
POLITECNICO DI BARI

1^a FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRICA

DISPENSE DEL CORSO

IN

.....

PROVE E DIAGNOSTICA NON DISTRUTTIVA SUI MATERIALI

Docente:

Prof. Ing. Giuseppe ACCIANI

Collaboratore:

Ing. Vincenzo MUSCAS

ANNO ACCADEMICO 2005-2006

INDICE

Introduzione

Capitolo I

1.1 La definizione dei Controlli non Distruttivi	pag. 1
1.2 Il ruolo dei Controlli non Distruttivi	pag. 2
1.3 Classificazione CnD	pag. 5
1.4 Difetti e proprietà dei materiali	pag. 11
1.5 Influenza dei difetti sulle proprietà dei materiali	pag. 14

PARTE I - Metodi visivi

Capitolo I

1.1 Esame visivo o endoscopia	pag. 1
1.2 Metodi ottici e fotografici	pag. 3
1.3 Rilievi fotogrammetrici	pag. 4
1.4 Radiografia	pag. 6
1.4.1 I raggi X	pag. 8
1.4.2 Produzione di raggi X	pag. 12
1.4.2.1 I raggi X di frenamento	pag. 14
1.4.2.2 I raggi X caratteristici	pag. 16
1.4.3 Proprietà dei raggi X	pag. 18
1.4.4 Interazione con la materia	pag. 20
1.4.5 Tecniche radiografiche	pag. 22
1.4.6 Radiografia	pag. 24
1.4.6.1 Principi di base	pag. 24
1.4.6.2 La pellicola radiografica	pag. 31
1.4.6.3 L'immagine radiografica	pag. 36
1.4.6.4 Applicazione ai beni culturali	pag. 38
1.4.6.5 Casi di studio	pag. 44
1.4.7 Tomografia	pag. 54
1.4.7.1 Introduzione	pag. 54
1.4.7.2 Principi di base	pag. 55
1.4.7.3 Strumentazione tomografica	pag. 57
1.4.7.4 Parametri fondamentali in una tomografia	pag. 60
1.4.7.5 Applicazione ai beni culturali e casi di studio	pag. 61
1.4.8 Xeroradiografia	pag. 67
1.4.9 Stereoradiografia	pag. 70
1.4.10 Radiografia digitale	pag. 71
1.4.11 Fluorescenza a raggi X	pag. 74
1.4.11.1 Principi di base	pag. 75
1.4.11.2 Analisi del segnale	pag. 78
1.4.11.3 Applicazione ai beni culturali	pag. 83

1.4.11.4 Casi di studio	pag. 86
1.4.12 Vantaggi e svantaggi	pag. 95

Capitolo II

2.1 Metodo dei liquidi penetranti	pag. 96
2.1.1 Vantaggi e svantaggi	pag. 108
2.2 Rilevazioni di fughe	pag. 109

Capitolo III

3.1 Termografia	pag. 110
3.1.1 La tecnica termografica	pag. 111
3.1.2 Lo strumento: la termocamera	pag. 116
3.1.3 Le problematiche	pag. 122
3.1.4 I campi di applicazione	pag. 124
3.1.4.1 Industria	pag. 126
3.1.4.2 Civile	pag. 131
3.1.4.3 Ambiente	pag. 134
3.1.4.4 Altre applicazioni	pag. 138
3.1.4.5 Termografia per il rilevamento dei punti deteriorati sulle linee elettriche in Alta Tensione	pag. 141
3.1.5 La termografia applicata alla medicina	pag. 142

PARTE II - Metodi non visivi

Capitolo I

1.1 Metodo dell'emissione acustica	pag. 1
1.2 Metodi dinamici	pag. 2
1.3 Introduzione ultrasuoni	pag. 3
1.3.1 Il suono: caratteristiche fisiche	pag. 6
1.3.2 Fenomeni connessi con la propagazione delle onde sonore	pag. 12
1.3.3 Cenni di fisica acustica	pag. 15
1.3.3.1 SPL-HPL	pag. 15
1.3.3.2 Intensità	pag. 16
1.3.3.3 Emissione acustica	pag. 18
1.3.4 Ultrasuoni	pag. 21
1.3.4.1 Generazione	pag. 22
1.3.4.2 Trasmissione	pag. 24
1.3.4.3 Ricezione del segnale	pag. 26
1.3.4.4 Interpretazione dei dati	pag. 28
1.3.5 Applicazioni	pag. 32
1.3.6 Sonde per ultrasuoni e mezzi di accoppiamento	pag. 32
1.3.7 Tecniche di controllo	pag. 35
1.3.7.1 Tecniche per trasparenza	pag. 36

1.3.7.2 Tecnica per riflessione	pag. 39
1.3.8 Procedura operativa	pag. 43
1.3.9 Controllo dei trasduttori	pag. 46
1.3.10 Tecnica di esplorazione	pag. 52
1.3.11 Difficoltà nell'applicazione del metodo UT	pag. 54
1.3.12 Vantaggi e svantaggi	pag. 56
1.3.13 Prospettive future	pag. 58
1.3.14 Norme di riferimento per controlli con ultrasuoni	pag. 58
 Capitolo II	
2.1 Magnetoscopia	pag. 60
2.1.1 Tecniche di magnetizzazione	pag. 61
2.1.2 Circuiti magnetici	pag. 66
2.1.3 Magnetizzazione ed isteresi	pag. 68
2.1.4 Metodi di eccitazione del campo magnetico	pag. 73
2.1.5 Analisi d'impedenza per correnti parassite	pag. 76
2.2 Metodi magnetici	pag. 81
2.2.1 Metodi di dispersione del flusso	pag. 82
2.2.1.1 Ispezione con particelle magnetiche	pag. 83
2.2.1.2 Metodi dry e wet	pag. 88
2.2.1.3 Ispezione con nastro magnetico	pag. 89
2.2.2 Vantaggi e svantaggi	pag. 99
2.3 Metodo delle correnti indotte	pag. 100
2.3.1 Correnti di Foucault	pag. 102
2.3.1.1 Classificazione dei materiali dal punto di vista magnetico	pag. 102
2.3.1.2 Cenni teorici sulle correnti parassite	pag. 104
2.3.1.3 Applicazione tecnologica	pag. 105
2.3.1.4 Metodi utilizzati per la riduzione delle correnti parassite	pag. 108
2.3.2 La diagnostica industriale a correnti indotte	pag. 110
2.3.2.1 Cenni sui metodi numerici della diagnostica non distruttiva	pag. 112
2.3.3 Strumenti per la rilevazione dei difetti	pag. 116
2.3.3.1 Attrezzature utilizzate	pag. 118
2.3.3.2 Limiti del metodo a correnti indotte	pag. 132
2.3.3.3 Norme di riferimento	pag. 133
 PARTE III – Applicazioni	
Capitolo I	
1.1 Le principali applicazioni	pag. 1
1.1.1 Scelta delle tecniche di controllo	pag. 3
1.1.2 Proprietà fisiche	pag. 3
1.1.3 Difetti da ricercare	pag. 7
1.1.4 Geometria	pag. 14

1.1.5 Stato del materiale	pag. 17
1.2 Particolari casi di applicazione	pag. 18
1.2.1 L'aereo	pag. 18
1.2.1.1 L'ala	pag.
21	
1.2.1.2 Il motore	pag. 23
1.2.2 La ferrovia e il treno	pag. 25
1.2.2.1 Certificato di controllo sugli assili	pag. 29
1.2.3 Il monitoraggio strutturale	pag. 30
1.2.3.1 Termografia applicata a edifici e tetti	pag. 33
1.2.3.2 Sistemi di riscaldamento e perdite idrauliche	pag. 34
1.2.3.3 Isolamento termico	pag. 35
1.2.3.4 Controllo di tubi di caldaia, di scambiatori di calore e d'acqua	pag. 36
1.2.4 Pompa autoadescante	pag. 37
1.2.5 Settore Automobilistico	pag. 39
1.2.5.1 Test di affidabilità di componenti elettrici e meccanici	pag. 40
1.2.6 I Serbatoi di stoccaggio	pag. 43
1.2.7 Apparecchiature a Pressione (recipienti, tubazioni)	pag. 44
1.2.8 Controlli sui pali di fondazione	pag. 45
1.2.9 Beni artistici (dipinti, affreschi, statue)	pag. 47
1.2.9.1 Sculture	pag. 47
1.2.9.2 Dipinti su tela	pag. 47
1.2.9.3 Affreschi	pag. 49
1.2.9.4 Facciata di una chiesa	pag. 49
1.2.10 Applicazioni medicali	pag. 50
1.2.11 Campi di applicabilità	pag. 53

PARTE IV – Conclusioni

Capitolo I

1.1 Conclusioni: le problematiche delle prove non distruttive	<u>pag. 1</u>
1.2 Bibliografia e siti web	pag. 5

CAPITOLO I

1.1 La definizione dei controlli non distruttivi

Le Prove non Distruttive (PnD), note anche con il nome di Controlli non Distruttivi (CnD), consistono nell'indagine su materiali, manufatti e sui risultati di alcune lavorazioni al fine di verificarne l'integrità, la compattezza, la natura e/o composizione senza distruggerne o alterarne lo stato, attraverso metodologie riconosciute e standardizzate. Alcune di queste tecniche consentono di testare una singola parte di una struttura direttamente in loco senza doverla allontanare dagli altri componenti.

La materia si divide in:

Prove non Distruttive e/o Controlli non Distruttivi

quando le metodologie di analisi sono rivolte ai materiali ed ai processi di lavorazione di base sui materiali;

Diagnostica non Invasiva e/o Diagnostica non Distruttiva

quando le stesse metodologie o la combinazione di più metodologie sono orientate alla analisi di un sistema complesso (impianto industriale, edificio, sistema generico) nel quale vi può essere la presenza contemporanea di materiali compositi.

In entrambi i casi ciò che sarà verificata è la qualità parametrizzata del materiale o del sistema. Nel caso del materiale l'obiettivo primario sarà quello di accertarsi che esso non nasconda difetti congeniti o conseguenti alle lavorazioni del ciclo di produzione; nel caso, invece, di un sistema

complesso l'analisi diagnostica tenderà a verificare lo stato di funzionamento del complesso stesso e ad evidenziare le eventuali malformazioni o anomalie di funzionamento che potrebbero dipendere sia da difettologia dei materiali sia da cattivo impiego o stato di manutenzione del sistema.

1.2 Il ruolo dei controlli non distruttivi

La finalità di tutti i controlli non distruttivi è in ogni caso la sicurezza, la cui presenza viene verificata in termini di rispondenza a requisiti di affidabilità e di conformità al progetto secondo i quali un determinato prodotto è stato concepito e realizzato. Tali requisiti vengono generalmente valutati in base ad “**analisi di accettabilità**” (o di conformità rispetto a campioni di riferimento). Le “**analisi di caratterizzazione**” risultano invece finalizzate a definire accuratamente il comportamento di un qualsiasi materiale o prodotto, in diverse condizioni operative e/o ambientali, in modo tale da fornire risultati proficuamente utilizzabili per valutarne l'utilizzo in differenti campi di applicazione.

I controlli non distruttivi rivestono un ruolo fondamentale in tre diversi ambiti:



in **fase di collaudo**, cioè quando il prodotto viene testato prima dell'utilizzo;

-
- ✚ in **fase di controllo**, cioè durante la vita utile del prodotto, quando si rende necessario effettuare un monitoraggio della qualità e/o della sicurezza;
 - ✚ in **fase di diagnostica**, cioè quando, rilevata la presenza di un malfunzionamento, si rende necessaria la ricerca della causa, la valutazione dell'entità del problema da cui il malfunzionamento stesso dipende, nonché la raccolta di informazioni di carattere generale dalle quali dipende l'intervento risolutivo.

Di grande importanza è la possibilità di impiegare i metodi non distruttivi per l'effettuazione di *un monitoraggio completo e continuativo di parametri significativi in periodi più o meno lunghi*, quali l'inflessione di strutture portanti orizzontali, oppure per il controllo dello stato di difetti. È possibile ad esempio mantenere sotto controllo lo stato di avanzamento di un quadro fessurativo ritenuto pericoloso, valutando implicitamente le cause che lo governano e lo determinano, o valutare, nel corso della sua vita utile, l'inflessione di un ponte.

Controlli effettuati sui pezzi di prova permettono l'individuazione di zone sistematiche difettose e, quindi, *i C.N.D. diventano parte integrante del processo di progettazione*, dando un qualificato apporto alla **Garanzia di Qualità**, ovvero quel complesso di azioni sistematiche e ben pianificate volte a dare assicurazione che un impianto/sistema possano fornire le prestazioni richieste nelle diverse condizioni operative. La garanzia di qualità è un aspetto che riguarda anche *il valore commerciale del pezzo*.

L'utilizzatore pretende, infatti, un certo numero di anni di funzionamento senza inconvenienti. Si potrebbe pensare di sottoporre tutti i componenti a C.N.D., ma questo approccio estremo porterebbe i costi a livelli insostenibili ed impraticabili. Allora è importante valutare con attenzione il rapporto costi/benefici, infatti il costo cresce sempre più velocemente al diminuire (inteso sia come numero sia come dimensione) dei difetti riscontrabili nel prodotto. Nella *logica aziendale del massimo profitto* con la minima spesa si tenderà a ricercare la zona in cui si possa ottenere il massimo valore aggiunto, ad eccezione degli impianti critici per la sicurezza dell'uomo e dell'ambiente, in cui i rischi di eventuali rotture o semplice discontinuità di funzionamento non possono essere assoggettati a semplici legami costo-benefici.

1.3 Classificazione CnD

I controlli non distruttivi si suddividono in due famiglie:

- ***Controlli non distruttivi superficiali:***

che danno la possibilità di esaminare i particolari solo a livello superficiale ed al massimo sottopelle. Con l'applicazione di tali metodi di esame si ha solo la possibilità di localizzare l'eventuale presenza dei difetti, identificando solo la loro forma ed estensione, quindi non si riesce a quantificare in modo preciso la profondità del difetto.

- ***Controlli non distruttivi volumetrici:***

al contrario dei metodi superficiali con l'applicazione dei controlli volumetrici si ha la possibilità di verificare l'integrità del materiale, purtroppo in alcuni casi specifici non si riescono ad individuare difettosità superficiali. Dal momento che i metodi di esame volumetrici e superficiali hanno dei limiti, per aumentare l'affidabilità del controllo è buona norma abbinare una tecnica di controllo volumetrico con una di controllo superficiale.

Metodi superficiali:

I metodi di controllo non distruttivo superficiali sono:

-  esame visivo
-  esame con liquidi penetranti
-  esami con particelle magnetiche

Metodi volumetrici:

I metodi di controllo non distruttivo volumetrici sono:

-  esame radiografico
-  esame radioscopico
-  esame ad ultrasuoni
-  esame con correnti indotte

Un' altro tipo di classificazione a cui possono essere assoggettate le prove non distruttive è quella riguardante la visibilità del metodo, infatti i controlli non distruttivi di tipo ***non visivo*** sono:

-  il metodo degli ultrasuoni
-  emissione acustica
-  metodi dinamici
-  la magnetoscopia
-  il metodo delle correnti indotte

Mentre i controlli non distruttivi di tipo **visivo** sono:

- l' endoscopia
- ottici e fotografici
- rilievi fotogrammetrici
- la radiografia
- la tecnica dei liquidi penetranti
- rilevazioni di fughe
- la termografia

Infine un' altra grossolana classificazione è la seguente:

-  **metodi radiologici:** raggi x, raggi gamma e fasci di neutroni
-  **metodi acustici e oscillatori:** misure con impedenze ultrasoniche e meccaniche
-  **metodi elettrici e magnetici:** corrente parassita, dispersione di flusso magnetico, ispezione con particelle magnetiche, analisi con le microonde e misure con caduta di potenziale e campo alternato
-  **metodi visivi e ottici:** interferometria, olografia e tinture penetranti
-  **metodi termici:** radiazione infrarossa e vernici termiche.

Per la completa ispezione di un oggetto è generalmente richiesta una combinazione di due o più metodi. Tuttavia la decisione di scegliere un metodo piuttosto che un'altro dipende da diversi fattori:

-
1. valutazione della struttura e della composizione dei materiali.
 2. misura delle dimensioni.
 3. rivelazione dei difetti interni.
 4. rivelazione dei difetti superficiali e sottosuperficiali.

1) Per quanto riguarda il primo punto bisogna dire che i diversi fattori che determinano la composizione di un materiale comprendono la natura del materiale stesso, i costituenti di una lega e le concentrazioni dei componenti di un miscuglio.

I fattori connessi alla struttura invece includono la durezza dei metalli, la profondità nelle leghe, il contenuto di impurità e il grado di sollecitazioni interne. Questi fattori modificano i valori delle costanti elastiche, della conducibilità elettrica, delle proprietà magnetiche e della permittività elettrica. Le costanti elastiche sono connesse alla velocità del suono c (per un materiale isotropo di densità ρ , $c = (q/\rho)^{1/2}$ dove q è il modulo elastico appropriato.). La permittività elettrica può essere determinata utilizzando le microonde elettromagnetiche. Le proprietà dei metalli ferromagnetici e delle leghe possono essere determinate utilizzando metodi magnetici.

Per la misura della conducibilità elettrica infine è efficace il metodo della corrente parassita.

2) Per quanto riguarda la misura delle dimensioni (ad esempio lo spessore), essa è normalmente effettuata con le tecniche visuali (ottiche), ultrasoniche, delle correnti parassite e delle microonde. I metodi visuali sono tuttavia raramente utilizzati, mentre quelli ultrasonici consentono di

determinare spessori di diversi metri in un gran numero di metalli anche se lo stesso non si può dire per i non metalli. D'altra parte, le microonde elettromagnetiche si sono dimostrate altamente efficaci per misurare le dimensioni di molti oggetti di plastica. Il testing con le microonde può anche determinare gli spessori di oggetti metallici a facce parallele. Il metodo delle correnti parassite infine può essere utilizzato per misurare gli spessori di lamine metalliche molto sottili ed anche di rivestimenti dielettrici (ad esempio vernici) su substrati metallici.

3) La più comune applicazione del testing non distruttivo è probabilmente la rivelazione dei difetti interni. I metodi radiologici (raggi X e raggi gamma) sono maggiormente utilizzati per questo scopo (figura 2). Essi hanno il vantaggio di produrre un'immagine prontamente visibile e spesso ad alta risoluzione della regione interna dell'oggetto sotto test.

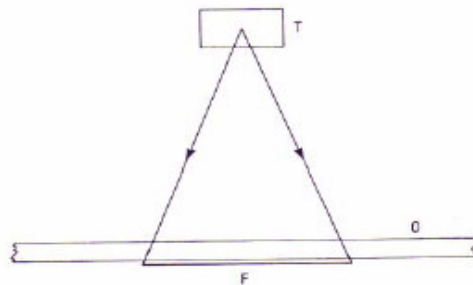


Figura 2. Dispositivo base per il testing con raggi X: le frecce indicano la direzione del fascio. *T* = tubo a raggi X, *O* = oggetto da testare, *F* = pellicola.

I principali svantaggi sono rappresentati dalla necessità di proteggersi dai rischi legati alle radiazioni ionizzanti (il che richiede un'area protetta e il

continuo controllo della salute del personale) e dal fatto che la profondità di penetrazione della radiazione nell'oggetto da testare può essere molto limitata (ad esempio 50 mm o meno in alcuni metalli e ancora meno in molti polimeri).

Anche i metodi ultrasonici possono essere utilizzati per la rilevazione dei difetti interni. Essi presentano il vantaggio di essere adatti ad individuare le posizioni dei difetti in una singola operazione e di non essere soggetti ai rischi legati alle radiazioni.

Infine anche le microonde possono essere utilizzate per misurare i difetti interni in oggetti non metallici ma generalmente con un grado di precisione più basso rispetto agli ultrasuoni.

4) La rivelazione delle fessure superficiali è ottenuta mediante i metodi delle tinture penetranti e delle particelle magnetiche. Il metodo delle tinture penetranti tuttavia non può essere utilizzato per rilevare difetti sottosuperficiali, mentre il metodo delle particelle magnetiche è adatto solo per i metalli ferromagnetici e richiede l'applicazione di un forte campo magnetico. I metodi elettromagnetici sono generalmente i più accurati per misurare le profondità delle rotture superficiali in campioni di metallo. La tecnica della corrente parassita è più precisa per le misure di rotture meno profonde, mentre per le rotture più profonde si utilizzano le misure con campo alternato. Il metodo della dispersione del flusso magnetico può essere usato per misurare le rotture superficiali e sottosuperficiali, ma solo per materiali ferromagnetici, e richiede l'applicazione di un forte campo magnetico. E' spesso usato per testare ampi tubi.

1.4 Difetti e proprietà dei materiali

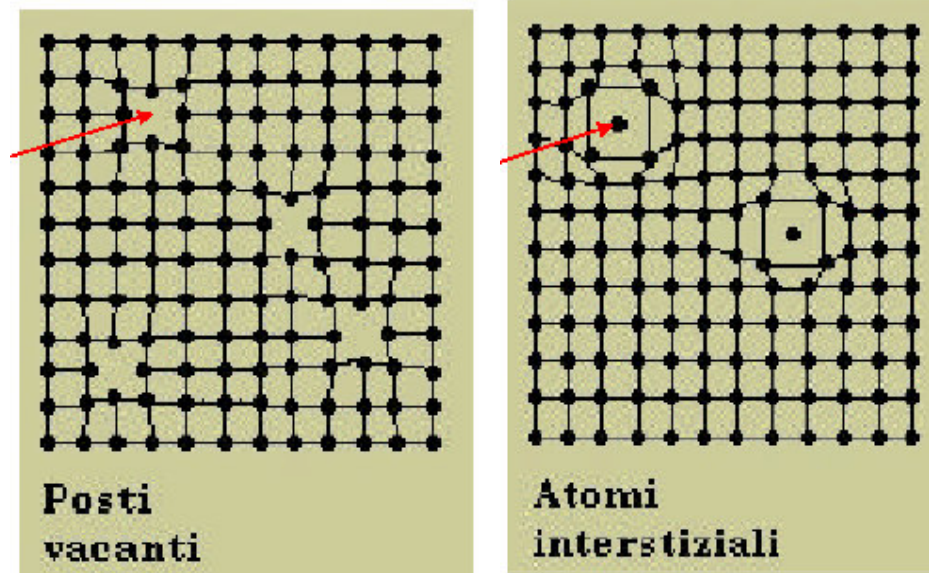
I difetti che possono essere presenti sui materiali possono avere una diversa origine, questi influiscono sulle proprietà fisiche e meccaniche del pezzo preso in considerazione provocando a volte la produzione di scarti di lavorazione. Esempi di difetti sono:

1. ***Inclusioni:*** sostanza estranea che può essere presente in vari cristalli; le inclusioni possono essere gassose, liquide, solide.
2. ***Cricche:*** appaiono come delle crepe nella struttura metallica. La cricca può essere prodotta da sollecitazioni eccessive del metallo o dal raffreddamento irregolare durante la fusione. La presenza di una cricca è indice di indebolimento della struttura metallica e precede sovente la rottura.
3. ***Difetti reticolari:*** sono imperfezioni del reticolo cristallino. Questi si suddividono in tre grandi categorie:

a) *Difetti puntiformi* :

- La vacanza: costituita da un sito atomico in cui l'atomo è assente. Le vacanze addizionali nei metalli possono essere introdotte da deformazioni plastiche, raffreddamento rapido e dal bombardamento con particelle energetiche.

-
- L'autointerstiziale: l'atomo occupa una posizione interstiziale tra atomi che lo circondano nelle normali posizioni atomiche. Questi difetti possono essere introdotti in una struttura a causa di irradiazioni.

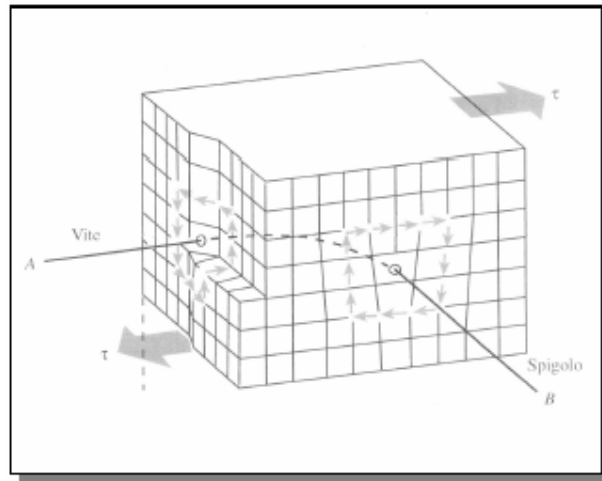


b) Difetti di linea: questi vengono anche detti **dislocazioni**, le quali causano distorsioni di reticolo concentrate attorno a una linea.

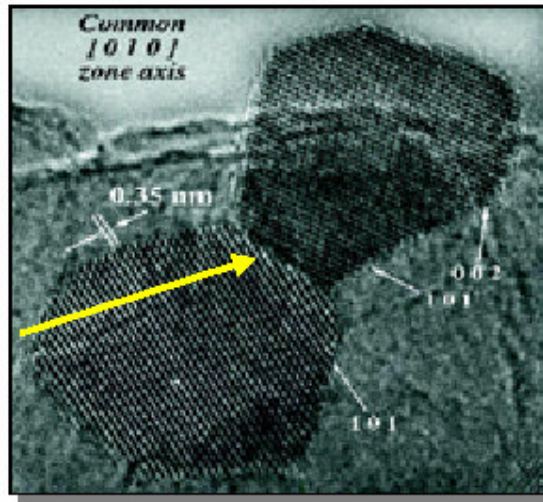
Le dislocazioni si creano o durante la solidificazione dei solidi cristallini o durante deformazioni plastiche o dall'addensamento di vacanze.

Un esempio di dislocazione è la dislocazione a vite che si può formare in un cristallo perfetto a seguito delle applicazioni verso l'alto o verso il basso di sforzi di taglio. Questi sforzi introducono una regione di reticolo

cristallino distorto con una forma a spirale di atomi distorti, nella quale viene immagazzinata energia.



c)Difetti di superficie: questi difetti sono costituiti dai **bordi di grano**. Questi nei metalli si creano durante la solidificazione, quando i cristalli formati da diversi nuclei crescono simultaneamente e si incontrano tra loro. La forma dei bordi di grano è determinata dalle restrizioni imposte dalla crescita dei grani vicini. Le dimensioni di questi difetti superficiali sono importanti specialmente per la resistenza meccanica dei materiali infatti tanto più queste sono elevate quanto più a temperature elevate possono avvenire scorrimenti tra i bordi di grano diventando quindi regione di debolezza nei metalli policristalli.



- 4. Microfessure:** complesso di lesioni capillari che si manifestano sotto forma di screpolature. Le microfessure possono essere generate da lesioni secondarie di trazione o da fenomeni di ritiro.

1.5 Influenza dei difetti sulle proprietà dei materiali

La presenza di difetti influenza le proprietà dei materiali.

1) **Resistività:** costante caratteristica di ogni sostanza che ne esprime numericamente l'attitudine a condurre correnti elettriche. Nel sistema internazionale di misura si esprime in ohm-metro. In un corpo omogeneo e isotropo la resistività ρ è data dalla relazione:

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$$

dove E è il campo elettrico e J è la densità di corrente.

Se un conduttore, di lunghezza l e sezione S, ha resistenza R la sua resistività è data da:

$$\rho = RS/L$$

La resistività aumenta al crescere della temperatura seguendo la seguente formula:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

dove t_0 è la temperatura ambiente a cui corrisponde il valore di ρ_0 e α è una costante detta coefficiente di temperatura. Per metallo puro è :

$$\alpha = 10^{-3} C^{-1}$$

per le leghe il valore di α è minore.

I materiali possono essere classificati in base alla *resistività* in:

- **Conduttori:** che sono dei corpi che permettono il passaggio di corrente presentando resistenza elettrica prevalentemente bassa. Nei conduttori si ha che la resistività è pari a $10^{-8} \div 10^{-5} \Omega m$.
- **Semiconduttori:** in cui $\rho = 10^{-6} \div 10^8 \Omega m$
- **Dielettrici o isolanti :** sostanze di conducibilità elettrica molto piccola (quasi nulla) $\rho = 10^7 \div 10^{16} \Omega m$

La resistività aumenta per la presenza di minore purezza .

Si è notato inoltre come una cricca superficiale, aumentando il percorso delle correnti indotte, fa diminuire localmente la conducibilità del metallo.

2) **Corrosione nei metalli:** fenomeno di natura chimico fisica che provoca il graduale deterioramento di una sostanza, per lo più metallo, per effetto di agenti esterni. La corrosione può avvenire per opera di agenti atmosferici (ossigeno, umidità, anidride carbonica) e consiste in genere nella trasformazione di metalli in ossidi. Lo strato di ossido formato superficialmente continua la sua azione sullo strato sottostante fino a degradare completamente il metallo. La presenza di difetti nel materiale non fa altro che accelerare il processo della corrosione.

3) **Deformabilità a freddo:** capacità di un corpo di deformarsi. La deformazione non è altro che un cambiamento di forma di un corpo provocato dall'azione di forze. La deformazione può essere elastica o permanente a seconda che al cessare della causa che lo ha prodotto si annulla o permane. La deformazione che si produce può essere **longitudinale**, data dal rapporto tra la variazione di lunghezza e la lunghezza iniziale o **trasversale**, data dal rapporto tra una dimensione trasversale e il suo valore iniziale. Il numero di difetti incrementa la deformabilità a freddo. Dopo questa fase introduttiva, nei prossimi quattro capitoli andremo ad analizzare in dettaglio i principali Controlli Non Distruttivi, con uno sguardo particolare a quelli più comunemente utilizzati.

PARTE I – Metodi visivi

CAPITOLO I

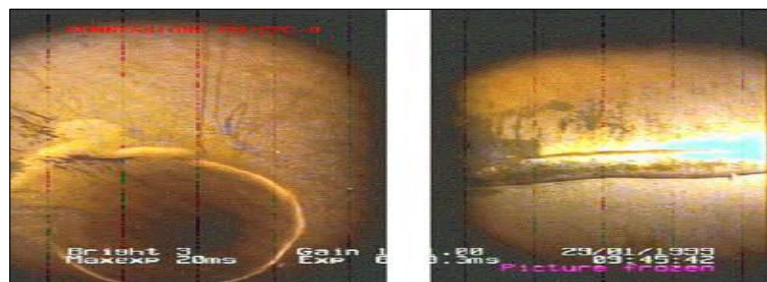
1.1 Esame Visivo o Endoscopia

Per esame visivo s'intende l'ispezione degli oggetti ad occhio nudo o col solo ausilio di lenti od endoscopi a fibre ottiche, rigidi o flessibili (piccole telecamere che in alcuni casi non raggiungono il diametro di cinque millimetri), che permettono di accedere anche all'interno di particolari geometricamente complessi e inaccessibili. Ovviamente l'esame visivo non può che rivelare difetti macroscopici superficiali e può sembrare inutile per ricercare difetti interni. In realtà consente subito di stabilire quali siano le superfici più idonee da scandire con eventuali sonde atte allo scopo (per esempio le sonde ad ultrasuoni).



Esame visivo con l'ausilio di lenti o endoscopi

Come prova non distruttiva l'esame visivo assume un ruolo importantissimo e soltanto agli inesperti può apparire una tecnica semplice o banale. In realtà, sebbene sia il metodo più naturale, richiede una discreta predisposizione all'osservazione ed una notevole esperienza, affinché possa rivelare all'operatore tutte le informazioni utili, potenzialmente disponibili. Permette la rilevazione di difetti di ossidazione, corrosione, erosione, impatto e frattura su superfici esterne ed interne (endoscopia). L'importante è comunque avere un “*foro*” d'accesso.



1.2 Metodi ottici e fotografici

Con tale denominazione si indica una serie di test basati sull'impiego della luce o di altre radiazioni (infrarossi o ultravioletti) quale mezzo per la rilevazione di difettosità anche a livello sub-superficiale, mediante l'analisi dei fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione delle radiazioni incidenti.



Nel caso dei metodi ottici tale analisi viene condotta mediante l'interferometria olografica (tecnica sofisticata basata sulla costruzione di una mappa a frange chiare e scure ottenuta sostanzialmente sovrapponendo su una lastra olografica due esposizioni del campione in esame, prima e dopo l'applicazione di una sollecitazione, ovvero sovrapponendo due immagini dell'oggetto, illuminato da sorgenti monocromatiche e coerenti (luce laser), la cui superficie si deforma impercettibilmente nella direzione

di osservazione); nel caso dei metodi fotografici, l'analisi è effettuata mediante registrazione su apposite emulsioni fotografiche sensibili alle radiazioni specifiche impiegate.

1.3 Rilievi Fotogrammetrici

La fotogrammetria permette, attraverso la digitalizzazione delle immagini, l'acquisizione delle dimensioni geometriche e di tutte le informazioni necessarie ad un rilievo accurato ed è utilizzata per creare una documentazione che permetta l'identificazione dettagliata e completa della struttura in esame.

Tale tecnica viene eseguita mediante il rilievo topografico, il raddrizzamento delle immagini (avviene secondo un modello matematico di ricostruzione) e la restituzione grafica di ogni singolo prospetto, che definisce ogni particolare costruttivo rappresentando mattoni, infissi, pietre, malta ecc. Una rappresentazione grafica fedele consentirà ai restauratori di avere il maggior numero di informazioni per poter intervenire sul degrado del soggetto in esame.

Sotto è riportato il rilievo fotogrammetrico eseguito sul prospetto principale del Palazzo Agresta D'Alessandro a Rotondella (MT), con la restituzione vettoriale riportante l'individuazione dei materiali e l'analisi dello stato attuale del degrado.



	Distacchi parziali
	Distacchi totali
	Efflorescenze
	Macchie
	Muschio
	Umidità per risalita capillare

Prospetto elaborato al CAD con l'analisi dello stato di degrado



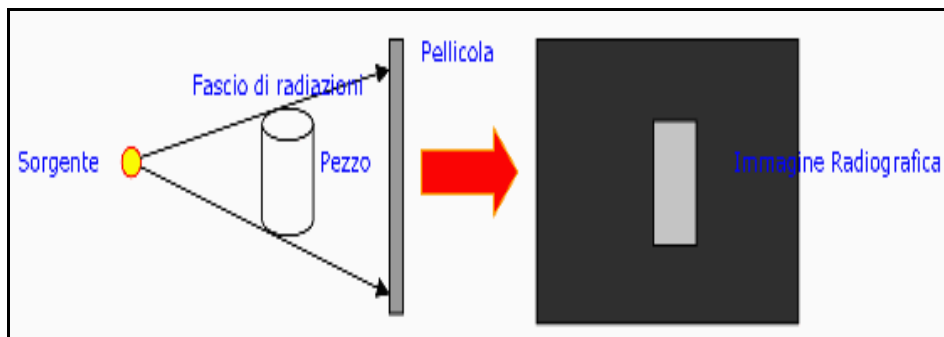
	Bucature		Pietre di origine locale
	Ferro		Legno
	Cemento		Coppi
	Laterizi		Matta
			Intonaco cementizio

Prospetto con individuazione dei materiali

1.4 Radiografia

Lo scopo della Radiografia Industriale è quello di riprodurre “l’immagine interna” di un oggetto senza distruggerlo; tale immagine viene fissata in modo permanente su di una pellicola radiografica, sfruttando le proprietà dei raggi X o dei raggi gamma:

- propagazione rettilinea
- potere di penetrazione nella materia
- capacità di impressionare una emulsione sensibile



Quando i raggi X, onde elettromagnetiche, passano attraverso l’oggetto da esaminare, vengono assorbiti in funzione dello spessore e della densità della materia attraversata; quelli che riescono ad attraversare il materiale, impressionano una lastra fotografica posta dietro l’oggetto da esaminare. A seguito dello sviluppo fotografico la lastra risulterà più o meno annerita nelle sue diverse zone, in funzione della dose di radiazione assorbita. Se nell’oggetto esaminato esistono difetti quali cavità, fessure, grosse

inclusioni meno assorbenti della matrice o discontinuità di materiale più denso e quindi più assorbente, sulla lastra si formeranno macchie più scure o più chiare, d'intensità proporzionale allo spessore del difetto, il quale apparirà delimitato dalla sua proiezione prospettica. I parametri da controllare per ottenere un adeguato annerimento della lastra al variare dello spessore dei pezzi sono:

- ✚ distanza sorgente-lastra, dato che l'intensità della radiazione decresce con il quadrato della distanza dalla sorgente;



- ✚ tempo d'esposizione;
- ✚ parametri elettrici del dispositivo sorgente , cioè tensione e corrente.

1.4.1 I raggi X

"Non avevo idea di cosa fossero quei raggi perciò li chiamai semplicemente raggi X, essendo x il simbolo matematico di una grandezza incognita".

Così Röntgen commentò l'origine del nome della sua serendipitosa scoperta.

In effetti, era alle prese con una serie di esperimenti sui fenomeni di scarica nei tubi a raggi catodici quando notò una luce verde proveniente da un pezzo di cartone che si trovava in un'altra parte della stanza. Il cartone era ricoperto di una sostanza chimica luminescente (platinocianuro di bario), che risplendeva se colpita dalla luce. Ma non c'era luce nel laboratorio. Röntgen tolse la corrente al tubo catodico e quella luce verde sparì. Ridiede corrente e mentre tratteneva degli oggetti tra il tubo e il cartone per testare quegli strani raggi, con suo grande stupore, vide, proiettata sul cartone, l'ombra delle ossa della sua mano.

E così, dall' 8 Novembre 1895, trascorsero sette settimane di esperimenti meticolosamente pianificati ed eseguiti prima di poter determinare la natura di tali raggi.

I raggi x sono onde elettromagnetiche con frequenze elevatissime, superiori a 10^{16} Hz, lunghezza d'onda compresa tra circa 10 nm e 0,001

nm, che trasportano per ogni singolo fotone energia compresa tra 0.12 e 120 keV¹.

Appartengono alle radiazioni ionizzanti, ossia radiazioni che trasportano quantità di energia sufficienti a generare nella materia fenomeni di ionizzazione e, dato che la minima energia di legame degli elettroni è dell'ordine di 10 eV, si stabilisce



Wilhelm Conrad Röntgen
(1895-1923)

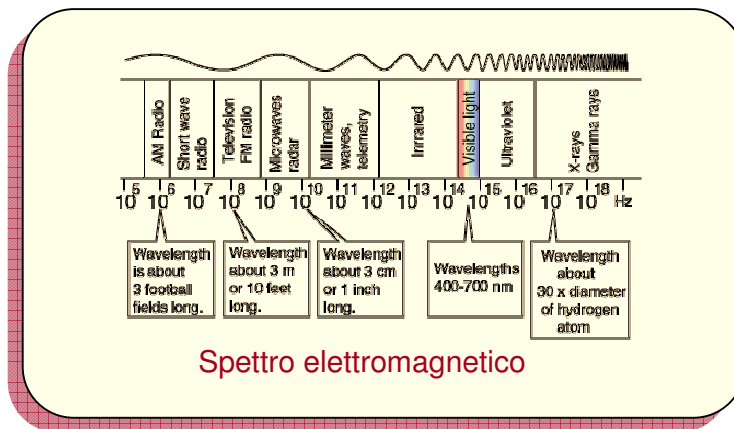


La “prima radiografia”

Si tratta della famosa radiografia fatta da Röntgen e inviata al fisico Franz Exner. È tradizionalmente nota come “la prima radiografia” o “la radiografia della mano della signora Röntgen”. Non è stata certo la prima né l'ultima.

come limite convenzionale tra le radiazioni ionizzanti e quelle non ionizzanti un valore di energia attorno ai 100 eV.

¹ 1eV=1.6*10⁻¹⁹joule. L'eV si usa come unità di misura dell'energia dei fotoni. 1 eV corrisponde all'energia cinetica acquistata da un elettrone quando viene accelerato da una differenza di potenziale di 1V.



Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali costituite da un campo elettrico E e da un campo magnetico H perpendicolari tra loro, che si propagano in direzione perpendicolare a quella di oscillazione: l'uno e l'altro variano nel tempo con una funzione periodica sinusoidale con frequenza ν determinata.

Le equazioni di Maxwell suggeriscono che una carica elementare posta in moto oscillatorio origina un campo elettrico variabile nel tempo e questo a sua volta genera un campo magnetico anch'esso variabile: entrambi si propagano nello spazio con velocità costante. L'emissione di energia sotto forma di onde elettromagnetiche non avviene con continuità ma tramite quanti discreti, *fotoni*, ciascuno associato ad una quantità di energia, data dalla relazione:

$$E = h \nu$$

dove h è la costante di Planck ($h=6.6 \cdot 10^{-34}$ js) e ν è la frequenza dell'onda.

L'energia e la capacità di penetrazione della radiazione sono inversamente proporzionali alla lunghezza d'onda: dei raggi X, quelli caratterizzati dalle lunghezze d'onda maggiori, ossia più vicine alla banda ultravioletta dello spettro elettromagnetico, vengono comunemente detti molli; quelli con lunghezza d'onda minore, e dunque più vicini, o addirittura sovrapposti, alla regione dei raggi gamma, sono chiamati duri.

Vengono inoltre detti "bianchi" i raggi X che risultano dalla sovrapposizione di più lunghezze d'onda e monocromatici quelli formati da radiazione di un'unica lunghezza d'onda, riprendendo esattamente la terminologia relativa alla regione visibile dello spettro.

I processi di emissione dei raggi X sono simili a quelli di emissione delle radiazioni luminose. si generano quando elettroni in moto con velocità prossime a quelle della luce interagiscono e, quindi, scambiano la propria energia con atomi di elementi ad elevato numero atomico. Dopo l'interazione la particella perde energia e questa viene convertita in radiazione elettromagnetica.

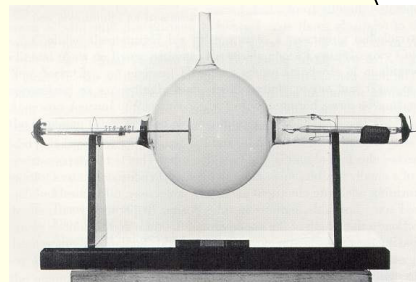
Inoltre, la produzione di radiazione, sia luminosa che nel campo dei raggi X, può avvenire per effetto di transizioni degli elettroni atomici tra stati energetici diversi; in particolare, mentre la transizione tra orbite esterne determina l'emissione di radiazione luminosa, quella tra i livelli energetici

più interni provoca emissione di radiazione alle frequenze proprie dei raggi X. La radiazione gamma, infine, i cui effetti sono molto simili a quelli attribuibili ai raggi X, è conseguenza delle trasformazioni energetiche che si verificano all'interno dei nuclei atomici.

1.4.2 Produzione di raggi X

I tubi elettronici impiegati attualmente per l'emissione dei raggi X non differiscono sostanzialmente dal dispositivo ideato dall'elettrotecnico Coolidge.

Tubo di Coolidge



Un tubo radiogeno consiste in un'ampolla di vetro sigillata nella quale dovrebbe essere mantenuto un vuoto molto spinto. Nell'ampolla si contrappongono due elettrodi, il *catodo* (un piccolo filamento di tungsteno) e l'*anodo* (in genere un cilindro di rame sulla cui faccia anteriore è fissata una piastrina di tungsteno). Il dispositivo è legato con due circuiti elettrici principali.

Un generatore di bassa tensione (max 15 V) fa circolare corrente nel filamento di tungsteno, così da provocare, per *effetto termoionico*, l'estrazione di una quantità di elettroni proporzionale alla corrente circolante e, quindi, alla temperatura raggiunta. Il secondo circuito elettrico (di alta tensione, fino a 100kV) accelera gli elettroni emessi dal catodo verso l'anodo; la tensione acceleratrice regola l'energia con cui l'elettrone giunge all'anodo ($E_c = 1/2 * mv^2$), ovvero l'energia massima messa a disposizione per la produzione di raggi X, e comporta anche un aumento del rendimento nella conversione da energia cinetica a energia fotonica emessa, poiché diminuisce la quantità di calore prodotto a favore della frazione di energia trasformata in raggi X.

I meccanismi attraverso cui l'elettrone nell'impatto con l'anodo perde energia sono:

- l'elettrone eccita un atomo della sostanza colpita spostando un elettrone esterno (orbitale ottico). L'atomo ritorna allo stato fondamentale emettendo radiazioni nel visibile;
- l'elettrone ionizza l'atomo rimuovendo un elettrone esterno;

-
- l'elettrone collide con un elettrone interno della sostanza colpita (shell K o L) e lo espelle. Se $W_{K,L}$ indica l'energia di legame dell'elettrone all'orbita K o L, l'energia richiesta per il processo è $E_c + W_{K,L}$. Un elettrone più esterno va a sostituire quello espulso con emissione della radiazione caratteristica della sostanza colpita;
 - l'elettrone interagisce con il nucleo atomico: in questo caso l'elettrone orbita parzialmente attorno al nucleo e perde energia per decelerazione (*bremsstrahlung*).

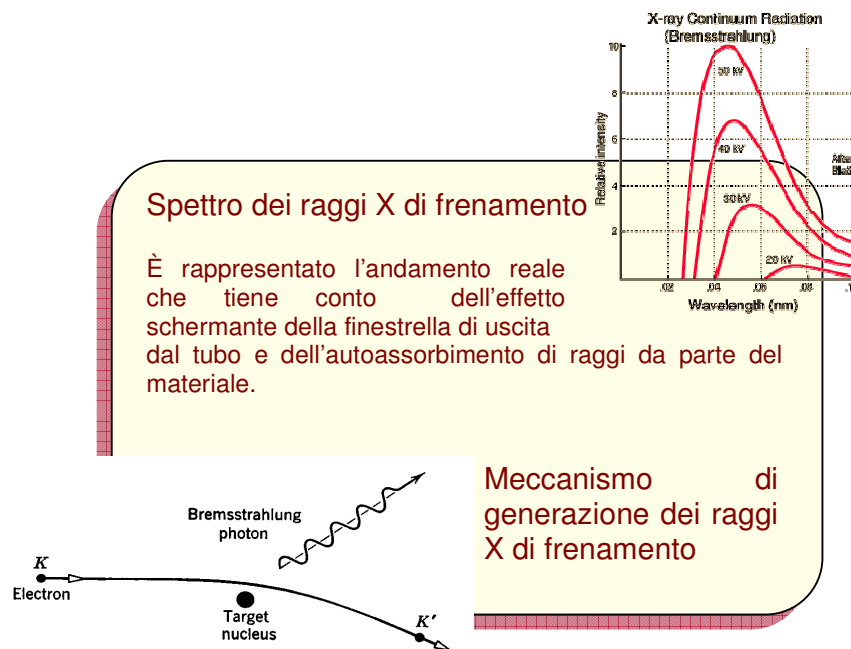
Nella produzione di raggi X i fenomeni dominanti sono il terzo e il quarto, anche se, in realtà, questi due processi sono eventi rari (1% dell'energia cinetica viene convertita in radiazione elettromagnetica) rispetto ai più probabili effetti di dissipazione di energia con sviluppo calore.

1.4.2.1 I raggi X di frenamento

Se uno degli elettroni provenienti dal catodo (*elettrone proiettile*) supera la barriera elettronica di un atomo della sostanza colpita e passa nelle immediate vicinanze del nucleo, sarà soggetto all'intensa forza di attrazione elettrostatica esercitata da quest'ultimo che costringe l'elettrone a mutare direzione di moto; l'accelerazione centripeta conseguente fa deviare l'elettrone causando, così, una perdita più (*raggi X duri*) o meno (*raggi X molli*) forte di energia che viene emessa sotto forma di un fotone il cui quanto di energia associato è proporzionale al frenamento subito,

ovvero alla distanza dell'elettrone dal nucleo. Al limite, nel caso di urto frontale dell'elettrone col nucleo l'energia irradiata è la massima possibile e pari al valore della tensione di accelerazione.

Lo spettro teorico dei raggi X di frenamento risulta continuo e indica che le energie di valore più basso sono quelle a maggiore probabilità. Lo spettro reale risulta diverso per l'effetto schermante dei materiali posti in corrispondenza della finestrella di uscita e per l'*autoassorbimento* dei raggi X di bassa energia all'interno del materiale colpito, così vengono eliminate gran parte delle componenti ad energia molto bassa. Il massimo della curva di spettro continuo è localizzato in genere a $\lambda = 1.58 \lambda_{\min}$.



1.4.2.2 I raggi X caratteristici

Se la collisione di un elettrone catodico ed un elettrone del metallo è sufficientemente violenta da ionizzare l'atomo bersaglio con rimozione totale dell'elettrone di un orbitale interno, la lacuna che si viene a creare tende ad essere colmata dalla caduta di un elettrone di un orbitale più esterno.

A seconda del livello di partenza e di arrivo si parlerà di serie K_α , K_β , ... L_α , L_β , ... M_α , M_β , ... e così via.

Il processo di assestamento della nube elettronica è accompagnato dall'emissione di una o più radiazioni elettromagnetiche che costituiscono i raggi X caratteristici.

Questi avranno un'energia pari alla differenza delle energie di legame degli elettroni orbitali coinvolti:

$$h \nu = W_1 - W_2$$

con W_1 e W_2 che indicano rispettivamente livello energetico di partenza e di arrivo dell'elettrone.

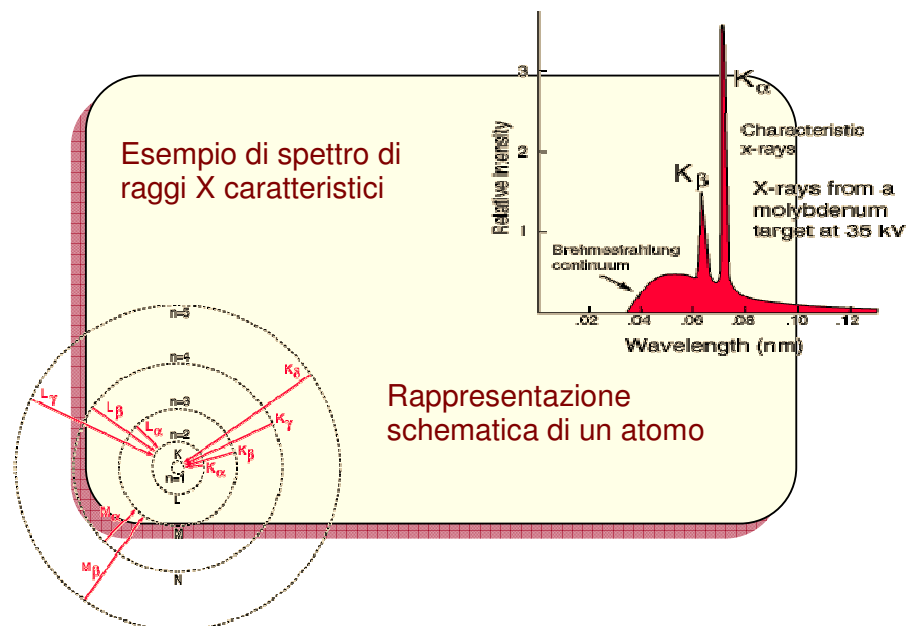
Poiché l'energia di legame degli elettroni è differente per ogni elemento, i raggi X prodotti saranno differenti da elemento a elemento, più precisamente saranno caratteristici dell'elemento bersaglio impiegato.

L'energia del fotone emesso nella transizione dal livello L (n=2) al livello K (n=1), cresce all'aumentare del numero atomico (l'energia di legame degli elettroni più vicini al nucleo cresce proprio nello stesso modo) secondo quanto suggerito dalla *legge di Moseley*:

$$\nu = [C(Z-a)]^2$$

dove **C** e **a** sono delle costanti che dipendono dalla particolare transazione che si osserva.

Lo spettro dei raggi X caratteristici è, quindi, uno spettro a righe, ciascuna riga è posizionata in corrispondenza dell'energia di transazione possibile e la corrispondente ordinata indica la probabilità della transizione stessa.



1.4.3 Proprietà dei raggi X

I raggi X impressionano un'emulsione fotografica similmente a ciò che fa la luce visibile. L'assorbimento di raggi X da parte dei diversi elementi avviene in modo selettivo; in particolare, minore è il peso atomico e la densità di una sostanza, più trasparente essa risulta al passaggio di raggi X di una lunghezza d'onda determinata. Questa proprietà viene sfruttata nell'analisi non distruttiva dei materiali, nell'analisi cristallografica e in radiologia medica.

Vediamo le principali proprietà dei raggi X.

Fluorescenza I raggi X hanno la proprietà di indurre la fluorescenza in alcune sostanze quali, ad esempio, il platinocianuro di bario e il solfuro di zinco. Ciò ha permesso di mettere a punto perfezionate tecniche di radioscopia, mediante le quali è possibile osservare direttamente la struttura di oggetti opachi.

Ionizzazione L'elevato potere ionizzante dei raggi X è una delle loro più importanti caratteristiche e, nella radiazione monocromatica, è direttamente proporzionale alla quantità di energia trasportata. Attraversando una camera di ionizzazione, i raggi X producono una corrente elettrica di intensità proporzionale alla loro energia, che può dunque venire misurata mediante una misura della corrente. Sfruttando questo fenomeno si sono realizzati strumenti anche più sensibili delle ordinarie camere di

ionizzazione: il contatore di Geiger-Müller e lo scintillatore. Inoltre, il potere ionizzante dei raggi X rende visibile la loro traiettoria in una camera a nebbia o una camera a bolle.

Diffrazione Quando i raggi X attraversano una sostanza cristallina o vengono da questa riflessi o diffusi, si verifica il fenomeno della diffrazione: gli atomi del cristallo, disposti in una struttura geometrica regolare, agiscono infatti da reticolo di diffrazione. La figura di interferenza che ne risulta può essere fotografata e analizzata, per determinare alternativamente la lunghezza d'onda dei raggi X incidenti o la distanza tra gli atomi nel cristallo, e quindi le dimensioni della cella primaria del reticolo cristallino. La diffrazione di raggi X può essere ottenuta anche impiegando reticoli a righe, a condizione che la spaziatura tra le righe sia dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della radiazione.

1.4.4 Interazioni con la materia

Esistono diversi meccanismi di interazione tra raggi X e materia. Tutti i casi evidenziano la natura quantizzata della radiazione.

Effetto fotoelettrico Quando colpisce un atomo, un quanto di radiazione, ovvero un fotone, può essere assorbito e provocare l'estrazione di un elettrone dalle orbite più esterne. Se l'energia del fotone incidente è superiore all'energia di legame dell'elettrone, quest'ultimo si allontana con un'energia cinetica pari all'eccesso di energia. Questo fenomeno, chiamato effetto fotoelettrico, si verifica perlopiù per assorbimento di raggi X di bassa energia.

Effetto Compton L'effetto Compton, scoperto nel 1923 dal fisico statunitense Arthur Holly Compton, è un fenomeno fisico che si osserva quando un fotone ad alta energia (e, quindi, anche un fotone di radiazione X) colpisce un elettrone. In base alle leggi di conservazione della quantità di moto, valide in generale nell'urto tra corpi, le due particelle deviano dalle rispettive traiettorie iniziali e il fotone uscente, avendo ceduto all'elettrone parte della propria energia, emerge con una lunghezza d'onda maggiore di quella iniziale.

Produzione di coppie Un particolare fenomeno di interazione radiazione-materia si verifica quando elementi di alto peso atomico vengono irraggiati

con radiazione X ad alta energia. Un fotone che penetra nello strato elettronico più vicino al nucleo di un atomo può determinare la formazione di una coppia elettrone-positrone (quest'ultimo è una particella con tutte le caratteristiche dell'elettrone, ma con carica positiva), ossia convertire la propria energia in massa. Perché si verifichi questo fenomeno, il fotone deve avere un'energia pari ad almeno 1,2 MeV, ossia all'equivalente in energia della somma delle masse delle due particelle da produrre. Se il fotone incidente possiede un'energia superiore a questo valore di soglia, l'eccesso di energia viene convertito in energia cinetica della coppia di particelle, che si allontanano in direzioni divergenti, come deve essere per il principio di conservazione della quantità di moto.

Effetto Rayleigh A seguito di questo effetto un fotone incidente viene deviato dalla sua traiettoria iniziale a causa dell'interazione con il nucleo, mantenendo invariata la sua energia.

1.4.5 Tecniche radiografiche

Le tecniche radiografiche sono note per la loro diffusa applicazione in tutti i campi della medicina e in molte applicazioni industriali, ma pochi sanno che Röntgen, lo scopritore dei raggi X, fu tra i primi ad effettuare la radiografia di un dipinto. In realtà, dal primo ventennio del XX secolo, è iniziato un uso rilevante di tali tecniche anche nel campo dei Beni Culturali, tanto che ormai molti musei dispongono di apparecchiature radiologiche per l'analisi dei dipinti e di altri oggetti di interesse museale.

La loro progressiva penetrazione nel mondo dell'arte nasce dall'esigenza di indagare l'intima natura dell'opera, dato che "...come gli esseri viventi anche i dipinti hanno una doppia vita: un volto ufficiale, pubblico e un volto privato, più segreto che riusciamo ad esplorare solo nel corso di una lunga intimità."

Così afferma Magdeleine Hours nel suo libro *I segreti dei capolavori*: "La storia stessa della pittura si trasforma attraverso queste modalità d'indagine: gli avvenimenti della vita degli artisti diventano più chiari, così come l'evoluzione del gusto. Senza dubbio alcune scoperte non vanno al di là della storia minima, ma oltre a soddisfare la nostra curiosità, una volta messe assieme, possono consentire di situare meglio l'artista nel suo ambiente, di vedere quali influenze abbiano esercitato su di lui le abitudini e le mode del suo tempo. I capolavori di Rembrandt, così vigorosamente originali, sono segnati più di quanto non si pensi dal gusto dell'epoca, "la moda del momento". Osservate il corpo di Betsabea, così naturalmente

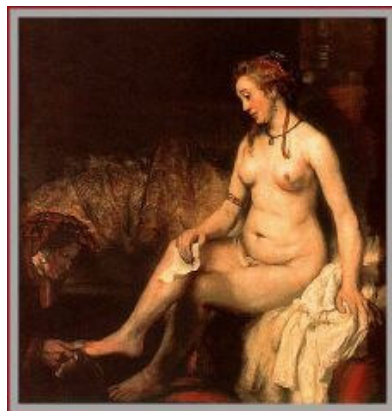
gracile ed elegante nello schizzo, grazie ai raggi X; nell'opera finita appare ispessito con ampi tratti aggiunti dal pittore, ansioso di adeguarsi ai canoni del suo secolo.”

Dunque, attraverso la radiografia, possiamo ripercorrere i vari stati della creazione artistica!

In realtà, le tecniche radiografiche, in ambito artistico, vengono utilizzate per svariati scopi; in generale consentono:

- di valutare le tecniche di realizzazione degli oggetti di interesse;
- di osservare lo stato di conservazione;
- di osservare eventuali restauri;
- di localizzare i punti di interesse per ulteriori osservazioni.

Nei paragrafi successivi verranno illustrate le principali tecniche radiografiche che trovano applicazione nel campo dei Beni Culturali.



