

5 INDAGINI SUI MATERIALI

5.1 PROVE NON DISTRUTTIVE SUL CALCESTRUZZO

5.1.1 Carotaggio

UNI EN 12504-1

Il carotaggio del calcestruzzo permette una valutazione della resistenza meccanica attraverso la prova di compressione in laboratorio dei provini cilindrici prelevati in sito.

Il numero di carote da prelevare per caratterizzare il materiale dell'elemento strutturale in studio non deve essere inferiore a 3. Le carotatrici hanno punte con diametri di 7, 10, 14 e 16 cm che vanno scelte, tendendo al diametro massimo, in funzione delle difficoltà del sito.

La scelta del diametro della carota dovrà tenere conto di alcuni aspetti:

- la riduzione della sezione resistente dell'elemento in studio;
- evitare il taglio di armature;
- il diametro dell'inerte.



Esecuzione di una carota su una pila

L'operazione di carotaggio è particolarmente delicata in quanto, se non eseguita correttamente, potrebbe compromettere i risultati. Sono quindi importanti alcuni aspetti:

- utilizzare punte perfettamente cilindriche e ben affilate;
- fissare rigidamente la carotatrice evitando qualunque vibrazione;
- utilizzare abbondantemente l'acqua di raffreddamento.

Tutti i fori andranno riempiti con malta di cemento a presa rapida.

La carota appena estratta andrà immediatamente contrassegnata e fotografata a fianco del foro di estrazione.

Il trasporto dovrà avvenire con la massima cautela, onde evitare la formazione di fessurazioni per vibrazione, proteggendo la carota con appositi materiali morbidi ed inserendola in una cassetta di trasporto rigida.

Le carote saranno tagliate e rettificate presso un Laboratorio Prove Materiali Autorizzato, in base alla normativa UNI EN 12390-1 e UNI EN 12390-3, che fornirà la resistenza cilindrica di compressione.



Prova di compressione

Il valore della resistenza cubica è ottenuta da quella cilindrica attraverso la relazione:

$$R_{cub} = R_{cil} / 0,83 \text{ per } h/d > 2 \quad (24)$$

Per rapporti inferiori è introdotto un fattore di correzione ricavabile dalle norme ASTM C 42:68 e la relazione diventa:

$$R_{cub} = F_c \cdot R_{cil} / 0,83 \quad (25)$$

h/d	F_c
2	1,00
1,75	0,99
1,50	0,97
1,25	0,94
1,00	0,91

5.1.2 Prova di Pull-out

UNI 10157

La metodologia d'indagine consente di determinare la resistenza media del calcestruzzo, R_{mc} , mediante l'estrazione di un tassello post-inserito.

Il sistema è stato sviluppato in modo da permettere l'inserimento di un tassello post-opera.

Il tassello è inserito in un foro appositamente svasato internamente; attraverso la battitura della testa del tassello si produce l'allargamento della parte radiale interna consentendo così una perfetta adesione alle pareti. Viene quindi applicato un martinetto oleodinamico che poggia su una superficie circolare; attraverso il tiro del tassello si determina la rottura di un cono di calcestruzzo.



Fase di estrazione del tassello

Il valore della forza massima necessaria consente, attraverso delle curve sperimentali di correlazione, di pervenire al valore della R_{mc} . La rottura della parte sottoposta a tensione avviene per compressione-taglio tra la parte allargata del tassello e la base del martinetto.

La strumentazione, oltre a comandare elettricamente il funzionamento del martinetto, consente una misura precisa della pressione oleodinamica, depurata degli attriti nella fase di taratura, e una stampa dei valori rilevati.



Fase di stampa del risultato

La procedura di prova può essere così sintetizzata:

- rilevazione attraverso un pacometro della presenza di ferri di armatura nell'area di prova;
- esecuzione del foro, alle distanza minima di 10 cm;
- perfetta pulizia del foro;
- inserimento del tassello con battitura della testa;
- fissaggio del martinetto di estrazione;
- estrazione comandata elettricamente;
- visione immediata e stampa del risultato.

La curva di correlazione tra forza massima d'estrazione e R_{mc} è ricavata da studi sperimentali di confronto con provini cubici:

$$R_c = 0,925 \cdot F + 9 \text{ [MPa]} \quad (26)$$

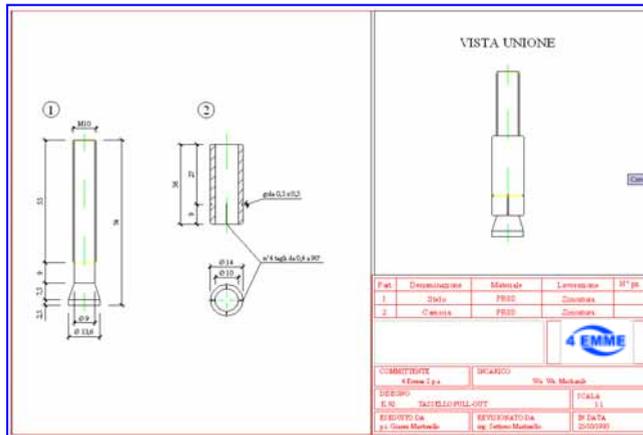
dove F è la forza di estrazione [kN].

Vanno eseguite almeno 3 estrazioni per ogni elemento strutturale utilizzando la media dei risultati ottenuti.

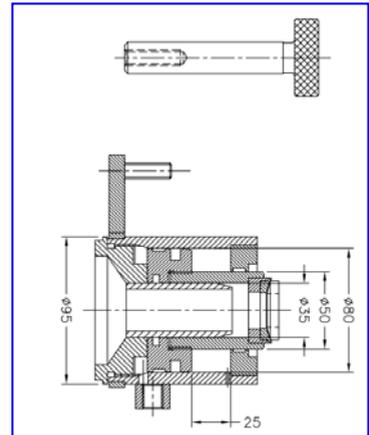
Tutti i valori medi potranno concorrere a determinare la resistenza caratteristica R_{ck} definita come la resistenza a compressione al di sotto della quale si può attendere di trovare il 5% della popolazione di tutte le misure effettuate:

$$R_{ck} = R_{tm} - 1,64 SQ \quad (27)$$

dove R_{tm} è il valore medio di tutti i risultati ed SQ è lo scarto quadratico.



Dimensione del tassello



Dimensione del martinetto

CARATTERISTICHE TECNICHE

Campi di misura: 0 - (2,5 - 5) - 10 - 20 - 50 - 100 - 200 - 250 - 350 - 500 - 700 - (1100 - 1400) bar

Errore totale tipico: per FS: 20 - 1400 bar: $\leq 0,2\%$ FS bal; per FS: 2,5 - 10 bar: $\leq 0,5\%$ FS bal.

Variazioni con la temperatura: dello zero e della sensibilità: $\pm 0,05\%$ FS / °K nel campo compensato di temperatura.

