

CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

Metodo MT – Magnetoscopia / Particelle Magnetiche

Dispensa completa per la preparazione all'esame di certificazione ISO 9712 –
Livello 2

Corso	NDT MT/PT – Giugno 2026
Metodo trattato	MT – Magnetic Particle Testing (Magnetoscopia)
Livello	Livello 2 – ISO EN UNI 9712
Norma principi generali	EN ISO 9934-1
Norma accettabilità saldature	EN ISO 23278
Norma metodo su saldature	EN ISO 17638
Norma condizioni di visione	EN ISO 3059

PARTE 1 – PRINCIPI FISICI: MAGNETISMO ED ELETTROMAGNETISMO

1. Il Metodo MT: introduzione e confronto con il PT

Il controllo magnetoscopico (MT – Magnetic particle Testing) è un metodo di controllo non distruttivo superficiale (e parzialmente subsuperficiale) che permette di individuare discontinuità affioranti in superficie o appena al di sotto di essa, applicando un campo magnetico al materiale e rilevando la dispersione di flusso in corrispondenza dei difetti tramite particelle ferromagnetiche fini.

Caratteristica	PT (Liquidi Penetranti)	MT (Magnetoscopia)
Principio fisico	Capillarità	Elettromagnetismo / dispersione di flusso
Tipo di difetti	Solo superficiali affioranti	Superficiali e sub-superficiali
Materiali applicabili	Qualsiasi (metalli, plastiche, ceramiche...)	Solo materiali ferromagnetici
Su superfici verniciate	NO (la vernice occlude i difetti)	Sì (max ~50 micron di spessore)
Pulizia richiesta	Molto accurata (fondamentale)	Meno rigorosa (sabbiatura OK)
Strumentazione	Bombolette spray (economica)	Giogo elettromagnetico, puntali, bobine...
Indicatore	Liquido rosso su sfondo bianco	Polvere di ossido di ferro (nera) su sfondo bianco
Magnetizzazione residua	Nessun problema	Può richiedere smagnetizzazione post-esame

⚠ CONCETTO CHIAVE / ATTENZIONE

MT e PT sono entrambi metodi superficiali ma complementari: il PT è preferibile in officina su superfici pulite e materiali non ferromagnetici; il MT è preferibile in cantiere su superfici meno curate e dove si cercano difetti appena sotto pelle su acciai al carbonio e leghe ferromagnetiche.

2. Fondamenti di Magnetismo

2.1 Il magnete e le linee di forza

Un magnete ha due poli: Polo Nord (da cui le linee di forza escono) e Polo Sud (dove le linee di forza rientrano). Le linee di forza compongono il campo magnetico e vanno sempre dal Polo Nord al Polo Sud.

- Se un magnete viene diviso in due parti, si ottengono due nuovi magneti, ciascuno con proprio Polo Nord e Polo Sud – non è possibile isolare un singolo polo.
- Poli omonimi (N-N o S-S) si respingono; poli eteronimi (N-S) si attraggono.
- Il Polo Nord geografico della Terra corrisponde al Polo Sud magnetico (per questo l'ago della bussola punta verso nord).

2.2 Proprietà magnetiche della materia

Categoria	Permeabilità relativa μ_r	Esempi
Ferromagnetici	Molto elevata (decine – migliaia)	Ferro, acciaio al carbonio, nichel, cobalto, ghisa
Paramagnetici	Leggermente >1 (quasi neutra)	Alluminio, manganese, platino, ossigeno
Diamagnetici	Leggermente <1 (repulsione debole)	Rame, argento, bismuto, acqua, alcol

Nota MT

Il controllo MT è applicabile SOLO a materiali ferromagnetici. L'acciaio al carbonio (AISI/SAE 1020, 4140 ecc.) è il materiale per eccellenza. L'acciaio inossidabile austenitico (304, 316) NON è ferromagnetico e NON può essere controllato con MT.

2.3 Elettromagnetismo: corrente e campo magnetico

La scoperta fondamentale dell'elettromagnetismo è che corrente elettrica e campo magnetico sono due aspetti della stessa fenomenologia fisica: una corrente genera sempre un campo magnetico circostante, e un campo magnetico variabile può indurre corrente.

Regola della mano destra

⚠ CONCETTO CHIAVE / ATTENZIONE

REGOLA FONDAMENTALE: con la mano destra, se il POLLICE indica la direzione della corrente elettrica, le DITA CHIUSE indicano la direzione delle linee di campo magnetico (per conduttore rettilineo). Per la SPIRA: se le DITA indicano il verso della corrente nella spira, il POLLICE indica la direzione del campo magnetico interno.