Betsabea al bagno
1834

Rembrandt

Olio su tela
180 x 140 cm

1.4.6 Radiografia

1.4.6.1 Principi di base

In relazione alla loro ridotta lunghezza d'onda i raggi X risultano radiazioni assai penetranti nella materia; essi riescono ad attraversare indisturbati molti corpi materiali.

L'attraversamento di un corpo da parte dei raggi X dipende da vari fattori, tra i quali:

- il tipo di atomi che costituiscono il corpo;
- la loro densità;
- lo spessore del corpo;
- la lunghezza d'onda dei raggi impiegati.

A parità di lunghezza d'onda di radiazioni X usate, la maggiore o minore “trasparenza” del materiale, ovvero il minore o maggiore assorbimento dei raggi da parte del materiale, è dovuta essenzialmente al differente tipo di atomi in esso contenuti: gli atomi dei metalli pesanti sono assai più opachi, ossia meno trasparenti ai raggi X rispetto ad altri atomi.

Si consideri un fascio collimato e monoenergetico di raggi X ². Quando questo attraversa una lastra di materiale di spessore s , viene parzialmente assorbito, così che l'intensità iniziale del fascio I_0 , dopo l'attraversamento della lastra, si riduce al valore I . La legge che lega tali due intensità, è la relazione fondamentale della radiologia, anche detta *legge di Lambert-*

² vale lo stesso anche per i raggi γ

Bouguer. Tale legge descrive l'assorbimento esponenziale di un fascio monoenergetico collimato di raggi X in funzione dello spessore di una lastra di materiale omogeneo ed assume la forma:

$$I = I_0 \exp(-\mu s)$$

dove μ è il coefficiente di attenuazione lineare ed è espresso in cm^{-1} , s è lo spessore della lastra.

Il rapporto I/I_0 è detto *trasparenza*, il reciproco *opacità*.

La legge scritta evidenzia che, per un dato materiale, l'intensità I dei raggi X che emerge dalla lastra diminuisce in modo esponenziale con lo spessore s della lastra stessa, dato che $\therefore$, fissata l'energia della radiazione e il materiale della lastra, dipende da s .

Inoltre, per una lastra di materiale omogeneo e di spessore costante, l'assorbimento della radiazione dipende dall'energia della radiazione stessa e aumenta al diminuire dell'energia.

L'intensità I del fascio di radiazione che attraversa l'oggetto diminuirà, quindi, con l'aumentare dello spessore della lastra, e verrà registrata su un eventuale film radiografico con un maggiore annerimento del film oppure, su un eventuale rivelatore di raggi X, con un minore numero di fotoni.

Se il fascio di raggi X non è collimato, ma è "largo", e se attraversa una lastra di materiale omogeneo e di spessore costante, allora si avrà sul film radiografico un annerimento uniforme in tutta la zona attraversata dalla radiazione. Se, eventualmente, tale fascio incontrasse un buco lungo il suo

percorso nella lastra, allora, i raggi X in quella zona sarebbero meno assorbiti di quelli che passano altrove. La lastra sarà, quindi, meno impressionata in quella zona o il rivelatore misurerà più fotoni.

Cerchiamo di capire meglio il significato del coefficiente di attenuazione lineare μ . Tale coefficiente dipende da:

- l'energia della radiazione impiegata;
- il materiale che costituisce la zona attraversata dalla radiazione;
- la densità del materiale.

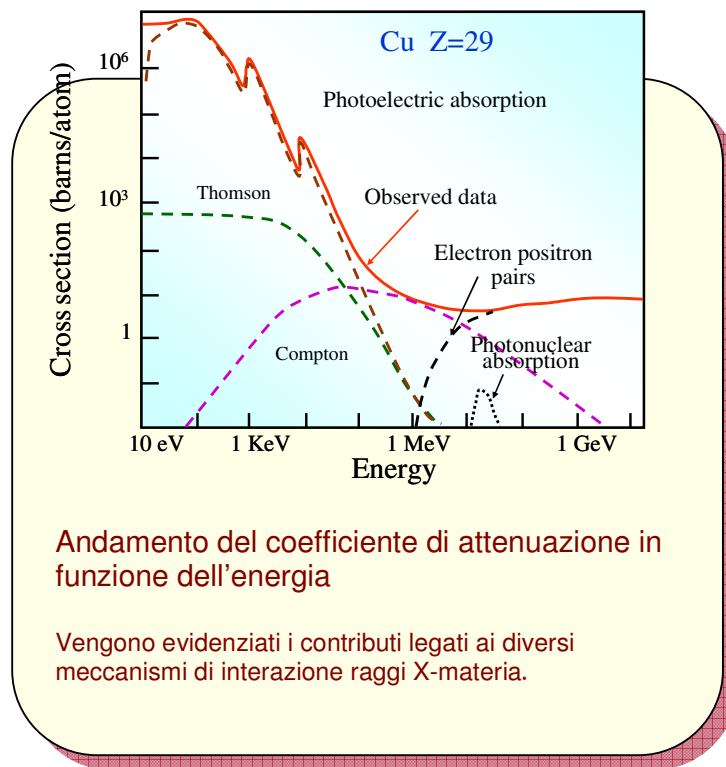
A causa della dipendenza di μ dalla densità Δ del materiale è opportuno scrivere il coefficiente di attenuazione lineare come:

$$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{\mu}{\rho} \text{ (cm}^2\text{/g)} \Delta \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

il termine μ/Δ è chiamato coefficiente di attenuazione di massa ed è ovviamente indipendente dalla densità del materiale e, a parità di energia, dipende dal numero atomico Z dell'elemento costituente la lastra, nel senso che i materiali di numero atomico maggiore, come già detto, attenuano di più che non materiali di numero atomico inferiore.

È possibile legare il comportamento di μ ai principali fenomeni di interazione dei raggi X con la materia. In particolare, alle basse energie (nell'acqua fino a 25keV), prevale il coefficiente di attenuazione lineare per effetto fotoelettrico e si ha una dipendenza di μ da $Z^4 - Z^5$, alle alte energie

(per l'acqua oltre i 50keV) prevale il coefficiente di attenuazione lineare per effetto Compton. In tal caso μ risulta proporzionale alla densità del materiale. L'effetto Rayleigh incide in totale per non più del 5-10% . La somma dei contributi dovuti ai tre effetti costituisce il *coefficiente di attenuazione di massa totale*.



Il coefficiente di attenuazione di massa è tabulato per tutti gli elementi chimici e per i composti, misture e sostanze più importanti. La sua conoscenza è essenziale per poter stimare preventivamente quanti fotoni

attraverseranno il campione ed è, inoltre, utile per valutare, note le dimensioni e la composizione almeno approssimativa del campione, l'energia della radiazione da impiegare per ottenere un'immagine ottimale. Si può, infatti, dimostrare che per ottenere una buona immagine radiologica, è bene che sia soddisfatta la relazione:

$$\mu s \cong 2$$

che, in pratica, equivale a richiedere che su 100 fotoni in ingresso, all'incirca 15 passino senza interagire.

Dato lo spessore s del campione da indagare, dalla relazione vista, si potrà ricavare μ . Avendo a disposizione una tabella con coefficienti di attenuazione valutati, per vari elementi o composti, in funzione dell'energia della radiazione, si cerca il valore di μ calcolato nella colonna relativa al materiale del campione; quindi, si potrà leggere in corrispondenza della riga che, approssimativamente, riporta tale valore, il valore indicativo di energia della radiazione che consente di ottenere un'immagine ottimale.

<i>E(keV)</i>	<i>Aria</i>	<i>Acqua</i>	<i>Legno</i>	<i>Pietra</i>	<i>Rame</i>
<i>10</i>	<i>0.007000</i>	<i>5.100</i>	<i>1.800</i>	<i>60.00</i>	<i>1840.00</i>
<i>20</i>	<i>0.001000</i>	<i>0.800</i>	<i>0.300</i>	<i>8.40</i>	<i>290.00</i>
<i>30</i>	<i>0.000500</i>	<i>0.370</i>	<i>0.200</i>	<i>2.80</i>	<i>93.00</i>
<i>40</i>	<i>0.000300</i>	<i>0.270</i>	<i>0.150</i>	<i>1.40</i>	<i>41.00</i>
<i>50</i>	<i>0.000270</i>	<i>0.220</i>	<i>0.120</i>	<i>0.90</i>	<i>22.00</i>
<i>60</i>	<i>0.000230</i>	<i>0.200</i>	<i>0.110</i>	<i>0.70</i>	<i>13.50</i>
<i>80</i>	<i>0.000220</i>	<i>0.180</i>	<i>0.095</i>	<i>0.55</i>	<i>6.50</i>
<i>100</i>	<i>0.000200</i>	<i>0.170</i>	<i>0.085</i>	<i>0.50</i>	<i>3.90</i>
<i>150</i>	<i>0.000180</i>	<i>0.150</i>	<i>0.080</i>	<i>0.32</i>	<i>1.90</i>
<i>200</i>	<i>0.000160</i>	<i>0.135</i>	<i>0.060</i>	<i>0.30</i>	<i>1.35</i>
<i>300</i>	<i>0.000140</i>	<i>0.120</i>	<i>0.050</i>	<i>0.25</i>	<i>0.95</i>
<i>400</i>	<i>0.000120</i>	<i>0.110</i>	<i>0.045</i>	<i>0.22</i>	<i>0.80</i>

<i>500</i>	<i>0.000110</i>	<i>0.095</i>	<i>0.040</i>	<i>0.20</i>	<i>0.70</i>
<i>600</i>	<i>0.0001000</i>	<i>0.090</i>	<i>0.040</i>	<i>0.19</i>	<i>0.65</i>
<i>1000</i>	<i>0.000085</i>	<i>0.070</i>	<i>0.032</i>	<i>0.15</i>	<i>0.51</i>

Tabella 1 Coefficienti di attenuazione lineare in aria, acqua , legno, pietra e rame in funzione dell'energia. I valori di densità utilizzati sono rispettivamente 0.0013, 1, 0.5, 2.2, 8.6 g/cm³

Si può facilmente osservare che per campioni di elevato spessore (per esempio una colonna di legno di 2 m di diametro o una statua di bronzo di 5 cm di spessore massimo), l'uso dei raggi X risulta non adeguato. Allora, si potrebbe pensare di ricorrere a raggi γ , che, avendo lunghezza d'onda inferiore ai raggi X , risultano più penetranti nella materia ma, purtroppo, richiedono maggiori precauzioni e forniscono peggiori prestazioni. In realtà, per spessori ancora maggiori, neanche i raggi γ riescono ad attraversare in modo soddisfacente l'oggetto e, quindi, in questi casi non è possibile realizzare radiografie dell'oggetto.

Dalla tabella si può notare che le differenze tra i coefficienti di attenuazione lineare per i diversi materiali, a parità di energia, sono più consistenti a energie basse e tendono ad essere trascurabili ad energie elevate. Ciò avviene per le diverse incidenze dei contributi a μ , legati agli effetti di interazione dei raggi X con la materia, al variare dell'energia.

Le considerazioni fatte si applicano rigorosamente solo quando la radiazione impiegata è monoenergetica, al contrario, quella emessa da un

tubo radiogeno (radiazione di bremsstrahlung) non lo è. In effetti, il tubo genera un fascio di raggi X eterogeneo, cioè composto di radiazioni di diversa lunghezza d'onda.

Il limite minimo di lunghezza d'onda di questo fascio di radiazioni è correlato al voltaggio applicato dalla seguente formula:

$$\lambda = 12.35/kV$$

con λ espressa in Å.

In ogni caso, si può ritenere che tale radiazione si comporti come una monoenergetica di energia media, calcolabile dallo spettro di radiazioni emesso dal tubo.

Più piccola è la lunghezza d'onda media del fascio impiegato, più penetrante nella materia esso risulta (raggi X duri); accade il contrario se la lunghezza d'onda aumenta (raggi X molli).

Un corpo investito dai raggi X determina, quindi, dalla parte opposta alla sorgente, un'immagine costituita da luci e ombre in relazione alla trasparenza dei raggi.

Parlare di luci ed ombre non è propriamente adeguato in quanto i raggi X sono radiazioni invisibili all'occhio umano; tuttavia essi possono essere facilmente rivelati proprio come luci ed ombre, o meglio chiari e scuri, registrandoli su lastre fotografiche che essi sono capaci di impressionare (*radiografia*) oppure raccogliendoli su uno adatto schermo fluorescente (*radioscopia*).

La radioscopia fornisce quindi un'immagine direttamente ed immediatamente visibile degli effetti di trasparenza o assorbimento dei raggi X che hanno attraversato il corpo. Ciò richiede, tuttavia, che elevate intensità di radiazione raggiungano lo schermo fluorescente e questo implica o che il corpo sia poco assorbente oppure che l'energia dei raggi impiegati sia molto elevata.

Più facilmente ottenibili e soprattutto più consone alle esigenze del settore artistico sono, invece, le radiografie.

1.4.6.2 La pellicola radiografica

Così come avviene per la luce, anche nell'esposizione di una pellicola ai raggi X si determina un'immagine latente. Ciò che accade è la trasformazione di bromuro di argento in argento metallico per effetto dello sviluppo. Il processo di fissaggio scioglie i cristalli di bromuro non colpiti dalla radiazione lasciando intatto l'argento metallico. Le aree esposte appariranno dunque oscure e l'immagine risultante sarà negativa.

Una pellicola radiografica, una volta sezionata, risulta essere composta da diversi strati:

- il *supporto*, realizzato in poliestere dello spessore di circa 200:μm, ha lo scopo di sostenere l'emulsione sensibile;
- il *sottostrato* ha la funzione di collante tra l'emulsione e il supporto;

-
- l'*emulsione*, dello spessore di pochi micron, è costituita da gelatina nella quale sono sospesi dei cristalli di alogenuro di argento responsabili della formazione dell'immagine;
 - lo *strato protettivo* protegge l'emulsione da abrasioni e danni di tipo meccanico.

Il processo di esposizione di una pellicola radiografica ai raggi X è del tutto identico a quello della pellicola fotografica esposta alla radiazione luminosa.

Se osserviamo la lastra esposta mediante un negatoscopio e indichiamo con B_0 l'intensità della luce generata dalla sorgente illuminante, ovvero la luce incidente sul film, e con B la luce emergente che ha attraversato il film, ovvero la luce che giunge al rivelatore, allora la *densità* D del film esposto è definita come:

$$D = \log (B_0/B)$$

La densità ottica di una pellicola ad esposizione descrive, quindi, il grado di annerimento dell'immagine radiografica conseguente ad una maggiore o minore quantità di argento metallico nello strato di emulsione fotosensibile della pellicola.

Insieme alla densità ottica, altro parametro utilizzato per la caratterizzazione delle immagini radiografiche è l'*esposizione* E . Tale parametro rappresenta la quantità totale di radiazione che investe il

rivelatore e viene definita come il prodotto della intensità della corrente nel tubo radiogeno e il tempo in cui il supporto di registrazione è esposto alla radiazione:

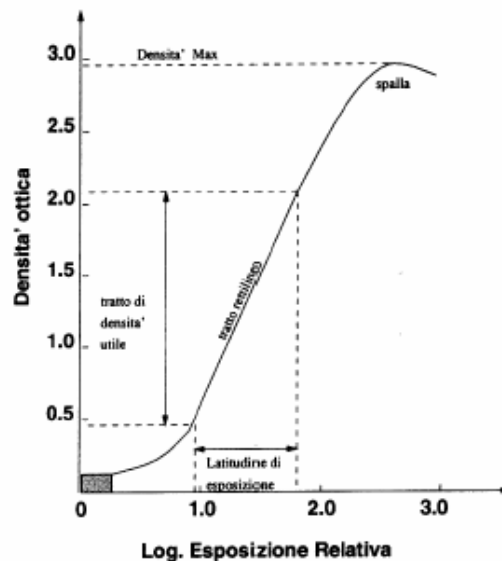
$$E = B * \Delta t_{\text{esp}}$$

La *curva sensitometrica* o *caratteristica* di una lastra radiografica descrive la relazione tra densità ottica e il logaritmo dell'esposizione.

Nel grafico si possono distinguere quattro regioni: il *velo*, il *piede*, il *tratto rettilineo* e la *spalla*.

Il velo corrisponde al valore minimo di densità ottica che si ottiene comunque anche nelle zone non esposte della pellicola.

Il piede della curva, detto anche *zona di sottoesposizione*, inizia dal punto corrispondente alle esposizioni minime registrate. In tale regione non si ha una relazione lineare tra densità ottica e logaritmo dell'esposizione.



Curva sensitometrica di una lastra radiografica

Il tratto rettilineo è detto anche *zona delle corrette esposizioni* a causa della relazione lineare tra densità ottica e logaritmo dell'esposizione. In tale regione la pellicola è utilizzata correttamente. L'intervallo di esposizioni di tale regione vien detto *latitudine*.

La spalla rappresenta la zona superiore della curva in cui all'aumentare dell'esposizione la densità ottica tende a raggiungere un valore di saturazione.

I particolari presenti sui film possono essere visualizzati se tra due punti adiacenti vi sia una differenza di densità apprezzabile. La minima differenza di esposizione che produce una differenza di densità è legata alla

pendenza della curva sensitometrica relativa alla pellicola in esame. La pendenza è detta *gamma del film* ed è indicata con γ .

Il comportamento di un film dipende oltre che dall'esposizione, anche dall'energia dei fotoni che lo colpiscono. L'alta sensibilità dei film intorno ai 40 keV è dovuta all'alto coefficiente di assorbimento fotoelettrico dei sali di argento a questa energia.

La radiografia classica, basata su film fotografici, presenta due fondamentali limiti intrinseci:

- la non linearità della risposta del processo fotografico, tanto nelle zone di bassa quanto nelle zone di alta esposizione, come risulta evidente dalla curva sensitometrica, e la presenza della zona velo;
- l'impossibilità di visualizzare l'immagine in modo rapido ed indipendente dal supporto fisico e di effettuare trattamenti numerici che ne migliorino la visualizzazione o l'estrazione di informazioni.

Il superamento di tali limiti è lo scopo delle nuove tecniche di imaging radiografico digitale.

1.4.6.3 L'immagine radiografica

Le caratteristiche principali che possiamo osservare nell'immagine radiografica sono:

- *manca di dettaglio*: l'oggetto da analizzare, pur avendo contorni ben definiti, appare nell'immagine radiografica con bordi arrotondati e confusi. Questo effetto può essere dovuto alle dimensioni della macchia focale, alla radiazione diffusa, alla cattiva centratura e ad altre ragioni;
- *cattiva risoluzione*: se abbiamo due oggetti opachi a distanza d con contorni netti, le loro immagini radiografiche non li avranno altrettanto. Diremo che il sistema radiografico ha scarsa risoluzione se, in qualche modo, riusciamo a vedere separatamente i due oggetti. Qualora ciò non fosse possibile, per effetto dell'avvicinamento degli oggetti, diremo che le immagini non sono risolte. La risoluzione si misura in coppie di linee per millimetro (lp/mm);
- *contrasto*: supponiamo che la fluenza di fotoni in un punto di riferimento sia Φ_0 e che in un punto adiacente sia Φ_1 , allora il contrasto è dato da:

$$C(\Phi) = (\Phi_1 - \Phi_0) / \Phi_0$$

- *nebbia(fog)*: la radiazione diffusa produce un velo che riduce il contrasto e nasconde i dettagli;

Le valutazioni svolte finora in termini qualitativi possono essere condotte in termini quantitativi attraverso una funzione matematica: la funzione *modulazione di frequenza* (MTF).

Possiamo definire la MTF di un sistema come il rapporto tra la quantità di informazione che il sistema è in grado di registrare e quella che riceve.

Per ottenere delle buone immagini nelle ricerche archeometriche è necessario disporre di tubi RX con macchie focali molto contenute (microfocus). Un fuoco di grandi dimensioni produce un'immagine sfocata perché l'immagine è creata da raggi X che partono da diverse parti di esso.

L'ampiezza della penombra è data da :

$$P = \frac{D}{L}l$$

dove D è il diametro del fuoco, L la distanza del fuoco dall'oggetto e l la distanza dell'oggetto dalla pellicola radiografica.

Alla luce della relazione appare evidente che P potrà essere ridotta diminuendo il diametro focale, avvicinando l'oggetto alla pellicola o distanziando il tubo dall'emulsione.

1.4.6.4 Applicazioni ai beni culturali

La piccola lunghezza d'onda dei raggi X e, quindi, la loro alta possibilità di penetrazione nella materia, rende possibile il loro impiego in varie applicazioni estremamente utili nel campo delle opere d'arte.

Alcuni esempi sono i seguenti:

- indagini su oggetti in “cotto” o in porcellana al fine di rivelare perni metallici o altre strutture metalliche interne più assorbenti applicate in precedenti restauri, evidenziare linee di frattura stuccate e altro;
- indagini su oggetti metallici per rivelare oggetti metallici ricoperti da incrostazioni, evidenziare decorazioni consunte o nascoste, fratture, difetti;
- indagini di natura stilistica dei dipinti su tavola o tela.

Le indagini che si possono compiere su tele e tavole dipinte hanno costituito in passato e costituiscono oggi uno dei principali motivi della notevolissima diffusione che questo metodo di indagine ha avuto nel settore artistico. La possibilità di vedere attraverso il film pittorico, rivelare pitture sottostanti a quelle visibili a occhio, in alcuni casi addirittura più importanti di essa, pentimenti dell'autore, interventi di restauro, firme e scritte nascoste, anomalie strutturali, mancanze, ecc... , giustificano la grande fortuna delle tecniche radiografiche nell'indagine dei dipinti.

È tuttavia opportuno ridimensionare l'importanza di questo metodo certamente utilissimo. La radiografia non è certo da considerarsi il miglior atto scientifico di tipo conoscitivo per indagare la situazione strutturale e

materiale di un'opera d'arte. Le tecniche radiografiche dovrebbero risultare affiancate da altri metodi di indagine, insieme ai quali contribuiscono all'ottenimento di un' "immagine" quanto più completa dell'oggetto artistico in esame.

Gran parte delle informazioni succitate sui dipinti, ottenibili con l'impiego di tecniche radiografiche, derivano dall'effetto schermante determinato sui raggi X da alcuni pigmenti minerali, soprattutto quelli contenenti Piombo e in particolare Bianco di Piombo (Biacca) pigmento usatissimo in pittura in tutte le epoche.

Nella tabella sono riportati alcuni esempi di assorbimento di raggi X dei principali pigmenti usati in pittura.

Colore	Pigmento	Composizione	Assorbimento
BIANCHI	Bianco di Piombo	$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$	Molto elevato
	Bianco di Zinco	ZnO	Elevato
	Bianco di Calce	CaCO_3	Medio
GIALLI	Giallo di Cromo	PbCrO_4	Molto elevato
	Giallo di Cadmio	CdS	Elevato
	Ocra	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Medio elevato
	Giallo di Napoli	$\text{Pb}_3(\text{SbO}_4)_2$	Molto elevato
	Lacche gialle	Organiche	Basso

ROSSI	Vermiglione Rosso Veneziano Terre Rosse Lacche Rosse Minio	HgS Fe ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ Organiche Pb ₃ O ₄	Molto elevato Medio Medio elevato Basso Molto elevato
MARRONI	Seppia Bitume Terre bruciate	Organica Organica Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	Basso Basso Medio elevato
BLU	Oltremare Blu di Cobalto Blu di Prussia Indaco	Silicato di sodio CoO . Al ₂ O ₃ Fe ₄ [Fe(CN) ₆] ₃ Organico	Medio Medio Medio elevato Basso
VERDI	Verde di Scheele Verde Cromo Lacca verde	CuHAsO ₃ Blu di Prussia + Giallo di Cromo Organico	Elevato Medio elevato Basso
NERI	Nero d'avorio Nero di vite Nero fumo	Carbonio+Ca ₃ (PO ₄) ₂ Organico Organico	Medio Basso Basso

Tabella 2 Assorbimento dei raggi X di alcuni pigmenti usati in pittura

Ogni intervento pittorico, originale o posteriore, richiede l'uso di un pigmento bianco che, come detto, risulta quasi sempre evidenziabile dai raggi X.

Non si dimentichi, però, che l'immagine radiografica costituisce la proiezione su un piano di un insieme di trasparenze e opacità dovute a strutture che nella realtà sono distribuite nello spazio e, quindi, nonostante gli artifici tesi a diminuire gli effetti di disturbo indesiderati, rimane spesso una non trascurabile incertezza all'atto dell'interpretazione dei risultati radiografici. Il lavoro di astrazione e di sintesi necessario ad una corretta interpretazione può essere generalmente effettuato solo da persone con notevole esperienza e confidenza con la tecnica e, quindi, preferibilmente da un radiologo specialista in dipinti che operi in collaborazione con un restauratore.

Per le indagini dei dipinti le cui strutture sono in gran parte poco opache ai raggi X sarà necessario creare le condizioni atte a potenziare le piccole differenze di trasparenza; ciò è possibile con l'uso di radiazioni molli sviluppate a bassi voltaggi e con apparecchiature appositamente costruite.

I voltaggi più comunemente usati per l'indagine dei dipinti sono approssimativamente compresi nell'intervallo 20-50 kV; la scelta del voltaggio appropriato è importante per l'ottenimento del miglior contrasto tra le varie strutture; scelto il voltaggio la giusta densità viene ottenute variando il tempo d'esposizione.

Inoltre, al fine di ottenere una buona immagine radiografica, si pone la pellicola a stretto contatto con la superficie pittorica poiché proprio in

vicinanza di quest'ultima si trovano le strutture che interessa radiografare. È chiaro, però, che tutto ciò che fa da supporto al dipinto (tela, tavola, telaio, preparazione, ecc...), trovandosi in questo modo interposto tra la sorgente e il film sensibile, viene registrato sulla pellicola insieme all'immagine di ciò che interessa. Si cerca di minimizzare tale effetto di disturbo con vari accorgimenti. Nel caso, ad esempio di dipinti su tavola, eventuali grosse disparità di spessore del supporto potrebbero essere compensate riempiendo i vuoti con materiali (di solito in polvere) che assorbano i raggi X in maniera simile al legno. Gli effetti di disturbo determinati da telai o altre strutture portanti collocate sul retro del dipinto potrebbero essere minimizzati anche realizzando un assetto di ripresa che permetta il movimento relativo della sorgente rispetto al dipinto, durante l'esposizione, permanendo il contatto tra superficie e lastra. Tale sistema è detto a "fuoco traverso" e , praticamente, fa muovere durante l'esposizione le ombre delle strutture che disturbano (più distanti dalla pellicola di ciò che interessa) provocandone la sfocatura sul piano del film fotografico. Può essere realizzato in vari modi: tenendo ferma la sorgente X e ruotando la coppia soggetto-pellicola oppure viceversa; il tipo dei movimenti relativi può essere anche variato; le traiettorie possono seguire una curva, una calotta o altre figurazioni.

Oltre a strutture portanti, altre strutture possono rimanere registrate sul film, costituendo motivo di studio o di disturbo; sono tali, ad esempio, le gallerie dei tarli frequentemente presenti nelle tavole dipinte e le venature del legno sulla superficie della tavola dove questa è stata "mesticata" ossia

ricoperta dalla preparazione pittorica. Tale preparazione prende la forma della superficie, come un calco, ed essendo sufficientemente densa può rimanere registrata nella radiografia.

La tecnica classica di ripresa radiografica dei dipinti prevede un generatore di radiazione di raggi X usualmente posizionato sul suolo e orientato verso l'alto. Il fascio dei raggi è limitato da uno schermo conico o comunque divergente ed è diretto verso il dipinto, disposto in modo da consentire la centratura della lastra applicata a diretto contatto della superficie pittorica.

1.4.6.5 Casi di studio

Verranno illustrate, a supporto di quanto affermato, una serie di radiografie realizzate su dipinti.

Doña Isabel de Porcel

Si tratta di un ritratto commissionato a Goya da don Antonio de Porcel, consorte di donna Isabella, che ha da sempre affascinato non tanto per l'accuratezza dei particolari quanto perché insinua facilmente il sospetto che all'autore fosse particolarmente gradita questa commissione forse più di quanto il povero don Antonio avrebbe gradito. Di Doña Isabel, rappresentata vestita come una maya, colpiscono, insieme alla forme prorompenti, gli occhi, più grandi del dovuto e quasi protuberanti. Il dipinto è considerato uno dei capolavori di Goya.

La radiografia realizzata sul dipinto rivela che la tela era già stata utilizzata in precedenza. Si può, infatti, scorgere al centro dell'immagine radiografica il volto di un uomo. Si tratta di un giovane in divisa.



Doña Isabel de Porcel
prima del 1805

Francisco de GOYA
1764-1828
Olio su tela
82 x 54.6 cm

Radiografia a raggi X del dipinto

In corrispondenza del collo di Doña Isabel, cerchiato di giallo, è chiaramente visibile il volto del giovane ufficiale.

In realtà nella storia dell'arte il riuso dei materiali relativi alla produzione artistica è molto più frequente di quanto non si creda: in pittura è stato sistematico il riciclaggio di tavole, di supporti d'ogni tipo, di cornici e di tele; in scultura i materiali più preziosi sono stati oggetto di continue trasformazioni e riutilizzi (celeberrimo il saccheggio del bronzo del Pantheon ad opera di **Barberini** e **Bernini** per costruire il baldacchino di San Pietro, ma non si dimentichi che anche il *David* di **Michelangelo** nacque da un blocco di marmo già intaccato da un altro scultore).



Altro esempio di riciclo di tela è relativo ad un dipinto di Tiziano, “Ragazza con piatto di frutta”. Capovolgendo di 180° l’immagine radiografia, si scorge perfettamente il ritratto di un uomo anziano, molto probabilmente un doge.



Ragazza con piatto di
frutta
c.1555

Tiziano Vecellio
1488-1576

Olio su tela
102 x 82 cm

Radiografia del dipinto

Ruotando di 180° l’immagine
si osserva la sagoma di un
uomo anziano.



La radiografia, come detto, è in grado, anche, di evidenziare eventuali “pentimenti” dell’autore, ovvero, ritocchi o cambiamenti di posizione di personaggi, come le seguenti immagini dimostrano.

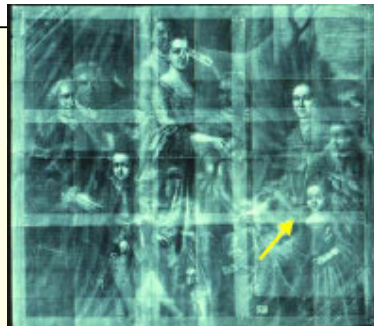


The Gordon Family

In questo dipinto, di cui non ho informazioni circa l'autore, si noti la ragazza indicata dalla freccia

Radiografia del dipinto

Si può rilevare che la fanciulla, nella bozza era stata collocata in basso a destra, e più esattamente davanti al ragazzo.



Inoltre, si notano segni evidenti di precedenti restauri, nella zona tra l'occhio e lo zigomo della signora col bimbo in grembo.

Nel trittico di Lorenzo Monaco, raffigurante l'Annunciazione, l'immagine radiografica evidenzia il ripensamento dell'autore circa il posizionamento del trono della Vergine. È opportuno notare che dipinti sullo stesso tema presentano, in genere, la Vergine a destra e l'Angelo a sinistra.



Vediamo come la radiografia evidenzia le procedure stilistiche adottate nella realizzazione di dipinti.

È interessante a riguardo prendere in esame le opere di Beato Angelico realizzate su pannelli. La tecnica adottata richiedeva estrema meticolosità, ma produceva risultati strabilianti per la brillantezza dei colori e per i dettagli estremamente decorativi. La preparazione del pannello era standard e prevedeva l'applicazione, realizzata con della colla, di robuste tele, in

genere di lino, per rinforzare i pannelli di pioppo utilizzati, e la sovrapposizione di più strati di gesso e colla.

Le radiografie dei dipinti mettono in perfetta evidenza la presenza delle tele che risultavano, in generale, non perfettamente coincidenti con il pannello e caratterizzate da profili irregolari.

Pannello di predella della
chiesa di S. Domenico,
Fiesole
ca.1420

Beato Angelico
ca.1400-1455

pannello di pioppo
33 x 23 cm



Radiografia a raggi X
del dipinto

Prendendo per riferimento le macchie bianche sistemate ai quattro angoli, è facile seguire il contorno irregolare della tela.

L'incollatura della tela è ancora più chiaramente visibile nella seguente immagine ottenuta radiografando un particolare di un altro pannello.

Radiografia di un
particolare del
pannello
dell'altare della
chiesa di
S.Domenico,



La possibilità della radiografia di catturare la tecnica stilistica usata è evidente anche nell'immagine radiografica di un'opera di Raffaello "S. Caterina d'Alessandria" in cui rileviamo come il grande artista risenta dello stile del Perugino: i tratti usati nella rappresentazione dell'incarnato risultano molto più fittamente sovrapposti di quelli che definiscono altre parti del dipinto e così l'immagine ottenuta appare molto più densa in corrispondenza del volto della santa rispetto allo sfondo.

Santa Caterina
d'Alessandria,
particolare
1508

Raffaello Sanzio
1483-1520

Olio su tavola
71.1 x 54.6



Radiografia a raggi X del
dipinto

Il volto della santa appare notevolmente più scuro rispetto allo sfondo per effetto dei più sottili e fitti tratti di pittura con cui Raffaello, così come Perugino, solevano dipingere l'incarnato.

Infine, verifichiamo la possibilità di individuare eventuali impatti traumatici di interventi di restauro su dipinti.

A tal proposito, oltre al già evidenziato caso dell'opera "The Gordon family", prendiamo in considerazione i danni subiti dalla tela della "Dama col liocorno" di Raffaello, in occasione della sostituzione del pannello di supporto originale. La radiografia del dipinto mette anche in evidenza delle correzioni dell'autore sul liocorno che inizialmente pare dovesse essere un cagnolino. Ci fu, infatti, un intervento significativo sul dipinto, da parte di Raffaello stesso, qualche decennio dopo il completamento, a seguito di danneggiamenti subiti nell'area che rappresentava il cagnolino; durante lo stesso intervento, corrispondente al terzo strato pittorico, venne ridipinta la mano sinistra e aggiunta ex-novo quella destra.

Dama con liocorno
1505-1506

Raffaello Sanzio
1483-1520

olio su tavola trasportato su tela
65 x 51 cm

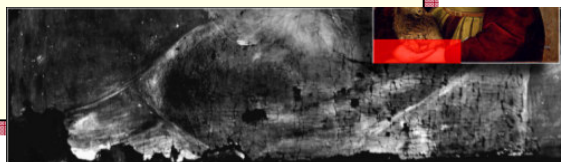


Dettaglio radiografico

L'immagine radiografica rende visibile la presenza di un cagnolino sotto la stesura pittorica del liocorno.

Dettaglio radiografico del bordo inferiore sinistro

Non si può escludere che i bordi possano aver subito dei parziali ridimensionamenti durante la distruzione del pannello originale. A questo proposito si osservi in radiografia lo strangiamento del bordo inferiore.



1.4.7 Tomografia

1.4.7.1 Introduzione

La tomografia computerizzata con raggi X è una tecnica ormai nota in medicina, dove è usata da circa trent'anni ed è diventata uno dei cardini della diagnostica clinica.

La sua importanza è anche riconosciuta in ambito industriale per rivelare fratture, disomogeneità, vuoti nei prodotti industriali e per fare controlli di qualità.

Nel settore dei beni culturali, manca in realtà uno studio sistematico sull'argomento, tant'è che non sono ancora stati sviluppati dei sistemi tomografici espressamente dedicati allo studio dei Beni Culturali; purtuttavia, si hanno esempi di applicazione di tomografia computerizzata X, ma anche γ , a manufatti artistici, al fine di studiare alcune caratteristiche di materiali antichi o per esaminare spessori e composizione di leghe, colonne, ceramiche, ecc...

L'esigenza di ricorrere alla tomografia nasce dal fatto che nella radiografia l'immagine ottenuta evidenzia l'assorbimento totale subito dal fascetto di radiazione lungo l'intero percorso e consente, quindi, di fare una valutazione media dell'assorbimento, ma nessuna considerazione puntuale. Tale limitazione della radiografia, legata alla sovrapposizione delle strutture indagate, può essere superata mediante l'utilizzo della tomografia.

Inoltre, nella tomografia assiale computerizzata (TAC), si usufruisce dell'incredibile vantaggio della digitalizzazione dell'immagine che potrà essere manipolata, archiviata, visualizzata e trasferita tramite computer.

1.4.7.2 Principi di base

Già nel 1917 il matematico J.Radon aveva dimostrato che un oggetto a tre dimensioni può essere ricostruito unicamente a partire da una serie infinita delle sue proiezioni, ma fu solo nel 1963 che Cormack progettò il primo prototipo di tomografo ripreso successivamente da G.Hounsfield e perfezionato negli anni seguenti fino agli attuali tomografi.

La tomografia computerizzata corrisponde in un certo senso a un'evoluzione della radiologia, nel senso che consente di ottenere una mappa di densità puntuale della sezione dell'oggetto attraversato dalla radiazione, in base a un grande numero di misure di attenuazione, che coinvolgono più volte lo stesso elementino di volume (chiamato *voxel*).

Proiezione di un cubo suddiviso in nove volumi elementari (voxel) Nelle caselle sono riportati i valori dei fattori di attenuazione dei voxel. Tale schema è utile per comprendere il principio di ricostruzione d'immagine iterativa.	1.1	1.3	1.2
	1.3	1.0	1.3
	1.4	1.1	1.1

Il principio della misura e ricostruzione dell'immagine si può schematizzare mediante un cubo, di cui è riportata una proiezione in figura, suddiviso in nove elementini di volume caratterizzati da un proprio valore di intensità (o fattore di attenuazione) mostrato numericamente. Si consideri il voxel caratterizzato dal valore 1.3 (in giallo). Una prima misura dà per i tre voxel orizzontali il valore 3.6, per quelli verticali 3.8, per quelli diagonali 2.5 e 2.4 rispettivamente. Da questi si ottengono valori medi di 1.2, 1.27, 1.25, 1.2 rispettivamente, per un valore medio complessivo di 1.27.

Naturalmente più volte si coinvolge lo stesso voxel in misure di attenuazione, più ci si avvicinerà al valore vero di densità che lo caratterizza. Una tomografia consiste, quindi, nell'eseguire migliaia e a volte milioni di misure di attenuazione. Qualora, invece di un fascio collimato, si utilizza un ventaglio di raggi X (*fan beam*), oppure un cono di raggi X, si possono realizzare contemporaneamente più misure per mezzo di altrettanti singoli rivelatori.

Nella tomografia, detta anche radiografia a strati, l'esposizione viene effettuata durante una serie di movimenti sincroni, ad arco della sorgente e insieme della pellicola tali da non far subire scorrimenti delle strutture contenute in un determinato piano che comprende l'asse di rotazione. Le immagini di tutti gli altri strati, invece, si muovono sulla pellicola sfumandosi rispetto all'immagine del piano interessato che rimane nitida. Ovviamente, valgono gli stessi principi fisici della radiografia e, quindi, potremo utilizzare ancora l'equazione di Lambert-Bouguer per descrivere

l'assorbimento esponenziale di un fascio monoenergetico collimato di raggi X e ripetere le stesse considerazioni fatte sul coefficiente di attenuazione lineare.

1.4.7.3 Strumentazione tomografica

Un sistema tomografico completo è caratterizzato dalle seguenti componenti principali:

- una sorgente di raggi X;
- un sistema di movimentazione (rotazione e/o traslazione) relativa;
- uno o più rivelatori o un sistema di rivelazione;
- algoritmi matematici di ricostruzione dell'immagine;
- un sistema di presentazione e manipolazione dell'immagine.

La sorgente ideale per la tomografia dovrebbe essere di intensità adeguata e di energia variabile, realizzata in modo da consentire eventuali collimazioni e di produrre immagini in tempi ragionevolmente brevi.

La sorgente più indicata è, quindi, un tubo a raggi X; tipicamente, in tomografia, vengono utilizzati tubi ad anodo in tungsteno, tensione variabile tra 20 e 200 kV e una corrente anodica di 1-100 mA.

Qualora, il tempo non sia considerato variabile critica del processo, è possibile fare ricorso a sorgenti radioisotopiche che emettano radiazioni nel campo dei raggi X; tra queste si hanno:

- ^{109}Cd , che emette raggi X da 22keV;

-
- ^{241}Am , che emette raggi γ da 59.5 keV;
 - ^{57}Co , che emette raggi γ da 122 e 134 keV.

In genere, le velocità di emissione di fotoni per tali sorgenti sono dell'ordine di 10^6 - 10^7 fotoni/s e, quindi, molti ordini di grandezza al di sotto delle velocità di emissione per i normali tubi a raggi X. Ciò rende i tempi di rivelazione, nel caso di utilizzo di sorgente radioisotopica, molto lunghi (in genere, parecchie ore).

Le sorgenti impiegate possono essere collimate attraverso un cilindro forato, per ottenere un fascetto sottile, o attraverso due lastre parallele, per ottenere un fascio a ventaglio. Se non c'è collimazione, usando l'intero cono di uscita della radiazione, è possibile ottenere immagini in 3D. La collimazione è tanto più efficace quanto più è bassa l'energia della radiazione.

Il modo più semplice per rivelare la radiazione eventualmente collimata che esce dal campione da analizzare è un singolo rivelatore sensibile ai raggi X (o γ). In genere, sono richiesti rivelatori veloci, in grado di processare un gran numero di fotoni per unità di tempo piuttosto che rivelatori di grande risoluzione energetica. Nel primo caso vengono usualmente utilizzati scintillatori solidi, nel secondo, anche per poter ridurre il rumore di fondo, si possono usare rivelatori a semiconduttori raffreddati termoelettricamente.

Per ridurre i tempi di rivelazione è opportuno impiegare *arrays* di rivelatori oppure intensificatori di immagine (equivalenti a molti rivelatori 3D)

caratterizzati, però, da prestazioni finali inferiori rispetto a quelle di sistemi di rivelatori singoli.

L'impiego di un singolo rivelatore rende necessaria la presenza di sistemi di movimentazione dotati di moto traslatorio e rotatorio; al contrario, con sistemi di rivelazione è sufficiente un dispositivo di movimentazione dotato di solo moto rotatorio. L'accuratezza e la precisione dei movimenti dovrebbe essere selezionata in accordo alla risoluzione spaziale dell'immagine, a sua volta correlata alla dimensione dell'oggetto.

1.4.7.4 Parametri fondamentali in una tomografia

Il risultato finale di una tomografia è un'immagine della sezione oppure del volume dell'oggetto attraversato dalla radiazione. I parametri che caratterizzano tale immagine sono principalmente la *risoluzione spaziale* e il *contrasto*.

La risoluzione spaziale indica le dimensioni della minima area o del minimo volume identificabile nell'immagine, ovviamente un'immagine è tanto migliore quanto più piccolo è il dettaglio individuabile. Tale parametro dipende dal materiale che costituisce l'oggetto, dall'energia della radiazione, dal passo di traslazione o rotazione del sistema di movimentazione e, infine, dagli algoritmi di ricostruzione. A parità di materiale, la risoluzione spaziale è dell'ordine di grandezza della collimazione, il passo di movimento adottato viene adeguato. Ad esempio, se si impiega un fascio collimato di 1 mm, la risoluzione spaziale ottimale non potrà essere molto inferiore al millimetro, e il passo di movimentazione dovrà essere inferiore ad esso. Nella normale tomografia, per campioni da dimensioni massime da 1cm a qualche metro, un valore indicativo di risoluzione spaziale è dell'ordine di 0.1-1 mm. Per risoluzioni spaziali migliori, ma su oggetti più piccoli, è possibile ricorrere alla microtomografia, con la quale si possono ottenere soluzioni micrometriche.

Il contrasto indica, invece, la capacità di distinguere materiali diversi attraverso la tomografia. Esso dipende fondamentalmente dal coefficiente di attenuazione dei materiali stessi, e in particolare dalla differenza dei

coefficienti di attenuazione dei materiali che si vogliono distinguere: quanto più sono diversi i coefficienti, tanto più facile è distinguere i materiali. È opportuno ricordare che i coefficienti di attenuazione tendono a differenziarsi maggiormente ad energie inferiori, pertanto, quando le dimensioni dell'oggetto lo rendono possibile, è utile lavorare a basse energie. Un valore indicativo del contrasto, che, peraltro, dipende dalla statistica dei conteggi e da altri fattori minori, è circa 1-2 % nei casi migliori.

1.4.7.5 Applicazioni ai beni culturali e casi di studio

In generale, le strutture interne di oggetti non altrimenti accessibili, vengono studiate mediante radiografie eseguite sotto diverse angolazioni, tuttavia, nel caso di strutture di densità non molto differenti, non è affatto agevole risolvere l'eventuale sovrapposizione delle stesse. La tomografia assiale computerizzata ci consente di eseguire sezioni a diversi livelli dell'oggetto, nonché di valutare le densità del materiale, gli eventuali difetti, la densità di quanto non contenuto in ambiti non accessibili e di rispondere ad altri possibili interrogativi ai quali le tecniche convenzionali non consentono di dare risposta.

Come detto, però, mancano studi sistematici in questo settore, anche per la grande varietà di problemi che richiederebbero un'altrettanta varietà di strumenti. In ogni caso, sono stati condotti studi su vari manufatti di diverse dimensioni e di diversi materiali.

I materiali più facilmente indagabili mediante tale tecnica sono:

- legno (dalle piccole statuette alle grandi colonne, dalle cornici ai dipinti su tavola);
- marmo e pietra (dagli oggettini fino alle grandi statue);
- ceramiche e terrecotte (vasi di diverse dimensioni);
- leghe di rame (bronzo e ottone);
- pietre preziose, per le quali serve la microtomografia.

Vediamo alcuni esempi.

Legno

Il coefficiente di attenuazione di massa del legno è simile a quello dell'acqua, essendo la composizione dei due materiali abbastanza simile. Si può quindi calcolare che possono essere analizzati oggetti fino a qualche metro di diametro con normali tubi a raggi X (tensione massima 169kV). Un'immagine tomografica di un tronco d'albero è in grado di mostrare molto chiaramente gli anelli di accrescimento annuale. Inoltre, semplici misure di attenuazione possono fornire ulteriori dettagli come mostrato nel grafico. È facile immaginare che attraverso i metodi della dendrocronologia si possano rilevare eventuali elementi di interesse cronologico.

Immagine tomografica del tronco di un albero.

Sono chiaramente visibili gli anelli di accrescimento annuale. Tramite la loro conta, i metodi della dendrocronologia

potrebbero suggerire eventuali elementi di interesse cronologico.

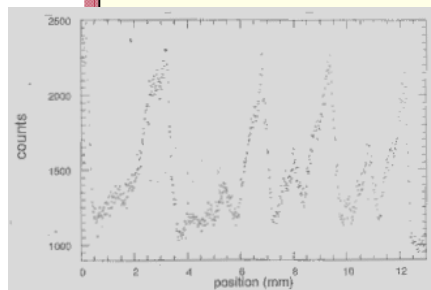
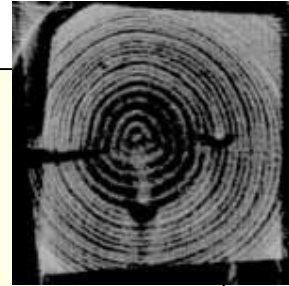


Diagramma delle variazioni di conteggio degli anelli

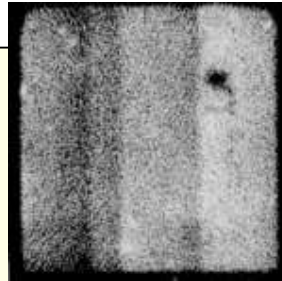
Esprime le variazioni di densità all'aumentare della distanza dal centro.

Marmo, pietra e cemento

Data la presenza in alte concentrazioni di elementi ad elevato numero atomico, il marmo, la pietra e il cemento hanno un coefficiente di attenuazione di gran lunga superiore a quello dell'acqua e molto simile tra loro. I massimi spessori indagabili con tomografia a raggi X sono di 50-100 cm. Per dimensioni maggiori si può ricorrere all'uso di raggi γ . In figura è mostrata la tomografia di un campione di pietra.

Tomografia di un campione di pietra

Viene resa visibile la struttura interna di uno strato del campione. Sarebbe possibile studiare la porosità e la capacità di assorbimento delle pietre porose tramite una tomografia computerizzata.



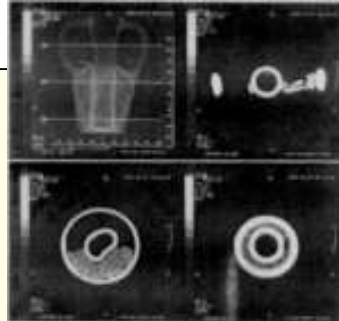
Ceramiche e terrecotte

Hanno composizione non dissimile da quella della pietra e del cemento, ma densità inferiore; si può supporre che abbiano coefficienti di attenuazione pari circa alla metà di quello del cemento e comunque legati alla composizione della terra impiegata.

Tomografia di varie sezioni di un vaso di terracotta.

Nell'immagine in alto a sinistra è riportata la radiografia del vaso che mostra i livelli delle sezioni su cui è stata effettuata la tomografia.

È possibile riscontrare la disomogeneità del materiale utilizzato e vari difetti.



Leghe di rame (bronzo e ottone)

Hanno un coefficiente di attenuazione simile e molto alto, per la loro densità (8.9 g/cm^3 per il bronzo). È possibile realizzare tomografie a raggi X di tali materiali fino a spessori di pochi centimetri (in genere 1-1.5 cm).

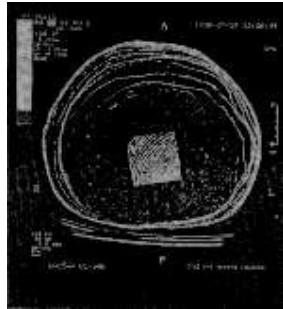


Tomografia di una statua in bronzo

Per i manufatti realizzati per fusione la tomografia rende possibile la valutazione precisa dello spessore della lega utilizzata.

Cartapesta

Il coefficiente di attenuazione della cartapesta è basso e difficile da definire univocamente a causa dell'estrema disomogeneità dei campioni. È riportata la tomografia della statua di San Giuseppe Patriarca (Lecce) che mostra chiaramente la struttura interna composta di vari strati di cartapesta e un supporto in legno. Valgono a tal proposito le considerazioni sul legno effettuate precedentemente.



Tomografia della statua di S. Giuseppe Patriarca (Lecce)

Questa enorme statua è considerata da molti la più grande statua al mondo in cartapesta.

La tomografia evidenzia la presenza di diversi strati di cartapesta e la natura lignea del supporto eventualmente assoggettabile ad analisi dendrocronologiche.

1.4.8 Xeroradiografia

L'effetto xerografico è stato scoperto da Chester Carlson nel 1938 . Al giorno d'oggi il processo è ampiamente utilizzato in tutte le fotocopiatrici presenti sul mercato.

Dato che lo stesso processo può essere utilizzato in radiografia, si parlerà più propriamente di xeroradiografia. Vediamone il funzionamento.

A tal fine supponiamo di disporre di una lastra piana di alluminio ricoperta da un sottile strato fotoconduttivo di Selenio amorfo; carichiamo questo strato ad un potenziale positivo molto elevato per mezzo dell'effetto corona. Il Selenio amorfo è un fotoconduttore in grado di mantenere la carica elettrostatica per qualche tempo. La lastra caricata può essere scaricata dalla luce, perciò è riposta in una cassetta del tutto simile a quelle usate nella radiografia convenzionale.

Quando i raggi X colpiscono il Selenio, la carica distribuita sulla sua superficie decresce secondo la legge:

$$Q = Q_0 e^{-kR}$$

dove Q e Q_0 indicano rispettivamente la carica residua e iniziale sulla lastra, R è l'esposizione e k una costante.

Si ottiene, così, un'immagine elettrostatica latente dell'oggetto esaminato che può essere evidenziata mediante della finissima polvere di materiale

sintetico di colore blu (*toner*) caricata per effetto triboelettrico. L'immagine viene, quindi, trasferita su un foglio di carta plastificata che, per il fissaggio, viene riscaldato così da fondere il toner con il sottile strato di plastica.

Le caratteristiche principali dell'immagine xeroradiografica sono:

- l'esaltazione dell'effetto di bordo, dovuta all'effetto dei campi elettrici che si determinano nelle discontinuità tra le superfici cariche.;
- l'esaltazione dei dettagli;
- l'elevato potere risolutivo;
- l'ampia latitudine di esposizione.

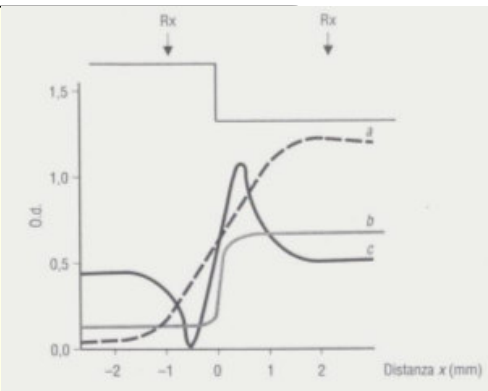
Densitometrie ottiche relative a diversi tipi di film e di metodi radiografici

Si tratta dell'immagine di un gradino prodotta da diversi sistemi radiografici.

Le curve a e b sono relative a una pellicola radiografica tradizionale: si può osservare un basso

contrasto al bordo, ma un'elevata variazione della densità ottica nelle zone lontane dal bordo.

La curva c si riferisce alla xeroradiografia: l'effetto elettrostatico determina un grande contrasto al bordo, ma bassa variazione di densità ottica nelle regioni distanti dal bordo.



La xeroradiografia, per le sue peculiarità, risulta una tecnica interessante negli studi archeometrici.

Un esempio applicativo utile, lo si ha nell'indagine della tecnica di fabbricazione a cercine usata per la realizzazione di contenitori tramite la sovrapposizione di anelli di argilla successivamente saldati e regolarizzati dal ceramista.

La xeroradiografia, inoltre, produce risultati particolarmente interessanti nelle indagini su oggetti di cartapesta, data la particolare natura del materiale.



Xeroradiografia di una statua di cartapesta

La statua risale al 1830.
È possibile riscontrare dal drappeggio del vestito la capacità della tecnica di esaltare i dettagli e gli effetti di bordo.

1.4.9 Stereoradiografia

La tridimensionalità degli oggetti, prodotta dal nostro cervello e da noi percepita, deriva dall'elaborazione di immagini del medesimo soggetto osservate da due punti di vista leggermente differenti. Se osserviamo due fotografie dello stesso oggetto, riprese da posizioni leggermente differenti e posizionate in modo che ciascun occhio ne veda una, possiamo riprodurre la sensazione della profondità.

Tale principio può essere usato anche per le radiografie. Si effettuano due riprese radiografiche da diverse angolazioni e si osservano le due radiografie simultaneamente in modo che ciascun occhio veda una sola radiografia, il cervello fonderà i due radiogrammi creando la visione stereoscopica dell'oggetto. Il dispositivo che aiuta a creare l'immagine 3D dell'oggetto è detto stereovisore. Per eseguire delle buone stereoradiografie, lo spostamento del tubo radiogeno dovrebbe essere pari alla distanza interpupillare media (65 mm).

L'immagine stereoradiografica consente di percepire la posizione nello spazio delle strutture interne dell'oggetto indagato, evitando, così, di ricorrere a tecniche distruttive o all'interpretazione, non sempre facile, di diversi radiogrammi.

1.4.10 Radiografia digitale

I risultati raggiunti con le tecniche informatiche di processamento delle immagini e lo sviluppo di nuovi sistemi di rivelazione del segnale hanno reso possibile la diffusione di tecniche di radiografia digitale che, inizialmente sviluppate per l'industria spaziale e la diagnostica clinica, si sono rivelate di grande utilità anche per l'analisi di dipinti.

Sono diversi i limiti fondamentali delle radiografia convenzionale che tali nuove tecniche si propongono di risolvere. Tra questi si ha il problema della mancata conoscenza a priori delle caratteristiche di attenuazione del dipinto che richiedono la realizzazione, lo sviluppo e la valutazione di molte radiografie prima di ottenere la densità ottimale. Inoltre, non sempre è possibile osservare l'intero range di densità da una singola radiografia e, così, è necessario produrre più radiogrammi con differenti esposizioni per ottenere quante più informazioni possibili sul singolo dipinto. Si cerca, anche, di risolvere il problema relativo al basso contrasto dovuto a piccole variazioni di densità. Infine, è ovvio il vantaggio della digitalizzazione dell'immagine che consente l'archiviazione, la trasmissione su linee telefoniche, la possibilità di eseguire copie multiple, ecc...

Sono state proposte varie apparecchiature per la radiografia digitale; tra le più diffuse si annovera quella basata su fosfori a memoria. Tali fosfori colpiti dai raggi X che hanno attraversato l'oggetto in studio, memorizzano l'informazione che può essere recuperata punto per punto sotto forma di

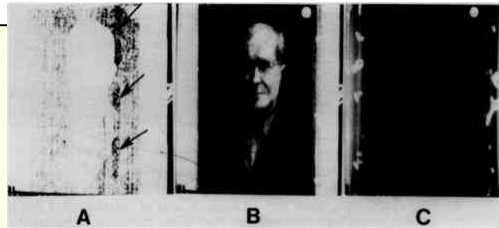
segnale luminoso mediante opportuna esposizione a luce, preferibilmente laser.

Vediamo brevemente altre tecniche.

Nella *fluoroscopia digitale* il fascio di raggi X che emerge dall'oggetto, è raccolto da un'intensificatore d'immagine, il cui output è visualizzato tramite una videocamera progettata per ridurre il disturbo di fondo. L'output della videocamera è digitalizzato e archiviato in un computer. Il vantaggio principale di tale tecnica consiste nella visualizzazione immediata, su uno schermo, dell'immagine radiografica; ciò consente la valutazione dell'esposizione appropriata durante l'acquisizione stessa dell'immagine. Altro vantaggio è l'ottima risoluzione spaziale. Purtroppo, le ridotte dimensioni degli intensificatori di immagine disponibili, richiedono diverse acquisizioni per l'indagine di opere di grandi dimensioni.

La "scanned projection radiography", utilizzata anche nella TAC, consiste nel piazzare il tubo a raggi X e il rivelatore in modo che il dipinto possa traslare rispetto al fascio di raggi X. Durante il movimento, i dati sono trasmessi dall'array di rivelatori ad un computer per la successiva manipolazione. Nell'immagine ottenuta, l'intensità di ciascun pixel è proporzionale alla quantità di raggi X passati attraverso il punto corrispondente sul dipinto. La risoluzione spaziale è meno buona rispetto alla fluoroscopia. Il vantaggio principale è legato alla possibilità di usare un ampio range di energia per i raggi.

Radiografie
“scanned
projection”
dell’
Autoritratto di
Cornelius Hankins



Le immagini mostrano una tecnica di manipolazione dell'immagine digitale detta “windowing” che consente all'osservatore di selezionare solo una porzione del range di intensità dell'immagine, così da evitare problemi di basso contrasto.

