

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA



**CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA ELETTRONICA**

**Prove non distruttive con correnti parassite e magnetoscopia:
applicazioni e analisi dei risultati**

RELATORE: *Prof. Gabriele Marchesi*

LAUREANDO: *Nicola Dalla Rizza*

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

Sommario

Tutti i manufatti realizzati nel settore industriale, siano essi costituiti da metallo (p.e. acciaio inox, ghisa ecc.) o materiale sintetico (p.e. plastica, gomma ecc.) possono contenere all'interno o sulla superficie dei difetti. Le discontinuità possono essere di numerose tipologie (p.e. cricche, porosità, inclusioni, ecc) e forme (tondeggianti, allungate, planare, volumetrica). Queste irregolarità possono avere cause metallurgiche o di lavorazione e possono preesistere alla messa in servizio del componente o essere conseguenza dell'esercizio. E' importante quindi monitorare tali difetti poichè nel breve o nel lungo periodo potrebbero causare dei possibili malfunzionamenti agli oggetti stessi.

Per tali motivi la maggior parte dei componenti sono analizzati mediante l'ausilio di numerose tecniche non distruttive, i cui vantaggi sono essenzialmente tre: non richiedono la distruzione di campioni derivati dalla struttura sotto controllo, sono verifiche non invasive e rendono possibili controlli PnD (Prove Non Distruttive) anche se un componente è in servizio.

In particolar modo in questo lavoro di tesi vengono studiati i metodi di controllo mediante magnetoscopia (MT) e correnti parassite (ET), descrivendone il principio di funzionamento, gli strumenti utilizzati, gli ambiti in cui vengono applicati ed infine i metodi di analisi dei dati, tramite l'ausilio di calcolatori, attraverso i quali è possibile ricostruire la forma dei difetti ed effettuare simulazioni sulle discontinuità rilevate dagli strumenti ET e MT.

INDICE

Sommario

Introduzione	1
Capitolo 1: Metodi ispettivi	3
1.1 Generalità sulle PnD	3
1.2 I difetti	4
1.3 I controlli non distruttivi	4
1.4 Controllo visivo (VT)	5
1.5 Liquidi penetranti (PT)	6
1.6 Correnti parassite (ET)	7
1.7 Magnetoscopia (MT)	7
1.8 Radiografia (RT)	8
1.9 Ultrasuoni (UT)	8
Capitolo 2: Il metodo delle correnti parassite	10
2.1 Storia della tecnica a correnti parassite	10
2.2 Principio di funzionamento	11
2.3 Spessore di penetrazione e scelta della frequenza di lavoro	12
2.4 Tecniche d'esame	15
2.5.1 Limiti	15
2.5.2 Vantaggi	16
2.6.1 Strumenti	17
2.6.2 Visualizzazione del difetto	18
Capitolo 3: La magnetoscopia	20
3.1.1 Generalità della magnetoscopia	20
3.1.2 Storia dell'MT	20
3.2 Principio di funzionamento	21
3.3 Il campo magnetico	23
3.4.1 La magnetizzazione	25
3.4.2 Magnetizzazione longitudinale	25
3.4.3 Magnetizzazione circolare	26

3.4.4 Rilevazione difetti	26
3.5.1 Attrezzature per effettuare la magnetizzazione ed il controllo magnetoscopico	28
3.5.2 Magnetoscopio a bancale	28
3.5.3 Il giogo elettromagnetico	29
3.5.4 Magnetoscopio a puntali	29
3.6 Applicazione e sviluppi dell' MT	30
3.7 Vantaggi e limiti del metodo magnetoscopico	31
Capitolo 4: Tecniche ET ed MT in ambito pratico	33
4.1 Utilizzo del metodo a correnti parassite nel campo industriale petrolchimico	33
4.2 Strumenti ET	33
4.3.1 Tecniche di prova ET	34
4.3.2 Confronto dei metodi ET e PT nelle prove superficiali	35
4.4 Applicazioni pratiche nel petrolchimico	36
4.4.1 Scambiatori di calore	36
4.4.2 Contenitori a pressione (vessel)	39
4.4.3 Sistemi di tubazioni: rilevazione e misura dei difetti superficiali	40
4.4.4 Soffietti: rilevamento di discontinuità superficiali	40
4.4.6 Turbine e compressori	41
4.4.7 Misura dell'usura	41
4.5 Formazione e certificazione dei tecnici ET	42
4.6.1 Controlli magnetoscopici nelle applicazioni industriali	42
4.6.2 Applicazioni delle Prove MT	43
4.7.1 Metodologia pratica	43
4.7.2 Preparazione delle superfici	44
4.7.3 Magnetizzazione	44
4.7.4 Applicazione delle particelle	45
4.7.5 Ispezione della superficie	48
4.7.6 Smagnetizzazione	50
4.7.7 Pulizia finale	50
4.8 Certificazioni	50
4.9 Esempio di controllo MT nell'aeronautica	51
Capitolo 5: Esempio di analisi dei risultati nella magnetoscopia	52
5.1.1 Il metodo FEM	52
5.1.2 Generalità	52
5.2.1 Il Gradiente	53
5.2.2 Definizione e rappresentazione cartesiana	53
5.3 L'utilizzo di FEM nella magnetoscopia	55

5.4.1 Simulazione pratica della magnetoscopia	55
5.5 Algoritmo di FEM nell'MT	58
5.6 Sensibilità dell'analisi con l'uso di FEM	60
5.7 Conclusione	61
Capitolo 6: Modello degli elementi finiti applicato ad un difetto impiegando il metodo delle correnti parassite	62
6.1 Problematiche connesse utilizzando un modello che approssima le cricche	62
6.1.1 Scopo della prova	62
6.2 Caratteristiche del campione esaminato	63
6.3 Formule per l'estrapolazione di un modello con FEM	64
6.4.1 Confronto dei modelli degli elementi finiti	65
6.4.2 Distribuzione dei vettori delle correnti parassite	66
6.4.3 Parametri di confronto	67
6.5 Conclusioni	70
Capitolo 7: Confronto dei due metodi ispettivi	71
7.1 Storia e confronto dei due metodi	71
7.2 Generalità e calibrazione	72
7.3 Vantaggi e svantaggi nell'applicazione dei due metodi	74
7.4 Ricerca e sviluppo nell'analisi dei risultati	74
7.5 Sostituzione del metodo MT con quello ET nel campo nucleare	75
7.6 Benefici e vantaggi nelle prove nel settore nucleare	76
7.7 Validità della prova	77
7.8 Conclusione	77
Conclusioni	78
Bibliografia	79

Introduzione

In ambito industriale e civile la richiesta di standard qualitativi nei componenti elettrici e meccanici, per tutti i possibili utilizzi della vita quotidiana, è aumentata nel corso degli anni.

Le aziende produttrici, per affrontare in modo efficace tale tematica e quindi poter inserire nel mercato prodotti caratterizzati da un'elevata affidabilità e qualità, hanno bisogno di tecniche ispettive che siano in grado di determinare eventuali anomalie e non alterare le caratteristiche strutturali e/o funzionali dei manufatti.

Con il passare del tempo si sono sviluppati numerosi metodi di controllo.

In passato, per l'analisi dei materiali dei prodotti industriali venivano svolte a campione delle prove distruttive ma, successivamente, con l'evolversi della tecnologia e grazie a numerose ricerche, si è arrivati a modelli ispettivi non invasivi, i cosiddetti test o prove non distruttive (PnD) con conseguenti minori costi di scarto e maggiore praticità nel controllo qualità.

Queste prove non distruttive sono condotte su materiali quali metalli, compositi, plastiche, ceramiche, ed inoltre su componenti dell'industria nucleare, chimica e petrolchimica; su mezzi di trasporto come aerei, navi, treni, autoveicoli, su installazioni off-shore come le piattaforme per la ricerca e l'estrazione del petrolio, i gasdotti e opere stradali.

Il campo d'applicazione è dunque particolarmente vasto e di straordinaria importanza per la qualità dei prodotti, della sicurezza e dell'affidabilità degli oggetti in analisi.

Le più importanti tecniche PnD impiegate nella pratica sono: VT test visivo, PT liquidi penetranti, MT magnetoscopia, ET correnti parassite, RT radiografia e UT ultrasuoni.

Il contenuto della tesi focalizza l'attenzione su due particolari metodi: quello delle correnti parassite e quello magnetoscopico.

Nel primo capitolo vengono illustrati i più importanti ed utilizzati metodi ispettivi, descrivendone il principio di funzionamento, il campo di applicazione ed i relativi vantaggi e svantaggi che li caratterizzano.

Nel secondo capitolo si affronta in maniera più specifica il metodo delle correnti parassite, in tutti i suoi aspetti.

Nel terzo capitolo analogamente si procede con la descrizione delle caratteristiche del metodo magnetoscopico.

Nel quarto capitolo vengono presentate le funzionalità e le applicazioni dei metodi ET e MT utilizzati in ambito industriale.

Nel quinto capitolo sono riportati brevemente la struttura e il modo di esecuzione di un programma agli elementi finiti, allo scopo di trattare e analizzare i dati ottenuti dalla simulazione di un modello di difetto (ricostruito) tramite la prova non distruttiva magnetoscopica.

Nel sesto capitolo si affronta il tema analogo, ma con riferimento alla tecnica delle correnti parassite costituendo nuovamente un modello del provino sotto esame.

Nel capitolo conclusivo viene proposto un confronto di entrambi i metodi (ET ed MT) nel settore industriale, soprattutto in quello nucleare. Viene descritta l'evoluzione dei due controlli PnD nel corso degli anni, ed infine viene valutata quale tecnica ispettiva è in grado di dare i risultati migliori in termini monetari e qualitativi.

CAPITOLO 1

METODI ISPETTIVI

1.1 Generalità sulle PnD

Le Prove non Distruttive (PnD) sono l'insieme di procedure e tecniche per determinare eventuali difetti negli oggetti della più svariata natura, forma e dimensione.

La caratteristica primaria che un'ispezione PnD deve rispettare è quella di non alterare il materiale in esame ed inoltre non si richiede la distruzione di campioni prelevati dalla struttura sotto controllo.

In altre parole le PnD quindi permettono un'ispezione senza che il pezzo in esame venga danneggiato, oltre a ciò queste prove sono effettuate in modo tale da non pregiudicare l'utilizzo futuro di un componente o di un materiale.

Per definire tali prove si usa spesso l'acronimo NDT, derivato dall'espressione inglese *Non Destructive Testing* o l'acronimo PnD, derivato dall'espressione *Prove non Distruttive*.

Tecnici ed ingegneri definiscono e attuano questi tipi di controlli al fine di determinare le caratteristiche e i difetti dei materiali responsabili di possibili malfunzionamenti, come per esempio negli aerei, reattori nucleari, rete ferroviaria, condutture ecc.. Spesso durante questo tipo di test si osservano una varietà di discontinuità, invisibili ad occhio nudo ma ugualmente preoccupanti, che caratterizzano molti componenti, a questo scopo infatti sono stati messi a punto differenti metodi per definire la tipologia e la forma dei difetti riscontrabili in un materiale.

Si può dedurre che le prove non distruttive forniscono un ottimo equilibrio tra l'effettivo controllo di qualità dei manufatti ed il costo-efficacia che si riscontra dal mancato scarto di determinati oggetti: le PnD vengono infatti eseguite allo scopo di ottenere informazioni utili per la valutazione dell'accettabilità di un prodotto. L'acquisizione e la valutazione di queste indicazioni deve essere svolta da tecnici specificamente addestrati e qualificati, perciò essi devono essere in grado di valutare l'affidabilità, i limiti ed i risultati ottenuti dal metodo in esame. L'affidabilità di questi controlli è definita in documenti attinenti alle procedure di ispezione mediante gradi di livello di competenza richiesta al personale (ad es. I, II e III) e valutato in base al risultato della prova PnD.

In definitiva i controlli non distruttivi servono per:

- assicurare l'integrità e l'affidabilità dei prodotti (vita utile del manufatto più lunga, minore probabilità di guasti e/o interruzioni di esercizio)

- prevenire incidenti e preservare vite umane (componenti particolarmente critici di sistemi intrinsecamente pericolosi)
- assicurare la soddisfazione del cliente
- migliorare il processo di progettazione (guasti e/o rotture che si presentano sistematicamente in certe parti dell'oggetto)
- controllare il processo di produzione e mantenere uno standard qualitativo uniforme ed elevato
- ridurre i costi di produzione (es. controllo dei semilavorati prima che da essi vengano realizzati i prodotti finiti)

1.2 I difetti

Nella letteratura con il termine difetto si intende una anomalia nel materiale, rilevante ai fini di un possibile mal funzionamento o rottura del componente.

