caduta di oggetti e dal metallo caldo.



Figura 3.2.48. Stivali di sicurezza con punta. Fonte: <https://www.ctcgroupe.com/en/your-markets/personal-protective-equipment/ce-marking-current-footwear-ppe-and-standards-162-1.html>

### Protezione della testa:

- **Cappello duro:** In ambienti con rischi dall'alto o con rischio di caduta di oggetti, è necessario indossare un elmetto di protezione.

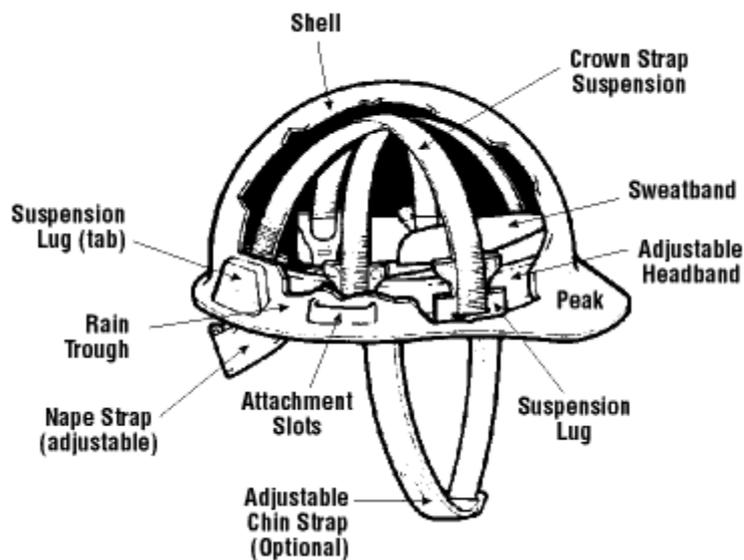


Figura 3.2.49. Casco di saldatura.

Fonte: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/prevention/ppe/headwear.html>



### Protezione anticaduta:

- Se l'ispezione prevede lavori in quota, potrebbero essere necessari dispositivi di protezione anticaduta come imbracatura di sicurezza e cordino.



Figura 3.2.50. Componenti di un sistema anticaduta.

Fonte: <https://www.karam.in/blog/revisiting-concept-fall-protection>

È importante notare che i requisiti dei DPI possono variare a seconda delle normative locali, degli standard di settore e delle politiche aziendali. Prima di iniziare qualsiasi ispezione di saldatura, le persone dovrebbero ricevere una formazione sull'uso e la manutenzione corretti dei DPI, nonché una comprensione dei rischi specifici associati all'attività di ispezione. Inoltre, i DPI devono essere sempre in buone condizioni, regolarmente ispezionati e sostituiti se danneggiati o usurati.

### 3.3. Formazione pratica nella preparazione dei campioni (Mhte)

La formazione pratica per la preparazione dei materiali comuni è qui presentata secondo la metodologia presentata nella figura 1.2.2.

#### 3.3.1. Acciai al carbonio

Nel caso degli acciai al carbonio la preparazione deve seguire le metodologie base (vedi Capitolo 1.2.1.). Di seguito l'esempio di preparazione dell'acciaio al carbonio secondo la norma ISO 16060:2003.

Campionamento: Taglio di un campione di dimensioni adeguate (in funzione del montaggio). I metodi di taglio adatti sono il taglio a getto d'acqua, il taglio meccanico con raffreddamento, ecc. Figura 3.3.1. mostra una macchina da taglio utilizzata per test di microscopia.



Figura 3.3.1.1. Metcon Servocut 302

Montaggio: È adatto anche il montaggio a caldo o a freddo (vedi capitolo 1.2.2.), il diametro del cilindro di montaggio è solitamente di 25-50 mm. Durante il montaggio a caldo è necessario seguire il manuale della macchina per il montaggio a caldo. Un esempio di macchina per il montaggio a caldo è mostrato nella Figura 3.3.1.2.



Figura 3.3.1.2. Macchina per il montaggio a caldo

Durante il processo di montaggio a freddo è necessario seguire il manuale del materiale di montaggio (resina bicomponente).



Figura 3.3.1.3. Esempio di processo di montaggio a freddo

Macinazione: durante la macinazione sotto il raffreddamento ad acqua utilizzare una molatrice adatta.

Macinazione fine: utilizzare carta o fogli abrasivi SiC con grana 200 -1000. Nel caso di molatura manuale seguire il capitolo 1.2.5, mentre per l'utilizzo della molatrice (fig. 3.3.1.4) fare riferimento al manuale d'uso. Utilizzare carta o pellicola abrasiva a seconda dei requisiti della macchina con la stessa grana del processo di levigatura manuale.



Figura 3.3.1.4. Esempio di rettificatrice

Lucidatura: la lucidatura viene effettuata tramite lucidatrice utilizzando un tampone lucidante con particelle adesive. I tamponi per lucidatura possono essere di diverse forme e qualità (feltro, velluto, lino, ecc.). L'abrasivo può essere diamante o allumina ( $9-0,05\mu\text{m}$ ) in sospensione acquosa.

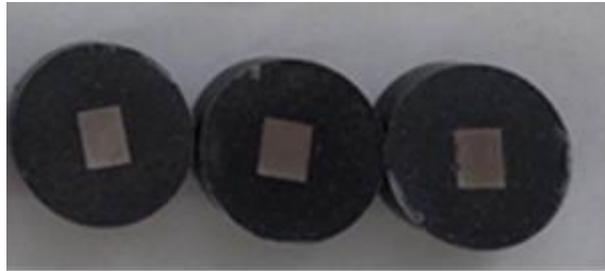


Figura 3.3.1.5. Campioni di prova lucidati

Pulizia: la superficie dell'acciaio al carbonio deve essere pulita con metanolo per rimuovere tutta la contaminazione e l'acqua (vedere Capitolo 1.2.4.)

Asciugatura: l'essiccazione deve avvenire sotto un flusso di aria mite.

Acquaforte: suggerito Nital (vedi Tabella 1.2.8.1.)

### 3.2.7. Acciaio inossidabile austenitico

La preparazione dei campioni di prova dell'acciaio inossidabile è la stessa del caso dell'acciaio al carbonio. Bisogna fare attenzione durante il taglio perché gli acciai inossidabili austenitici hanno una bassa durezza. Si consiglia il taglio con getto d'acqua, se disponibile. Durante la molatura e lucidatura, la preparazione deve essere effettuata con attenzione, per mantenere la microstruttura dell'acciaio inossidabile austenitico. La preparazione dell'acciaio inossidabile deve essere effettuata secondo la norma ISO 16060:2003.

Acquaforte: soluzione consigliata di acido ossalico (vedi Tabella 1.2.8.1.)

### 3.2.8. Rame e leghe

La preparazione dei campioni di rame e leghe è solitamente la stessa degli acciai e altri metalli, ma durante la lucidatura si suggerisce l'uso di particelle abrasive diamantate ( $3-0,05\mu\text{m}$ ). Il processo di pulizia e asciugatura è lo stesso del caso degli acciai al carbonio. La preparazione del rame e delle sue leghe deve essere effettuata secondo la norma ISO 16060:2003.

Acquaforte: suggerito Acido cloridrico-cloruro di ferro (vedi Tabella 1.2.8.1.)

### 3.2.9. Alluminio e leghe

La preparazione dei campioni di prova dell'alluminio e delle sue leghe è la stessa del caso dell'acciaio al carbonio. Bisogna fare attenzione durante il taglio perché l'alluminio e le leghe hanno una bassa durezza. Si consiglia il taglio con getto d'acqua, se disponibile. Realizzare la preparazione dell'alluminio sulla base della norma ISO 16060:2003.

Acquaforte: mordenzante Kroll suggerito (vedi Tabella 1.2.8.1.)



### 3.2.10. Titanio e leghe

La preparazione dei campioni di titanio e sue leghe è solitamente la stessa degli acciai e di altri metalli, ma durante la lucidatura si suggerisce l'uso di particelle abrasive diamantate ( $3-0,05\mu\text{m}$ ). Nell'ultima fase della lucidatura si dovrebbe utilizzare la sospensione diamantata combinata con  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Il processo di pulizia e asciugatura è lo stesso del caso degli acciai al carbonio. Realizzare la preparazione del titanio e delle leghe sulla base della norma ISO 16060:2003.

Acquaforse: acquaforse di Keller (vedi Tabella 1.2.8.1.).

### 3.3.6. Polimeri

La preparazione dei campioni di polimeri è diversa da quella dei metalli, quindi richiede una preparazione più attenta.

Campionamento: è possibile trovare un'ampia gamma di polimeri con diverse durezza a temperatura ambiente. Pertanto, la raccomandazione è di tagliare i polimeri alla temperatura di transizione vetrosa, che nel caso dei polimeri saldabili è superiore alla temperatura ambiente. È possibile utilizzare metodi di taglio meccanico con raffreddamento ad acqua o taglio manuale a bassa velocità.

Montaggio: è molto importante conoscere la temperatura di fusione o rammollimento del polimero insieme alla temperatura di polimerizzazione. La temperatura di montaggio a caldo deve essere inferiore alla temperatura di polimerizzazione, rammollimento e fusione. Il materiale di montaggio deve essere scelto in base al polimero, in modo che non si verifichino reazioni chimiche tra loro. Il processo di montaggio tiene conto della capacità chimica e della temperatura di reazione del materiale di montaggio.

Smerigliatura e macinazione fine: utilizzare carte o fogli abrasivi SiC con grana 200 -1000. In caso di macinazione manuale seguire il capitolo 1.2.5. Nel caso della rettificatrice seguire il manuale della macchina. A seconda delle esigenze della macchina utilizzare carte o fogli abrasivi con la stessa grana della levigatura manuale. Figura 3.3.1.4. mostra una rettificatrice. Utilizzare una bassa velocità di rotazione durante la preparazione del polimero.

Lucidatura: la lucidatura viene effettuata mediante lucidatrice, utilizzare un tampone lucidante con particelle adesive. I tamponi per lucidatura possono essere di diverse forme e qualità (feltro, velluto, lino, ecc.). L'abrasivo può essere diamante o allumina ( $9-0,05\mu\text{m}$ ) in sospensione acquosa.

Pulizia: solo pulizia con acqua.

Asciugatura: l'asciugatura deve avvenire in corrente d'aria ambiente (verificare la temperatura ambiente).

Acquaforse: nessuna acquaforse.

### Riferimenti:

[3.3.1] Bramfitt BL., Bencoter AO: Guida del metallografo, pratiche e procedure per ferri e acciai. 1°. Ed. ASM Internazionale, Parco dei Materiali, 2002. 169–244.

[3.3.2] McCall JL., Mueller WM: Preparazione dei campioni metallografici, microscopia ottica ed elettronica 1°. ed. Plenum Press, New York, 1973. 1–348.



[3.3.3] Vander Voort GF: Principi e pratica della metallografia. 4°. ed. ASM Internazionale, Parco dei Materiali, 2007. 1–258.

[3.3. 4] ISO/TR 16060:2003 Prove distruttive su saldature in materiali metallici — Agenti aggressivi per esame macroscopico e microscopico, 2003

### 3.3. Norme per la valutazione della qualità dei giunti realizzati mediante saldatura e tecniche correlate

#### 3.2.1. EN ISO 17639 Prove distruttive su saldature in materiali metallici — Esame macroscopico e microscopico delle saldature

Questo standard fornisce raccomandazioni per la preparazione dei campioni, le procedure di test e i loro obiettivi principali per l'esame macroscopico e microscopico. Definisce l'esame macroscopico e microscopico, come descritto di seguito:

- esame macroscopico: l'esame del campione preparato deve essere effettuato mediante test visivo senza ingrandimento o al massimo con ingrandimento 50x. La superficie esaminata del campione può essere incisa o non incisa.
- esame microscopico: l'esame del campione preparato deve essere effettuato al microscopio e utilizza un ingrandimento compreso tra 50x e 500x. La superficie esaminata del campione può essere incisa o non incisa.

Lo standard definisce la condizione personale, la persona che esegue il test è l'esaminatore.