Altra tecnica di processamento dell'immagine spesso usata è quella di “sottrazione” che consente di evidenziare le differenze presenti tra due immagini radiografiche dello stesso soggetto ripreso in differenti condizioni. Si può modificare, di poco, la posizione del dipinto in modo da far risaltare l'effetto di bordo, oppure si “sottraggono” radiogrammi realizzati a differenti energie per rilevare pigmenti diversi ma con coefficienti di attenuazione simili, o, ancora, si può avere una “sottrazione temporale” per studiare il deterioramento del manufatto o la sua autenticità.

Altro metodo di radiografia digitale è il “punto volante” o “scanned point source system”. In tale sistema l'immagine si forma scandendo un sottile pennello di raggi X sull'area da indagare. Dopo aver attraversato l'oggetto il fascio di raggi X è raccolto da uno scintillatore la cui luce generata è misurata, digitalizzata e immagazzinata nella memoria di un computer. Questa tecnica non è molto diffusa in quanto il tempo richiesto è dell'ordine dei 15 secondi e presenta una risoluzione spaziale nettamente inferiore rispetto a quella garantita dalle tecniche precedenti.

In generale, la radiografia digitale fornisce immagini simil-xerografiche e, quindi, in grado di evidenziare le interfacce o le discontinuità negli oggetti esaminati, e per questo è altamente apprezzata nelle indagini archeometriche.

1.4.11 Fluorescenza a raggi X

Da circa mezzo secolo la fluorescenza a raggi X (XRF) è una delle tecniche chiave nello studio dei materiali di interesse archeologico e storico-artistico e deve il suo successo al fatto di riunire in sé alcune caratteristiche che la rendono insostituibile. La prima è che si tratta di una tecnica di analisi elementare che permette, perciò, non solo di identificare molti materiali, ma anche di affrontare i problemi legati alla provenienza e alle tecnologie di fabbricazione. La seconda caratteristica riguarda la non distruttività e presenta vantaggi fin troppo ovvii in un campo in cui molti degli oggetti studiati sono unici e di grande rilevanza artistica. L'ultima importante caratteristica è la relativa facilità con cui si possono realizzare strumenti portatili, trasferibili all'interno di musei e laboratori di restauro per analizzare in situ oggetti inamovibili, perché troppo fragili o troppo grandi.

1.4.11.1 Principi di base

Si dà nome di fluorescenza a quei fenomeni ottici nei quali un materiale colpito da radiazioni elettromagnetiche di certe lunghezze d'onda riemette radiazioni con lunghezze d'onda superiori a quelle della radiazione incidente.

I raggi incidenti vengono detti primari, quelli che costituiscono la fluorescenza, secondari. Fluorescenza è il nome che si dà al fenomeno quando esso ha carattere temporaneo, si parla di fosforescenza quando il fenomeno si prolunga nel tempo. In particolari condizioni operative la fluorescenza può essere provocata utilizzando, quale radiazione incidente, raggi X.

Abbiamo già discusso come si generano raggi X per effetto dell'interazione elettroni-materia; in realtà, si verificano gli stessi effetti quando gli elettroni incidenti su una data sostanza vengono sostituiti da un fascio di fotoni.

Riassumiamo il processo.

Quando una radiazione nel campo dei raggi X, generata da un tubo catodico o da una sorgente radioattiva colpisce un oggetto, il raggio può essere assorbito dall'atomo o passare attraverso la materia. Se il raggio è assorbito e possiede energia sufficiente (superiore alla soglia fotoelettrica di un elettrone interno), tale da espellere un elettrone di un orbitale interno, si crea una vacanza e l'atomo si ritrova in una condizione instabile. Durante il riassetto dell'atomo, un elettrone di un orbitale esterno va ad occupare la vacanza creata emettendo la radiazione caratteristica della

sostanza la cui energia è pari alla differenza delle energie di legame dell'elettrone agli stati energetici interessati dalla transizione.

A volte, però, l'energia prodotta dalla transizione, non viene emessa sotto forma di radiazione caratteristica ed è ceduta ad un elettrone che può, così, essere espulso dall'atomo. L'elettrone espulso prende nome di elettrone "Auger". Questo processo si pone in competizione con l' XRF e risulta più frequente negli elementi a basso numero atomico.

Ricordiamo che i raggi X caratteristici sono denominati K, L, M o N a seconda dell'orbitale da cui è stato espulso l'elettrone, e presentano un pedice $\forall$, $\exists$, o $()$ per indicare l'orbitale da cui proviene l'elettrone irradiante. Pertanto, un raggio di tipo $K_{\forall}$ è generato dalla transizione di un elettrone dal livello energetico L a quello K. Si potrebbe specificare ulteriormente l'indicazione dell'energia di partenza dell'elettrone, dato che ciascun livello può ospitare più elettroni.

L'aspetto saliente degli spettri X di emissione degli atomi è che essi variano con grande regolarità in funzione del numero atomico. Per l'identificazione degli elementi di peso leggero (Si, Ca) o medio (Cr, Fe, Cu, Ag) si utilizzano di solito le righe di emissione X della "serie K" che si generano nelle transizioni allo stato ionizzato di energia minima 1S; mentre, per gli elementi più pesanti si ricorre alle righe di emissione della "serie L" che si generano nelle transizioni agli stati elettronici di energia immediatamente superiore (2S, 2P).

L'analisi qualitativa è di solito molto semplice essendo pochi i casi di esatta sovrapposizione tra righe di emissione della serie L e righe della

serie K. Per esempio, la riga K_{γ} del Titanio ($E_{K\gamma}=4.51$ keV) si sovrappone ad una delle righe L_{γ} del Bario ($E_{L\gamma1}=4.46$ keV) cosicché nel caso in cui il Bario sia preponderante tra i due elementi l'identificazione del Titanio può fallire.

Tuttavia, questo tipo di analisi, che consiste semplicemente nell'identificazione delle righe X caratteristiche di emissione di uno spettro, non è di solito sufficiente. Per ottenere anche l'analisi quantitativa (o meglio, semiquantitativa) deve essere sviluppata un'opportuna elaborazione dei dati di intensità delle diverse righe X.

La condizione irrinunciabile per l'analisi quantitativa è che la composizione del campione sia omogenea a livello microscopico ovvero su distanze minori del percorso medio della radiazione X nel materiale in esame.

Approssimativamente, l'intensità di fluorescenza della riga di emissione per un dato elemento dipende direttamente dalla sua concentrazione relativa anche se non in modo lineare, data l'influenza della concentrazione relativa degli altri elementi sull'autoassorbimento nel campione. L'effetto della presenza nel campione di elementi diversi da quello analizzato si esprime in termini di "coefficienti di influenza" mediante i quali si determina l'andamento effettivo dell'intensità dell'emissione X in funzione della concentrazione relativa.

Inoltre, si dovrà tener conto anche degli effetti di eccitazione secondaria, per i quali l'emissione X di un elemento pesante contenuto nel campione è

causa dell'eccitazione degli elementi più leggeri. Tale fenomeno è frequente soprattutto nelle leghe metalliche.

Infine, ulteriori complicazioni all'analisi quantitativa si hanno nel caso di eccitazione policromatica, dato che sarà necessario rappresentare l'intensità sperimentale come sovrapposizione di contributi di intensità corrispondenti alla suddivisione dello spettro di eccitazione in un numero finito di intervalli di energia e considerare separatamente il contributo all'intensità di ciascun intervallo.

1.4.11.2 Analisi del segnale

Le principali tecniche utilizzate per l'analisi dello spettro di emissione dei raggi X sono due:

- WDS (Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy) ;
- EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).

Nella tecnica WDS i raggi X vengono prima monocromatizzati per mezzo di un reticolo di diffrazione e poi rivelati mediante una camera di ionizzazione. L'identificazione degli elementi si basa sulla lunghezza d'onda dei raggi X caratteristici, da cui il nome del metodo.

Il fascio policromatico che emerge dalla superficie del campione è scomposto nelle sue componenti monocromatiche mediante l'uso di un cristallo, secondo la legge di Bragg.

$$n\lambda = 2d \sin \vartheta$$

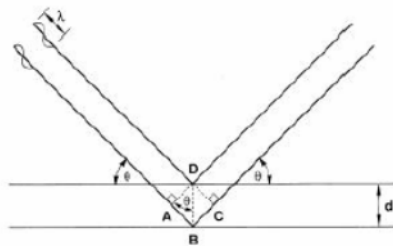
con d distanza tra piani interatomici e ϑ angolo di diffrazione.

È, quindi, importante la conoscenza dei parametri del cristallo e dell'angolo di diffrazione per poter scegliere il cristallo che copre il range di interesse delle lunghezze d'onda.

Si può parlare di spettrometri WDXRF sequenziali, in cui si effettua un movimento rotatorio del rivelatore (cambia 2ϑ) in modo da selezionare diverse lunghezze d'onda, oppure di spettrometri WDXRF simultanei in cui si hanno uno o più rivelatori piazzati ad angoli definiti così da rivelare diversi elementi contemporaneamente.

Negli ultimi anni, lo sviluppo di cristalli sintetici ha reso possibile analizzare elementi a basso numero atomico (O, N, C) sebbene dei limiti al processo fisico (perdita del segnale per assorbimento nel campione) ne limitano l'utilizzo.

Nella tecnica EDS i raggi X vengono direttamente rivelati da un rivelatore a semiconduttore che è in grado di distinguere l'energia dei fotoni. Molto spesso è utilizzato un *Si(Li) detector*.



Diffrazione secondo la legge di Bragg

Una forte riflessione del raggio di lunghezza d'onda λ avviene solo quando l'angolo di incidenza è 2θ .

Viene diffuso del Litio in un Silicio di tipo p così da creare una giunzione p-n. Quando viene applicato un campo elettrico inverso, la regione intrinseca (zona sensibile) si allarga a qualche millimetro. È necessario operare a basse temperature per evitare che il Litio (mobile in presenza di un campo elettrico a basse temperature) danneggi il rivelatore.

L'EDS rivela ed evidenzia lo spettro di emissione X per l'intero range di energia, richiedendo, così, tempi notevolmente inferiori rispetto alla WDS sequenziale.

I principali svantaggi di tale tecnica sono legati alla somma, sovrapposizione e “fuga” di picchi.

La somma si verifica quando la velocità dei conteggi è abbastanza alta e due raggi impattano il rivelatore allo stesso istante temporale, l'impulso che si crea e viene misurato è la somma delle energie dei due raggi. Per esempio se si hanno due raggi K_{α} di Silicio ($E=1.74 \text{ keV}$) e di Alluminio

($E=1.487$ keV), un picco a 3.23 keV sarà la somma dei due picchi e non un picco di Potassio ($E = 3.31$ keV).

La sovrapposizione dei picchi è legata alla bassa risoluzione di tale tecnica che determina una separazione non rilevabile tra due picchi. Per esempio, piccole quantità di Ferro non sono rilevabili in presenza di grandi quantità di Magnesio ($Mn K_{\beta}$ è molto vicino a $Fe K_{\gamma}$).

La fuga di picchi è un fenomeno legato alla possibilità che all'impatto con il rivelatore di Silicio si abbia assorbimento della radiazione da parte del Silicio stesso; vale a dire che se si ha molto Ferro ($E_{K\gamma}=6.40$ keV) si potrebbe osservare il picco del Ferro a 4.56 keV, data l'energia assorbita dal Silicio (1.84 keV).

In generale, la strumentazione portatile è basata sull'EDS; tuttavia, è importante notare che gli elementi leggeri non possono essere misurati direttamente con tali rivelatori, in quanto raggi X con energie inferiori a 2 eV sono facilmente assorbiti dall'aria. Pertanto, è bene analizzare tali elementi in laboratorio, dove è possibile creare il vuoto. Le principali differenze tra l'EDS e la WDS si hanno nell'efficacia della rivelazione e nella risoluzione.

L'efficacia complessiva nel raccogliere raggi X è bassa per entrambe le tecniche: per la WDS inferiore allo 0.2% e per l'EDS inferiore al 2% (il rivelatore è più vicino al campione rispetto alla WDS); inoltre, nella WDS dei raggi che entrano nel rivelatore solo il 30% viene effettivamente preso in considerazione, al contrario nell'EDS quasi il 100% è conteggiato.

Ciò consente nell'EDS l'uso di fasci di radiazione di diametro più piccolo. La risoluzione, però, è di gran lunga migliore nella WDS, come evidenziato dalla figura.

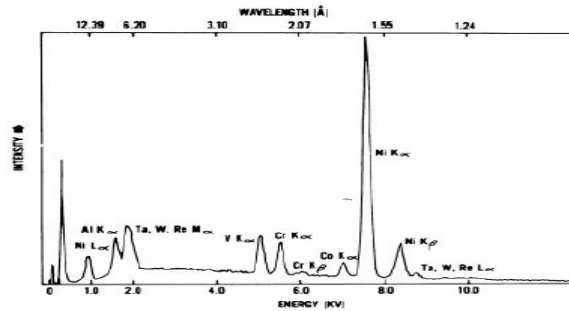
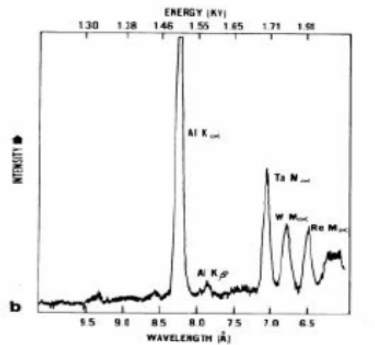
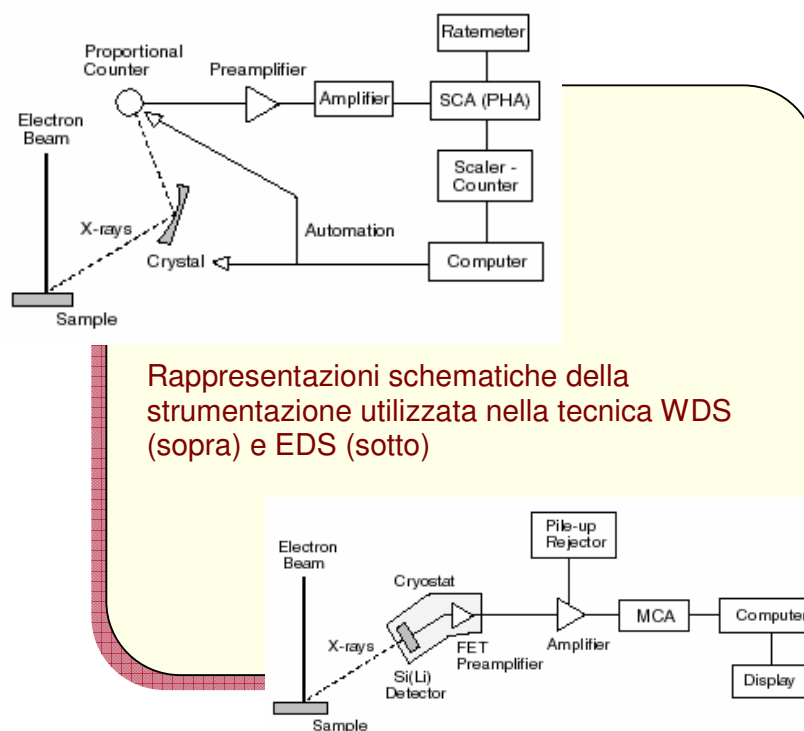


Figure 5.53. EDS spectrum of the same nickel-base superalloy used to obtain the WDS spectra in Figures 5.12a and 5.12b.

Spettro di fluorescenza X caratteristica di una lega di Nichel ottenuto con l'EDS (sopra) e con la WDS (sotto)



Si può rilevare la differente risoluzione dei due spettri nel range di lunghezze d'onda rilevato dalla WDS.



3.3

1.4.11.3 Applicazioni ai beni culturali

La caratteristica fondamentale dell'XRF nel caso dei Beni Culturali è di non essere distruttiva nell'accezione più rigorosa del termine e per questo è molto usata. Ciò deriva direttamente dal fatto che gli elettroni atomici coinvolti nelle transizioni che danno luogo all'emissione della radiazione X sono quelli più interni. Pertanto, non si procurano modifiche dei legami chimici nei composti degli oggetti analizzati. Inoltre, non è richiesta alcuna preparazione del campione poiché l'energia della transizione X

caratteristica ha, in genere, un valore sufficientemente grande perché sia alta la probabilità che fuoriesca. Lo strato superficiale in analisi, il cui spessore è determinato dall'energia della radiazione emessa, ha, nel caso di campioni metallici, una profondità di circa 20 μ m.

Infine, ancora a causa dell'elevata energia della radiazione X prodotta, si ha che il segnale del rivelatore corrisponde, quasi sempre, alla rivelazione di un singolo fotone per volta; si spiega, così, l'elevata sensibilità del metodo.

Il riconoscimento degli elementi presenti nel campione in analisi permette, per esempio, nel caso di pigmenti inorganici di risalire alla loro composizione chimica che, in genere, è un metodo preliminare di caratterizzazione del materiale di manufatti preziosi o antichi.

Per quanto riguarda l'analisi quantitativa, nel caso dei beni culturali, si hanno ulteriori complicazioni. Vediamo le principali.

Nell'analisi degli oggetti metallici (per esempio le monete) si presenta il problema dell'irregolarità della superficie e della possibile esistenza di una patina superficiale nella quale la composizione si è modificata (si pensi al fenomeno della sbianchettatura delle monete in lega d'argento che dà luogo ad una composizione dello strato superficiale più ricca d'argento rispetto agli strati interni). Quest'ultimo problema non è, in genere risolvibile con l'analisi XRF, si dovrà, quindi ricorrere ad altre tecniche.

Per i vetri o le ceramiche, nell'analisi EDXRF, si incontra il problema, spesso chiamato, della “matrice oscura”. Esso consiste nel fatto che non sempre è possibile, per vetri e ceramiche, valutare la composizione della matrice, in quanto le radiazioni di bassa energia emesse dagli elementi

leggeri della pasta vetrosa (tra cui il Sodio) sono quasi del tutto assorbite dall'aria e dalla finestra di protezione del rivelatore.

Infine, per la stesure pittoriche, a volte, è addirittura necessario ricorrere all'analisi stratigrafica di un microprelievo e, in genere, l'analisi quantitativa non è possibile.

Per effettuare delle analisi quantitative su un campione, senza commettere grossi errori, è necessario avere:

- campione lucidato e privo di asperità;
- concentrazioni maggiori del 15%;
- assenza di serie interferenze spettrali;
- $Z > 10$.

Se queste condizioni sono rispettate si riescono ad ottenere precisioni del 4% con tecnica EDS e del 1 % con tecnica WDS.

Il calcolo delle concentrazioni è complesso e affidato a programmi. Il metodo più usato è denominato ZAF e tiene conto di correzioni al picco misurato dovute a:

- Z: numero atomico medio del materiale
- A: assorbimento
- F: fluorescenza

1.4.11.4 Casi di studio

La corona ferrea

Attualmente il corpo della corona ferrea è composto di 6 lamine, delle 8 che molto probabilmente formavano il manufatto originale, tenute insieme da un anello che, secondo la tradizione medioevale, sarebbe stato ricavato da un chiodo di ferro della Croce di Cristo.

L'analisi XRF del chiodo ha messo in evidenza che tale anello è fatto di argento al 99%. Si tratta di un risultato che lascia sorpresi non tanto per la scoperta, chiaramente visibile anche ad occhio nudo, quanto per il fatto di essere rimasto nascosto fino alla realizzazione delle analisi.



Corona Ferrea

La datazione attribuita all'epoca di Carlo Magno (800 d.C.) sembrerebbe da arretrare fino all'epoca di Teodorico (500d.C.).

Sono chiaramente visibili le sei lamine e l'anello che la tradizione voleva fosse stato ricavato dal chiodo della Croce di Cristo.

È stato inoltre rilevato, che i filetti che delimitano i campi smaltati della parte esterna della corona e il perno di giunzione tra due lamine presentano

una composizione d'oro al 90% e, quindi, nettamente superiore a quello del corpo della corona, fornendo, così, un supporto all'ipotesi della riduzione del numero originale di lamine.

La cappella degli Scrovegni

Sono state realizzate analisi EDXRF sugli affreschi di Giotto della cappella degli Scrovegni al fine di:

- Accertare e determinare la presenza di zolfo sulla superficie degli affreschi;
- In caso di presenza di zolfo, stabilire se con opportuni trattamenti chimici sarebbe potuto diminuire o scomparire del tutto;
- Accertare e determinare l'eventuale presenza di cloro sulla superficie degli affreschi;
- Stabilire la presenza di aree di precedenti restauri;
- Studiare la composizione chimica dei pigmenti usati da Giotto.

L'interesse per lo zolfo e per i suoi composti durante un restauro è legato al suo effetto dannoso sugli affreschi (oscuramenti del colore originale). I composti dello zolfo si creano per combustione di carbone, petrolio e gasolio. Lo zolfo è stato rilevato in tutte le aree analizzate, con percentuali variabili in funzione dell'area e del colore sottostante. Sul colore azzurro si sono riscontrate percentuali minori forse per una maggiore attenuazione della radiazione emessa dallo zolfo per la presenza del rame contenuto nel

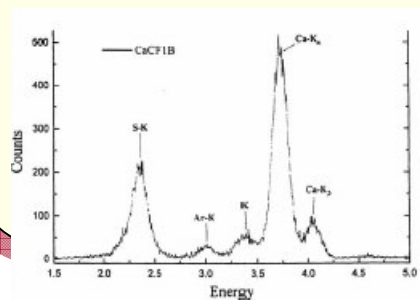
lapislazzuli. Il processo di pulitura dallo zolfo è stato continuamente monitorato mediante l'analisi EDXRF che ne ha evidenziato l'efficacia. Non è stato rintracciato cloro tranne che in un'area sul soffitto, evidentemente manipolata in epoche precedenti e si sono rilevate tracce di titanio, indice di interventi di restauro precedenti.



Interno della Cappella degli Scrovegni (Padova)

La cappella è dedicata a Nostra Signora dell'Annunciazione e fu commissionata, nel 1303, da Enrico Scrovegni a suffragio dell'anima del padre Reginaldo, accusato di usura. Gli affreschi furono commissionati a Giotto.

Gli affreschi sono stati sottoposti ad analisi EDXRF, condotte con strumentazione portatile, in oltre 300 punti, prima, durante e dopo il restauro del 2001-2002. I risultati dell'analisi condotta sulla raffigurazione dell'ingresso di Gesù a Gerusalemme (immagine a sinistra), sono riportati nel diagramma a destra dal quale è rilevabile la presenza di zolfo.



Spettro EDXRF di un'aureola dorata (in nero) e di un'aureola scura (in rosso)

Durante le analisi è stata condotta

un'indagine sistematica sulle aureole che ha evidenziato l'assenza di piombo, ferro, rame e argento dalla lega d'oro utilizzata: se tali elementi fossero appartenuti alla lega, le loro concentrazioni relative rispetto all'oro sarebbero rimaste costanti.

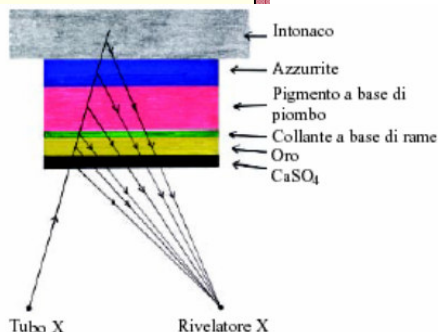
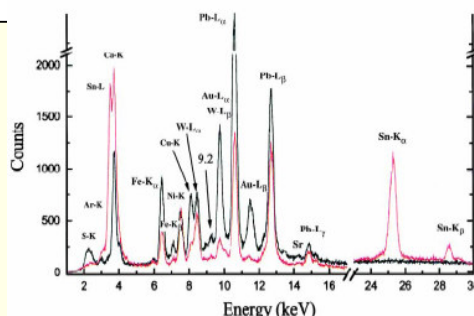
L'oro utilizzato è purissimo e molto probabilmente le foglie utilizzate sono state ottenute martellando monete di Firenze o Venezia (fiorini o ducati) contenenti oro al 99.7%.

Si è potuto valutare tramite analisi differenziali che lo spessore medio delle foglie d'oro è 1.6 μ m e, quindi sono stati impiegati circa 600 g d'oro per ricoprire le aureole dell'intera cappella.

La stessa analisi, dato il rapporto piombo/oro pressoché costante, ha portato a supporre la presenza di uno strato di piombo appena inferiore a quello d'oro. Tale ipotesi è stata confermata dall'analisi diretta di un frammento d'oro prelevato dagli affreschi.

Infine, si è potuto dedurre che Giotto ha realizzato le aureole in almeno tre modi diversi:

- Sopra l'intonaco dipingeva uno strato di azzurrite, poi uno di biacca e un collante a base di rame, sul quale veniva applicata la lamina d'oro (come in figura);
- Sopra l'intonaco dipingeva l'eventuale strato di azzurrite su cui applicava una lamina di stagno e, su uno strato di colla, una lamina d'oro;
- Sopra l'intonaco e l'azzurrite dipingeva uno strato di biacca e su questo incollava una lamina di stagno. L'oro in questo caso non era evidenziato; era caduto oppure era sostituito, in origine, con un pigmento color oro, oppure con una lamina d'argento presente allo stato attuale solo a livello di tracce.



L'uso dell'analisi XRF è, a volte, fortemente ostacolato dal fatto che l'area irraggiata è, in genere, ampia; ciò impedisce l'analisi di dettagli di decorazioni, di caratteristiche distintive dell'oggetto, ecc...Inoltre, come detto, la geometria, e in particolare, la superficie irregolare dell'oggetto introducono errori sistematici nell'analisi quantitativa. L'uso di un fascio di raggi X di dimensioni ridotte potrebbe far superare tali limiti di indagine. Si parla, in tal caso, di μ -XRF.



Mappe elementari di calcio e zinco ottenute con l'analisi :-XRF in un'area di un documento svedese

L'analisi :-XRF realizzata in laboratorio è un'eccellente tecnica di indagine per l'analisi di documenti, per esempio per valutarne l'autenticità; ciò grazie al fatto che gli inchiostri, pur appearing simili, presentano una composizione chimica differente.

Il documento in figura, un contratto di vendita di uno stabile, mostra segni di alterazione. Si sospetta che la modifica sia stata effettuata nel 1530, quando il re svedese ridonò ad alcuni nobili i loro beni, confiscati da una legge precedente: il nome originale del proprietario fu raschiato e rimpiazzato con quello del nobile. Il contraffattore evidentemente non si preoccupò di utilizzare lo stesso inchiostro. L'analisi XRF ha consentito l'identificazione dei nomi dalle mappe di zinco (elemento dell'inchiostro originale) e di calcio generate.

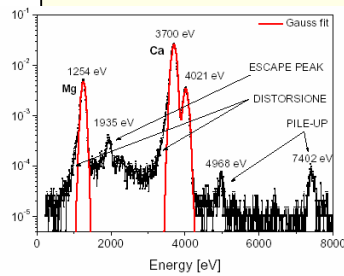
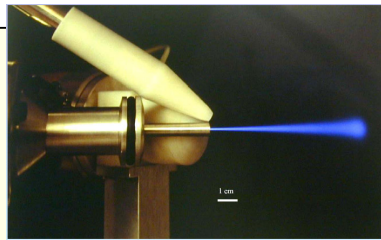
La stessa tecnica è stata utilizzata per verificare l'autenticità delle decorazioni di antichi vasi giapponesi.

Tra le possibili versioni di analisi XRS, ritroviamo la tecnica PIXE (Particle Induced X-ray Emission) nella quale la radiazione che produce la fluorescenza caratteristica è costituita da protoni o più raramente da ioni di elio e, ancora più raramente, di un atomo pesante. Oltre all'impiego nel campo biologico e medico, tale tecnica si è dimostrata di grande utilità anche nell'analisi dei Beni Culturali e, in particolare, nel caso di miniature o di codici antichi per i quali il fascio di protoni di alcuni MeV, ottenuto

con un acceleratore elettrostatico, può essere estratto dalla zona interna dell'acceleratore ad alto vuoto e focalizzato in aria su una superficie di pochi μm^2 . La fonte di sollecitazione della radiazione caratteristica può essere anche costituita da elettroni; in tal caso si parla di analisi EPMA (Electron Probe MicroAnalysis).

Attrezzatura utilizzata nell'analisi PIXE

Il raggio prodotto ha diametro dell'ordine dei micron.

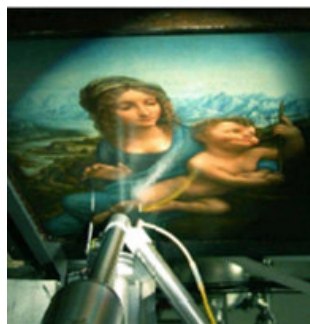


A sinistra vengono posti a confronto spettri ottenuti con tecnica PIXE e con EDS. La PIXE usa lo stesso rivelatore dell'EDS ma consente di ottenere un minor fondo di bremsstrahlung

I dipinti su tela o su tavola sono caratterizzati da una struttura a strati, che consiste in un sottostrato di preparazione (in genere di biacca o gesso), uno o più strati di pittura, e uno strato di vernice protettiva. Con un'unica rilevazione PIXE il fascio di protoni potrebbe attraversare più strati e, di conseguenza i diversi contributi degli strati verrebbero confusi nello spettro. La distinzione della sequenza di elementi sovrapposti viene risolta usando la tecnica PIXE differenziale che realizza rilevazioni dello stesso

punto con valori differenti di energia; le informazioni provenienti dai vari spettri rimarrà ad un livello semiquantitativo, data la difficoltà d'interpretazione dei diversi fattori.

Tale metodo d'indagine è stato applicato per lo studio del dipinto in figura.



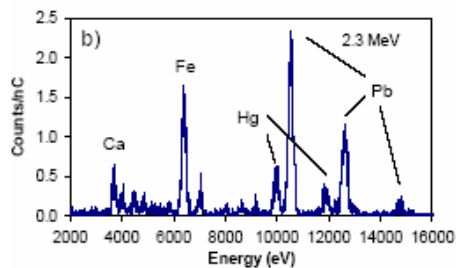
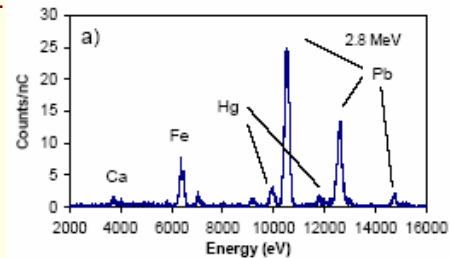
Madonna dei fusi
ca. 1501

Leonardo da Vinci

Olio su tavola
48.3 x 36.9 cm

L'analisi PIXE differenziale ha evidenziato la presenza di biacca anche negli strati pittorici, molto probabilmente usata per schiarire le ombre.

Gli spettri riportati, relativi a due rilevazioni sull'incarnato, evidenziano la presenza di mercurio e, quindi, l'uso di cinabro come pigmento rosso. Con la riduzione di energia, si osserva una riduzione dei picchi nell'area compresa tra i picchi di piombo e



mercurio che il contributo al piombo del substrato scompare dato che i livelli inferiori non sono più raggiunti dal fascio di protoni.

Sebbene l'analisi PIXE sia nota come analisi non distruttiva, su di alcuni campioni di elevato valore archeologico, si è registrato un' effetto di scolorimento, causato dall'irraggiamento.

Anche l'XRF potrebbe causare dei danni. In genere, l'assorbimento di radiazioni, di qualsiasi tipo, potrebbe causare la rottura dei legami chimici in modo permanente provocando, come effetto macroscopico, l'oscuramento o l'ingiallimento del campione. Nell'XRF, come detto, i raggi X primari agiscono essenzialmente sugli elettroni interni e, quindi, la probabilità di osservare tale fenomeno è molto bassa. Tuttavia, la grande quantità di fotoni ed elettroni emessi durante il processo di rilassamento presenta un considerevole potenziale distruttivo. Pertanto, prima di realizzare l'analisi è bene valutare le condizioni necessarie a garantire la minimizzazioni di tali effetti dannosi, prestando particolare attenzione ai tempi di esposizione e alle energie utilizzate.

1.4.12 Vantaggi e svantaggi

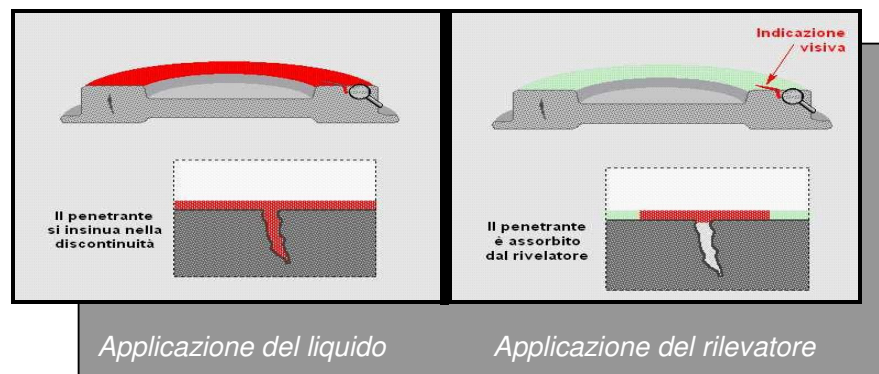
- ✚ Tali tecniche radiografiche hanno il pregio di fornire una documentazione diretta, duratura (sotto forma di pellicola radiografica), obiettiva e dimensionale del pezzo esaminato.
- ✚ Richiede una grande esperienza quanto più complessa è la geometria dei pezzi.
- ✚ Tale metodo non può dare indicazioni sulla profondità del difetto rilevato, se non con due proiezioni ortogonali fra loro.
- ✚ Le limitazioni del metodo sono legate allo spessore massimo ed alla complessità geometrica dei pezzi da esaminare, alla forma e giacitura dei difetti e soprattutto all'elevato costo delle attrezzature e della loro manutenzione.
- ✚ i difetti bidimensionali possono essere rilevati solo se il loro orientamento rispetto all'asse del cono radiante è inclinato; può risultare inefficace nella determinazione di cricche specie se disposte perpendicolarmente alla radiazione.
- ✚ I raggi X non superano spessori di acciaio superiori a circa 60 mm, mentre i raggi gamma, anche nei casi migliori non superano i 180 mm.
- ✚ Le sorgenti fisiche di raggi x e gamma necessitano di adeguate precauzioni per non recare danno alla popolazione, per cui le esposizioni devono essere controllate ed eseguite in luoghi

debitamente isolati, cioè in un bunker di cemento con spessore fino a 250 [cm].

CAPITOLO 2

2.1 Metodo dei liquidi penetranti

Questa prova non distruttiva sfrutta la capacità di alcuni liquidi di penetrare, per capillarità e non per gravità, all'interno dei difetti superficiali (cricche, cavità, ecc). La bassa tensione superficiale e la buona bagnabilità di questi liquidi, ne assicurano la penetrazione anche all'interno di discontinuità sottilissime. L'esame è effettuato con una preparazione e pulizia preliminare che rimuove tutti gli agenti contaminanti, quali incrostazioni, olio, vernici e a cui segue l'asciugatura delle parti da esaminare affinché non rimangano nelle discontinuità tracce di acqua e solventi.



Dopo l'applicazione e la penetrazione del liquido (detto appunto penetrante), operazione che richiede un tempo variabile a seconda del tipo di prodotto utilizzato, del tipo di materiale da ispezionare e del tipo di discontinuità da rilevare, il liquido penetrante eccedente è rimosso dalla superficie mediante lavaggio con acqua corrente fredda. Dal momento che l'acqua presenta tensione superficiale più elevata e bagnabilità peggiore rispetto al penetrante, non è in grado di rimuovere lo stesso dalle fessure nel quale è penetrato per capillarità. Dopo il lavaggio, sfruttando ancora una volta il principio della capillarità, viene estratto il liquido penetrante rimasto all'interno delle difettosità; l'operazione viene compiuta stendendo sulla superficie del pezzo uno strato di polvere bianca di opportuno spessore (rivelatore), la cui funzione è quella di assorbire ed attirare verso la superficie il penetrante rimasto nelle discontinuità dopo il lavaggio e di espanderlo in superficie con conseguente ingrandimento anche delle indicazioni relative a piccolissime discontinuità. Il tempo di sviluppo dovrebbe essere compreso tra 10 e 30 minuti ma, per alcune specifiche applicazioni, potrebbero risultare necessari tempi diversi.

A seconda della tecnica applicata il difetto potrà essere evidenziato in vari modi: o come una macchia di colore rosso o come macchia fluorescente facilmente rilevabile mediante irradiazione, al buio, con luce di Wood.



Il controllo non distruttivo con Liquidi Penetranti è uno dei più tradizionali metodi di analisi utilizzati dall'industria aeronautica per evidenziare discontinuità superficiali su qualsiasi materiale non poroso (metallo, ceramica, vetro, plastica, etc.), prerogativa che lo rende utilizzabile in numerose fasi di produzione e/o revisione di componenti dei velivoli. In linea di principio, il suo utilizzo risale all'inizio del secolo quando nelle officine ferroviarie venivano evidenziate discontinuità sugli assi e sui ganci dei vagoni, utilizzando olio (o petrolio) come liquido penetrante e cenere in polvere come sviluppatore. La tecnica, denominata "dell'olio e cenere", consisteva nell'applicare inizialmente il liquido sui componenti in esame dopo un certo "tempo di penetrazione", veniva rimosso l'eccesso di olio (o petrolio) ed applicata la cenere in polvere sulla superficie. Quest'ultima, assorbendo il liquido infiltratosi nelle discontinuità, formava delle macchie oleose sulla superficie del componente che venivano opportunamente interpretate dagli operatori. Questo metodo di analisi non distruttiva passa da una concezione "artigianale" ad una di tipo "industriale" negli anni che precedono l'ultima guerra mondiale, ed il suo rapido sviluppo viene

determinato prevalentemente dall'utilizzo sempre più frequente delle leghe leggere, specialmente in campo aeronautico. Infatti, poichè tali materiali non presentavano caratteristiche ferromagnetiche apprezzabili, era di basilare importanza avere a disposizione un valido controllo alternativo a quello Magnetoscopico, già solidamente affermato. Il metodo di CND con Liquidi Penetranti permetteva di evidenziare in maniera rapida ed affidabile, discontinuità aperte in superficie (cricche, porosità, ripiegature, strappi, cricche di fatica e di trattamento termico, etc.) su qualsiasi componente indipendentemente dalla geometria e dal materiale dello stesso. Ovviamente i prodotti utilizzati nel vecchio metodo "dell'olio e cenere" sono stati da tempo sostituiti con altri in grado di soddisfare le più svariate esigenze operative. Di conseguenza, pur rimanendo concettualmente inalterato, il metodo PT impiega oggi prodotti molto sofisticati i quali, a seconda delle loro caratteristiche fisico-chimiche, determinano la tecnica di ispezione da adottare e le attrezzature da utilizzare.

Tuttavia, affinché questo metodo di analisi possa essere proficuamente utilizzato debbono sussistere alcune essenziali condizioni operative, prima fra tutte quella in cui le discontinuità da evidenziare, oltre ad essere di tipo superficiale, risultino "aperte in superficie". Infatti, qualsiasi sostanza estranea presente sulla loro apertura (sporcizia, limatura, olio, grasso, smeriglio di rettifica, bavatura metallica, vernice, etc.) impedirebbe al liquido di penetrare al loro interno. Ne consegue quindi che la preparazione superficiale di un componente da ispezionare con il metodo PT risulta

essere una delle fasi più delicate di tutto il processo di controllo. Queste "sostanze estranee", comunemente denominate "contaminanti", possono avere origine da numerose cause quali ad es. processi metallurgici di fabbricazione (abrasivi, trucioli, calamine da trattamento termico, residui carboniosi, etc.), controlli non distruttivi precedentemente effettuati (Particelle Magnetiche, Liquidi Penetranti precedentemente utilizzati, olio impiegato nel controllo con Ultrasuoni, etc.) oppure condizioni di esercizio (lubrificanti, oli protettivi, ossidi, vernici, etc.). A seconda delle caratteristiche fisico-chimiche del materiale in esame e della particolare natura del contaminante, la preparazione superficiale del componente potrà essere effettuata mediante Pulizia Meccanica, Pulizia con Solventi o con Attacco Chimico. Il Penetrante, fondamentalmente costituito da un liquido oleoso e di colore variabile (generalmente rosso o fluorescente), deve essere applicato sul componente in maniera tale da assicurare una completa copertura di tutte le superfici in esame. Affinchè possa penetrare anche nelle discontinuità più sottili, esso deve rimanere sulle superfici per un periodo di tempo variabile a seconda del tipo di prodotto utilizzato, del tipo di materiale da ispezionare e del tipo di discontinuità da rilevare. L'applicazione del Penetrante, che può essere effettuata a spruzzo, con pennello, mediante apparecchiature elettrostatiche o immergendo direttamente il componente nel penetrante stesso qualora le dimensioni in gioco lo consentano, deve comunque essere scelta di volta in volta a seconda della specificità del caso. Affinchè un Penetrante risulti di qualità

apprezzabile deve necessariamente soddisfare alcune esigenze operative quali ad esempio:

- Assicurare una completa ed uniforme copertura della superficie in esame;
- Assicurare una buona penetrazione nelle discontinuità più sottili;
- Assicurare un'apprezzabile permanenza nelle discontinuità relativamente larghe e poco profonde;
- Risultare facilmente asportabile durante la fase di rimozione, ma contemporaneamente permanere nelle discontinuità per fornire valide indicazioni;
- Rimanere allo stato liquido anche in differenti condizioni di esercizio, in modo da essere facilmente richiamato in superficie dallo sviluppatore;
- Assicurare un'evaporazione minima ed una buona resistenza alla perdita di colore o di fluorescenza;
- Essere esente da agenti corrosivi per i materiali da ispezionare e da componenti tossici per gli operatori;
- Possedere un alto punto di infiammabilità, nel rispetto delle vigenti norme antinfortunistiche.

Non sempre i Penetranti presenti sul mercato possiedono contemporaneamente tutte le suddette proprietà in quanto, per rendere i prodotti economicamente competitivi, spesso i produttori giungono a compromessi "costo-qualità" che caratterizzano un tipo di penetrante

esclusivamente per specifiche applicazioni. In così poco spazio risulta difficile fornire sufficienti informazioni su ognuna delle suddette proprietà e sulle analisi da effettuare per verificare l'idoneità dei vari prodotti presenti sul mercato a soddisfare l'affidabilità e la sensibilità richiesta da questo metodo di CND. Tuttavia si rende necessaria una breve trattazione su una particolare caratteristica del controllo con Liquidi Penetranti, e precisamente al fatto che la "penetrazione" del liquido all'interno di una discontinuità avviene per capillarità e non per gravità; tale prerogativa, che risulta la base di tutta la metodologia di controllo, rende facilmente ispezionabili superfici di difficile accesso indipendentemente dalla loro posizione (orizzontali, verticali o inclinate). Le caratteristiche fisico-chimiche dei Penetranti che incidono maggiormente nel fenomeno della "capillarità" risultano essere: Tensione Superficiale, Potere Bagnante e Viscosità. La Tensione Superficiale dipende prevalentemente dalle forze di "coesione" tra le molecole del liquido; quando questo viene a contatto con una superficie solida, tali forze competono con quelle di "adesione" tra le molecole del liquido e quelle del solido. L'equilibrio che si instaura, oltre a determinare l'Angolo di Contatto, caratterizza il prodotto (Liquido Penetrante) con una buona o scarsa bagnabilità, caratteristica che risulta strettamente legata alla tensione superficiale. Appare quindi evidente come un Liquido Penetrante di apprezzabile qualità debba necessariamente possedere un piccolo Angolo di Contatto al fine di assicurare una buona bagnabilità della superficie in esame ed un'ottima penetrazione nelle discontinuità da rilevare. In realtà la Tensione Superficiale e l'Angolo di

Contatto non risultano sufficienti a valutare la capacità di penetrazione dei prodotti utilizzati nel controllo PT, in quanto particolare importanza assume il modo in cui questi due parametri interagiscono tra loro. Infatti, se consideriamo una goccia di liquido in equilibrio su una superficie piana, nel punto di contatto delle tre fasi (solida, liquida e gassosa) esiste un bilanciamento delle forze regolato dalla seguente relazione:

- Tensione Superficiale del solido a contatto con l'aria
- Tensione Superficiale all'interfaccia solido-liquido
- Tensione Superficiale all'interfaccia aria-liquido
- Angolo di contatto

Tensione Superficiale ed Angolo di Contatto assumono un ruolo di particolare importanza nel fenomeno della capillarità, che costituisce la base dell'azione penetrante di un liquido all'interno delle discontinuità. Infatti per "capillarità" viene generalmente inteso quel particolare fenomeno per il quale, immergendo un tubo "capillare" in un liquido, si ottiene una differenza di livello tra il liquido contenuto nel tubo e quello al suo esterno. Il dislivello ottenuto risulterà positivo o negativo, a seconda dell'Angolo di Contatto e della bagnabilità del liquido; se esso ha una buona bagnabilità ($< 90^\circ$) all'interno del tubo si ottiene un innalzamento del livello (dislivello positivo) mentre in caso contrario ($> 90^\circ$) si ottiene invece un abbassamento. Tale fenomeno è dovuto al fatto che le molecole del liquido sono attratte da quelle della parete del tubo, con maggiore o

minore forza di quella che le tiene unite all'interno del liquido stesso; quando tali forze si bilanciano si ottiene la condizione di "dislivello zero" all'interno del tubo capillare. In realtà, considerare un tubo capillare come una discontinuità non è completamente esatto in quanto l'uno è aperto alle estremità, le altre non sempre attraversano l'intero spessore del materiale in esame. Infatti, se immergiamo nello stesso liquido due capillari aventi lo stesso raggio interno, ma uno aperto e l'altro chiuso ad un'estremità, in quest'ultimo si ottiene un dislivello meno pronunciato. Il fenomeno è dovuto al fatto che l'aria presente nel tubo, comprimendosi a causa dell'innalzamento di livello, genera una pressione aggiuntiva (P_1) che si somma al peso (P) della colonna di liquido; questa condizione simula in maniera più corretta quanto accade realmente in una discontinuità non passante, in quanto il Penetrante dovrà vincere la reazione dell'aria in essa contenuta. Per attenersi maggiormente alle reali condizioni operative di un controllo PT, la pressione esercitata dal Penetrante per introdursi in una discontinuità, viene generalmente denominata "Pressione di Capillarità" che tiene conto anche della "Larghezza della discontinuità". Partendo da questo presupposto possiamo operare una sommaria divisione classificando i Penetranti in base alle metodologie adottate per la loro rimozione dalla superficie in esame le quali determineranno anche le classi di sensibilità:

1)PENETRANTI LAVABILI IN ACQUA i quali, contenendo un emulsificatore incorporato, possono essere rimossi direttamente con acqua utilizzando dispositivi a pioggia, a spruzzo oppure adeguati panni

imbevuti. A seconda della normativa in cui si opera, l'acqua non dovrà superare determinati valori di pressione e di temperatura; al termine della fase di lavaggio il componente dovrà essere completamente asciugato.

2)PENETRANTI POST-EMULSIONABILI che, non contenendo un emulsificatore incorporato, hanno bisogno di un'ulteriore operazione prima di poter essere lavati con acqua; l'applicazione sul penetrante, mediante immersione o spruzzo, di un emulsificatore che li renda facilmente asportabili. In base alla loro formulazione chimica, gli emulsificatori possono essere suddivisi in LIPOFILICI (base olio) e IDROFILICI (base acqua); tale suddivisione determinerà anche differenti metodologie di utilizzo che vengono definite di volta in volta a seconda delle caratteristiche dei prodotti, del componente in esame e delle discontinuità da rilevare.

3)PENETRANTI LAVABILI CON SOLVENTE i quali non vengono rimossi con acqua ma utilizzando particolari solventi (REMOVER). Questo tipo di prodotti sono molto sensibili, e vengono utilizzati in genere su superfici lisce con sezioni uniformi, oppure laddove risulti difficoltoso disporre di una fonte idrica. Molte volte, enfatizzando più del necessario le proprietà dei Liquidi Penetranti, vengono erroneamente tralasciate alcune importanti considerazioni sulle caratteristiche degli altri prodotti impiegati nel processo. Infatti la sensibilità e l'affidabilità di questo metodo di analisi non distruttiva dipendono dalla loro corretta interazione al fine di soddisfare le specifiche esigenze del controllo. Nel contesto del processo di applicazione dei Penetranti assume particolare importanza lo sviluppatore,

denominato anche "rilevatore" il quale, essendo prevalentemente costituito da una polvere bianca altamente assorbente, ha lo scopo di amplificare e rendere visibili all'occhio dell'operatore le sottili indicazioni fornite dal Penetrante presente nelle discontinuità.

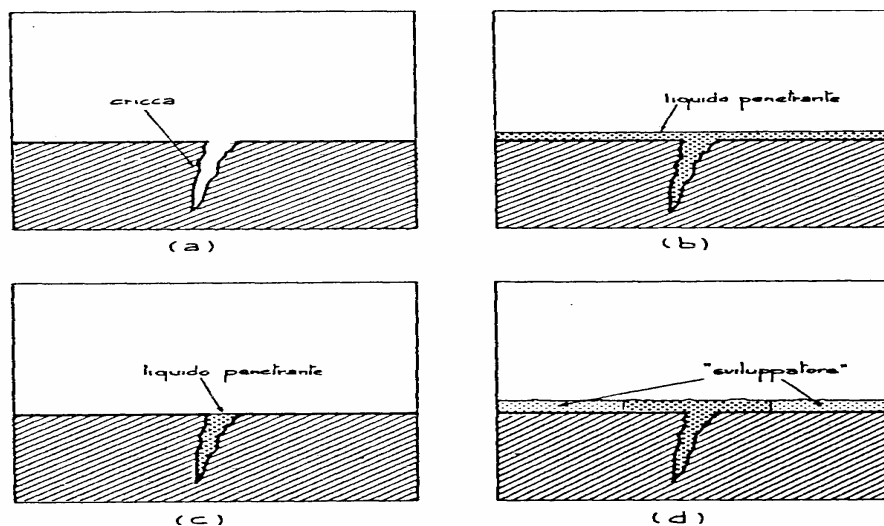
Anche in questo caso è possibile operare una suddivisione dei prodotti in base alle loro caratteristiche fisico-chimiche e precisamente:

1)SVILUPPATORI A SECCO costituiti da una polvere bianca, impalpabile, di adeguata granulometria e potere assorbente, che vengono applicati mediante apposite cabine a turbolenza d'aria oppure mediante attrezzature elettrostatiche.

2)SVILUPPATORI IN SOSPENSIONE D'ACQUA costituiti da una polvere bianca tenuta in sospensione in acqua dove siano stati precedentemente disciolti additivi anticorrosione. Vengono applicati per immersione del componente in apposite vasche, dove un agitatore mantiene le particelle costantemente in sospensione; successivamente il componente dovrà essere essiccato con apposite attrezzature in modo da far evaporare tutta l'acqua ed ottenere sulla superficie in esame una distribuzione uniforme della pellicola assorbente.

3)SVILUPPATORI IN SOSPENSIONE SOLVENTE che sono senza dubbio i più usati, in quanto offrono notevoli vantaggi rispetto ai precedenti quale ad es. il fatto che il solvente, possedendo un'elevata volatilità, evapora quasi istantaneamente subito dopo l'applicazione dello sviluppatore rendendo minimo il tempo di asciugatura.

In ultima analisi è bene ricordare che nel controllo con Liquidi Penetranti, come anche in quello con Particelle Magnetiche, l'interpretazione dei risultati viene effettuata mediante osservazione visiva da parte dell'operatore delle indicazioni che appaiono sulla superficie in esame. Ne consegue che, anche utilizzando prodotti caratterizzati da un'elevata sensibilità ed eseguendo correttamente tutte le fasi operative del processo di controllo, l'affidabilità dell'ispezione potrà essere notevolmente penalizzata nel caso in cui non sussistano le condizioni ideali di illuminazione sulla superficie del componente da ispezionare. Tali considerazioni assumono particolare rilievo qualora vengano utilizzati Penetranti Fluorescenti il cui impiego richiede l'ausilio di apparecchi di illuminazione di tipo ultravioletto (lampade di Wood); in questo caso l'intensità dell'illuminazione sulla superficie in esame, la lunghezza d'onda di emissione della luce U.V. (365 nm) e l'idoneità dell'oscuramento dell'ambiente adibito all'ispezione (illuminamento max 20 Lux) risultano elementi determinanti per assicurare l'affidabilità del controllo.



2.1.1 Vantaggi e svantaggi

- ✚ Metodo di facile impiego ed economico in quanto non necessita di attrezzature costose ma di semplici materiali facilmente reperibili.
- ✚ Non si possono rivelare difetti troppo grossi, che siano accessibili anche all'acqua e che quindi non trattengano il penetrante.
- ✚ Non si possono rilevare difetti troppo piccoli, non penetrabili dal liquido stesso o che non possano accumularne una sufficiente quantità.
- ✚ Non permette di valutare in maniera quantitativa la dimensione dei difetti.
- ✚ Il suo impiego nelle analisi in loco di pezzi di grosse dimensioni risulta complicato e non di sicuro successo.
- ✚ L'interpretazione dei risultati lascia un certo margine alla soggettività e all'esperienza interpretativa dell'operatore

2.2 Rilevazione di fughe

Questo tipo di test si basa sul principio che, in presenza di una discontinuità passante all'interno di una parete che separa due liquidi a pressione differente, il fluido a pressione maggiore passa in quello a pressione minore. Lo scopo di tale tecnica è quindi quello di verificare la tenuta di recipienti sigillati, che contengano liquidi (fluidi inquinanti, per esempio), la cui fuoriuscita improvvisa non può essere tollerata, come nel caso dei grandi impianti di distribuzione (acquedotti, oleodotti, gasdotti etc.). Il campo di applicazione è la rivelazione di piccole perdite dovute a microfessure o porosità. Le tecniche utilizzate possono essere suddivise in tre classi:

- ✦ *misura di velocità di perdita*, si tratta di un controllo qualitativo che permette di ben valutare l'entità del fluido che fuoriesce;
- ✦ *localizzazione della perdita*, è un controllo qualitativo mirato all'individuazione di dove sia localizzata la perdita;
- ✦ *controllo della velocità di perdita*, è essenzialmente un monitoraggio d'impianti.

Alcuni metodi generalmente utilizzati per la rivelazione di fughe sono:

- *emissione di bolle (PEB)*: è un controllo qualitativo che può essere facilmente impiegato in presenza di una differenza di pressione tra interno ed esterno del recipiente, che viene coperto da soluzione

saponosa e che permette di rivelare la presenza di fughe grazie alla formazione di bolle;

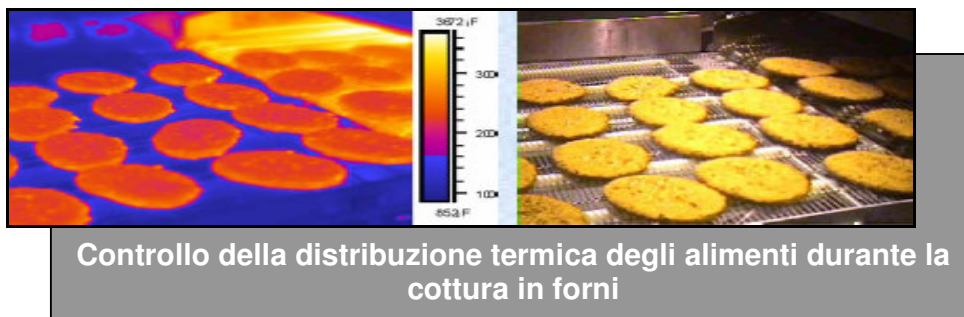
➤ variazione di pressione (PVP): è un metodo qualitativo, che permette di valutare la presenza della fuga ma non la sua collocazione; richiede un monitoraggio temporale della pressione all'interno del recipiente.

CAPITOLO III

3.1 Termografia

La termografia è una tecnica utilizzata per rilevare e misurare la radiazione infrarossa emessa dai corpi. Il test consiste nella misura della distribuzione superficiale di temperatura di un materiale a seguito di una sollecitazione di origine termica ed eventuali anomalie presenti in tale distribuzione sono indice di un possibile difetto. E' possibile determinare, mediante uno strumento detto termocamera ad alta risoluzione (circa 1 cm a qualche metro di distanza), la temperatura di una superficie attraverso la misura delle radiazione infrarossa emessa da ogni oggetto proporzionalmente alla sua temperatura. Il risultato finale è una immagine termografica, che rappresenta in falsi colori (livelli di grigio oppure una scala cromatica opportuna) le differenze di temperatura tra zone contigue (per una profondità di 3-4 cm). In altri termini, una immagine tradizionale registra le differenze di intensità luminosa mentre una immagine termografica registra le differenze di temperatura.

La diagnostica termografica *applicata all'industria* permette un *monitoraggio dei processi produttivi che producono calore* dando un apporto determinante alla MANUTENZIONE PREVENTIVA nella gestione delle avarie e del contenimento dei costi di riparazione dei sistemi e macchinari.



3.1.1 La tecnica termografica

La termografia è la tecnica che consente di evidenziare e misurare il calore emesso da tutti i corpi caldi per mezzo delle radiazioni infrarosse. Queste radiazioni, essendo in funzione della temperatura dei corpi stessi, consentono ad opportuni strumenti, come le termocamere ad infrarossi, di misurarne ed analizzarne con precisione la temperatura, [senza emissioni di radiazioni dannose e in maniera non invasiva](#), rendendo questo tipo di ispezione fondamentale in tutti i campi dove non sia possibile effettuare misure di temperatura per contatto. Le termocamera ad infrarossi sono in grado di riprodurre sotto forma di immagine le radiazioni infrarosse emesse dagli oggetti. **Le radiazioni infrarosse** sono onde elettromagnetiche, invisibili all'occhio umano, che si differenziano da quelle luminose, e visibili, esclusivamente per la loro lunghezza d'onda. La radiazione infrarossa può essere registrata sia di giorno che di notte, dal momento che si tratta di energia emessa piuttosto che riflessa. I raggi passano senza

difficoltà attraverso la foschia ed il fumo, contaminanti atmosferici che tendono invece ad oscurare la radiazione nel campo del visibile. Poiché un oggetto più caldo emette più energia di uno più freddo, esso appare, nell'immagine all'infrarosso a falsi colori, di tonalità più chiara. L'infrarosso (IR) è la radiazione invisibile "al di sotto del rosso", caratterizzata da valori di frequenza compresi tra $3 \cdot 10^{11}$ Hz e $3.85 \cdot 10^{14}$ Hz. È la regione dello spettro compresa tra le microonde e la luce visibile. Quasi tutte le sostanze emettono nell'infrarosso, a causa dell'agitazione termica delle loro molecole. Circa la metà dell'energia raggiante proveniente dal Sole è costituita da infrarosso, e una lampada elettrica ordinaria emette molto più infrarosso che luce. L'uomo, come tutti gli animali "a sangue caldo", è un emettitore di infrarosso.