Prevalentemente si hanno discontinuità per cause metallurgiche o di lavorazione, possono preesistere alla messa in servizio del componente oppure essere conseguenza di condizioni, gravose o meno, di esercizio.

Esistono un'infinità di tipologie di difetti ad esempio cricche, porosità inclusioni, ecc., con forma differente: tondeggiate, allungate, planare, volumetrica.

Identificata la difettosità presente nel manufatto, a fronte delle prescrizioni di una normativa o di requisiti contrattuali è possibile stabilire se la presenza dell'irregolarità nella struttura è accettabile o meno.

1.3 I controlli non distruttivi

I metodi PnD che possono essere utilizzati per controllare ed effettuare misurazioni nei prodotti industriali sono numerosi. Tutt'ora vengono continuamente sviluppate tecniche di indagine innovative, infatti si cercano nuovi modi per applicare i principi della fisica e delle altre discipline scientifiche nell'ambito pratico, allo scopo di perfezionare sia i metodi già largamente conosciuti e sia quelli ancora in fase di collaudo.

Tuttavia, in riferimento alla UNI EN 473 sono citabili le sei tecniche ispettive che maggiormente vengono impiegate in campo industriale:

1. (VT) Ispezione visiva
2. (PT) Liquidi penetranti
3. (ET) Correnti parassite
4. (MT) Magnetoscopia
5. (RT) Radiografia
6. (UT) Ultrasuoni

1.4 Controllo visivo (VT)

Con il metodo visivo (VT) l'interpretazione e la valutazione dei risultati viene effettuata dall'operatore in base a determinati parametri di accettabilità della difettologia del manufatto in esame, perciò per verifica visiva si intende soltanto l'ispezione degli oggetti eseguite ad occhio nudo oppure con il solo ausilio di lenti ed endoscopi a basso ingrandimento.

Naturalmente il bagaglio tecnico unito all'esperienza del personale addetto ai controlli sono essenziali per assicurare la sensibilità e l'affidabilità del risultato.

Il principio si basa sull'impiego della luce come mezzo rivelatore dei difetti. Analizzando la direzione, l'ampiezza e la fase della luce riflessa o diffusa dalla superficie di un oggetto opaco, oppure trasmessa all'interno di un mezzo trasparente, si possono ottenere informazioni sullo stato fisico dell'oggetto in esame. I controlli visivi vengono generalmente utilizzati per rilevare specifiche caratteristiche superficiali e/o dimensionali quali allineamenti, forme e dimensioni di componenti di macchine, di impianti e di manufatti, stato delle superfici, ecc..

Gli esami visivi, come anche suggerito dalla norma di riferimento UNI EN 13018 [7], vengono generalmente suddivisi in:

- **esami visivi diretti:** quando è possibile accedere alla zona che si intende ispezionare ad occhio nudo, ad una distanza della superficie non maggiore di circa 60 cm, con una angolazione non inferiore a 30°. Per migliorare ingrandimenti e visuale possono essere utilizzati lenti e specchi. L'illuminazione, effettuata con opportune lampade, deve essere compresa tra i 150 ed i 600 lux.
- **esami visivi remotizzati:** definiti in questo modo se non è possibile accedere direttamente all'oggetto od alla superficie da esaminare. A tal scopo vengono utilizzate apparecchiature più o meno sofisticate, quali ad esempio: specchi, telescopi, endoscopi, fibre ottiche, telecamere, ecc. In ogni caso, qualunque sia il mezzo utilizzato, gli strumenti devono avere una risoluzione almeno equivalente a quella dell'occhio umano.

Al fine della corretta applicazione di questo metodo di analisi è necessaria l'esatta conoscenza del tipo di difetto che si vuole rivelare. Un vantaggio del VT, nell'applicazione remotizzata, è che permette un controllo visivo a distanza. Gli svantaggi sono essenzialmente: l'impossibilità d'impiego senza un accesso diretto alla zona d'esame (è necessario avere un foro d'accesso), ed il fatto che il metodo dipende dal parere dell'operatore e dalla sua esperienza.

I prodotti che possono essere controllati sono: serbatoi, motori, condotte di fluidi, carrelli di atterraggio di aerei, ecc..

Il personale addetto ai controlli PnD con metodo VT, ogni due anni viene sottoposto ad accurata visita oculistica nel corso della quale viene verificata la capacità visiva (diretta o corretta) e quella di distinzione dei colori. [8]

1.5 Liquidi penetranti (PT)

La tecnica di prova non distruttiva sfrutta la capacità di alcuni liquidi di penetrare, per capillarità e non per gravità, all'interno dei difetti superficiali quali: cricche, cavità, ecc.. La bassa tensione superficiale e la buona bagnabilità di tali liquidi, assicurano la penetrazione anche all'interno di irregolarità sottilissime. L'ispezione VT è una tecnica particolarmente idonea per localizzare irregolarità superficiali, quali cricche, porosità, ripiegature, in modo veloce ed economico e con grande accuratezza su tutte le tipologie di materiali, acciai, leghe di rame, leghe di alluminio, vetro, plastica ad altro, senza alcuna limitazione della forma dei componenti stessi.

Rispetto ai controlli magnetici, i liquidi penetranti possono essere applicati su qualsiasi componente, indipendentemente dalla geometria o dal materiale dello stesso, tranne che per pezzi molto porosi, come ad esempio i sinterizzati o i getti di ghisa oppure pezzi con superfici particolarmente rugose.

Dopo l'applicazione e la penetrazione del liquido (detto appunto penetrante), la quantità eccedente viene rimossa dalla superficie mediante lavaggio con acqua corrente fredda la quale però non è in grado di rimuovere il liquido penetrante. Successivamente, 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). Il liquido penetrante "risalito" per capillarità, lascerà nel rivelatore un segnale avente dimensioni molto maggiori rispetto al difetto che lo ha generato. A seconda della tecnica applicata il difetto potrà essere evidenziato in vari modi: o come una macchia di colore rosso (tecnica visibile o a contrasto di colore) oppure come macchia fluorescente (tecnica con liquido fluorescente) facilmente rilevabile mediante lampada UV.

Tuttavia con questo metodo non è comunque semplice la valutazione dei difetti, infatti, a volte le lavorazioni meccaniche determinano indicazioni di difettosità che possono venire risolte solo da un operatore con grande esperienza. [8]

1.6 Correnti parassite (ET)

In breve il principio di funzionamento del metodo ET è caratterizzato da un campo magnetico, generato da una bobina alimentata da corrente alternata, che produce nel pezzo da esaminare delle correnti indotte. Tali correnti influenzano il valore di impedenza della bobina che le ha generate. La presenza di una qualsiasi discontinuità, modifica l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e quindi l'impedenza del circuito, la cui variazione è indice di possibile difettosità. Le dimensioni minime del difetto rilevabili dipendono sensibilmente dal diametro della bobina.

Con il controllo ET può essere rilevata anche la minima disomogeneità di un materiale, quindi a seconda del caso sotto osservazione è possibile rilevare:

- disomogeneità associate alla geometria del materiale come cricche, deformazioni, inclusioni, variazione di spessore, ossidazioni, etc.
- spessori di strati non conduttivi oppure conduttivi, ma di differente conducibilità, che ricoprono una base conduttiva
- errori di trattamento termico ed anche disomogeneità delle leghe, surriscaldamenti localizzati.
- variazioni associate alla permeabilità del materiale attraverso la misura dell'intensità dei campi magnetici.

Questa tecnica d'ispezione trova grande impiego nel campo industriale in quanto è possibile effettuare controlli ET automatizzati su barre, tubi estrusi, trafilati su bulloneria o su altri pezzi meccanici di forma semplice (si rimandano ulteriori approfondimenti al capitolo 2).

1.7 Magnetoscopia (MT)

Il controllo non distruttivo attraverso le particelle magnetiche è un metodo per localizzare difetti superficiali e sub-superficiali nei materiali ferromagnetici. Con la verifica mediante MT quando l'oggetto da testare viene magnetizzato, le irregolarità che si trovano generalmente in senso trasversale al campo magnetico determinano una deviazione delle linee di flusso del campo magnetico stesso. Se il difetto poi affiora in superficie, parte delle linee di flusso del campo magnetico vengono disperse oltre la superficie stessa. Per l'individuazione del difetto sarà sufficiente spruzzare sulle superfici, attraverso soffietti, delle polveri ferromagnetiche colorate o fluorescenti. Queste particelle si concentreranno allineandosi lungo le linee di flusso del campo magnetico, formando un "profilo" della discontinuità che generalmente ne indica la posizione, la dimensione, la forma e l'estensione. In tali casi le particelle sono rese visibili mediante una lampada di Wood (si rimandano ulteriori approfondimenti al capitolo 3). [8]

La tecnica magnetoscopica può essere applicata ai materiali magnetici, come ghise e acciai non austenitici, le cui discontinuità sono rilevabili ad una profondità massima dell'ordine di circa una decina di millimetri.

1.8 Radiografia (RT)

Attraverso le tecniche radiografiche e gammagrafiche risulta possibile evidenziare un gran numero di difetti presenti in prodotti industriali, soprattutto nei getti e nelle saldature come per esempio: porosità, inclusioni, soffiature, cricche, tarli, inclusioni di scoria, mancanza di penetrazione. Queste due tecniche ispettive sono particolarmente affidabili e quindi vengono utilizzate per l'esame di parti di grande importanza strutturale.

Il meccanismo di formazione dell'immagine radiografica è legata al differente assorbimento delle radiazioni (raggi X per la radiografia mentre raggi gamma per la gammagrafia) all'interno del pezzo in funzione della variazione di spessore, dei diversi costituenti chimici, delle disuniformità nella densità, della presenza di difetti. L'informazione ottenibile da un singolo controllo radiografico è bidimensionale perciò al fine di descrivere completamente una discontinuità l'RT deve essere integrata con altre radiografie o con altri metodi volumetrici ovvero l'esame radioscopico oppure quello ad ultrasuoni. La valutazione delle irregolarità viene eseguita per confronto della densità radiografica con le caratteristiche conosciute dell'oggetto stesso o con standard radiografici, prodotti dallo stesso manufatto, di qualità accettabile.

Gli elementi fondamentali per eseguire il controllo radiografico sono: la sorgente di radiazione, il campione da controllare e la lastra radiografica.

La gammagrafia e la radiografia sono applicabili a tutti i materiali, ma sono limitate solo dai più grossi spessori e dagli elevati assorbimenti.

1.9 Ultrasuoni (UT)

L'ispezione ad ultrasuoni è un metodo non distruttivo in cui delle onde sonore ad alta frequenza vengono introdotte nel materiale da esaminare, vengono infatti sfruttate la propagazione e la riflessione, proprio dovuta alle possibili irregolarità, di queste onde (di frequenza superiore a quelle percepibili dall'udito) allo scopo di evidenziare difetti superficiali o interni e, in certi casi, anche di determinare lo spessore dei materiali testati.

La tecnica ultrasonora è particolarmente impiegata proprio per la variegata gamma di difetti individuabili, essa infatti permette di rivelare sia difetti superficiali che difetti in profondità.

Il metodo è basato essenzialmente sul fenomeno della trasmissione di un'onda acustica attraverso il materiale. Gli ultrasuoni sono onde elastiche vibrazionali con frequenza solitamente compresa tra 1 e 10 MHz (per certe applicazioni il campo si può estendere dai 20 KHz fino ad oltre 200 MHz). [8]

Il suono si propaga nei corpi mediante la vibrazione elastica degli atomi e delle molecole che lo compongono, ad una velocità dipendente dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato. Le onde ultrasonore sono generate sfruttando le proprietà piezoelettriche di alcuni materiali; queste proprietà consistono nella capacità di questi materiali di contrarsi e riespandersi quando siano sottoposti all'azione di un campo elettrico alternato. Se il campo elettrico alternato possiede adatta frequenza, le vibrazioni del materiale producono onde elastiche di frequenza ultrasonora. Il fenomeno è reversibile, perciò lo stesso materiale capace di emettere ultrasuoni, può generare un segnale elettrico se investito da un fascio d'onde elastiche. [8]

In genere il metodo degli ultrasuoni viene impiegato nell'industria metallurgica ma l'invecchiamento delle infrastrutture, dalle strade alle costruzioni ai velivoli, ha presentato un nuovo insieme di ambiti di misura, ricerca e di evoluzione.