Lo standard fornisce tutte le istruzioni per la preparazione del campione di prova, compresi i metodi di finitura superficiale e di incisione con gli agenti mordenzanti indicati. Elenca le norme di sicurezza da osservare durante l'esame. L'esame della superficie preparata può essere effettuato sui campioni incisi o non incisi in conformità con gli standard pertinenti. La norma suggerisce la forma del rapporto sperimentale.

#### 3.4.2. ISO/TR15608 Saldatura - Linee guida per un sistema di raggruppamento di materiali metallici

Questa norma comprende un sistema uniforme per la classificazione dei materiali metallici destinati alla saldatura. Il sistema di raggruppamento può essere utilizzato per trattamenti termici o prove sui materiali.

I materiali a cui si fa riferimento nella presente norma sono i seguenti: acciai, alluminio e leghe, rame e leghe, nichel e leghe, titanio e leghe, zirconio e leghe, ghise.



Gli acciai vengono classificati in funzione del carico di snervamento minimo, in base ai processi di lavorazione o di trattamento termico e in base al loro contenuto di leghe di Cromo e Nichel oppure in base alla microstruttura (es. austenite, ferrite, martensite).

L'alluminio, il rame, il nichel, il titanio, lo zirconio e le rispettive leghe, sono classificati in base ai loro elementi di lega. Le ghise vengono classificate in base alla microstruttura. La presente norma fa riferimento alle seguenti norme ISO/TR 20172 Saldatura – Sistema di raggruppamento dei materiali – Materiali europei, ISO/TR 20173 Saldatura – Sistema di raggruppamento dei materiali – Materiali americani, ISO/TR 20174 Saldatura – Sistema di raggruppamento dei materiali – Materiali giapponesi.

3.4.3. ISO/TR 17671-2 Saldatura – Raccomandazioni per la saldatura di materiali metallici – Parte 2: Saldatura ad arco di acciai ferritici

Questo standard fornisce una guida per la saldatura ad arco manuale, semi-meccanizzata, meccanizzata e automatica di acciai ferritici, esclusi gli acciai inossidabili ferritici, in tutte le forme di prodotto. Vengono forniti dettagli sui possibili fenomeni dannosi che possono verificarsi con consigli sui metodi con cui possono essere evitati.

Questa parte della norma ISO/TR 17671 è generalmente applicabile a tutti gli acciai ferritici ed è appropriata indipendentemente dal tipo di produzione coinvolta, sebbene la norma applicativa possa prevedere requisiti aggiuntivi.

3.4.4. ISO/TR 16060 Prove distruttive su saldature di materiali metallici – Agenti aggressivi per esame macroscopico e microscopico

Questo standard fornisce una revisione dei materiali mordenzanti più importanti (con composizione chimica) per l'esame macroscopico e microscopico dei materiali saldati in conformità con la norma EN ISO 17639. Lo standard suggerisce i metodi di preparazione della superficie prima dell'attacco e fornisce requisiti aggiuntivi.

3.4.5. EN ISO 17637 Controlli non distruttivi delle saldature - Controllo visivo dei giunti saldati per fusione

Questa norma specifica i test visivi delle saldature per fusione nei materiali metallici. Può anche essere applicato al test visivo del giunto prima della saldatura. Il controllo non distruttivo delle saldature è applicabile a:

- Produttori di giunti saldati per fusione



- Autorità di ispezione in vari settori come l'edilizia, l'automotive, l'ingegneria generale, l'aerospaziale e il marittimo
- Enti di formazione e qualificazione autorizzati
- Enti di certificazione

Lo standard garantisce che i test visivi delle saldature per fusione nei materiali metallici siano uniformi e ripetibili, indipendentemente da nuovi processi, pratiche standard riviste, apparecchiature di nuova concezione o modifiche ai materiali utilizzati. Può quindi contribuire al miglioramento della qualità della saldatura mediante test visivi precisi ed efficienti dei giunti saldati per fusione.

3.4.6. ISO 15614-1 Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici — Prova della procedura di saldatura — Parte 1: Saldatura ad arco e a gas di acciai e saldatura ad arco di nichel e leghe di nichel

Questo standard specifica come una specifica preliminare della procedura di saldatura viene qualificata mediante test della procedura di saldatura. La norma ISO 15614-1 si applica alla saldatura di produzione, alla saldatura di riparazione e alla saldatura di accumulo. La norma ISO 15614-1 definisce le condizioni per l'esecuzione delle prove delle procedure di saldatura e l'intervallo di qualificazione delle procedure di saldatura per tutte le operazioni pratiche di saldatura nell'ambito della qualificazione di questo documento.

Lo scopo principale della qualificazione della procedura di saldatura è dimostrare che il processo di giunzione proposto per la costruzione è in grado di produrre giunti aventi le proprietà meccaniche richieste per l'applicazione prevista.

Vengono forniti due livelli di test della procedura di saldatura al fine di estendere il campo di applicazione ai giunti saldati. Nel livello 2, l'entità dei test è maggiore e gli intervalli di qualificazione sono più restrittivi rispetto al livello 1. I test procedurali effettuati al livello 2 qualificano automaticamente per i requisiti del livello 1, ma non viceversa. Quando in un contratto o in una norma applicativa non è specificato alcun livello, si applicano tutti i requisiti del livello 2.

Questo standard si applica alla saldatura ad arco e a gas degli acciai in tutte le forme di prodotto e alla saldatura ad arco di nichel e leghe di nichel in tutte le forme di prodotto.

La saldatura ad arco e a gas è coperta dai seguenti processi in conformità alla norma ISO 4063.



111 - saldatura ad arco metallico manuale (saldatura ad arco metallico con elettrodo rivestito);

114 - saldatura ad arco con anima tubolare autoprotetta;

12 - saldatura ad arco sommerso;

13 - saldatura ad arco di metallo con protezione gassosa;

14 - saldatura ad arco con protezione di gas con elettrodo non consumabile;

15 - saldatura ad arco plasma;

311 - saldatura ossiacetilenica.

I principi di questo documento possono essere applicati ad altri processi di saldatura per fusione.

Vale la pena ricordare che un numero di processo precedente non richiede un nuovo test di qualificazione secondo questo documento. Le specifiche e le qualifiche delle procedure di saldatura effettuate in conformità alle edizioni precedenti di questo documento possono essere utilizzate per qualsiasi applicazione per la quale è specificata l'edizione corrente. In questo caso restano comunque applicabili gli intervalli di qualificazione delle precedenti edizioni.

È anche possibile creare un nuovo intervallo di qualificazione WPQR (record di qualificazione della procedura di saldatura) secondo questa edizione basato sul WPQR qualificato esistente, a condizione che l'intento tecnico dei requisiti di prova di questo documento sia stato soddisfatto. Qualora debbano essere effettuate prove aggiuntive per rendere la qualificazione tecnicamente equivalente, è necessario eseguire la prova aggiuntiva solo su un provino.

3.4.7. ISO 15614-2 Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici — Prova della procedura di saldatura — Parte 2: Saldatura ad arco di alluminio e sue leghe  
Questo standard specifica come una specifica preliminare della procedura di saldatura viene qualificata mediante test della procedura di saldatura.

Si applica alla saldatura ad arco di alluminio lavorato e fuso e sue leghe. Non si applica alla saldatura di finitura di getti di alluminio, menzionata nella norma ISO 15614-4.



3.4.8. EN 10247 Esame micrografico del contenuto di inclusioni non metalliche degli acciai utilizzando immagini standard.

La presente bozza di norma europea definisce un metodo di valutazione microscopica delle inclusioni endogene non metalliche utilizzando grafici illustrati. Il metodo non si applica alle particelle di lunghezza o diametro inferiore a  $3,0\ \mu\text{m}$  o di larghezza inferiore a  $2,0\ \mu\text{m}$ . Se definite da una norma di prodotto o da un accordo tra le parti coinvolte per determinati prodotti speciali, le inclusioni con una larghezza inferiore a  $2,0\ \mu\text{m}$  possono essere valutate solo in base alla lunghezza. Le inclusioni con dimensioni eccedenti i limiti superiori sono riassunte nella presente norma. Si presuppone che, se le particelle sono allungate o se ci sono stringhe di particelle, siano parallele tra loro. Altre disposizioni non sono coperte da questo progetto di norma. Questo progetto di norma europea si applica ai campioni con una precipitazione microscopica che si avvicina alla distribuzione casuale.

Dai dati delle misurazioni ottenute con questo metodo è possibile stabilire una valutazione secondo altri standard. Il presente progetto di norma europea non si applica agli acciai automatici.

Vale la pena ricordare che il principio di base di questo progetto di norma europea consente la determinazione del contenuto di inclusioni non metalliche mediante tecniche di analisi delle immagini.

3.4.9. ISO 6520-1, Saldatura e processi affini - Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici - Parte 1: Saldatura per fusione

Questo standard serve come base per una classificazione e descrizione precisa delle imperfezioni di saldatura.

Per evitare qualsiasi confusione, le tipologie di imperfezioni vengono definite con spiegazioni ed illustrazioni ove necessario. Sono escluse le imperfezioni metallurgiche.

Un altro sistema per la designazione delle imperfezioni è possibile secondo ISO/TS 17845. Viene data una corrispondenza tra la classificazione esistente delle imperfezioni secondo ISO 6520-1 e il sistema di designazione secondo ISO/TS 17845.



#### 3.4.10. ISO/TS 17845 Saldatura e processi affini - Sistema di designazione delle imperfezioni

Questo standard fornisce un sistema per la designazione delle imperfezioni nella saldatura e nei processi affini. Si applica ai materiali metallici e non metallici (ad esempio termoplastici). Può essere utilizzato anche per altri scopi (ad esempio per la fondazione).

#### 3.4.11. ISO 6520-1 Saldatura e processi affini - Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici - Parte 1: Saldatura per fusione

Questo standard serve come base per una classificazione e descrizione precisa delle imperfezioni di saldatura. Per evitare qualsiasi confusione, le tipologie di imperfezioni vengono definite con spiegazioni ed illustrazioni ove necessario. Sono escluse le imperfezioni metallurgiche. Un altro sistema per la designazione delle imperfezioni è possibile secondo ISO/TS 17845. Viene data una corrispondenza tra la classificazione esistente delle imperfezioni secondo ISO 6520-1 e il sistema di designazione secondo ISO/TS 17845.

### **Riferimenti:**

[3.4.1] EN ISO 17637 Prove non distruttive delle saldature - Prove visive dei giunti saldati per fusione

[3.4.2] EN ISO 17639:2022 Prove distruttive su saldature in materiali metallici — Esame macroscopico e microscopico delle saldature 2022.

[3.4.3] ISO 15614-1:2017 Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici — Prova della procedura di saldatura — Parte 1: Saldatura ad arco e a gas di acciai e saldatura ad arco di nichel e leghe di nichel.

[3.4.4] EN 10247 Esame micrografico del contenuto di inclusioni non metalliche degli acciai utilizzando immagini standard

[3.4.5] ISO 6520-1 Saldatura e processi affini - Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici - Parte 1: Saldatura per fusione

3.4. Formazione pratica per l'identificazione della struttura del campione microscopico.

#### 3.5.1. Acciai al carbonio e bassoalegati

L'acciaio al carbonio e legato può essere prodotto con un'ampia gamma di proprietà. Per descrivere queste microstrutture è necessario identificare i costituenti presenti. I costituenti monofase includono austenite, ferrite, ferrite  $\delta$ , cementite, vari carburi di lega e martensite, nonché varie fasi intermetalliche, nitruri e inclusioni non metalliche.

I grani ferritici possono essere equiassici o allungati (nella direzione di laminazione). Negli acciai al carbonio, gli acciai completamente ferritici si ottengono solo quando il contenuto di carbonio è basso ( $C < 0,08$  % in peso). La ferrite è una fase morbida a bassa resistenza e se la dimensione del grano è fine si ottengono buona duttilità e formabilità.