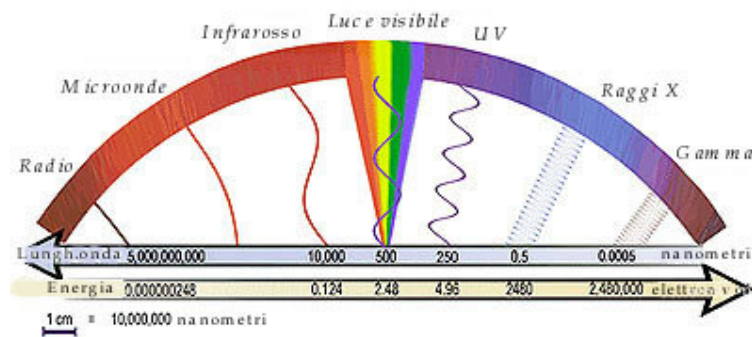


Figura 1: lo spettro elettromagnetico

Oltre che dalla temperatura assoluta, l'intensità dell'emissione infrarossa dipende da un'intrinseca proprietà dell'oggetto, nota come **emissività**. Mentre un corpo nero è idealmente un perfetto radiatore di energia, i diversi elementi presenti nell'ambiente sono per la maggior parte dei radiatori imperfetti, o corpi grigi.

Il corpo nero è un oggetto teorico che assorbe il 100% delle radiazioni che lo colpiscono. Dunque non riflette alcuna radiazione e appare perfettamente nero. Un corpo può apparire nero ai nostri occhi perchè assorbe solo la luce visibile. Il corpo nero invece assorbe [tutto lo spettro elettromagnetico](#). In pratica in natura niente assorbe totalmente (la migliore approssimazione è il carbonio in forma di grafite che riflette solo il 3%), ma il concetto di un tale perfetto assorbitore di energia è molto utile nello studio del comportamento della [radiazione elettromagnetica](#). In pratica, un piccolo foro sulla superficie di una sfera cava, si avvicina molto al concetto di corpo nero perchè la radiazione che entra nel foro difficilmente riuscirà a sfuggirne di nuovo e verrà quindi assorbita. Ma, riscaldando le pareti interne della sfera, a temperature via via maggiori, dal foro uscirà della radiazione, la cui intensità e il cui colore dipenderanno dalla temperatura del corpo nero.

All'aumentare della temperatura, infatti, il colore della radiazione emessa dal corpo nero si sposterà dal rosso al violetto, al blu fino al bianco. In altre parole, quando la [temperatura assoluta](#) aumenta, la gran parte della radiazione emessa dal *corpo nero* si sposta verso le [lunghezze d'onda](#) più corte e quindi le frequenze più alte. Ma non solo: al crescere della

temperatura assoluta del corpo nero, cresce la quantità totale di energia emessa: secondo la legge di Stephan-Boltzmann, il potere emissivo di un corpo nero risulta proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta. Il corpo nero dunque è anche idealmente un perfetto emettitore di radiazione.

L'emissività infrarossa è il rapporto tra l'emissione di un corpo grigio e quella di un corpo nero alla medesima temperatura assoluta; questo rapporto va da zero, per un corpo privo di emissione, all'unità (100%) per un corpo nero. Per la maggior parte delle superfici terrestri naturali l'emissività è comparativamente alta (nell'arco compreso tra l'85 e il 99%). Le differenze nell'emissività possono risultare importanti nel determinare la configurazione dell'immagine all'infrarosso.

Le differenze di temperatura sono la variabile più importante nel provocare le differenze di tonalità, sebbene l'emissività giochi un ruolo importante in materiali differenti. Il confronto fra le due immagini sottostanti, quella nel visibile e l'immagine IR, evidenzia la diversa temperatura (a parità di emissività) delle aree coperte da vegetazione arborea e prativa rispetto, ad esempio, agli argini ed alle strade od al bacino idrico.

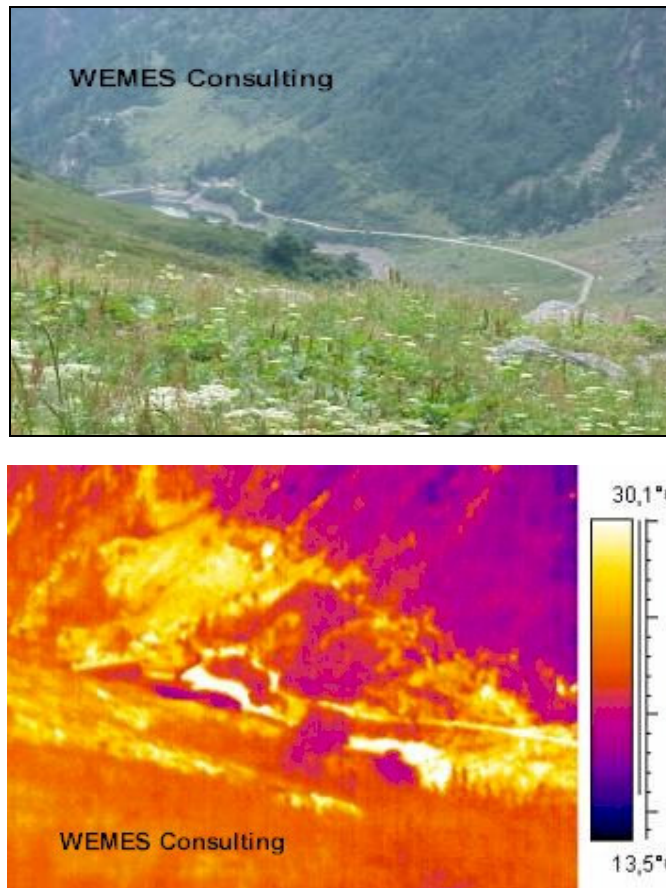


Figura 2: La scala colorata situata alla destra dell'immagine indica infatti le temperature corrispondenti alle diverse tonalità di colore, in cui il bianco corrisponde in questo caso ai 30°C, mentre il nero ai 13,5°C

3.1.2 Lo strumento: la termocamera

ThermaCAM™ P65 PAL



Caratteristiche principali:

- Detector FPA Microbolometrico di IV generazione, 320 x 240 pixel
- Videocamera nel visibile integrata
- Funzione di Autofocus
- Risoluzione termica < 0,08°C @ 30°C alla piena frequenza di 50 Hz

- Campo di misura: da -40°C a + 500°C (+1500°C e + 2000°C opzionale)
- Risoluzione spaziale: 1,3 mrad
- Frequenza di acquisizione immagine: 50 Hz
- Visore monolare a colori (TFT) ad alta risoluzione
- Display LCD con coating antiriflesso, orientabile e remotabile (con i comandi per l'uso della termocamera incorporati)
- Commento vocale memorizzabile su scheda PCMCIA (30 secondi per ogni immagine) tramite set microfono-auricolare senza fili (tecnologia Bluetooth)
- Commento di testo
- Funzioni di misura: combinazione di spot, aree, profilo, isoterme Controllo remoto RS 232
- Uscite Video PAL e S-Video
- Interfaccia Firewire IEEE 1394
- Registrazione di filmati AVI
- Digitalizzazione immagini: 16 bit
- Registrazione immagini termiche e nel visivo su PC-Card a bordo (128 Mb)
- Porta di comunicazione a infrarossi IRDA
- Software ThermoCAM QuickView incluso
- Lampada per la ripresa di fotografie nel visibile anche in luoghi con scarsa illuminazione
- Caratteristiche fisiche: corpo macchina in metallo, grado di protezione IP 54, resistenza agli urti 25 G e alle vibrazioni 2 G. Peso: < 2 Kg, incluso display LCD e remote control

La termocamera è al suo interno autoraffreddata. Questo per raffreddare i componenti che, scaldatisi per il funzionamento, potrebbero alterare le letture dei sensori. Le moderne termocamere sono tutte del tipo CCD-MATRIX, in altre parole presentano una matrice di sensori in grado di ricevere l'immagine dell'oggetto, che è quindi scomposta pixel per pixel. Ogni sensore della matrice presenta un suo errore di taratura, cioè ad ogni T radiante ogni sensore risponde con una tensione V differente dagli altri che può dare origine, a volte, ad errori anche di un grado. I sensori vanno quindi tarati uno ad uno. La curva di taratura, che è memorizzata dal computer all'interno della termocamera, viene costruita per punti. Si inquadra un corpo nero avente una temperatura T nota e costante e si vanno a misurare i segnali in volt forniti da ogni sensore. Questa operazione viene svolta con corpi neri a temperature diverse in modo da completare la curva di taratura con tutte le temperature che la termocamera deve essere in grado di analizzare. Il segnale fornito in volt dai sensori è un segnale analogico. Per convertirlo in digitale nelle termocamere furono usati prima ADC (Analogue to Digital Converter) a 8 bit (che forniscono 256 diverse discretizzazioni) e poi i migliori ADC a 12 bit (che ne forniscono 4096) in grado di permettere tarature raffinate anche a basse T , zona in cui le escursioni di V sono molto piccole.

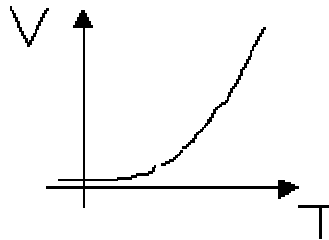


Figura 3: grafico qualitativo della caratteristica della curva di taratura di un sensore.

Le immagini vengono poi memorizzate nelle memory card.

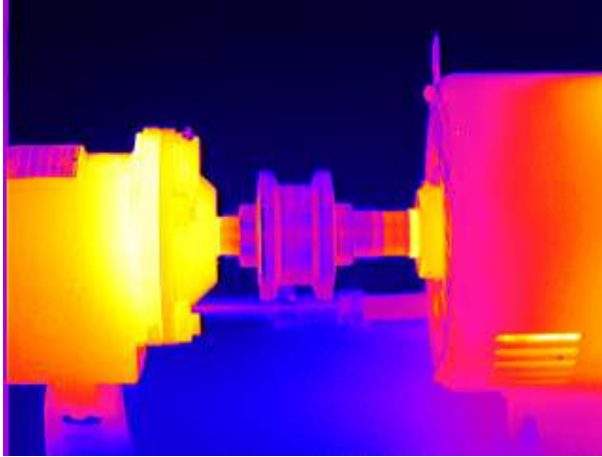


Figura 4: immagine ripresa da una termocamera ccd.

Ogni immagine è memorizzata come fosse una matrice all'interno della quale ad ogni pixel viene associato un numero rappresentante il valore di tensione che il sensore aveva registrato e di conseguenza ne rappresenta il livello di luminosità da adottare per la visualizzazione della immagine.

3.1.3 Le problematiche

La termocamera è in grado di rilevare le temperature dei corpi analizzati anche se, in verità, essa non misura propriamente la temperatura T bensì la intensità di radiazione I e, di conseguenza, la quantità di calore q emessa dal corpo. Si presentano però numerosi problemi da risolvere per la corretta

gestione delle informazioni acquisite dallo strumento. Prima fra tutte la non linearità della equazione di Stefan-Boltzmann:

$$q_{\square} = \sigma_{\square} T^4$$

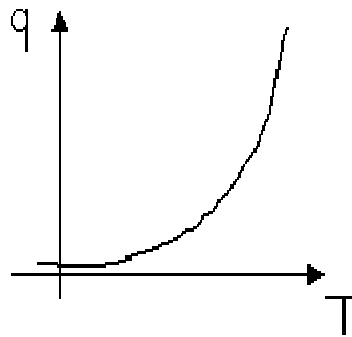


Figura 5: grafico qualitativo della relazione di Stefan-Boltzmann.

che mi fa notare come a basse **T** il sistema sia impreciso. Infatti, in questa zona del grafico per discrete variazioni di **T** sono associati valori di **q** poco diversi tra loro. Un altro problema è dato dal fatto che la **q** che la macchina misura non è quella che il corpo scambia con l'ambiente ma quella che il corpo stesso emette. Per meglio dire la **T** del corpo analizzato è falsata dalla **T** degli altri corpi che lo irradiano.

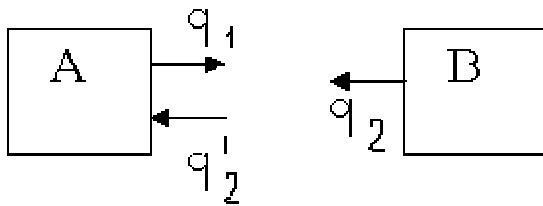


Figura 6: i corpi interagiscono tra loro mediante scambio termico per irraggiamento che avviene in ogni direzione.

Inquadrando il corpo A con la termocamera non riesco a misurare q_1 ma rilevo per forza una quantità q , più grande, falsata dalla presenza del corpo B: misurerò quindi

$$q_{\text{misurata}} = q_1 + (1 - a)q'_2 \quad (2)$$

dove a rappresenta il coefficiente di assorbimento del corpo A.

Per risolvere questa situazione si usano corpi con valori di a prossimi all'unità (in genere è sufficiente $a \geq 0,8$). Se invece si ha a che fare con corpi con a molto bassi (una lastra di alluminio, con $a \approx 0,3$, riflette la temperatura ambiente) è necessario rivestirli di vernici particolari per raggiungere alti valori di a . Questo sistema, se serve per misurare il q scambiato da un'aletta di raffreddamento in convezione forzata, non dà alcun problema poiché $q_{\text{convezione}} \gg q_{\text{irraggiamento}}$. Al contrario, dove la convezione è naturale (ad esempio un circuito elettrico), la componente $q_{\text{irraggiamento}}$ diventa rilevante e la misura può risultare falsata. Non per ultimo va infine ricordato che l'introduzione di uno strato di vernice introduce

inevitabilmente una nuova resistenza termica che può fare variare la situazione dello scambio termico all'interno del corpo.

3.1.4 I campi di applicazione

La mappatura termica superficiale di un corpo può essere eseguita con continuità o per punti, utilizzando sia la conduzione diretta del calore esistente tra il corpo in esame ed il sensore (metodo a contatto), sia captando tramite elementi sensibili le radiazioni, trasmesse o riflesse, provenienti dal corpo in esame (metodo a distanza). Il metodo a contatto è utilizzato esclusivamente nel campo della medicina.

Le tecniche comunemente utilizzate per le indagini termografiche si dividono fondamentalmente in due gruppi: quelle che sfruttano l'emissione dell'energia interna dell'oggetto in esame e quelle che richiedono sollecitazione termiche dall'esterno. In generale ad oltre 800 °K un oggetto non illuminato diventa visibile ad occhio nudo, in quanto una frazione non trascurabile dell'energia radiante emessa si trova nella regione visibile dello spettro. A temperature inferiori, ricorrendo a dispositivi sensibili alle radiazioni infrarosse (I.R.), si possono ottenere invece immagini in bianco e nero o in falsi colori; il grado di grigio o la sfumatura del colore sono strettamente legati alla temperatura ed alle proprietà della superficie degli oggetti esaminati. Un sistema termografico a distanza è costituito fondamentalmente da una telecamera con rivelatore all'infrarosso (IR), un monitor e, molto frequentemente, da un computer per l'elaborazione delle immagini. Questo metodo di analisi, soprattutto noto per le applicazioni militari, presenta una grande varietà di usi di tipo civile in campi che vanno

dall'agricoltura, alla geologia, alla meteorologia ed alla medicina. Di particolare rilevanza risultano essere le applicazioni nel campo dell'industria manifatturiera, nella manutenzione preventiva di impianti e macchine finalizzati alla produzione ed utilizzazione dell'energia, nel controllo qualità dei processi produttivi ed in generale nel settore degli Esami non Distruttivi. In quest'ultimo campo di applicazione la termografia assume particolare importanza in quanto la distribuzione della temperatura superficiale di un componente può fornire utili informazioni sulla presenza di difetti superficiali e/o sub-superficiali, soprattutto in quei materiali che risultano difficilmente ispezionabili con altri metodi di esame non distruttivo (es. materiali dielettrici, materiali compositi, etc.)

3.1.4.1 Industria

Elettricità: individuazione di sovratemperature causate da anomale resistenze di contatto su giunzioni, connessioni elettriche sui passanti AT/AT, AT/MT, MT/bt dei trasformatori di potenza, terminali di cavi AT, MT, giunti di potenza su conduttori isolati, morsetterie varie, sezionatori, interruttori di potenza a qualunque valore di tensione applicata, sistemi di smaltimento di calore prodotto, nel loro esercizio, da apparecchiature elettriche statiche e dinamiche, quadri elettrici di distribuzione, trasformatori di corrente e di tensione, generatori di energia elettrica comprensivi degli organi meccanici di rotolamento, motori elettrici di qualsiasi potenza, sistemi di rifasamento e quant'altro produca calore per effetto Joule durante il proprio funzionamento.

Motore elettrico

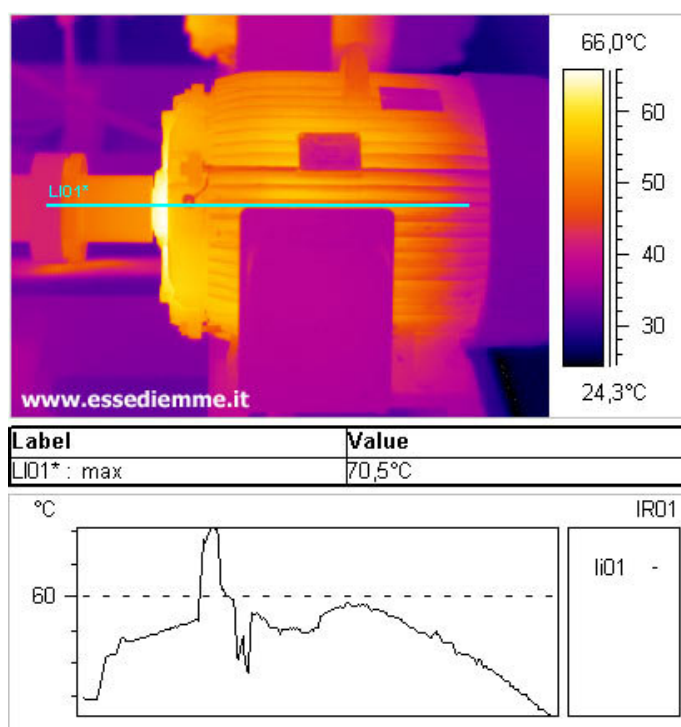


Figura 7: Notevole surriscaldamento del corpo motore riconducibile ad evidenti problemi meccanici degli elementi che lo costituiscono, per usura degli stessi o per problemi di lubrificazione. Procedere all'analisi dei dati storici della manutenzione a cui è stato sottoposto e, se mancanti, eseguire una revisione totale.

Cavi Elettrici

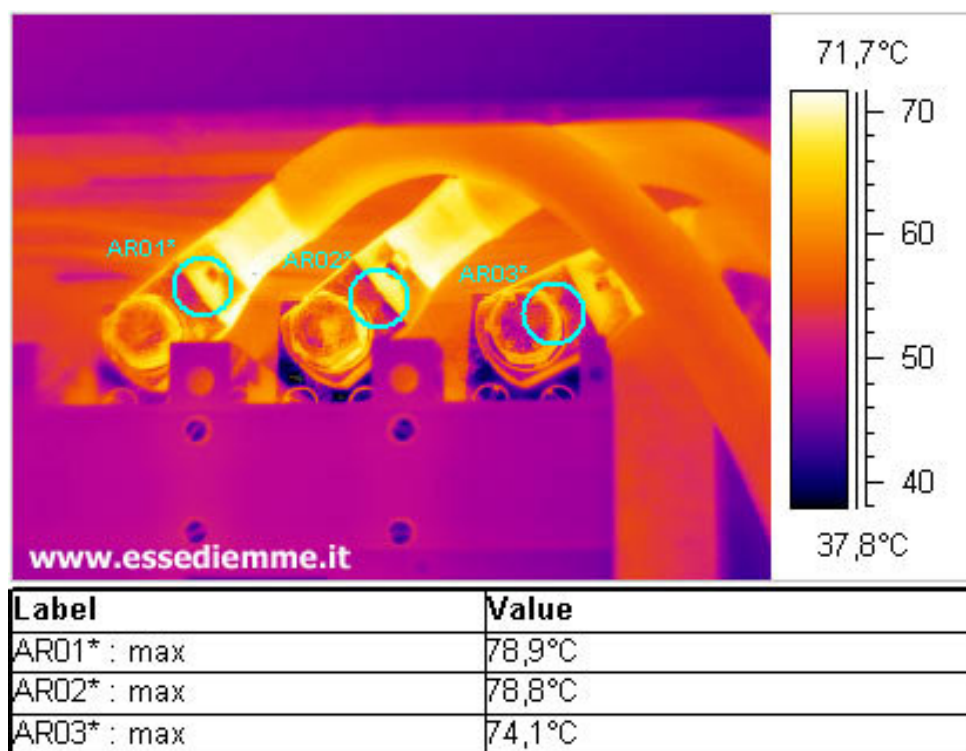


Figura 8: L'immagine termografica relativa alla connessione di cavi di distribuzione di un quadro elettrico di bassa tensione, evidenzia una situazione molto grave. Siamo infatti in presenza di valori di temperatura elevati che, se non rilevati e procrastinati nel tempo, possono portare alla successiva fusione dei morsetti di ancoraggio e di parte dei conduttori ad essi collegati.

Fasce di fili

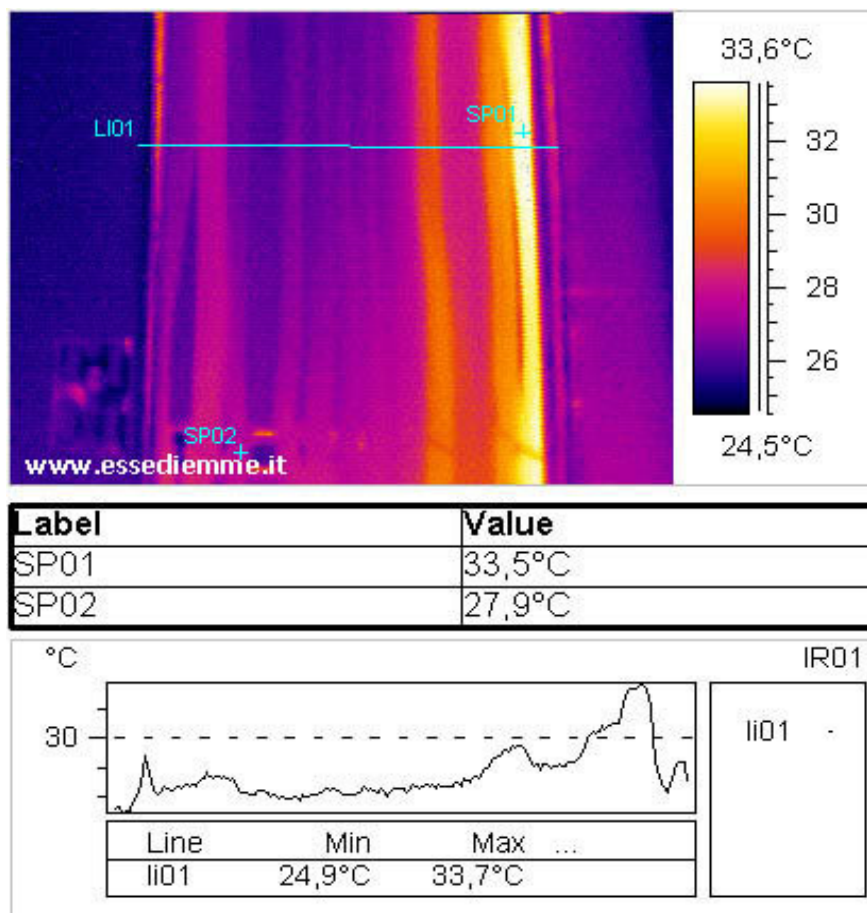


Figura 9: Grazie alla notevole precisione termica e all'alta risoluzione della termocamera utilizzata è possibile individuare con precisione problemi su singoli elementi di un fascio di fili elettrici consentendo così un rapido e preciso intervento per eliminare situazioni anomale che possono portare, come nel caso, ad interruzioni del servizio o addirittura a principi di incendi nei casi più gravi.

Impianti industriali: profilo termico del refrattario di un reattore di processo petrolchimico, forni per produzione di cementi, cadute di materiale refrattario in tubazioni di cementifici e raffinerie, impianti di produzione di vapore per applicazioni industriali nel settore tessile, per la produzione di acqua bollente, tubazioni di trasporto vapore ed acqua calda

per grossi impianti di riscaldamento centralizzato, turbine, centrali termiche e termoelettriche, complessi per il trattamento delle acque prima e dopo le lavorazioni, impianti di produzione di aria compressa con particolare riferimento alle testate dei compressori.

Forno per cottura calce



Figura 10: Con interventi mirati eseguiti durante il funzionamento del forno è possibile verificare con esattezza i punti in cui il refrattario denuncia cedimenti potendone valutare preventivamente l'entità e stabilire gli interventi da eseguire e la fermata dell'impianto

3.1.4.2 Civile

Edilizia: verifica statica di intonaci, rivestimenti di facciate con materiali di diversa natura, pavimentazioni, ancoraggi vari, coibentazione termica (caldo-freddo), perdite di tubazioni per acqua calda e fredda, impianti di riscaldamento e/o condizionamento, infiltrazioni di acqua da soffitti e/o lastrici solari e discendenti, processi di impermeabilizzazione. Verifica di omogeneità nella realizzazione di manufatti in calcestruzzo, sia per gettata in sito che precompressi. Verifica di omogeneità dopo interventi di

ristrutturazione di facciate e/o parti di esse con malte e resine cementizie diverse dalle originali.

Dispersione di calore



Figura 11: L'ispezione con una termocamera all'infrarosso evidenzia tutte le vie di fuga dell'impianto di riscaldamento domestico, quando non sono stati adoperati idonei materiali termoisolanti nella costruzione di fabbricati adibiti a civile abitazione permettendo di valutarne anche le perdite economiche provocate dalle maggiori spese. Da queste immagini si possono rilevare le parti che più di ogni altra necessitano di intervento per contenere o eliminare definitivamente le dispersioni termiche così individuate

Cornicioni



Figura 12: Verifica dello stato di cornicioni con individuazione delle zone interessate da infiltrazioni e ristagni di umidità con conseguente rischio di danneggiamento degli intonaci.

Restauro: esame accurato della porzione oggetto di restauro per determinare le aree su cui intervenire avendo chiaro lo stato superficiale e sottostante non altrimenti rilevabile. In presenza di opere pittoriche come affreschi e quadri, si possono valutare con chiarezza se vi sono stati precedenti interventi, con quali risultati e stabilire poi il tipo di intervento da eseguire. Possono altresì essere rilevate presenze di muffe senza dover operare rimozioni anche se parziali. Dopo il restauro è possibile verificarne la qualità, visionando la parte maggiormente interessata e valutando la omogeneità dei materiali impiegati.

Facciata di una chiesa

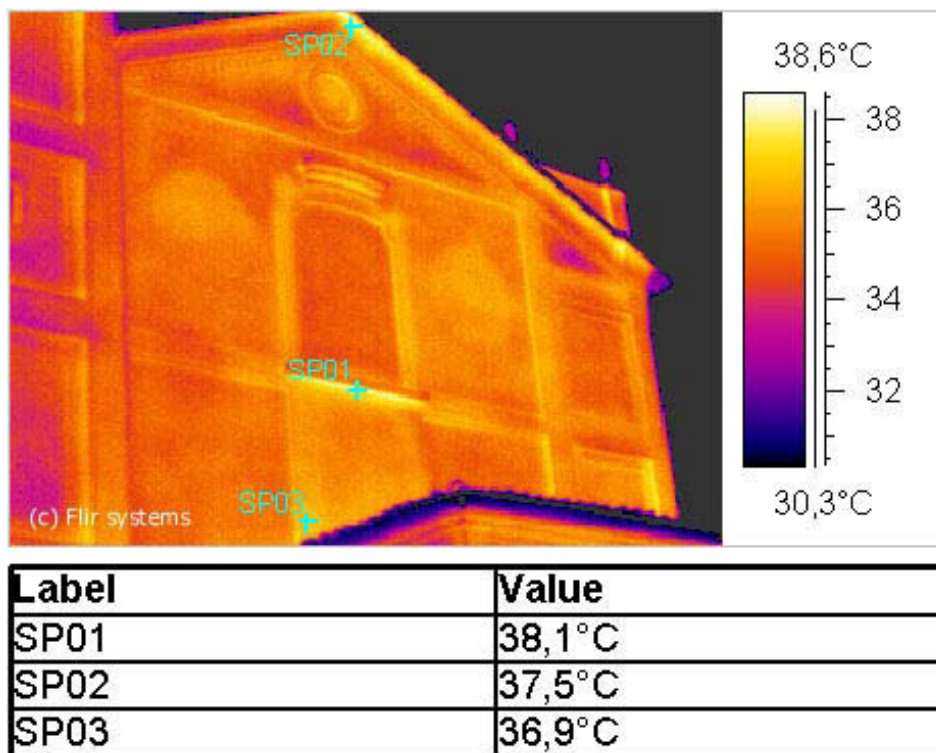


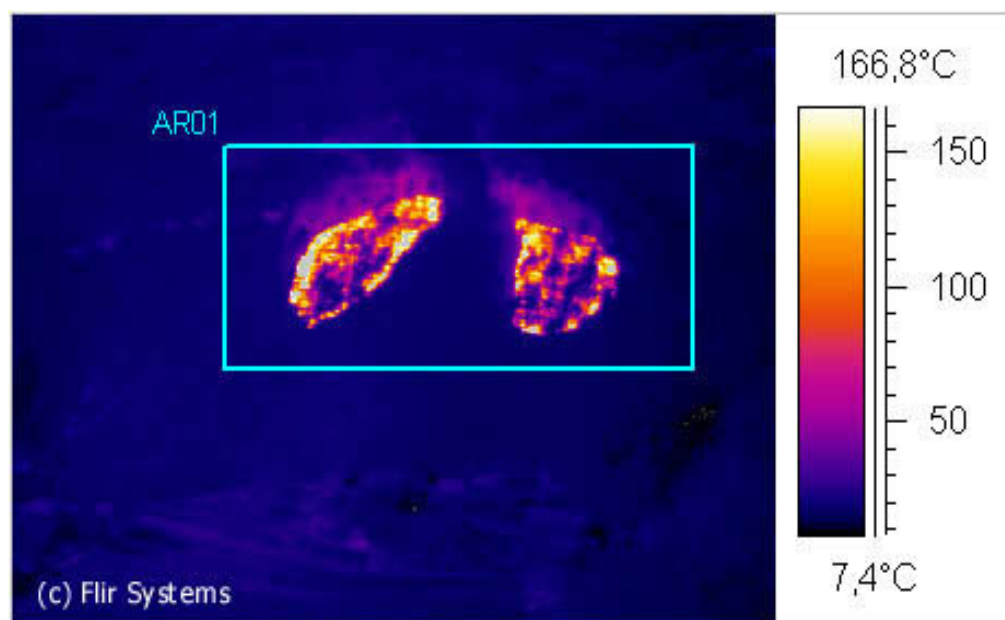
Figura 13: Una ispezione termografica alla facciata di questa chiesa evidenzia delle modifiche successive apportate alla struttura originale. In fase di restauro può essere molto utile valutare con anticipo ogni variazione apportata alla struttura originaria così da concentrarsi maggiormente su queste per verificarne la stabilità e l'integrità. In questo caso sono ben evidenti due prese di luce circolare richiuse in un secondo momento difficilmente individuabili senza questo tipo di ispezione.

3.1.4.3 Ambiente

Incendi: proprio perché sensibile alle sorgenti di calore la termocamera all'infrarosso si presta eccellentemente a rilevare sul territorio ogni variazione di temperatura tale da far sospettare la presenza di focolai di

incendi prima che questi si sviluppino su vasta scala, particolarmente nei sottoboschi di zone impervie e difficili da controllare a terra. Ovviamente, oltre che trovare applicazione in operazioni di prevenzione, l'apparecchiatura ben si presta anche a monitorare quelle aree sulle quali si è già intervenuti per spegnere un incendio e dove potrebbero verificarsi delle recidive attribuibili a focolai non estinti completamente, tanto su aree scoperte quanto coperte dalla vegetazione.

Bosco



Label	Value
AR01 : max	>261,9°C
AR01 : min	10,7°C

Figura 14: Esempio di monitoraggio di un incendio. Utilizzando le termocamere ad infrarossi è possibile sia effettuare opere di prevenzione che, in incendi già sotto controllo, individuare in maniera precisa e tempestiva la posizione di piccoli focolai non ancora spenti, evitando così il propagarsi imprevisto di nuovi fronti del fuoco.

Trattamento rifiuti: l'uso della termocamera permette il monitoraggio dei contenitori nei quali vengono stoccati rifiuti di ogni natura e provenienza, individuando senza rischio alle persone ogni eventuale falla e conseguente fuoriuscita di materiali, prima che gli stessi entrino in contatto con l'ambiente circostante inquinandolo. Altrettanto dicasi per gli impianti di discarica, ai limiti dei quali è possibile rilevare modificazioni geologiche prodotte da infiltrazioni di acqua e formazioni di sacche di biogas che fuoriescono da aree circostanti con conseguente rischio di esplosione o incendio.

Tutela territorio: massicce infiltrazioni di acqua su terreni considerati franosi possono essere individuate, prima che la situazione possa degenerare, a patto che sia stata tracciata una mappa del territorio a rischio sul quale occorrerà ripetere verifiche tendenti ad accertare l'omogeneità del terreno, nelle varie condizioni climatiche e nell'alternarsi delle stagioni. Sarà così possibile individuare, con buona approssimazione, l'estensione delle aree franose ed i periodi maggiormente a rischio. Con lo stesso metodo sarà possibile seguire e monitorare nel tempo le opere di bonifica eseguite apportando, se necessario, eventuali correttivi negli interventi di

consolidamento.

Stabilità di ghiacciai

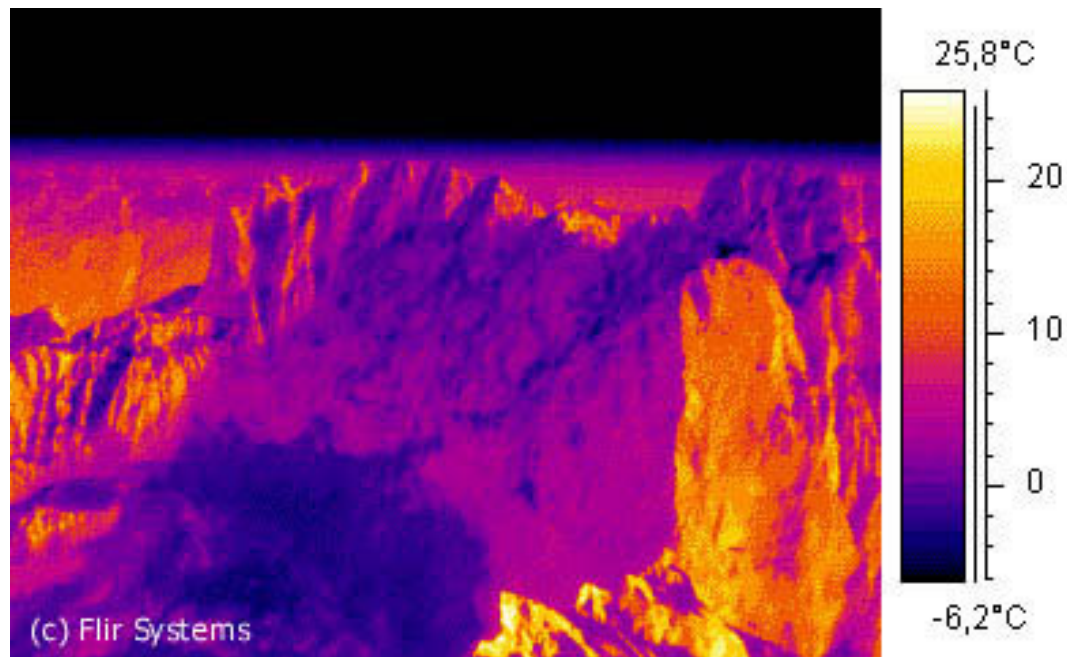


Figura 15: La prevenzione delle slavine e lo studio della consistenza dei ghiacci e della neve in alta montagna può essere eseguito sfruttando una termocamera all'infrarosso per monitorare anche le più piccole variazioni di temperatura e accorgersi per tempo di eventuali pericoli.

3.1.4.4 Altre applicazioni

Sorveglianza ambientale notturna a cose e persone, analisi dei flussi e dell'efficacia dei sistemi di ventilazione forzata in sistemi informatici o in apparati elettronici, ispezioni al materiale rotabile per l'individuazione di anomalie a freni, cuscinetti, mozzi, compressori, impianti di bassa tensione, analisi dei processi produttivi per il controllo della qualità.

Sorveglianza



Figura 16: Con l'infrarosso è possibile anche effettuare servizi di sorveglianza nel buio nella notte.

Personal computer

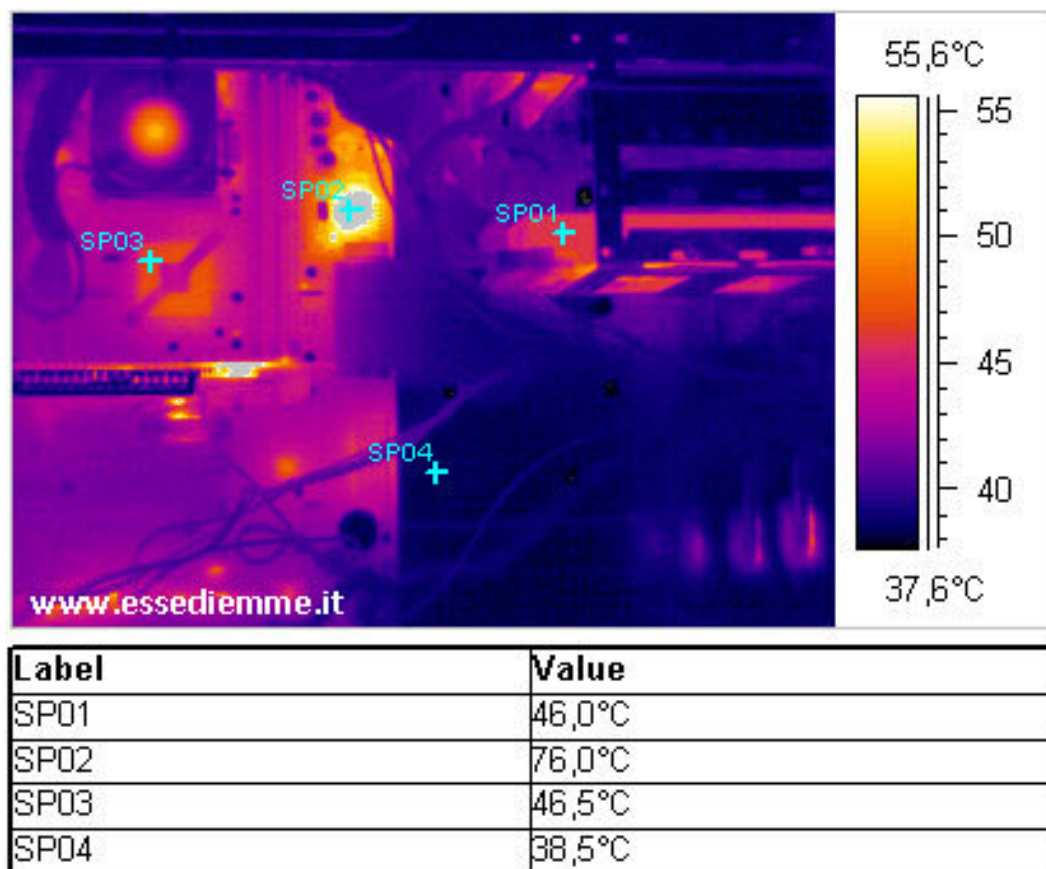


Figura 17: Verifica dello stress termico in personal computer, utilizzati in applicazioni che ne richiedono il funzionamento continuo 24 ore su 24, per l'individuazione di eventuali problemi di ventilazione all'interno del case o degli ambienti in cui sono inseriti.

Aviazione civile

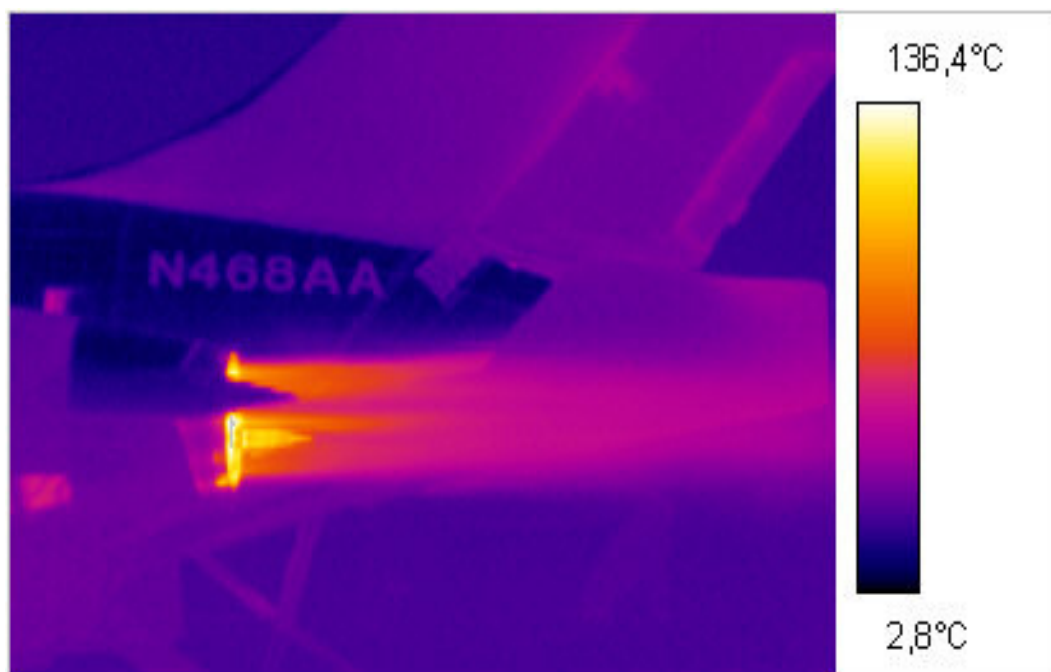


Figura 18: Esempio di controlli sul funzionamento delle turbine di motori a reazione di aerei passeggeri. Grazie all'elevata risoluzione della termocamera e all'alta precisione termica è possibile individuare la più piccola anomalia nei motori senza la necessità di procedere a lunghe e costose operazione di smontaggio.

3.1.4.5 Termografia per il rilevamento dei punti deteriorati sulle linee elettriche in Alta Tensione

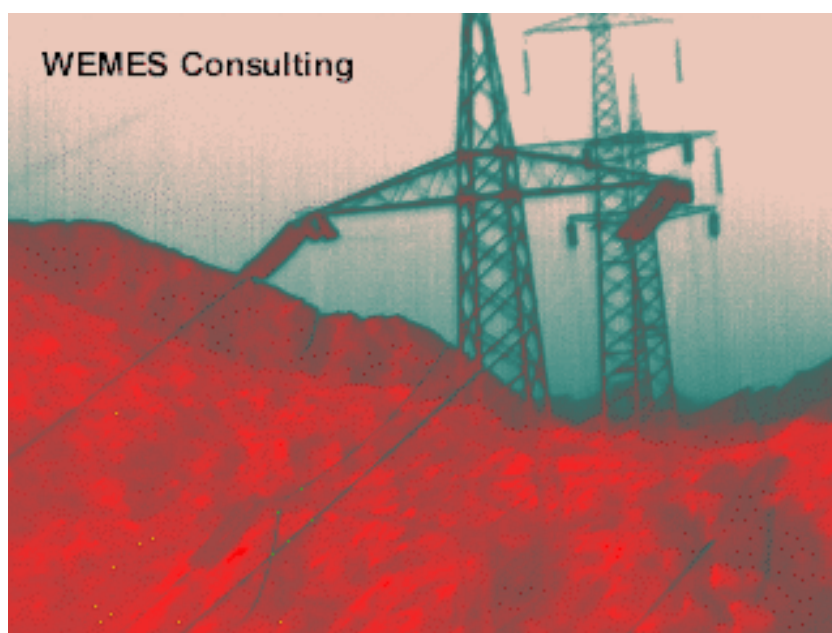


Figura 19

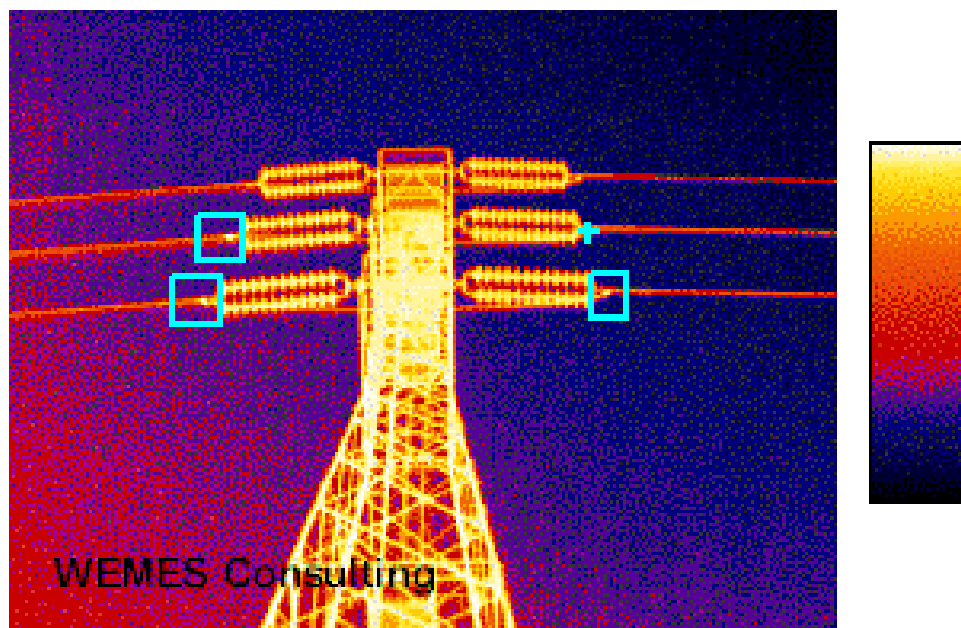


Figura 20

3.1.5 La termografia applicata alla medicina

Le radiazioni infrarosse hanno due proprietà fondamentali:

- 1) Non impressionano l'occhio umano rimanendo invisibili;
- 2) Sono emesse da tutti i corpi caldi, e più in generale dalle molecole, indipendentemente dal loro stato termico, per effetto di transizioni elettroniche tra i diversi livelli energetici;

L'uomo, ad esempio, è un organismo omeotermico, è capace cioè di mantenere costante la sua temperatura interna, indipendentemente dalle condizioni esterne, per questo motivo produce calore che disperde per la maggior parte nell'ambiente; l'interfaccia attraverso la quale il calore prodotto viene disperso è la pelle. La pelle, come qualsiasi corpo, a

temperatura superiore allo zero assoluto irradia energia elettromagnetica nell'ambiente circostante ad una intensità che è massima nella regione infrarossa dello spettro elettromagnetico. La termografia medica è una tecnica, innocua e incruenta, che consente di evidenziare e misurare le temperature della superficie del corpo umano, sfruttando l'energia calorica emessa dall'organismo attraverso la cute sotto forma di radiazioni elettromagnetiche infrarosse. In definitiva, la termografia si basa sulla constatazione che vari processi patologici provocano un aumento della produzione di calore nella regione corporea interessata. È un esame assolutamente privo di effetti collaterali, è indolore, non invasivo, di semplice esecuzione e non utilizza radiazioni dannose. Il paziente deve essere messo a proprio agio in comoda poltrona, in ambiente ad illuminazione costante, sufficientemente spazioso e tranquillo, al fine di ridurre al minimo gli spostamenti d'aria sulla superficie esposta e le manovre ambientali, che potrebbero ottenere riflessi vegetativi. Dopo aver completato l'anamnesi storica, è opportuno rilevare la temperatura orale del paziente: se è maggiore di $37,5^{\circ}\text{C}$ il test va rimandato; se è normale la superficie cutanea oggetto del rilievo termografico, deve essere esposta direttamente all'aria per circa 15 minuti, in modo da eliminare ogni modificazione termica a seguito dell'esposizione a diretto contatto con l'aria. La temperatura ambiente deve essere tra i 20° ed i 24°C , con umidità relativa tra il 35 e il 60%.

Nel campo della medicina, oltre al metodo a distanza, viene utilizzato il metodo a contatto che può essere così implementato:

- la **termografia da contatto a cristalli liquidi** sfrutta la proprietà dei cristalli liquidi colesterici (di cui sono costituite le lastre) di

modificare la loro disposizione spaziale in funzione della temperatura; ad ogni modificazione spaziale corrisponde una diversa rifrazione dei raggi luminosi che assumono quindi colori diversi a seconda dell'incidenza della luce sulle facce dei microcristalli colesterici. In pratica, quando si appoggiano le lastre termografiche sulla zona da indagare, queste assumono colorazione differente a seconda della temperatura.

- la **termografia computer assisted**, invece, non utilizza lastre a cristalli liquidi che si colorano direttamente appoggiandole sulla zona in esame, ma una lastra particolare che, collegata ad un computer, invia ad esso, punto per punto, le diverse temperature registrate sulla superficie cutanea analizzata. In tal modo si ricavano, mediante i calcoli effettuati dal computer, i valori medi di temperatura della superficie occupata dai diversi colori, corrispondenti, anche in questo caso, alle diverse gradazioni termiche.

Praticamente, la differenza tra la termografia da contatto e quella computer assisted sta nel fatto che nella prima l'immagine si forma direttamente sulla lastra appoggiata sulla cute, mentre nella seconda l'immagine si forma sullo schermo del computer. In quest'ultimo caso sarà più facile memorizzare immagini, procedere al loro raffronto nel tempo, valutare numericamente le temperature nei diversi distretti.

La termografia da contatto a cristalli liquidi utilizza uno strumento costituito da una lastra a **cristalli liquidi colesterici**. L'applicazione più comune della tecnologia dei cristalli liquidi sono i display a cristalli liquidi;

tuttavia alcuni tipi di cristalli sono impiegati per altre applicazioni. I cristalli liquidi colesterici sono dei cristalli organici derivati dal colesterolo e la loro struttura molecolare a spirale si espande e si contrae al cambiamento della temperatura. Questi cristalli possono così essere formulati e calibrati per cambiare di colore a delle precise temperature. Riflettono la luce che ricevono in una serie di colori in sequenza che sono il rosso, il verde e il blu. Il colore verde è usato come punto di riferimento per misurare la temperatura. Il processo di microincapsulazione racchiude il cristallo liquido in microsfere proteggendolo dagli agenti esterni. I cristalli liquidi microincapsulati mostrano il cambiamento di colore sempre nello stesso modo e ordine con velocità che variano a seconda dell'ampiezza della scala della temperatura. La precisione disponibile è di $\pm 1^{\circ}\text{C}$ per i prodotti standard e di $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ per i prodotti medicali. Le temperature disponibili vanno da -30°C a $+120^{\circ}\text{C}$.

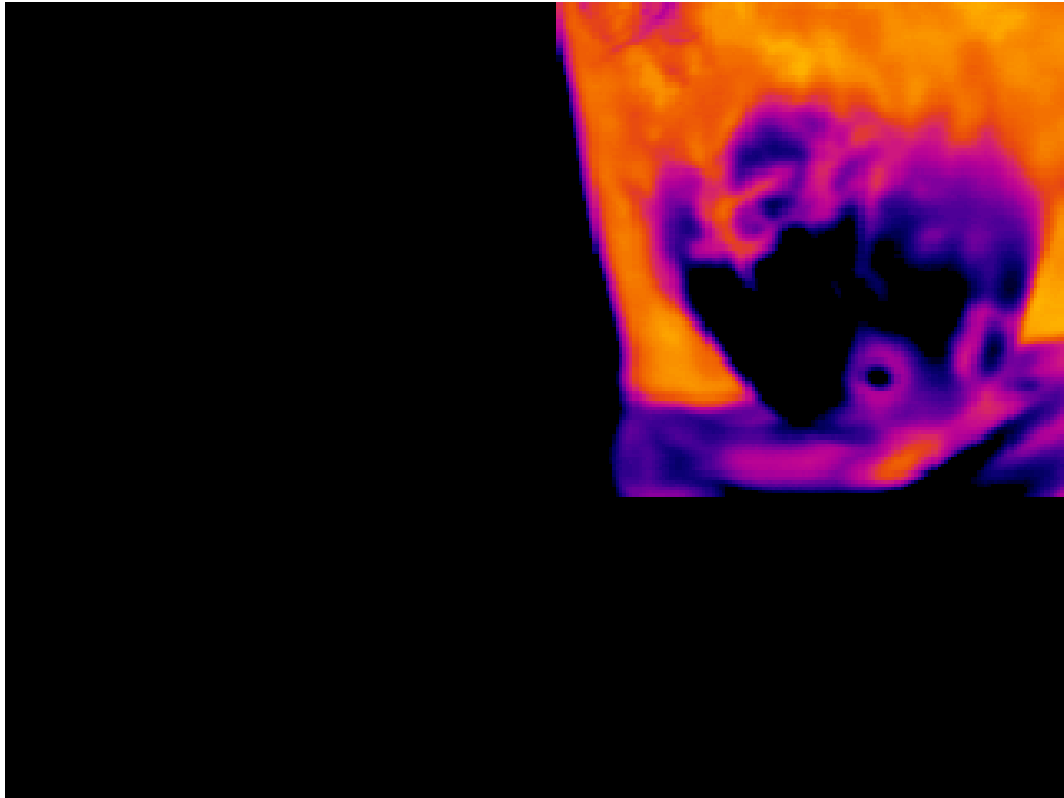


Figura 21: Test per tumore alla mammella.

Conclusioni

Dalla ricerca possiamo desumere che i controlli non distruttivi hanno molteplici campi di applicazione. In particolar modo la termografia applicata all'industria permette di accorgersi in tempo di mal funzionamenti che potrebbero dare origine a gravi danni: basti pensare che

il surriscaldamento di fili elettrici può essere la causa di un incendio. E' vero che la strumentazione richiesta per effettuare queste prove diagnostiche è abbastanza costosa, ma i benefici che si possono trarre dall'uso di queste tecniche sono molti. Esistono già diverse imprese specializzate in queste campo alle quali è possibile richiedere un servizio di controllo o presso le quali è possibile addestrare i propri tecnici all'uso degli strumenti.

PARTE II – Metodi non visivi

CAPITOLO I

1.1 Metodo dell'emissione acustica

La misura dell'emissione acustica ha lo scopo di rilevare le onde di pressione generate dalla nascita o dall'evoluzione di discontinuità nelle strutture dei materiali. Il malfunzionamento di macchinari è spesso segnalato dalla comparsa o dalla variazione di rumorosità.

Il rilievo è eseguito con sonde, che basano il loro funzionamento sul principio della piezoelettricità, ovvero tali sonde trasformano i segnali acustici in segnali elettrici. E' applicato per:

- ✓ monitoraggio continuativo di componenti e macchinari in esercizio al fine di individuare anomalie, per poter porvi rimedio con interventi di manutenzione preventiva;
- ✓ controllo dell'usura e della resistenza a fatica di strutture o parti di esse.

Un grosso problema di tale tecnica risiede nel fatto che i segnali originali sono molto deboli e richiedono per tanto una forte amplificazione (10^4 - 10^5 volte). A tali livelli di amplificazione il rumore proveniente dall'ambiente e dalla stessa strumentazione è tutt'altro che trascurabile, essendo spesso dello stesso ordine di grandezza del segnale che si vuol misurare. L'operazione di filtraggio risulta quindi fondamentale e molto delicata.

1.2 Metodi dinamici

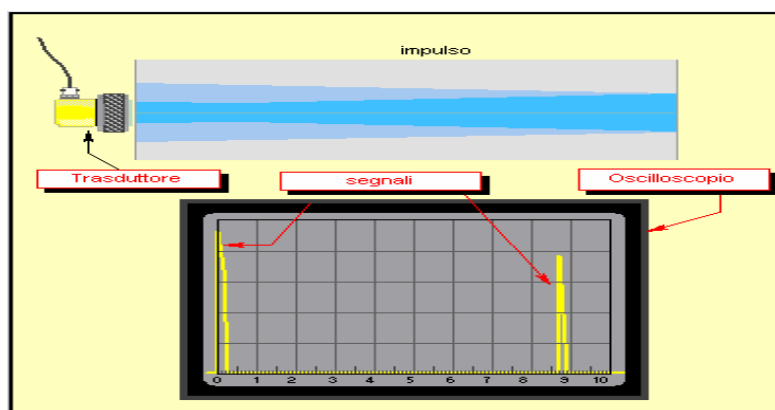
L'analisi dei modi vibrazionali consente la rilevazione di difetti e imperfezioni in quanto la presenza di una qualsiasi anomalia all'interno di un sistema dinamico dà luogo ad una variazione dell'intensità vibratoria del sistema stesso.

Il metodo si basa sulla costruzione della “carta dinamica” del sistema in esame mediante registrazione delle vibrazioni rilevate dai trasduttori posizionati in vari punti del sistema stesso. Una volta individuati i modi vibrazionali e le frequenze proprie di vibrazione della struttura in esame, indice evidente della presenza di un difetto sono i picchi, vibrazioni isolate di intensità tale da superare il cosiddetto “rumore di fondo” proprio del sistema. Il metodo viene applicato a macchinari a funzionamento rotante (turboalternatori, pompe, compressori) nella rilevazione del deterioramento di cuscinetti a rotolamento, nell'analisi di strutture a forte caratterizzazione dinamica quali i ponti.

1.3 Introduzione ultrasuoni

Il suono è una vibrazione che trasmette energia attraverso una serie di piccoli spostamenti di materiale. Le vibrazioni con frequenza superiore a quella udibile dall'orecchio umano vengono chiamate vibrazioni ultrasonore.

Un esame con US può essere descritto come segue: l'impulso di US, emesso da un opportuno trasduttore, si propaga nel materiale in linea retta, secondo un fascio regolare di data divergenza, finchè giunto alla superficie opposta subisce una riflessione ritornando al trasduttore, il quale, essendo reversibile, riconverte l'impulso US in un segnale elettrico che può venire rappresentato su di uno schermo sotto forma di echi (il metodo è quindi l'applicazione tecnologica del fenomeno dell'eco), consentendo l'individuazione di difetti, o dando direttamente la misura dello spessore in mm. In presenza di una discontinuità lungo il tragitto, il fascio US subisce una riflessione parziale, la cui entità è strettamente legata alla dimensione di tale difettosità, infatti l'energia assorbita dal difetto fa sì che esso possa vibrare emettendo a sua volta onde elastiche di frequenza tipica della sua risonanza.