Sovraccarico: fino a 350 bar: 2 volte FS; fino a 1400 bar: 1500 bar max (dentro dalla rivestitura 1/4" BSP)

Risposta in frequenza: per Mod. non amplificati: fino a 50 bar: 0 - 5 KHz; oltre 50 KHz; per Mod. amplificati: in tensione: 0 - 100 Hz; in corrente: 0 - 1000 Hz, limitata da filo e let.

Campi di temperatura: compensata: -10 - +85°C; di funzionamento: per corpo metallico inteso: -40 - +120°C; per l'elettronica: -20 - +85°C; RH: $\leq 95\%$

Norme CE: per ambienti industriali: EN 50061-2 (per fenomeni di erosione); ed. EN 50062-2 (per fenomeni di inquinamento).

Prove a colpi e vibrazioni: ogni amplificatore è sottoposto a 3 colpi nelle 3 direzioni con martello in antra dura. Ogni trasduttore finito è sottoposto a 3 colpi nelle 2 direzioni con chiave di serraggio; inoltre il fatto cadere entro un tubo verticale con altezza di 1 metro su una piastrina in legno. Campioni di produzione sono sottoposti a ciclo di vibrazioni nelle 3 direzioni mediante vibratore elettrodinamico nel campo di frequenze 5 - 5000 Hz.

DIMENSIONI DI INGOMBRO

TRASDUTTORI DI PRESSIONE PRESSOSTATI LP 608

Caratteristiche del trasduttore di pressione da 350 bar

5.1.3 Misura sclerometrica

UNI EN 12504-2

Lo sclerometro consiste in una massa battente di acciaio, azionata da una molla, che contrasta un'asta di percussione a contatto sulla superficie di prova del calcestruzzo.

Il valore di rimbalzo della massa battente è misurato mediante un indice di lettura trascinato su una scala lineare allungata nella cassa dello sclerometro.

Per l'esecuzione della prova vanno rispettate delle regole di buona esecuzione:

- indagare su elementi di spessore >150 mm;
- evitare zone che presentano nidi di ghiaia, scalfitture, porosità elevata;
- individuare preventivamente la tessitura di armatura mediante strumento pacometrico;
- l'asse dello strumento dovrà essere perfettamente ortogonale alla superficie da indagare;
- utilizzare esclusivamente sclerometri che lasciano una traccia cartacea delle battute.

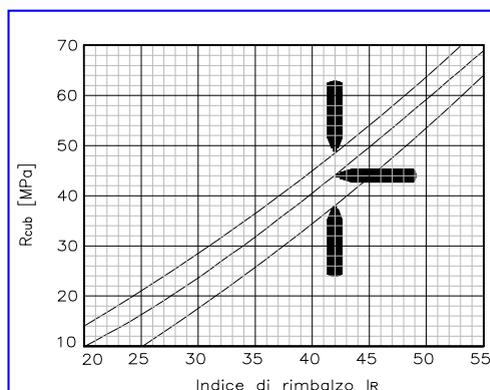


Prova sclerometrica

Devono essere eseguite 12 battute scartando i due valori maggiori e mediando i 10 rimanenti.

L'indice di rimbalzo va trasformato in Resistenza cubica attraverso le curve di correlazione legate alla direzione d'uso dello sclerometro.

TRAVE DI BORDO	TRAVE DI BORDO	TRAVE N. 35
CAMPATA N. 53	CAMPATA N. 33	PILA CENTRALE
ARMATURA	BASE	
41	52	47



Lo sclerometro è uno strumento indicato per una valutazione su calcestruzzi giovani, in quanto il fenomeno della carbonatazione del calcestruzzo provoca l'indurimento dello strato superficiale provocando una alterazione del fenomeno di rimbalzo.

Gli sclerometri vanno tarati una volta all'anno.

Il resoconto della prova sclerometrica deve contenere almeno i dati riportati in tabella.

N.	Data	Elemento	Indici di rimbalzo										Media	R _{cub} [MPa]
1	6.8.04	Trave I - anima	45	42	40	40	38	39	41	45	40	40	41	36
2	6.8.04	Trave I - base	54	54	53	53	52	53	51	52	51	51	52	58
3	6.8.04	Pila centrale	52	50	45	44	50	46	49	47	48	48	48	50

5.1.4 Misura ultrasonica

UNI EN 583-1

La prova ultrasonica ha una funzione di misura dell'omogeneità del materiale e non di misura diretta della resistenza del calcestruzzo.

Questo tipo di prova non distruttiva, non invasiva e soprattutto rapida nell'esecuzione, consente di ottenere una valutazione complessiva sulle caratteristiche del materiale potendola estendere velocemente in molti punti.

La misura si ottiene ponendo le sonde, emettitrice e ricevente, nelle facce opposte nel caso di spessori fino 50 cm, o su una linea superficiale. La sonda emettitrice produce degli impulsi ultrasonici che sono captati dalla sonda ricevente dopo che tali impulsi hanno attraversato il materiale interposto.

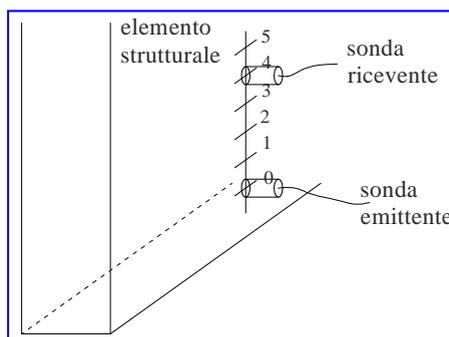
Il tempo di transito è misurato e memorizzato dallo strumento.

Per una prima valutazione dei risultati sperimentali si utilizza una tabella comparativa che lega la velocità di propagazione dell'onda ultrasonica a valori di resistenza per materiale asciutto.



Unità ultrasonica

Velocità media [m/s]	Resistenza R_{cub} [MPa]
> 4200	> 30,0
3600 - 4200	25,0 - 30,0
3000 - 3600	20,0 - 25,0
2400 - 3000	15,0 - 20,0
< 2400	< 15,0



Va inoltre segnalato che la trasformazione da velocità del suono a resistenza è molto indicativa.

La tabella interpretativa si riferisce a calcestruzzi eseguiti da poco, senza patologie particolari, in assenza di armature.

La misurazione si ottiene effettuando diverse emissioni ultrasoniche rilevando il valore medio di tre passaggi consecutivi con valori all'interno di una variabilità del $\pm 5\%$.

La formula deve essere adattata utilizzando dei punti dove sono state effettuate delle prove di Pull-out e/o carotaggi. Ottenuta la formula sperimentale specifica del sito si procederà ad eseguire la prova su tutte le zone di interesse permettendo una chiara individuazione delle caratteristiche generali. Se la prova è eseguita sulla superficie (e non attraverso il materiale) il valore della velocità media sarà la media delle diverse distanze (20, 40, 60, ... cm).