Geometria conduttore	Campo magnetico generato	Formula H in un punto
Conduttore rettilineo	Linee concentriche circolari attorno al conduttore; intensità decresce all'aumentare della distanza dal conduttore	$H = I / (2\pi r)$ H: intensità campo I: corrente [A] r: distanza dal conduttore
Spira circolare	Campo simile a un magnete con un Polo Nord e un Polo Sud; più intenso al centro della spira	$H = I / (2r)$ (al centro della spira)
Bobina (N spire)	Campo simile a una spira ma amplificato per N; si comporta come un elettromagnete	$H = (N \times I) / (2r)$ N: numero spire
Solenoido ($L \gg 2r$)	Campo quasi uniforme all'interno; l'intensità dipende dalla lunghezza e non dal raggio	$H = (N \times I) / L$ L: lunghezza solenoide
Toroide	Campo confinato all'interno del toroide; all'esterno il campo è quasi nullo	$H = (N \times I) / (2\pi r)$ r: raggio medio

2.4 Induzione magnetica e permeabilità

Quando un materiale ferromagnetico viene immerso in un campo magnetico esterno H, all'interno del materiale i "domini magnetici" (regioni cristalline con orientazione propria) si allineano nella

direzione del campo, generando un campo magnetico indotto aggiuntivo. Il campo complessivo risultante è l'induzione magnetica B.

La permeabilità magnetica μ esprime la facilità con cui un materiale si lascia magnetizzare. Nei materiali ferromagnetici μ ha valori molto elevati, il che significa che si magnetizzano facilmente e intensamente.

2.5 Ciclo di isteresi magnetica

Il ciclo di isteresi descrive la relazione tra il campo magnetico applicato H e l'induzione B nel materiale. È fondamentale capire il seguente comportamento:

- Prima magnetizzazione: B cresce lentamente, poi rapidamente (zona lineare), poi si satura.
- Riduzione di H: quando H torna a zero, B non torna a zero ma rimane a un valore residuo: questo è il MAGNETISMO RESIDUO (Br).
- Per riportare B a zero è necessario applicare un campo inverso chiamato campo coercitivo (Hc).
- L'intera curva chiusa H-B è il ciclo di isteresi.

⚠ CONCETTO CHIAVE / ATTENZIONE

MAGNETISMO RESIDUO: dopo il controllo MT, il pezzo controllato può rimanere magnetizzato. Questo può creare problemi a lavorazioni successive: • Saldatura: il campo magnetico residuo disturba l'arco elettrico (arc blow), rendendo la saldatura impossibile o di scarsa qualità. • Lavorazioni meccaniche: la polvere di truciolo si attacca al pezzo. Per riportare il pezzo a magnetismo zero occorre eseguire un ciclo di smagnetizzazione (ciclo di isteresi controllato con ampiezza decrescente).

2.6 Temperatura di Curie

Ogni materiale ferromagnetico perde le sue proprietà magnetiche al di sopra di una temperatura caratteristica chiamata temperatura di Curie. Per il ferro puro è circa 770 °C.

Pratica

Se il pezzo controllato deve subire un trattamento termico a temperatura superiore alla temperatura di Curie (es. ricottura a 800 °C), la smagnetizzazione NON è necessaria: il calore eliminerà automaticamente qualsiasi residuo magnetico.

2.7 Tipi di corrente utilizzabile

Tipo di corrente	Comportamento nel pezzo	Difetti rilevabili – Vantaggi/Limiti
Corrente Continua (DC)	Si distribuisce uniformemente su tutto lo spessore del pezzo (non solo in superficie) Campo magnetico uniforme e profondo	VANTAGGIO: rileva difetti sub-superficiali (appena sotto la superficie) LIMITE: tende ad 'appiccicare' le particelle sulla superficie riducendo la loro mobilità e quindi la sensibilità
Corrente Alternata (AC)	Si concentra sulla superficie del pezzo (effetto pelle) Campo magnetico superficiale	VANTAGGIO: ottima mobilità delle particelle (trazione pulsante); eccellente per difetti superficiali LIMITE: non rileva difetti sub-superficiali

Corrente Raddrizzata (HW DC)	Corrente alternata con semi-onda negativa eliminata Comportamento intermedio tra AC e DC	VANTAGGIO: combina penetrazione della DC con la mobilità particelle dell'AC Disponibile su grandi impianti fissi; rara su apparecchiature portatili
-------------------------------------	---	---

PARTE 2 – PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL CONTROLLO MT

3. Come funziona il Controllo MT

3.1 Il flusso disperso: il principio chiave

Quando un pezzo ferromagnetico viene magnetizzato, le linee di flusso magnetico scorrono internamente al materiale. In presenza di una discontinuità (cricca, mancanza di fusione, sdoppiatura...):

- Le linee di flusso non possono attraversare il difetto (l'aria o il vuoto ha permeabilità prossima a 1, contro centinaia/migliaia del materiale).
- Le linee devono "scavalcare" il difetto fuoriuscendo dalla superficie: si crea un FLUSSO DISPERSO.
- Il flusso disperso attrae e trattiene le particelle magnetiche fini (polvere di ossido di ferro) in corrispondenza del difetto, rendendo visibile l'indicazione.