Il fenomeno fisico della piezoelettricità è reversibile, perciò quando l'onda riflessa od emessa dall'ostacolo ritorna alla sonda che l'ha generata, darà

un segnale elettrico contiene tutte le informazioni sulle dimensioni, geometria e natura dell'ostacolo incontrato dal fascio d'ultrasuoni incidenti, nonché la sua posizione; infatti è possibile ricavare informazioni sulla posizione del difetto, attraverso il rapporto dei tempi di ritorno dell'eco del segnale e dell'eco di fondo, dato che il materiale da esaminare possiede sempre un confine, cioè una parete di fondo sulla quale il fascio in ingresso si riflette comunque. Inoltre è possibile rivelare la presenza d'un difetto interno anche nel caso che questo non generi la riflessione, ma soltanto l'assorbimento del fascio incidente. Ciò è possibile perché lo strumento visualizza il fondo sia come distanza (tempo per la ricezione dell'eco di fondo), che per assorbimento (attenuazione dell'intensità del segnale di fondo riflesso, per assorbimento da parte della materia attraversata). Se l'intensità del fascio riflesso dalla parete di fondo diminuisce bruscamente in una certa posizione significa che qualche ostacolo o discontinuità l'ha parzialmente assorbito. In questo caso non è possibile individuare la posizione del difetto, ma solamente valutarne la presenza ed il potere assorbente. Per valutare la dimensione del difetto si confronta l'intensità dell'eco ricevuto con quello di difetti standard, o con grafici appositamente costruiti.

Il metodo permette l'identificazione di difetti distanti dal trasduttore da pochi mm a diversi metri. Più d'ogni altro CnD l'esame UT richiede un operatore di grande esperienza, capace d'interpretare correttamente ogni segnale che compaia sul monitor e di sfruttare appieno le possibilità che questa tecnica offre. Questo metodo risulta applicabile al controllo di tutti i materiali in grado di far propagare onde ultrasonore con frequenze comprese tra i 16 kHz e i 20 MHz.

Si complica invece in presenza di fori, scanalature, filettature, variazioni di sezione o di geometrie complesse.

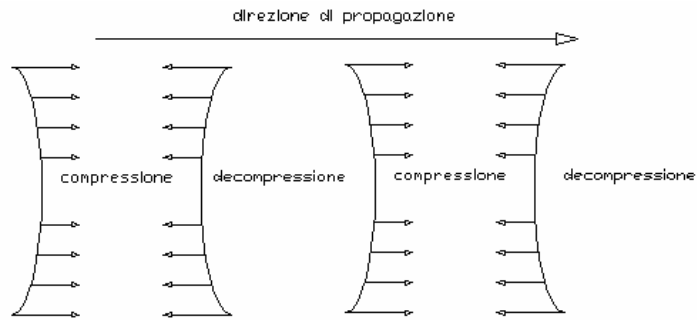


1.3.1 Il suono : caratteristiche fisiche

Il suono é un'onda elastica vibrazionale: ha bisogno di un mezzo per propagarsi e la perturbazione avviene parallelamente o perpendicolarmente alla direzione di propagazione a seconda che si propaghi in un solido, liquido o gas.

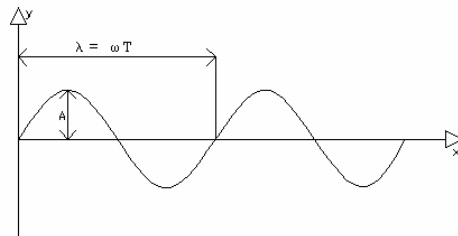
Per la sua esistenza sono, dunque, necessari una sorgente (corpo vibrante) e un mezzo elastico di propagazione (aria, acqua, ecc..). Può essere considerato prodotto da un susseguirsi di rarefazioni e compressioni di piccole porzioni di aria.

Ogni singola molecola trasferisce energie alle molecole adiacenti e dopo il passaggio dell'onda e l'oscillazione attorno alla propria posizione intermedia fissa, ritorna pressappoco nella posizione iniziale.



In uno spazio anisotropo (senza direzioni privilegiate) una sorgente puntiforme genera onde sonore secondo geometrie sferiche.

Grandezze fisiche



Periodo (T): intervallo di tempo necessario per compiere una vibrazione completa. Si misura in secondi (s).

Frequenza (f): numero di vibrazioni complete che avvengono in un secondo. E' l'inverso del periodo. Si misura in hertz (Hz). Il "range" di udibilità dell'orecchio umano è compreso tra i 20 e i 20000 Hz . Ciò significa che, pur esistendo onde sonore che si propagano a frequenze più basse (infrasuoni) o più alte (ultrasuoni), noi non possiamo percepirle. La frequenza caratterizza l'altezza o acutezza di un suono.

Lunghezza d'onda (λ) : distanza percorsa dall'onda in un periodo.
Perciò, se v è la velocità di propagazione , $\lambda = v \cdot T = v / f$.
Si misura in metri (m).

Ampiezza (A) : Rappresenta lo spostamento massimo delle molecole d'aria che oscillano intorno alla posizione di equilibrio al passaggio della perturbazione acustica. All'aumentare di questo spostamento aumenta la forza con cui le molecole colpiscono la membrana timpanica e, quindi l'intensità del suono che percepiamo.

Velocità di propagazione (v) : la velocità del suono è la velocità con cui il suono si propaga in una certa sostanza. Questa grandezza è molto importante, perché è anche la velocità con cui si propagano l'[energia cinetica](#) e le sollecitazioni meccaniche in quella determinata sostanza.

Nei [fluidi](#), la velocità del suono segna il confine tra due regimi di moto completamente diversi, per l'appunto detti [regime subsonico](#) e [regime supersonico](#).

Il suono si propaga in modi diversi a seconda che sia in un solido, in cui tutti gli atomi sono collegati solidalmente fra loro, oppure in un fluido (liquido o gas), che invece è incoerente.

- Velocità del suono nei solidi

In un solido si possono propagare due tipi di onde diverse: le [onde longitudinali](#), che sono onde di pressione e depressione del materiale, e le [onde trasversali](#), che invece sono *onde di taglio*: vale a dire che il materiale non subisce compressione, ma taglio, cioè viene portato a muoversi in senso laterale alla direzione di propagazione dell'onda.

Perciò, il suono si propaga nei solidi con due di velocità diverse.

Per un'onda longitudinale, la velocità è data da:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

dove E è il [modulo di Young](#) del materiale considerato e ρ la sua densità.

Per le onde trasversali la formula è analoga

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

dove G è il [modulo di rigidità](#) (o modulo di scorrimento).

Il modulo di Young è sempre superiore a quello di rigidità, quindi *le onde longitudinali sono sempre le più veloci*. Se il mezzo è limitato, come nel caso di una sbarra o altro oggetto di piccole dimensioni sono anche le uniche ad essere eccitate. Perciò quando si parla di velocità del suono nel mezzo ci si riferisce correntemente alla propagazione longitudinale trascurando quella trasversale.

- Velocità del suono nei fluidi

In un fluido gli atomi sono liberi di scorrere a piacimento, e quindi le onde trasversali non esistono; il suono si propaga solo per mezzo di onde di pressione longitudinali.

La velocità con cui queste si propagano dipende sia dalla densità del fluido sia dal suo modulo di compressibilità E_c , che è l'analogo del modulo di Young per i fluidi. Esso può definirsi a partire dalla seguente formula:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P}{E_c}$$

In pratica rispetto alla pressione unitaria E_c mi dice di quanto il fluido si comprime. Il primo membro non ha dimensioni, essendo il rapporto di volumi, e così deve succedere per il secondo. Allora ha la stessa unità della pressione, che nel S.I. è $\frac{N}{m^2}$.

- Velocità del suono nei gas

Per i gas il modulo di compressibilità è dato da:

$$E_c = p \frac{c_p}{c_v}$$

dove c_v è il [calore specifico](#) del gas a volume costante, c_p è il calore specifico a pressione costante e p la pressione media.

Visto che l'esperienza pratica dimostra che le compressioni ed espansioni causate dal suono nel gas avvengono troppo rapidamente perché ci sia scambio apprezzabile di calore, si può considerare il processo adiabatico.

Questo ci permette di scrivere:

$$c_{spec} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}}$$

dove R è la costante dei gas perfetti, T è la temperatura assoluta del gas e M il suo [peso molecolare](#).

Quindi la velocità del suono nei gas non dipende dalla loro pressione ma soltanto dalla loro temperatura.

Nell'aria, la velocità del suono è di 331,5 m/s a 0°C e di 343 m/s a 20°C.

1.3.2 Fenomeni connessi con la propagazione delle onde sonore

Quando un'onda sonora che si propaga in un mezzo incontra una superficie di attraversamento di un mezzo dalle caratteristiche differenti, parte dell'onda viene riflessa, parte assorbita e parte rifratta.

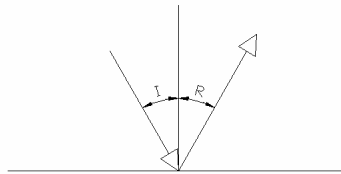
- Riflessione

Fenomeno che si verifica quando un'onda (sonora, per esempio) incontra un ostacolo e torna indietro dalla parte da cui proviene.

Leggi della riflessione

L'angolo di incidenza (I) e l'angolo di riflessione (R) sono uguali e complanari

$$I = R$$



- Rifrazione

Il fenomeno consiste in un cambiamento di direzione di propagazione dell'onda quando questa attraversa la superficie di separazione di mezzi di densità diversa .

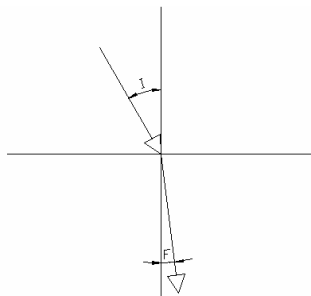
Questo cambiamento dipende dal rapporto fra le diverse velocità di propagazione dell'onda nei due mezzi.

Leggi della rifrazione

1)

$$\frac{\sin I}{\sin F} = \frac{v_1}{v_2} = K$$

2) L'angolo di incidenza (I) e l'angolo di rifrazione (F) sono complanari



- Assorbimento: il fenomeno consiste nel fatto che parte dell'energia trasportata dall'onda viene assorbita dall'ostacolo e si trasforma in calore .
- Diffrazione : quando la lunghezza d'onda del suono emesso dalla voce umana e' dello stesso ordine di grandezza degli ostacoli che incontra sul suo cammino nel punto in cui l'onda incontra l'ostacolo si generano onde sferiche che si propagano in tutte le direzioni permettendo al suono di giungere in punti che si trovano dietro l'ostacolo.
- Risonanza : si verifica quando ad un sistema vengono trasmessi impulsi con frequenza uguale alla frequenza di vibrazione del

sistema stesso , di conseguenza esso oscilla con oscillazioni di ampiezza massima.

- **Interferenza** : Effetto prodotto dalla sovrapposizione di due o più onde che si propagano simultaneamente nello stesso mezzo , per cui lo spostamento in un dato punto e in un certo istante e' pari alla somma vettoriale degli spostamenti prodotti dalle onde componenti in quel punto e in quell'istante.

Si ha interferenza costruttiva quando gli spostamenti hanno lo stesso verso e si ottiene un'onda di ampiezza maggiore di quelle dovute separatamente a ciascuna onda , viceversa si ha interferenza distruttiva quando gli spostamenti hanno verso opposto e si ottiene un'onda di ampiezza minore di quelle delle onde componenti.

- **Battimenti** : fenomeno prodotto dall'interferenza di due onde di frequenza poco diversa. Se si tratta di onde sonore i battimenti consistono nella percezione di un suono di intensità variabile che raggiunge un massimo ad intervalli di tempo uguali.

1.3.3 Cenni di fisica acustica

1.3.3.1 SPL – HPL

La relazione esistente tra suono considerato come entità fisica e la sensazione sonora non è lineare, ma segue la legge di Weber-Fechner, secondo la quale l'intensità di una sensazione fisiologica è proporzionale al logaritmo dello stimolo per cui quando la pressione sonora si decuplica, il livello di pressione sonora aumenta di 20 dB.

Questo è il motivo per cui è necessario sapere che la descrizione dell'intensità può essere fatta utilizzando o i dB SPL (Sound Pressure

Level) quando si parla di pressione sonora o i dB HTL (Hearing Threshold Level) quando si tratta di sensazione uditiva. Non è quindi corretto considerare simili i dB SPL misurati con il fonometro (strumento di misura del suono) ed livelli di soglia uditiva valutati in dB HTL con l'audiometro, se non servendosi di idonee tabelle di conversione. Oltre a questo è utile ricordare che l'orecchio umano non è sensibile a tutte le frequenze nello stesso modo per cui i fonometri permettono un'analisi acustica non solo lineare, ma anche con scale ponderate secondo la sensazione uditiva.

La scala più utilizzata è quella ponderata in A ed è questa la spiegazione per cui l'intensità è spesso espressa in dBA sottointendendo l'acronimo SPL).

1.3.3.2 Intensità

E' definita come il flusso medio di energia che, nell' unità di tempo, attraversa una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione. E' la grandezza che permette di distinguere i suoni deboli da quelli forti. Un suono e' tanto più forte quanto maggiore e' l' ampiezza delle oscillazioni della sorgente che lo genera. Tenendo presente il carattere tridimensionale delle onde sonore, l' intensità I viene definita così :

$$I = \frac{E_{tot}}{S \cdot t} = \frac{W}{4\pi \cdot r^2}$$

W è la potenza legata all'energia sonora nel tempo

E indica la quantità di energia generata e trasportata dall'onda.

$$E = K \cdot f^2 \cdot S^2$$

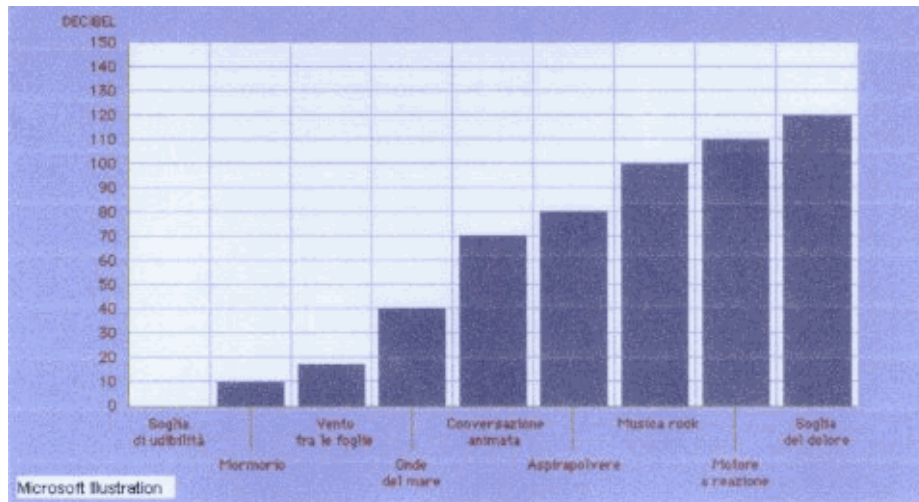
L' intensità si misura in Decibel (dB).

$$dB = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Dove I_0 , è il valore d'intensità per cui la sensazione fisiologica è nulla:

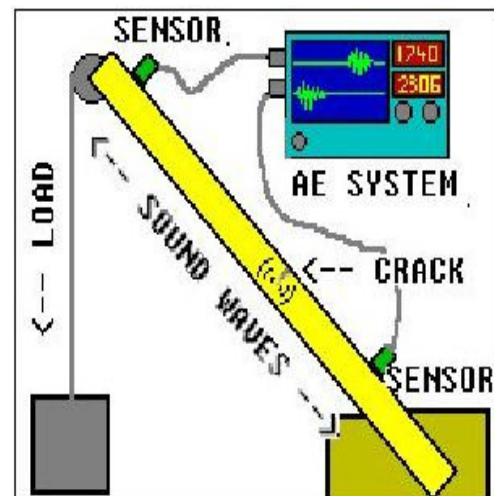
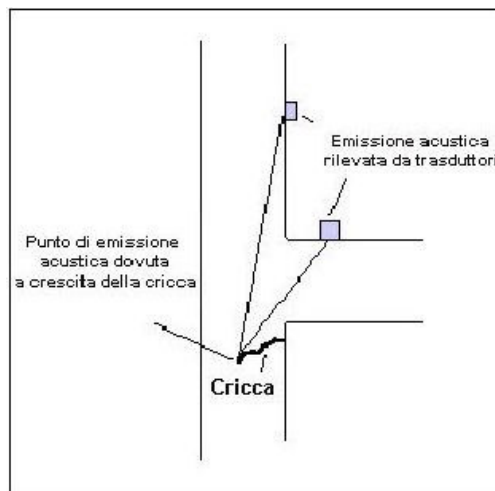
$$I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

La scala delle intensità è logaritmica, perciò ogni incremento di 10 dB corrisponde ad un aumento in intensità di un fattore 10: il fruscio delle foglie, infatti, è 10 volte più intenso dei mormorii.



1.3.3.3 Emissione acustica

Una emissione acustica è un'onda sonora che viaggia attraverso il materiale come risultato di qualche improvviso rilascio di energia durante processi progressivi di danneggiamento all'interno di un materiale.



Il monitoraggio dell'emissione acustica (acoustic emission, AE), che consiste nell'ascolto di suoni non percepibili dall'orecchio umano, prodotti da materiali, strutture o macchine in uso o sotto carico, permette di trarre numerose informazioni circa lo stato di salute del componente analizzato.

La tecnica consiste nel posizionare uno o più sensori piezoelettrici sulla superficie esterna dell'oggetto in esame e nell'analizzare i segnali elettrici risultanti mediante sistemi computerizzati che valutano le grandezze caratteristiche dei segnali acustici rilevati.

Tali rumori possono derivare da numerose cause quali l'attrito, la propagazione e crescita del crack, il cambiamento nella struttura del materiale causato ad esempio dalla corrosione.

I principali campi di utilizzo del test non distruttivo AE sono :

- settore industriale, in cui si valutano macchinari e saldature;
- settore petrolchimico, per il controllo di impianti, tubature e cisterne;
- settore civile - strutturale, per l'analisi di ponti, grattacieli, etc;

Tale tecnica ha inoltre molta importanza nell'analisi di strutture composite come fibra di vetro, plastiche rinforzate e materiali aerospaziali avanzati.

I vantaggi della tecnica AE sono :

- un'intera struttura può essere monitorata da più posizioni;

- il componente può essere testato in uso ed in modo continuo;
- possono essere rilevati cambiamenti microscopici nella struttura;
- bassi costi di analisi;
- possibilità di utilizzo in zone inaccessibili o rischiose.

Gli svantaggi sono :

- vengono rilevati solo difetti in stato di avanzamento mentre quelli stabili non vengono rilevati;
- il metodo non si può utilizzare con i materiali che presentano bassa remissività (p. es. acciaio austenitico);
- l'attività acustica dipende dalla temperatura e dal comportamento duttile o fragile del materiale

1.3.4 Ultrasuoni

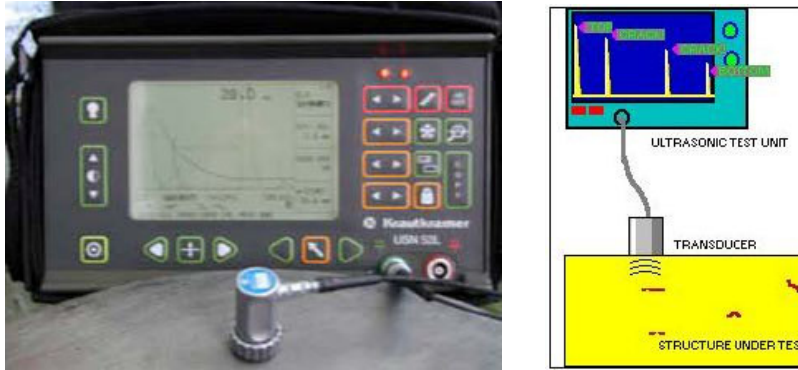
La tecnica ND a ultrasuoni ha assunto negli anni un ruolo fondamentale in campi quali: processi di produzione di ceramiche strutturali, di componenti metallici, di dispositivi elettronici di potenza; la diagnostica medica; il controllo di opere d'arte; la comprensione dei fenomeni fisici.

Comunque, il settore di maggiore applicazione rimane quello petrolchimico, per il controllo di tubature ed impianti.

L'ispezione mediante ultrasuoni 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. La tecnica si basa essenzialmente sul fenomeno della trasmissione di un'onda acustica nel materiale.

Gli ultrasuoni sono onde elastiche vibrazionali con frequenza compresa tra 1 e 10 MHz (per certe applicazioni il campo si può estendere dai 20 KHz fino ad oltre 200 MHz). Attualmente tutti gli strumenti rivelatori d'ultrasuoni si compongono di due parti, unite o distinte: il *generatore* del segnale da inviare al materiale da esaminare ed il *rivelatore*, che riceve, amplifica, filtra e visualizza i segnali che ritornano alla sonda dopo la propagazione. In tal modo è possibile rivelare soltanto gli echi riflessi da eventuali difetti interni o gli echi di fondo (o della parete di confine del pezzo esaminato) più o meno attenuati in funzione dei difetti presenti.

Lo strumento rivelatore d'ultrasuoni filtra i segnali ricevuti e questi possono essere amplificati o depressi a piacere dell'operatore.



rivelatore di ultrasuoni

1.3.4.1 Generazione

Il fascio d'onde ultrasonore, ovvero il segnale, viene generato sfruttando le proprietà piezoelettriche o magnetostrittive di alcuni cristalli di quarzo, ceramiche quali titanio al bario e titanio allo zinco, o plastiche quali difluorite, cioè la loro capacità di contrarsi ed espandersi sotto l'azione d'un campo elettrico o di un campo magnetico alternato.

Le vibrazioni del cristallo producono onde elastiche di frequenza ultrasonora, *purché il campo elettrico (o magnetico) alternato eccitante possieda l'adatta frequenza.*

Un sistema alternativo di produzione ultrasonora, che si adatta ad alcuni tipi di controlli non distruttivi, consiste nell'usare trasduttori elettromagnetici acustici EMAT (electromagnetic acoustic transducer).

Durante questo processo le onde ultrasonore sono prodotte come risultato di un disordine meccanico indotto in un metallo mediante grandi correnti alternate che percorrendo una spira formano un campo magnetico avvolto sulla superficie del metallo.

Gli EMAT sono particolarmente utili per scanning continui e temperature di utilizzo superiori ai 1000°, in contrasto ai trasduttori piezoelettrici che operano efficientemente fin sotto i 450°.

Le onde ultrasonore generate possono essere di tipo trasversale e di tipo longitudinale, si propagano con la stessa frequenza del generatore ed hanno una capacità di penetrazione nel materiale che è inversamente proporzionale alla loro frequenza.

Naturalmente la capacità di penetrazione dipende anche dalle caratteristiche intrinseche del materiale che deve essere attraversato in particolare la principale caratteristica del mezzo che devono attraversare, è l'*impedenza acustica* "Z" definita come il prodotto della sua densità "R" per la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo.

$$Z = \rho \cdot v$$

1.3.4.2 Trasmissione

Il metodo richiede uno stato superficiale che consenta, o non ostacoli eccessivamente il passaggio degli ultrasuoni.

Per esempio una superficie lappata può essere considerata ottimale, mentre la superficie grezza di lavorazione a caldo che presenti scaglie di calamina di rilevante spessore ed anche poco aderenti, può costituire una barriera insormontabile per il fascio d'ultrasuoni. Talvolta non è possibile valutare l'integrità dei semilavorati grezzi operando direttamente sulle superfici del

semilavorato. In tal caso gli esami devono esser eseguiti sui semilavorati totalmente immersi in acqua, per migliorare la propagazione degli ultrasuoni all'interfaccia.

Gli ultrasuoni così generati vengono trasferiti direttamente nel materiale da controllare grazie al contatto, o più propriamente al semplice accostamento del generatore (trasduttore) alla superficie del pezzo, purché esista un mezzo adeguato tra le due interfacce, cioè capace di trasferire il suono senza eccessivo assorbimento (si usano frequentemente sospensioni o soluzioni acquose sature di colle cellulosiche).

Il fascio d'onde ultrasonore si propaga nel materiale da esaminare con la stessa frequenza del generatore e con una velocità che dipende dal materiale attraversato.

Difetti che generano assorbimento e riflessione dell'onda incidente

Poiché il materiale da esaminare possiede sempre un confine, cioè una parete di fondo sulla quale il fascio in ingresso si riflette comunque, è possibile ricavare informazioni sulla posizione del difetto presente nella massa, attraverso il rapporto dei tempi di ritorno dell'eco del segnale di partenza (detto *eco di partenza*) e dell'eco del segnale di fondo (detto *eco di fondo*). Questo è possibile perché la propagazione delle onde ultrasonore avviene sempre a velocità costante in un mezzo omogeneo.

Quando il fascio incontra un ostacolo sarà riflesso, assorbito, deviato o diffratto secondo le leggi comuni a tutti i fenomeni di propagazione delle onde.

Le onde riflesse possiedono la stessa frequenza di quelle incidenti, ma sono sfasate rispetto ad esse, anche in funzione del cammino percorso, cioè della distanza del trasduttore dai vari punti della superficie dell'ostacolo.

Analoga sorte spetta alle onde diffratte.

L'energia assorbita dal difetto colpito dalle onde incidenti fa sì che esso possa vibrare a sua volta emettendo onde elastiche di frequenza tipica della sua risonanza e variamente sfasate.

In definitiva il segnale che ritorna verso il trasduttore è molto complesso, perché è la risultante della sommatoria di molte onde di uguale frequenza, ma sfasate, e di altre onde di frequenza diversa, pure sfasate fra loro.

Tale segnale contiene tutte le informazioni sulle dimensioni, geometria e natura dell'ostacolo incontrato dal fascio d'ultrasuoni incidenti.

Difetti che generano solo assorbimento

E' possibile rivelare la presenza di un difetto interno anche nel caso che questo non generi la riflessione, ma soltanto l'assorbimento del fascio incidente.

Ciò è possibile perché lo strumento visualizza il fondo sia come distanza (tempo per la ricezione dell'eco di fondo), che per assorbimento (attenuazione dell'intensità del segnale di fondo riflesso, per assorbimento da parte della materia attraversata).

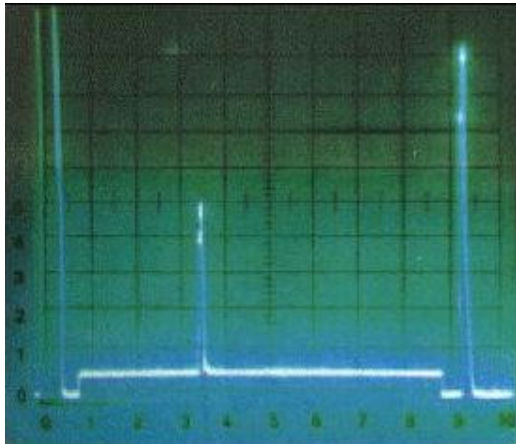
Se l'intensità del fascio riflesso dalla parete di fondo diminuisce bruscamente in una certa posizione significa che qualche ostacolo o discontinuità l'ha parzialmente assorbito.

In questo caso non è possibile individuare la posizione del difetto, ma solamente valutarne la presenza ed il potere assorbente.

1.3.4.3 Ricezione del segnale

Il fenomeno fisico della piezoelettricità o magnetostrizione, che è stato sfruttato per generare l'onda, è reversibile. Ne deriva che lo stesso cristallo capace di emettere ultrasuoni, può generare un segnale elettrico o magnetico, quando venga investito da un fascio d'onde elastiche.

Perciò, quando l'onda riflessa od emessa dall'ostacolo ritorna alla sonda che l'ha generata, darà un segnale elettrico che, opportunamente amplificato e filtrato, potrà essere visualizzato sul quadrante dell'oscilloscopio, di cui sono sempre dotati gli strumenti rivelatori d'ultrasuoni.



In altre parole l'eco di partenza e l'eco di fondo vengono visualizzati sullo schermo dello strumento con dei picchi, la cui distanza risulta proporzionale al tempo che gli ultrasuoni impiegano per percorrere il viaggio di andata e di ritorno dalla sonda alla superficie riflettente presente all'interno del materiale.

Il fascio ultrasonoro in uscita dal trasduttore è caratterizzato dalla sua forma geometrica (dimensioni e campo) mentre il segnale ultrasonoro in ricezione (riflesso o trasmesso) è caratterizzato da due parametri fondamentali:

- ampiezza "a" ovvero il valore di picco dell'impulso (mostrato sullo schermo dello strumento in una rappresentazione detta A-scan)
- tempo di volo "t" ovvero il tempo intercorso tra l'impulso trasmesso e quello ricevuto; sullo schermo dell'apparecchio tale tempo è indicato dalla distanza tra i due impulsi. Il tempo di volo fornisce la misura indiretta del percorso effettuato dall'onda ultrasonora nel mezzo.

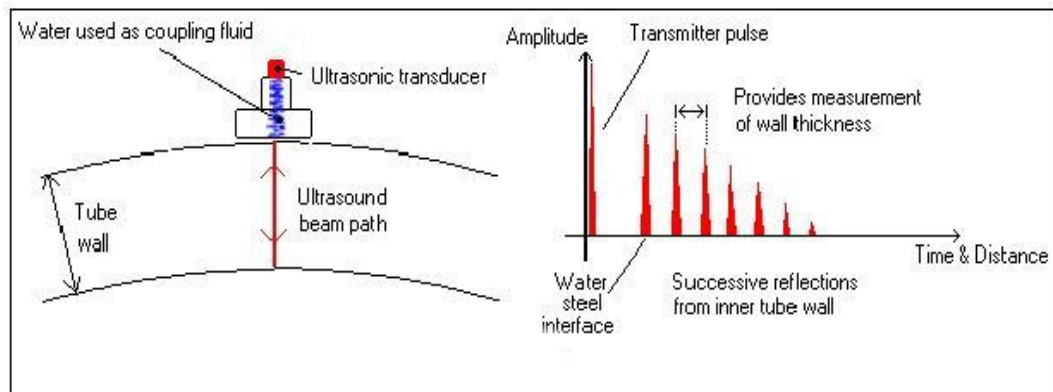
1.3.4.4 Interpretazione dei dati

La localizzazione ed il dimensionamento dei difetti avviene generalmente attraverso un processo di correlazione tra

- le caratteristiche del fascio ultrasonoro
- le caratteristiche fisiche e geometriche del materiale
- i parametri "a" (ampiezza) e "t" (tempo di volo)
- le coordinate della traiettoria di scansione.

I risultati dell'ispezione vengono spesso mostrati in forma di restituzione grafica C-scan (rappresentazione in pianta) e B-scan (rappresentazione in profondità).

La figura mostra ad esempio il principio di misura dello spessore di una parete.

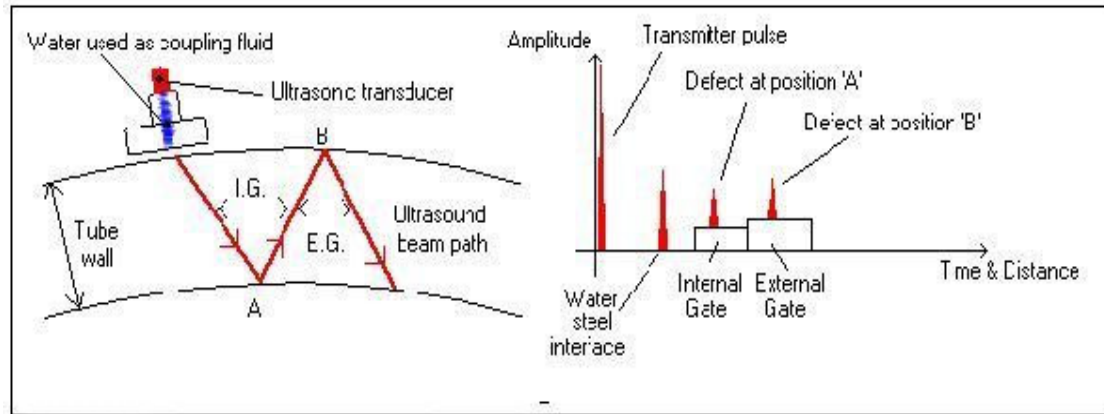


Il primo impulso è generato dalla sorgente, il secondo è quello che viene trasmesso al componente da esaminare dopo che l'onda ha attraversato il mezzo di accoppiamento. I successivi impulsi si trovano alla stessa distanza l'uno dal successivo. Il segnale più volte riflesso attraversa infatti lo stesso percorso.

A questo punto, sfruttando semplicemente la relazione $s = v \cdot t$ si risale allo spessore della parete.

V può essere determinato da apposite tabelle o attraverso una prova su distanza nota.

La figura seguente mostra un test ultrasonico con relativi risultati:



La gated area è l'istante di tempo compreso fra l'impulso trasmettitore iniziale e l'istante in cui un'eco dovrebbe tornare da ogni imperfezione. Da notare è che le differenti posizioni dei gates interni ed esterni sono dovute a differenti tempi di transito per la riflessione delle imperfezioni interne ed esterne. E' possibile valutare approssimativamente la dimensione della discontinuità incontrata dal fascio d'ultrasuoni, confrontando l'intensità dell'eco ricevuto con quello di difetti standard, o con grafici appositamente costruiti (scale AVG).

Nella pratica corrente le PND con ultrasuoni si eseguono tarando lo strumento con adatti campioni standard, cioè cercando gli echi di difetti precostituiti. In tal modo è possibile assegnare ad ogni difetto una *dimensione equivalente*, cioè affermare che le sue dimensioni e forma sono tali da generare un eco simile a quello d'un foro di diametro definito e posizionato alla stessa distanza dal trasduttore. La dimensione equivalente non è direttamente collegabile con quella reale, ma è un parametro approssimativo, attualmente necessario per classificare l'entità dei difetti rivelati.

Altre volte si tara lo strumento direttamente sul pezzo da esaminare, per cogliere l'eco di fondo e la sua scomparsa od attenuazione.

Il controllo con ultrasuoni è reso più efficace e semplice dal grado di simmetria del pezzo da esaminare, ovvero dalla presenza di superfici piane o cilindriche, di piani paralleli o comunque in grado di riflettere efficacemente l'onda di fondo. Si complica invece in presenza di fori, scanalature, filettature, variazioni di sezione o di caratteristiche geometriche complesse. Anche la finitura superficiale gioca un molo importante sull'efficacia del controllo con ultrasuoni.

Gli ultrasuoni rivelano con difficoltà i difetti che giacciono troppo vicino al trasduttore. Tuttavia questa difficoltà, la cui entità non è generalizzabile, dipende soprattutto dal tipo di sonda e può essere aggirata con l'affinamento delle tecniche di controllo e dall'esperienza dell'operatore.

1.3.5 Applicazioni

Ecco alcuni dei principali tipi di componenti che sono usualmente controllati con il metodo ultrasonoro per la ricerca di eventuali difettosità:

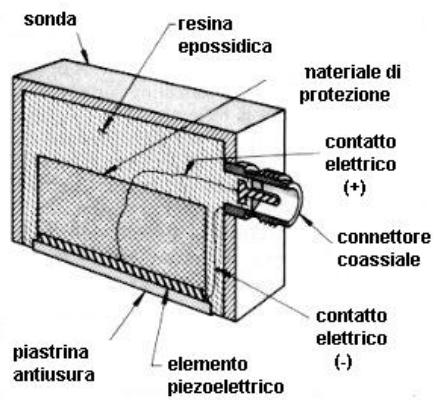
- componenti laminati, rulli, alberi, azionamenti, colonne delle presse

- apparecchiatura di potenza: pezzi fucinati della turbina, rotor del generatore, condutture in pressione, insiemi di parti saldate, recipienti in pressione, componenti di reattori
- componenti di velivoli
- materiali per macchine
- particolari ferroviari
- parti automobilistiche

1.3.6 Sonde per ultrasuoni e mezzi di accoppiamento

La generazione e la rilevazione delle onde ultrasonore è effettuata per mezzo di un elemento trasduttore. Questo elemento è contenuto all'interno della cosiddetta sonda. L'elemento "attivo" nella sonda è il cristallo piezoelettrico.

La piezoelettricità (o pressione elettrica) è una proprietà caratteristica di alcuni cristalli naturali e di alcuni materiali costruiti artificialmente. Come dice il nome stesso, in un cristallo piezoelettrico è in grado di sviluppare una carica elettrica quando sottoposto a deformazione. Al contrario, quando il cristallo viene sottoposto ad un campo elettrico, si deforma. I materiali più comunemente utilizzati per nelle sonde per ultrasuoni sono il quarzo, il solfato di litio, alcuni ceramici polarizzati, tipo il bario titanato, il piombo zirconato titanato, meta-niobato di piombo, ecc.



schema di sonda piana

Le sonde possono avere diverse forme e dimensioni.

Esistono comunque quattro tipi "base" di sonda: piana, angolata, doppia, ad immersione.

CAMPI DI APPLICAZIONE DELLE DIVERSE SONDE

SONDA PIANA

Billette	inclusioni, segregazioni, coni di ritiro
Forgiati	inclusioni, cricche, segregazioni, fiocchi, incollature, coni di ritiro
Rullati, prodotti di laminazione	inclusioni, cricche, strappi, incollature
Getti	scoria, inclusioni, porosità, gocce fredde, strappi, cricche da ritiro
Difetti causati da usura	cricche a fatica, corrosione, erosione, cricche da tensocorrosione

SONDA ANGOLATA

Forgiati	cricche, incollature, ripiegature
Rullati	cricche, strappi, incollature, rotture trasversali
Saldature	inclusioni di scoria, porosità, incollatura, incompleta penetrazione, risucchi, cricche nel materiale d'apporto e nel materiale base
Tubazioni	cricche longitudinali e circonferenziali
Difetti causati da usura	cricche a fatica, cricche da tensocorrosione

SONDA DOPPIA

Piatti e lamiere	misurazione dello spessore, rilevazione del senso di laminazione
Tubazioni	misurazione dello spessore
Difetti causati da usura	corrosione, erosione, cricche da stress-corrosion, assotigliamento

SONDA AD IMMERSIONE

Billette	inclusioni, segregazioni, coni di ritiro
Forgiati	inclusioni, cricche, segregazioni, fiocchi, incollature, coni di ritiro
Rullati, prodotti di laminazione	laminazione, inclusioni, cricche, strappi, incollature
Saldature	inclusioni, porosità, incompleta fusione, incompleta penetrazione, cricche, laminazione del materiale base,
Compositi	porosità, aumento o impoverimento di resina, distacchi/perdite di fibre
Tubazioni	cricche longitudinali e circonferenziali

Per ottenere un buon accoppiamento tra la sonda ed il materiale da esaminare è necessario eliminare l'aria che vi si interpone, cosa che viene ottenuta mediante l'utilizzo di un mezzo di accoppiamento da interporre tra la sonda e la superficie da esaminare.

Il mezzo di accoppiamento deve avere buone caratteristiche di bagnabilità, ed una buona trasparenza agli ultrasuoni. Il mezzo di accoppiamento deve essere scelto in modo da non danneggiare la superficie del componente in esame.

In base all'esigenza tale mezzo può essere scelto tra:

- olio tipo SAE 30

- gel per ultrasuoni
- acqua
- glicerina

E' importante usare lo stesso mezzo di accoppiamento sia per la taratura della macchina che durante il controllo.

1.3.7 Tecniche di controllo

Il controllo ad ultrasuoni per il rilievo delle discontinuità interne ai materiali, viene eseguito fondamentalmente con due tecniche:

- tecnica per trasparenza
- tecnica per riflessione

1.3.7.1 Tecnica per trasparenza

Nella tecnica per trasparenza possono venire impiegati tre metodi:

- trasmissione

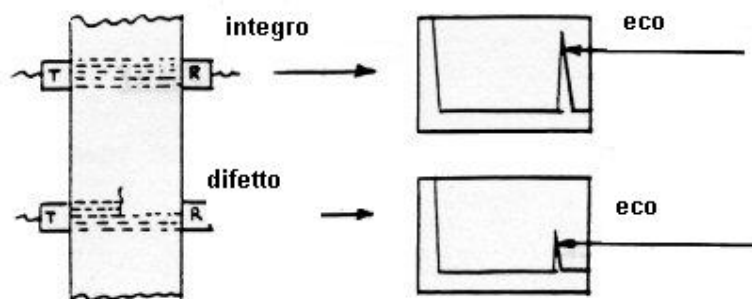
- riflessione

- conduzione

In tutti e tre i metodi l'eccitazione del trasduttore può essere effettuata in modo continuo o ad impulsi

Metodo a trasmissione

Nella tecnica per trasparenza con il metodo a trasmissione vengono impiegati due trasduttori, posizionati uno di fronte all'altro sulle due superfici opposte del pezzo da esaminare: uno dei due trasduttori funge da emettitore, l'altro da ricevitore.



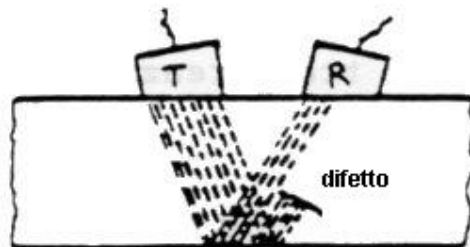
Se il fascio ultrasonoro generato dal primo trasduttore incontra una discontinuità sul suo percorso viene parzialmente riflesso e il fascio trasmesso risulta perciò indebolito; il segnale ricevuto dal secondo trasduttore si presenta quindi ridotto in ampiezza rispetto al caso di assenza di discontinuità.

La riduzione del segnale, rilevata dalla sonda ricevente, rappresenta quindi l'indicazione di discontinuità; dal valore di tale riduzione è possibile risalire al diametro equivalente della discontinuità.

Nella tecnica a trasparenza con il metodo a trasmissione quindi non viene individuata né la profondità né la forma del riflettore.

Metodo a riflessione

Il metodo a riflessione è molto simile al precedente con la differenza che le due sonde sono posizionate sulla stessa superficie del pezzo.



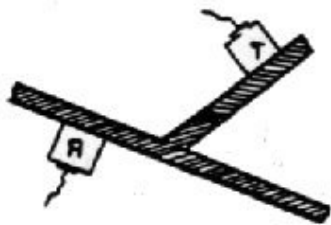
Metodo a conduzione

Si applica a particolari di geometria complessa e di piccolo spessore, dove risulta impossibile determinare il percorso esatto del fascio in quanto esso subisce numerose e imprevedibili riflessioni.

Si posizionano allora le due sonde in maniera arbitraria e la sonda ricevente raccoglie il segnale del campo ultrasonoro diffusosi fino a quel punto.

Questa è una tecnica applicabile solo su serie di particolari uguali in quanto l'esame viene effettuato per confronto tra il segnale ottenuto su un particolare ritenuto sano (pezzo campione) e gli altri.

Qualsiasi variazione del segnale ricevuto (rispetto al segnale del pezzo campione) costituisce la prova che il fascio ha incontrato una discontinuità sul suo percorso.



1.3.7.2 Tecnica per riflessione

Questa tecnica consiste nell'individuazione della presenza di una eco dovuta alla riflessione del fascio su un riflettore, eco che è evidentemente

assente se il pezzo esaminato e' integro.

L'impiego di questa tecnica avviene con due metodi:

- metodo per risonanza in eccitazione continua
- metodo per riflessione classica a impulsi.

Metodo per risonanza ad eccitazione continua

Nella tecnica per riflessione con il metodo a risonanza ad eccitazione continua, si sfruttano le condizioni di risonanza all'interno del pezzo quando il suo spessore corrisponde a metà lunghezza d'onda o a suoi multipli.

Queste condizioni vengono individuate determinando a quale frequenza Fr corrisponde il valore di risonanza con la formula:

$$Fr = \frac{V_l}{2d} \quad (\text{MHz})$$

V_l è la velocità longitudinale degli ultrasuoni nel materiale

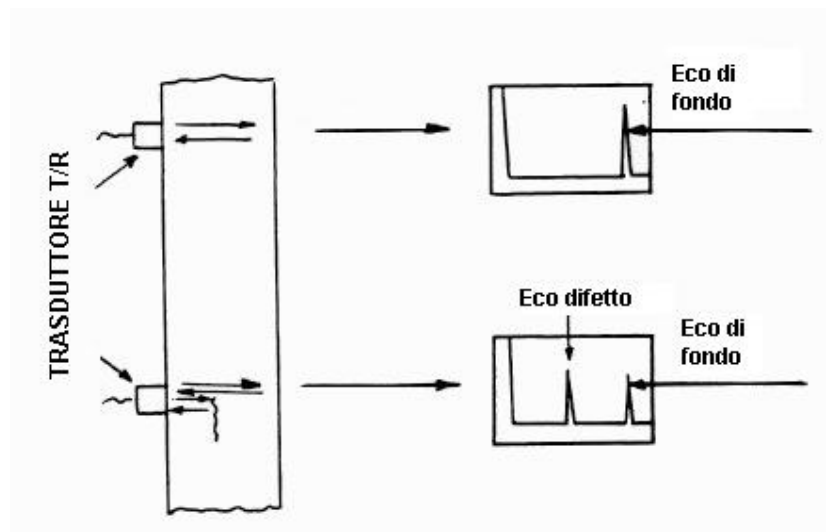
d è lo spessore del materiale

Nel caso il valore di frequenza sia molto diverso da quello del trasduttore occorre utilizzare valori multipli di frequenza, ma occorre fare attenzione poiché, se esiste un difetto ad una certa profondità, si ha risonanza anche quando la semilunghezza d'onda è un sottomultiplo di questa profondità.

Metodo per riflessione classica

Nella tecnica per riflessione classica ad impulsi i segnali captati dalla sonda vengono presentati su uno schermo oscilloscopico.

La rappresentazione in figura rispecchia una delle condizioni più usuali del controllo ultrasonoro effettuato con il metodo a contatto usando una sonda a fascio normale su un pezzo con superfici piane e parallele.



La prima eco rappresenta l'impulso di eccitazione inviato dal trasduttore; la seconda eco corrisponde al ritorno su trasduttore del segnale riflesso dal

fondo. Se nel percorso ultrasonoro all'interno del pezzo vengono incontrate delle piccole discontinuità, le loro riflessioni verranno via via rappresentate sullo schermo con l'apparizione di echi posizionati all'interno dei primi due, con conseguente riduzioni dell'altezza dell'eco di fondo. Nella tecnica per riflessione classica ad impulsi, oltre a considerare la riduzione dell'ampiezza dell'eco di fondo si considera anche l'ampiezza dell'eco delle discontinuità, alla sua posizione sulla base tempi e alla sua forma.

Tali dati forniscono informazioni rispettivamente su diametro equivalente, sulla profondità e sulla forma delle discontinuità

1.3.8 Procedura operativa

Estensione del controllo:

Il controllo deve essere eseguito su tutto il volume del pezzo in modo da non lasciare aree inesplorate.

Nel caso in cui ciò non sia possibile, a causa della configurazione del particolare da esaminare o per altre motivazioni, deve essere segnalato nel rapporto di prova di controllo.

La sonda deve essere spostata sulla superficie di controllo con una sovrapposizione fra una passata e l'altra non inferiore al 50% della larghezza della sonda.

Velocità di scansione:

La velocità di scansione della sonda sul pezzo non deve essere superiore a 150 mm/sec.

Per il controllo di saldature austenitiche e delle fusioni, la velocità di scansione non deve superare i 50mm/sec.

Preparazione della superficie da controllare:

Le superfici interessate dal controllo ad ultrasuoni devono essere sufficientemente lisce in modo tale da permettere una buona scorrevolezza del trasduttore.

Dalla superficie di controllo devono essere rimosse: scorie, spruzzi di saldatura, calamina, polveri, sporcizia, vernice e quanto altro possa compromettere un buon accoppiamento tra sonda e la superficie da esaminare, per tale ragione gli elementi devono essere rimossi utilizzando nel caso anche la spazzolatura.

Procedura nella tecnica per riflessione:

Questa tecnica utilizza il segnale riflesso da qualsiasi interfaccia all'interno del particolare esaminato. Il segnale è caratterizzato dall'ampiezza e dalla posizione lungo l'asse dei tempi che, a sua volta, dipende dalla distanza tra la discontinuità presente nel materiale e la sonda. La posizione della discontinuità viene definita sulla base di tale distanza, dalla direzione di propagazione del suono e dalla posizione della sonda.

Si raccomanda a ciascun operatore di misurare l'ampiezza del segnale del riflettore in rapporto ad una curva di correzione ampiezza distanza (D.A.C.) o ad una serie di curve D.A.C. costruite utilizzando blocchi campione con discontinuità realizzate artificialmente (fori trapanati lateralmente, fori piani, intagli, ecc...) o ad un diagramma di riflessione equivalente, metodo A.V.G.

Taratura dell'apparecchio:

Prima di ogni esame deve essere eseguita la taratura dello strumento con gli stessi trasduttori da utilizzare durante il controllo.

La taratura deve essere poi verificata:

- almeno ogni tre ore di lavoro
- quando si spegne e si riaccende lo strumento
- quando si sostituisce il cavo, la sonda o si cambia il mezzo di accoppiamento
- quando cambia l'operatore
- quando si abbiano dei dubbi sulla corretta funzionalità dell'apparecchiatura

Nel momento in cui durante la verifica dell'apparecchiatura si riscontra uno spostamento degli echi di riferimento nell'asse dei tempi maggiore del 10%, oppure una riduzione di sensibilità del 20%, si deve ricontrollare tutto quanto precedentemente controllato nel corso dell'ultima taratura corretta.

Nel caso in cui, si riscontri un incremento dell'amplificazione degli echi di riferimento superiore al 20%, si deve ricontrollare solo l'ampiezza degli echi di difetto riscontrati e registrati dall'ultima taratura corretta.

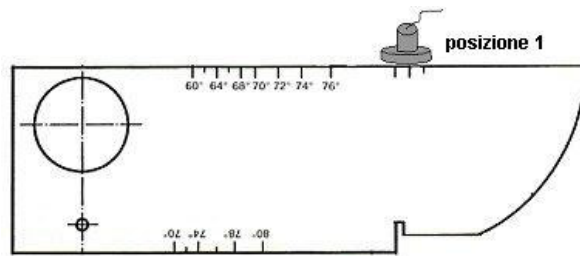
1.3.9 Controllo dei trasduttori

Blocchi usati per il controllo

Per il controllo dei trasduttori, devono essere usati il blocco N°1, avente le caratteristiche secondo la norma EN12223 ed il blocco N°2, avente le caratteristiche secondo la norma EN27963

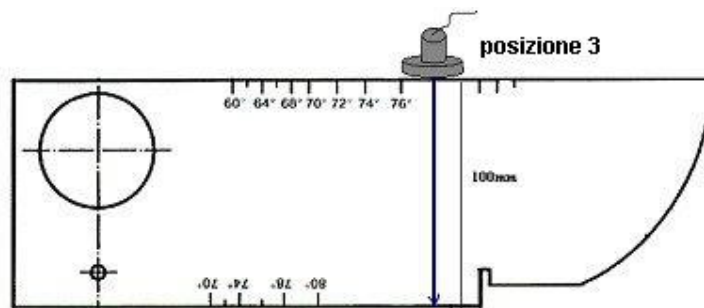
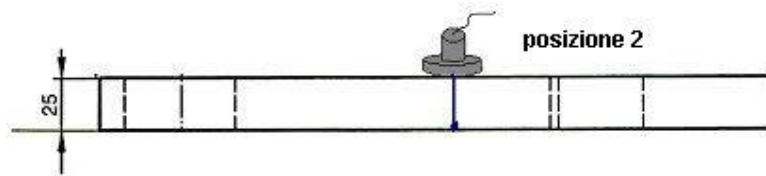
Trasduttori ad onde longitudinali

Per il controllo del potere risolutore si deve posizionare la sonda, come indicato in figura , in posizione 1; se il trasduttore ha un buon potere risolutore, i tre echi di risposta dai tre gradini devono risultare ben distinti sullo schermo.



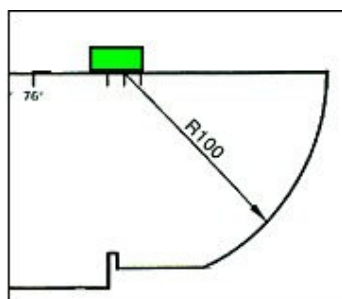
Taratura del campo di misura

La taratura del campo di misura deve essere eseguita posizionando il trasduttore sul blocco, vedi prima figura, nella posizione 2, spessore 25 mm per fondo scala inferiori a 100 mm e in posizione 3, per fondi scala superiori a 100 mm.

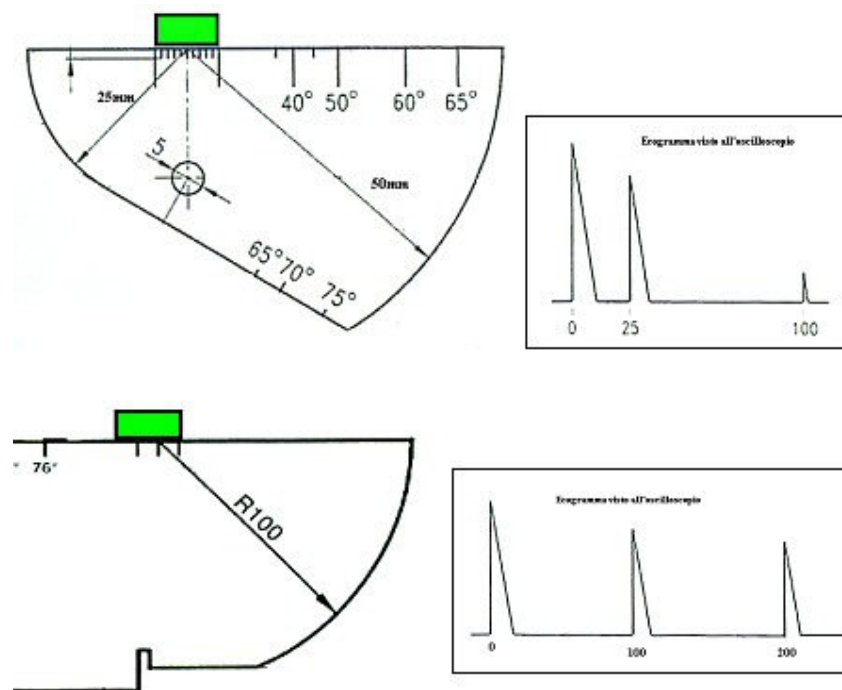


Trasduttori angolati

In questi trasduttori si deve verificare l'esatto punto di uscita del fascio ultrasonoro e l'angolo reale dello stesso come illustrato nella figura 3.



Il punto di uscita deve essere marcato sul trasduttore ed usato come riferimento per il posizionamento dei difetti. L'angolo misurato, non deve scostarsi dall'angolo nominale di più $\pm 1^\circ$. La taratura del campo di misura deve essere eseguito utilizzando il blocco N°2 per fondo scala inferiore ai 200 mm; mentre si deve utilizzare il blocco N°1, per fondo scala superiore ai 200 mm come illustrato in figura.



Taratura della sensibilità:

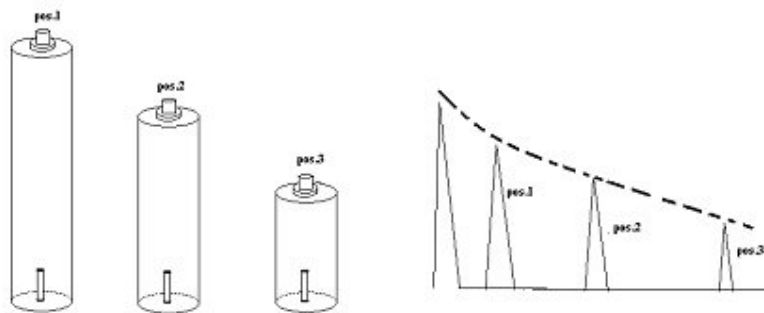
I blocchi campione per la taratura della sensibilità devono essere di dimensioni adeguate ed avere fori ed intagli di riferimento tali da evidenziare i difetti desiderati.

Per la scelta dei blocchi di riferimento si rimanda alle normative vigenti ed alle procedure elaborate dal committente in base alle sollecitazioni a cui il particolare deve essere sottoposto.

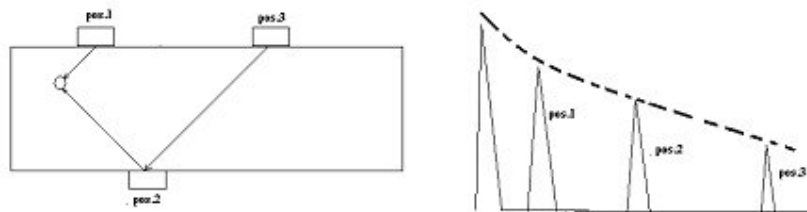
I blocchi di taratura devono avere le seguenti caratteristiche:
Il materiale che lo costituisce deve avere le stesse caratteristiche metallurgiche e meccaniche il più simile al materiale da esaminare.
La superficie del blocco deve avere una rugosità superficiale simili al particolare da esaminare.

Costruzione di una curva D.A.C.:

Le curve D.A.C. devono essere costruite utilizzando dei blocchi campione con difetti di riferimento e dimensione note; verranno ora fatti due esempi di costruzione curve D.A.C. per sonde longitudinali e trasversali:



costruzione curva D.A.C. con blocchi campione a foro piatto per sonde a fascio longitudinale



curva D.A.C. con blocco campione a foro assiale per sonde a fascio trasversale.

Perdite di trasferimento

Prima di eseguire il controllo, si deve verificare che non ci siano perdite di trasferimento della sensibilità tra il blocco usato per la taratura ed il particolare da esaminare.

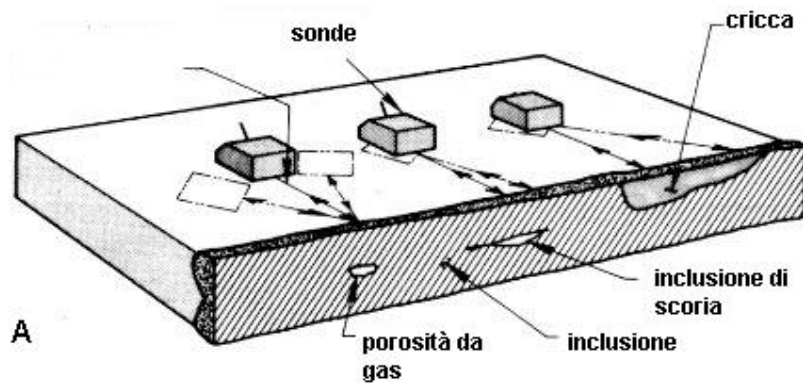
Nel caso in cui si rileva una perdita durante il trasferimento, bisogna aggiungere dei decibel in modo tale da ottenere la stessa sensibilità durante il controllo.

Nel caso in cui i decibel di correzione sono superiori a 6dB, il controllo non può essere eseguito.

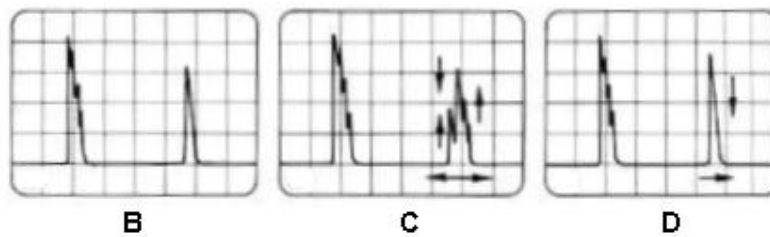
1.3.10 Tecnica di esplorazione

Per una maggiore velocità e sensibilità durante il controllo si devono aggiungere 6dB all'amplificazione corretta; nel momento in cui si rilevano

dei difetti, per la valutazione degli stessi, i 6dB aggiunti in precedenza, devono essere tolti.