La procedura di calcolo è la seguente:

- eseguite le prove di Pull-out e carotaggio si misura la velocità ultrasonica nelle stesse zone;
- si calcola il valore medio della resistenza R_m dei vari metodi ed il valore medio della velocità del suono V_m negli stessi punti;
- la formula di correlazione degli ultrasuoni è:

$$R_{cub} = \frac{1}{k} V_L - 5$$

dove k assume il valore limite di 120 nella condizione migliore del calcestruzzo e si calcola sperimentalmente volta per volta attraverso la formula:

$$k = V_m / (R_m + 5)$$

I punti di prova vanno selezionati con un pacometro che individui l'armatura superficiale che va evitata.

Un altro metodo di valutazione prevede la stima del Modulo Elastico attraverso una correlazione indicata dalle norme UNI.

$$E = V^2 \cdot \rho \cdot [(1 + \gamma_d) (1 - 2\gamma_d)] / (1 - \gamma_d)$$

dove:

E = modulo di elasticità in [Pascal]

V = velocità di propagazione in [m/s]

ρ = massa volumica in [dN/m³]

γ_d = modulo di Poisson dinamico (0,15-0,25)

Dal Testo Unico si potrà stimare la resistenza.

$$R_c = 10 (E/22.000)^{1/0,3} \quad [\text{MPa}]$$

5.1.5 Misura della profondità di carbonatazione

UNI 9944

La prova ha lo scopo di misurare la profondità di carbonatazione dello strato superficiale del calcestruzzo.

Il calcestruzzo possiede un valore di pH di circa 12,5, cosa che gli conferisce un carattere fortemente alcalino. Questa forte alcalinità costituisce una protezione naturale dell'armatura contro la corrosione (passivazione).

Il fenomeno chimico è conseguente all'anidride carbonica dell'aria che, penetrando nei pori del calcestruzzo, neutralizza la calce libera presente. Il pH dello strato superficiale del calcestruzzo si abbassa fino a scendere a valori inferiori a 9 provocando il fenomeno della carbonatazione.



Soluzione di fenoftaleina

In questo stato il calcestruzzo è fortemente permeabile e riduce la capacità protettiva; fornisce inoltre, allo strato superficiale, una durezza superiore che tende ad ingannare i metodi di determinazione della resistenza a compressione misurati con sclerometro e pull-out.

L'indagine consiste nello spalmare il liquido sulla superficie della carota dopo aver pulito accuratamente con uno straccio. La soluzione di fenoftaleina, all'1% di alcool etilico, reagisce col calcestruzzo provocando un cambiamento di colore, da bianco trasparente a rosso violetto, nella parte non carbonatata.



Colorazione della carota

L'analisi va condotta subito dopo il prelievo della carota per evitare che si formi un film superficiale carbonatato lungo tutta la superficie che impedirebbe la reazione con la fenoftaleina.

La penetrazione della carbonatazione segue una legge parabolica del tipo: $s = k\sqrt{t}$ dove s è lo spessore dello strato carbonatato, t il tempo, mentre k è un coefficiente che dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo e dai fattori ambientali. In generale k diminuisce assieme alla riduzione del rapporto acqua/cemento e/o garantendo una buona costipazione con stagionatura ad umido.

Il valore di k tende ad aumentare per umidità relative, U.R., comprese tra 50% e 70%, mentre tende a diminuire per U.R. basse, < 40%, o alte, > 90%.

Quando il copriferro è carbonatato per tutto lo spessore protettivo delle armature, la situazione cambia. Prescindendo dall'eventuale presenza di cloruri, che aggraverebbe la situazione, la corrosione si produce velocemente solo nelle zone soggette a dilavamento o per U.R.>90%. In queste circostanze l'aumento di volume prodotto dall'ossido di ferro produce l'espulsione del copriferro e, di conseguenza, un incremento del fenomeno della corrosione.

Nelle altre zone, all'interno di edifici o aree schermate dalla pioggia, il fenomeno della corrosione rimane trascurabile.



Espulsione del copriferro

5.1.6 Rilevazione dei ferri d'armatura a mezzo di pacometro BS 1881-204

La rilevazione della posizione e del diametro delle armature può essere effettuata mediante uno strumento denominato pacometro.

Lo strumento consiste in una sonda emettitrice di campo magnetico collegata ad una unità di elaborazione digitale ed acustica.

La sonda è fatta scorrere lungo la superficie e dall'assorbimento del campo magnetico si è in grado di determinare la posizione delle armature, lo spessore del copriferro e, con buona approssimazione, il diametro dei ferri.

Questo tipo di rilevazione, oltre alla specificità della conoscenza delle armature superficiali, ha diverse altre funzioni, ed in particolare è utile per l'esecuzione delle altre prove come il carotaggio ed il Pull-out, che necessitano di evitare le armature.

Strumenti più sofisticati elaborano il segnale di risposta in forma digitale e memorizzando i vari passaggi permettono di ricostruire il reticolo delle armature.



Spazzolatura pacometrica



Individuazione delle armature

5.2 PROVE NON DISTRUTTIVE SULLE MURATURE

5.2.1 Martinetti piatti

L'uso dei martinetti piatti nella diagnosi dello stato delle murature ha due finalità:

- ottenere lo stato di esercizio tensionale di una zona specifica di muratura attraverso l'uso di un martinetto piatto singolo;
- determinare in sito le caratteristiche meccaniche della muratura attraverso l'uso di due martinetti piatti.

Martinetto piatto singolo

La rilevazione dello stato tensionale della muratura è basata sulla variazione dello stato deformativo in un punto della struttura per effetto di un taglio eseguito in direzione normale alla superficie.

Durante l'esecuzione del taglio, attuata attraverso una speciale troncatrice, la parte muraria sovrastante si scarica della tensione di esercizio.

La rilevazione del rilassamento è attuata attraverso 3 sensori elettronici che registrano un allungamento mano a mano che il taglio è completato. Si procede quindi all'inserimento del martinetto piatto ed alla messa in pressione. Mano a mano che la pressione aumenta i sensori di deformazione rilevano il ripristino delle tensioni.



Prova con martinetto piatto



Fase di taglio

La pressione di misura è quella che permette di ripristinare l'equilibrio deformativo riportando la misura dei sensori alla posizione precedente al taglio.

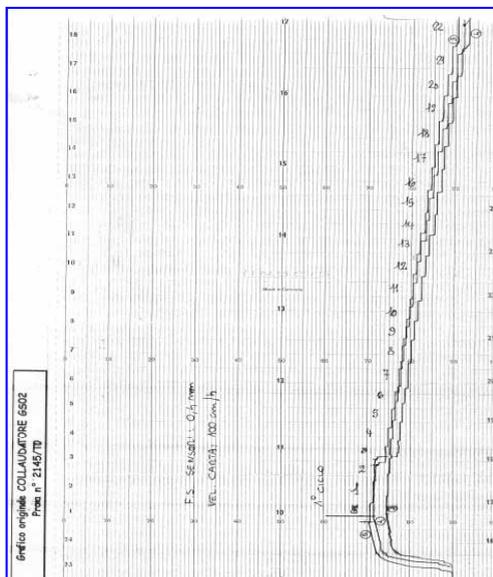


Grafico dei cedimenti

La prova è condotta ad incrementi di carico costanti mentre i sensori differenziali rilevano in tempo reale, su un grafico, l'andamento delle deformazioni.