Analogia con i magnetini

Dove c'è una discontinuità, il materiale si comporta come se fosse stato tagliato: sui due bordi si creano un micro-Polo Nord e un micro-Polo Sud. Le linee di forza escono dalla superficie, le particelle magnetiche le seguono e si addensano – l'indicazione diventa visibile.

3.2 Orientamento del campo magnetico rispetto al difetto

⚠ CONCETTO CHIAVE / ATTENZIONE

REGOLA FONDAMENTALE: il campo magnetico deve essere il più possibile **PERPENDICOLARE** alla direzione del difetto. • Campo perpendicolare al difetto (90°): massima rilevabilità. • Campo inclinato (30°–60° rispetto al difetto): rilevabilità sufficiente. • Campo parallelo al difetto (0°): il difetto non viene rilevato (nessun flusso disperso). **NE CONSEGUENTE:** per garantire la rilevazione di difetti in tutte le direzioni, ogni zona deve essere magnetizzata in **ALMENO DUE DIREZIONI APPROSSIMATIVAMENTE PERPENDICOLARI** (scarto max. ±30°).

3.3 Vantaggi e limiti del metodo MT

VANTAGGI	LIMITI
<ul style="list-style-type: none"> ◦ Principio semplice e intuitivo ◦ Elevata sensibilità (maggiore del solo visivo) 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Applicabile SOLO a materiali ferromagnetici ◦ Non rileva difetti interni profondi

<ul style="list-style-type: none"> ◦ Applicabile anche su superfici verniciate (max ~50 micron) ◦ Interpretazione delle indicazioni relativamente semplice ◦ Buona accessibilità con apparecchiature portatili ◦ Può rilevare difetti sub-superficiali (con corrente continua) ◦ Facilmente automatizzabile (impianti fissi) ◦ Utile per difetti da fatica (si propagano dalla superficie verso l'interno) 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Geometrie complesse possono limitare l'uso di determinate tecniche ◦ Può richiedere smagnetizzazione dopo l'esame ◦ Angoli acuti e variazioni di sezione generano falsi segnali ◦ Dipendenza dalla direzione del campo rispetto al difetto ◦ Non applicabile su acciaio inox austenitico, alluminio, titanio...
--	---

PARTE 3 – SISTEMI E TECNICHE DI MAGNETIZZAZIONE

4. Metodi di Esame

4.1 Metodo continuo vs. metodo residuo

Aspetto	Metodo Continuo (magnetizzazione diretta)	Metodo Residuo (magnetizzazione residua)
Come funziona	Magnetizzazione, applicazione del rivelatore e osservazione avvengono SIMULTANEAMENTE	Prima si magnetizza il pezzo, poi (in un secondo momento) si applica il rivelatore e si osservano le indicazioni
Principio sfruttato	Campo magnetico attivo in quel momento	Magnetismo residuo (Br) rimasto nel pezzo
Sensibilità	Più alta (campo magnetico al massimo)	Più bassa (campo residuo < campo applicato)
Tempo di osservazione	Limitato (deve avvenire durante la magnetizzazione)	Prolungato (il campo residuo persiste)
Utilizzo tipico	Controlli locali (giogo elettromagnetico); il metodo più usato in campo	Impianti fissi su pezzi di geometria idonea a mantenere il magnetismo residuo

4.2 Sistemi di magnetizzazione

Sistema	Descrizione
Elettrico	La corrente elettrica viene fatta passare direttamente nel pezzo (tramite elettrodi o puntali) oppure in un conduttore esterno (conduttore passante interno a un tubo). La corrente crea il campo magnetico per effetto elettromagnetico.
Magnetico	Il pezzo viene immerso in un campo magnetico esterno generato da un magnete permanente o (più comunemente) da un elettromagnete (giogo). Il pezzo si magnetizza per induzione.

Combinato	Sfrutta contemporaneamente sia il sistema magnetico che quello elettrico, creando due campi magnetici ortogonali. Permette di rilevare difetti in più direzioni con un'unica operazione.
------------------	--

4.3 Tipi di magnetizzazione

Tipo	Andamento linee di flusso	Difetti rilevabili
Longitudinale	Parallele all'asse del pezzo (da un estremo all'altro); tipica di bobine passanti o solenoidi	Difetti trasversali all'asse del pezzo (cricche perpendicolari, difetti circumferenziali)
Circonfrenziale	Circolari attorno all'asse del pezzo; tipica del passaggio di corrente direttamente nel pezzo (tra elettrodi)	Difetti longitudinali (cricche assiali, sdoppiature longitudinali)
Localizzata	Campo magnetico circolare locale generato dal giogo elettromagnetico o dai puntali; tipica dei controlli in campo	Difetti perpendicolari all'asse del giogo; per coprire tutte le direzioni occorre ruotare il giogo di 90°

PARTE 4 – STRUMENTAZIONE E RIVELATORI

5. Apparecchiature di Magnetizzazione

5.1 Impianti fissi (bancali)

Utilizzati in officina per il controllo in serie di pezzi. Comprendono:

- Testate per bloccare il pezzo tra due elettrodi (magnetizzazione circonferenziale per passaggio di corrente assiale)
- Bobine passanti o solenoidi per magnetizzazione longitudinale
- Generatore di corrente integrato (AC, DC o raddrizzata)
- Sistema di irrorazione automatica del rivelatore liquido
- Proiettori di luce UV (per rivelatori fluorescenti) o luce bianca

Il controllo avviene automaticamente; l'operatore osserva e interpreta le indicazioni.