Tipici difetti rilevabili con controllo UT



Rilevazione dei difetti

Ecco come possono essere visualizzati alcuni difetti tipici:

B - porosità da gas

C - inclusione di scoria

D - cricca

Controllo del particolare

Il controllo del particolare deve essere effettuato in modo tale da poter individuare tutti i possibili difetti diversamente orientati.

Dimensionamento dei difetti

Per il dimensionamento dei difetti, si deve fare riferimento a fori a fondo piatto o intagli eseguiti su blocchi campione, oppure alle curve AVG costruite per ciascun trasduttore.

1.3.11 Difficoltà nell'applicazione del metodo UT

Pur trattandosi di un metodo di controllo molto efficace, non è certo esente da difficoltà di applicazione.

Caratteristiche del materiale

La possibilità di verificare l'integrità strutturale di un componente dipende fondamentalmente dalle caratteristiche fisico-chimiche e metallurgiche del materiale e dal tipo di discontinuità ricercate. L'opacità dei materiali (denominata anche "non trasparenza") agli

ultrasuoni, è un effetto legato prevalentemente alle caratteristiche morfologiche della struttura del materiale ed è particolarmente evidente nelle saldature di acciaio austenitico, nei materiali fusi, nei materiali compositi e nei materiali ceramici di notevole spessore. In particolare, per i materiali metallici esso dipende dalla grandezza e dall'orientamento dei grani in relazione alla lunghezza d'onda del fascio ultrasonoro.

In linea generale, nelle ispezioni di materiali non molto trasparenti vengono utilizzate basse frequenze allo scopo di lavorare con un rapporto favorevole "lunghezza d'onda"/"dimensione dei grani"; tuttavia ci sono casi in cui tale accorgimento non risulta applicabile come ad esempio quando si debbano rilevare difetti molto piccoli. In altri casi l'opacità locale o generale del materiale in esame può deformare il fascio ultrasonoro e disperdere la sua energia iniziale.

Zona morta

Il problema del rilevamento di un difetto è legato anche all'influenza dell'impulso e del fascio ultrasonoro; in questo caso particolare importanza assumono le caratteristiche dell'apparecchiatura utilizzata (es. durata dell'impulso di trasmissione) e quelle del trasduttore (es. caratteristiche generali del fascio). La corretta interpretazione dell'eco di un difetto richiede una sufficiente separazione, sulla base dei tempi dello schermo, tra l'impulso dell'onda riflessa e quello dell'onda trasmessa, o comunque tra l'eco di prima interfaccia e l'eco proveniente da una discontinuità. Poiché la durata dell'impulso emesso dalla sonda non può essere inferiore ad un certo valore minimo, ne consegue che utilizzando un trasduttore di comune applicazione (normale o angolato) non è possibile rilevare un difetto la cui posizione sia localizzata in prossimità della superficie del componente. In

altre parole esiste una "zona morta" più o meno estesa, in cui i due impulsi risultano sovrapposti.

Geometria e rugosità del particolare da controllare. Una delle maggiori difficoltà di applicazione di questo metodo di analisi non distruttiva deriva da particolari geometrie del componente in esame che non risultano accessibili all'ispezione ultrasonora. Basti pensare ad esempio alla difficoltà di eseguire il controllo di gomiti o valvole su impianti realizzati senza prevedere sufficienti spazi per la manovra delle sonde; molte volte però tali difficoltà sono determinate dalle dimensioni e dalla natura del materiale, nonché dalla complessità costruttiva del componente. Anche l'eccessiva rugosità della superficie di scansione nelle ispezioni a contatto o casi in cui non è possibile utilizzare dei mezzi di accoppiamento perché alterano il materiale in esame, costituisce una seria limitazione all'applicazione del metodo ultrasonoro.

Qualifica dell'operatore

L'interpretazione delle indicazioni fornite da un esame ultrasonoro necessita di operatori altamente qualificati e, allo stesso tempo, di notevole esperienza. Infatti, la sola qualificazione del personale, soprattutto nel caso di controllo di particolari complessi o di sicurezza, non è sufficiente a garantire la corretta interpretazione dei segnali rilevati sull'oscilloscopio: l'esperienza del tecnico è fondamentale.

1.3.12 Vantaggi e svantaggi

I principali vantaggi forniti dal controllo ultrasuoni rispetto agli altri metodi di controllo non distruttivo riguardano:

- ✚ maggior potere di penetrazione nel mezzo, cosa che consente di rilevare anche discontinuità che si trovano all'interno del materiale.
- ✚ Il controllo del materiale può essere fatto anche a diversi metri di profondità, per esempio nel controllo assiale di alberi d'acciaio molto lunghi o in pezzi fucinati;
- ✚ elevata sensibilità che permette di rilevare discontinuità molto piccole
- ✚ miglior precisione nella determinazione della posizione dei difetti interni, nella valutazione della loro forma ed orientamento
- ✚ è sufficiente che una sola superficie del particolare sia accessibile
- ✚ è un controllo elettronico che fornisce immediatamente il rilievo dei difetti. Questo rende il metodo adatto all'automazione, al controllo rapido, al controllo in linea
- ✚ consente il controllo volumetrico del pezzo dalla superficie superiore a quella inferiore
- ✚ il metodo non presenta pericoli di radiazioni e non ha alcun effetto secondario sul personale e su altre apparecchiature poste nelle vicinanze
- ✚ è facilmente trasportabile

Gli svantaggi del controllo ultrasonoro includono:

- ✚ le operazioni richiedono grande attenzione ed esperienza del personale
- ✚ la definizione delle procedure di controllo richiede competenze tecniche
- ✚ particolari con superficie con elevata rugosità o molto piccoli o sottili o non omogenei vengono controllati con grande difficoltà

- ✚ discontinuità presenti nello strato immediatamente al di sotto della superficie possono sfuggire al controllo
- ✚ occorre impiegare mezzi d'accoppiamento per facilitare la trasmissione degli ultrasuoni dal trasduttore al materiale da controllare
- ✚ sono richiesti dei campioni di riferimento, tanto per la calibrazione dell'apparecchiatura che per la caratterizzazione dei difetti

1.3.13 Prospettive future

Gli sforzi della ricerca nel settore dei CnD industriali con UT sono attualmente tesi alla demodulazione dei segnali di ritorno attraverso l'applicazione delle trasformate di Fourier. Ciò permetterebbe non solo d'individuare la posizione e di valutare la dimensione equivalente dei difetti, ma di vederne realmente la forma, diagnosticandone la natura, come già accade nell'ecografia in campo medico, che consente di vedere sul monitor la forma e la posizione del bimbo nel grembo materno. La ricerca è volta anche all'integrazione dei risultati dell'applicazione del metodo UT con altre informazioni provenienti dall'analisi del medesimo componente fornite dall'applicazione di altre tecniche non distruttive.

1.3.14 Norme di riferimento per controlli con ultrasuoni

UNI EN 583-1:2004

Prove non distruttive - Esame ad ultrasuoni - Parte 1: Principi generali

UNI EN 583-2:2004

Prove non distruttive - Esami ad ultrasuoni - Parte 2: Regolazione della sensibilità e dell'intervallo di misurazione della base dei tempi

UNI EN 583-3:1998

Prove non distruttive - Esame ad ultrasuoni - Tecnica per trasmissione

UNI EN 583-4:2004

Prove non distruttive - Esame ad ultrasuoni - Parte 4: Esame delle discontinuità perpendicolari alla superficie

UNI EN 583-5:2004

Prove non distruttive - Esame ad ultrasuoni - Parte 5: Caratterizzazione e dimensionamento delle discontinuità

UNI EN 12223:2001

Prove non distruttive - Esame ad ultrasuoni - Specifica per blocco di taratura N° 1.

UNI EN 27963:1994

Saldature in acciaio. Blocco di riferimento N° 2 per il controllo mediante ultrasuoni delle saldature.

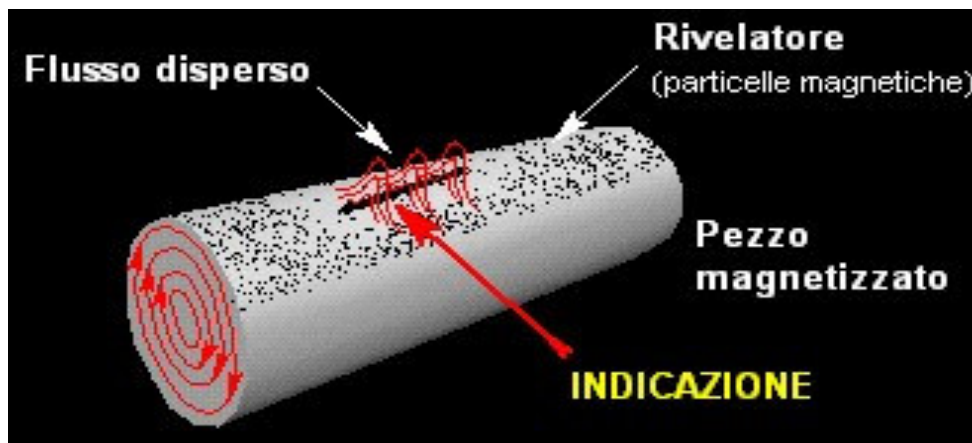
UNI EN 473:2001

Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive - Principi generali.

CAPITOLO II

2.1 Magnetoscopia

La tecnica si basa sul principio di creare un campo magnetico all'interno del pezzo che, in presenza di cricche superficiali, presenta un addensamento delle linee di flusso; tale addensamento determina l'insorgere di una forza attrattiva su particelle magnetiche cosparse sul pezzo, la cui distribuzione è quindi strettamente collegata alla presenza delle cricche perpendicolari alle linee di flusso.



I rilevatori si distinguono in polveri per controllo:

- ✚ a secco, caso tipico degli impianti fissi. Sulla superficie perfettamente pulita, sgrassata ed asciutta viene soffiata la polvere.
- ✚ ad umido, tipico dei controlli eseguiti con gioghi od elettrodi. È così chiamata poiché viene utilizzata una sospensione di polvere magnetica nera oppure fluorescente, in acqua o petrolio.

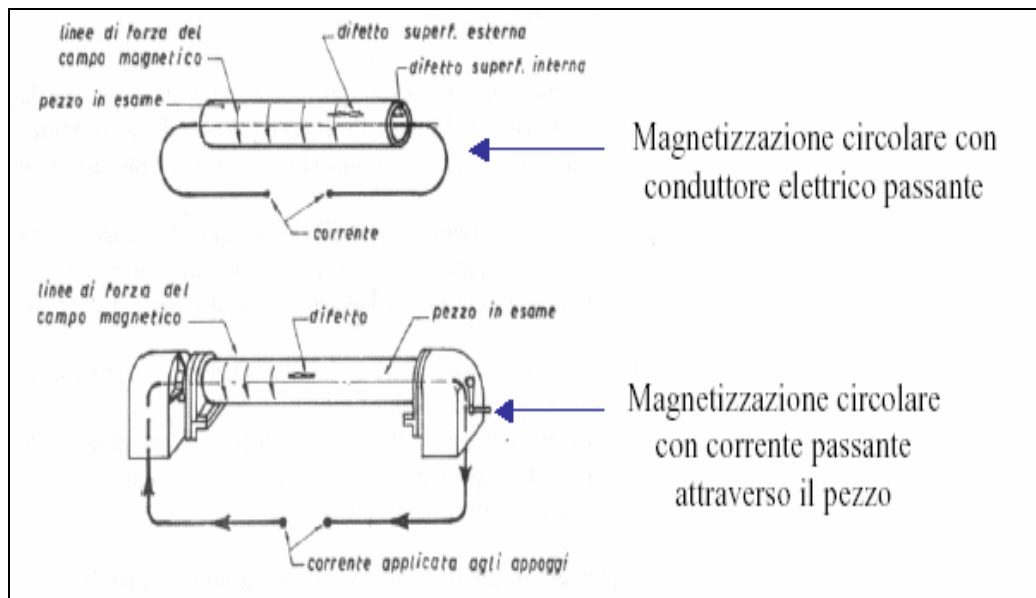
La tecnica del *controllo ad umido* viene applicata per le rilevazioni di difetti superficiali molto piccoli o su superfici lisce, mentre il *controllo a*

secco viene usato su superfici non lavorate e dove è richiesta una minore sensibilità.

2.1.1 Tecniche di magnetizzazione

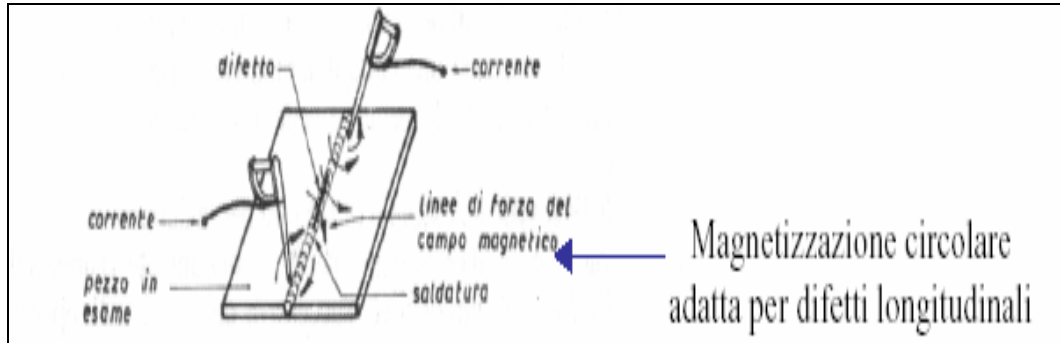
Se poniamo in relazione il comportamento del campo magnetico con le eventuali discontinuità presenti nel materiale in esame, risulta possibile operare una suddivisione difettologica che costituisce la base di qualsiasi criterio di scelta di un'appropriata metodologia di controllo. Infatti, in funzione della loro posizione, le discontinuità vengono suddivise come esterne (aperte in superficie e che determinano una variazione geometrica del profilo iniziale del componente in esame (es. cricche)), sottopelle (fino a 1,5-2 mm di profondità per varie cause di lavorazione o di esercizio) ed in profondità (oltre i 2 mm). A seconda del tipo di discontinuità da evidenziare e delle caratteristiche fisico-chimiche e geometriche del componente, la magnetizzazione del materiale in esame può essere effettuata impiegando differenti tecniche ed utilizzando apparecchiature scelte di volta in volta in funzione della specificità del caso. Tuttavia si distinguono due tipi fondamentali di magnetizzazione, LONGITUDINALE e CIRCOLARE, che possono venire usati singolarmente, alternativamente o combinati opportunamente tra loro. Il campo magnetico può essere prodotto invece da un magnete permanente, da elettromagneti o facendo attraversare il componente da corrente elettrica che potrà essere continua o alternata a seconda del tipo di discontinuità da evidenziare. La magnetizzazione con *corrente magnetizzante alternata* fornisce la rilevazione dei difetti superficiali, mentre la magnetizzazione con *corrente magnetizzante continua* quelli subsuperficiali.

Nella **MAGNETIZZAZIONE CIRCOLARE** si può considerare il componente come conduttore elettrico, e quindi far passare la corrente magnetizzante direttamente attraverso di esso: si viene così a creare intorno al componente stesso un campo magnetico circolare, in cui le linee di forza risultano perpendicolari alla direzione della corrente. Per generare un campo magnetico circolare, si possono individuare tre tecniche fondamentali e precisamente: magnetizzazione **DI TESTA**, **A CONDUTTORE CENTRALE** e **CON PUNTALI**.

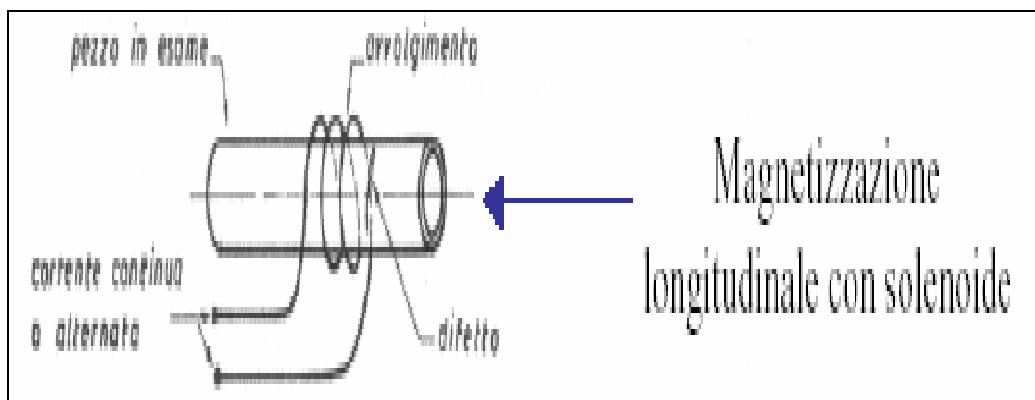


Per quanto concerne la tecnica con **MAGNETIZZAZIONE DI TESTA**, il componente viene serrato meccanicamente tra due elettrodi, ed all'interno di esso viene fatto circolare corrente elettrica di un determinato valore, a cui è proporzionale il campo magnetico che si crea sulla superficie esterna. Nella tecnica di **MAGNETIZZAZIONE A CONDUTTORE CENTRALE**, viene invece utilizzata una barra di rame attraversata da corrente elettrica e

il campo magnetico creato intorno alla barra di rame investirà il componente stesso dall'interno verso l'esterno.



Nella tecnica di MAGNETIZZAZIONE CON PUNTALI, vengono utilizzati elettrodi di rame: posizionando i puntali a contatto del componente in esame e facendolo attraversare da corrente elettrica, sulla superficie da ispezionare vengono a crearsi dei campi magnetici circolari che evidenziano eventuali discontinuità. Questa tecnica risulta particolarmente utile qualora debbano essere ispezionate zone circoscritte di componenti aventi notevoli dimensioni.



Nella MAGNETIZZAZIONE LONGITUDINALE, il componente in esame viene invece magnetizzato posizionandolo in un campo magnetico già

esistente, creato ad esempio da una BOBINA percorsa da corrente elettrica alternata. I campi circolari intorno alle spire della bobina generano un campo magnetico longitudinale al suo interno. La rivelazione dei difetti è migliore quando sono orientati in senso ortogonale alle linee di flusso del campo magnetico. Quindi affinché i difetti siano intercettati dalle linee di forza del campo magnetico indotto, il pezzo in esame deve essere magnetizzato almeno in due direzioni fra loro ortogonali.

2.1.2 Circuiti magnetici

La soluzione del problema generale della magnetostatica, in presenza di materiali ferromagnetici e correnti libere, risulta particolarmente complessa. Fortunatamente, in molte applicazioni, è possibile condurre lo studio facendo riferimento a parametri globali, analoghi a quelli che, nel caso del campo di corrente stazionario (tensioni, correnti, resistenze, ecc.), consentono una notevole semplificazione del modello e una valutazione più immediata delle grandezze di interesse.

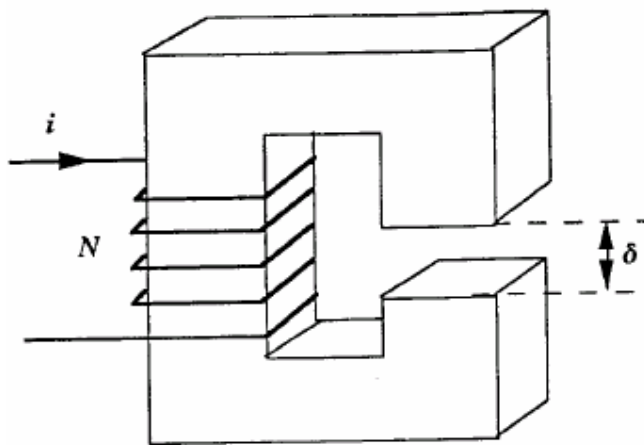


Figura 3 Mezzo a permeabilità infinita, costituito da una struttura toroidale interrotta in corrispondenza di un traferro di spessore δ . N = numero di spire e i = corrente elettrica.

A tal proposito, esaminiamo una struttura del tipo mostrato in figura 3, nella quale si suppone che il materiale ferromagnetico sia caratterizzato da una permeabilità magnetica infinita (che nel seguito per brevità chiameremo “ferro”) [De Menna, 1998]. In virtù di questa ipotesi il campo magnetico nel ferro è nullo e le linee vettoriali di H avranno un andamento qualitativo del tipo riportato in figura 4. Il traferro di altezza δ invece è sede di un campo magnetico dovuto alla corrente i che interessa l'avvolgimento di N spire.

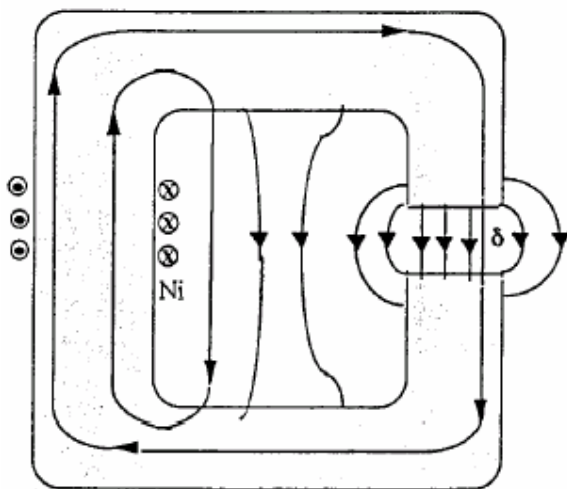


Figura 4 Andamento delle linee vettoriali di H nella struttura di figura 2.1

In queste ipotesi è possibile dimostrare che, se il traferro ha dimensioni trascurabili rispetto allo sviluppo complessivo della struttura in ferro, il campo nell'aria al di fuori del traferro è trascurabile rispetto al valore che esso assume nel traferro. Questa considerazione induce allora a trattare i sistemi del tipo in esame introducendo un'ulteriore approssimazione che consiste nel trascurare del tutto il campo al di fuori del traferro. Ci si riconduce, cioè, ad una situazione nella quale il campo è completamente incanalato nel ferro, il quale costituisce pertanto una sorta di circuito magnetico per le linee vettoriali del campo. Si osservi, in particolare, che mentre $\mathbf{H}$ è nullo, $\mathbf{B}$ si mantiene limitato nel ferro.

Ciò premesso, è possibile dimostrare utilizzando anche la legge di Ampere che si perviene alla seguente relazione:

$$Ni = R\Phi$$

La grandezza $R = \delta/\mu_0 S$ prende il nome di *riluttanza* del tratto di circuito magnetico considerato, mentre Φ rappresenta il flusso del campo $\mathbf{B}$

esistente nella generica sezione del ferro; S infine è l'area della sezione retta del ferro nelle immediate vicinanze del traferro.

L'equazione $Ni = R\Phi$ viene spesso chiamata legge di Ohm per i circuiti magnetici, infatti se si sostituiscono in essa le forze magnetomotrici Ni con le f.e.m., i flussi Φ con le correnti e le riluttanze R con le resistenze si ottiene proprio la legge di Ohm.

2.1.3 Magnetizzazione ed isteresi

Il testing non distruttivo delle proprietà magnetiche è confinato principalmente ai materiali ferromagnetici e ferrimagnetici, che possono avere valori della permeabilità magnetica relativa μ_r che vanno dall'unità a diverse migliaia, in dipendenza della natura delle loro proprietà e della storia precedente come pure del valore H dell'intensità del campo magnetico applicato.

Il ferromagnetismo esiste in un numero di metalli che comprendono il ferro, alcuni tipi di acciaio, nichel e cobalto. Un fenomeno analogo si ha in certi materiali non metallici noti come ferriti, i quali sono detti essere ferrimagnetici. Questi materiali possono essere magnetizzati e sono caratterizzati da variazioni della permeabilità magnetica μ con l'intensità del campo magnetico, generalmente in maniera non lineare e danno origine all'isteresi.

Consideriamo una sbarra non magnetizzata di materiale ferromagnetico [Blitz, 1997] posta all'interno e diretta lungo l'asse di un solenoide connesso ad una sorgente variabile in continua così da produrre variazioni di H , quindi dell'intensità B della densità del flusso magnetico. Ricordiamo che la relazione che lega B ed H è la seguente:

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

dove μ_0 è la permeabilità magnetica dello spazio libero, cioè $4\pi \cdot 10^{-7}$ H m-1.

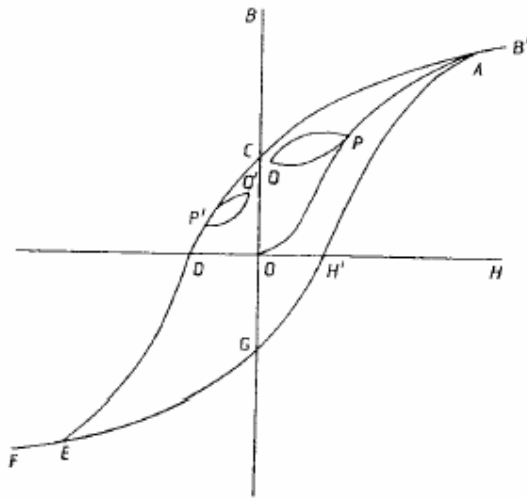


Figura 5 Metalli ferromagnetici: curve tipiche di magnetizzazione ed isteresi

Osservando la figura 5 è possibile vedere quale è l'andamento di B in funzione di H in una parte selezionata del campione circondata da una bobina a rilevazione del flusso. In qualsiasi punto della curva, il rapporto B/H è uguale alla permeabilità magnetica come definito nell'equazione precedente. La curva iniziale OAB' è detta curva di magnetizzazione e mostra che ad un incremento di H dal valore zero corrisponde un incremento di B ; inoltre il valore di μ_d nell'origine O , dove la curva approssima una retta molto piccola, è definito come la *permeabilità iniziale*

μ_i . Al di sopra del punto A , di coordinate (H_A, B_A) , la sbarra ferromagnetica diventa completamente magnetizzata e si ha la saturazione, come indicato dalla linea retta AB' lungo la quale μ_d è pari ad uno. L'uso della saturazione si è dimostrato vantaggioso con il testing con correnti parassite di materiali ferromagnetici a causa delle relazioni lineari risultanti tra la densità di corrente parassita, B ed H .

Appena H viene diminuito, la curva torna indietro lungo la sua traiettoria originaria ma solo fino al punto A , a partire dal quale la curva segue la traiettoria AC , fino ad arrivare nel punto C in corrispondenza del quale la curva interseca l'asse B . Nel punto C , H è uguale a zero e B è uguale a B_r , che è chiamato *retentività*, ed il suo valore è caratteristico del materiale. Invertendo la corrente, e quindi la direzione di H , la curva continua fino ad intersecare l'asse H nel punto D , dove B è zero ed H è pari ad H_c , che è detto *coercività* ed il cui valore è ancora caratteristico del materiale della sbarra. Proseguendo, al di là del punto E di coordinate $(-H_A, -B_A)$, si ha la saturazione (tratto EF). Il valore di H è poi riportato a zero (punto G) e, invertendo di nuovo la sua direzione, esso viene incrementato fino ad intersecare l'asse H nel punto H' e proseguendo, fino a che si abbia ancora la saturazione (punto A). In questo modo otteniamo il cappio d'isteresi $ACDEGH'A$. L'area racchiusa dal cappio d'isteresi rappresenta la perdita di energia per ciclo per volume unitario della sbarra; questa energia viene dissipata in calore.

Un ciclo d'isteresi può anche essere ottenuto facendo passare una corrente alternata di opportuna intensità attraverso il solenoide.

L'isteresi magnetica inoltre può essere ottenuta senza la necessità di raggiungere il livello di saturazione. Per esempio, un metodo comune di smagnetizzare un oggetto magnetizzato è quello di sottoporlo ad un campo magnetico che varia in maniera sinusoidale e avente un'ampiezza che viene

gradualmente diminuita a zero; le curve risultanti allora presentano un'area che si riduce progressivamente. Questo è normalmente fatto collocando l'oggetto nelle vicinanze di una bobina che trasporta una corrente alternata sufficientemente elevata che fornisce il valore di saturazione di H , e allontanando l'oggetto lentamente dalla bobina per una distanza che dipende dal valore di corrente in essa.

Quando si presenta isteresi magnetica in un metallo soggetto ad un campo alternato, sono indotte in esso correnti parassite; come risultato, si ha un'ulteriore perdita di energia accompagnata da un corrispondente aumento dell'area del cappio. Partendo da un certo punto P (o P') sulla curva, può essere tracciato un cappio d'isteresi più piccolo con variazioni di B ed H uguali a δB e a δH , rispettivamente. Il gradiente medio di questo cappio, cioè il gradiente della linea PQ (o $P'Q'$), rappresenta la *permeabilità incrementale* μ_{inc} che dipende dalle proprietà materiali e dalla storia precedente del materiale. Quando P giace nell'origine ed i valori di δB e δH sono piccoli, cioè il cappio d'isteresi più piccolo si estende sopra la parte lineare della curva di magnetizzazione, la permeabilità incrementale viene chiamata la *permeabilità recoil* μ_{rec} . Essa è quel valore di μ che è rilevante nel testing con correnti parassite di bassa intensità in cui la linearità delle variabili, corrente, campo, etc., è essenziale per testare accuratamente metalli ferromagnetici non saturati.

2.1.4 Metodi di eccitazione del campo magnetico

Il campo magnetico può essere generato attraverso uno dei seguenti metodi:

- *metodo del giogo magnetico*
- *metodo del flusso di corrente*

- *metodo d'induzione magnetica*

Prima di analizzare i vari metodi facciamo alcune considerazioni teoriche sul campo magnetico. La scelta dell'intensità del campo magnetico dipende dal valore della riluttanza magnetica, che è regolata dalla dimensione e dalla permeabilità magnetica dell'oggetto che deve essere testato e di qualsiasi pezzo di metallo utilizzato per completare un circuito magnetico o per mantenere parallele le linee di flusso nella regione di interesse .

Un campo troppo elevato, per esempio, può provocare saturazione e la permeabilità magnetica viene conseguentemente ridotta ad un valore basso inaccettabile, il che comporta una riduzione della sensibilità di rilevazione.

La direzione del campo magnetico applicato invece dovrebbe formare un angolo sufficientemente grande con qualsiasi difetto o con altre discontinuità della permeabilità magnetica così da fornire la massima sensibilità di rivelazione. Tutto ciò può essere ottenuto effettuando due test successivi; nel secondo test il campo magnetico dovrebbe formare un angolo di 90° con quello del primo test, in modo da assicurare che una considerevole componente del campo formi un angolo retto con qualsiasi discontinuità. La struttura dell'oggetto da testare può qualche volta rendere difficile ottenere un'adequata componente del campo in tutte le sue parti ed allora può essere necessario applicare tre campi in direzioni prescelte.

Con una moderna apparecchiatura, possono essere effettuati test multipli contemporaneamente utilizzando due differenti eccitazioni in alternata alla stessa frequenza oppure una combinazione di eccitazioni in alternata e in continua. E' possibile dimostrare [Deutsch and Vogt, 1982], per esempio, che con due eccitazioni simultanee in alternata che differiscono di 90° in fase, il vettore campo risultante è un'ellisse che ruota alla stessa frequenza della corrente, così che una volta per ciclo il suo asse maggiore giace perpendicolarmente a qualsiasi fessura presente.

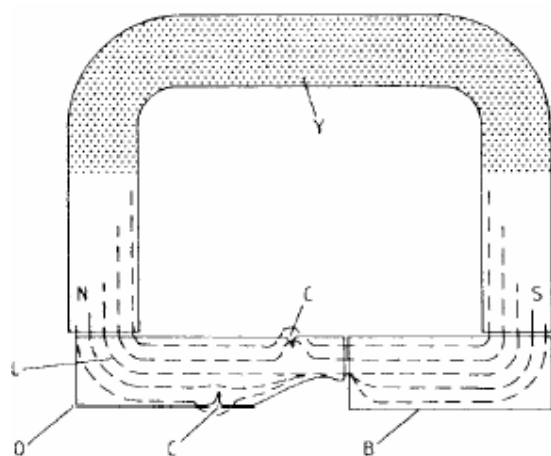


Figura 6 Metodo del giogo magnetico. Giogo con magnetico permanente a forma di cavallo (Y) per il testing di un oggetto (O) contenente una fessura (C) e che utilizza un blocco di acciaio dolce (B) per completare il circuito magnetico delle linee di flusso (L).

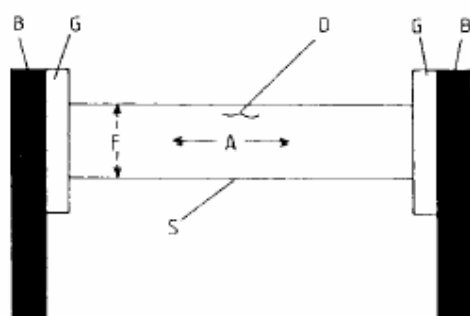


Figura 7 Metodo del flusso di corrente per testare una sbarra di acciaio (S): A = direzione della corrente, B = blocco di rame, D = difetto, F = direzione del flusso, G = velo di rame.

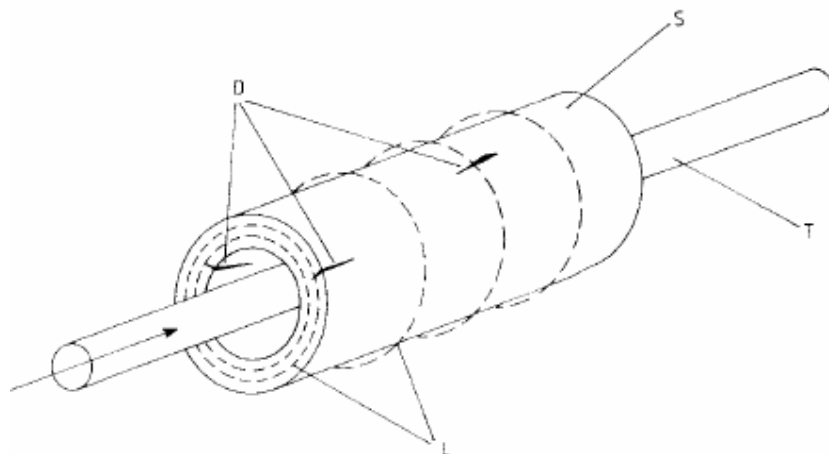


Figura 8 metodo d'induzione magnetica. Sbarra penetrante (*T*) utilizzata per testare un tubo con diametro piccolo: *D* = difetto, *L* = linee di flusso, *S* = tubo.

2.1.5 Analisi d'impedenza per correnti parassite

Con il metodo delle correnti parassite, la corrente che passa attraverso la bobina genera onde elettromagnetiche in un conduttore elettrico molto vicino. Il campo magnetico associato $\mathbf{H}$ induce un flusso di correnti elettriche - le correnti parassite appunto - che seguono traiettorie circolari nei piani perpendicolari alla direzione di $\mathbf{H}$. Come risultato si verificano variazioni dell'impedenza della bobina, il che può essere relazionato al tipo di bobina, alla dimensione, forma e posizione dell'oggetto da testare e ai valori della sua permeabilità magnetica μ e conducibilità elettrica σ . L'impedenza della bobina è anche modificata dalle variazioni localizzate di μ , σ e della geometria dell'oggetto sotto test come risultato della presenza di qualche difetto.

L'analisi d'impedenza per correnti parassite indotte dalle bobine ad accerchiamento che circondano conduttori cilindrici fu introdotta da Forster [Forster, 1986]. L'analisi è semplificata considerando una bobina a solenoide con nucleo ad aria infinitamente lunga e raggio efficace r_0 che circonda e sia coassiale con una asta cilindrica infinitamente lunga che conduce elettricamente e avente un raggio b , dimensioni uniformi e una struttura omogenea, così che le direzioni dei campi magnetici e delle densità di flusso siano coassiali con la bobina. Se supponiamo che la bobina sia attraversata da una corrente alternata che varia in maniera sinusoidale con il tempo a frequenza ω ed indichiamo con $\mathbf{Z} = R + j\omega L$ l'impedenza della bobina in presenza dell'asta e con $\mathbf{Z}_0 = j\omega L_0$ l'impedenza della bobina in assenza dell'asta, il rapporto $\mathbf{Z}/\mathbf{Z}_0 = \omega L/\omega L_0 - jR/\omega L_0$ è detto *impedenza normalizzata*.

E' possibile dimostrare che le componenti reali ed immaginarie dell'impedenza normalizzata assumono in questo caso la seguente espressione:

$$\omega L/\omega L_0 = \eta \mu_R + 1 - \eta f_n$$

$$R/\omega L_0 = \eta \mu_I$$

dove η è detto *fill-factor* ed è definito come il rapporto tra l'area della sezione trasversale dell'asta (πb^2) e l'area della sezione trasversale efficace della bobina (πr_0^2):

$$\eta = \pi b^2 / \pi r_0^2 = (b/r_0)^2$$

μ_R e μ_I sono rispettivamente la parte reale e il coefficiente della parte immaginaria di quella che Forster chiamò la *permeabilità relativa efficace* μ , definita come: $\mu = B/B_0$, dove $B_0 = \mu_0 H$ è la densità del flusso magnetico risultante all'interno della bobina in assenza dell'asta e B è la

densità media del flusso magnetico nella sezione trasversale dell'asta, che si può esprimere nel seguente modo: $B = (2\mu_r B_0 / kb) J_1(kb) / J_0(kb)$, dove J_1 e J_0 sono rispettivamente le funzioni di Bessel di primo ordine e di ordine zero e k è la costante di propagazione.

Le componenti di μ possono essere derivate dalle funzioni di Bessel oppure ottenute direttamente dalle tabelle calcolate da Forster [Forster, 1986]. Tuttavia, l'analisi può essere effettuata numericamente utilizzando un programma in BASIC abbastanza piccolo e relativamente semplice [Blitz, 1997]. La tabella 1 elenca alcuni valori delle componenti di μ calcolate utilizzando questo programma per diverse *frequenze normalizzate* f_0 , dove:

$$f_0 = \omega \mu_r \mu_0 \sigma b^2$$

In questo caso μ_r è uguale ad uno

Tabella 1 Variazioni della componenti reali μ_r ed immaginarie μ_I della permeabilità relativa efficace con la frequenza normalizzata f_0 .

f_0	$\overline{\mu_R}$	$\overline{\mu_I}$
0	1.000	0
1	0.9798	0.1215
2	0.9255	0.2244
4	0.7738	0.3449
6	0.6361	0.3770
8	0.5365	0.3693
10	0.4678	0.3494
12	0.4194	0.3281
15	0.3697	0.3001
20	0.3178	0.2656
25	0.2841	0.2416
30	0.2593	0.2237
40	0.2245	0.1979
50	0.2006	0.1795
60	0.1830	0.1655
70	0.1694	0.1545
80	0.1584	0.1454
90	0.1493	0.1378
100	0.1416	0.1312
125	0.1264	0.1186
150	0.1154	0.1089
175	0.1069	0.1012
200	0.1000	0.0950
250	0.0894	0.0855

Un'importante caratteristica dell'analisi d'impedenza di Forster è l'uso di normalizzazioni nel valutare le componenti dell'impedenza della bobina, il raggio o il diametro (fill-factor) e la frequenza in forma adimensionale. Forster definì anche una *frequenza limite* f_g , tale che $f_0 = f / f_g$, dove f è la frequenza di funzionamento:

$$= 2 / \pi \mu_r \mu_0 \sigma b^2$$

Il grande vantaggio della normalizzazione è che le componenti dell'impedenza di una bobina di raggio qualsiasi che circonda un cilindro metallico privo di difetti di raggio qualsiasi possono essere valutate da una singola famiglia di curve (ad esempio la fig. 9 che mostra le variazioni di $\omega L / \omega L_0$ e $R / \omega L_0$ per materiali non ferromagnetici e per diversi valori di f_0 e η).

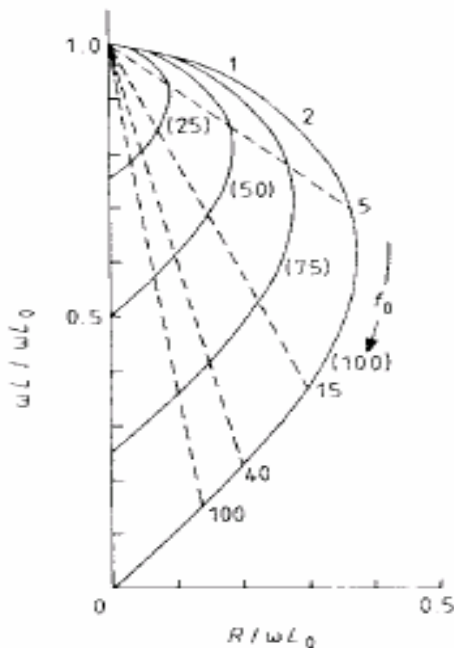


Figura 9 Variazioni delle componenti $\omega L/\omega L_0$ e $R/\omega L_0$ (equazioni 2.14) dell'impedenza normalizzata di una lunga bobina ad accerchiamento che circonda una lunga asta cilindrica non ferromagnetica (o ferromagnetica saturata) che conduce elettricamente, per una frequenza normalizzata f_0 e un fill-factor η in percentuale (tra parentesi).

Sulla curva sono indicati i valori di f_0 e, per dati valori di μ_r , σ e b essi sono proporzionali alle frequenze. Tuttavia, per una fissata frequenza la curva f_0 indica le variazioni di σ , quando μ_r e b sono costanti, ed è spesso chiamata la curva $\delta\sigma$. Inoltre, se il raggio della bobina è costante, la curva η indica i valori del diametro D del cilindro ed è chiamata curva δD . Le variazioni sia di σ che di D possono perciò essere determinate simultaneamente.

La figura 9 mostra che la variazione d'impedenza con σ decresce al crescere della frequenza, il che indica che le misure con corrente parassita della conducibilità elettrica sono più sensibili alle frequenze più basse. Tuttavia, la differenza di fase tra le curve $\delta\sigma$ (o δf_0) e δD aumenta da un minimo a basse frequenze ad un valore più o meno costante, intorno ai 45° , quando f_0 supera 15; perciò la frequenza ottimale per le misure della conducibilità corrisponde a $f_0 = 15$.

Quando f_0 supera 15 le variazioni del diametro possono essere misurate con un elevato grado di sensibilità.

L'aumento della differenza di fase tra le curve $\delta\sigma$ e δD con la frequenza per valori molto bassi di f_0 indica che le variazioni della conducibilità possono anche essere determinate misurando questa differenza di fase.

Nella pratica sia la bobina che l'asta hanno lunghezza finita, perciò nascono discrepanze tra i valori misurati e quelli teorici delle componenti

normalizzate dell'impedenza. Queste discrepanze non dovrebbero superare piccole percentuali, a patto che la bobina sia più corta dell'asta e la lunghezza della bobina superi il suo diametro di un fattore 2 o più. Predizioni più precise dell'impedenza possono essere ottenute per bobine di lunghezza finita con l'uso di una analisi più complicata [Dodd et al., 1974]. Tuttavia, lo scopo principale di tracciare le curve di impedenza è quello di valutare le frequenze ottimali per il testing e il metodo di Forster è normalmente adeguato per questo scopo, perfino per bobine relativamente piccole.

2.2 Metodi magnetici

Con i metodi magnetici del testing, l'oggetto che deve essere testato viene sottoposto ad un campo magnetico e poi vengono osservati i cambiamenti risultanti del flusso magnetico nella regione di interesse. Le applicazioni sono confinate ai materiali ferromagnetici ed includono la rilevazione di fessure, la misura dei cambiamenti dimensionali e l'osservazione delle variazioni della permeabilità magnetica. I campi magnetici applicati possono essere sia continui che alternati.

2.2.1 Metodi di dispersione del flusso

I fenomeni localizzati come le fessure superficiali o sottosuperficiali nell'acciaio ferritico ed in altri materiali ferromagnetici possono essere rilevati mediante i metodi di dispersione del flusso.

Con questi metodi, viene indotto un campo magnetico all'interno dell'oggetto da testare, e la distribuzione delle linee di flusso magnetico risultanti è determinata dai valori della permeabilità magnetica all'interno della regione di interesse. La figura 10 infatti mostra come le discontinuità della permeabilità magnetica, causate dalla presenza di una fessura che simula un difetto in una sbarra ferromagnetica magnetizzata, modificano la distribuzione delle linee di flusso magnetico indotto (il flusso esce fuori dall'oggetto). La dispersione del flusso si verifica non solo sulla superficie contenente la fessura ma anche su quella opposta, anche se qui la densità del flusso disperso ha un'ampiezza minore.

La figura 10 mostra anche che una parte del flusso passa attraverso la fessura.

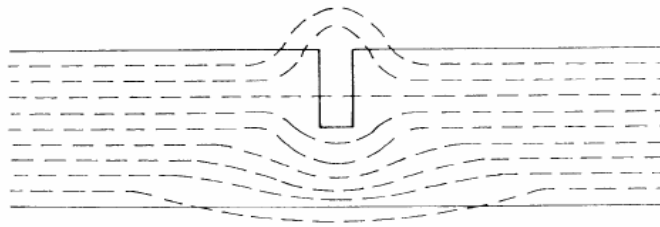


Figura 10 Dispersione del flusso magnetico in presenza di un taglio che simula una fessura in una sbarra ferromagnetica magnetizzata. Le linee tratteggiate indicano il flusso magnetico.

Il principale vantaggio di questi metodi è l'alta probabilità di rilevazione quando essi sono opportunamente applicati; un'altro vantaggio è che essi mostrano una sensibilità più elevata, rispetto a tutti i metodi convenzionali dell'NDT, nel rilevare piccole fessure superficiali, perfino su superfici rugose.

Uno svantaggio invece consiste nel fatto che questi metodi richiedono che la componente del campo applicato normale a qualsiasi discontinuità sia

considerabile, altrimenti la quantità di divergenza del flusso risultante è troppo piccola per essere osservata.

I metodi di dispersione del flusso possono essere suddivisi in:

- *Ispezione con particelle magnetiche* (MPI : Magnetic Particle Inspection)
- *Ispezione con nastro magnetico* (*Magnetografia*)

Il campo magnetico inoltre può essere sia continuo che alternato ed è eccitato con un magnete permanente o con mezzi elettrici.

2.2.1.1 Ispezione con particelle magnetiche

L'ispezione con particelle magnetiche [Blitz, 1997] è il metodo più largamente utilizzato per la rilevazione di difetti superficiali e sottosuperficiali nei materiali ferromagnetici.

Con questo metodo, un campo magnetico di adeguata intensità è applicato alla superficie dell'oggetto da testare, al quale vengono applicate contemporaneamente piccole particelle ferromagnetiche, utilizzando sia il metodo wet che quello dry, che verranno descritti in seguito.

Le particelle si allineano nella direzione del flusso magnetico e quindi indicano le deviazioni del flusso che avvengono in corrispondenza di una fessura o di qualche altra discontinuità della permeabilità magnetica (figura 11a). Poiché le linee deviate coprono una area più grande della fessura, si osserva un'immagine ingrandita del difetto (figura 11b).

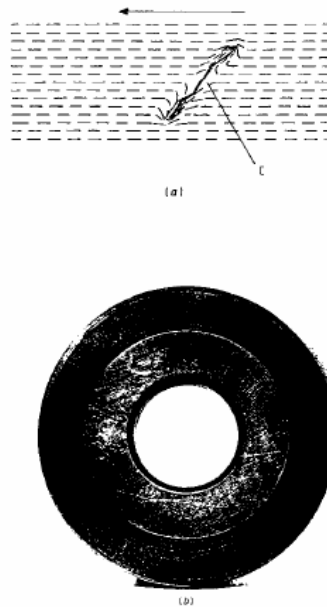


Figura 11 (a) Divergenza delle linee di flusso magnetico sopra la superficie di un campione metallico magnetizzato nelle vicinanze di una fessura superficiale (C). (b) Indicazioni di fessure mediante particelle magnetiche sulla superficie di un cuscinetto d'acciaio; le fessure sono state causate dalla levigatura.

L'MPI può essere utilizzato per testare oggetti di varie misure ed è considerato come un preliminare essenziale per esaminare componenti e strutture in ferro ed acciaio che sono adatti a sopportare forti stress quando sono in funzionamento. Esso è ampiamente utilizzato nelle installazioni di petrolio e gas, e nelle industrie dell'energia nucleare, dell'aviazione e automobilistiche, con lo scopo principale di rilevare la presenza di fessure, falde, inclusioni non metalliche e scissioni sia alla superficie che immediatamente sotto.

I principali vantaggi dell'ispezione con particelle magnetiche sono:

- esso è semplice da utilizzare.

- ❑ è altamente sensibile.
- ❑ fornisce indicazioni chiaramente visibili.
- ❑ è relativamente economico.

Anche se sono necessarie elevate correnti per produrre un campo magnetico di intensità sufficiente per raggiungere un'adeguata sensibilità di rilevazione, tuttavia devono essere applicate soltanto basse tensioni, tipicamente 6-27 V; conseguentemente i rischi di una scossa elettrica sono ridotti al minimo.

Il metodo presenta alcuni svantaggi:

1. sono accessibili solamente le regioni superficiali e sottosuperficiali dell'oggetto da testare.
2. è richiesta un'accurata preparazione delle superfici, come la rimozione di grasso e di altre sostanze che possono alterare la mobilità e la visibilità delle particelle.
3. dopo ogni test deve essere effettuata la smagnetizzazione, infatti la presenza di qualche magnetismo residuo può attrarre sostanze, che potrebbero aderire permanentemente, provocando probabilmente guasti quando l'oggetto viene usato.
4. le particelle ferromagnetiche possono ostruire le fessure, rendendo più difficile la rilevazione.
5. occorrono test in almeno due direzioni perché alcune linee di flusso orientate nella direzione di un difetto non sono deviate e quindi ostacolano la rilevazione.
6. l'efficienza del metodo dipende dall'abilità, dall'esperienza, dalla concentrazione e dall'onestà dell'operatore.

In generale, la massima profondità alla quale può essere rilevata una fessura superficiale con l'utilizzo di campi continui è circa 1.5 mm. Con i campi alternati invece, le onde elettromagnetiche si propagano all'interno del metallo ma la penetrazione è bassa, come indicato dalla *profondità di penetrazione* δ ($\delta = (2/\omega\mu\sigma)^{1/2}$, dove ω è la frequenza angolare, μ e σ sono rispettivamente la permeabilità magnetica e la conducibilità elettrica del mezzo in cui le onde si propagano), che tipicamente è 0.5 mm per l'acciaio testato alla frequenza di 50 Hz. Inoltre δ decresce all'aumentare della frequenza, pertanto l'utilizzo dei campi alternati è di solito ristretto a testare fessure superficiali.

Questo metodo normalmente non è impiegato per misurare le dimensioni di un difetto, ma un operatore esperto può valutarle grossolanamente a partire dalle dimensioni e dal pattern dell'accumulo di particelle che si ha dove è localizzato il difetto. Questa valutazione può essere assistita con l'aiuto di un blocco contenente tagli sottili di diverse profondità e fatto con lo stesso materiale dell'oggetto da testare.

King [Blitz *et al.*, 1969a] ha mostrato inoltre che è possibile identificare il tipo di difetto dal tipo di indicazione; per esempio, le fessure dovute a trattamento con calore sono di solito lunghe e strette.

L'MPI è largamente utilizzato per testare strutture marine subacquee, come i supporti di una piattaforma e gli oleodotti, specialmente per difetti di saldatura; inoltre i difetti maggiormente rilevati sono le fessure superficiali dovute a logoramenti. Le strutture sono di solito ricoperte da organismi marini e, prima del testing, devono quindi essere pulite per mettere a nudo il metallo, solitamente con getti di fluido ad alta pressione.

Un metodo di magnetizzazione largamente utilizzato in questi casi è il metodo del flusso di corrente che utilizza due sonde (figura 12): una

corrente opportuna fornisce un'adeguata intensità del campo. Le sonde sono capaci di funzionare sopra superfici aventi un alto grado di curvatura;

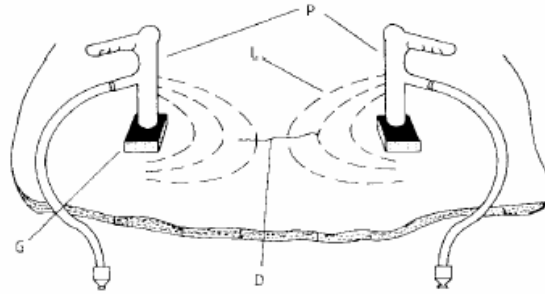


Figura 12 Testing con punzoli: D = difetto, G = velo di rame, L = linee di flusso, P = punzoli metallici.

2.2.1.2 Metodi dry e wet

Con il metodo dry, le particelle consistono in una limatura di ferro polverizzato avente una elevata permeabilità magnetica e una bassa retentività; queste particelle vengono semplicemente cosparse sulla superficie del materiale da testare e spazzate via dopo il test. Questo metodo risulta adeguato per ispezionare colate grezze di metallo e fucinature, ed è particolarmente sensibile all'individuazione di difetti sottosuperficiali.

Il metodo wet invece è quello più comunemente utilizzato. Con esso, le particelle sono di solito fatte di ossido di ferro magnetico (Fe_3O_4) sospeso

in un liquido a bassa viscosità, ad esempio paraffina, a formare un inchiostro. Il metodo è molto efficace per testare superfici ed è più sensibile e semplice da utilizzare di quello dry.

Normalmente viene usato inchiostro nero, ma per applicazioni con superfici scure risulta vantaggioso usare inchiostri colorati e fluorescenti.

Gli inchiostri fluorescenti tuttavia sono meno fluidi di quelli neri e possono fornire una minore sensibilità di rilevazione per superfici luminose; l'osservazione delle tracce d'inchiostro nero invece può essere migliorata coprendo la superficie con un rivestimento bianco e liscio.

E' importante infine sottolineare che gli inchiostri vanno tenuti liberi da agenti concomitanti come olio, acqua e detergenti.

2.2.1.3 Ispezione con nastro magnetico (Magnetografia)

L'Ispezione con nastro magnetico o Magnetografia [Blitz, 1997] è un metodo che consiste nel magnetizzare il campione da testare, e coprendo la parte della superficie che deve essere esaminata con un tratto di nastro magnetico, che può essere successivamente analizzato con una sonda.

Un esempio che ci consente di capire come funziona questo metodo è descritto da Forster [Forster, 1983], il quale utilizzò la magnetografia per testare lamine d'acciaio su una linea di produzione.

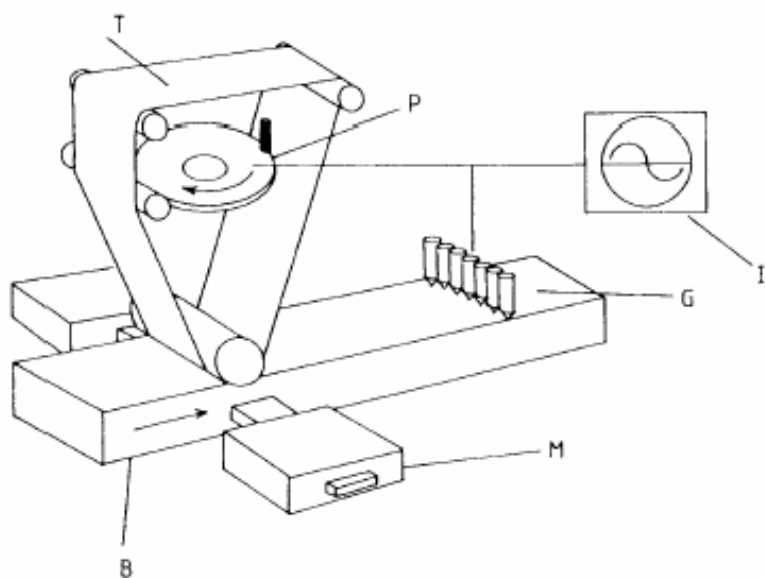


Figura 13 Magnetografia utilizzata per testare una lamina d'acciaio (B):
M = motore, P = raccoglitore che contiene le sonde, T = nastro magnetico.

Una lamina (B) (figura 13) avanza orizzontalmente alla velocità costante di circa 1 m/s attraverso un campo magnetico alternato indotto; la superficie superiore della lamina è in contatto con la parte più bassa di un cappio di nastro magnetico (T) che riceve i campi dispersi corrispondenti alla presenza di qualche difetto. Il nastro viene analizzato ad una velocità di 250 volte al secondo da un disco rotante (P) contenente diverse sonde equamente spaziate su una circonferenza coassiale con il disco. Ogni sonda è collegata ad uno di un array (G) di spray colorati ed i segnali provenienti dal nastro sono monitorati mediante un indicatore (I). Un cancellatore opportunamente posizionato cancella i segnali dopo che essi sono stati ricevuti dalle sonde. In questo modo sulla superficie della lamina, laddove sono posizionati i difetti, compariranno segni di diversi colori, i quali indicano i livelli di rilevazione della dispersione del flusso (per esempio, un

segno rosso potrebbe indicare un difetto abbastanza grande, mentre un segno bianco potrebbe indicare un difetto abbastanza piccolo, ecc.).

Un'importante caratteristica di questo metodo è che, poiché i nastri sono flessibili, le superfici curvate, come le saldature nelle congiunzioni a T dei tubi, possono essere esaminate analizzando un tratto piatto del nastro; inoltre è un metodo adattabile all'automazione.

Il metodo ha il vantaggio di essere quantitativo, cioè è in grado di misurare le profondità delle fessure; per la rilevazione di fessure superficiali sono sufficienti campi magnetici di bassa intensità.

Per testing offshore, il vantaggio principale della magnetografia rispetto all'MPI è che nessuna misura deve essere condotta sott'acqua e non è richiesto che il palombaro abbia conoscenze relative alle tecniche del testing non distruttivo; nastri di 0.5 o 1 m di lunghezza e da 50 a 100 mm di larghezza sono collocati sull'oggetto da testare, e tenuti in posizione da magneti permanenti.

Strumentazione per il testing automatico di tubi ed aste

Per il testing automatico di aste e tubi con dispersione del flusso magnetico è richiesto l'uso di particolari sistemi di scansione [Blitz, 1997]. In particolare un dispositivo sviluppato da Forster in tal senso relativamente ad aste e tubi, aventi un diametro nel range 10 – 500 mm ed oltre, è chiamato Rotomat (figura 14). Esso fu progettato per la rilevazione e la

misura di fessure presenti sia sulla superficie interna che esterna di tubi senza giunzioni e a saldatura continua. Per ottenere un grado di sensibilità sufficientemente elevato nel misurare i difetti longitudinali viene applicato un campo continuo in direzione circolare; il campo è applicato mediante un giogo rotante (figura 14a) attraverso il quale il tubo è alimentato mentre si muove ad una velocità costante fino a 2 m/s in direzione assiale. Una coppia di espansioni polari fornisce un circuito magnetico intorno al tubo, che è separato dalle espansioni da un ristretto gap di aria. Le lunghezze delle espansioni polari possono essere regolate a seconda del diametro del tubo. Due unità diametralmente opposte, ognuna contenente un array tipicamente di 16 sonde e avente una larghezza di 80 mm, sono fissate al giogo in modo tale da fornire una completa scansione del tubo.