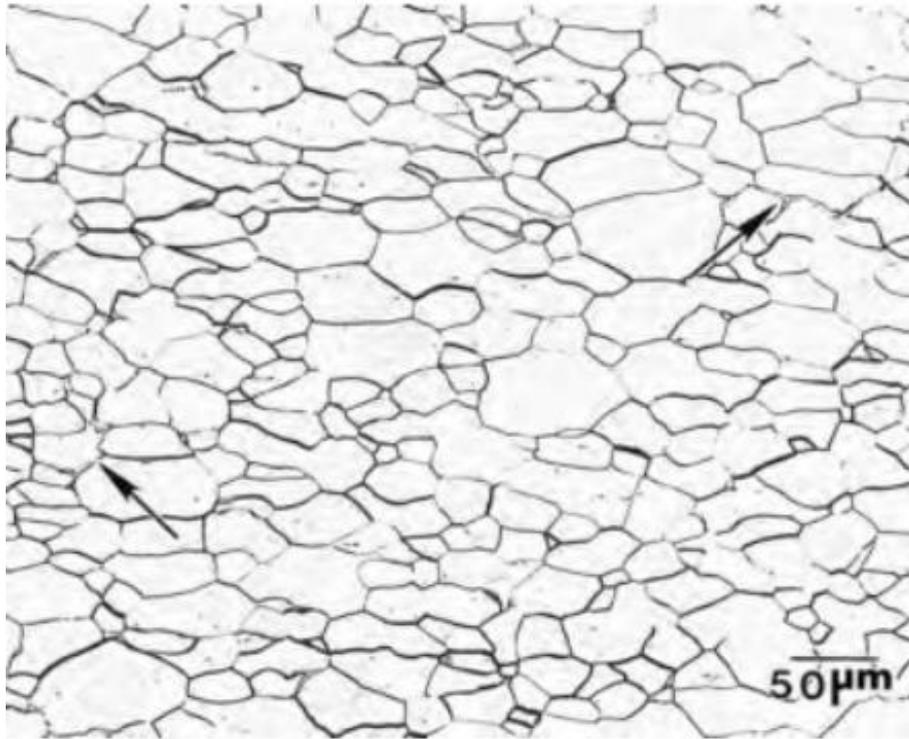


Fig. 3.5.1 – Acciaio bassolegato ( $C < 0,08$  % in peso). Struttura completamente ferritica. Acquaforde: Nital 2%..

Fonte: Laboratorio IIS

La maggior parte degli acciai non legati per applicazioni strutturali o di pressione (contenuto di C compreso tra 0,08 e 0,4 % in peso) sono costituiti da ferrite e perlite. La quantità di perlite è qualitativamente indicativa del contenuto di carbonio nella lega. Un contenuto di carbonio più elevato oltre il limite di solubilità del Fe (0,08 % in peso) significa una maggiore precipitazione di cementite ( $Fe_3C$ ) e di conseguenza una maggiore presenza di perlite (struttura lamellare di cementite e ferrite).

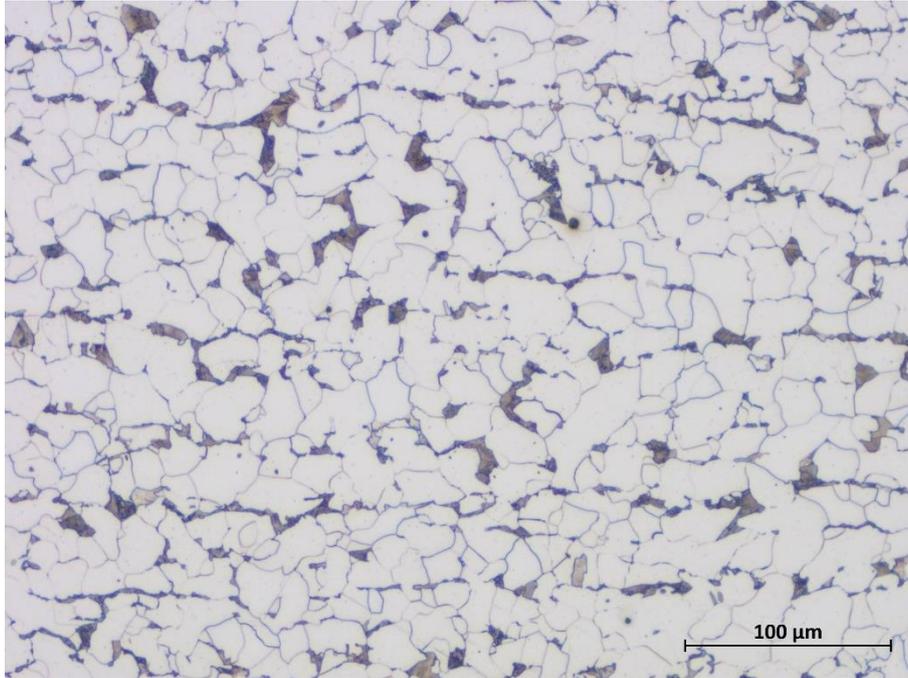


Fig. 3.5.2 – Acciaio al carbonio per caldaia e tubo del surriscaldatore (C = 0,2 % peso). Ferrite e perlite. Acquaforse: Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.

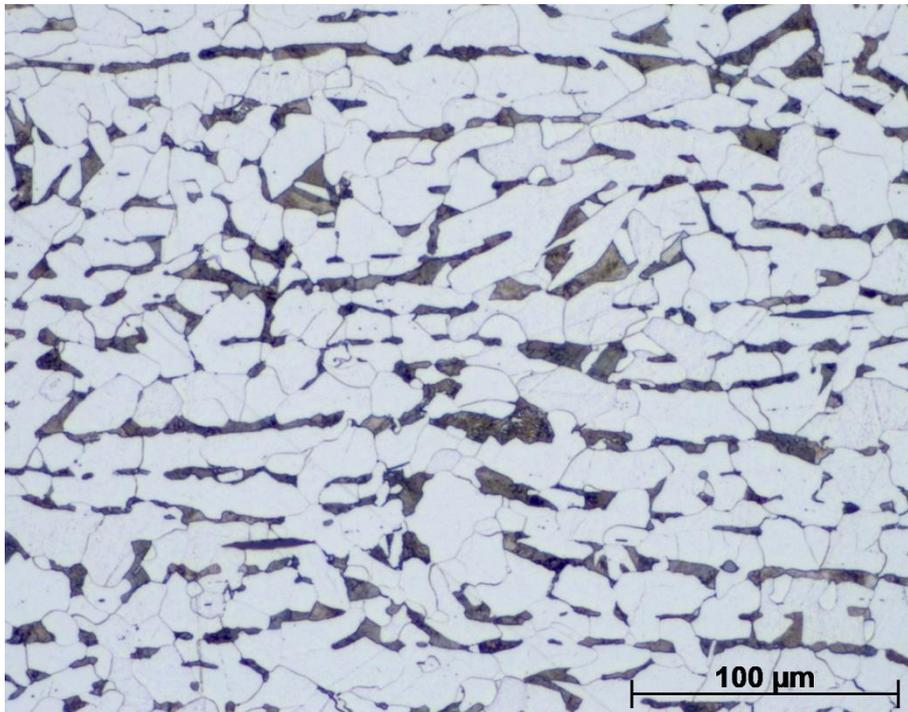


Fig. 3.5.3 – Acciaio al carbonio per applicazioni strutturali tipo S355J0 (C = 0,25 % peso). Ferrite e perlite. Acquaforse: Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.

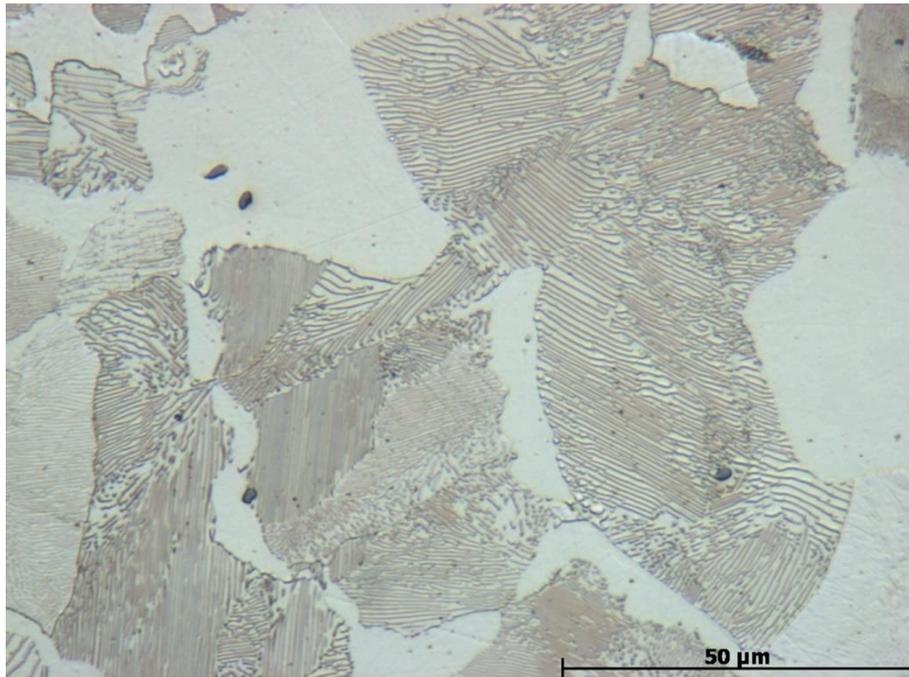


Fig. 3.5.4 – Particolare della perlite ad alto ingrandimento (500x) – Perlite è costituito da scaglie alternate di ferrite (bianca) e cementite (grigia/marrone). Acquaforse: Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.



Fig. 3.5.5 – Dettaglio di un acciaio a medio carbonio tipo C45 (C = 0,45 % peso) – Perlite isolate di ferrite. Acquaforse: Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.

2%. Fonte: Laboratorio IIS.

Le diverse forme allotropiche del ferro e la presenza di carbonio e altri elementi di lega consentono trasformazioni della struttura sottoposta a cicli termici dovuti a trattamenti termici o all'esecuzione di saldature.

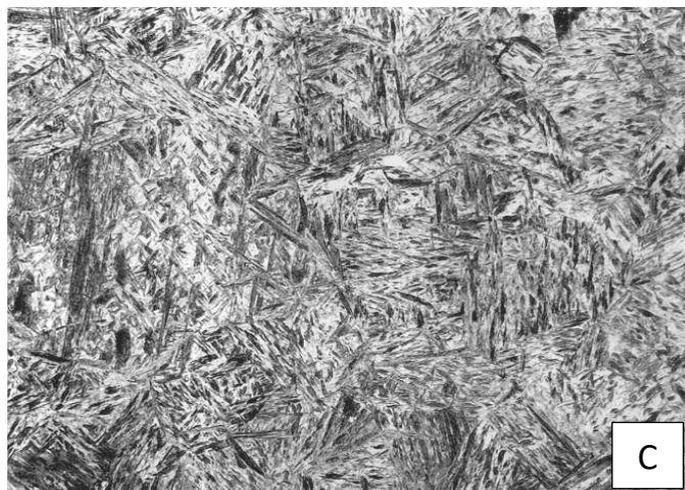
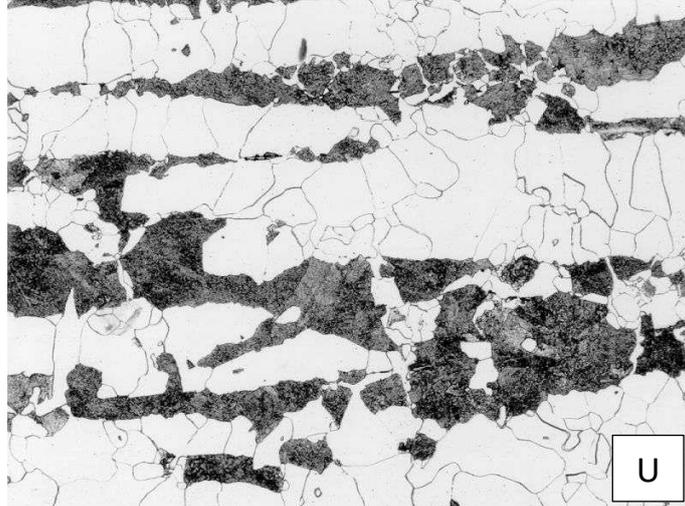


Fig. 3.5.6 – Dettagli dell'acciaio strutturale tipo S355J2 con diversi trattamenti termici. (a) ricotto; (b) Normalizzato; (c) Estinto. Acquaforte: Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.