5.2 Generatore con puntali (in disuso)

Apparecchiatura simile a una saldatrice (200–5000 A) con elettrodi di rame che vengono premuti direttamente sulla superficie da controllare. Crea un campo magnetico localizzato e circolare tra i due puntali.

⚠ CONCETTO CHIAVE / ATTENZIONE

I puntali sono caduti in disuso perché: • Il contatto metallico diretto può creare micro-cricche o bruciature sulla superficie. • Il punto di contatto deve essere poi pulito e ri-controllato. • Sono stati sostituiti dagli elettromagneti (giogo) che offrono prestazioni equivalenti senza contatto diretto.

Se vengono ancora usati (puntali): distanza tra i puntali 80–200 mm; intensità 4–5 A/mm di spessore per spessori > 20 mm.

5.3 Giogo elettromagnetico (la strumentazione più diffusa)

Il giogo (“Magnetic Yoke”) è un elettromagnete portatile composto da due bracci articolati (con polo N e polo S) collegati da un nucleo in materiale ferromagnetico. Premendo l’interruttore si attiva la corrente nella bobina interna e si crea il campo magnetico tra i due poli.

- I bracci sono regolabili: si può stringere o allargare la distanza tra i poli per adattarsi alla zona da controllare.
- Funzionamento non invasivo: nessun contatto elettrico diretto con il pezzo.
- Facilmente trasportabile per uso in campo e in cantiere.
- Disponibile sia in versione AC che DC (o commutabile).

Verifica della potenza del giogo (norma ASME)

Tipo di corrente	Peso minimo da sollevare	Frequenza verifica
Corrente Alternata (AC)	4,5 kg (10 lb)	Periodica (prima di ogni utilizzo e comunque verificare danno fisico)
Corrente Continua (DC)	18 kg (40 lb)	Periodica

Come si verifica
Si usa un campione di acciaio al carbonio certificato con peso noto. Si appoggia il giogo sul campione, si attiva e si tenta di sollevare il campione. Se il giogo non riesce a sollevare il peso minimo prescritto, non deve essere utilizzato.

5.4 Altre tecniche di magnetizzazione

Tecnica	Descrizione e applicazione
Conduttore passante (centrale)	Un conduttore elettrico viene inserito all’interno di un tubo o di un anello. La corrente nel conduttore crea un campo magnetico circonferenziale nella parete del tubo. Ideale per rileva difetti assiali (longitudinali) in tubi e anelli. Ispezione max 460 mm di lunghezza per passata. Per grandi diametri spostare il conduttore vicino alla parete per migliorare l’intensità.
Bobina passante (solenoido esterno)	Il pezzo viene inserito all’interno di una bobina. La corrente nella bobina crea un campo magnetico longitudinale nel pezzo. Ideale per pezzi cilindrici (barre, tubi). Lunghezza ispezionabile max 460 mm. Intensità = $K \times D$ (dove K è un fattore tabulato e D il diametro).
Bobina a spire concatenate	Un cavo viene avvolto intorno al pezzo. La corrente segue il percorso delle spire creando un campo magnetico circonferenziale nel pezzo. Intensità = $K \times D / N$ (N = numero di spire).

PARTE 5 – RIVELATORI E VERIFICA DEL CAMPO

6. I Rivelatori Magnetici (Polveri)

Il rivelatore (developer) nel metodo MT è costituito da particelle magnetizzabili fini, principalmente MAGNETITE (ossido di ferro Fe_3O_4) o ossido di ferro ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), che si addensano in corrispondenza del flusso disperso prodotto dai difetti, rendendo visibile l'indicazione.