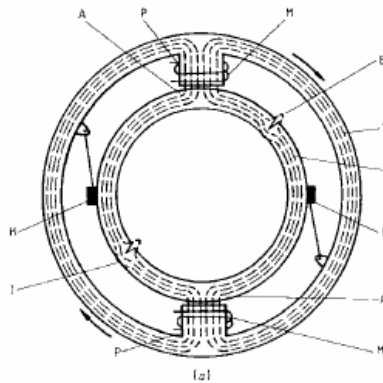


Figura 14 (a) Il giogo di magnetizzazione per il Rotomat di Forster: A = gap di aria, E = dispersione del flusso in presenza di un difetto esterno, H = unità contenente le sonde, I = dispersione del flusso in presenza di un difetto interno, M = avvolgimento per la magnetizzazione, P = espansione polare, T = tubo, Y = anello del giogo. (b) Utilizzo del Rotomat per testare un tubo.

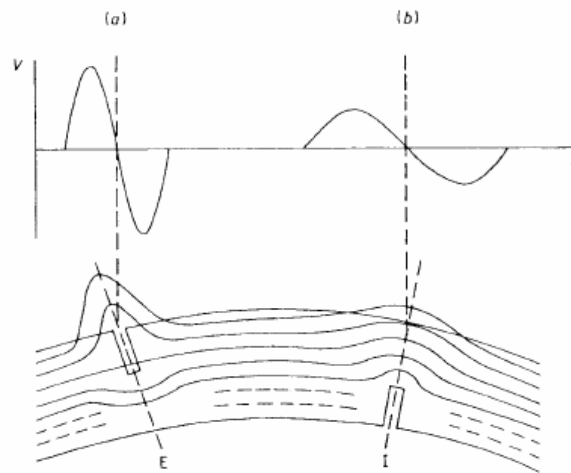


Figura 15 Variazioni della tensione di uscita V della sonda in funzione dello spostamento s per la circonferenza di un tubo testato con il Rotomat: (a) difetti esterni e (b) difetti interni.

Nella figura 15 invece è mostrato come è possibile distinguere i difetti presenti sulle superfici interne da quelli presenti sulle superfici esterne. La tensione d'uscita della sonda, inizialmente continua, diventa alternata quando il rilevatore attraversa una regione di dispersione del flusso. La frequenza dell'uscita è perciò più alta per le fessure esterne rispetto a quelle interne.

Con questo strumento è possibile misurare fessure con profondità dell'ordine di 0.4 mm.

Uno strumento che può essere utilizzato in maniera complementare al Rotomat è il *Transomat* di Forster.

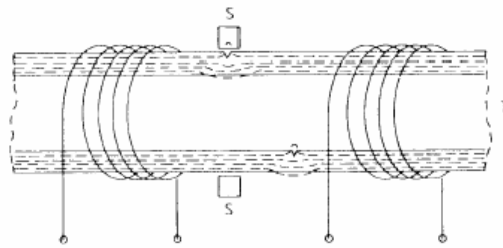


Figura 16 Innalzamento laterale di un tubo (T) testato con il Transomat: il diagramma mostra due sonde (S) che fanno parte di un array circolare.

Con esso il campo magnetico di eccitazione continuo è indotto in direzione assiale da una coppia di sonde (figura 16) in modo tale da facilitare la rilevazione dei difetti trasversali. Le sonde fanno parte di un array circolare e le loro posizioni possono essere regolate a seconda del diametro del tubo. La distinzione tra i difetti presenti sulle superfici interne e quelli presenti sulle superfici esterne è ottenuta in maniera del tutto analoga al Rotomat.

Una scansione completa per la rilevazione dei difetti in qualsiasi direzione può essere raggiunta facendo passare il tubo attraverso i due strumenti in successione. Un altro strumento che consente di rilevare i difetti presenti sulla superficie esterna di tubi ed aste di acciaio, aventi diametro nel range 25 – 260 mm, con una sensibilità più elevata rispetto agli strumenti analizzati in precedenza è il *Circoflux* di Forster (figura 17).

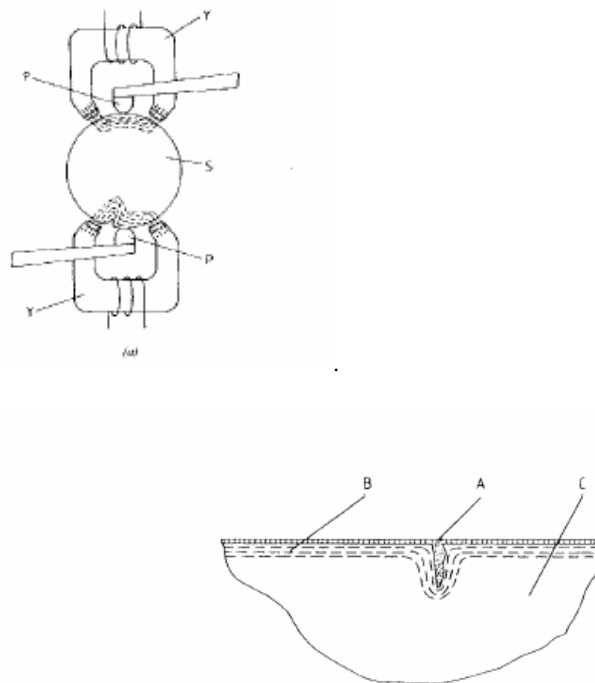


Figura 17(a), Giogo (Y), campione (S) e disposizione delle sonde (P) per il Circoflux. **(b)** Unità rotanti del Circoflux. **Figura 17(b)**, Elevata magnetizzazione di un campione da testare contenente una fessura (A) utilizzando un campo alternato. Il campione mostra una regione saturata (B) ed una regione ad elevata permeabilità (C).

Lo strumento è costituito da una coppia di gioghi e di array di sonde montati in modo tale da ruotare quando il tubo o l'asta passa attraverso essi ad una velocità costante fino a 2 m/s. Esso genera un campo magnetico alternato ad una frequenza dell'ordine dei khertz con una energia di diversi kwatt. L'utilizzo di frequenze elevate consente di sopprimere i rumori a bassa frequenza originati dai dispositivi meccanici come gli scanner

Il Circoflux in pratica applica il seguente principio: viene applicato un campo magnetico alternato avente un'intensità sufficientemente elevata da

produrre saturazione nella regione superficiale del campione. Poiché l'attenuazione del campo magnetico aumenta con la profondità, la saturazione si annulla al di sotto dello strato superficiale, in modo tale da produrre un incremento della permeabilità magnetica e quindi della densità del flusso. Questo ha come effetto di ridurre lo spessore dell'area magnetizzata ed apparentemente aumenta lo spessore di qualsiasi fessura, come indicato dalla dispersione del flusso attraverso la regione saturata (figura 17 b). Osserviamo infine che per alcuni tubi come gli oleodotti, le superfici esterne sono inaccessibili ed il giogo di magnetizzazione e gli array di sonde sono montati su un carrello che viene spinto internamente al tubo. Per la rilevazione è necessaria l'applicazione di campi magnetici continui al fine di garantire una sufficiente penetrazione.

Un carrello d'ispezione adatto ad individuare difetti (generalmente risultanti da corrosioni e stress) in oleodotti molto lunghi con il metodo di dispersione del flusso magnetico è stato sviluppato dalla British Gas plc ed è chiamato '*Maiale intelligente*' (figura 18).



Figura 18 *Maiale intelligente: carrello d'ispezione per testare oleodotti con la dispersione del flusso magnetico.*

Il carrello è spinto attraverso l'oleodotto mediante il flusso di un fluido sotto pressione (ad esempio combustibile per aviazione, gas, olio); esso trasporta, oltre ad unità di magnetizzazione e alle sonde, anche un'unità di elaborazione dati particolarmente sviluppata, un nastro magnetico e un raccoglitore di energia collocato in moduli cilindrici resistenti agli urti.

Questi strumenti sono fatti di diverse dimensioni per consentire l'ispezione di oleodotti aventi diametri nel range 200 – 1200 mm.

2.2.2 Vantaggi e svantaggi

- ✚ E' un CND più rapido, meno laborioso e più efficace di quello con liquidi penetranti, ma richiede l'uso d'apparecchiature talvolta assai costose.
- ✚ Il metodo è meno soggetto ad errori dell'operatore rispetto a quello con liquidi penetranti e non richiede necessariamente la perfetta pulizia preventiva delle superfici, sebbene sia sempre auspicabile per ottenere i migliori risultati.
- ✚ Raggiunge elevate sensibilità e presenta una buona accessibilità.
- ✚ Presenta scarsa sensibilità ai difetti tondeggianti ed è assolutamente inefficace per i difetti interni o per difetti troppo lontani dalla superficie. Le dimensioni minime del difetto rivelabile con la magnetoscopia dipendono soprattutto dalla sua distanza dalla superficie.

2.3 Metodo delle correnti indotte

Il principio fisico alla base della tecnica è quello per cui un campo magnetico generato da una bobina alimentata a corrente alternata produce delle correnti indotte nel materiale metallico da esso investito, che sono causa dell'insorgere di un campo magnetico secondario che si oppone alla causa che lo ha generato, cioè la variazione del campo magnetico. Il fenomeno di mutua induzione, che si verifica, altera il valore dell'impedenza misurabile ai capi del circuito primario e tale misura permette di valutare le eventuali anomalie presenti, dal momento che l'entità ed il percorso di tali correnti è influenzato dall'eventuale presenza di difetti. Tale tecnica consente di rilevare difetti superficiali e sub-superficiali in tutti i materiali conduttori e permette l'analisi anche di parti in movimento. Inoltre è possibile rilevare spessori di inserti di materiale avente caratteristiche di conduttività differenti e variazioni di permeabilità. Come strumentazione si può utilizzare:

-  un circuito primario, per esempio costituito da due solenoidi collegati in serie, alimentato da un generatore di corrente sinusoidale e frequenza scelte in modo opportuno;

- ✚ un circuito secondario, su cui viene indotta la corrente dovuta alla variazione del campo magnetico generato dal circuito primario in cui è immerso anche il secondario;
- ✚ un oscilloscopio per rilevare la tensione indotta sul circuito secondario.

La profondità di penetrazione nel pezzo indagato, da parte delle correnti indotte, dipende dalla frequenza della corrente eccitatrice. Naturalmente, perché il sistema dia risultati, non solo qualitativi ma anche quantitativi, necessita di precise tarature. Le operazioni di taratura sono piuttosto complesse e questo limita l'applicabilità del sistema solo a controlli di pezzi in numero elevato quali bulloni, profilati o pezzi da trattamento termico.

E' importante sottolineare che nella diagnostica le correnti parassite sono volutamente indotte, mentre nel normale funzionamento dei dispositivi bisogna ridurle perché sono perdite che si traducono in calore con conseguente aumento della temperatura e possibile fusione del materiale.

2.3.1 Correnti di Foucault

2.3.1.1 Classificazione dei materiali dal punto di vista magnetico

Un qualsiasi corpo, allo stato liquido, solido o gassoso, si magnetizza se viene immerso in un campo magnetico. La grandezza che tiene conto dello stato magnetico è il vettore induzione $\mathcal{B}$, che è legato al vettore intensità del campo magnetico $\mathcal{H}$ dalla relazione:

$$B = \mu H$$

dove μ rappresenta la *permeabilità magnetica* del materiale, esprimibile in funzione della permeabilità del vuoto μ_0 , nel modo seguente:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

La μ_r è detta *permeabilità relativa*, cioè il valore della permeabilità magnetica del materiale riferita a quella del vuoto, il cui valore è $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{H}{m}$. La permeabilità magnetica è il parametro che caratterizza le varie sostanze riguardo al loro comportamento magnetico. La maggior parte di esse presenta una permeabilità magnetica μ non molto diversa da quella del vuoto e quindi suscettibili di un magnetismo estremamente debole; queste sostanze sono classificate *diamagnetiche* se $\mu < \mu_0$ (acqua, rame, oro, argento, etc.), oppure *paramagnetiche* (aria, alluminio, manganese, platino, ecc.) se $\mu > \mu_0$.

Esistono però altre sostanze che presentano una permeabilità centinaia o migliaia di volte superiore a quella del vuoto, e quindi uno spiccato stato

magnetico. Queste ultime (ferro, nichel, cobalto e loro leghe) sono classificate come *ferromagnetiche* e di esse si fa' uso per la costruzione dei circuiti magnetici. Il processo di magnetizzazione delle varie sostanze può essere sintetizzato del seguente diagramma:

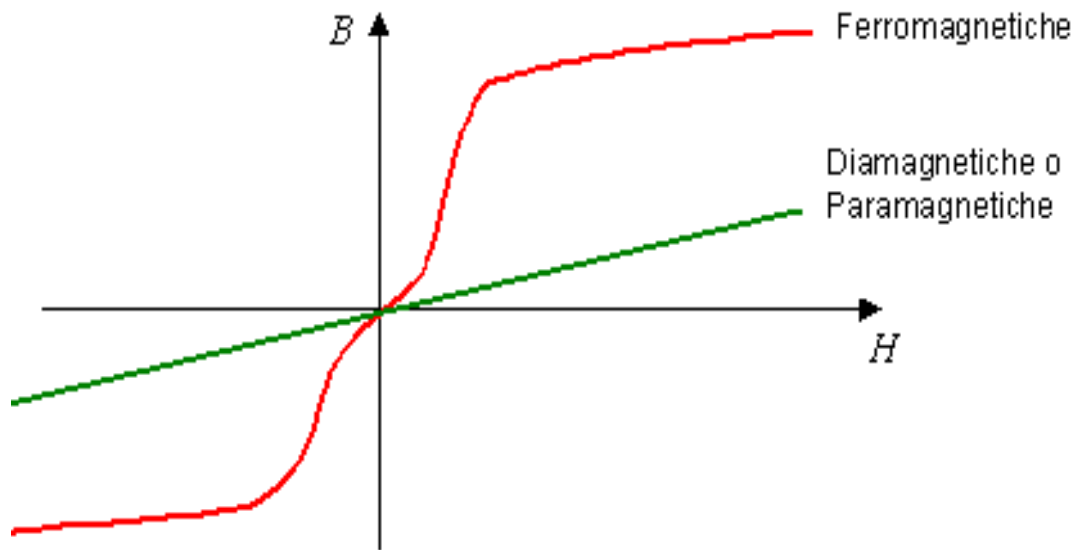


FIG 1. Andamento della *magnetizzazione* delle varie sostanze

I materiali ferromagnetici sottoposti a cicli di magnetizzazione, cioè a campi magnetici variabili, sono soggetti ad un fenomeno dannoso, costituito dalle *correnti parassite* o di **Foucault** che circolano in piani di materiale perpendicolari alla direzione dell'induzione B .

2.3.1.2 Cenni teorici sulle correnti parassite

In un conduttore metallico massiccio, qualora venga variato il flusso del campo magnetico ad esso concatenato (sia per variazione dell' induzione, sia per spostamento del conduttore), si generano delle f.e.m. e quindi delle correnti indotte, dette di Foucault. Esse si manifestano quando:

- si ha una massa metallica che si muove in un campo magnetico costante, allora le correnti di Foucault sono dovute alla forza di Lorentz sugli elettroni. La forza di Lorentz è la forza esercitata da un campo magnetico su una carica elettrica q che si muove con velocità v :

$$\mathbf{F} = (q\mathbf{v}) \times \mathbf{B}_0$$

Dove $\mathbf{B}_0$ è il vettore induzione magnetica.

Le correnti parassite prodotte dal moto relativo danno origine ad una azione frenante la cui intensità è proporzionale al modulo della velocità.

- Sono presenti conduttori massicci immersi in campi magnetici sinusoidali ossia in campi magnetici di intensità variabile nel tempo con la seguente legge:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \sin(\omega t)$$

Secondo la legge di Lenz la direzione delle correnti di Foucault è tale da opporsi alla causa del processo, cioè al moto del conduttore stesso o alla variazione del campo induzione magnetica. Tali correnti indotte sono chiamate anche parassite perchè causano una perdita di energia per effetto Joule che, nel caso di conduttori metallici massicci, è tanto più evidente quanto più è elevata la

velocità del conduttore o la pulsazione dell' induzione magnetica. Questo fenomeno se da un lato è fonte di gravi problemi, in quanto può causare notevoli perdite di energia, può d' altra parte essere sfruttato per diverse applicazioni.

2.3.1.3 Applicazione tecnologica

1)Freni elettromagnetici: Le correnti parassite si generano in qualsiasi massa metallica che ruoti o si sposti comunque entro un campo magnetico. Per la legge di Lenz, queste correnti hanno l'effetto di frenare il movimento che le induce e l'energia corrispondente a questa azione frenante si traduce integralmente in calore in seno alla massa, la quale pertanto si riscalda. Tale azione frenante viene direttamente utilizzata nella costruzione dei freni elettromagnetici i quali vengono realizzati prevalentemente in forma di disco metallici.

Freni elettromagnetici sono usati per esempio in molte metropolitane: elettromagneti posti in vicinanza delle rotaie permettono di esercitare un'azione frenante sulle ruote del treno in arrivo, causando la frenata.

2)Forni elettromagnetici: lo sviluppo di calore dovuto alle correnti indotte di Foucault nella massa di un conduttore implica, in molte macchine, perdite di energia e riscaldamento che si cerca di ridurre. Ma questo calore, in altri casi, viene utilizzato per elevare la temperatura dei corpi.

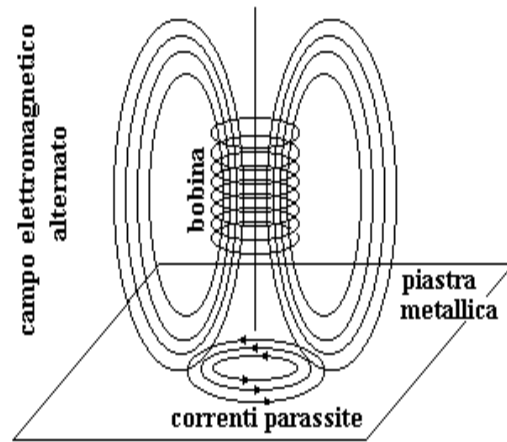
Un forno elettromagnetico permette di fondere massimo 15 libbre di metallo (acciaio,oro,rame...) a temperature fino a $30000^0\text{ F}(1650^0\text{ c})$ in 30 min ad una potenza di 20kw.

3)Sensori di movimentazione senza contatto: i sensori di spostamento senza contatto, di alta precisione, sono oggi la soluzione ai difficili problemi relativi alla misura nel campo della ricerca, dello sviluppo e dell'automazione industriale; inoltre recenti sviluppi dell'elettronica e dei sensori hanno permesso di ampliare le applicazioni.

La nuova generazione di sensori di precisione senza contatto è ideale per le seguenti applicazioni:

- rilevazioni di movimenti molto veloci;
- misure senza contatto fisico e senza forza esterna;
- montaggio su linee continue e operazioni che richiedono misure di precisione per un lungo periodo di tempo senza deterioramento del sensore.

Il principio dei sensori di spostamento senza contatto è basato sulla perdita di energia del circuito oscillatore causata dalla generazione di correnti parassite in un pezzo elettricamente conduttivo. In pratica una bobina con un sensore viene percorsa da una corrente alternata ad alta frequenza; quando al sensore viene avvicinato un target metallico, si generano in esso per induzione magnetica delle correnti parassite, che opponendosi al campo magnetico primario, provocano una variazione di oscillazioni e quindi un segnale funzione della distanza tra sensore e pezzo.



Altro aspetto importante e quindi molto critico per il sistema è la forte influenza della temperatura sul segnale di misura. A questo riguardo sono previsti dei sistemi che consentono delle compensazioni in temperatura per ottenere un'eccellente stabilità.

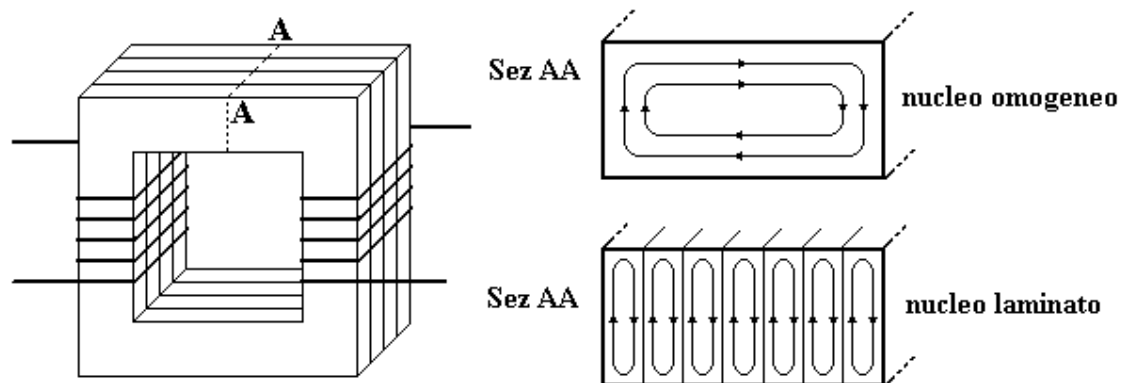
VANTAGGI

- utilizzabile con tutti i target metallici elettricamente conduttivi, sia ferromagnetici che non ferromagnetici;
- dimensioni estremamente ridotte dei sensori;
- insensibilità alla polvere, umidità, olio o materiale dielettrico nell'intervallo di misura;
- affidabilità delle misure, anche in presenza di interferenze di campi elettromagnetici;
- ampio intervallo operativo di temperatura;
- elevata precisione.

2.3.1.4 Metodi utilizzati per la riduzione delle correnti parassite

Per evitare quindi notevoli dissipazioni di energia nei nuclei magnetici sottoposti a campi induzione magnetica variabili, bisogna ricorrere ai seguenti artifici:

1. Suddividere il materiale, con superfici di separazione parallele alla superficie del flusso, cioè realizzare il nucleo con sottilissimi fili, reciprocamente isolati da vernici o fogli di sostanze isolanti: questo processo si chiama laminatura.
2. Utilizzare metalli con una resistività maggiore possibile, come gli acciai al silicio. Infatti in presenza di silicio (3÷4%) aumenta notevolmente la resistività dell' acciaio.



Riguardo alla laminatura, in riferimento alle figure, si può osservare che nel nucleo laminato la lunghezza dei percorsi delle correnti parassite è enormemente aumentata rispetto al blocco unico; nei circuiti ove agiscono le f.e.m. indotte, quindi, le resistenze risultano fortemente aumentate e le dissipazioni ridotte. Inoltre, tanto più elevata è la frequenza di oscillazione del campo, tanto minore deve essere lo spessore dei fili: si va quindi da qualche decimo di millimetro per correnti con una frequenza di 50 Hz (rete domestica) a pochi centesimi di millimetro per cavi telefonici. Per la

costruzione di circuiti magnetici a frequenza telefonica, si usano anche sostanze plastiche isolanti che contengono particelle di ferro colloidale (ossia di dimensioni di qualche micron): in questo modo le perdite dovute alle correnti di Foucault sono praticamente nulle.

2.3.2 La diagnostica industriale a correnti indotte

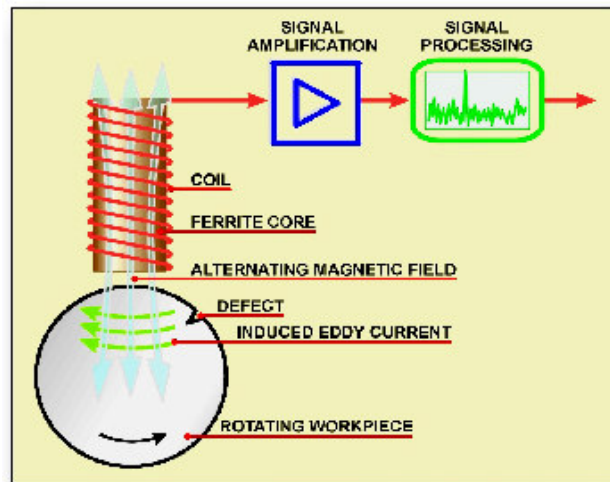
La metodologia “EDDY CURRENTS” (correnti indotte), prevede l’ispezione non distruttiva sui materiali conduttori con l’obiettivo di rilevare qualunque difetto presente nello stesso. Tale metodo consiste nell’indurre dei campi magnetici alternati, creati attraverso apposite bobine (o sonde), nel materiale da diagnosticare.

A loro volta, i campi generano nella zona di intervento, delle correnti indotte o correnti di Foucault, il cui flusso viene interrotto dalla presenza di discontinuità all’interno del componente sottoposto al controllo. La sonda, che non è a contatto con il materiale, non solo avverte con dei segnali luminosi o sonori, se è stata rilevata una cricca nel metallo, una diminuzione di spessore per corrosione o porosità, ma ne fornisce anche il dimensionamento.

Il campo magnetico variabile, prodotto dalle sonde viene denominato “campo primario “ mentre quello generato dalle correnti indotte, anch’esso variabile, “campo secondario”.

La fase delle correnti indotte, il cui flusso è funzione delle variabili specifiche del materiale sottoposto all’ispezione, varia a seconda della frequenza di eccitazione e delle caratteristiche connesse al materiale, quali: la conducibilità, la permeabilità magnetica e le dimensioni geometriche.

Chiaramente, il campo magnetico secondario, poiché è associato alle correnti indotte, varia in modo analogo e la sua misurazione viene fatta sulla base della valutazione dei suoi effetti sulla corrente o sulla tensione dell'avvolgimento primario o, sulla corrente o tensione indotta in un avvolgimento secondario.



I fattori di accoppiamento magnetico, l'ampiezza e la fase delle correnti indotte, variano continuamente fornendo un ampio spettro di segnali e nel contempo anche gli angoli di fase della corrente di eccitazione, del flusso magnetico e della tensione assumono un ruolo importante nella corretta esecuzione del metodo non distruttivo che stiamo implementando.

Quindi, ad ogni campo magnetico è associato un flusso di spostamento magnetico, espresso in Weber (Wb), misurabile tenendo conto dei volt-secondi indotti in una spira concatenata a tale flusso nell'intervallo di tempo in cui il flusso taglia la spira.

Definiamo, pertanto, la quantità di flusso magnetico, riferita all'unità di area trasversale normale alla direzione del flusso stesso, come "induzione magnetica" indicata con B (Wb/m).

Dunque, poichè abbiamo dedotto un rapporto di reciprocità tra i due circuiti che generano campo primario e secondario, occorre un unico strumento che consenta di evidenziare le variazioni, rispetto alle condizioni iniziali in uno dei due circuiti, come conseguenza delle influenze reciproche tra essi. In pratica, basta che uno solo dei due circuiti (elettricamente separati) venga alimentato direttamente con tensione alternata per individuare possibili variazioni di resistenza verificatesi nell'altro. Perché ciò sia possibile è necessario che vengano generate le correnti indotte ovvero che vi sia un flusso magnetico indotto nel nucleo della bobina.

A tale proposito descriviamo di seguito due tipologie di tecniche tramite cui generare correnti parassite nel materiale :

- 1) **TECNICA A BOBINA PASSANTE:** la bobina di eccitazione produce il campo magnetico mentre l'avvolgimento secondario riceve la tensione indotta dal flusso prodotto dalle correnti parassite;
- 2) **TECNICA A TESTINA (PICK-UP):** una sonda scorre sulla superficie del componente da ispezionare per rilevare eventuali difetti.

Vantaggi e Svantaggi

L'indagine EC (eddy currents) è un metodo estremamente versatile che ben si presta a qualunque tipo di applicazione che coinvolga specifiche variabili legate alle caratteristiche fisico-chimiche del materiale esaminato. Tuttavia, abbiamo riscontrato aspetti

svantaggiosi espliciti, per esempio, nella necessità che il materiale in questione sia conduttore di corrente.

Inoltre, essendo un metodo superficiale non è trascurabile l' "effetto pelle", fenomeno per cui in un conduttore piano la corrente si riduce in modo esponenziale in funzione della penetrazione in profondità (la profondità, a sua volta, è tanto minore quanto maggiore è il valore di frequenza, permeabilità e conducibilità). Ai fini pratici, l'indagine non distruttiva, è implementata prescindendo dal contatto tra sonda e superficie dell'oggetto quindi consente di controllare manufatti in movimento, componenti di particolari geometrie o con valori di temperature superficiali elevate.

Si presenta come una metodologia ad alta rapidità di esecuzione, basso costo di esercizio che preserva i manufatti da rischi di danneggiamento e nel contempo preserva l'efficienza degli utensili usati.

2.3.2.1 Cenni sui metodi numerici della diagnostica non distruttiva

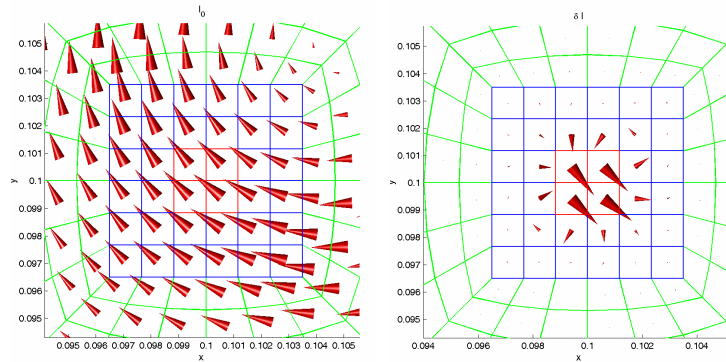
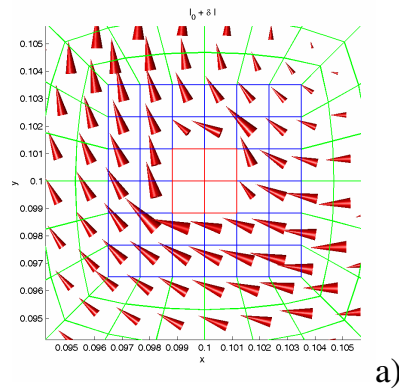
Dato un materiale conduttore, ci proponiamo di rilevare eventuali difettosità, partendo da un modello opportunamente strutturato, che ci permetta di calcolare il campo elettromagnetico in presenza di una sorgente assegnata ed una cricca volumetrica perfettamente isolante.

Dalle misure del campo elettromagnetico, generato dalla sorgente nota che interagisce con il materiale conduttore, si rivelano le stime di posizione e forma delle cricche.

Ovviamente, disponendo di metodi numerici veloci, è possibile implementare in tempo reale, sofisticati algoritmi di ricostruzione. Alla base del metodo vi sono determinate ipotesi il cui fine è quello di semplificare il fenomeno fisico e pervenire a risultati numerici riducendo il costo computazionale per la soluzione del problema diretto.

Il volume occupato dal conduttore è V_c , quello della cricca è V_0 e il volume della regione osservata è V_t (V_0 è incluso in V_t).

Si dimostra che la densità di corrente assume valore nullo in presenza di V_0 ed è visibile dalla figura a), quindi il flusso di corrente che investe la cricca subisce alterazione.



b)

c)

fig.a) distribuzione della densità di corrente J in presenza di una cricca volumetrica ; **fig.b)** corrente imperturbata; **fig c)** variazione infinitesima di corrente.

2.3.3 Strumentazione per la rilevazione dei difetti

Introduzione: sviluppo delle nuove tecnologie informatiche

Nei paragrafi precedenti abbiamo verificato gli indiscussi vantaggi offerti dalle correnti indotte come metodo di controllo non distruttivo, di conseguenza i costruttori sono stati obbligati a realizzare apparecchiature di elevate prestazioni tecnologiche in vista del conseguimento dei benefici legati alla metodologia EC.

Sebbene oggi, si possa già disporre di sofisticate attrezzature che consentono ampie applicazioni e grande affidabilità, è lecito supporre che in un prossimo futuro l'impiego di questo metodo di indagine può essere amplificato da nuovi mezzi di elaborazione dei segnali.

La proposta di nuovi sensori è supportata dalla grande opportunità di acquisizione, gestione ed elaborazione di dati fornita dalle moderne tecnologie informatiche. La possibilità di disporre, anche in ambienti tipicamente industriali, di sistemi di ingombro e peso limitato e caratterizzati da elevata capacità di calcolo, ha reso sempre più viva la necessità di dotare tali sistemi di adeguati organi periferici di “senso” atti a

fornire un flusso di informazioni di ingresso adeguato alle capacità di elaborazione.

La piccola e la media industria, orientate verso obiettivi garantiti della sopravvivenza nel proprio settore di appartenenza, attuano opportune scelte dinanzi a problemi critici quali: elevati costi di produzione, costi di magazzino, spreco di materie prime e altre conseguenze connesse a queste. Azioni correttive di intervento sono sintetizzate nell'obiettivo di ridurre al minimo i costi di produzione riducendo, ad esempio, l'enorme numero di pezzi difettosi, scarti, semilavorati in attesa di rilavorazione.

Quindi, comprendiamo l'importanza del ruolo della diagnostica a correnti indotte che consente di ridurre al minimo i tempi di rilevazione dei parametri che individuano i difetti all'interno dei laminati metallici usando sistemi completamente automatici sia per posizionare la sonda sia per acquisire dati.

Il metodo può essere applicato o in modo manuale o automatico. Viene valutato il segnale prodotto dal difetto che varia a seconda delle diverse caratteristiche geometriche ed elettriche delle sonde utilizzate.

Le sonde utilizzate possono essere statiche o dinamiche, ad anello per superfici, fori o zone interne, assolute o differenziali con avvolgimento singolo o doppio, a ponte o per riflessione.

Le sonde scelte sono del tipo *pancake-coil* collegate in modalità differenziale su di un circuito a ponte ed ogni apparecchiatura è dotata di elevata sensibilità da consentire la rilevazione di imperfezioni del materiale metallico anche di dimensioni ridotte e in profondità rispetto alla superficie di analisi.

Occorre che forma, dimensione, frequenza di alimentazione delle sonde e qualità dei componenti usati per i circuiti siano scelti con criterio per non

incorrere, per esempio, nel problema relativo al rumore e all'effetto di deriva sui segnali rilevati.

Le sonde sono costituite da avvolgimenti che inducono correnti vorticose sul metallo e collegati a circuiti che rendono il sistema notevolmente sensibile.

A volte occorre confrontare i risultati provenienti da simulazioni effettuate variando, per esempio, la posizione di una sonda a diverse distanze dai difetti presenti su una piastra metallica mantenendo costante il reticolo per non incorrere in risultati errati.

Non è stata immediata la risposta concreta all' intuizione della importanza dello sviluppo delle tecniche viste, a causa della non facile applicabilità.

Infatti, i dispositivi attivi per generare e amplificare i segnali di esplorazione erano ingombranti e richiedevano tensioni di alimentazione di non agevole gestione (centinaia di volt).

Mancavano modelli matematici di descrizione dell'interazione tra il sistema e il principio fisico, metodiche, procedure e tecnologie che sono, ora, disponibili grazie alle innovazioni delle tecnologie informatiche.

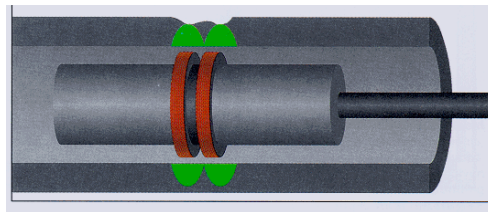
Ad oggi sono stati risolti molti problemi e sul mercato sono presenti numerosi strumenti sofisticati.

2.3.3.1 Attrezzature utilizzate

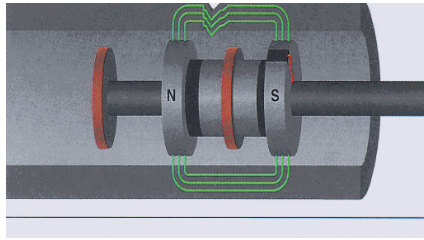
Per rilevare i difetti dei materiali sono stati costruiti diversi strumenti che utilizzano il principio di funzionamento delle correnti indotte. Tra questi riportiamo i più importanti:

1) Strumenti utilizzati per il controllo dei tubi:

Il controllo non distruttivo di impianti industriali fa frequente uso di correnti indotte, al fine di evidenziare difetti superficiali o poco profondi originati in fase di fabbricazione o dovuti alla corrosione. Le tecniche non distruttive basate sulle correnti indotte impiegano un campo magnetico come strumento di sonda per rilevare variazioni nelle proprietà e discontinuità in materiali conduttivi. Il campo magnetico viene applicato posizionando un avvolgimento vicino alla superficie dell'oggetto sotto test. Vengono quindi valutate variazioni di conduttività permeabilità e geometria. In particolare, un largo uso di tale tecnica si ha nel controllo dei fasci tubieri degli scambiatori di calore, dove le superfici da esaminare sono oltremodo estese. Qualunque difetto presente nel materiale interrompe il flusso di corrente e ciò viene avvertito dall'apparecchio. Questo strumento è stato sviluppato per il controllo delle sonde a correnti indotte, in grado di generare segnali di eccitazione bifrequenziali e di analizzare contemporaneamente l'intensità delle correnti con la massima separazione tra i due canali. Nel controllo dei tubi, le correnti indotte a multifrequenza sono in grado di localizzare e dimensionare difetti sotto la piastra di supporto e nel metallo dei tubi.



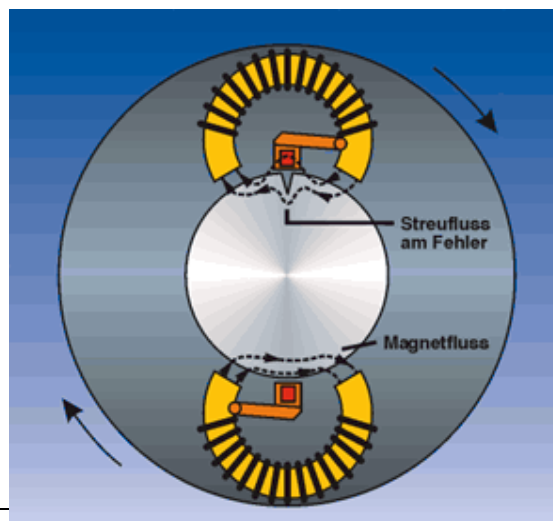
Esistono, inoltre, rilevatori a flusso magnetico disperso; questo metodo si basa sulla magnetizzazione del materiale da ispezionare utilizzando un forte magnete posizionato all'interno della sonda .



Quando questa incontra una diminuzione di spessore o una discontinuità netta, la distribuzione del flusso varia intorno a quell'area e viene rilevata o con una sonda o con una bobina di ricezione.

2) *Circoflux:*

E' l'apparecchiatura maggiormente indicata per la ricerca di difetti superficiali e subsuperficiali su materiale ferromagnetico laminato (barre o tubi). Basato sulla tecnologia a flusso disperso EHP (**E**xtrêmement **H**igh **P**ower), il sistema magnetizza il materiale con un campo sinusoidale rotante ad alta frequenza (6 kHz), a differenza del **Rotomat** che invece utilizza una magnetizzazione costante. La figura sottostante illustra il principio di funzionamento del **Circoflux**.



Il flusso magnetico generato nelle bobine di magnetizzazione viene trasmesso al materiale **senza contatto**. Poiché la permeabilità relativa dell'aria risulta essere di molto inferiore alla permeabilità del materiale, in assenza di difetto il flusso magnetico si propaga all'interno del materiale senza dispersione. Nel caso invece vi sia un difetto, il flusso magnetico è forzato a deviare seguendo la geometria del difetto. Una piccola parte del flusso emerge in superficie in corrispondenza del difetto e crea il flusso disperso. Speciali sonde differenziali sensibili a variazioni di campo magnetico rilevano questa dispersione di flusso fornendo l'informazione relativa al difetto.

L'alto potere magnetizzante e la qualità delle sonde differenziali fornisce un ottimo rapporto segnale/rumore. Disturbi causati da variazioni geometriche e/o di permeabilità magnetica, problematiche difficilmente risolvibili poiché legate al processo di lavorazione, sono in larga misura sopresse dalla saturazione magnetica presente in superficie e dalla realizzazione stessa delle sonde differenziali. I segnali relativi ai difetti sono invece amplificati, raggiungendo un elevatissimo rapporto segnale/rumore anche per materiali con superficie grezza.

Informazioni descrittive:

- Controllo Non Distruttivo di barre o tubi ferromagnetici, per la ricerca di difetti longitudinali in superficie.
- Diametro materiale: da 10 a 180mm

- Velocità di controllo a garanzia del 100% del materiale controllato:
max 3,75 m/s
- Difetto minimo individuabile: 0,15mm di profondità (dipendente
dalla qualità del materiale, subordinato al rapporto segnale/rumore)

3) DEFECTOMAT : ricerca difetti superficiali su materiali elettricamente conduttori che abbiano un orientamento prevalentemente trasversale. Utilizzando il metodo a correnti indotte con passaggio in bobina, permette la rilevazione di difetti superficiali con orientamento prevalentemente longitudinale. A seconda del tipo di prestazioni richieste, esistono modelli diversi per ogni esigenza.

a) DEFECTOMAT CP/EP



Per molti anni, il nome DEFECTOMAT C è stato sinonimo di efficienza e convenienza per il controllo di tubi, barre o filo. Il nuovo **DEFECTOMAT CP/EP** ne è il degno erede. L'aggiunta della lettera **P** è legata alla nuova elettronica, basata su tecnologia a microprocessore.

Caratteristiche principali del DEFECTOMAT CP / EP:

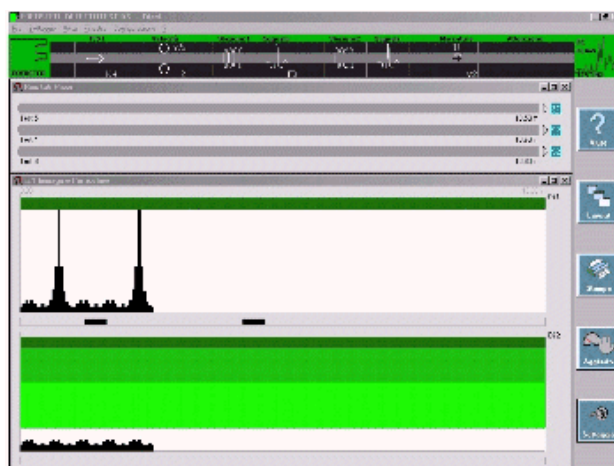
- Strumento digitale compatto a microprocessore per il controllo attraverso il metodo delle correnti indotte alla ricerca di difetti superficiali e subsuperficiali, con una scansione del 100% del materiale (eccetto pochi mm di testa e coda). L'elettronica di valutazione e test risulta completamente contenuta in un robusto housing di 19" particolarmente adatto per difficili condizioni di lavoro. L'apparecchiatura è dotata di un design compatto ed ermetico con sistema di raffreddamento interno. Le funzioni principali sono facilmente selezionabili direttamente con tasti funzione dell'apparecchiatura; altri comandi disponibili con una tastiera esterna (opzionale).
- Lingue disponibili: Tedesco, Inglese, Francese, ***Italiano***, Spagnolo, Giapponese, altre lingue disponibili a richiesta.
- 8 frequenze disponibili: 3, 6, 10, 15, 20, 30, 60, 100 KHz (frequenze appositamente focalizzate per il controllo di tubi) oppure : 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000, 3000 KHz.
- Analisi del segnale attraverso un canale differenziale, filtri passa basso e passa alto con regolazione dinamica automatica in base alla velocità, modificabili anche manualmente. Questa funzione permette di aggiustare automaticamente i filtri cambiando le impostazioni in funzione delle variazioni di velocità di passaggio del materiale, in modo da avere sempre la taratura ottimale.
- Valutazione del segnale con discriminazione del segnale tra difetti "piccoli" e "grandi" con due soglie indipendenti

- **Taratura "statica" del difetto:** memorizzazione del segnale proveniente dalla sonda di controllo in una finestra preimpostabile con possibilità di variare ampiezza e fase del segnale. Questa funzione permette di effettuare la taratura anche a posteriori, cioè dopo il passaggio del materiale.
- Doppia registrazione dei risultati di controllo
- Alta risoluzione VGA 640 x 480 pixels **a colori (CP)**, oppure **in bianco e nero (EP)**, semplice interfaccia operatore con visualizzazione delle principali funzioni, moderno sistema a finestre e semplici controlli operativi .
- RAM interna per il salvataggio ed il richiamo dei settaggi dell'apparecchiatura, fino ad un massimo di 24 settaggi differenti.
- Memory card per la memorizzazione esterna dei settaggi e della configurazione del sistema
- *Interfaccia Computer remoto (solo CP)*, interfaccia stampante
- *Canale assoluto (opzionale)*
- *Valutazione EN1971 oppure SFS (opzionale)(solo CP)*
- Interfaccia : per collegarsi a sistema di marcatura (massimo 2 classi) e sistema di selezione (massimo 3 classi)
- Report finale : possibilità a stampare protocollo di controllo per pezzi singoli o prodotti lunghi (filo, vergella, tubi in rotoli)
- Valutazione automatica in base ai difetti presenti in una sezione preimpostata secondo il numero o la densità

b) DEFECTOMAT DS



Nuovo sistema di controllo per la ricerca di difetti superficiali gestito interamente via PC (interfaccia Win NT)



- Sistema di controllo non distruttivo universale per la ricerca di difetti su filo, barre, tubi. E' in grado di interfacciarsi con tutte le sonde ed i sistemi di controllo FOERSTER, sia a correnti indotte (CIRCOGRAPH, DEFECTOMAT) sia a flusso disperso (Circoflux, Rotomat).
- Sistema di visualizzazione ed interfaccia operatore in ambiente Windows (WinNt), con menu guidati ed aiuti in linea;
- Documentazione dei risultati del controllo ampiamente personalizzabili, con memorizzazione a scelta di ogni elemento o di ogni segnale di difetto sia come conteggio sia come densità (EN1971);
- Separazione totale tra canale di controllo ed interfaccia utente per garantire il 100% del materiale controllato anche in presenza di eventuali "crash" del PC
- *Novità:* compensazione della distanza (Circograph) con aggiustamento automatico e procedura guidata;
- Monitoraggio continuo del sistema elettronico di controllo e *novità* monitoraggio del rumore di fondo della sonda di controllo per eventuali anomalie di funzionamento;
- L'elettronica di valutazione e test risulta completamente contenuta in un robusto housing di 12 HU o 37HU, nella quale è presente sia l'elettronica di controllo che il computer di interfaccia utente. Tutte le connessioni elettronica/PC sono accessibili facilmente, la porta frontale è dotata di serratura, IP54.
- 8 frequenze disponibili: ***standard1***: 1Khz, 3Khz, 10Khz, 30Khz, 100 Khz, 300 Khz, 1Mhz, 3Mhz ***standard2***: 3Khz, 6 Khz, 10 Khz, 15 Khz, 20 Khz, 30 Khz, 60 Khz, 100 Khz (opzionale 8 frequenze a scelta da 375Hz a 3Mhz)

- Filtro dinamico per mantenere inalterate le modalità di controllo al variare della velocità della linea
- ***Taratura "statica" del difetto:*** memorizzazione del segnale proveniente dalla sonda di controllo in una finestra preimpostabile con possibilità di variare ampiezza e fase del segnale. Questa funzione permette di effettuare la taratura anche a posteriori, cioè dopo il passaggio del materiale.
- **Nota:** Il sistema permette il "Remote Service", tutte le operazioni effettuate sullo strumento possono essere effettuate anche da un PC remoto. Eventuali problemi di funzionamento, taratura e/o ottimizzazione possono quindi essere risolti da FOERSTER ITALIA attraverso un collegamento telefonico.

c) DEFECTOMAT ECM



E' un modulo a correnti indotte con ottima relazione qualità/prezzo per la ricerca di difetti superficiali. E' in grado di controllare materiali ferrosi, austenitici e non ferrosi, sia con sezione circolare (come barre, tubi) ma anche sezioni più complesse (ovali, rettangolari, poligonali). E' disponibile sia in versione "stand alone", sia con oscilloscopio (analogico o digitale), è inoltre disponibile un SW di gestione del modulo.

Caratteristiche principali

- modulo per controllo a correnti indotte compatto, con microprocessore particolarmente adatto per rilevamento difetti superficiali in sistemi automatici o manuali, con selezione buono/scarto
- possibilità di collegare in serie altri moduli DEFECTOMAT e MAGNATEST
- rappresentazione dei messaggi in forma abbreviata su cristalli liquidi
- auto-test per malfunzionamento
- menu guidato per la taratura
- chiave di conferma variazione parametri di taratura con blocco di sicurezza

- memorizzazione interna fino a 16 set di parametri
- operatività semplificate per l'utilizzatore per mezzo della chiave e di 3 pulsanti di taratura
- frequenza fissa selezionabile tra: 1Khz, 3Khz, 10Khz, 30 Khz, 100 Khz, 300 Khz, 1 Mhz e 3 Mhz oppure modulo a frequenza variabile (opzionale)
- regolatore di fase (opzionale)
- modo dinamico
- filtri passa alto e passa basso regolabili separatamente
- n.3 soglie di selezione automatica impostabili separatamente
- modulo assoluto (opzionale)
- interfaccia seriale PC (software Ecm-Pc opzionale)
- interfaccia per scambio segnali con meccanica di movimentazione (ingressi via fotoaccoppiatori, uscite via relays)
- uscita analogica
- conteggio pezzi buoni/scarti
- dimensioni mm. 106x304x261,5 (BxPxH)
- peso Kg. 5 circa
- manuale di istruzioni italiano/inglese
- certificazione CE

4) Magnatest:

Il controllo all'arrivo delle merci o prima dell'assemblaggio evita danni successivi dovuti a materiali non corretti o componenti difettosi. Il controllo a correnti indotte tipo Magnatest consente il rilevamento precoce dei difetti produttivi; controllando il 100% del materiale si garantisce la massima qualità del prodotto.

Caratteristiche principali dello strumento

- alto rapporto qualità/prezzo
- elevata velocità di controllo sia in monofrequenza che in multi frequenza
- 100% compatibilità con bobine e accessori
- facile integrabilità all'interno delle linee di produzione

Il magnatest prevede inoltre:

- interfaccia windows come nuova interfaccia standard
- sequenza automatica di test
- menù guidati di calibrazione e configurazione

Principali caratteristiche tecniche:

- frequenze: 2H-10H
- 10 pezzi al secondo a 1kHz
- Valutazione: circolare, ellittica, rettangolare. Manuale ed automatica
- Peso: 15Kg

Esistono diverse versioni di magnatest tra cui possiamo menzionare il **magnatest ecm**, questo è un modulo a correnti indotte compatto ed economico per selezionare i campioni in base alle proprietà dei materiali, come durezza, composizione, profondità di tempra. Utilizzando un vero controllo magneto- induttivo con valutazione delle armoniche fornisce un affidabile strumento per individuare inammissibili deviazioni dalle proprietà richieste.

2.3.3.2 Limiti del metodo a correnti indotte

Le limitazioni del metodo sono in stretta relazione con le caratteristiche dei materiali in prova:

- il metodo è applicabile soltanto su materiali conduttori e per localizzare discontinuità superficiali o subsuperficiali a profondità non superiori a 10-15mm per materiali di conduttività medio-bassa. Questa profondità diminuisce drasticamente per valori di conduttività più elevati e per i materiali ferromagnetici.

- l'interpretazione delle indicazioni, agli effetti del riconoscimento del tipo di difetto è difficoltosa; l'automazione del metodo risulta difficile in taluni casi, come ad esempio quando il controllo dei tubi deve essere condotto dall'interno anziché dall'esterno.

2.3.3.3 Norme di riferimento

Normativa

La normativa di riferimento nell'applicazione delle prove non distruttive con il metodo a correnti indotte può essere divisa in tre categorie:

- 1) norme di metodo;
- 2) norme di prodotto;
- 3) norme per il personale.

Per quanto concerne le norme di metodo:

- UNI EN 1330-5 (30-11-00) comprende tutta la terminologia utilizzata nel controllo con correnti indotte;
- UNI EN 12084 (01-07-03) dettate i principi generali e le linee guida;
- UNI EN 13860-1(01-08-03) racchiude le caratteristiche dell'apparecchiatura e della strumentazione e le relative modalità di verifica;
- UNI EN 13860-2 specifica le caratteristiche della sonda con relativa modalità di verifica.

Per le norme di prodotto, ne citiamo alcune come la UNI EN 1971(30-09-00) che è specifica per i tubi in rame e sue leghe, e la UNI EN 7045(30-04-72) per i materiali metallici non ferrosi.

La qualifica e la certificazione per il personale è stata regolamentata in Europa dal 1993, in particolare la UNI EN 473 riguarda la qualifica e la certificazione del personale addetto alle prove non distruttive di cui fornisce i principi generali; mentre la UNI EN 45013 fornisce i criteri generali riguardanti gli organismi di certificazione preposti alla certificazione del personale.

Legge Quadro

La legge quadro sulla protezione dall'esposizione ai campi elettrici, magnetici, elettromagnetici ha lo scopo di evidenziare i principi fondamentali a cui attenersi per:

- tutelare la salute dei lavoratori e della popolazione dagli effetti derivanti dall'esposizione a determinati livelli di campi E, M, EM;
- promuovere la ricerca scientifica per la valutazione degli effetti a lungo termine;
- assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio promuovendo le innovazioni tecnologiche e adottando azioni di risanamento per minimizzare l'integrità e gli effetti dei campi suddetti con le migliori tecnologie disponibili.

Conclusioni

Per affrontare la materia è necessario approfondire le caratteristiche e le proprietà dei materiali, le tecniche e le metodologie. In tal modo è possibile contribuire, in modo qualificato, alla soluzione del problema inerente alla garanzia di qualità.

Per “garanzia di qualità” intendiamo il complesso di azioni sistematiche e ben pianificate volte ad assicurare che un impianto/sistema e sue parti, possano fornire le prestazioni richieste nelle diverse condizioni operative.

La qualità dei componenti stessi viene assicurata nella fase di monitoraggio in cui risulta essere possibile rilevare

difetti presenti in parti di pezzi assemblati senza che vi sia l’inutile azione di smontaggio. Attualmente la ricerca si sta occupando di due tematiche, l’una rivolta alla rilevazione sperimentale di difetti presenti in laminati metallici con l’uso di tecniche differenziali per una migliore risoluzione assiale, l’altra impegnata nello sviluppo di una modellistica numerica capace di determinare la risposta dei sensori di misura partendo dalle caratteristiche del campo elettromagnetico, delle proprietà dei materiali ispezionati e dalle tipologie dei difetti presenti. L’applicazione del metodo degli elementi finiti, necessaria alla modellistica numerica, comporta diversi problemi riguardo alla geometria dei sistemi trattati e alla loro discretizzazione. Una soluzione, a tale proposito, è quella di ricorrere a simulazioni tridimensionali mediante una tecnica di estrusione partendo dal modello bidimensionale.

PARTE III - CAPITOLO I

1.1 Le principali applicazioni

Viaggi in aereo?	Viaggi in treno?	Viaggi in macchina?	Guardi un quadro, una statua?
			
Ogni determinato numero di ore di volo almeno 50 particolari dell'aereo vengono controllati con PnD.	Le ruote, gli assili sono controllati con PnD	Almeno 30 particolari della tua auto sono controllati con PnD.	Miriadi di indagini sono fatte su tutte le opere d'arte con PnD

Rispetto ai **campi di applicabilità** le PnD, come abbiamo visto, possono essere distinte nelle seguenti tre classi:

- ***PnD superficiali***: idonee a rilevare anomalie superficiali ed in qualche caso sub-superficiali;
- ***PnD volumetriche***: idonee a rilevare discontinuità all'interno dello spessore;
- ***PnD globali***: idonee a verificare con un solo metodo la difettologia del componente (emissione acustica; ricerche di fughe).

In relazione, invece, alle **fasi di intervento**, le PnD possono essere classificate nel seguente modo:

- PnD per interventi su ***componente in esercizio*** (on line)
- PnD per interventi con ***componente fuori esercizio***

I vari metodi non distruttivi hanno in comune la caratteristica di fornire informazioni circa la conformità o meno dei materiali; d'altra parte essi sono fondati su differenti principi fisici per cui non esiste un metodo di prova non distruttiva a carattere universale; piuttosto, ogni metodo è idoneo più di altri a risolvere un determinato problema .

1.1.1 Scelta delle tecniche di controllo

E' importante notare che i vari metodi “ CnD “ risultano spesso complementari tra loro, quindi per una adatta scelta delle tecniche di controllo è necessario considerare diversi fattori:

- ✚ PROPRIETÀ FISICHE: Ferromagnetismo, conducibilità elettrica, acustica, opacità ai Raggi X, porosità del materiale.
- ✚ DIFETTI DA RICERCARE: Tipo, posizione, entità, ecc.
- ✚ GEOMETRIA: Forma e dimensioni, grado di finitura superficiale, ecc.
- ✚ STATO DEL MATERIALE: Laminato, forgiato, saldato, estruso, ecc.

1.1.2 Proprietà fisiche

Materiale	In particolare	Possibili CND	Perché?
Conduttore	Metalli (ferro, oro, argento, rame, alluminio, ecc.)	✚ metodo delle correnti indotte	il materiale da esaminare deve essere in grado di condurre l'elettricità affinché il campo magnetico possa generare correnti parassite nel pezzo indagato
		✚ radiografia	non sono opachi alle radiazioni, cioè i raggi X vengono assorbiti in funzione dello spessore e della densità della materia attraversata
		✚ ultrasuoni	sono in grado di far propagare le onde ultrasonore con frequenze comprese tra i 16 KHz e i

			20 MHz
		✚ metodo dei liquidi penetranti	possono essere applicati con successo su qualsiasi componente purchè non siano pezzi porosi, come ad esempio i sinterizzati oppure pezzi con superfici particolarmente rugose
Dielettrico	Materiali plastici	✚ radiografia	non sono opachi alle radiazioni
		✚ ultrasuoni	non presentano alta attenuazione acustica
	Ceramiche	✚ metodo dei liquidi penetranti	possono essere applicati su qualsiasi componente purchè non siano pezzi porosi
		✚ radiografia	non sono opachi alle radiazioni
		✚ ultrasuoni	non presentano alta attenuazione acustica
Magnetico	✚ Acciaio inox	✚ metodo dei liquidi penetranti	possono essere applicati su qualsiasi componente fatti salvi pezzi porosi come ad esempio i getti di ghisa oppure pezzi con superfici particolarmente rugose
	✚ Acciaio al carbonio (ferro magnetico)	✚ radiografia	non sono opachi alle radiazioni

	 Ghisa (ferromagnetico)	 ultrasuoni	non presenta controindicazioni al metodo
		 magneto scopia	è una metodologia che utilizza il magnetismo o meglio ancora il ferromagnetismo ossia la capacità di concentrare il campo per evidenziare le anomalie delle linee di flusso del campo magnetico nei pressi di un difetto
	Acciaio inox austenitico	 metodo delle correnti indotte	non è possibile applicare la magnetoscopia a un materiale che non si magnetizza
Non Ferro magnetico		 metodo dei liquidi penetranti	è sufficiente verificare la non porosità del pezzo
		 radiografia	non opaco alle radiazioni
		 ultrasuoni	non presenta controindicazioni al metodo
Calcestruzzo		 radiografia	è in grado di assorbire le radiazioni
Legno		 ultrasuoni	capace di assorbire o riflettere le onde ultrasonore

Materiale composito		 metodo dei liquidi penetranti	possono essere applicati su qualsiasi componente purchè non siano pezzi porosi
		 radiografia	non opaco alle radiazioni
		 ultrasuoni	non presenta alta attenuazione acustica

 L'esame visivo può essere applicato a qualsiasi materiale, non richiedendo il contatto con lo stesso o assorbimento di liquidi, onde o radiazioni.