I punti di fissaggio dei sensori di misura devono distare almeno 30 cm partendo da 10 cm dal taglio. Questa posizione consente la rilevazione dell'entità massima della deformazione muraria.



Fase di registrazione dei cedimenti

I martinetti piatti utilizzati sono in acciaio di forma semicircolare con le seguenti caratteristiche:

- superficie A_m 778,6 cm²;
- spessore 4,0 mm;
- diametro semicircolo 35 cm;
- profondità 26 cm;
- press. max esercizio 100 bar.



Martinetto piatto

La tensione di esercizio della muratura è calcolata mediante la seguente formula:

$$\sigma_e = k_m \rho_o \frac{A_m}{A_t} \quad (28)$$

dove:

σ_e = tensione di esercizio della muratura [MPa];

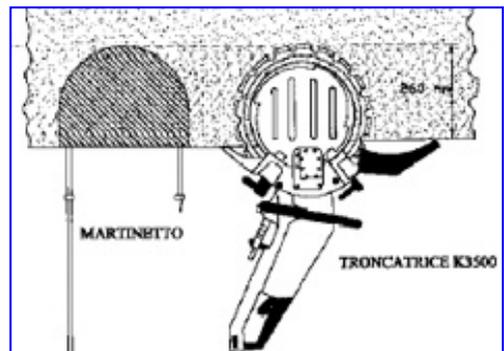
k_m = coefficiente di taratura del martinetto;

ρ_o = pressione di ripristino delle condizioni di deformazione [MPa];

A_m = area del martinetto [cm²];

A_t = area della superficie del taglio [cm²].

Il coefficiente k_m tiene conto della riduzione della sezione di spinta del martinetto dovuta all'influenza della rigidità del bordo e dello stato di affaticamento e deformazione conseguente all'uso. E' importante pertanto che, dopo ogni prova, il martinetto sia tarato in laboratorio per verificare lo stato d'esercizio e rideterminare il coefficiente di taratura k_m .



Il taglio nella muratura è effettuato da una troncatrice idraulica manuale con lama anulare diamantata. Il taglio che ne deriva, grazie alla particolare caratteristica

della sega che utilizza una trasmissione eccentrica, è di dimensioni uguali a quelle del martinetto.

Martinetto piatto doppio

Una volta rilevato il carico di esercizio della muratura si può proseguire installando un secondo martinetto parallelo al primo ad una distanza di circa 40 cm.

Tra i due martinetti è installato un ulteriore sensore di deformazione su base di misura 20 cm.

Il volume di materiale interposto ai due martinetti è sottoposto ad una prova di compressione aumentando via via la pressione contemporaneamente sui due martinetti piatti.

La pressione è aumentata fin tanto che la curva carico deformazione determina una linearità inferiore all'85% ad identificare l'inizio della deformazione plastica.

Per il calcolo della tensione di rottura σ_r si utilizza la formula

$$\sigma_r = k_m p_o \frac{A_m}{A_t}$$

dove k_m è rappresentato dalla media dei coefficienti di taratura dei due martinetti.

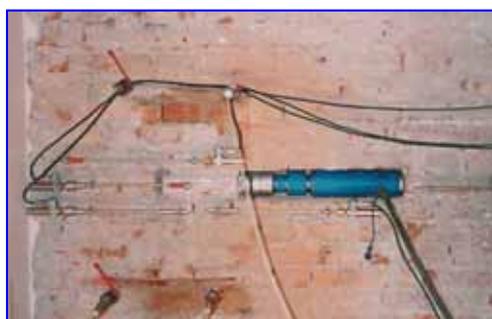
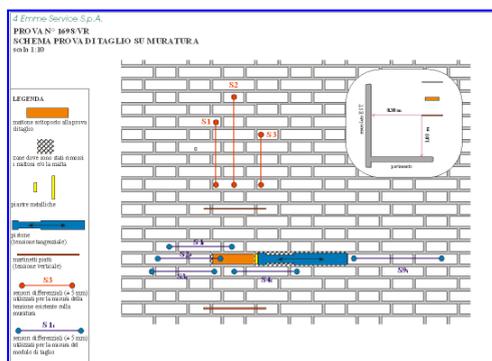
E' importante che la registrazione delle deformazioni avvenga in maniera grafica e continua, e non con sistemi puntuali che non sono in grado di evidenziare la formazione delle prime microfessurazioni.

Resistenza a taglio

Per rilevare la resistenza della muratura a sollecitazioni di origine diversa da quella del semplice peso proprio delle strutture, può essere utile misurare la resistenza al taglio di un singolo elemento di muratura sottoposto ad una forza laterale.

A questo scopo è utilizzato un martinetto inserito orizzontalmente all'interno della muratura, avendo cura di asportare alcuni elementi senza danneggiare la zona di prova.

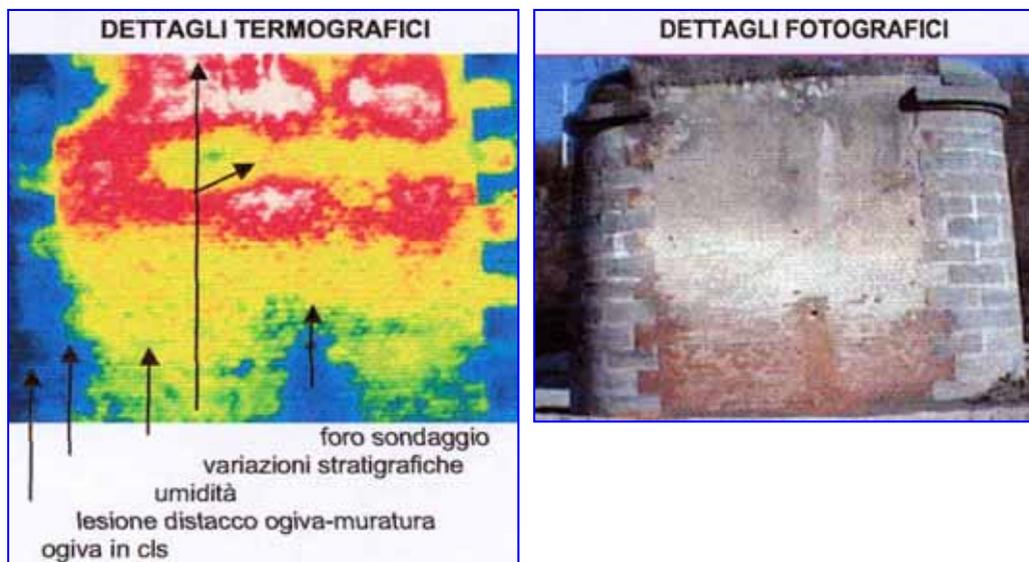
I sensori di misura sono posti orizzontalmente e segnalano il momento del distacco fissando la forza di taglio necessaria.