6.1 Rivelatore secco vs. umido

Aspetto	Rivelatore Secco (polvere)	Rivelatore Umido (sospensione liquida)
Composizione	Polvere di ossido di ferro asciutta; granulometria 50–300 micron	Particelle di ossido di ferro (1–20 micron) sospese in un veicolo liquido (petrolio, acqua)
Applicazione	Soffietto a getto d'aria; richiede superficie asciutta	Bomboletta spray o irrorazione; comune con vernice di contrasto
Sensibilità	Minore (particelle più grandi)	Maggiore (particelle più fini)
Superfici grezze	Più adatto (non aderisce alla rugosità)	Meno adatto (le particelle fini si incastrano nella rugosità – falsi segnali)
Uso tipico	Raro; prevalente per superfici grezze, posizioni in piano	Il più diffuso; quasi sempre con vernice di contrasto bianca

6.2 Vernice di contrasto

Le superfici metalliche sono spesso grigio-scure: il contrasto con le particelle nere di ossido di ferro sarebbe scarso. Per migliorare il contrasto si spruzza preventivamente una vernice bianca sulla superficie (prima del rivelatore e prima della magnetizzazione).

- La vernice deve essere facilmente rimovibile (solvente o acqua).
- Uno strato sottile non ferromagnetico non disturba il controllo (il campo magnetico passa attraverso 50 micron di vernice).
- Dopo la spruzzata di vernice bianca, si aspetta che asciughi, poi si magnetizza e si applica il rivelatore nero: il contrasto bianco/nero è eccellente.

⚠ CONCETTO CHIAVE / ATTENZIONE

ATTENZIONE: non confondere la vernice di contrasto (bianca, usata PRIMA del rivelatore) con il rivelatore (polvere nera applicata DURANTE la magnetizzazione). Sono due prodotti distinti con funzioni diverse!

6.3 Rivelatori fluorescenti

Particelle di ossido di ferro rivestite da pigmenti fluorescenti. Visibili sotto lampada di Wood (luce UV a ~365 nm) in ambiente oscurato (max 20 lux ambientali). Sensibilità molto alta.

- Richiedono camera oscura o oscuramento locale.
- La lampada UV deve avere intensità superficie $\geq 1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.
- Verifica lampada: ogni 8 ore di funzionamento con strumento tarato a 365 nm.

- Alta sensibilità è vantaggiosa su superfici lisce; può dare troppi falsi segnali su superfici ruvide.

6.4 Verifica dell'efficienza del rivelatore e del campo magnetico

Per verificare che la tecnica utilizzata (tipo di corrente, intensità, rivelatore) sia adeguata per rilevare difetti alla profondità attesa, si usano strumenti di riferimento certificati:

Strumento	Funzione e utilizzo
Sonda ASME (ottagonale)	Piastrina con 8 triangoli di acciaio uniti da brasatura in rame (non ferromagnetico). Appoggiata sulla superficie e irrorata con rivelatore, le particelle si addensano sui segmenti perpendicolari al campo magnetico. Permette di determinare la DIREZIONE del campo.
Sonda di Bertold	Piastrina di ottone su base di 4 pezzi di acciaio a croce. Funzione analoga alla sonda ASME; permette di verificare direzione e intensità del campo e, alzando la sonda, anche la capacità di rilevare difetti a diverse profondità.
Blocchi campione (con fori a diverse profondità)	Blocchi certificati con fori sub-superficiali a profondità note (es. 0,1 / 0,3 / 0,5 mm). Permettono di verificare a che profondità la tecnica in uso è in grado di rilevare discontinuità sub-superficiali.
Gaussometro	Strumento che misura l'intensità del campo magnetico (in Tesla o Gauss). Usato per verificare la direzione e l'intensità del campo residuo dopo smagnetizzazione.

PARTE 6 – PROCEDURA OPERATIVA DEL CONTROLLO MT

7. Le Fasi del Controllo MT

N.	Fase	Dettagli operativi
1	Attività preliminare	Acquisire storia del pezzo (materiale, lavorazioni, vita in servizio), norme applicabili, procedura operativa. Identificare i difetti attesi.
2	Pulizia della superficie	Rimozione di grasso, olio, ossidi, residui di scoria, sporcizia. A differenza del PT: sabbiatura e molatura SONO consentite. La pulizia non deve essere così accurata come per il PT.
3	Verifica magnetismo residuo	Con gaussometro: verificare se il pezzo ha già del magnetismo residuo che potrebbe disturbare l'esame.
4	Applicazione vernice di contrasto (se necessario)	Spruzzare vernice bianca sulla superficie e attendere asciugatura. NON applicare se si usano rivelatori fluorescenti.
5	Magnetizzazione (e irrorazione simultanea – metodo continuo)	Scegliere tecnica e intensità. Applicare il campo magnetico. Con metodo CONTINUO: spruzzare contemporaneamente il rivelatore e osservare SUBITO i segnali che si formano. L'irrorazione deve terminare prima del termine della magnetizzazione.
5b	(Solo metodo residuo) Magnetizzazione	Magnetizzare il pezzo, togliere il campo, verificare il magnetismo residuo con gaussometro, poi applicare il rivelatore e osservare con più calma.