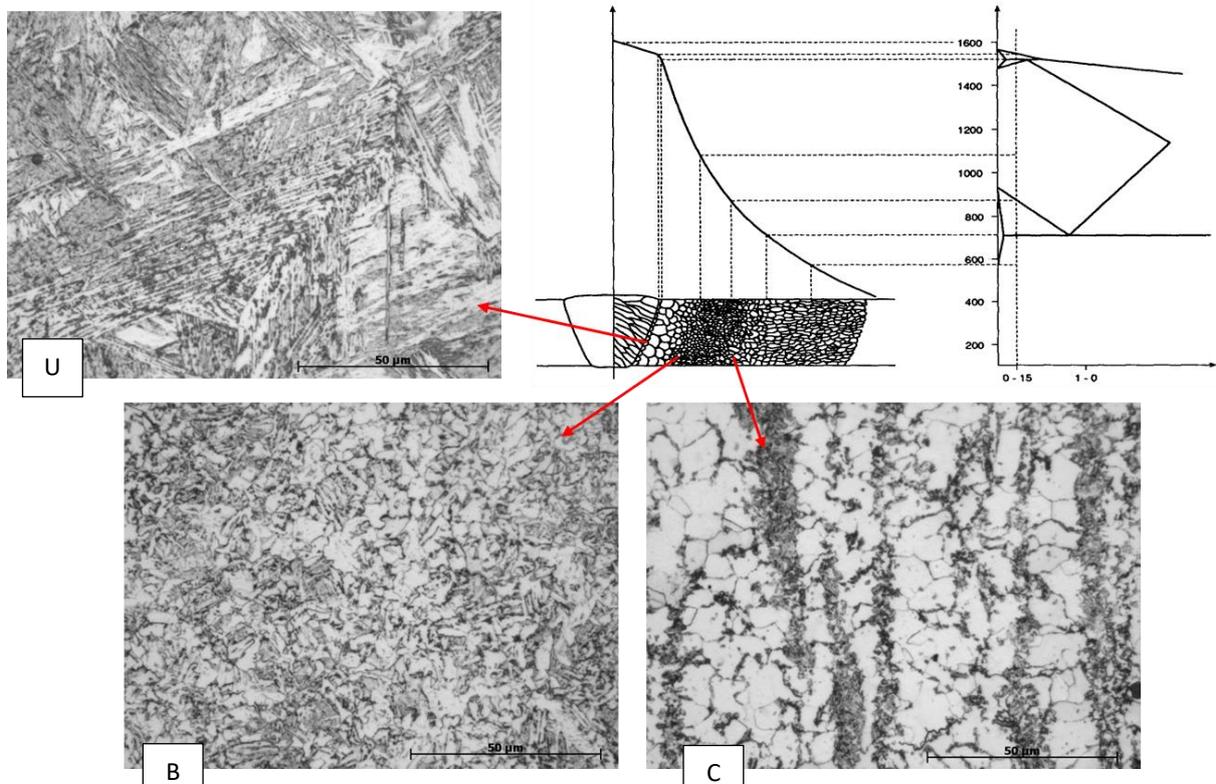


Fig. 3.5.7 – Dettaglio della zona termicamente alterata di un giunto di saldatura in acciaio bassoalegato. (A) Zona a grana grossa; (b) Zona a grana fine; (c) Zona di trasformazione parziale - Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.

### 3.2.1. Acciaio inossidabile austenitico

Aggiungendo elementi di lega all'acciaio è possibile modificare l'equilibrio delle fasi e la struttura finale. Alcuni elementi stabilizzano la fase ferritica (equivalente Cromo), mentre altri stabilizzano la fase austenitica (equivalente Nichel). La famiglia più importante degli acciai alto legati sono gli acciai inossidabili.

Se sono presenti grandi quantità di elementi stabilizzanti dell'austenite (carbonio, nichel, manganese, azoto), l'austenite può essere osservata a bassa temperatura.

Gli acciai inossidabili austenitici e gli acciai austenitici al manganese sono fleghe completamente austenitiche. Queste sono leghe monofase. L'austenite è anche una fase morbida a bassa resistenza; tuttavia, la lavorazione a freddo produce un indurimento.

Nell'acciaio inossidabile austenitico (serie AISI 300), la trasformazione allotropica allo stato solido è soppressa; e non sono presenti trasformazioni dovute ai cicli termici; pertanto, si osserva solo un ingrossamento dei grani nella zona termicamente alterata (HAZ).

Tipicamente, la zona di saldatura ha una struttura dendritica con circa il 5-10% di ferrite delta. La presenza della ferrite delta è molto importante perché migliora la resistenza alla fessurazione a caldo durante la saldatura.

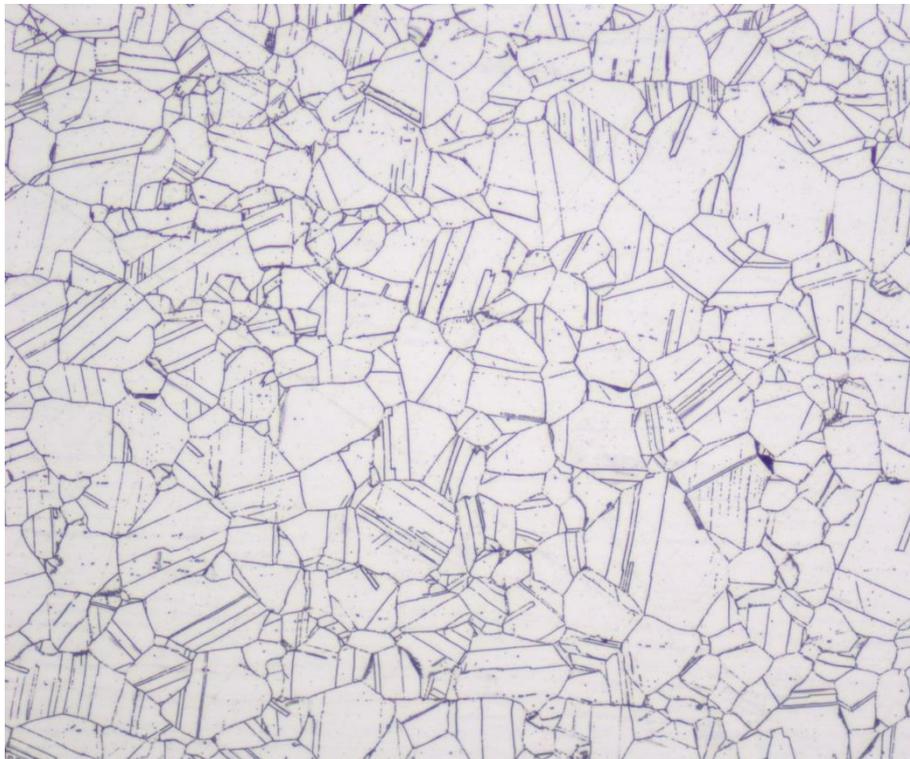


Fig. 3.5.8 – Particolare della struttura completamente austenitica (100x) – Grani austenitici poligonali. Mordenzante: soluzione elettrolitica di acido ossalico. Fonte: Laboratorio IIS.

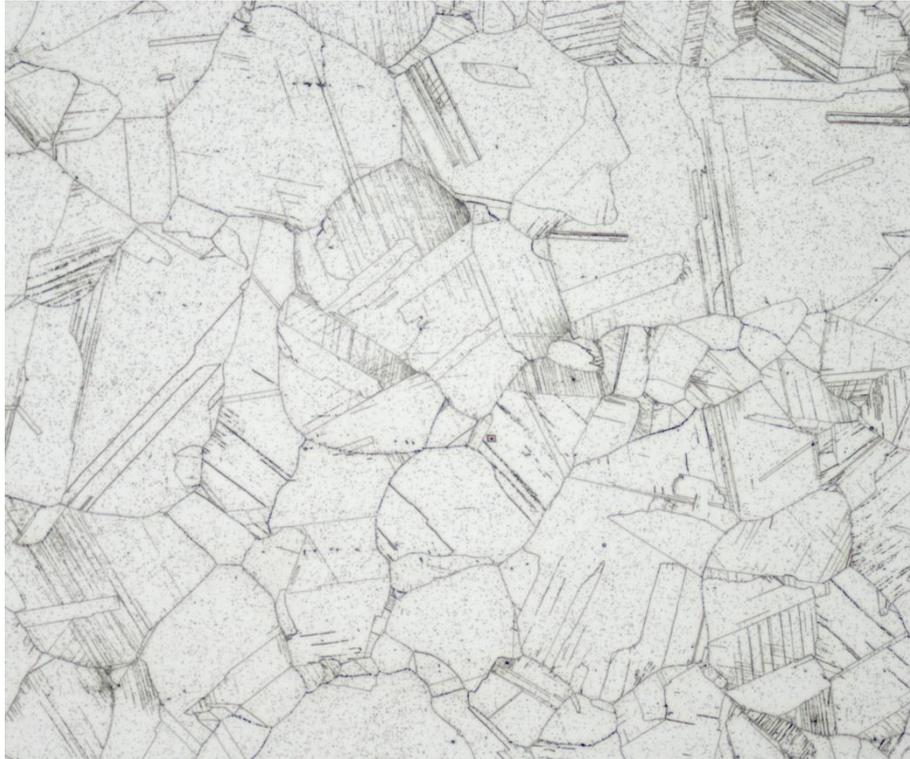


Fig. 3.5.9 – Particolare della struttura completamente austenitica (100x) con segni di indurimento – Grani austenitici poligonali. Mordenzante: soluzione elettrolitica di acido ossalico. Fonte: Laboratorio IIS.

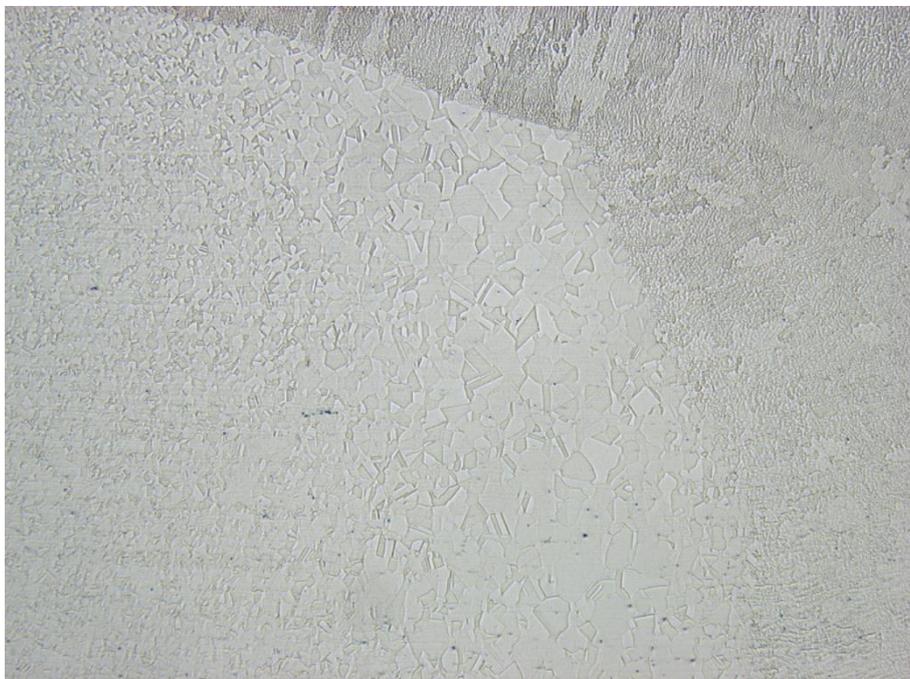


Fig. 3.5.10 – Zona termicamente alterata (ZTA) dell'acciaio inossidabile austenitico tipo AISI 316 (25 x). Grani grossolani in HAZ. Fonte: Laboratorio IIS.