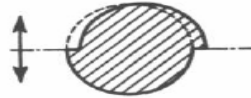
 La termografia può essere utilizzata su qualunque tipo di materiale con qualche difficoltà per i buoni conduttori (è particolarmente adatta per materie plastiche e materiali compositi).

 Gli ultrasuoni e la radiografia possono essere applicati su tutti i materiali, ma le onde rispettivamente ultrasonore e elettromagnetiche vengono assorbite in funzione dello spessore, della densità della materia attraversata e di altre proprietà intrinseche.

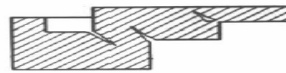
1.1.3 Difetti da ricercare

I difetti rilevati vengono classificati secondo criteri che prendono in considerazione la natura, l'estensione e la dimensione. Sotto sono riportati alcuni esempi di difetti riscontrabili.

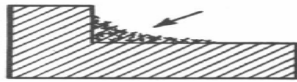
Difetti di forma



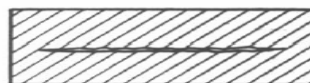
Soluzioni di continuità



Difetti di superficie



Cavità



Inclusioni



Difetto	Esempio	Possibili CND	Perché?
Superficiale e sub- superficiale	✚ Cricche da ritiro ✚ Cricche da fatica ✚ Cavità ✚ Porosità ✚ Ossidazione	✚ metodo delle correnti indotte	è possibile misurare il valore dell'impedenza ai capi del circuito primario influenzata dalla presenza di tali difetti
		✚ metodo dei liquidi penetranti *	è necessario che il liquido possa penetrare nel pezzo, ma i difetti non devono essere troppo grossi (accessibili anche all'acqua) né troppo piccoli (non penetrabili dal liquido stesso)
		✚ radiografia	i raggi X riescono ad attraversare il materiale e impressionano una lastra fotografica posta dietro l'oggetto da esaminare

		 termografia	Il test consiste nella misura della distribuzione superficiale di temperatura di un materiale con una termocamera che fornisce un'immagine termografica rappresentante in falsi colori le differenze di temperatura tra zone contigue per una profondità di 3-4 cm
		 magneto scopia	per evidenziare il difetto bisogna spruzzare le superfici con adatte sospensioni di polveri ferromagnetiche, colorate o fluorescenti, le cui particelle si concentreranno allineandosi lungo le linee di flusso del campo magnetico, che in presenza di un difetto deviano

			localmente e creano, ai bordi del difetto stesso, un'anomalia del campo magnetico.
Macro scopico superficiale	✚ ossidazione ✚ corrosione ✚ erosione ✚ frattura	✚ esame visivo	Il difetto viene rilevato a occhio nudo o con l'ausilio di telecamere che non riescono a rilevare difetti microscopici superficiali e a maggior ragione difetti interni
Interno	✚ inclusioni ✚ fessure ✚ cavità ✚ soffiature	✚ metodo delle correnti indotte	è in grado di rilevare inclusioni metalliche in materiali non metallici
		✚ radiografia	consente di vedere all'interno del pezzo esaminato consentendo una valutazione volumetrica dei difetti trovati
			i difetti possono essere distanti dal trasduttore pochi mm o diversi metri. La banda di

		🚧 ultrasuoni	frequenze utilizzate è compresa tra 100KHz e 50MHz (>frequenza del suono udibile dall'orecchio umano, 20KHz) e di conseguenza l'ultrasuono, avendo una lunghezza d'onda minore, viene riflesso da superfici molto piccole come i difetti all'interno dei materiali.
--	--	--------------	--

🚧 Con il metodo dell'emissione acustica non è possibile rilevare il tipo o la dimensione dei difetti, ma mediante l'applicazione di un determinato numero di sensori posti in posizioni adeguate, si rilevano la posizione della sorgente emissiva (localizzazione del difetto) e l'intensità dell'emissione acustica (entità dell'evoluzione del difetto).

🚧 Nel caso dei liquidi penetranti non devono essere chiusi quali porosità, ripiegature, cricche da rettifica, da tempra, da saldatura, da fatica. Non permette la rilevazione di cricche subsuperficiali.

🚧 Il metodo dei liquidi penetranti non permette di valutare in maniera quantitativa la dimensione dei difetti.

🚧 Il metodo degli ultrasuoni invece permette di stabilire la profondità e la dimensione dei difetti all'interno dei materiali.

 La tecnica degli ultrasuoni non è particolarmente adatta per gli esami di superficie, ma con particolari sonde si possono rivelare i difetti affioranti.

1.1.4 Geometria

Geometria del pezzo	Possibili CND	Perché?
Complessa	 metodo delle correnti indotte	non è necessario il contatto fisico tra sonda e superficie in esame
	 esame visivo	per esame visivo s'intende non solo l'ispezione degli oggetti ad occhio nudo ma anche con l'ausilio di lenti od endoscopi a fibre ottiche (piccole telecamere che in alcuni casi non raggiungono

		il diametro di cinque millimetri), che permettono di accedere anche all'interno di pezzi complessi e inaccessibili
Semplice	 radiografia	la proiezione di pezzi dà luogo a sfondi relativamente omogenei, nei quali ogni piccola variazione d'intensità d'annerimento (o di luminosità) è facilmente osservabile ed interpretabile
	 metodo dei liquidi penetranti	l'esame è limitato a zone facilmente accessibili e raggiungibili dal rivelatore, per effettuare la pulizia preliminare, l'applicazione del liquido, il lavaggio con acqua e la stesura del rivelatore
	 magnetoscopia	per evidenziare il difetto occorre spruzzare le superfici con adatte sospensioni di polveri ferromagnetiche, colorate o fluorescenti e di conseguenza le superfici devono essere facilmente accessibili
Simmetrica e semplice		la presenza di superfici piane o cilindriche, di piani paralleli o comunque in

	 ultrasuoni	grado di riflettere efficacemente l'onda di fondo rende più efficace e semplice il controllo
Con alto grado di finitura superficiale	 ultrasuoni	il metodo richiede uno stato superficiale che consenta, o non ostacoli eccessivamente il passaggio degli ultrasuoni
	 metodo dei liquidi penetranti	può presentare segnali in corrispondenza delle porosità, delle rugosità da lavorazione meccanica più accentuate, o degli spigoli vivi di battute, o presso il fondo gola delle filettature; segnali la cui classificazione quali reali difetti può lasciare molti dubbi
	 magnetoscopia	poco adatta per l'esame dell'integrità superficiale di pezzi porosi, quali i getti di ghisa, e pezzi con superfici troppo scabrose, rugose, filettate

1.1.5 Stato del materiale

Stato	Possibili CND
Laminato	✚ metodo dei liquidi penetranti
	✚ radiografia
	✚ ultrasuoni
	✚ magnetoscopia
	✚ metodo delle correnti indotte permette l'analisi anche di parti in movimento (possibilità di esame di pezzi in uscita da macchinari quali laminatoi)
Forgiato	✚ metodo dei liquidi penetranti
	✚ radiografia
	✚ ultrasuoni
Fucinato	✚ ultrasuoni
	✚ magnetoscopia
Trafilato	✚ metodo dei liquidi penetranti
	✚ radiografia
	✚ ultrasuoni: disponendo d'un generatore d'adeguata potenza è possibile individuare difetti distanti anche parecchi metri dal trasduttore. Ciò permette il controllo dell'integrità di trafilati anche molto lunghi (per es. barre)
	✚ metodo delle correnti indotte

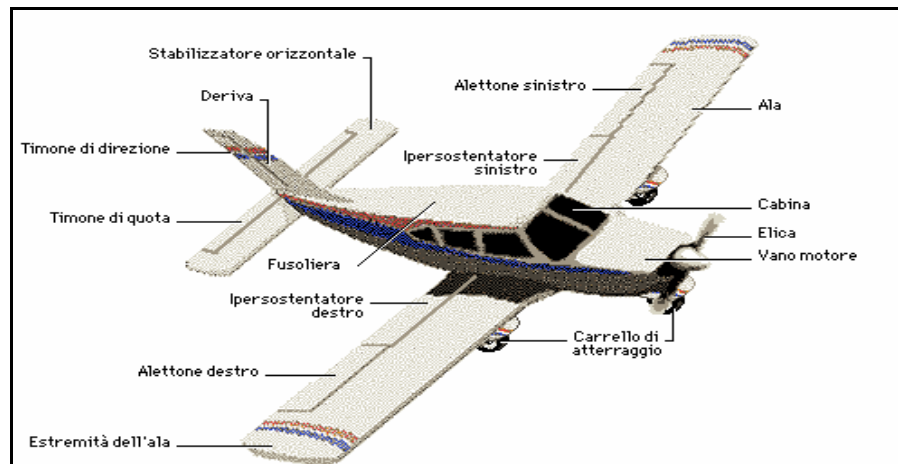
	permette l'analisi anche di parti in movimento (possibilità di esame di pezzi in uscita da macchinari quali trafilati)
Fuso	+ metodo dei liquidi penetranti (risulta adatto a rilevare difetti affioranti in superficie, come giunti freddi o cricche di ritiro)
	+ radiografia
	+ ultrasuoni
	+ esame visivo
Saldato	+ metodo dei liquidi penetranti
	+ radiografia
	+ ultrasuoni
	+ magnetoscopia
	+ metodo delle correnti indotte
	+ esame visivo

1.2 Particolari casi di applicazione

1.2.1 L'aereo

Le parti principali di un aereo sono la fusoliera, le ali, la coda e il carrello di atterraggio. La fusoliera ospita il pilota, i passeggeri e il carico. Le ali sono conformate in modo da consentire il sollevamento del velivolo; la coda comprende i pezzi mobili, il timone di direzione e i timoni di quota, che regolano il beccheggio e le svolte. La deriva e lo stabilizzatore

orizzontale sono fissi e aumentano la stabilità durante il volo. Il carrello di atterraggio permette il movimento dell'aereo a terra.



I principali controlli non distruttivi applicabili per la sicurezza nei voli sono:

➤ le correnti indotte per il controllo

✚ su parti in lega di alluminio per la ricerca di cricche da fatica e aree corrosive (a parità di volume, l'alluminio pesa circa $\frac{1}{3}$ del rame e dell'acciaio. Anche per questa ragione l'80% del peso di un aereo da trasporto è dato dall'alluminio);

✚ su viti, bulloni, dadi ed altri particolari miniaturizzati, inseriti in strutture più ampie come l'ala, dal momento che la distribuzione delle correnti parassite interessa un volume molto ristretto per cui il test che si effettua è di tipo localizzato.

➤ l'ultrasuono (e precisamente le **onde di Lamb** come particolare forma di propagazione) per il controllo

✚ degli incollaggi delle strutture metalliche. Le onde di Lamb hanno un complesso modo di vibrazione delle particelle e si manifestano quando

lo spessore del materiale interessato dal fenomeno è minore della lunghezza d'onda dell'ultrasuono che lo attraversa;

- delle palette del compressore nei motori.

➤ la magnetoscopia per l'ispezione dell'integrità superficiale di numerosi componenti il cui materiale presenta apprezzabili caratteristiche ferromagnetiche

- parti in acciaio di alberi di trasmissione;

- parti vitali del motore quali i dischi turbina;

- gambe del carrello di atterraggio.

- tutta la bulloneria ferromagnetica utilizzata nelle giunzioni critiche presenti sull'aereo.

➤ l'esame visivo per rilevare danni, perdite e le condizioni di elementi o parti purché effettuabili con accesso immediato attraverso l'apertura di pannelli e portelli di ispezione.

➤ la termografia per

- Controllo delle temperature di parti critiche di motori.

- Controllo dei sistemi di raffreddamento delle camere di combustione.

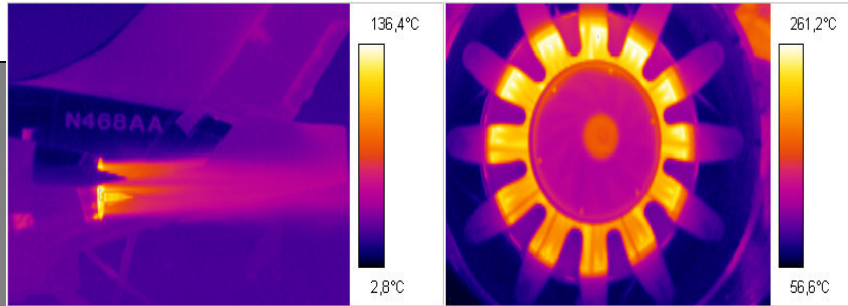
- Controllo delle temperature delle palette delle turbine.

- Studi della temperatura di combustibili solidi durante la combustione.

- Analisi delle temperature dell'aria in ingresso alla turbina.

- Individuazione di infiltrazioni d'acqua sulle superfici di materiale composito di aerei.

- Analisi termica dei circuiti elettronici a bordo.



Esempio di controlli sul funzionamento delle turbine di motori

1.2.1.1 L'ala

La struttura tipica dell'ala consiste di un'intelaiatura formata da due longheroni e centine (legno o ferro) racchiusi da una sottile lamina metallica di rivestimento o da rivestimenti plastici rinforzati. Le centine, poste ad angolo retto rispetto ai longheroni, conferiscono all'ala la sua forma esterna. Data la presenza di legno o ferro, di rivestimenti metallici e plastici, i controlli più indicati e compatibili con i diversi materiali sono:

- ✚ radiografia;
- ✚ ultrasuoni.



L'ala è assemblata alla fusoliera

Inoltre per verificare le turbolenze che le estremità delle ali possono sopportare si eseguono:

- ✚ prove dinamiche che impiegano prevalentemente cilindri idraulici e calcolatori di processo che coordinano i movimenti per rendere le sollecitazioni uguali a quelle dei voli quotidiani.

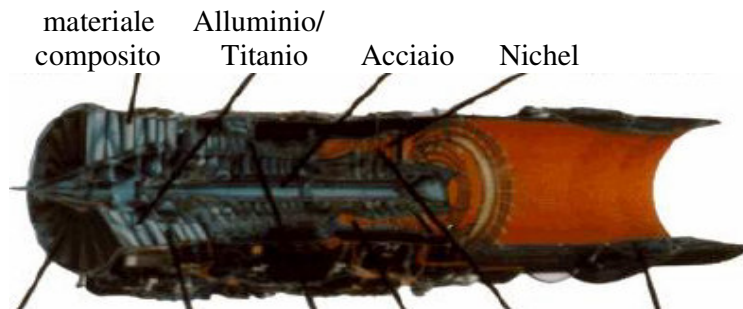


1.2.1.2 Il motore

Le parti fondamentali sono il compressore, la camera di combustione e la turbina. Il compressore immette aria nel motore facendo aumentare la temperatura e la pressione. L'aria ad alta pressione viene miscelata al combustibile ed accesa nella camera di combustione, dove i gas molto caldi si espandono rapidamente e ad alta velocità passano nella turbina. I gas attraversano la turbina e vengono espulsi dall'effusore determinando la spinta dell'aereo. Il movimento di rotazione della turbina, indotto dal passaggio dei gas di scarico, viene trasmesso attraverso alberi di trasmissione al compressore che aspira altra aria.

Acciaio e leghe di titanio (usata per le palette del compressore, generalmente forgiata) sono largamente usati nei motori, ma negli stadi più

caldi si richiedono le leghe di nichel usate per le palette degli stadi finali del compressore e per i dischi delle turbine ad alta pressione. Tra i materiali utilizzati per le alte temperature assumono particolare importanza i ceramici. Infatti la loro utilizzazione nelle turbine potrebbe permettere di lavorare a temperature più elevate con il risultato di avere a disposizione una maggiore spinta. Esempi tipici sono il Nitruro di silicio, l' Allumina, il Carburo di silicio che hanno temperature di fusione pari a circa 2550 °C e densità più basse dei metalli ($\sim 5.8 \text{ g/cm}^3$).



Sia per i componenti in acciaio o nichel e forgiati sia per i ceramici si possono realizzare:

- ✦ radiografia;
- ✦ metodo dei liquidi penetranti;
- ✦ ultrasuoni;

per le parti in acciaio o nichel si possono inoltre effettuare controlli con:

- ✦ magnetoscopia;

✦ metodo delle correnti indotte.

1.2.2 La ferrovia e il treno



La ferrovia è il sistema di trasporto su veicoli a ruote che si spostano su guide di ferro parallele, dette binari.

I principali controlli non distruttivi applicabili per la sicurezza nei trasporti ferroviari sono:

➤ l'esame visivo per controllare

- ✚ l'usura del rodiggio, in termini di usura del profilo trasversale e circonferenziale delle ruote;

- ✚ la variazione delle caratteristiche e la rottura degli eventuali elementi smorzanti nelle sospensioni; la superficie esterna esaminata a vista deve essere esente da qualunque difetto come ripiegature, bruciature, incisioni, scagliature o altro che possa nuocere all'impiego delle molle.

➤ le correnti indotte per il controllo

- ✚ su parti in lega di alluminio per la ricerca di cricche da fatica e aree corrosive (a parità di volume, l'alluminio pesa circa 1/3 del rame e dell'acciaio);

- ✚ su viti, bulloni, dadi ed altri particolari miniaturizzati, inseriti in strutture più ampie.

➤ la termografia per

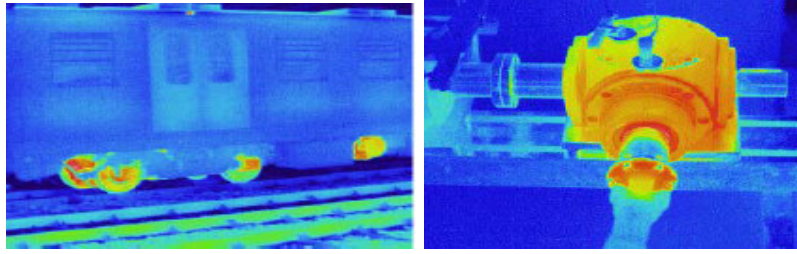
- ✚ analisi del corretto funzionamento di componenti meccanici;

- ✚ misura di temperatura componenti elettrici quali motori, resistori, pantografi ecc.;

- ✚ individuazione delle boccole o cuscinetti degli assili ;

- ✚ controllo sistema di condizionamento a bordo vetture;

- ✚ analisi della ruota attraverso l'immagine acquisita da una termocamera per evidenziare la distribuzione del surriscaldamento in fase frenante.



Il controllo del funzionamento dei freni di convoglio ferroviari avviene sia a distanza ravvicinata sia da distanze maggiori, infatti grazie alla notevole risoluzione delle immagini e alla sensibilità della termocamera è possibile effettuare con precisioni controlli sul materiale rotabile anche a distanza di sicurezza dai treni mentre questi sono in transito sulle linee ferroviarie evidenziando con precisione ogni possibile problema di surriscaldamenti anomali.

➤ gli ultrasuoni per controllo di:

- ✚ assili ferroviari in opera, che permettono di controllare integralmente l'assile con esplorazione di entrambe le superfici esterne, introducendo in un punto, mediante attuatori piezoelettrici, vibrazioni ad opportune frequenze che poi si propagano anche fino a distanze molto elevate. Al termine della tratta vi è un opportuno sensore di ricezione e, dall'ampiezza del segnale rilevato, è possibile dedurre se e quanta parte della rotaia si stia fratturando;
- ✚ serbatoio di aria compressa per impianto frenante in opera (non smontato), per verificare eventuali variazioni di spessore rispetto ai dati di progetto, sia sulle generatrici che sui fondelli.
- ✚ sale montate, ovvero l'insieme delle ruote e degli assili.

✚ molle ad elica di acciaio per sospensioni alla frequenza di 5MHZ, con una sonda di 10 mm di diametro. L'esame della superficie viene effettuato con controllo magnetico per rilevare la presenza di difetti superficiali o sub superficiali.

➤ l'esame visivo, la magnetoscopia, il metodo con i liquidi penetranti, la radiografia e gli ultrasuoni per ispezionare:

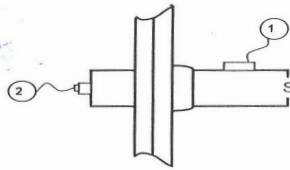
✚ I giunti saldati.

➤ il metodo delle correnti indotte, gli ultrasuoni, la radiografia e il metodo vibrazionale (per valutare i livelli di vibrazioni sulle parti strutturali delle linee ferroviarie) per verificare l'integrità delle:

✚ Rotaie (guide metalliche).

1.2.2.1 Certificato di controllo sugli assili

(eseguito dalla Traterm, un'azienda specializzata in controlli non distruttivi).

 TRATERM CONTROLLI NON DISTRUTTIVI TRATTAMENTI TERMICI CASTELDARIO (MN)		CONTROLLI NON DISTRUTTIVI NON DESTRUCTIVE EXAMINATIONS CONTROLLO CON ULTRASUONI ULTRASONIC EXAMINATION REPORT		2004 UT - 1351 Foglio 1 / 1 Sheet Pagina 1 Page
CLIENTE Spett. GESFA ORDINE P.O. Nr. APPARECCHIO CARRO PIANALE SIGLA 3176 393 3 287-1 Vessel Item			Comm. N° Job Nr. TARGA N°: Matr n°:	
OGGETTO Object CONTROLLO ULTRASONORO ASSALI DI MEZZI FERROVIARI				
STADIO DI LAVORAZIONE Working step D0P0 L'ESERCIZIO PERIODICO				
SPECIFICA DI CONTROLLO Examination procedure del 30/3/1994 P.S.C.-C.N.D.n°9(Rif.I/MR.TC.QU/cnd/7.2.7			CONDIZIONI SUPERFICIALI Test surface status DA ESERCIZIO	
RIVELATORE Equipment KRAUTKRAMER TIPO USM25		SCHIZZO Sketch		
TRASDUTTORI Search units ONDE Waves TIPO type FREQ. Frequency (MHz) TIPO Size (mm) ANGOLO Angle				
LONGIT. Longitudinal B2Sn 2 24 0°		LATO DX & SX ASSALE N° 1 :UT 27142 ASSALE N° 2 :UT 26836 ASSALE N° 3 :UT 825710 ASSALE N° 4 :UT 27010		
TRASVERSALI Shear MWB 4 8 X 9 45° MWB 4 8 X 9 70°				
BLOCCO DI RIFERIMENTO Reference block V1; V2-				
ACCOPPIAMENTO PER MEZZO DI Coupling by OLIO				
POSIZIONI DI ESPLORAZIONE Scanning position			NOTE Remarks	
1 ☒ MWB45°;70° 2 ☒ B2Sn 3 4 5 6			7 8 9 10 11 12 controllo eseguito con assali montati.	
RISULTATI DELL'ESAME Examination results DAL CONTROLLO NON SONO EMERSE ANOMALIE				
DATA Date	COSTRUTTORE Manufacturer		TRATERM	ISPETTORI Inspectors
16/02/2004			BOCCHINI PAOLO RT-UT-MT-LP LEVEL 2.....	

1.2.3 Il monitoraggio strutturale

Il monitoraggio strutturale è rivolto prevalentemente al restauro ed all'ampliamento di vecchi edifici, sia in muratura che in cemento armato. Un completo *check up* dell'opera eseguito in un determinato momento della vita della struttura, consente di poter istruire la sua "cartella" e seguire (meglio prevenire) le variazioni della sua sicurezza. Infatti dal punto di vista della sicurezza, effettuare indagini diagnostiche su una costruzione civile consente di verificare i parametri originali di progetto ed apprezzarne gli eventuali scostamenti dalle condizioni di normalità di esercizio, nonché eventuali anomalie strutturali e/o di esercizio.

- Esame visivo: per formulare correttamente il progetto d'indagine si deve per prima cosa procedere all'ispezione ed alla redazione dell'esame visivo, che deve riportare tutti i difetti rilevati, quadro fessurativo, macchie di ruggine, distacchi del calcestruzzo etc..
- Ultrasuoni: sono prove basate sulla modalità di propagazione di onde elastiche di vibrazione che vengono fatte viaggiare attraverso il mezzo in esame. Le prove consistono nella misura dei tempi di propagazione delle onde elastiche indotte nel mezzo fra due punti con distanza nota (trasmissione e ricezione).



Si posiziona un trasmettitore di tipo piezoelettrico od impulsivo (martello) su un lato della parete ed un ricevitore, anch'esso di tipo piezoelettrico (geofono) sul lato opposto. Un "interval-timer" effettua la lettura del tempo t intercorso tra la generazione e la ricezione del disturbo sonico. Nota di distanza L tra ricevitore e trasmettitore si ricava come rapporto L/t la velocità di propagazione dell'onda sonora attraverso le pareti.



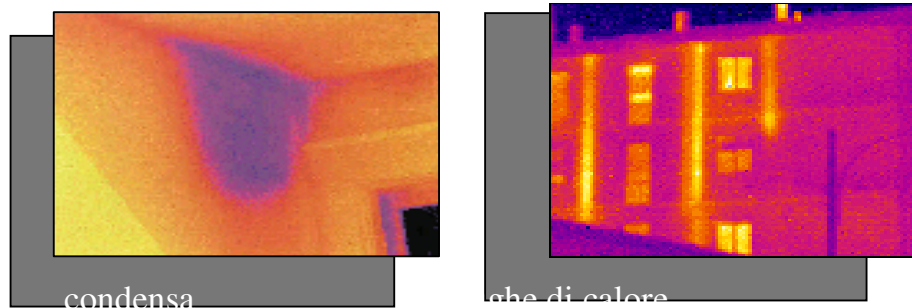
Trasmettitore e ricevitore piezoelettrici

➤ **Indagine magnetometrica:** mediante un pacometro si è in grado di identificare la presenza di elementi metallici (ferromagnetici) al di sotto delle superfici intonacate o lapidee. I pacometri sfruttano il principio dell'induzione magnetica ed è essenzialmente costituito da una sonda con la quale si spazzola la superficie da esaminare e da una centralina di rilevamento, capace di emettere un segnale digitale e sonoro allorquando viene rilevata la presenza di un tondino d'acciaio.



Utilizzo di un pacometro

- Rilievi fotogrammetrici: verifica dati dimensionali e posizione elementi.
- *Termografia*: la lettura dell'immagine ottenuta consente di identificare la presenza di differenti materiali che compongono la struttura (pietre, mattoni, malta ecc.) e di analizzarne le possibili anomalie presenti (distacchi d'intonaco, infiltrazioni di umidità, presenza di travi, tubature, finestre murate ecc.).

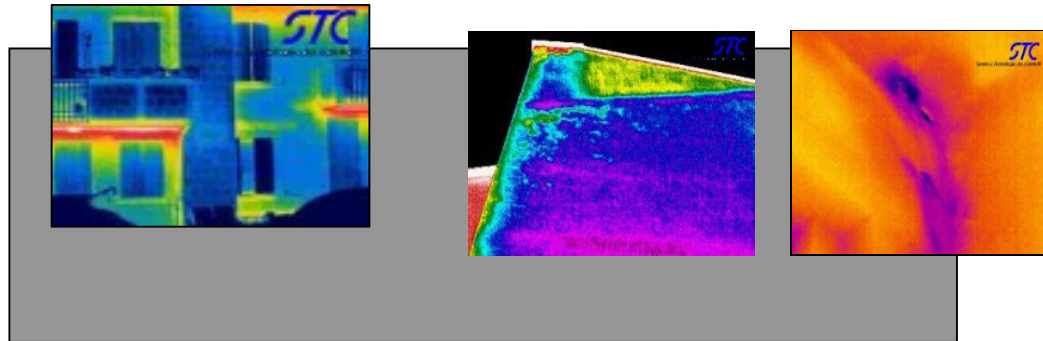


1.2.3.1 Termografia applicata a edifici e tetti

La termografia ad infrarossi viene spesso impiegata per individuare e ridurre le *dispersioni di energia degli edifici*. La capacità di identificare la causa dei difetti imputabili a una costruzione scadente o a una condensa formatasi a causa di un isolamento non adeguato o inesistente, assume un ruolo importante nell'incremento dell'efficienza in termini di risparmio energetico. L'indagine termografica applicata alle *superfici murarie* consente, dalla individuazione di zone a differente temperatura, di *evidenziare la presenza di strutture architettoniche nascoste*. Infatti le

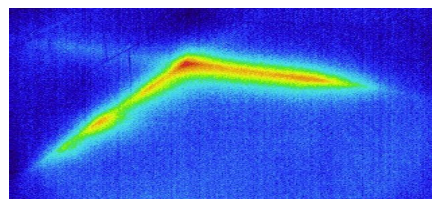
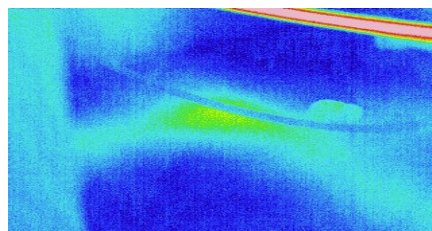
diverse risposte in temperatura sono causate da differenze di conducibilità e di capacità termica tra i materiali posti all'interno delle pareti. La condensazione che si forma per un isolamento difettoso del muro si tradurrà nel tempo in deterioramento e, di conseguenza, in elevati costi di riparazione.

L'umidità nascosta in un tetto costituisce una causa ancor più grave per quanto riguarda dispersione di energia e deterioramento del sistema di isolamento. E' senz'altro meno oneroso riparare o sostituire una parte di un tetto che ricostruirne uno completamente.



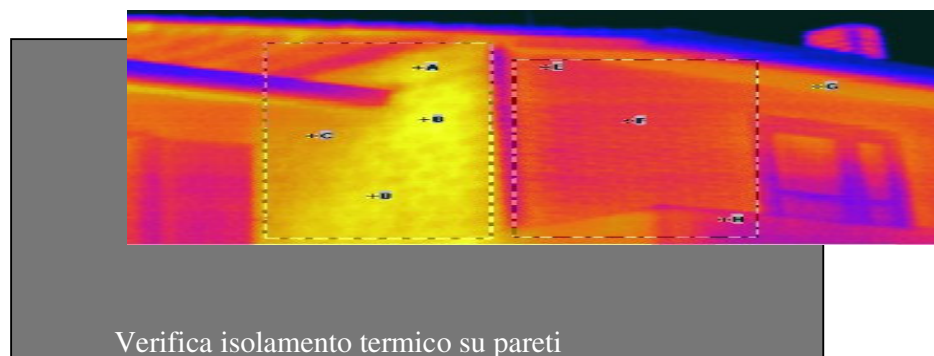
1.2.3.2 Sistemi di riscaldamento e perdite idrauliche

La sorveglianza ad infrarossi può rivelarsi estremamente efficace per localizzare *perdite di vapore sulle linee, difetti del sistema di isolamento sulle linee di distribuzione del vapore e scaricatori di condensa difettosi*. La termografia consente di risparmiare tempo e denaro individuando e rilevando eventuali *perdite nelle condutture sotterranee*.



Il vantaggio principale di questo tipo di analisi è che si opera senza dover rompere alcun tipo di parete o pavimento per la ricerca dell'eventuale perdita o ostruzione.

1.2.3.3 Isolamento termico



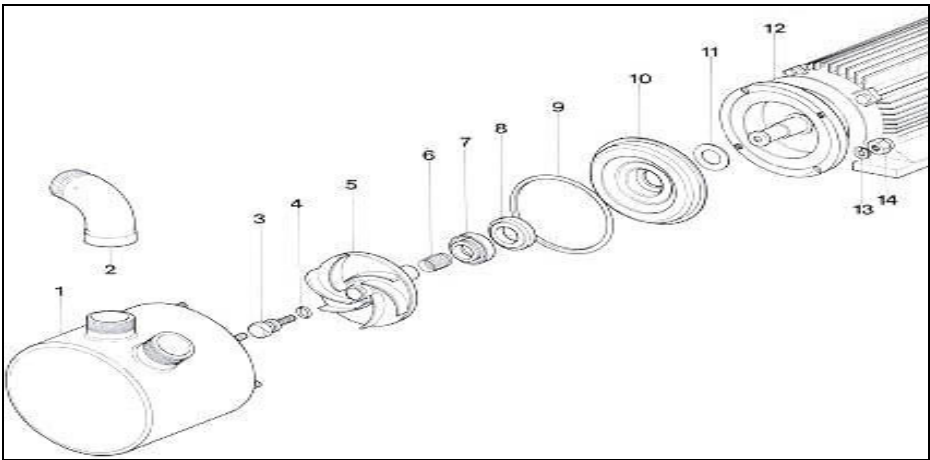
- ✦ Verifica condizioni isolamento interno alle pareti
- ✦ Verifica isolamento termico sugli infissi

- ✦ Verifica isolamento delle tubazioni dell'impianto di riscaldamento

1.2.3.4 Controllo di tubi di caldaia, di scambiatori di calore e d'acqua

- Le correnti indotte vengono usate comunemente per il controllo di materiali non ferrosi (amagnetici), come i tubi di condizionatori d'aria.
- La magnetoscopia è impiegata per l'ispezione di materiali in acciaio (magnetici), come tubi di caldaia e tubazioni d'acqua.
- Gli ultrasuoni possono essere usati per una precisa misurazione dello spessore ed una rilevazione di cricche in tubi di caldaia.

1.2.4 Pompa autoadescante



1	CORPO POMPA	INOX	8	PARTE FISSA TENUTA MECCANICA	CERAMICA, BUNA O VITON O TEFLON
2	CURVA D'USCITA	INOX	9	O.R. TENUTA CORPO	BUNA O VITON
3	VITE GIRANTE	INOX	10	PIATTO PORTA TENUTA	INOX
4	O.R. VITE GIRANTE	BUNA O VITON	11	ANELLO DISTANZIATORE	INOX
5	GIRANTE	INOX	12	MOTORE ELETTRICO	-
6	ANELLO COMPENSATORE	ACCIAIO	13	RONDELLA	ACCIAIO
7	PARTE ROTANTE TENUTA MECCANICA	GRAFITE,BUNA O VITON O TEFLON, INOX	14	DADO BLOCCAGGIO	OTTONE

E' necessario effettuare controlli su:

✚ lo stato della girante per verificare la presenza di eventuali segni di cedimento, solitamente delle crepe alla base delle alette; poiché il materiale costituente è l'acciaio inox, le tecniche possono essere:

- ✚ metodo dei liquidi penetranti;
- ✚ radiografia;
- ✚ ultrasuoni.

✚ lo stato delle valvole di aspirazione e di mandata pulendole accuratamente e accertandosi che non si sia fermato qualche corpo estraneo che ne impedisca il perfetto funzionamento; le valvole per bassa pressione sono generalmente di ottone, ghisa o plastica, mentre per le valvole ad alta pressione si ricorre all'acciaio o all'acciaio inossidabile, nel caso in cui il fluido sia corrosivo; in questo caso i controlli sono quelli sopra riportati, invece nel caso di valvole in ghisa è possibile effettuare anche la

✚ magnetoscopia, essendo la ghisa un materiale ferromagnetico.

Nel caso di valvole di plastica i controlli sono:

✚ radiografia;

✚ ultrasuoni.

✚ lo stato delle membrane verificando che non ci siano crepe e che siano morbide ed elastiche;

✚ il filtro e il tubo di aspirazione e di mandata accertandosi che non siano intasati.

✚ la parte rotante per la tenuta meccanica con tecniche che consentono il monitoraggio di parti in movimento:

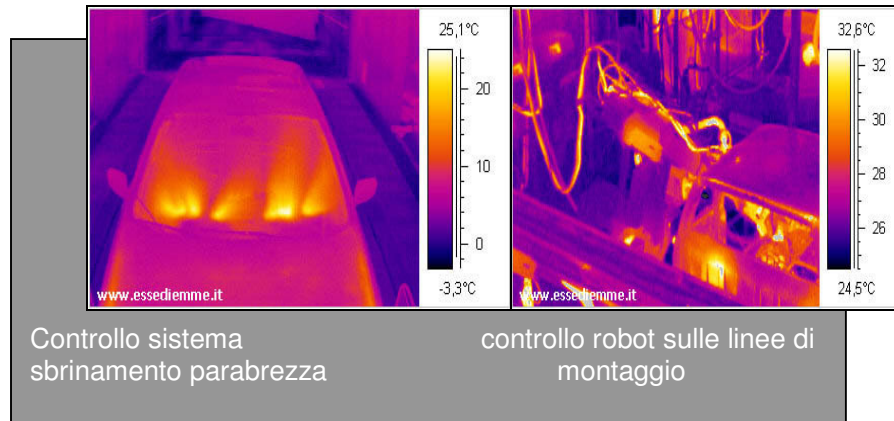
✚ la termografia

✚ il metodo delle correnti indotte (se il materiale è conduttore).

1.2.5 Settore Automobilistico

Un'auto è sottoposta a una serie di prove non distruttive, data la varietà di componenti che la costituiscono:

- Esame visivo: questa tecnica trova applicazione nella ispezione di motori diesel o turbine per gruppi elettrogeni, condotte gas o fluidi, pompe o compressori, riduttori, scatole di ingranaggi, cambi, condotte di aspirazione, ecc.
- Magnetoscopia: vengono ispezionate parti in acciaio e gli ingranaggi;
- Radiografia: un'applicazione molto diffusa riguarda l'impiego di intensi fasci di raggi X. per radiografare componenti meccanici, per assicurare la qualità delle fusioni e delle saldature;
- Termografia per:
 -  Analisi delle variazioni termiche su freni.
 -  Distribuzione termica sui radiatori con ventola di raffreddamento.
 -  Distribuzione termica di motori, turbocompressori, marmitte, lunotti termici, condizionatori, ecc.
 -  Studi sulla distribuzione termica del riscaldamento sedili.
 -  Analisi termica della superficie dei pneumatici durante test sul banco prova.
 -  Analisi della distribuzione termica durante l'apertura dell'air bag
 -  Controllo del ciclo produttivo di automobili con ispezioni termografiche sulle linee di montaggio per monitorare il funzionamento di robot addetti alla saldatura ed alla verniciatura.



1.2.5.1 Test di affidabilità di componenti elettrici e meccanici

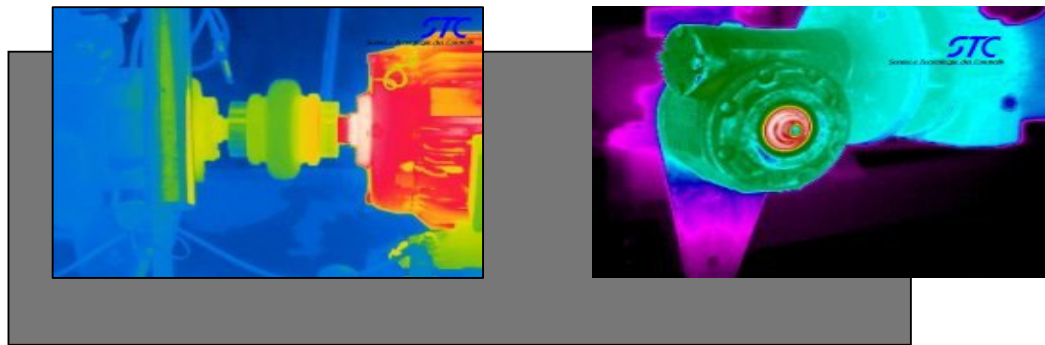
Un controllo ad infrarossi dedicato all'*impianto elettrico* consente di identificare le anomalie causate dall'azione tra corrente e resistenza. La presenza di un punto caldo all'interno di un circuito elettrico è dovuta di solito ad un collegamento corrosivo, ossidato oppure allentato, o, ancora, al malfunzionamento del componente in questione.

Per i componenti meccanici, Il livello eccessivo di calore può essere dovuto alla frizione prodotta da cuscinetti difettosi, lubrificazione insufficiente, normale usura. I meccanismi ispezionabili con la termografia ad infrarossi comprendono

-  ingranaggi
-  alberi
-  dispositivi di accoppiamento
-  cinture trapezoidali
-  pulegge

- ✚ frizioni
- ✚ pneumatici riparati
- ✚ cuscinetti (il controllo si basa sul principio dell'attrito generato all'interno dei cuscinetti in condizioni anomale)

Il principale vantaggio che si trae dal verificare con questo metodo le parti meccaniche è un notevole risparmio di tempo (riduzione dei fermi macchina), in quanto si localizza rapidamente l'area in cui si è presentato il problema.



Nel caso di determinati componenti elettromeccanici la termografia è l'unica tecnica di ispezione che consenta di determinare quale tipo di intervento sia opportuno, se di manutenzione o di riparazione: si potrebbero individuare i punti caldi sulle spazzole di alimentazione all'interno di un motore, che indicano un contatto insufficiente dovuto a consumo disuguale e la necessità di rettificare il collettore.

➤ Metodo dei liquidi penetranti, emissione acustica, radiografia ultrasuoni e termografia per misurare e caratterizzare il danneggiamento di materiali compositi in fibra di vetro e polipropilene per uso

automobilistico, evidenziando vantaggi e difetti dei laminati per uso in componenti.

1.2.6 I Serbatoi di stoccaggio

Sono degli elementi fondamentali nella catena di produzione di ogni impianto di trasformazione. I prodotti contenuti, le condizioni atmosferiche e di esercizio, l'età li rendono potenzialmente ad alto rischio di inquinamento ambientale. Le esigenze di produzione raramente consentono di poterli mettere fuori servizio.

I CND per i serbatoi di stoccaggio sono i seguenti:

- Controllo con EMISSIONI ACUSTICHE del fondo per il rilievo di corrosioni e perdite, con serbatoio in esercizio;
- Controllo con MAGNETOSCOPIA del fondo per la mappatura della corrosione proveniente anche dalla parte non calpestabile del fondo, con serbatoio aperto ed in manutenzione.
- Misura degli spessori di mantelli e tetti con CORRENTI INDOTTE e/o ULTRASUONI.
- Controllo con ESAME VISIVO per il rilievo di difetti macroscopici superficiali. Questo metodo è utile per interpretare indicazioni dubbie provenienti da altri controlli non distruttivi come gli ultrasuoni.
- Controllo con RILEVAZIONI DI FUGHE per verificare la fuoriuscita di liquidi che non può essere tollerata.

- Controllo con TERMOGRAFIA per determinare il livello del liquido in serbatoi.



1.2.7 Apparecchiature a Pressione (recipienti, tubazioni)

L'esame visivo è sicuramente una tecnica utilizzata per il controllo delle apparecchiature a pressione, ma l'affidabilità di questo controllo è spesso minore di quella offerta da altri metodi. Le correnti indotte e i controlli radiografici sono utilizzati per verificarne l'integrità, ma questi ultimi hanno lo svantaggio che i risultati delle analisi sono ottenuti 'off line', ossia fuori dalla linea di produzione, dopo il processo di sviluppo fotografico. Si avverte invece la forte esigenza da parte delle industrie di misure dello spessore delle pareti dei tubi 'in line', senza la necessità di bloccare parti del ciclo produttivo. Le emissioni acustiche sono un metodo ideale per il controllo integrale di grandi apparecchiature a pressione, infatti analizzando la quantità e le proprietà dei segnali dell'EA, si possono ottenere informazioni relative ai processi che si stanno verificando all'interno di una struttura posta sotto sforzo. Le apparecchiature a pressione o le linee non devono essere messe fuori servizio. Le rilevazioni di fughe consentono di garantire la massima tenuta.



1.2.8 Controlli sui pali di fondazione

Il progettista di una qualsiasi costruzione, trovandosi spesso di fronte a terreni con scarsa resistenza a compressione, deve adottare dei sistemi di fondazioni profonde come i pali in cemento armato che, se da un lato risolvono l'esigenza di aumentare la capacità portante, dall'altro generano problemi che possono influenzare la struttura, come quelli relativi alla fase di esecuzione (perforazione e getto).

Nei controlli non distruttivi sui pali di fondazione in cemento armato si possono distinguere due principali metodologie di prova: **gli ultrasuoni e i metodi dinamici**.

➤ I primi, più propriamente detta metodologia del Cross-Hole, si basa sul principio che le caratteristiche di un segnale sonico impulsivo (velocità di propagazione, ampiezza e frequenza), che si propaga attraverso un materiale, sono legate alle proprietà elastiche ed alla consistenza del materiale stesso. La tecnica di prova consiste nell'effettuare misure soniche tra coppie di fori che si sviluppano per tutta la lunghezza del palo. L'apparecchiatura è costituita da due sonde (una trasmittente e una ricevente) che si muovono all'interno della struttura in esame, utilizzando dei tubi inseriti e inglobati nel calcestruzzo in fase di realizzazione della struttura stessa. Le sonde sono collegate a uno

strumento ad **ultrasuoni** che provvede a generare il segnale sonico impulsivo attraverso la trasmittente e a visualizzare il tempo impiegato per raggiungere la ricevente. Le informazioni che si ottengono riguardano le caratteristiche del getto di calcestruzzo; in particolare la presenza di fratture, vuoti, strutture a nido d'ape, inclusioni di terreno, variazioni nette di qualità del calcestruzzo, ecc., sono evidenziate da un aumento del tempo di ritardo tra l'impulso trasmesso e il segnale ricevuto rispetto a quello registrato in condizioni di integrità del materiale.

➤ Le prove vibrazionali (**metodi dinamici**) consistono nell'applicare un accelerometro alla testa del palo o alla struttura da controllare, generare l'impulso mediante il martello sollecitando la testa del palo e acquisire i segnali provenienti dal sensore. Ogni volta che l'onda di compressione che si propaga verso il basso all'interno del palo incontra una variazione nella sua sezione, viene generata un'onda riflessa che si propaga verso l'alto, dove viene rilevata dall'accelerometro. La forma d'onda così acquisita fornisce quindi informazioni su eventuali diminuzioni o aumenti di sezione, lunghezza del palo eventualmente integro o, nei casi più gravi, fratture e discontinuità lungo il palo.

1.2.9 Beni artistici (*dipinti, affreschi, statue*)

1.2.9.1 Sculture

- Metodi ottici e fotografici (fotografia della fluorescenza U.V. per l'individuazione della patina superficiale)
- Tomografia assiale per la caratterizzazione della struttura interna e la ricerca di danni meccanici conseguenti ad un trasporto.
- Termografia.

1.2.9.2 Dipinti su tela

- termografia: per determinare le aree su cui intervenire avendo chiaro lo stato superficiale e sottostante non altrimenti rilevabile. In presenza di opere pittoriche come affreschi e quadri, si possono valutare con chiarezza se vi sono stati precedenti interventi, con quali risultati e stabilire poi il tipo di intervento da eseguire. Possono altresì essere rilevate presenze di muffe senza dover operare rimozioni anche se parziali.
- fotografia della fluorescenza U.V. per la diagnosi dello stato di conservazione e la classificazione delle vernici e dei pigmenti usati in un dipinto, originali o provenienti da passati interventi di restauro. La fluorescenza U.V. è la capacità di alcuni materiali di emettere luce quando vengono colpiti da raggi ultravioletti; per osservare il fenomeno una lampada accesa (lampada di Wood) emette una luce di colore viola

scuro e una certa quantità di raggi ultravioletti, invisibili all'occhio umano. Gli atomi assorbono tale energia e gli elettroni si spostano da un livello energetico a uno superiore, ma la permanenza a tale livello è brevissima; successivamente gli elettroni tornano al livello energetico originario liberando l'energia assorbita sottoforma di radiazioni elettromagnetiche. Poiché la resa energetica non è mai del 100%, le radiazioni liberate sono sottoforma di luce visibile o di raggi infrarossi con lunghezza d'onda superiore e quindi energia minore rispetto a quella dell'energia eccitatrice.

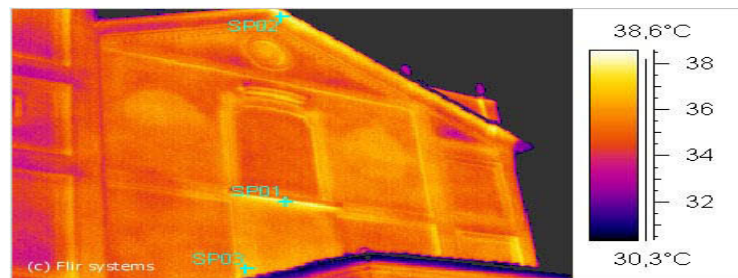
➤ La riflettografia infrarossa (IR): consente di registrare immagini nell'infrarosso, dette riflettogrammi, aventi l'aspetto di fotografie in bianco e nero, da cui è possibile interpretare il disegno realizzato dall'autore sullo strato preparatorio dell'opera. Ciò avviene per via dalla trasparenza dello strato pittorico alla radiazione nell'infrarosso vicino, a quella radiazione cioè, che ha una lunghezza d'onda compresa tra 1 e 2 mm. Gli storici dell'arte fanno oggi largo uso di questo tipo di indagine, che risulta imprescindibile per ottenere informazioni sulla tecnica dell'autore e sul mezzo grafico impiegato per il disegno. Altri importanti dati possono essere rilevati utilizzando questo metodo di indagine, tra questi vi sono: scritte, firme e date, sottostanti in origine allo strato pittorico, oppure coperte da operazioni di restauro precedenti alla misura riflettografica.

1.2.9.3 Affreschi

➤ ultrasuoni: capaci di caratterizzare e descrivere qualitativamente la muratura;

- termografia per il rilievo dell'umidità e distacco in affreschi e mosaici.
- fotografia della fluorescenza U.V. allo scopo di individuare le zone di degrado preferenziale e per ricostruire le antiche tecniche di esecuzione.

1.2.9.4 Facciata di una chiesa



Una ispezione termografica alla facciata di questa chiesa evidenzia delle modifiche successive apportate alla struttura originale. In fase di restauro può essere molto utile valutare con anticipo ogni variazione apportata alla struttura originaria così da concentrarsi maggiormente su queste per verificarne la stabilità e l'integrità. In questo caso sono ben evidenti due prese di luce circolare richiuse in un secondo momento difficilmente individuabili senza questo tipo di ispezione.

1.2.10 Applicazioni medicali

- Endoscopia: in medicina, tecnica diagnostica che permette di esaminare in modo diretto le cavità corporee, allo scopo di evidenziare la presenza di eventuali forme patologiche o di eseguire interventi di microchirurgia.



L'endoscopio si compone fondamentalmente di un tubo, in genere flessibile, del calibro di circa 6-8 mm, di un obiettivo posto nell'estremità che viene introdotta nel corpo e di un oculare posto all'altra estremità e che rende possibile all'operatore l'esecuzione dell'esame endoscopico. Il principale ambito in cui l'endoscopia si è affermata sono le indagini dell'apparato digerente (gastrosopia, colonscopia, rettoscopia). Molti endoscopi sono dotati all'estremità di apparecchi di ripresa fotografica e di strumenti chirurgici di ridotte dimensioni, e permettono l'asportazione di polipi o piccoli tumori, l'effettuazione di lavaggi localizzati, l'asportazione di calcoli renali.

➤ La radiologia sfrutta l'interazione del corpo umano con fasci di raggi x, la cui lunghezza d'onda è compresa fra 0,001 e 1 nm (onde elettromagnetiche ad alta frequenza) e la creazione di immagini, che rendano visibili le modificazioni indotte dal corpo umano sul fascio di raggi x.

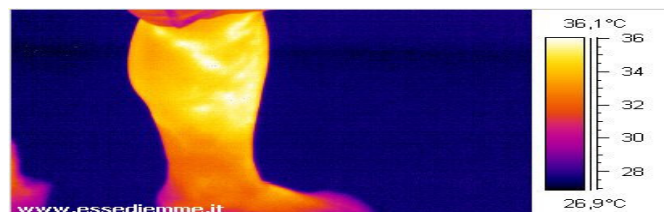
La **radiologia tradizionale** delle ossa e dell'apparato scheletrico è la più antica applicazione dei raggi x allo studio del corpo umano. La **risonanza magnetica** é una moderna tecnica diagnostica usata in medicina che fornisce immagini dettagliate del corpo umano. La RM produce immagini

di sezioni del corpo, sottoposto all'azione del campo magnetico, originate grazie all'aiuto di un computer che trasforma gli impulsi radio nelle immagini anatomiche in questione.

Un esempio di radiologia digitale è costituito dalla **Tomografia Assiale Computerizzata (TAC)**, indagine nella quale un tubo radiogeno ruota intorno al corpo del paziente emettendo un sottile fascio di raggi x. Dall'altra parte del corpo una corona di sensori radiosensibili collegati al un computer misura l'intensità dei raggi che hanno attraversato il paziente punto per punto. Questo insieme di dati viene raccolto e rielaborato dal computer che crea l'immagine virtuale su un monitor. Da questo il nome di "tomografia" che significa "immagine in sezione".



➤ **Termografia:** per la verifica della circolazione sanguigna e per l'identificazione di infiammazioni tendinee o muscolari. In alcuni casi viene impiegato questo tipo di indagine anche per la diagnosi di tumori della pelle.



1.2.11 Campi di applicabilità

In base alle caratteristiche qualitative, operative, strumentali o funzionali dei mezzi utilizzati nei CND, e ai parametri di riferimento (ad esempio dimensioni e morfologia del difetto, tipo di materiale, temperature di esercizio, condizioni operative, etc.), le tecniche hanno differenti campi di applicabilità:

	Aero nautico	Petrol chimico	Civile/ Edile	Energetico	Meccanico	Beni Artistici
Correnti indotte						
Liquidi penetranti						
Esame visivo						
Radiografia						
Ultrasuoni						
Termografia						
Magnetoscopia						
Rilevazione fughe						
Metodi dinamici						
Rilievi fotogrammetrici						

PARTE IV - CAPITOLO I

1.1 Conclusioni: le problematiche delle prove non distruttive

I Controlli Non Distruttivi (*non destructive evaluation*) sono oramai entrati in una fase di piena maturità sia scientifica che tecnologica. La loro importanza deriva dalla possibilità di ottenere grandi economie, sia nel processo produttivo che nella manutenzione, in quanto eliminano la necessità di sovrastimare i margini di sicurezza e affidabilità, garantendo la qualità del prodotto finale. Ma la scelta corretta delle Pnd da utilizzare è consequenziale ad un'analisi della problematica nel suo insieme ed è per questo che le varie fasi di applicazione di un metodo di controllo sono costituite da:

- ✦ Programmazione
- ✦ Problematiche dei controlli (accessibilità, preparazione delle superfici d'esame, conoscenza dei difetti tipici in esercizio)
- ✦ sensibilità dei controlli
- ✦ qualificazione del personale
 - ✓ documentazione (un esame anche ben condotto, ma non sufficientemente ed appropriatamente documentato, perde gran parte della sua validità, in quanto non può essere confrontabile nè con i controlli precedenti nè con quelli futuri)
- ✦ Frequenza ed estensione delle PnD.

Programmazione

Il primo gradino è quello di elaborare una appropriata «ceck list» che consenta la raccolta e l'elaborazione dei dati attinenti al componente eseguendo le seguenti azioni:

- a) conoscere il tipo di materiale, le condizioni di progetto e di esercizio, le dimensioni del componente;
- b) raccogliere e catalogare indicazioni fornite da precedenti esperienze sullo stesso componente;
- c) stabilire le cause e le modalità più probabili di degrado;
- d) stabilire le PnD più adeguate per verificare i danni subiti dal componente con riguardo all'efficacia, ai tempi ed ai costi;
- e) stabilire la sequenza cronologica di tutte le azioni necessarie da effettuare prima, durante e dopo le PnD.

Problematiche dei controlli

Ci sono degli aspetti che rendono il controllo dei componenti in esercizio diverso dal controllo dei componenti in fase di costruzione:

- accessibilità: a differenza dei controlli in costruzione il componente non può essere movimentato e quindi è necessario che l'operatore possa accedere a tutte le superfici per poter essere esaminate con le PnD;
- preparazione delle superfici d'esame: per alcune PnD (es. US, LP, MT) è indispensabile per la loro buona riuscita e ha una incidenza sui costi delle stesse;
- conoscenza dei difetti tipici d'esercizio: la conoscenza della tipologia caratteristica dei difetti nei componenti di impianto, quali la loro origine, la loro collocazione, la loro probabilità di individuarli in zone prestabilite

e la loro evoluzione, sono elementi indispensabili per una corretta metodologia di controllo.

Sensibilità dei controlli

Partendo dal presupposto che l'affermazione «componente senza difetti» tecnicamente non ha senso, è necessario sempre riferirsi alla normativa applicabile che identifica l'accettabilità o l'inaccettabilità dei difetti riscontrati. A tal proposito la normativa definisce oltre alla classe di accettabilità, anche la taratura della strumentazione che fa parte integrante della sensibilità del controllo e la tipologia dei difetti accettabili con cui confrontare le indicazioni riscontrate.

Qualificazione del personale

Dato che l'efficacia delle PnD è basata principalmente sulla loro ripetibilità è fuor di ogni dubbio che diventa necessario il rispetto, nella sua interezza, della specifica da applicare. Quindi per poter raggiungere tale scopo risulta indispensabile che la conduzione delle PnD deve essere affidata a personale adeguatamente qualificato, di provata capacità, serietà professionale e che abbia maturato una notevole esperienza sul controllo di difettosità che vengono a crearsi nel componente in esercizio.

Frequenza ed estensione delle PnD

La frequenza e l'estensione delle PnD, è un argomento molto dibattuto in relazione alla problematica associata alla difettologia da ricercare ed alla sua evoluzione. Un metodo molto semplice è quello di stabilire la frequenza dei controlli nell'intervallo tra due fermate e quindi prima e durante la fermata stessa. Per altri casi, dove alcuni componenti sono soggetti ad avere dei difetti con una evoluzione molto rapida, è possibile

instaurare un monitoraggio on line che permette di tenere sotto controllo l'evoluzione del difetto.

Bibliografia e siti web

- Associazione Italiana di Metallurgia, “Le Prove non Distruttive”
- Cigada, “Elementi di struttura e proprietà dei materiali metallici”
- Audenino, L. Goglio, M. Rossetto, “Metodi sperimentali per la progettazione”, Levrotto e Bella
- P. Dosenna, G Magistrali, “Controlli non distruttivi e ultrasuoni”, ATA
- MANUTENZIONE “Tecnica e Management” Settembre 2003

www.greenlabs.com

www.controlli.com/servizi.htm

www.quipo.it

www.aipnd.it
www.essediemme.it/main/termogra.htm
www.costruzioni.net
www.pnd.com
www.enea.it/controlli
www.procontrol-nd.it
www.eurolab.it/ita/collaudi
www.thermalwave.it/ita/applicazioni/spazio.htm
www.dima.unipa.it/~Zuccarello
www.rfi.it
www.manuali.net
www.webuser.unicas.it/iacoviello/METODOLOGIE
www.giordiano.it
www.twr.it/termo.htm
www.mat.casaccia.enea.it/controlli
www.apilombardia.it/innovare
www.tinycomp.it/freeserv
www.etd.adm.unipi.it/
www.fluxinos.it/it/processo
www.gilardoni.it/cnd
www.bruel-ac.com/prove
www.web.uni.com/settoretecnico/it/provenondistruttive/home
www.boviar.it
www.enac-italia-it/documents
www.arpa-piemonte.it/intranet
www.ispesl.it/ispesl
www.otic.it