CAPITOLO 2

IL METODO DELLE CORRENTI PARASSITE

2.1 Storia della tecnica a correnti parassite

In letteratura spesso questo metodo PnD viene menzionato con l'acronimo inglese Eddy Current Testing (ECT) oppure con quello italiano Metodo delle Correnti Parassite (ET). Questa tecnica ispettiva è una prova non distruttiva che sfrutta fundamentalmente il principio "dell'elettromagnetismo" per verificare il grado di difettosità del materiale sotto esame.

Il primo personaggio storico che diede un contributo fondamentale allo sviluppo del controllo a correnti parassite fu Michael Faraday, infatti egli nel 1831 scoprì il fenomeno dell'induzione elettromagnetica nonché concetto base della tecnica ispettiva in questione. Questo scienziato ebbe una formazione puramente chimica nell'Inghilterra del 1800, ma il suo maggior impegno fu nel campo dell'elettricità; a lui sono accreditate la scoperta dell'induzione elettromagnetica, dell'effetto magneto-ottico, del diamagnetismo e di altri fenomeni.

La sua scoperta avvenne quando avvolse due rotoli isolati di filo elettrico attorno ad un grande anello di acciaio, fissato ad un tavolo, egli trovò che facendo passare una corrente attraverso una bobina, un'ulteriore corrente momentanea era indotta nell'altra. Dagli alcuni esperimenti successivi scoprì che, muovendo un magnete attraverso un cappio di filo, in esso fluiva una corrente elettrica, ed inoltre analogamente osservò lo stesso fenomeno muovendo il solenoide sopra il magnete fermo.

Le sue dimostrazioni stabilirono che un campo magnetico variabile produce un campo elettrico, questa relazione è espressa matematicamente mediante la Legge di Faraday-Neumann-Lenz, che divenne successivamente una delle quattro equazioni di Maxwell, le quali poi si sono evolute nella generalizzazione conosciuta come teoria dei campi.

Nel 1879, un altro scienziato Hughes registrò delle alterazioni delle proprietà di una bobina quando essa era posta in contatto con dei metalli di conducibilità e permeabilità differenti, da queste osservazioni ipotizzò che fosse possibile sfruttare queste variazioni per introdurre degli innovativi metodi per la verifica dello stato delle superfici dei manufatti.

Trascorsi degli anni, la primitiva tecnica ET aveva attirato l'attenzione di altri studiosi ed industrie, ma non fu particolarmente impiegata nel settore pratico prima della seconda guerra mondiale, fundamentalmente perché questo controllo non distruttivo non era ancora maturo, infatti erano necessari ulteriori studi elettromagnetici per un'applicazione reale.

Ciò nonostante alcuni tentativi di controllo attraverso il metodo delle correnti parassite furono svolti nella metà degli anni '20 con Kranz, egli infatti realizzò delle misure di spessore dei muri. Un altro esempio d'impiego di questa tecnica, nonché uno dei primi lavori ben documentati, è quello di

Farrow, che tra il 1930 e il 1935 fu pioniere nello sviluppo dei sistemi a corrente indotta per l'ispezione di una tubatura d'acciaio saldata.

Comunque la maggior parte degli studi sperimentali mediante ET si sono svolti negli anni 50 e 60, specialmente nei velivoli e nelle industrie nucleari.

Al giorno d'oggi la prova a correnti parassite è una delle tecniche più usate e maggiormente nota sia dal punto di vista teorico che sperimentale.

2.2 Principio di funzionamento

L'esame non distruttivo a correnti parassite consiste fondamentalmente nell'indurre un campo magnetico alternato, creato da specifiche bobine (o sonde), nell'oggetto sotto esame; in ossequio alla legge di Lenz il materiale diviene sede di una f.e.m. indotta la quale, agendo in un mezzo con conducibilità elettrica maggiore di zero, provoca una circolazione di corrente elettrica in seno al pezzo stesso (corrente indotta). Il verso di circolazione di tale corrente sarà tale da produrre a sua volta un campo magnetico opposto a quello del campo magnetizzante esterno (figura 2.2.1).

Il campo magnetico variabile prodotto dalle sonde viene denominato "campo primario" mentre il campo magnetico generato dalle correnti indotte, anch'esso variabile, viene chiamato "campo secondario".

La fase delle correnti indotte, il cui flusso dipende da variabili legate al materiale in esame, varia in funzione della frequenza di eccitazione e delle caratteristiche del componente da ispezionare quali:

- conducibilità elettrica
- permeabilità magnetica
- dimensioni e forme geometriche

In altre parole la presenza di difetti superficiali o sub-superficiali modifica, in misura più o meno grande a seconda dell'entità, il percorso delle correnti indotte nel pezzo variandone di conseguenza il valore della conducibilità σ e della permeabilità μ (fig. 2.2.1 c).

Di conseguenza anche il campo magnetico secondario associato a tali correnti varia in maniera analoga; esso viene analizzato valutando i suoi effetti sulla corrente o sulla tensione della bobina inducente, oppure sulla corrente o sulla tensione indotta in un altro avvolgimento posto, anch'esso in prossimità della superficie dell'oggetto testato. [9]

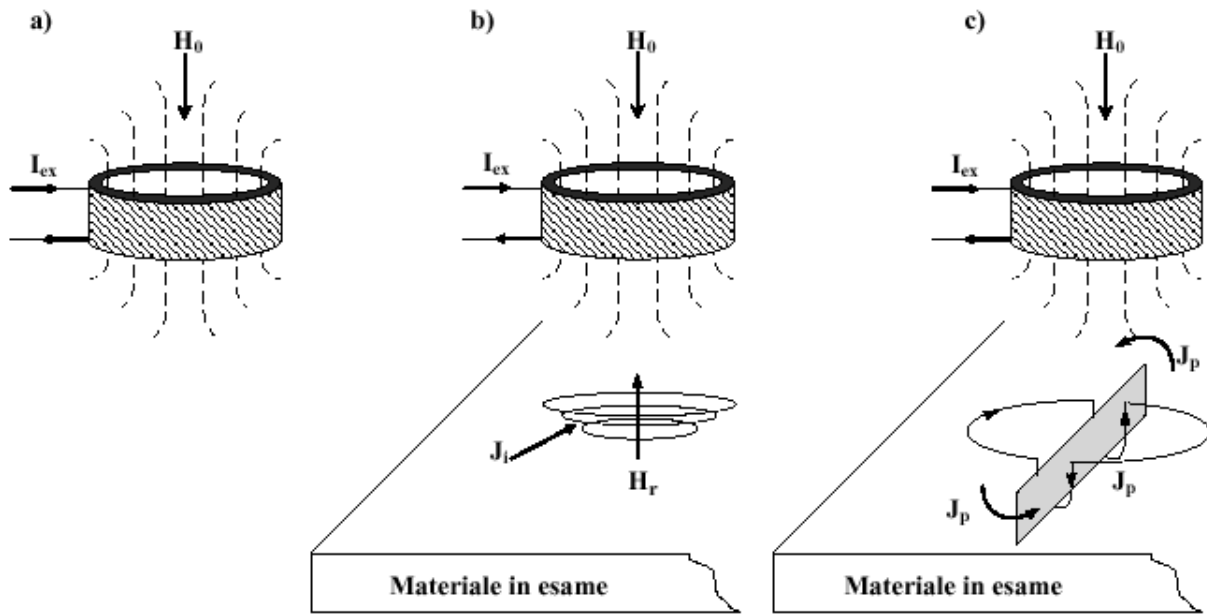


Fig.2.2.1 a) Bobina in aria; b) bobina a contatto con il materiale in assenza c) ed in presenza di difetto

2.3 Spessore di penetrazione e scelta della frequenza di lavoro

Quando si utilizza l'esame ET per verificare il livello di difettosità di un provino, si nota che all'interno dello stesso si generano delle correnti parassite che compiono delle traiettorie circolari chiuse disposte su piani perpendicolari al campo magnetico. Queste correnti parassite si concentrano in prossimità della superficie adiacente alla bobina di eccitazione, inoltre è possibile osservare che esse penetrano in misura minore aumentando la distanza bobina-provino.

In pratica perciò tale controllo non distruttivo è essenzialmente un metodo superficiale in quanto, a causa dell'effetto pelle, in un conduttore piano l'intensità di corrente decresce in maniera esponenziale con la penetrazione e, in generale, un incremento della frequenza f , della permeabilità μ e della conducibilità σ porta ad una conseguente minore profondità di penetrazione. Per provare questa caratteristica si può considerare una geometria monodimensionale dove il semispazio $x > 0$ sia occupato da materiale conduttore omogeneo, allora il modulo delle correnti indotte segue la legge:

$$J(x) = J_0 \cdot e^{-\delta/x} \quad (2.3.1)$$

dove:

- $J(x)$ è il modulo del vettore densità di corrente in funzione della profondità x
- J_0 è il modulo della densità di corrente sulla superficie del conduttore (per $x=0$)
- $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma f}}$ chiamato spessore di penetrazione (standard depth of penetration)

Tale modulo delle correnti $J(x)$ ad una profondità $x=\delta$ è circa il 37% di quello che si ha in superficie, si osserva che il valore δ presenta perciò una notevole diminuzione all'aumentare della frequenza del campo inducente (come è visibile in fig. 2.3.1). [9]

Come detto in precedenza all'aumentare della frequenza, la corrente indotta (parassita) si addensa sulla superficie del componente in esame per cui non è così facile rilevare difetti sub-superficiali; d'altra parte, aumentando la frequenza del campo induttore, sempre a parità di altre condizioni, aumenta anche l'ampiezza delle correnti.

Il vantaggio che si ha con una maggiore ampiezza delle correnti risulta quello di una agevole elaborazione del segnale, distinguibile con facilità dai possibili disturbi aleatori sovrapposti.

Solitamente in campo pratico si tende quindi ad utilizzare frequenze abbastanza elevate, tuttavia la scelta deve essere ponderata in base alle caratteristiche dell'oggetto sotto studio.

La possibilità di individuare difetti presenti nei materiali sotto esame con il controllo ET dipende perciò dai segnali rilevati dagli strumenti e dallo stato delle correnti parassite, quindi per poter determinare le discontinuità nei vari materiali testati si deve:

- scegliere di volta in volta il valore ottimale della frequenza del campo magnetico indotto, ovviamente tale dato viene estrapolato dal compromesso tra la necessità di penetrare un certo volume o area del campione e quella di ottenere sfasamenti tra il segnale utile associato alle irregolarità e quelli riguardanti tutte le altre cause che non interessano il controllo ovvero i disturbi;
- controllare che l'elemento perturbante, ossia il difetto, abbia entità tale da poter essere sicuramente rilevabile dagli strumenti ET e che esso sia situato entro lo spessore di conduzione (dovuto all'effetto pelle) delle correnti indotte. Ricordando che si ha una diversa distribuzione delle correnti indotte all'interno del provino, è evidente che tutti i difetti presenti sulla superficie, dove si hanno strati a maggiore densità di corrente, saranno sicuramente rilevabili, mentre per le inclusioni più profonde si hanno livelli, per determinati valori di frequenza, a densità di corrente molto bassa.

Normalmente quindi si ritiene che la rilevabilità di un difetto venga assicurata per una profondità in cui la densità di corrente indotta sia ancora pari a circa il 37% della densità di corrente dello strato superficiale e cioè entro lo spessore di penetrazione. [9]

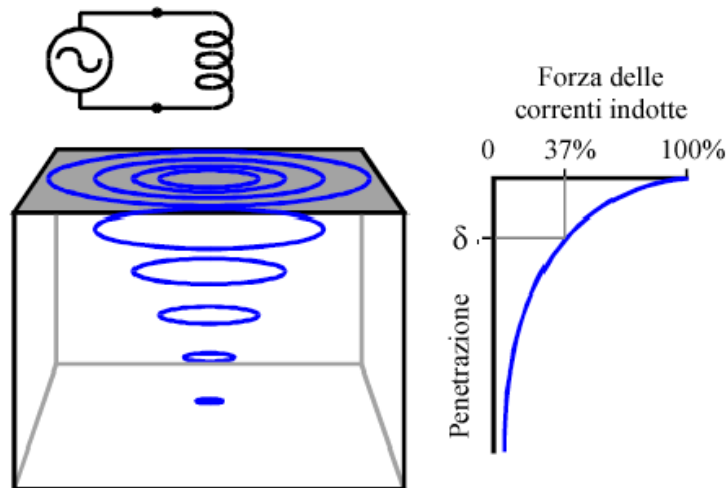


Fig. 2.3.1 Penetrazione delle correnti indotte all'interno di un provino.