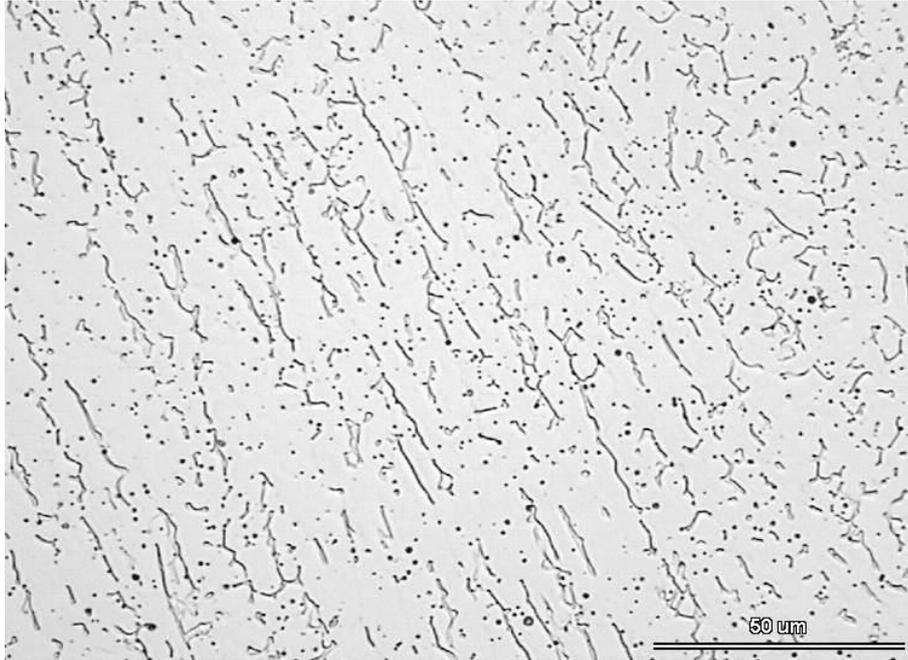


Fig. 3.5.11 – Zona di saldatura (WZ) di acciaio inossidabile austenitico tipo AISI 304. Struttura dendritica austenite con ferrite delta. Mordenzante: Soluzione elettrolitica di acido ossalico - Fonte: Laboratorio IIS.

Gli acciai inossidabili austenitici possono sensibilizzarsi se vengono trattati termicamente o utilizzati a temperature comprese tra 500 e 850°C. In alcune circostanze anche le zone delle saldature interessate dal calore possono essere sensibilizzate. I carburi di cromo sono visibili come punti scuri ai bordi dei grani.

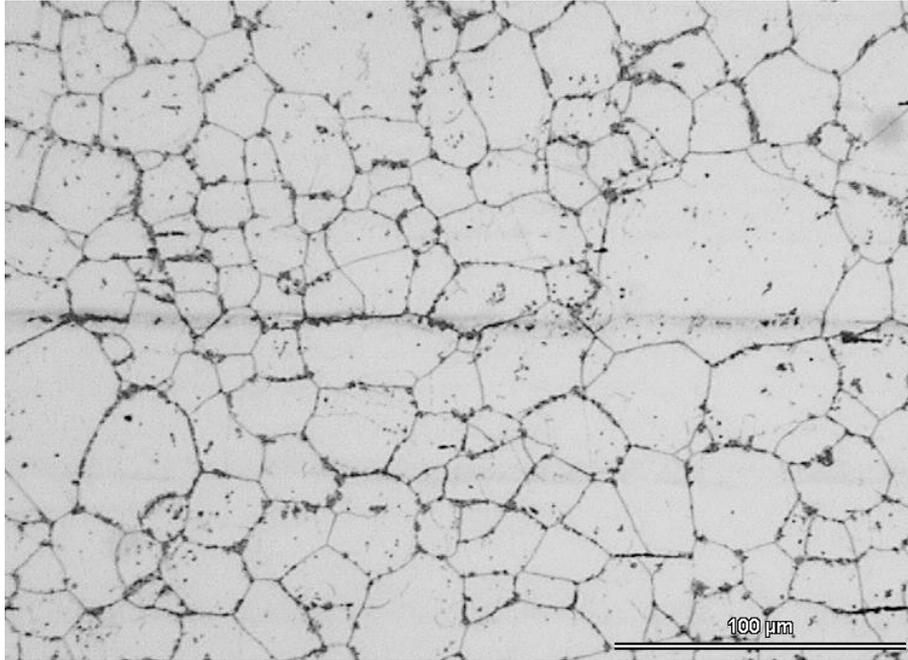


Fig. 3.5.12 – Particolare della struttura completamente austenitica (200x) con carburi di cromo ai bordi grano (sensibilizzazione). Mordenzante: Soluzione elettrolitica di acido ossalico - Fonte: Laboratorio IIS.

La fase Sigma è una fase intermetallica non magnetica composta principalmente da ferro e cromo, che si forma negli acciai inossidabili ferritici e austenitici durante una lunga esposizione a 550 – 950 °C; questo è un problema che si verifica durante il funzionamento o i trattamenti termici e non durante la saldatura.

La fase Sigma è dura e fragile. e quando presente negli acciai inossidabili è solitamente indesiderabile. Mediante attacco caustico elettrolitico (ad esempio soluzione NaOH o KOH) possiamo rilevare la fase sigma, mostrando così morfologie globulari disperse.

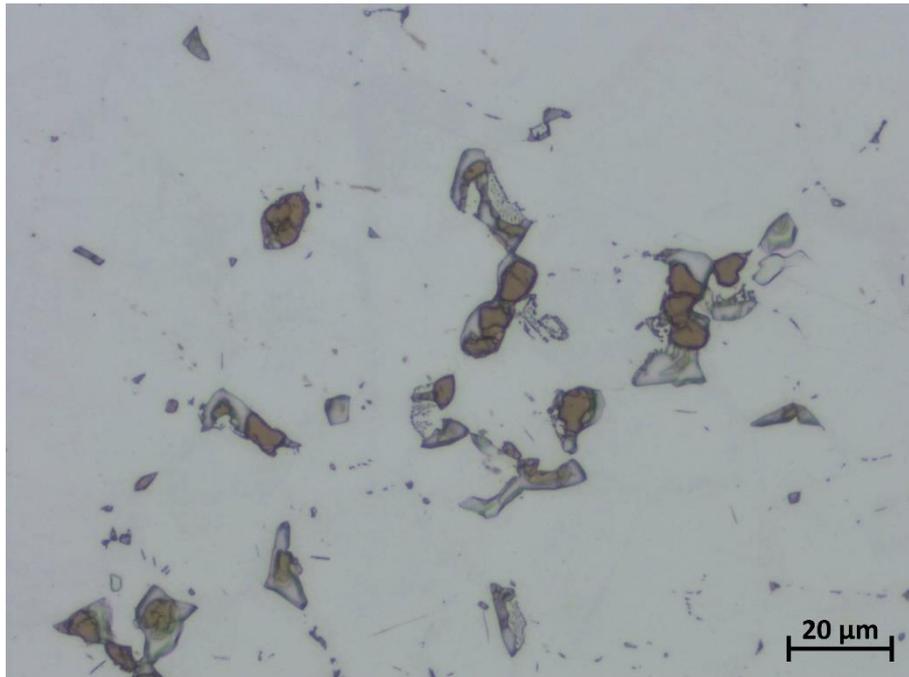


Fig. 3.5.13 – Fase Sigma su acciaio inossidabile austenitico tipo 304H. Mordenzante: soluzione elettrolitica di NaOH. Fonte: Laboratorio IIS.

### 3.2.2. Acciaio inossidabile duplex

Gli acciai inossidabili duplex si basano sul sistema di leghe Fe-Cr-Ni-N. La composizione chimica di queste leghe è stata modificata in modo tale che la microstruttura del metallo di base sia solitamente costituita per il 50% da ferrite e per il 50% da austenite.

A causa della complessa lega dei gradi duplex, possono verificarsi numerose reazioni di precipitazione in un intervallo di temperature inferiore a circa 1000 °C. Molti di questi precipitati infragiliscono le leghe duplex e devono essere evitati. Questi includono sigma ( $\sigma$ ), chi e alfa ( $\chi$  e  $\alpha$ ) prime, così come i nitruri di cromo.

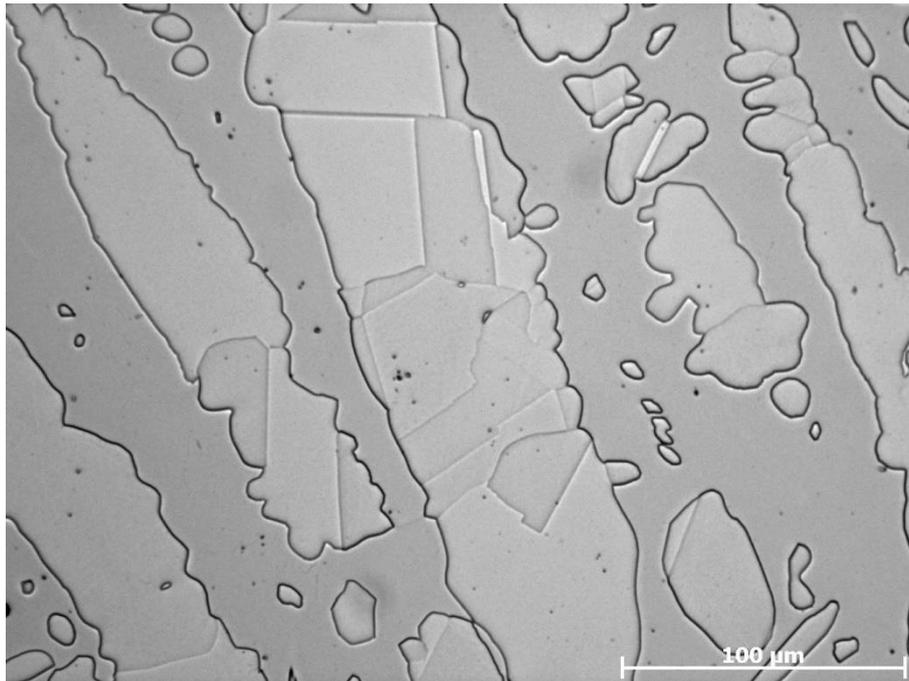


Fig. 3.5.14 – Acciaio inossidabile duplex – struttura bifasica di ferrite e austenite. Mordenzante: acido ossalico elettrolitico. Fonte: Laboratorio IIS.

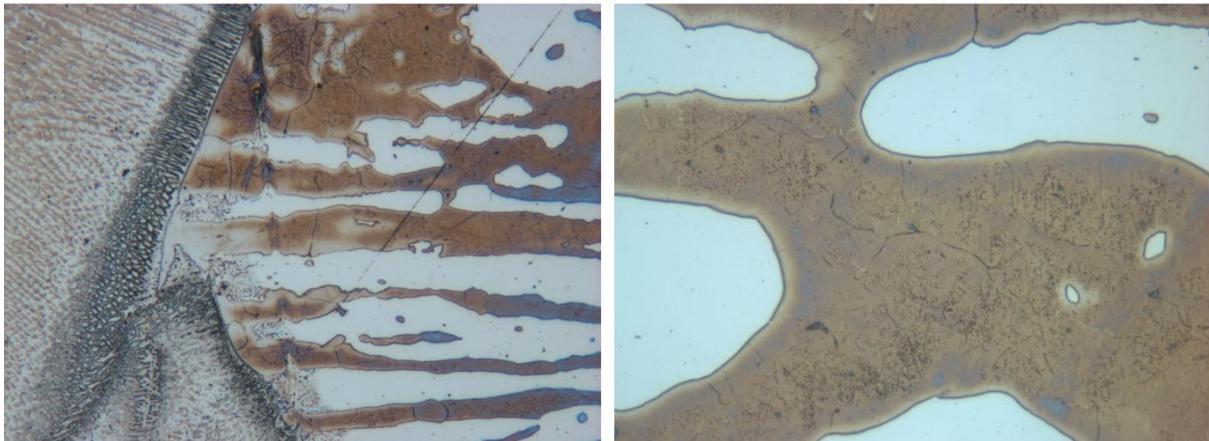


Fig. 3.5.15 – Dettagli della zona termicamente alterata di un duplex inossidabile (2205). Presenza di nitruri di cromo intragranulari in fase ferritica. Mordenzante: soluzione elettrolitica di NaOH. Fonte: Laboratorio IIS).