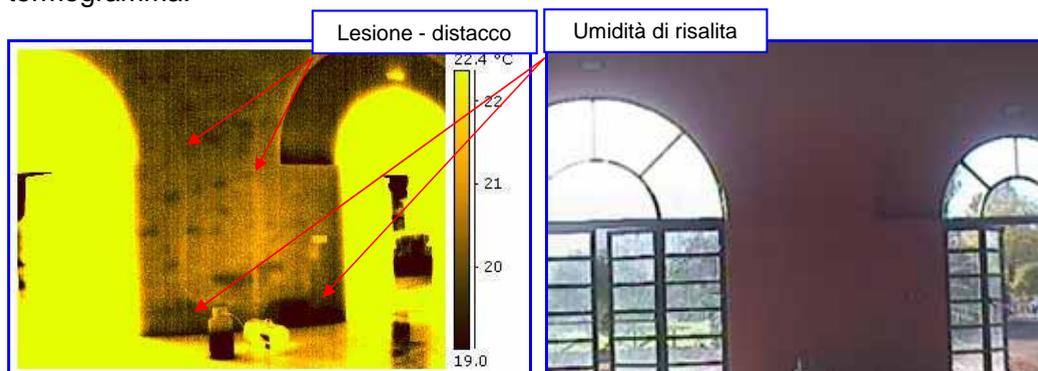
Prova di taglio

5.2.2 Termografia

Le indagini termografiche sono eseguite utilizzando delle particolari telecamere all'infrarosso (termocamere) che consentono di visualizzare e misurare la radiazione termica emessa da un soggetto e producendo un'immagine con tonalità di colore differente (termogramma), in base alle temperature radianti apparenti rilevate superficialmente.

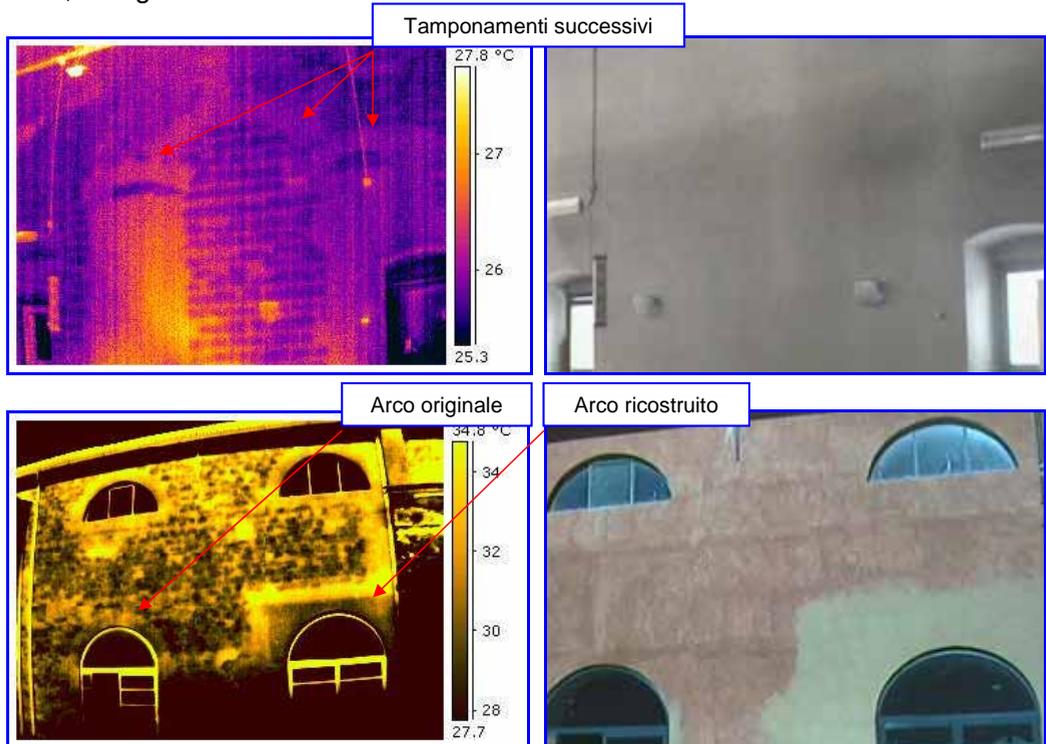


Il processo di diagnosi si attua mentre il calore migra dalla superficie verso l'interno dell'elemento indagato o viceversa, in conseguenza delle diverse capacità di trasmissione dei materiali. In presenza di degrado, la rapidità di trasmissione del calore è legata anche a vari fenomeni quali l'umidità, il distacco dell'intonaco, le fessurazioni ecc., con una resa diversificata nella scala cromatica del termogramma.

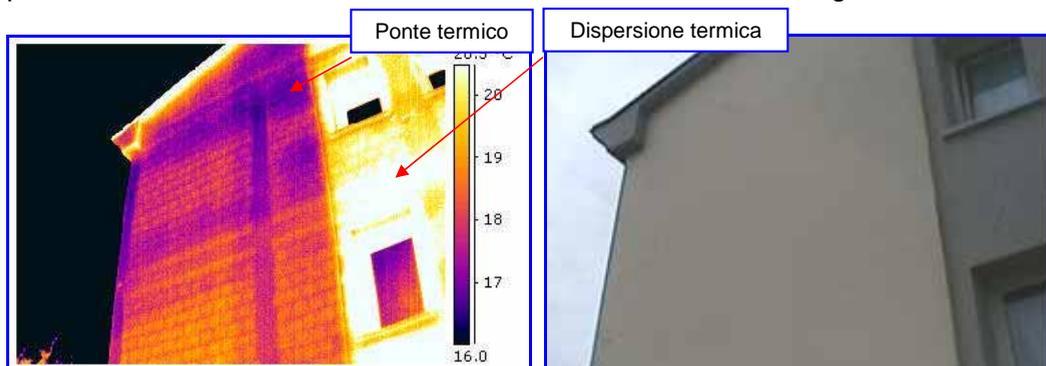


In fase di riscaldamento della superficie, artificialmente all'interno degli ambienti o sfruttando l'irraggiamento solare sia per gli interni, sia per gli esterni, si ottiene un transitorio termico in cui tutte le anomalie presenti tendono a rallentare in modo diverso la trasmissione del calore, rendendo possibile l'individuare sul termogramma dei fenomeni di degrado.

La termografia è particolarmente indicata anche nella ricerca storica architettonica. Sono infatti facilmente individuabili ampliamenti, tamponamenti, presenza di camini o sottoservizi, tessiture murarie sotto l'intonaco, orditura dei solai, omogeneità dei materiali ecc..



Una applicazione frequente è l'individuazione delle dispersioni termiche, permettendo di intervenire in maniera mirata alla coibentazione degli edifici.



5.3 PROVE SUGLI ACCIAI

5.3.1 Prova Vickers

ASTM A1038; UNI EN ISO 18265

La prova con microdurometro Vickers permette di ottenere una valutazione della resistenza meccanica dell'acciaio in sito. Per la sua semplicità consente di estendere la prova ad una grande quantità di elementi permettendo una efficace valutazione statistica.