6	Osservazione delle indicazioni	FASE PRINCIPALE. Osservare la formazione del segnale fin dall'inizio. Distinguere indicazioni rilevanti da falsi segnali e segnali non indicativi. Se necessario: pulire meccanicamente e ripetere per confermare.
7	Documentazione	Registrare indicazioni (sketch, fotografia, nastro adesivo trasparente, video). Dimensionare le indicazioni. Valutare accettabilità.
8	Smagnetizzazione (se richiesta)	Obbligatoria per metodo residuo e quando richiesta dalla specifica. Ciclo di isteresi a campo decrescente o uso di corrente alternata decrescente.
9	Pulizia finale	Rimuovere polvere/ossido di ferro e vernice di contrasto. L'ossido di ferro può causare corrosione se lasciato.

7.1 Pulizia della superficie (confronto PT vs MT)

Metodo di pulizia	PT: consentito?	MT: consentito?
Sgrassaggio con solvente	Sì	Sì
Spazzolatura metallica	Sì	Sì
Molatura leggera	Con cautela (no bave)	Sì
Sabbiatura / Pallinatura	NO (occludà le discontinuità)	Sì (accettabile)

7.2 Tracciato di ispezione per saldature (EN ISO 23278)

Per garantire la rilevazione di difetti in qualsiasi direzione, ogni zona deve essere ispezionata con il giogo posizionato in almeno due direzioni approssimativamente perpendicolari. La norma prescrive un tracciato a percorso con sovrapposizioni:

- Distanza tra i puntali (o poli del giogo): $D \geq 75 \text{ mm}$
- La zona 'valida' per lato è $D/2$ (i 25 mm vicino ad ogni polo vengono scartati)
- Zona ispezionata per passata: larghezza = $D/2$, lunghezza = $D/2$ (es. $D=100\text{mm} \rightarrow$ area valida $50 \times 50 \text{ mm}$)
- Il passo tra due passate successive deve essere $\leq D/2$
- Angolo tra due direzioni di magnetizzazione: $\approx 90^\circ$ (tolleranza: $\pm 30^\circ$)
- La zona termicamente alterata (ZTA) deve essere inclusa nell'ispezione: 10 mm per lato della saldatura

PARTE 7 – INTERPRETAZIONE DEI SEGNALI

8. Tipi di Segnali e Interpretazione

8.1 Classificazione delle indicazioni

Tipo di indicazione	Caratteristiche e significato
Indicazione LINEARE	Lunghezza $L > 3 \times$ larghezza. Tipica di cricche, mancanza di fusione, incollature, sdoppiature. Generalmente la più critica.

Indicazione NON LINEARE (tondeggiante)	Lunghezza $L \leq 3 \times$ larghezza. Tipica di porosità sfocianti, cavità tondeggianti. Generalmente meno critica.
Segnale NON INDICATIVO	L'indicazione è reale (c'è dispersione di flusso) ma non è causata da un difetto: filettature, angoli stretti, magli di saldatura, cambi di sezione. Non compromette accettabilità.
FALSO SEGNALE	Non causato da dispersione di flusso ma da: magnetizzazione eccessiva, contatto con pezzi magnetizzati, variazioni locali di durezza o composizione chimica (es. bordo tra acciaio al C e acciaio inox). Va eliminato/verificato.

8.2 Come distinguere indicazioni reali da falsi segnali

- Pulire meccanicamente la zona sospetta e ripetere la magnetizzazione + rivelatore.
- Se l'indicazione riappare nella stessa posizione: è un'indicazione reale.
- Se non riappare o cambia: era un falso segnale (es. ossido, sporcizia, irregolarità geometrica).

8.3 Cause di falsi segnali

- Magnetizzazione eccessiva: troppo campo magnetico crea dispersione anche in zona priva di difetti (variazioni di sezione, angoli, rugosità)
- Contatto del pezzo con altri oggetti magnetizzati durante il controllo
- Variazioni locali di durezza: zone più dure hanno permeabilità diversa – si crea dispersione di flusso ai bordi di zone di diversa durezza
- Variazioni di composizione chimica: es. bordo saldatura acciaio C / acciaio inox austenitico (non ferromagnetico) – il cambio di materiale simula una discontinuità
- Correnti parassite da cavi elettrici vicini (es. cavi saldatura che passano sopra la zona da controllare)

PARTE 8 – DIFETTI RILEVABILI CON MT E ASPETTO DEL SEGNALE

9. Difetti Rilevabili con MT

Difetto	Origine	Aspetto del segnale	Note diagnostiche e tecnica consigliata
Sdoppiature (laminati)	Primaria	Linea continua sul trasverso/bordo della lamiera	Rilevabili SOLO se affiorano sul bordo (trasverso). Quelle interne non rilevabili. Tecnica: giogo o puntali sul bordo della lamiera.
Ripiegature (laminati/forgiati)	Primaria	Continuo o intermittente; può presentare tratti chiusi (segnale più debole)	Presenti in superficie. Rilevabili con giogo o puntali. Rilevabilità simile a sdoppiature.