La frequenza di lavoro perciò rappresenta un parametro fondamentale nell'esecuzione dell'ET, essa viene scelta in funzione del tipo di materiale che si intende studiare, dell'irregolarità, della sonda usata, della velocità di esecuzione della prova, degli obiettivi della prova (se si vuole solo rilevare la presenza del difetto o anche fornire informazioni aggiuntive) e della precisione che si vuole garantire nella misura.

La rilevazione di difetti superficiali viene normalmente eseguita mediante sonde a "penna", utilizzando frequenze che vanno dai 100kHz ad alcuni MHz in funzione del materiale esaminato: 2MHz per l'alluminio, 6MHz per il titanio, 100-200kHz per materiali ferrosi.

Nella fig.2.3.2 è riportato un grafico qualitativo per determinare lo spessore di penetrazione delle correnti parassite nei materiali a diverse conducibilità in funzione della frequenza.

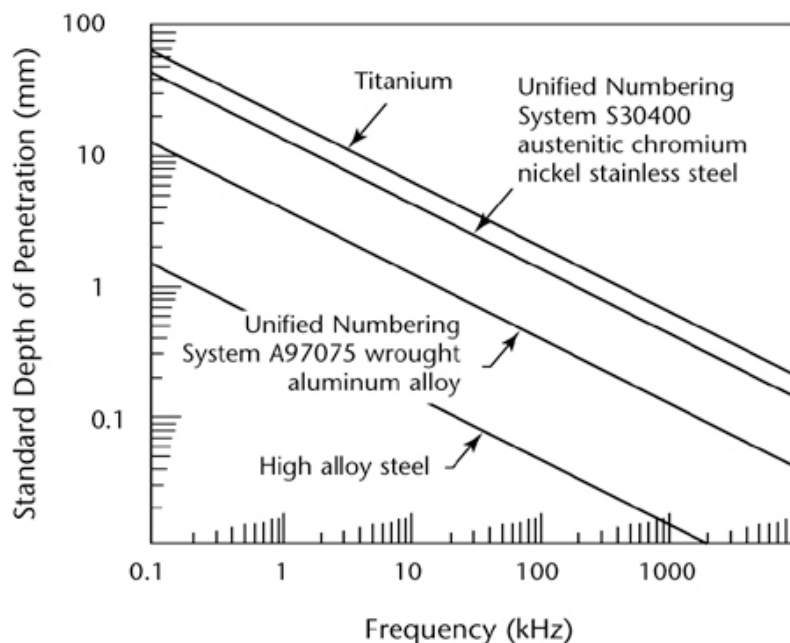


Fig.2.3.2 Grafico qualitativo dello spessore di penetrazione in funzione della frequenza per materiali di diversa natura.

Ad esempio nelle applicazioni aeronautiche, la rilevazione dei difetti sub-superficiali viene effettuata con frequenze molto basse dell'ordine del kHz, riuscendo a garantire spessori di penetrazione di 10mm ed oltre. [10]

2.4 Tecniche d'esame

Il metodo ispettivo con correnti parassite, oltre ad una grande varietà di applicazioni, offre numerosi altri vantaggi tra cui: elevata sensibilità d'esame, grande affidabilità, rapidità di esecuzione, basso costo di esercizio.

Il metodo è una valida alternativa al metodo magnetoscopico quando non è possibile applicarlo, come nel caso del controllo di prodotti in acciaio inossidabile austenitico.

Inoltre poter eseguire una tecnica ispettiva senza che vi sia contatto diretto tra sonda e pezzo in prova può risultare vantaggioso, permettendo così anche il controllo di pezzi in movimento.

Un esempio classico è quello nel campo metallurgico in cui è possibile il controllo dei semi-lavorati direttamente all'uscita delle trafilè e dei laminatoi, nonostante la loro elevata velocità e temperatura.

I metodi di applicazione della prova ET si differenziano per due aspetti:

- applicazione manuale o automatica di questa tecnica di controllo;
- il tipo di segnale prodotto dal difetto, in relazione alle diverse caratteristiche geometriche ed elettriche delle sonde utilizzate.

Per il primo aspetto non necessitano particolari spiegazioni, il metodo può essere automatizzato ogni qualvolta il tipo di applicazione lo consenta.

Quanto al secondo aspetto, invece, esistono moltissime sonde con caratteristiche notevolmente diverse. Si può infatti disporre di sonde statiche o dinamiche, ad anello per interni, per superfici o per fori, assolute o differenziali, con avvolgimento singolo o doppio, a ponte o per riflessione. Chiaramente ognuna delle caratteristiche elencate rende una sonda più adatta a determinate applicazioni piuttosto che ad altre.

2.5.1 Limiti

Le limitazioni del metodo sono in stretta relazione con le caratteristiche dei materiali in prova:

- il metodo è applicabile soltanto a materiali conduttori, in cui è possibile localizzare discontinuità superficiali o sub-superficiali a profondità non superiori a circa 10÷15 mm 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
- la superficie deve essere accessibile alla sonda
- l'abilità e la formazione richiesta al personale è più estesa di altre tecniche
- finitura superficiale e rugosità possono interferire
- lo spessore di penetrazione è limitato

2.5.2 Vantaggi

Uno dei vantaggi principali dell'ET come strumento PnD è l'elevata varietà di controlli e di misure che possono essere realizzati. In circostanze adeguate, le correnti parassite possono essere usate per:

- rilevare eventuali cricche
- misurare lo spessore di un materiale
- misurare campioni rivestiti da materiali di diversa natura
- misura di conducibilità per:
 - identificare un materiale
 - verificare il danneggiamento del calore nel provino
 - monitorare un trattamento termico

Ulteriori vantaggi di questo metodo ispettivo includono:

- sensibile alle piccole crepe e altri difetti
- rilevazione delle irregolarità superficiali e sub-superficiali
- l'ispezione dà risultati immediati
- apparecchiature portatili

- il metodo può essere utilizzato per svariate applicazioni, non solo per rilevare difetti
- la sonda non ha bisogno di entrare in contatto con il materiale in esame
- è possibile analizzare forme complesse dei componenti

2.6.1 Strumenti

Gli strumenti impiegati nei controlli a correnti parassite presenti in commercio sono disponibili per una grande varietà di configurazioni, tanto è vero che esistono sia gli analogici che quelli digitali. Comunemente gli strumenti sono classificati in base al tipo di display usato per la presentazione dei dati raccolti nella prova PnD, i più impiegati a tal fine sono quelli: a indicatore analogico, a lettura digitale, a piano d'impedenza (fig.2.6.1).



Fig.2.6.1 I tre strumenti ET.

Il più elementare strumento ET (figura 2.6.2) consiste in una bobina, alimentata da una sorgente di corrente alternata, che crea un campo magnetico ed un voltmetro per misurare la variazione di tensione attraverso la bobina, oppure al posto di esso può anche essere utilizzato un amperometro per misurare la variazione della corrente nel circuito.

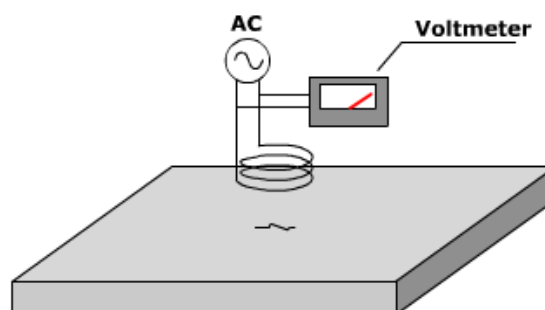


Fig.2.6.2 Schema di semplice strumento per rilevare le cricche.

Tuttavia sebbene tale schema mostri che con tale configurazione è possibile rilevare dei difetti, gli strumenti attuali sono molto più complessi. [9]

2.6.2 Visualizzazione del difetto

Le eventuali irregolarità del materiale in esame possono essere individuate con due diverse tecniche:

- misurando le variazioni di corrente nel circuito, associate al diverso valore di impedenza che di volta in volta assume la bobina
- osservando le variazioni di ampiezza e dell'angolo di fase dell'impedenza.

Nel primo caso, viene utilizzato il più semplice strumento ET ovvero il microamperometro (Fig.2.6.3), con esso si rilevano i vari tipi di difetti o cricche, inoltre è possibile effettuare dei controlli ispettivi per determinare la corrosione in un oggetto, oppure prove di conducibilità. Questi tipi di strumenti contengono un circuito a semplice ponte (bridge circuit), che mette a confronto una indicazione di default con quella misurata sul campione. L'apparecchio indicherà la possibile presenza di discontinuità nel provino attraverso il movimento di un indice del display.



Fig.2.6.3 Microamperometro.

Nel secondo caso è necessario un oscilloscopio capace di visualizzare nel proprio display il piano d'impedenza della bobina $R+jX_L$.

Questo piano d'impedenza è un modo molto utile per visualizzare i responsi delle correnti parassite da cui è possibile stabilire l'entità ed il tipo di cricca. I fattori di accoppiamento magnetico, l'ampiezza e la fase delle correnti parassite, variano continuamente dando luogo ad un ampio spettro di segnali; tuttavia anche gli angoli di fase della corrente di eccitazione, del flusso magnetico e della tensione, assumono particolare importanza per la corretta esecuzione di questo metodo di esame non distruttivo.

Come illustrato nella figura 2.6.4 si nota che il piano di impedenza è molto utile per visualizzare i dati ricavati dalla prova a correnti parassite. L'influenza dell'entità delle correnti parassite e della permeabilità magnetica del materiale stesso causano valori alquanto differenti di impedenza nel piano $R+jX_L$, da cui è possibile quindi determinare la possibile presenza di difetti. [9]

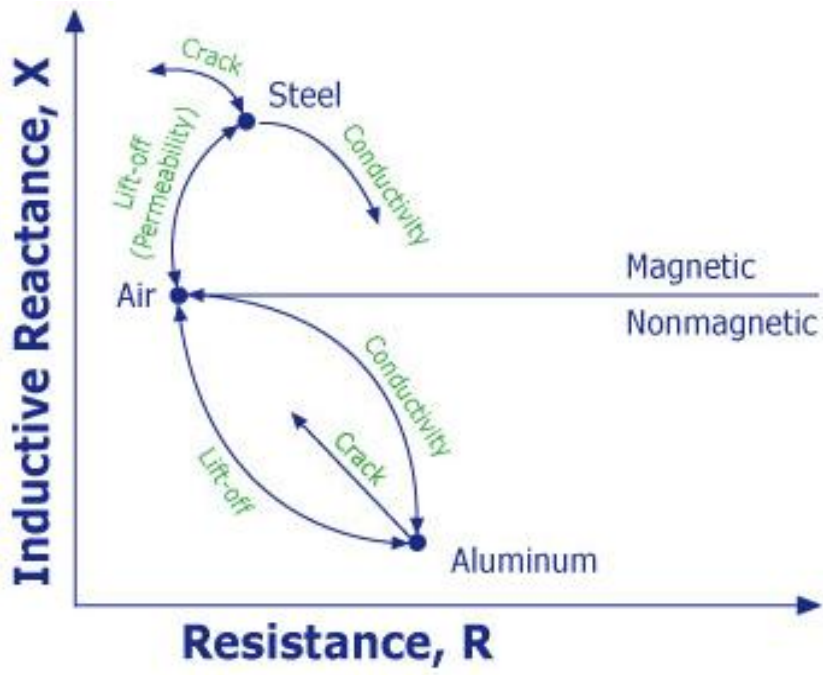


Fig.2.6.4 Piano d'induttanza (asse x resistenza, asse y reattanza induttiva).