### 3.2.3. Struttura martensitica

Martensite è il termine generico per microstrutture formate dalla trasformazione di fase senza diffusione. Le trasformazioni martensitiche si verificano nell'acciaio e nelle leghe a base di ferro, nonché in diversi sistemi non ferrosi. La martensite viene solitamente prodotta in acciaio o leghe a base di ferro mediante rapido raffreddamento dell'austenite e si forma mediante un

meccanismo di taglio. La struttura finale è fine ed aciculare; in alcuni casi è possibile osservare il bordo del grano austenitico primario.

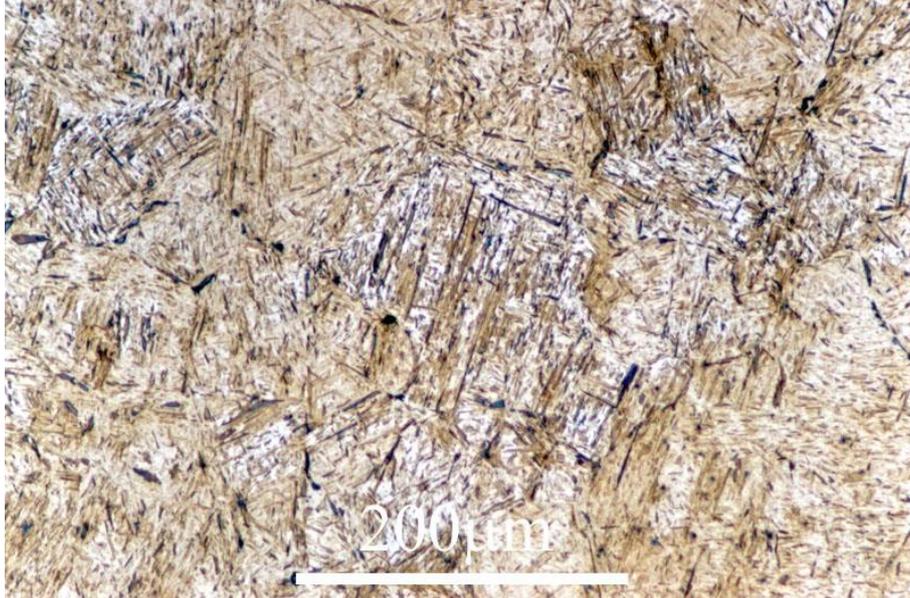


Fig. 3.5.16 – Particolari di acciaio a medio carbonio temperato. Acquaforde: Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.

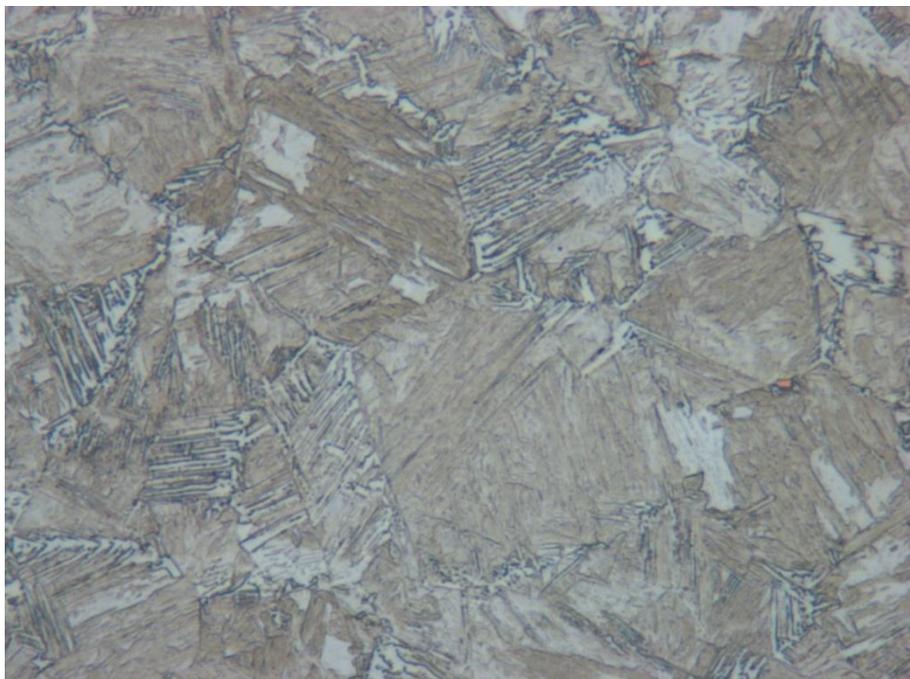


Fig. 3.5.17 – Dettagli dell'acciaio al Cromo Molibdeno (P91). Acquaforde: Vilella. Fonte: Laboratorio IIS.

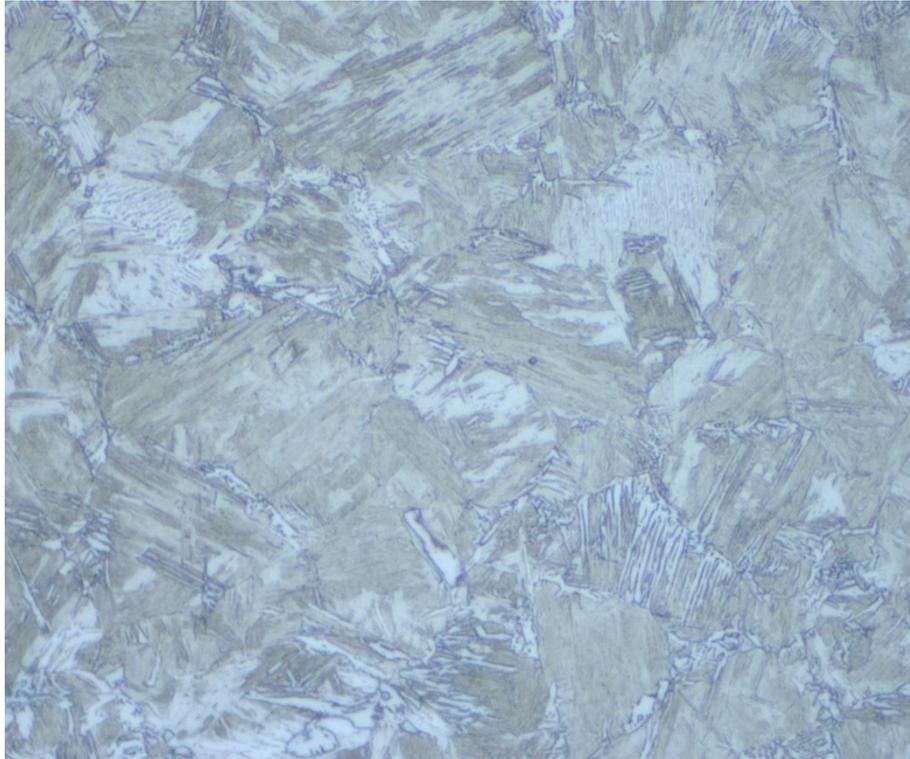


Fig. 3.5.18 – Dettagli di un acciaio balistico (Secure 500). Acquaforse: Nital 2%. Fonte: Laboratorio IIS.

## Riferimenti:

[3.5.1] *MANUALE ASM – Volume 9 – Metallografia e microstrutture*

[3.5.2] *Metallurgia della saldatura e saldabilità degli acciai inossidabili – John C. Lippold e Damian J. Kotechi.*

### 3.5. Dimostrazione di diversi tipi di strutture microscopiche (Mhte)

#### 3.2.1. Analisi delle saldature

L'esame macro viene comunemente eseguito su sezioni trasversali non montate attraverso giunti saldati e prevede tecniche di taglio e molatura grossolana/fine. La finitura risultante è adeguata per l'incisione, seguita dall'esame delle macro caratteristiche del giunto saldato.

Alcuni di essi sono elencati di seguito:

- Geometria della saldatura
- Numero e dimensione dei passaggi
- Profondità di penetrazione
- Estensione della ZTA (zona termicamente influenzata)
- Imperfezioni superficiali quali crepe, sottosquadri, gola eccessiva, convessità e angolo della punta della saldatura.



- Imperfezioni interne come cricche, porosità, inclusioni metalliche, mancanza di fusione, mancanza di penetrazione e scorie
- Imperfezioni della geometria del giunto come spazio tra le radici, faccia della radice, angolo di smusso e disallineamento

Per le tecniche di microsaldatura sarà necessaria una superficie lucida e otticamente piana. L'esame microscopico viene effettuato per lo studio delle imperfezioni delle saldature e delle caratteristiche microstrutturali quali:

- Vuoti (porosità, cavità da ritiro, microfessurazioni)
- Fasi speciali (fase sigma in acciaio inox)
- Granulometrie/struttura
- Struttura della saldatura
- Segregazione
- ZTA e struttura di base

### 3.2.2. Analisi di fase

La definizione di fase nel caso del materiale metallico è la successiva: la parte del sistema che è omogenea, ha proprietà chimicamente e fisicamente identiche e può essere separata da una superficie limite indipendente è chiamata fase. L'analisi della fase metallica è necessaria per caratterizzare le diverse fasi nei materiali metallici. L'analisi di fase è una tecnica speciale utilizzata nell'ingegneria della saldatura e nella scienza dei materiali per determinare le fasi di un campione mediante diversi metodi. Può essere condotto tramite diversi metodi, tra cui l'incisione colorata, la diffrazione di raggi X (XRD), la microscopia elettronica a scansione (SEM) e la microscopia elettronica a trasmissione (TEM), a seconda dei risultati richiesti. L'analisi della fase metallica è vitale per ottenere informazioni su specifici materiali saldati e di base.

Il risultato dell'analisi di fase del metallo base, della HAZ e del giunto fornisce informazioni sulle proprietà meccaniche attese e sull'idoneità della struttura saldata. Esempio: nella ZTA di un acciaio saldato a basso tenore di carbonio, la fase martensite è indesiderata. Un altro esempio sono le precipitazioni nella ZTA di un acciaio inossidabile austenitico. L'analisi di fase può anche informarci nel caso degli acciai al carbonio sul metodo di austenitizzazione (granulometria dell'austenite) perché dopo il raffreddamento anche se avviene una trasformazione di fase (ferrite, perlite) i grani mantengono la granulometria dell'austenite precedente.

### 3.2.3. Analisi della porosità

Nel giunto saldato più volte può essere presente porosità. Il motivo della porosità è l'assorbimento di azoto, ossigeno e idrogeno nel bagno di saldatura fuso che viene poi rilasciato durante la solidificazione per rimanere intrappolato nel metallo di saldatura. Il modo migliore per evitare la porosità è pulire il pezzo prima della saldatura. La tabella riassume alcuni tipi di metalli e i gas che causano porosità.

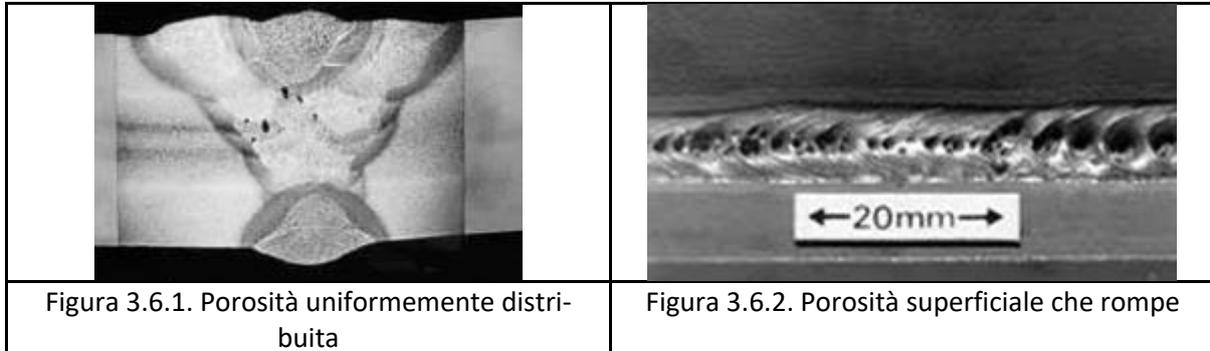
Tabella 3.6.1. I gas che causano la porosità

Metallo	Gas
Acciaio C-Mn	H, N, O
Acciaio inossidabile	H
Alluminio e leghe	H



Rame e leghe	H, N
Nichel e leghe	N
Titanio e leghe	H, N, O

La porosità può essere riscontrata nel giunto (Figura 3.6.1.) o in prossimità della superficie (Figura 3.6.2.) del giunto saldato.