L'area d'indagine deve preventivamente essere preparata eliminando la vernice e lucidandola con carta abrasiva di grana almeno 400.



Preparazione delle zone di prova

La misura della durezza si ottiene premendo la punta di diamante dello strumento sulla superficie dell'acciaio e producendo un'impronta; in questo modo si carica progressivamente una molla elicoidale contenuta nel corpo della sonda. Quando il carico ha raggiunto un valore corrispondente a quello di taratura lo strumento rileva automaticamente la misura dell'impronta e la memorizza. Un segnale acustico avverte che il processo di misura è completato.

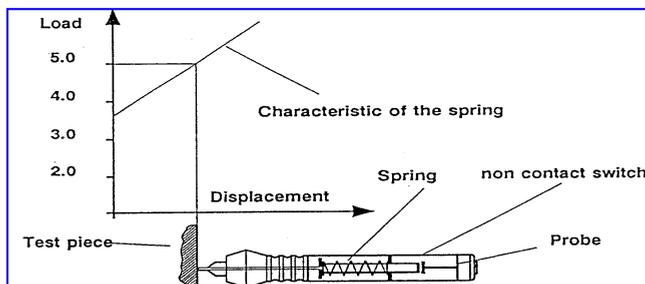


Esecuzione in sito della prova Vickers

Per ogni area di indagine si eseguono 15 misure che sono mediate scartando il valore più alto e quello più basso.

Lo strumento ha le seguenti caratteristiche:

- valutazione dell'impronta con metodo UCI (Ultrasonic Contact Impedance);
- carico di prova: 49,0 N;
- diamante piramidale con angolo: 136°;
- campo di misura da 20 HV a 1700 HV;
- risoluzione: 1 HV.



Il valore medio di durezza Vickers (HV) ottenuto per singolo elemento è convertito nella scala Brinell secondo la norma UNI EN ISO 18265. Si riporta uno stralcio di alcuni risultati sperimentali ottenuti su un ponte ferroviario.

Elem.		Elemento	Media HV	HB	R _t [MPa]
N°	HV	Diagonali	163	155	551
1	154	Montanti	161	153	545
2	152	Briglie inferiori	169	161	571
...	...	Controventi	157	149	529
15	162	Longherine	167	159	563
	157	Traversi	167	159	564

Per la valutazione della tensione si prendono come riferimento i valori ricavati dalle indagini sperimentali sul materiale.

Nell'esempio, la tabella riporta tutti i valori dell'indice di durezza Vickers rilevati, dai quali, in base alla norma, si può ricavare la resistenza a rottura per trazione caratteristica:

$$R_{tk} = R_{tm} - 1,64 SQ$$

dove R_{tm} è il valore medio di tutti i risultati, nel ns caso pari a 551 MPa, ed SQ è lo scarto quadratico pari a 15,5 MPa. Pertanto la resistenza a rottura per trazione caratteristica risulta **$R_{tk} = 528 \text{ MPa}$** .

Da questo risultato si deduce che l'acciaio impiegato può essere classificato come *Fe 520*, da cui si assume una tensione come ammissibile di **240 MPa**.

5.3.2 Liquidi penetranti

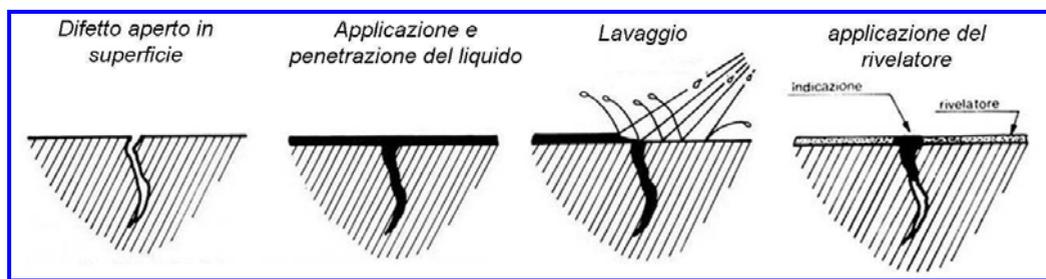
L'ispezione con i liquidi penetranti è adatta per evidenziare e localizzare sul materiale esaminato eventuali discontinuità affioranti in superficie, questo metodo è ampiamente utilizzato per la ricerca di difetti nelle saldature quali cricche e porosità.

Il principio si basa sulla capacità di questi liquidi di penetrare per capillarità (non per gravità) nelle fessure infinitesimali della superficie di una saldatura o di un semplice elemento metallico. Successivamente il liquido viene richiamato in superficie mediante apposite polveri (rivelatore), lasciando una traccia visibile dell'estensione e della forma del difetto.

UNI EN 571; UNI EN ISO 23277

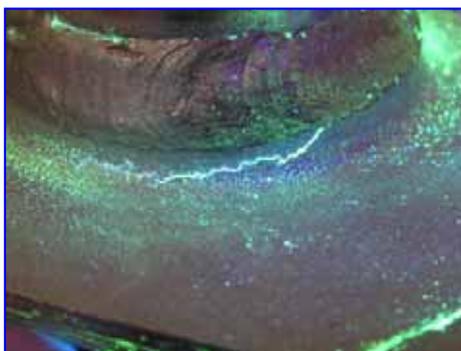


Controllo con liquidi penetranti



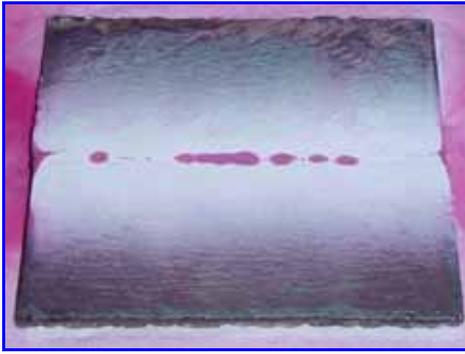
Fasi del controllo con liquidi penetranti

La scelta dei materiali da impiegare per l'esecuzione di un controllo coi liquidi penetranti non avviene a priori, ma solo dopo la valutazione di una serie di fattori. Questo perché esiste una grande varietà di penetranti e sviluppatore, ciascuno dei quali è maggiormente indicato per specifiche applicazioni. In generale, le variabili da tenere in considerazione riguardano la sensibilità richiesta, il tipo di materiale, l'estensione della superficie da controllare e il numero dei componenti da testare. Quando il requisito più importante del controllo è la sensibilità, la prima decisione che viene presa è di usare un penetrante fluorescente. Generalmente, i liquidi penetranti fluorescenti permettono di individuare difetti più piccoli perché l'occhio è particolarmente sensibile a tali indicazioni; l'ispezione con questo tipo di prodotti viene effettuata in un'area oscurata e la superficie viene illuminata per mezzo di una lampada di Wood.



Controllo con liquidi fluorescenti

Viceversa, in determinate circostanze quando l'esame è volto all'individuazione di difetti relativamente grandi e la finitura della superficie da analizzare non è elevata, come capita spesso nel controllo di giunti saldati, i penetranti visibili sono più adatti di quelli fluorescenti.