Incollature / Riprese di colata (fusioni/saldature)	Primaria	Continuo o intermittente; andamento parallelo all'asse della saldatura	Su saldature circolari: efficace bobina (campo longitudinale). Su saldature lineari: giogo trasversale alla saldatura.
Cricche da rettifica (superfici lavorate)	Finale	Rete di linee incrociate in tutte le direzioni	Tipiche di materiali duri (temprati). Direzioni multiple: usare bobina passante o bancare per avere campo uniforme in due direzioni.
Cricca a freddo / HAZ (saldature)	Finale	Trasversale al cordone o parallela alla ZTA; contorno netto	Campo longitudinale (parallelo al cordone) rileva cricche trasversali. Usare giogo o puntali orientati trasversalmente. Può essere appena sub-superficiale (corrente continua).
Cricca a caldo (saldature)	Finale	Longitudinale al centro del cordone; marcata, contorno netto	Campo perpendicolare al cordone. Giogo con bracci paralleli all'asse della saldatura.
Mancanza di penetrazione (saldature)	Finale	Longitudinale alla radice; continua o intermittente; trattabile come cricca	Rilevabile dalla faccia del rovescio (se accessibile) o con corrente continua per difetti sub-superficiali.
Incisioni marginali (saldature)	Finale	Longitudinale al bordo del cordone; molto marcata	Rilevabile con giogo orientato trasversalmente al cordone.
Porosità sfocianti	Finale	Tondeggiante, espansione uniforme	Già visibile all'esame visivo. Se sub-superficiale: corrente continua.
Strappi lamellari (spessori importanti)	Finale/Servizio	Sul trasverso della lamiera (come sdoppiatura); andamento piatto	Tipico di saldature d'angolo su spessori elevati. Tecnica analoga alle sdoppiature.
Cricca da fatica (in servizio)	Servizio	A 45° su assi rotativi; longitudinale su tubi in pressione; contorno molto netto	Molto evidente al MT. Su tubi: conduttore centrale + giogo in 2 direzioni. Particolare importanza per ispezioni in servizio.
Cricche da tenso-corrosione (in servizio)	Servizio	Rete ramificata in tutte le direzioni (intergranulari o transgranulari)	Tipiche vicino a saldature in ambiente corrosivo. Richiedono magnetizzazione in almeno 2 direzioni per la rilevazione completa.
Inclusioni solide (scoria, Tungsteno)	Finale	Tondeggiante o irregolare; più debole delle cricche	Le inclusioni interne non sfociate non sono rilevabili. Se superficiali o sub-superficiali: corrente continua.

PARTE 9 – NORME DI RIFERIMENTO

10. Norme di Riferimento per il Metodo MT

10.1 Schema delle norme

Norma	Oggetto
EN ISO 9934-1	METODO: Principi generali del controllo MT. Definisce procedura, sequenza delle fasi, requisiti del personale, condizioni operative. Norma di riferimento generale per l'esecuzione del controllo.
EN ISO 17638	PRODOTTO (saldature): Controllo MT su saldature di materiali ferromagnetici, incluse le ZTA. Norma specifica per saldature: ha priorità sulla 9934-1 quando il prodotto da controllare è una saldatura.
EN ISO 23278	ACCETTABILITÀ (saldature): Livelli di accettabilità delle indicazioni MT su saldature ferromagnetiche. Complementare alla 17638.
EN ISO 10228-1	PRODOTTO (forgiati): Controllo MT su fucinati in acciaio.
EN ISO 3059	Condizioni di visione per PT e MT (illuminazione, ecc.).
ASME Sezione V, Articolo 7	Norma americana unificata per MT: contiene principi generali, metodo su saldature, forgiati e tubi in un unico volume.

10.2 EN ISO 9934-1: punti chiave

- Il personale deve essere qualificato secondo EN ISO 9712 (o equivalente).
- Superficie: esente da sporcizia, scaglie, ruggine, grassi, oli. Rivestimenti non ferromagnetici con spessore max 50 micron: accettabili.
- Tecniche di magnetizzazione: corrente assiale (elettrodi), puntali, conduttore passante, elettromagnete, bobina.
- Metodi di rilevazione: sospensione liquida (più usata) o polvere secca. Fluorescenti: alta sensibilità ma richiedono buio.
- Metodo continuo: rivelatore applicato PRIMA e DURANTE la magnetizzazione (non dopo).
- Condizioni di visione: 500 lux per rivelatori colorati (da EN ISO 3059).
- Rivelatori fluorescenti: luce ambientale max 20 lux; intensità UV $\geq 1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.
- Smagnetizzazione: eseguire se richiesta dalla procedura o dal cliente.

10.3 EN ISO 23278: Livelli di accettabilità su saldature

Definizioni fondamentali

Termine	Definizione
Indicazione LINEARE	Lunghezza (L) > 3 volte la larghezza. Esempio: cricca, incollatura, mancanza di fusione.
Indicazione NON LINEARE	Lunghezza (L) \leq 3 volte la larghezza. Esempio: porosità tondeggianti, cavità.
Zona di controllo	Saldatura + 10 mm per lato (zona termicamente alterata inclusa).