CAPITOLO 3

LA MAGNETOSCOPIA

3.1.1 Generalità della magnetoscopia

La tecnica magnetoscopica (MT) è una prova non distruttiva utilizzata per rilevare i difetti, soprattutto quelli superficiali (ma anche quelli in profondità), presenti negli oggetti solitamente di grandi dimensioni.

Alcune principali caratteristiche che hanno portato l'MT ad un rapido e vasto impiego nel campo industriale sono: la facilità d'impiego, la discreta velocità nel suo utilizzo ed inoltre non è necessaria una particolare preparazione (o pulizia) delle superfici interessate dall'ispezione prima di poter effettuare il controllo PnD, cosa questa alquanto critica per altri metodi ispettivi.

La magnetoscopia, al fine di rilevare le discontinuità nei componenti sotto esame, sfrutta sostanzialmente i campi magnetici e delle piccole particelle magnetiche (p.e. limature metalliche). L'unico e fondamentale requisito necessario per l'applicazione della tecnica in questione è che l'oggetto sotto osservazione sia costituito da materiale ferromagnetico come: ferro, nichel, cobalto, o alcune delle loro leghe; se tale condizione non fosse rispettata non sarebbe possibile magnetizzare il materiale ad un determinato livello, ottenendo così conseguenti risultati ispettivi non affidabili.

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

Alcuni dei settori industriali che utilizzano questo controllo PnD: automobilistico, della produzione dell'acciaio strutturale, petrolchimico, della produzione di energia e aerospaziale.

Un altro importante campo d'ispezione in cui trova largo impiego questa tecnica è quello subacqueo infatti spesso vengono testate strutture offshore e condutture sottomarine.

3.1.2 Storia dell'MT

Nell'ottocento Bergmann, Becquerel e Faraday scoprirono che tutta la materia compresi i liquidi ed i gas sono influenzati da magnetismo.

La prima tecnica arcaica documentata per la verifica dei difetti in un manufatto sfruttando il campo magnetico si ebbe approssimativamente intorno al 1868, in quegli anni infatti furono testati dei componenti bellici tra cui le canne dei cannoni impiegati nelle battaglie. Il procedimento era piuttosto semplice: dapprima si magnetizzava la canna e successivamente si faceva scorrere su tutta la lunghezza dell'oggetto una specie di strumento simile ad una bussola magnetica, quindi in base all'indicazione dell'ago della bussola si poteva conoscere in maniera molto qualitativa lo stato di

una superficie. Questa era a tutti gli effetti una delle prime forme di prova non distruttiva, tuttavia tale termine in quell'epoca non era comunemente usato infatti venne coniato solo negli anni successivi alla prima guerra mondiale.

Nei primi anni del 1920, William Hoke si rese conto che delle particelle magnetiche (trucioli colorati di metallo) potevano essere usate sfruttando il magnetismo come mezzo di localizzazione delle discontinuità. Hoke scoprì che un'irregolarità superficiale o sub-superficiale in un materiale magnetizzato causava una distorsione del campo magnetico. Questa scoperta suscitò una particolare curiosità da parte dell'industria delle costruzioni meccaniche dell'epoca.

Si notò che le lavorazioni meccaniche, a cui potevano essere soggetti i materiali costituiti da acciaio duro, potevano creare delle crepe negli oggetti, si vide perciò che l'applicazione di una fine polvere ferromagnetica sulle superfici dei manufatti, adeguatamente magnetizzate, causava un accumulo delle particelle magnetiche in corrispondenza dei difetti, fornendo così un'indicazione visibile.

All'inizio degli anni '30, il controllo MT stava sostituendo rapidamente una sorta di tecnica a liquido penetrante (un precursore dell'attuale metodo) usata massicciamente in quel periodo; a testimonianza di ciò l'industria ferroviaria iniziò ad esaminare tramite magnetoscopia le caldaie, le ruote, gli assi e svariati componenti dei motori a vapore.

Oggi, la tecnica magnetoscopica viene impiegata estesamente per verificare i difetti dei prodotti industriali quali barre d'acciaio, per valutare l'integrità delle saldature strutturali su ponti, serbatoi, strutture di sicurezza, componenti critici degli autoveicoli come per esempio molti particolari per alte prestazioni nelle macchine da corsa, ecc...

3.2 Principio di funzionamento

Utilizzando il controllo magnetoscopico si osserva che quando l'oggetto da testare è magnetizzato le discontinuità che si trovano in un senso, generalmente trasversali al campo magnetico, determinano una deviazione delle linee di flusso del campo magnetico stesso. Se il difetto poi affiora in superficie parte delle linee di flusso del campo magnetico vengono disperse oltre la superficie stessa. Per mettere in luce le irregolarità è sufficiente spruzzare sulle superfici in esame adeguate sospensioni di polveri ferromagnetiche, colorate o fluorescenti (per tali aspetti si veda il capitolo 4 par.4.7.4). Le particelle perciò si concentrano allineandosi lungo le linee di flusso del campo magnetico, formando un "profilo" della discontinuità che generalmente ne indica la posizione, la dimensione, la forma e l'estensione. Nei difetti la polvere magnetica così concentrata viene resa visibile da una illuminazione apposita mediante lampada di Wood.

Gli esami magnetoscopici sfruttano in sostanza il ferromagnetismo dei materiali per evidenziare appunto le anomalie delle linee di flusso del campo magnetico nei pressi delle irregolarità superficiali.

In generale le linee di flusso, che rappresentano l'intensità locale del campo magnetico, attraversano un materiale come per esempio l'acciaio (metallo generalmente ferromagnetico a temperatura ambiente) in modo uniforme ma, nei pressi di una discontinuità come una microcricca, una cavità

od un'inclusione, si addensano o si disperdono, deviando localmente e creando un'anomalia del campo magnetico ai bordi del difetto (si veda il paragrafo successivo).

Per la magnetizzazione del campione si può ricorrere sia ad una sorgente a corrente continua sia ad una a corrente alternata. La differenza principale è che il campo magnetico generato dalla corrente continua generalmente penetra nella sezione trasversale del materiale, mentre i campi generati dalla corrente alternata rimangono confinati sulla superficie del materiale a causa del cosiddetto effetto pelle. Si evince che la corrente alternata non dovrebbe essere utilizzata nella ricerca di difetti sub-superficiali.

In altre parole l'entità di penetrazione dipende dal tipo di corrente (alternata, pulsante o continua), dall'intensità e dalla frequenza della corrente utilizzata nel controllo, tuttavia non è possibile superare il valore di qualche millimetro di profondità.

In funzione della loro posizione, le discontinuità vengono suddivise come:

- esterne (sono quelle "aperte" in superficie)
- sottopelle (fino a 1,5-2 mm di profondità)
- in profondità (oltre i 2 mm di profondità)

Per irregolarità esterne si intendono tutte quelle che risultano "aperte" in superficie e quindi determinano una variazione geometrica del profilo iniziale o nominale del componente in esame (p.e. cricche). Maggiore è l'ortogonalità della discontinuità rispetto alla direzione del flusso disperso, tanto più grande sarà l'opposizione creata alle linee di forza. Poiché la distribuzione di queste ultime, a seconda del tipo di corrente che si usa, è caratterizzata da un maggiore addensamento in superficie, regolando in maniera opportuna il valore della corrente di magnetizzazione si otterrà un andamento notevolmente crescente in profondità e quindi un apprezzabile guadagno nella profondità di materiale ispezionabile.

Per discontinuità sottopelle vengono considerate tutte quelle che per cause di lavorazione o di esercizio si trovano internamente al materiale, più precisamente in prossimità della superficie esterna. In questo caso la dispersione di flusso generata all'esterno del materiale sarà di entità notevolmente minore rispetto a quella del caso precedente, comunque di valore sufficiente ad attrarre la polvere magnetica, la quale viene depositata nell'immediata vicinanza. Per questo tipo di difetti solitamente si utilizzano particelle magnetiche di dimensioni ben definite e con alta permeabilità magnetica, in modo da aumentare al massimo il livello di sensibilità del controllo.

Per difetti in profondità il flusso disperso che si genera non sempre riesce a raggiungere la superficie esterna con un valore sufficientemente apprezzabile ad attrarre la polvere magnetica impiegata nell'ispezione. Ne consegue che la rilevabilità di queste discontinuità dipende dalle sue caratteristiche quali profondità, dimensione e natura delle stesse. A seconda del tipo di irregolarità da individuare e delle proprietà 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.

3.3 Il campo magnetico

Considerando un magnete a ferro di cavallo, le cui estremità siano quadrate e regolari, se esso viene appoggiato su una barra costituita da materiale magnetico, facendo in modo che le estremità del magnete aderiscano perfettamente alla barra, si ottiene un circuito chiuso, le cui linee di flusso del campo magnetico attraverseranno il materiale magnetico dal polo Nord verso il polo Sud (figura 3.3.1 a). Non essendoci poli esterni, le linee magnetiche di forza saranno trattenute all'interno del "circuito chiuso ad anello" perciò le limature di ferro o altre particelle magnetiche che si trovano sul materiale non saranno attratte al magnete, anche se esistono appunto queste linee di forza magnetica che lo attraversano.

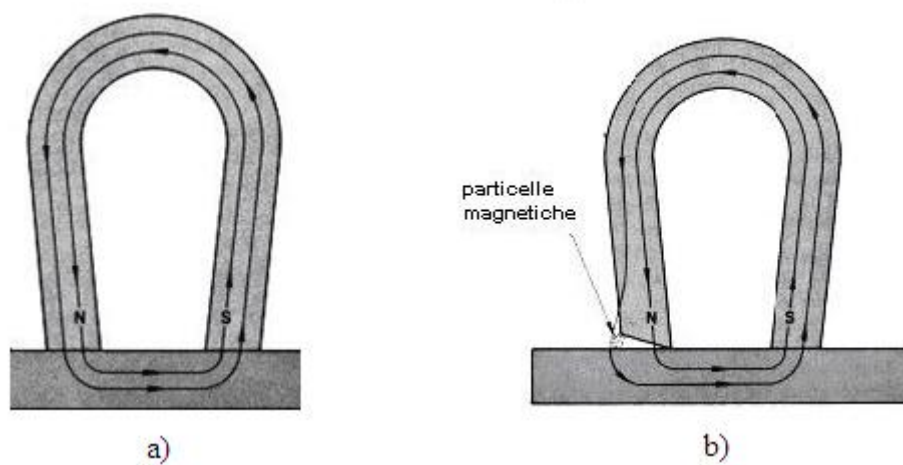


Fig.3.3.1 a) Magnete a ferro di cavallo con superfici regolari, b) Magnete a ferro di cavallo con una estremità non regolare.

Ora se una delle estremità del magnete considerato non è regolare si crea una discontinuità fra quella superficie del magnete ed il materiale magnetico sotto analisi, i poli quindi attrarranno le polveri magnetiche poste nelle immediate vicinanze. Queste particelle magnetiche aderiranno ai poli e colmeranno la lacuna esistente fra loro, come indicato nella figura 3.3.1 b.

Nel caso di cricca radiale presente in un provino magnetizzato in modo circolare, essa genera un polo Nord ed un polo Sud ai bordi dell'irregolarità e perciò la limatura magnetica verrà attratta ai poli del difetto determinando così un'indicazione della discontinuità del materiale.

I campi che si creano in corrispondenza dei difetti vengono detti "fughe di campo". La "forza" delle fughe di campo determina il numero delle particelle magnetiche che saranno attratte e che daranno origine all'indicazione di difettosità, rendendo le dimensioni proporzionali a quelle del difetto rilevato.

Disponendo di una barra di materiale ferromagnetico si osserva la presenza di un polo ad ogni estremità. Le linee di forza del campo magnetico scorrono attraverso la barra dal polo Sud in direzione del polo Nord. Siccome le linee di forza magnetiche corrono nel senso della lunghezza

della barra, si dice che la barra è magnetizzata longitudinalmente ovvero che contiene un campo magnetico longitudinale.

Se la barra viene rotta in due pezzi (figura 3.3.2 a), tra di essi si crea una fuga di campo magnetico, caratterizzata anch'essa dalla presenza dei poli Sud e Nord.