Controllo con liquidi penetranti visibili su giunti saldati

L'interpretazione dei risultati va eseguita da personale esperto in quanto ogni indicazione rilevata non significa necessariamente l'esistenza di un difetto. Esistono infatti delle indicazioni "false" o "non rilevanti" dipendenti da una non accurata preparazione superficiale preliminare, da una scorretta manipolazione dei pezzi prima dell'osservazione o dalla geometria del particolare (gole con fondo a spigolo vivo, fondi filetto, eccessiva rugosità superficiale ecc.).

Uno dei vantaggi del controllo non distruttivo con liquidi penetranti è la possibilità di essere applicato nella verifica della saldatura di qualsiasi componente, indipendentemente dalla forma o dal materiale dello stesso.

Tuttavia questa tecnica presenta i seguenti limiti:

- *il difetto da rilevare deve essere aperto in superficie;*
- *non è applicabile all'esame di superfici eccessivamente rugose o porose;*
- *la sensibilità del metodo è condizionata dal grado di finitura superficiale.*

E' importante sottolineare l'aspetto della preparazione e della pulizia della parte di saldatura da analizzare. La difficoltà si presenta a fronte di saldature verniciate dove è necessario procedere preliminarmente con una sabbiatura o spazzolatura meccanica. Questa operazione tende a mascherare le fessure limitando la capacità penetrativa dei liquidi. Sono quindi da impiegarsi speciali abrasivi plastici che hanno la proprietà di essere espulsi facilmente e di penetrare con efficacia anche nelle microfessure.

L'operazione di controllo deve essere eseguita con temperature del materiale compreso tra 10 e 40°C (esistono comunque prodotti specifici per alte temperature) per consentire la migliore capacità penetrativa del liquido.

Per quanto riguarda il *lavaggio* si utilizzerà un liquido adatto in funzione del tipo di penetrante utilizzato: acqua a bassa pressione, solventi o emulsionanti.

Infine va ricordato che le parti devono essere perfettamente asciutte prima dell'utilizzo del rilevatore.

Altre applicazioni del metodo risiedono nella ricerca di difetti di fabbricazione (cricche di tempra, filature, sdoppiature di laminazione, ecc.) e di servizio (cricche di fatica e di tensocorrosione, ecc.).

5.3.3 Controllo ultrasonoro

Il controllo ultrasonoro è un metodo non distruttivo in cui onde sonore ad alta frequenza sono introdotte nel materiale da esaminare, allo scopo di evidenziare difetti superficiali o interni, misurare lo spessore dei materiali, misurare la distanza e la dimensione delle difettosità.

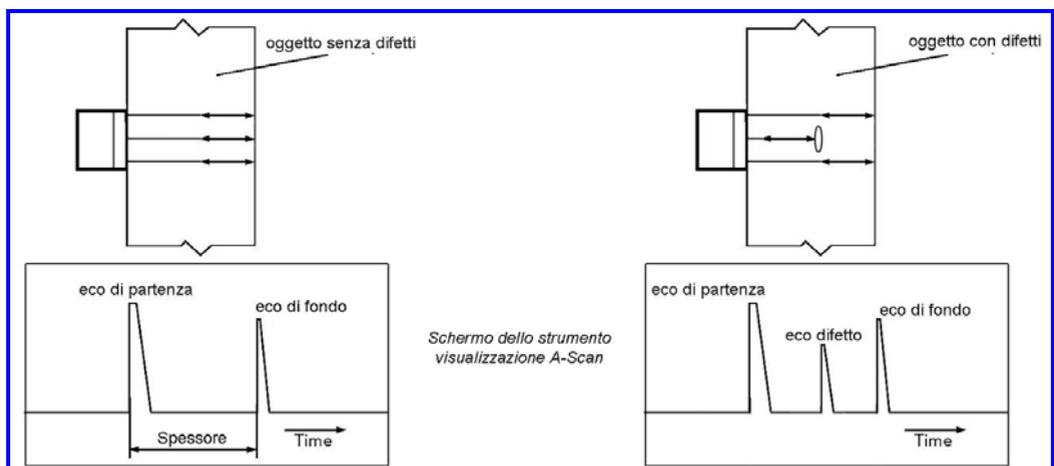
Gli ultrasuoni sono onde acustiche con frequenze superiori alla soglia dell'udito (0,5 - 25 MHz). L'impulso ultrasonoro viene trasmesso nel materiale da un apposito trasduttore, detto comunemente sonda.



Controllo ultrasonoro

Una sonda ad ultrasuoni, contiene un cristallo piezoelettrico in grado di trasformare un impulso elettrico in una vibrazione meccanica che genera onde sonore immesse nel componente da controllare. L'eventuale eco riflesso viene di nuovo captato dalla sonda, trasformato da vibrazione meccanica in impulso elettrico ed attraverso un cavo di collegamento riportato ad un apparecchio che ne amplifica il segnale e lo rende visibile su uno schermo.

Il segnale di partenza degli ultrasuoni (chiamato "eco di partenza") e quello riflesso dalla superficie opposta a quella d'entrata (chiamato "eco di fondo"), vengono visualizzati sullo schermo con dei picchi, la cui distanza risulta proporzionale al tempo che gli ultrasuoni impiegano a percorrere il percorso tra la sonda e la superficie riflettente all'interno del materiale. Se durante tale percorso il fascio ultrasonoro incontra delle discontinuità sarà riflesso, assorbito, deviato o diffratto secondo le leggi comuni a tutti i fenomeni di propagazione delle onde e sullo schermo, tra i due precedenti picchi (eco di partenza ed eco di fondo), ne compariranno altri che rappresentano delle indicazioni relative al tipo di discontinuità incontrate.



Ricerca di difetti in un pezzo con sonda piana

I materiali più comunemente utilizzati per le sonde sono il quarzo, il solfato di litio, alcuni ceramici polarizzati, tipo il bario titanato, il piombo zirconato titanato, metaniobato di piombo. Le sonde possono avere diverse forme, dimensioni e frequenze, la loro scelta è fondamentale e va fatta in base al tipo di materiale, alla geometria del componente da esaminare e del tipo di controllo.

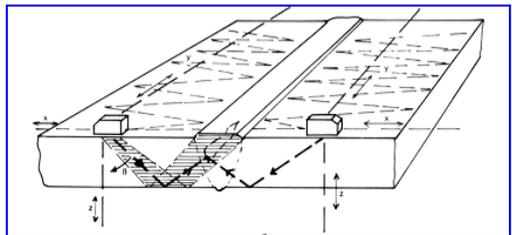
Esistono comunque quattro tipi "base" di sonda:

- *sonda piana*;
- *sonda angolata*;
- *sonda doppia*;
- *sonda ad immersione*.



Sonde

A differenza dei metodi con liquidi penetranti e con particelle magnetiche questo tipo di controllo è volumetrico, consente cioè la ricerca di difetti interni al materiale. Una delle applicazioni fondamentali di questa tecnologia è il controllo di giunti saldati a piena penetrazione. Questo tipo di applicazione prevede l'utilizzo di sonde angolate in quanto la geometria del giunto e la presenza del sovrametallo sul cordone di saldatura rende necessario un fascio ultrasonoro angolato, per sfruttare la riflessione della lamiera base e scandagliare l'intero volume della saldatura.