Numerosi test non distruttivi sono adatti come l'ispezione con penetranti o particelle magnetiche, l'ispezione con ultrasuoni, il test a raggi X, ecc. È adatto il test distruttivo come esame microscopico (Figura 3.6.1.).

#### 3.2.4. Decarburazione

La decarburazione è un processo chimico in cui il carbonio dell'acciaio si unisce all'ossigeno. Questo processo si instaura a temperature elevate (superiori a 700 °C) (Figura 3.6.3.). Il problema con questo processo è che il contenuto di carbonio dell'acciaio diminuisce. Il processo avviene per diffusione e anche la diffusione è un limite di questo processo. La decarburazione solitamente può avvenire sulla superficie dell'acciaio e in uno strato sottile sotto la superficie. Lo strato decarburato ha un impatto negativo sulla microstruttura e sulle proprietà meccaniche del giunto saldato e può causare fessurazioni nel bordo del giunto e nel metallo base.



Figura 3.6.3. Superficie decarbonizzata dell'acciaio C-Mn

#### 3.2.5. Strutture in rame

La struttura del rame e delle leghe dipende dal processo di fabbricazione (colata, laminazione, ecc.). La struttura del rame fuso mostra una struttura dendritica e la struttura laminata e ricotta mostra una struttura a piccoli grani. Il rame può formare ossidi nella struttura che sono rilevabili mediante test al microscopio.

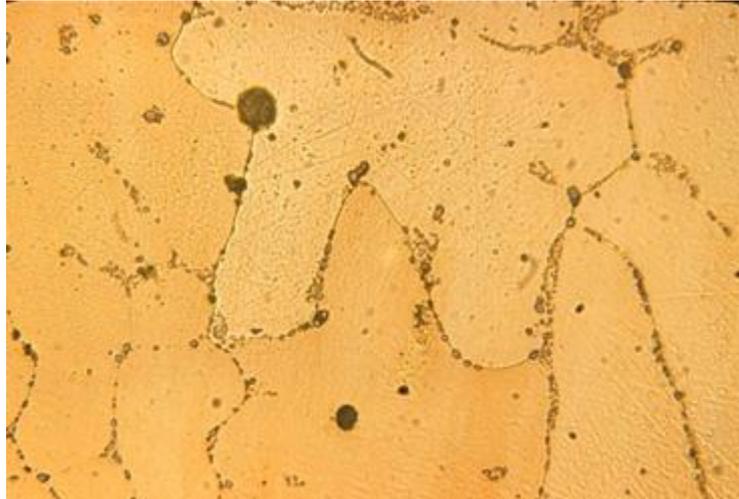


Figura 3.6.4. Microstruttura del rame con ossidi

### 3.2.6. Strutture in alluminio

Le strutture in alluminio e leghe dipendono dal processo di fabbricazione (fusione, laminazione, ecc.). La struttura del rame fuso mostra una struttura dendritica e la struttura laminata e ricotta mostra una struttura a piccoli grani. L'alluminio forma uno strato di ossido sulla superficie del pezzo. Nel caso dell'alluminio fuso, può trovare porosità sulla superficie dello strato di ossido poroso. Durante la saldatura, l'alluminio fuso reagisce con l'ossigeno e forma ossidi o porosità. Lo spessore dello strato di ossido con il tempo, la temperatura e l'ossigeno disponibile aumentano con la quantità. La sezione trasversale di un pezzo in alluminio è mostrata nella Figura 3.6.5.

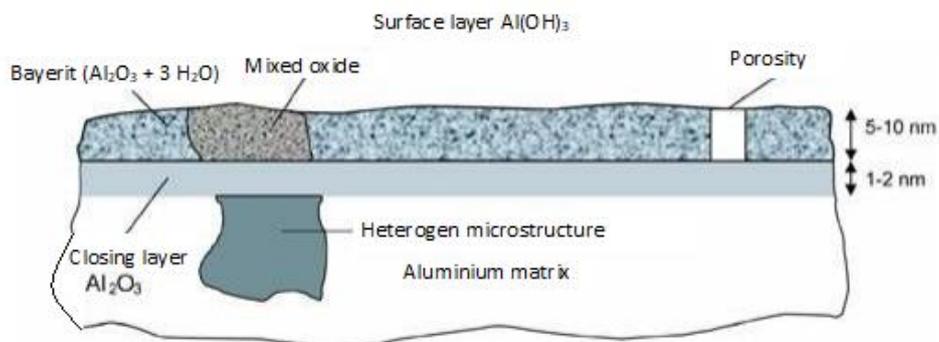


Figura 3.6.5. Sezione trasversale di un pezzo in alluminio

Il trattamento termico nel caso della speciale lega di alluminio può modificare la struttura superficiale. L'illustrazione del trattamento con soluzione e l'illustrazione del trattamento termico di indurimento per precipitazione per invecchiamento sono mostrati nella Figura 3.6.6.

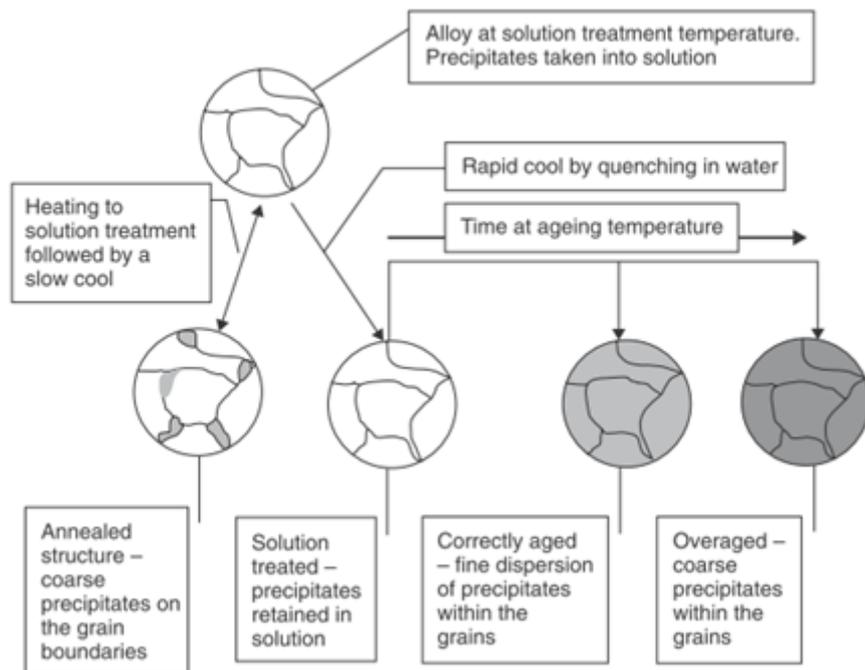


Figura 3.6.6. Il trattamento termico ha interessato le strutture

### 3.2.7. Strutture in ghisa

La metallurgia della ghisa è molto più complessa della sua economia. La ghisa è uno dei sistemi metallurgici più complessi. È interessante notare che le leghe ferro-carbonio (con meno del 2% di carbonio) sono metastabili. Il vero sistema stabile è il sistema di trasformazione di fase ferro-grafite (Fe-C). Le trasformazioni allo stato solido, su cui si basano i trattamenti termici della ghisa, sono simili a quelle applicate agli acciai e possono essere caratterizzate come:

- Al raffreddamento dei ferri ipoeutettici, ad una temperatura appena inferiore a 1147 °C la microstruttura è costituita da austenite proeutettica e ledeburite. Dopo un ulteriore raffreddamento, il carbonio in eccesso esce come cementite dall'austenite proeutettica ed eutettica. Infine, a 727 °C sia l'austenite eutettica che quella proeutettica si decompongono in perlite con un contenuto di carbonio pari a circa lo 0,77%.
- Durante il raffreddamento delle ghise eutettiche si forma la ledeburite. Dopo un ulteriore raffreddamento, il carbonio in eccesso fuoriesce dalla soluzione come cementite dall'austenite eutettica. Infine, a 727°C l'austenite eutettica si decompone in perlite.
- Al raffreddamento dei ferri ipereutettici, ad una temperatura appena inferiore a 1147 °C, la microstruttura è costituita da austenite proeutettica e ledeburite. Dopo un ulteriore raffreddamento, il carbonio in eccesso esce come cementite sotto forma di cementite proeutettoide e austenite eutettica. Infine, a 727°C l'austenite eutettica si decompone in perlite.

Se una lega di ferro supera il 2,11% di carbonio, il carbonio non deve nucleare dalla decomposizione dell'austenite, ma può invece formarsi direttamente dalla fusione mediante una reazione eutettica. Si noti che la cementite (Fe<sub>3</sub>C) può ancora nucleare nella fase eutettica più facilmente della grafite, ma con un raffreddamento sufficientemente lento, la grafite stessa può formarsi e crescere.

In base al processo di solidificazione ci siamo divisi in due gruppi. Le ghise bianche (Figura 3.6.7.) cristallizzano secondo il sistema Fe-C metastabile e le ghise grigie (Figura 3.6.8.) cristallizzano secondo il sistema Fe-C stabile.

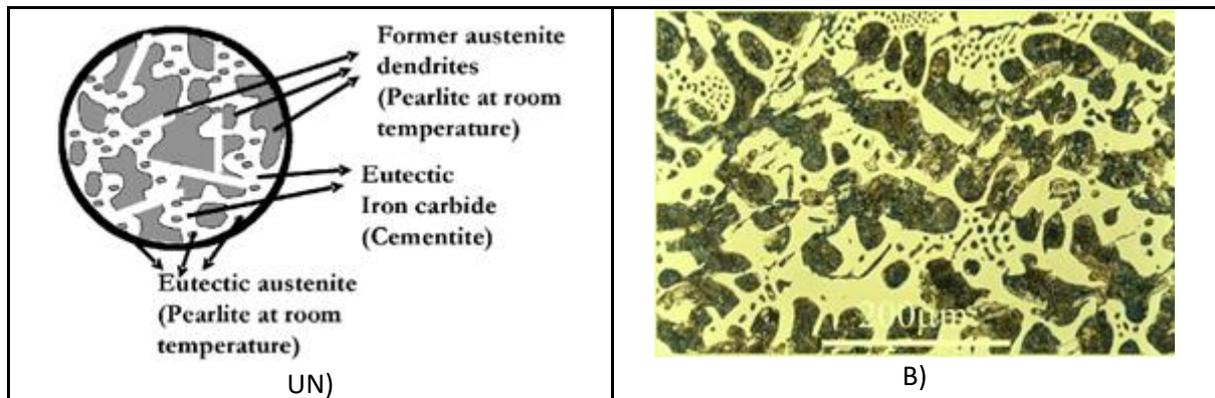


Figura 3.6.7. Ghisa bianca a) rappresentazione schematica, b) immagine al microscopio

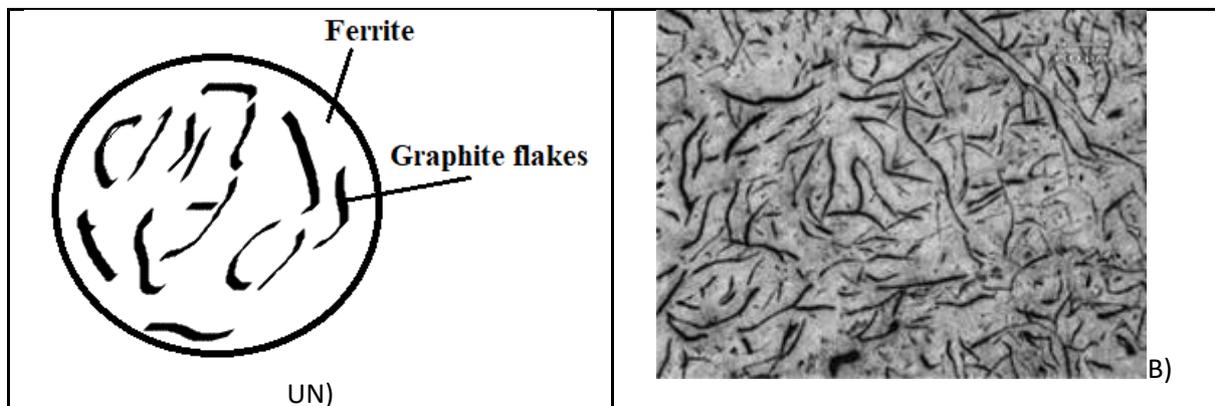


Figura 3.6.8. Ghisa grigia a) rappresentazione schematica, b) immagine al microscopio

La struttura in ghisa bianca può essere modificata con un processo di trattamento termico. La ghisa malleabile è realizzata mediante trattamento termico. Questa conversione, nella pratica abituale, è un processo in due fasi comunemente indicato come primo e secondo stadio di grafitizzazione. La prima fase di un tipico ciclo di trattamento termico consiste nel riscaldare i getti ad una temperatura compresa tra 900 e 950°C. La perlite si trasforma in austenite mediante un processo di rapida diffusione del carbonio dalla cementite nel ferro per formare una soluzione solida di carbonio in ferro gamma. I carburi massicci non vengono praticamente influenzati dal riscaldamento. Pertanto, al di sopra dell'intervallo eutettoidico (ma al di sotto dell'eutettico) il ferro è costituito da carburi massicci nell'austenite. Dopo la prima fase di grafitizzazione, la struttura di una ghisa malleabile è costituita da austenite e grafite (Figura 3.6.9.).