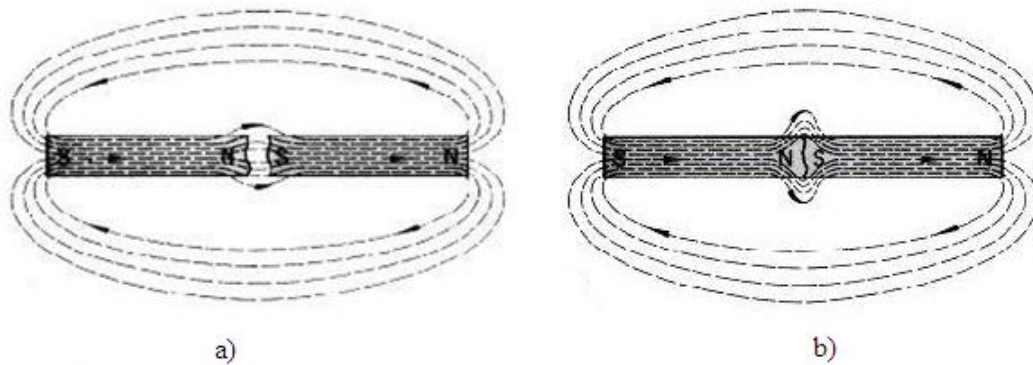


Fig.3.3.2 a) Barra magnetizzata e rotta in due pezzi, b) Spezzoni ravvicinati.

Questa fuga di campo persiste anche se i due spezzoni di barra vengono riavvicinati (figura 3.3.2 b).

Altro caso si ha quando si analizza una barra di materiale ferromagnetico "criccata" e cioè non divisa completamente in due, anche qui accade qualcosa di simile a quanto sopra descritto, infatti si osserva che nei bordi opposti della cricca si formano un polo Nord ed un polo Sud (figura 3.3.3). E' proprio tale campo che attrae le particelle magnetiche che determinano il "profilo" della cricca. Ovviamente la forza di questi poli sarà differente da quella dei poli ottenuti nel caso della barra completamente rotta e sarà in funzione della profondità e della larghezza della cricca in superficie.

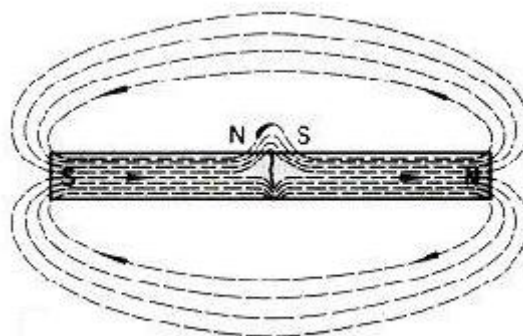


Fig. 3.3.3.Fuga di campo in corrispondenza di una cricca

E' importante notare che i materiali non ferromagnetici non possono essere controllati mediante magnetoscopia. Non risultano controllabili: leghe di alluminio, leghe di magnesio, rame e le sue leghe, titanio e le sue leghe, acciai inossidabili austenitici. [9]

3.4.1 La magnetizzazione

Un procedimento molto importante per rilevare in maniera affidabile i difetti è la corretta magnetizzazione del provino.

Mediante un elettromagnete è possibile creare nel provino sotto esame un campo magnetico. Tale strumento infatti può essere impiegato per chiudere il circuito magnetico tra due espansioni polari, generalmente adattabili alla sua geometria (giogo), e quindi creare un campo magnetico interno, oppure è possibile generare questo campo direttamente nel campione mediante il passaggio di corrente elettrica (puntali). Le apparecchiature per la magnetizzazione oggi disponibili sono di tipo fisso o portatile, ma sempre costruite in modo tale da permettere più esami sequenziali; attualmente esistono anche strumenti molto potenti che consentono un controllo dei materiali anche su larga scala. La magnetizzazione è importante perché per poter rivelare nel modo migliore dei difetti, essi devono essere orientati in senso ortogonale alle linee di flusso del campo magnetico.

Si distinguono essenzialmente due tipi fondamentali di magnetizzazione ovvero quella longitudinale e quella circolare, le quali possono essere impiegate singolarmente, alternativamente oppure combinate opportunamente tra di loro.

3.4.2 Magnetizzazione longitudinale

Nella magnetizzazione longitudinale il componente sotto analisi viene magnetizzato da un campo magnetico preesistente, creato ad esempio da una bobina percorsa da corrente alternata raddrizzata ad onda piena o a semionda.

I campi circolari intorno alle spire della bobina, combinandosi tra loro, generano un campo magnetico longitudinale all'interno del materiale, provocando così la magnetizzazione longitudinale (fig. 3.4.1).

Questa tecnica di magnetizzazione può essere impiegata utilizzando, un giogo magnetico, costituito da un magnete permanente o da un elettromagnete aventi determinate caratteristiche geometriche, costruttive e funzionali. In breve quando i poli del giogo si trovano in contatto con la superficie in esame, si genera nel materiale un flusso magnetico longitudinale. Grazie alla notevole praticità dell'attrezzatura, con tale tecnica si possono evidenziare tutte le discontinuità, indipendentemente della loro orientazione, semplicemente ruotando il giogo impiegato nell'ispezione.

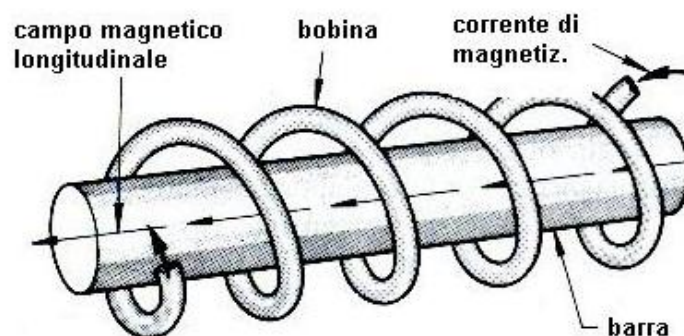


Fig.3.4.1 Esempio di magnetizzazione longitudinale

3.4.3 Magnetizzazione circolare

Per effettuare la magnetizzazione circolare si considera il componente come un conduttore elettrico in cui viene fatta passare direttamente la corrente magnetizzante, 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 e possiedono un verso ben definito (figura 3.4.2).

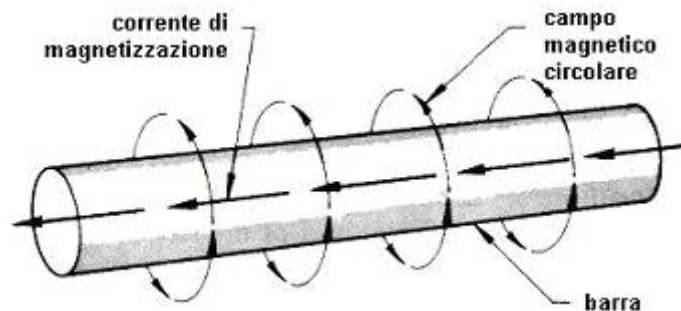


Fig.4.4.2 Esempio di magnetizzazione circolare.

Anche se esistono altre tecniche per magnetizzare il componente in esame (p.e. magnetismo residuo, etc.) la magnetizzazione circolare e quella longitudinale risultano tutt'oggi quelle di maggior utilizzo in campo industriale. Tuttavia, volendo accelerare i tempi di ispezione ed aumentare l'affidabilità del controllo, ogni qualvolta risulti possibile è buona norma effettuare l'esame MT impiegando una tecnica combinata, in cui i due tipi di magnetizzazione interagiscono fra loro con una sequenza temporale ciclica. L'esatta definizione del valore del campo magnetico necessario ad assicurare una corretta ispezione della superficie in esame dipende prevalentemente dalle caratteristiche geometriche, dimensionali e metallurgiche del materiale da magnetizzare nonché dalle classi di sensibilità in cui si opera e dalla morfologia delle discontinuità che si intendono evidenziare. [8] Al termine del controllo il componente ispezionato conterrà inevitabilmente una certa quantità di magnetismo residuo, il cui valore dipende fondamentalmente dalla permeabilità magnetica del materiale in esame, dal tipo di campo magnetico creato e dal valore e tipo di corrente impiegata. Il campo magnetico potrà essere trascurato o preso seriamente in considerazione, come ad esempio nel settore aeronautico in cui mediamente il massimo valore è di 0,3 mT, a seconda delle funzioni di esercizio o delle particolari applicazioni a cui il componente è destinato. Tuttavia, in linea del tutto generale, l'operazione di smagnetizzazione dovrà essere effettuata qualora il componente venga: collocato vicino ad equipaggiamenti mobili di misura, venga lavorato di macchina utensile, messo in rotazione, componente impiegato in operazioni di saldatura ecc..

3.4.4 Rilevazione dei difetti

Allo scopo di ottenere un'indicazione dei difetti nei materiali sotto controllo MT, il campo magnetico che interessa il campione analizzato, deve incontrare la discontinuità con un angolo sufficientemente grande da causare la distorsione localizzata delle linee di forza del campo

magnetico: i migliori risultati si ottengono quando questo angolo è di 90° , dunque la dimensione, forma e direzione della discontinuità sono molto importanti.

Osservando la figura 3.4.3, in cui un campione viene magnetizzato in maniera circolare, si nota che in queste condizioni un'irregolarità come quella indicata dalla lettera A non può essere rilevata in quanto essa è di forma regolare e giacente in direzione parallela a quella del campo magnetico. Mentre nel caso indicato con la lettera B se la discontinuità, pur giacendo parallelamente al campo magnetico, possiede una forma irregolare esistono buone probabilità che essa venga evidenziata anche se l'indicazione sarà debole.

Quando invece si hanno difetti la cui direzione predominante è a 45° rispetto al campo magnetico, come nel caso di C, D ed E, le condizioni sono più favorevoli ma dipendono dalla forma e dalla dimensione della discontinuità.

Come già accennato le indicazioni poste a 90° rispetto alla direzione del campo magnetico sono quelle che forniscono le indicazioni più evidenti come è visibile nei casi F, G ed H.

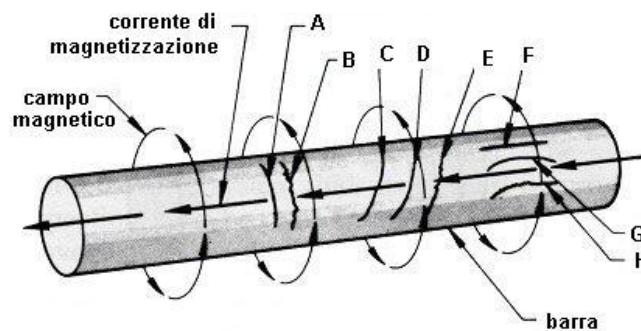


Fig. 3.4.3 Esempi di difetti in un provino magnetizzato circolarmente.

Analizzando la figura 3.4.4 è visibile una barra magnetizzata longitudinalmente. Le discontinuità L, M ed N che sono poste quasi a 45° rispetto alla direzione del campo magnetico, produrranno le stesse indicazioni che avrebbero prodotto con un campo magnetico circolare (cioè come il caso precedente). Le discontinuità J e K sicuramente saranno quelle più evidenti, mentre probabilmente le discontinuità P, Q ed R non verranno rilevate in quanto circa parallele alle linee del campo magnetico.

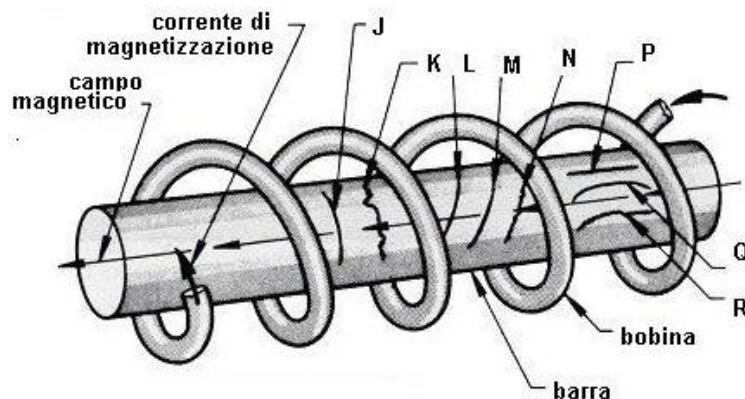


Fig.3.4.4 Esempi di difetti in un provino magnetizzato longitudinalmente.

3.5.1 Attrezzature per effettuare la magnetizzazione ed il controllo magnetoscopico

La caratteristica fondamentale del controllo mediante particelle magnetiche è quella della corretta magnetizzazione del campione sotto analisi, essa deve essere svolta in modo tale che le particelle magnetiche siano attratte dalle fughe di campo create dalle discontinuità del materiale.