Controlli di giunti saldati con sonde angolate

A seguire si riportano i difetti tipici del giunto saldato rilevabili con il controllo ultrasonoro.

- *Mancanza di penetrazione*: si ha alla radice del giunto, quando i due lembi risultano separati e non saldati tra loro.
- *Inclusioni di scorie*: sono degli ossidi non metallici che restano inglobati nel metallo d'apporto o tra questo ultimo e il metallo base. Sono localizzati tra una passata e l'altra delle saldature o nelle incisioni marginali.

- *Porosità*: cavità o vuoti che si riscontrano del materiale d'apporto dovuti alla presenza di gas durante la saldatura.
- *Incisioni marginali*: sono delle incisioni del metallo base localizzate ai bordi della zona di saldatura.
- *Cricche*: sono delle imperfezioni prodotte da una rottura locale allo stato solido, che può formarsi per effetto del raffreddamento o di tensioni.
- *Mancanza di fusione (incollature)*: quando c'è una mancata fusione tra il metallo d'apporto e il metallo base.

Altri campi fondamentali di applicazione degli ultrasuoni sui materiali metallici sono il controllo delle barre e dei laminati, nonché la misura dello spessore di oggetti che sono accessibili da un solo lato o che necessitano di una verifica dello stato di usura o di corrosione (tubazioni, serbatoi ecc.).



Misure di spessori di elementi accessibili da un solo lato

5.3.4 Particelle magnetiche

L'esame con particelle magnetiche consente di rilevare difetti superficiali e subsuperficiali in materiali ferromagnetici.

Il metodo si basa sulla deviazione che le linee del campo magnetico, indotto in un materiale, subiscono in presenza di una discontinuità. Per evidenziare il difetto sarà sufficiente spruzzare sulle superfici magnetizzate delle sospensioni di polveri ferromagnetiche, colorate o fluorescenti. Le particelle si concentreranno allineandosi lungo le linee di flusso del campo magnetico, formando un "profilo" della discontinuità che generalmente ne indica la posizione, la dimensione, la forma e l'estensione.

UNI EN 17638 – UNI EN ISO 23278



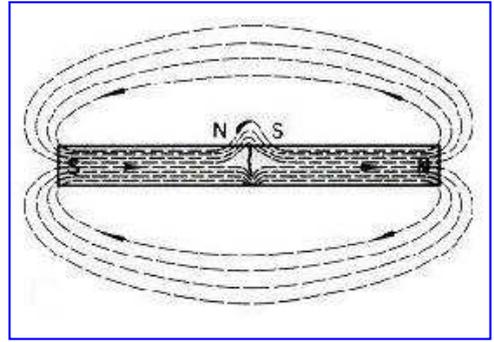
Controllo magnetoscopico con giogo

Importante per la rilevazione dei difetti è che questi siano orientati in modo da essere intercettati dalle linee di forza del flusso magnetico indotto; per tale ragione

lo stesso pezzo deve essere come minimo magnetizzato in due direzioni, fra di loro ortogonali.

Gli strumenti maggiormente utilizzati per magnetizzare il componente da controllare sono il giogo elettromagnetico ed i puntali.

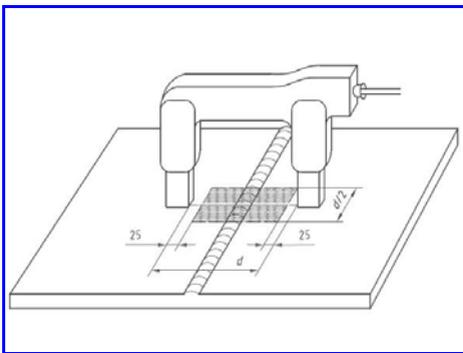
Il giogo elettromagnetico è uno strumento portatile molto versatile per i controlli magnetoscopici e perciò viene spesso adoperato nel caso di test condotti direttamente in cantiere. Il giogo è costituito da un avvolgimento a bobina intorno ad un corpo a forma di U in ferro dolce, in pratica si tratta di una elettro-calamita. La forma ad U ne consente il rapido e facile posizionamento sul particolare da controllare. I poli dell'elettromagnete possono essere completamente snodabili, questo consente l'impiego del giogo per il controllo di manufatti aventi forme e dimensioni diverse senza compromettere la sensibilità del metodo.



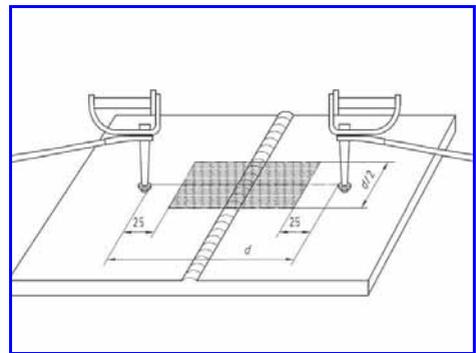
Deviazione del campo dovuta a una cricca

Il giogo può utilizzare sia corrente alternata che corrente continua ed inoltre l'intensità del campo magnetico può essere regolata attraverso la corrente. La corrente continua garantisce una maggiore penetrazione mentre la corrente alternata concentra il campo magnetico sulla superficie del pezzo fornendo una buona sensibilità per il rilevamento di discontinuità superficiali in un'area relativamente ristretta. In generale le discontinuità da rilevare devono essere nell'area centrale, cioè quella compresa tra i due poli del giogo ed orientate perpendicolarmente alla linea immaginaria che congiunge i poli stessi.

Quando si desidera analizzare dei materiali di notevoli dimensioni essi possono essere magnetizzati mediante un magnetoscopio a puntali. Questi ultimi servono per il passaggio di corrente, con la conseguente origine di un campo magnetico direttamente attraverso il materiale da testare.



Giogo elettromagnetico



Magnetoscopio a puntali

Il vantaggio rispetto ai liquidi penetranti risiede nella capacità di evidenziare anche quelle discontinuità del materiale che si trovano "sottopelle", ovvero localizzate nella zona superficiale ma non aperte in superficie.

L'unico e fondamentale requisito necessario per l'applicazione della tecnica in questione è che il componente sotto osservazione sia costituito da materiale ferromagnetico come: ferro, nichel, cobalto o alcune delle loro leghe; se tale condizione non fosse rispettata non sarebbe possibile magnetizzare il materiale ad un determinato livello, ottenendo così conseguenti risultati ispettivi non affidabili.

Il metodo magnetoscopico è utilizzato, oltre che per le saldature, per testare numerosi prodotti industriali delle più svariate forme, compresi pezzi derivanti da fusione e oggetti fucinati.

Nel caso di superfici molto irregolari è necessario molare tutto quello che può mascherare le indicazioni di discontinuità.



Controllo con giogo elettromagnetico



Cricca longitudinale in una saldatura