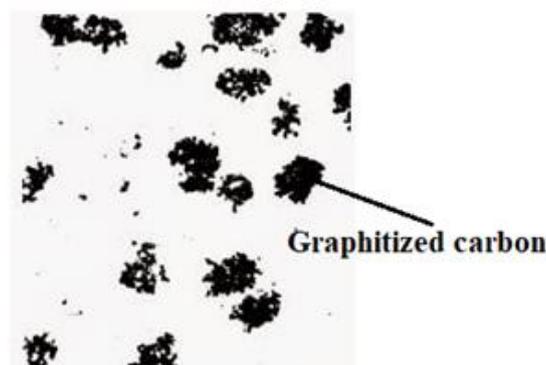


Figura 3.6.9. Ghisa malleabile ferritica

### Riferimenti

3.6.1. Gene Mathers: La saldatura dell'alluminio e delle sue leghe, Woodhead Publishing Ltd. USA 2002.

3.6.2. Saldatura per ingegneri progettisti, CWB Group, Canadian Welding Bureau 2006. ISBN 0-9739175-0-4

3.6.3. John C. Lippold; Metallurgia della saldatura e saldabilità, John Wiley & Sons, Inc, Canada, 2015.

## 3.6. Dimostrazione delle modalità di preparazione dei campioni per l'esame metallografico

3.2.1. Test macroscopici delle fasi di preparazione dei campioni metallografici:

1. Campionamento: un campione di prova di dimensioni adeguate deve essere tagliato (vedere Capitolo 1.2.1.) lentamente sotto raffreddamento ad acqua (Figura 3.7.1.). Se disponibile, è possibile utilizzare il taglio a getto d'acqua.

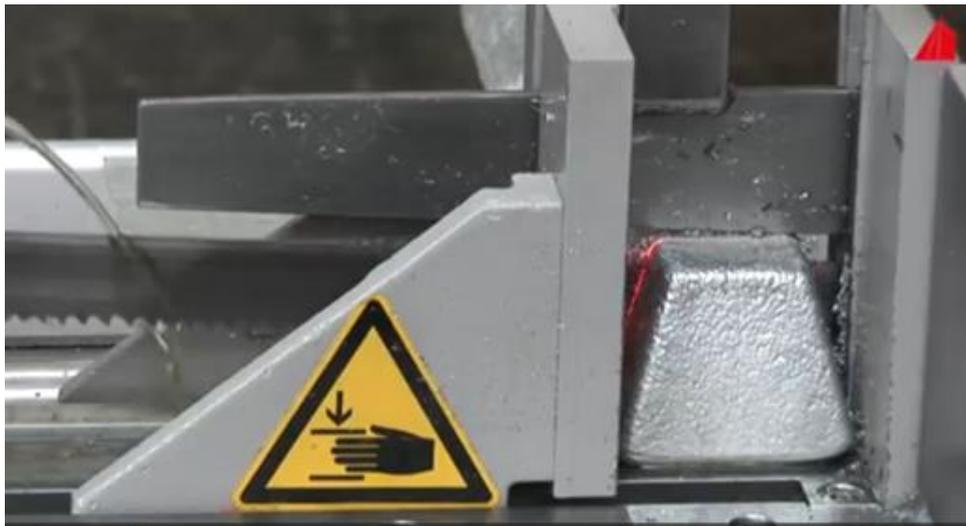


Figura 3.7.1. Taglio meccanico con raffreddamento ad acqua

2. Montaggio: dipende dalle dimensioni e dalla geometria del campione. Nel caso dell'esame macroscopico, il campione, che può essere tenuto in mano, può essere preparato senza montaggio (il montaggio è visto nel Capitolo 1.2.2.).

3. Marcatura: il campione di prova deve essere marcato per essere identificato durante il processo di preparazione (vedere capitolo 1.2.3.).

4. Molatura: macinazione con carta SiC passo dopo passo su carta a grana più fine come descritto nel capitolo 1.2.5.



Figura 3.7.2. Rettifica

5. Pulizia: lavaggio sott'acqua, seguito da soffiaggio d'aria (vedere capitolo 1.2.4.)
6. Acquaforte: se necessario, in base al tipo di analisi prevista (vedi Capitolo 1.2.8.).

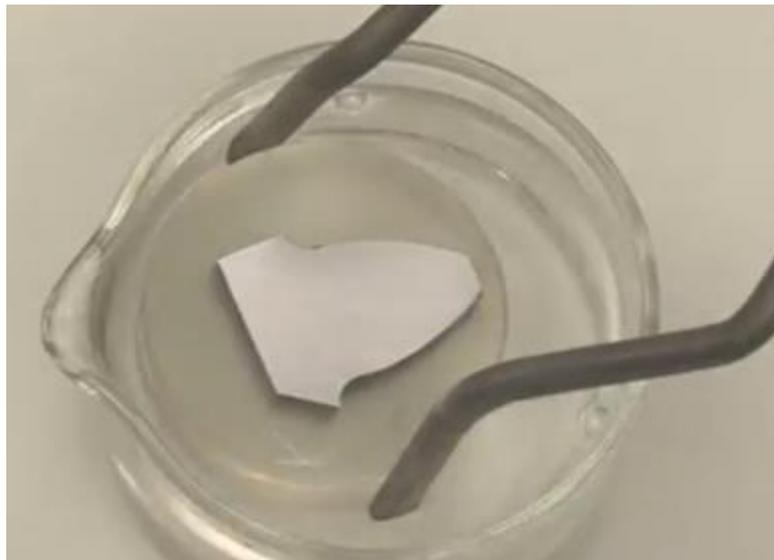


Figura 3.7.3. Acquaforte

7. Pulizia: lavaggio con acqua seguito da pulizia con alcool (vedi Capitolo 1.2.4.). Nel caso di campioni polimerici è necessario utilizzare solo la pulizia con acqua.

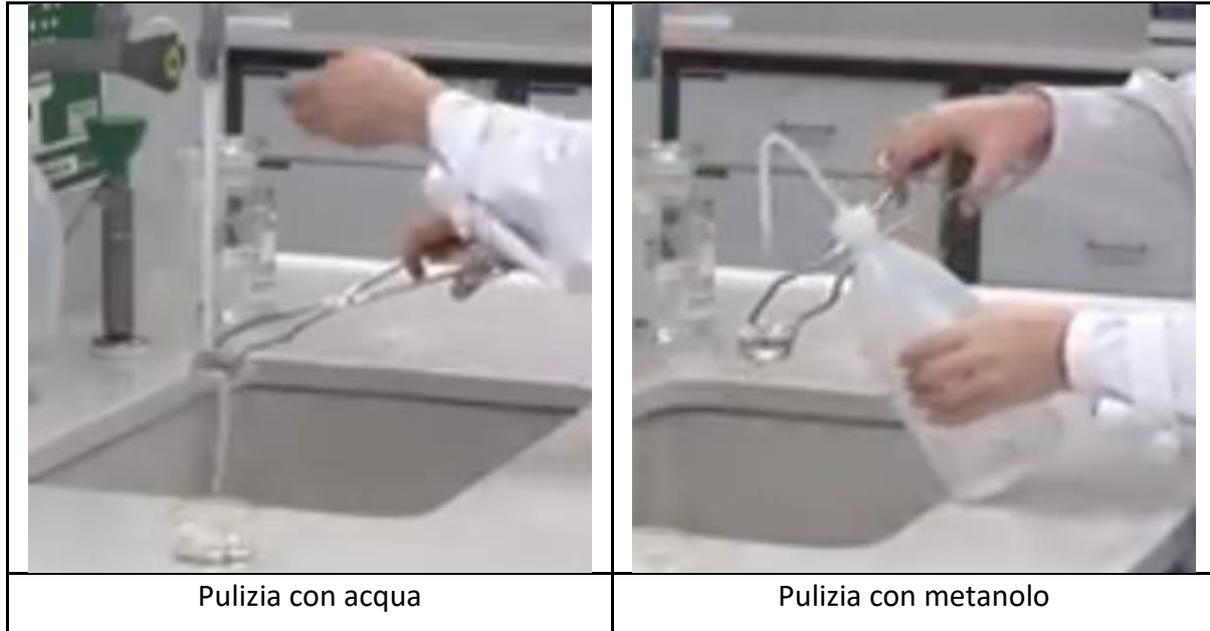


Figura 3.7.4. Pulizia

8. Essiccazione: L'essiccazione dovrebbe avvenire in un flusso di aria mite, nel caso di polimeri con temperatura dell'aria ambiente (vedere Capitolo 1.2.4.).

3.2.2. Test microscopici delle fasi di preparazione dei campioni metallografici:

1. Campionamento: è necessario tagliare un campione di prova di dimensioni adeguate, solitamente un massimo di 25x25x25 mm<sup>3</sup>, o un cilindro di massimo 25 mm di diametro e 25 mm di altezza (vedere Capitolo 1.2.1.), tagliare lentamente con raffreddamento ad acqua (Figura 3.7.1.) o utilizzare il taglio a getto d'acqua.

2. Pulizia: lavaggio con acqua e successivamente con Metanolo (vedere Capitolo 1.2.4.), nel caso di campioni di polimero è necessaria solo la pulizia con acqua. Può essere pulito anche con bagno ad ultrasuoni.

3. Asciugatura: L'asciugatura deve avvenire sotto un flusso d'aria mite (vedi capitolo 1.2.4.).

4. Montaggio: montaggio a caldo o a freddo (il montaggio è visto nel Capitolo 1.2.2.).



Figura 3.7.5. Montaggio

5. Marcatura: il campione di prova deve essere marcato per identificarlo durante il processo di preparazione (vedere capitolo 1.2.3.).

6. Macinazione: macinazione con carta SiC, passo dopo passo su carta a grana più fine (Figura 3.7.6.) (vedere Capitolo 1.2.5.).



Figura 3.7.6. Rettifica

7. Pulizia: lavaggio con acqua (vedi Capitolo 1.2.4.).

8. Lucidatura: lucidatura con tampone di lucidatura con particelle abrasive di allumina o diamante, passo dopo passo su particelle abrasive più fini, è possibile utilizzare anche la lucidatura elettrolitica (vedere capitolo 1.2.6. e capitolo 1.2.7.).



9. Pulizia: lavaggio con acqua e successivamente con alcool (vedi Capitolo 1.2.4.).
10. Asciugatura: l'essiccazione deve avvenire sotto un flusso di aria mite (vedi Capitolo 1.2.4.).
11. Incisione: con idoneo mordenzante (Figura 3.7.3.) (vedi Capitolo 1.2.8.).
12. Pulizia: lavaggio con acqua e successivamente con alcool (vedi Capitolo 1.2.4.).
13. Asciugatura: l'essiccazione deve avvenire sotto un flusso di aria mite (vedi Capitolo 1.2.4.).