3.5.2 Magnetoscopio a bancale

Esistono magnetoscopi di diverse dimensioni; quelli comunemente impiegati in ambito industriale consentono di controllare materiali aventi dimensioni fino ai 1250 mm di lunghezza e 250 mm di diametro.

In figura 3.5.1 è mostrato lo schema di un tipico magnetoscopio a bancale dotato di teste di contatto per generare campi magnetici circolari, e di bobina di magnetizzazione per creare campi magnetici longitudinali.

Il procedimento non è complicato: inizialmente il provino da testare viene serrato tra le teste di contatto, successivamente il passaggio di corrente genera il campo magnetico circolare che permetterà di controllare le eventuali irregolarità posizionate "longitudinalmente". Una successiva magnetizzazione eseguita dalla bobina permetterà poi di controllare le discontinuità poste anche trasversalmente. Per il controllo di pezzi particolarmente grandi possono essere richieste più magnetizzazioni. [8]

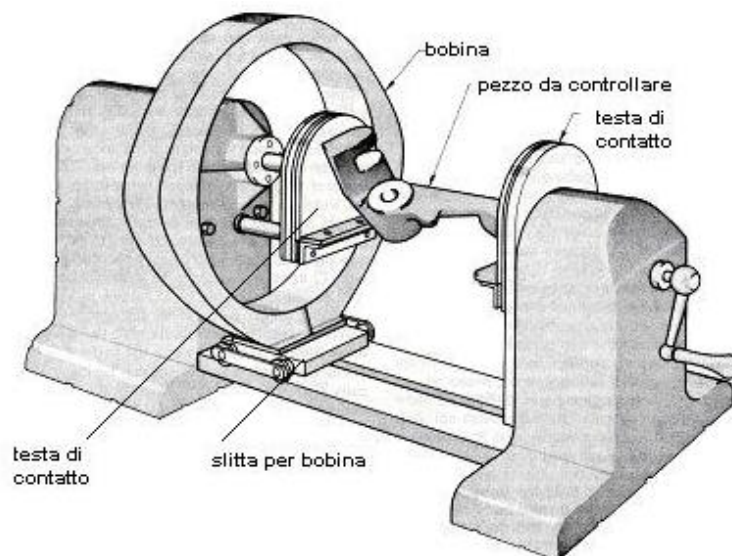


Fig. .3.5.1 Schema magnetoscopio a bancale

3.5.3 Il giogo elettromagnetico

Il giogo elettromagnetico (figura 3.5.2) è uno strumento portatile molto versatile per i controlli MT e perciò viene spesso adoperato nel caso di test condotti direttamente in cantiere.

Il giogo è costituito da un avvolgimento a bobina intorno ad un corpo, a forma di U, in ferro dolce, si evince che in pratica si tratta di una elettro-calamita. La forma ad U ne consente il rapido e facile posizionamento sul particolare da controllare. I poli dell'elettromagnete possono essere completamente snodabili, questo consente l'impiego del giogo per il controllo di manufatti aventi forme e dimensioni diverse senza compromettere la sensibilità del metodo.

Dopo aver appoggiato tale strumento sulla superficie in esame, l'apparecchio viene magnetizzato e di conseguenza si genera un campo magnetico che investe il provino.

Il giogo può utilizzare sia corrente alternata che corrente continua ed inoltre l'intensità del campo magnetico può essere regolata attraverso la corrente. Come già detto la corrente continua garantisce una maggiore penetrazione mentre la corrente alternata concentra il campo magnetico sulla superficie del pezzo fornendo una buona sensibilità per il rilevamento di discontinuità superficiali in un'area relativamente ristretta. In generale le discontinuità da rilevare devono essere: nell'area centrale cioè quella compresa tra i due poli del giogo, ed orientate perpendicolarmente alla linea immaginaria che congiunge i poli stessi(si veda la figura 3.5.2). [8]

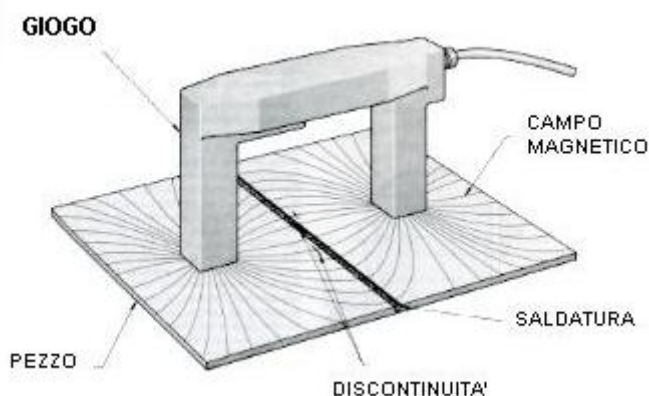


Fig.3.5.2 Giogo elettromagnetico.

3.5.4 Magnetoscopio a puntali

Quando si desidera analizzare dei materiali di notevoli dimensioni, quindi troppo grandi per poterli posizionare tra le due teste di un magnetoscopio a bancale, essi possono essere magnetizzati

mediante un magnetoscopio a puntali (figura 3.5.3). I puntali del magnetoscopio servono proprio per il passaggio di corrente, con la conseguente origine di un campo magnetico, direttamente attraverso il materiale da testare.



Fig.3.5.3 Esempi di magnetoscopio a puntali.

Questo strumento è molto utilizzato per il controllo di oggetti derivati da grosse fusioni e da insiemi di parti saldate, serbatoi di grandi dimensioni, strutture saldate ecc..

Una particolarità di questo metodo è che si manifesta una buona sensibilità ai difetti giacenti completamente sotto la superficie del particolare da verificare, mentre alcuni svantaggi sono: la distanza tra i puntali raramente può superare i 30 cm spesso anzi è molto minore, ne deriva che per controllare i pezzi di grandi dimensioni è necessario ricorrere ad un elevato numero di magnetizzazioni; altra condizione non favorevole è l'interferenza del campo magnetico esterno, presente tra i puntali, la quale può rendere difficoltosa la rilevazione delle difettosità. [8]

3.6 Applicazione e sviluppi dell'MT

Il metodo magnetoscopico è un controllo non distruttivo che viene spesso paragonato alla tecnica dei liquidi penetranti (PT). L'MT infatti può presentare gli stessi inconvenienti o limitazioni già citati per i liquidi penetranti, per cui richiede un operatore esperto e particolarmente attento. Questa tecnica ispettiva rispetto a quella dei liquidi penetranti risulta comunque meno vincolata ad errori soggettivi dell'operatore ed in aggiunta non richiede necessariamente la perfetta pulizia preventiva delle superfici.

Quindi se correttamente impiegata la magnetoscopia, risulta più rapida, meno laboriosa e più efficace rispetto al metodo PT; tuttavia essa è poco adatta per l'esame dell'integrità superficiale di materiali con superfici troppo scabrose, rugose, filettate o di geometria troppo complessa, pezzi

porosi come i getti di ghisa, quelli derivati da microfusione e quasi tutti le parti in acciaio sinterizzato.

Inoltre quando il campo viene generato direttamente nel provino tramite passaggio di corrente elettrica, è assolutamente necessario utilizzare puntali di contatto che si adattino perfettamente alle superfici, onde evitare scintille o scariche elettriche che potrebbero danneggiare irrimediabilmente le superfici stesse. [12]

Particolari precauzioni vanno prese soprattutto quando si debbano esaminare particolari finiti, cioè privi di ogni sovrametallo. In tal caso si devono usare puntali in metallo tenero e ridurre l'intensità della corrente per evitare ogni rischio di danneggiamento.

La magnetoscopia è assolutamente inefficace per i difetti interni ovvero per difetti troppo distanti dalla superficie.

Le dimensioni minime di un difetto rivelabili con la magnetoscopia dipendono soprattutto dalla sua distanza dalla superficie. Il limite di rilevabilità dei difetti affioranti è migliore di quello dei liquidi penetranti più sensibili.

Attualmente un'importante innovazione, che rappresenta un significativo sviluppo per l'interpretazione automatica dei risultati, è quella dell'impiego di sofisticati lettori ottici che sono in grado di individuare anche micro cricche nelle quali vengono depositate le particelle magnetiche.

3.7 Vantaggi e limiti del metodo magnetoscopico

Vantaggi:

- Può rilevare discontinuità superficiali e sub-superficiali non identificabili visivamente
- Non è richiesta una preparazione superficiale particolare
- Possono essere esaminate superfici rivestite (circa 0.1 mm)
- Le dimensioni e configurazioni del componente solitamente non limitano l'esame
- L'esame è veloce e semplice
- L'apparecchiatura può essere portatile
- Vengono prodotte indicazioni "dirette"
- La necessità di una pulitura post-ispezione è minima

Limiti:

- Può essere impiegato solo su materiali ferromagnetici

- La sensibilità di rilevazione diminuisce all'aumentare della profondità del difetto
- Scarsa sensibilità per i difetti rotondeggianti
- L'orientamento del campo magnetico rispetto alla direzione delle discontinuità è un fattore critico
- Per alcune tecniche è necessario un buon contatto elettrico
- Una tecnica operativa scorretta può portare a fenomeni di surriscaldamento ed innesco di un arco
- Può essere richiesta la smagnetizzazione
- Il metodo non è affidabile per la rilevazione di piccole porosità
- Si presta bene all'automazione solo per quanto riguarda la parte esecutiva, mentre l'interpretazione dei risultati deve essere fatta da personale qualificato
- L'interpretazione dei risultati, sebbene esistano specifiche e tabelle con standard fotografici, presenta sempre un certo margine di soggettività
- L'esame è normalmente limitato a zone facilmente accessibili
- I campi di temperatura in cui è possibile il controllo sono fino a 50°C con rilevatori umidi e fino a 300°C con rilevatori a secco.

CAPITOLO 4

TECNICHE ET ED MT IN AMBITO PRATICO

4.1 Utilizzo del metodo a correnti parassite nel campo industriale petrolchimico

Nel corso degli ultimi dieci anni il metodo delle correnti parassite è riuscito ad imporsi ampiamente negli stabilimenti petrolchimici. Ciò è dovuto principalmente all'introduzione di strumenti piuttosto economici che hanno reso le prove ET particolarmente vantaggiose, rispetto ad altre, in questo settore industriale.

La tecnica a correnti parassite è utilizzata specialmente nel controllo degli scambiatori di calore, delle tubazioni percorse da vapore, compressori, turbine e molti altri dispositivi o strutture presenti nell'industria petrolchimica.

Ci sono due importanti tipi di prove effettuate con il metodo in questione nelle suddette attività produttive, esse vengono classificate come:

- **Test superficiali:** le applicazioni principali sono: la rilevazione delle irregolarità di superficie, misura dello spessore del rivestimento di un materiale e misure di usura. Le tecniche di collaudo superficiali adottano strumenti portatili alimentati a batteria.
- **Test per tubazioni:** vengono svolti con attrezzature ET a multifrequenza nei tubi degli scambiatori di calore oppure nelle condutture di vapore.

4.2 Strumenti

Le analisi superficiali attraverso l'esame delle correnti parassite è normalmente eseguita con apparecchi portatili che sono di solito a singola o doppia frequenza, e solitamente costano tra \$ 6.000 e \$ 10.000. Tali dispositivi possono essere: sonde a penna o a matita (pencil probes), ad assi trasversali (cross axis probes) e a punto (spot probes).

Per determinare irregolarità nelle tubazioni si utilizzano attrezzature avanzate automatizzate controllate dal calcolatore. Questi sistemi sono a multifrequenza, con la possibilità di memorizzare i dati acquisiti a velocità di prova abbastanza elevate. Questi strumenti, normalmente sonde a bobina, costano tra \$ 30.000 e \$ 50.000.

4.3.1 Tecniche di prova ET

Nel settore petrolchimico esistono varie tecniche per la rilevazione dei difetti all'interno delle due classi di prova precedentemente menzionate:

- **Test per tubazioni:** utilizzando il metodo delle correnti parassite esistono tre tecniche di base per il collaudo delle tubazioni, scelte in funzione del materiale sotto analisi:

1. metodo convenzionale (Conventional testing): lo si applica per testare il fascio tubiero degli scambiatori di calore solitamente costituiti da materiale non-ferromagnetico come: acciaio inossidabile, leghe in rame-nichel e titanio.