Tabella dei livelli di accettabilità

Livello	Indicazioni LINEARI: max L	Indicazioni NON LINEARI: max d (asse maggiore)
1 (più restrittivo)	$L \leq 1,5 \text{ mm}$	$d \leq 3 \text{ mm}$
2	$L \leq 3 \text{ mm}$	$d \leq 3 \text{ mm}$
3 (più blando)	$L \leq 6 \text{ mm}$	$d \leq 4 \text{ mm}$
2X (più usato in pratica)	Valutate come Livello 1 ($L \leq 1,5 \text{ mm}$)	Valutate come Livello 2 ($d \leq 3 \text{ mm}$)
3X	Valutate come Livello 1 ($L \leq 1,5 \text{ mm}$)	Valutate come Livello 3 ($d \leq 4 \text{ mm}$)
<p>⚠ CONCETTO CHIAVE / ATTENZIONE</p> <p>Il livello di accettabilità NON lo sceglie l'operatore NDT, ma è prescritto dalla norma costruttiva (es. EN 1090), dalla direttiva applicabile (es. PED), dal capitolato del cliente o dalla procedura di controllo. Il livello 2X è il più usato in pratica industriale. Indicazioni adiacenti: se la distanza tra due indicazioni è < della dimensione maggiore dell'indicazione più piccola, si valuta come UNICA indicazione combinata.</p>		

PARTE 10 – RIEPILOGO PER L'ESAME**11. Schema di Riepilogo per l'Esame**

Domanda tipica da esame	Risposta
Su quali materiali si applica il MT?	Solo materiali FERROMAGNETICI (acciaio al carbonio, ferro, nichel, cobalto, ghisa)
Quali difetti rileva il MT?	Superficiali e sub-superficiali (NON difetti interni profondi)
Principio fisico del MT	Dispersione di flusso magnetico in corrispondenza di discontinuità
Orientamento ottimale campo vs. difetto	90° (perpendicolare); limite minimo: 40°–60° circa
Quante direzioni di magnetizzazione per saldature?	Almeno 2 direzioni perpendicolari ($\pm 30^\circ$) per coprire difetti in tutte le direzioni
Corrente continua (DC) rileva quali difetti?	Difetti SUB-SUPERFICIALI (ma peggior mobilità delle polveri)
Corrente alternata (AC) rileva quali difetti?	Difetti SUPERFICIALI; ottima mobilità polveri; non rileva difetti sub-superficiali
Il MT funziona su acciaio inox 304?	NO: l'acciaio inox austenitico NON è ferromagnetico
Il MT può fare controllo su superfici verniciate?	Sì, fino a max ~50 micron di spessore (verifica in procedura)

Sabbiatura prima del MT: si può?	Sì (differenza importante rispetto al PT dove è vietata)
Cos'è il flusso disperso?	Le linee di campo magnetico che fuoriescono dalla superficie in corrispondenza di una discontinuità
Strumento più usato per controllo in campo	Giogo elettromagnetico (yoke)
Verifica potenza giogo AC / DC	AC: solleva almeno 4,5 kg; DC: solleva almeno 18 kg
Rivelatore più diffuso	Sospensione liquida (umido) nero con vernice di contrasto bianca
Cos'è il magnetismo residuo e perché è un problema?	Magnetismo che rimane nel pezzo dopo il controllo; può disturbare saldature successive (arc blow) e lavorazioni meccaniche
Quando NON serve la smagnetizzazione?	Se il pezzo subirà un trattamento termico a $T >$ temperatura di Curie ($\sim 770^{\circ}\text{C}$ per ferro)
Indicazione lineare (EN ISO 23278)	$L > 3 \times$ larghezza (stesso criterio del PT per EN ISO 23277)
Livello di accettabilità più usato in pratica	2X (lineari come Livello 1; non lineari come Livello 2)
Zona termicamente alterata (ZTA) inclusa nel controllo?	Sì: la norma EN ISO 23278 prescrive 10 mm per lato della saldatura
Illuminazione minima per rivelatori colorati	500 lux (da EN ISO 3059)
Intensità lampada UV per rivelatori fluorescenti	$\geq 1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$; verifica ogni 8 ore; luce ambientale max 20 lux
Differenza metodo continuo vs. residuo	Continuo: magnetizzazione + rivelatore + osservazione simultanei. Residuo: prima magnetizzazione, poi rivelatore + osservazione (sfrutta magnetismo rimasto)
Norma per MT su saldature (metodo)	EN ISO 17638
Norma per livelli di accettabilità MT su saldature	EN ISO 23278

Buona fortuna all'esame!

Dispensa redatta sulla base delle lezioni MT del corso NDT MT/PT – Giugno 2026