La prova è effettuata con l'uso di una sonda a bobina la quale produce un campo elettromagnetico all'interno del tubo. Quando questa sonda attraversa una discontinuità, il campo elettromagnetico risulta distorto e quindi si modifica l'impedenza della bobina da cui poi è possibile determina l'entità del difetto. Questo tecnica di collaudo rileva soprattutto le cavità e le crepe.

2. prova a piena saturazione (Full saturation): è applicata per testare i sottili tubi degli scambiatori di calore costituiti da materiale sia completamente che parzialmente ferromagnetico. Le sonde a bobina impiegate includono in esse un potente magnete che tende a saturare magneticamente il materiale in analisi, quando ciò si verifica il controllo è svolto in maniera simile ai tradizionali test a correnti parassite.

3. la tecnica a campo remoto (Remote field): viene impiegata sempre per esaminare i tubi ferromagnetici dello scambiatore di calore, ma soprattutto in quelli di acciaio al carbonio e nichel. Tale controllo viene effettuato ancora con una sonda a bobina che crea un forte campo elettromagnetico nella tubazione, perciò con tale tecnica ispettiva la rilevazione si limita al controllo di grandi discontinuità.

- **Test superficiali:** queste analisi di superficie sono utilizzate per individuare tutti i difetti superficiali sia nei materiali non-ferromagnetici che in quelli ferromagnetici.

Il metodo è molto sensibile alle fessure particolarmente strette, oltre a ciò, con questa tecnica è possibile misurare con precisione la profondità delle irregolarità nei materiali non-ferromagnetici quali acciai inossidabili e leghe di nichel cromo impiegate per servizi ad alta temperatura.

Nei test superficiali vengono incluse anche le misure svolte nei componenti in cui sono presenti sovrapposizioni di materiali differenti, come il caso di una parete ferromagnetica rivestita da uno strato non-ferromagnetico. Un esempio tipico è quello delle pareti dei recipienti a pressione (vessel) visibile in fig.4.3.1, in cui si ha una superficie in acciaio inox rivestita da acciaio al carbonio.

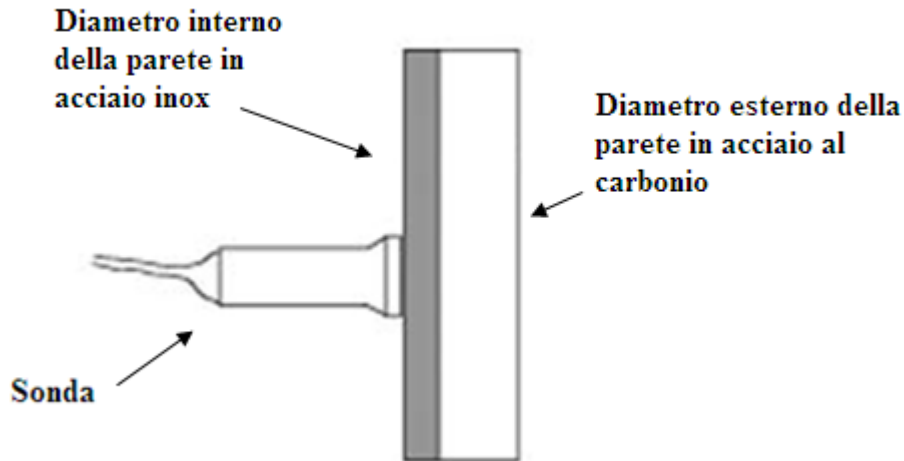


Fig.4.3.1 Spaccato di un contenitore a pressione.

Un cambiamento nello spessore del rivestimento porta ad una modifica dell'impedenza della bobina. Tale test, viene effettuato con sole sonde a punto (spot probes), ed è notevolmente impiegato in ambito industriale perché è considerato un metodo attendibile e veloce per questo genere di applicazioni.

Questo spessore di rivestimento può essere anche quantificato, il principio di tale tecnica si basa sulla misurazione del lift-off della sonda al di sopra della superficie in esame. Per questa applicazione vengono impiegati strumenti portatili come le sonde a punto.

Ulteriore parametro rilevabile dallo studio delle discontinuità superficiali è l'usura nelle pareti non-ferromagnetiche. A questo scopo il metodo ET è applicabile se la profondità di penetrazione delle correnti parassite è maggiore dello spessore del materiale, per ottenere ciò si agisce sul controllo della frequenza, infatti abbassandola può aumentare la profondità della penetrazione. [5]

In generale per l'analisi delle discontinuità è necessaria una corretta calibrazione delle apparecchiature. Nella prova ET infatti la frequenza è selezionata in modo tale che la profondità della penetrazione sia maggiore della profondità prevista (ipotizzata) dal difetto. Le più comuni sonde utilizzate per questi test superficiali sono quelle a punto ed a penna o matita.

Inoltre va ricordato che nello studio superficiale dei materiali principalmente si utilizzano le tecniche a correnti parassite ed a liquidi penetranti (PT).

4.3.2 Confronto dei metodi ET e PT nelle prove superficiali

Quando vengono svolti i test superficiali nei prodotti o nelle strutture industriali si osserva che in alcune applicazioni il metodo delle correnti parassite ha dei vantaggi rispetto ai liquidi penetranti (PT):

- la prova ET è significativamente più sensibile nella rilevazione di fessure strette, come per esempio crepe dovute alla tensocorrosione (il cedimento improvviso e imprevisto,

solitamente di metalli duttili sottoposti ad un carico di rottura in un ambiente corrosivo, soprattutto a temperature elevate) che si verifica negli acciai inossidabili sottoposti a forti stress.

- con il controllo a correnti parassite è possibile misurare i difetti in profondità nei materiali non-ferromagnetici, mentre i test a liquidi penetranti non dispongono di questa pregio.
- mediante la tecnica ET è possibile un'analisi dei difetti anche attraverso gli strati di vernice.
- per effettuare le prove in piccole aree, l'ET è molto più veloce del metodo PT soprattutto a causa dei lunghi tempi di sosta necessari per quest' ultima tecnica.

4.4 Applicazioni pratiche nel petrolchimico

4.4.1 Scambiatori di calore

Il controllo degli scambiatori di calore mediante la tecnica ET è sicuramente l'applicazione più diffusa negli stabilimenti petrolchimici. Per tali verifiche si impiega sia il metodo delle correnti parassite convenzionale che quello a campo remoto.

Gli scambiatori di calore includono: i condensatori, tutti i tipi di scambiatori, i riscaldatori d'acqua, i dispositivi di raffreddamento ad aria e ad olio lubrificante.

La tecnica delle correnti parassite convenzionale è un metodo veloce, certo ed esatto per la rilevazione delle piccole discontinuità nelle tubazioni. I test possono essere effettuati attraverso sonde automatizzate ad una velocità massima di 1.8 m/s (≈ 6.5 km/h).

Mentre la tecnica a campo remoto si riduce alla rilevazione di grandi irregolarità ed inoltre la velocità della prova è limitata a circa 0.3 m/s (≈ 1.1 km/h).

Una particolare versione del metodo convenzionale ET è quella a piena saturazione. Questa tecnica di controllo è applicabile ai sottili tubi ferromagnetici, come per esempio quelli in acciaio SA-268 dei tubi dei condensatori, e quelli in materiali parzialmente ferromagnetici delle tubazioni quali lega in rame-nichel, l'acciaio SA-789 e SA-790.

Nell'immagine 4.4.1 viene mostrato un classico esempio di controllo del fascio tubiero in uno scambiatore di calore.



Fig.4.4.1. Controllo dei tubi di uno scambiatore di calore utilizzando un sistema a multifrequenza.

Per ulteriore chiarezza in figura 4.4.2 viene riportata una relazione grafica sul controllo dello scambiatore di calore, essa viene compilata innanzi tutto creando una mappa virtuale dei tubi costituenti il componente in esame, e poi sovrapponendo i risultati della prova a correnti parassite per ciascun tubo. I colori rappresentano la gamma di profondità della discontinuità.

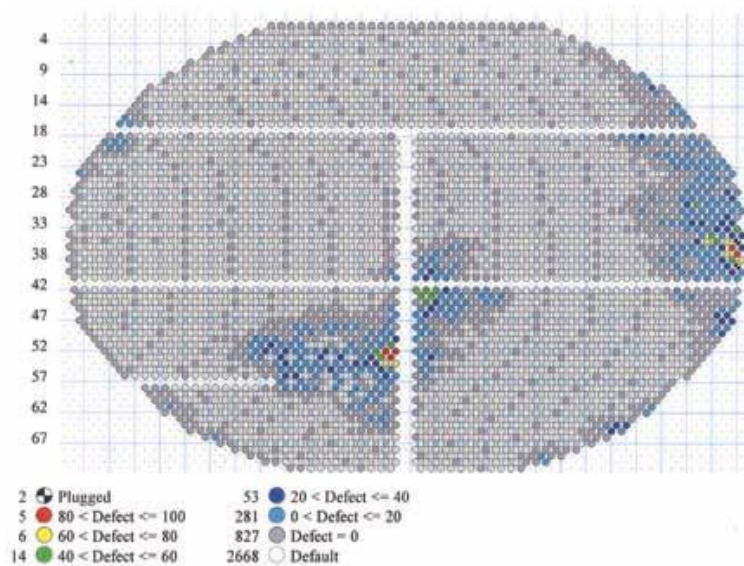


Fig.4.4.2 Un rapporto di analisi grafica dello scambiatore di calore.

L'unico inconveniente presente negli scambiatori di calore è quello delle possibili perdite di fluido che si verificano nella piastra tubiera (fig.4.3.4)), questo componente ha la funzione di sostenere alle estremità i tubi adibiti al passaggio del liquido e li mette in comunicazione con le testate (nei fori nella parte centrale sono mandrinati i tubi interni mentre i fori nella parte esterna servono per il

fissaggio del distributore e della cassa mediante tiranti e dadi). La giunzione piastra-tubi deve garantire stabilità e tenuta, essa viene realizzata mediante espansione e deformazione dei tubi, mandrinatura, saldatura.

Tuttavia le perdite che si possono avere sono determinate da difetti circolari nelle sedi in cui sono allacciati i tubi.



Fig.4.4.3 Piastra tubiera.

Un problema evidente nel controllo di questi componenti è che le cricche possono essere facilmente non rilevate dalle sonde a bobina, perciò si richiede l'uso di sonde superficiali, esse possono essere motorizzate (simili a quelle impiegate nel campo aeronautico per rilevare discontinuità nei bulloni) o semplicemente manuali. [5]

Nella Fig.4.4.4 viene mostrata la prova ET nella piastra tubiera usando una sonda rotante motorizzata per la rilevazione di cricche sotto o posteriormente alla piastra tubiera.



Fig.4.4.4 Test su piastra tubiera utilizzando una sonda rotante.

4.4.2 Contenitori a pressione (vessel)

Se viene effettuato il controllo dei contenitori a pressione, cioè recipienti a pressione chiusi progettati per contenere gas o liquidi ad una pressione sostanzialmente diversa dalla pressione atmosferica, tramite correnti parassite, solitamente si vogliono rilevare i difetti superficiali nelle pareti e misurare lo spessore di rivestimento delle stesse.

- Il rilevamento e la misurazione delle cricche superficiali si effettuano sulla superficie interna dei contenitori costituiti da acciaio inox.

In questo genere di applicazioni la tecnica ET viene utilizzata come alternativa ai liquidi penetranti in quanto è possibile con essa individuare fessure assai più strette ed inoltre è significativamente più veloce.

Le prove superficiali vengono applicate sia al metallo della parete sia al materiale che costituisce le saldature. Il test sul metallo può essere realizzato utilizzando sonde a punto o sonde a matita, queste tuttavia non possono essere usate nelle zone di saldatura a causa di segnali prodotti dal lift-off. Per ovviare al problema vengono utilizzate sonde speciali denominate crosspoint.

- La misura dello spessore del rivestimento di una parete è effettuata sui serbatoi a pressione realizzati in acciaio al carbonio o in acciaio inox con una copertura in leghe di cromo-nichel per alta temperatura.

Questi strati di rivestimento vengono monitorati in quanto possono essere soggetti ad erosione, infatti l'acciaio al carbonio può essere esposto ad un attacco chimico diretto.

Per quantificare questa abrasione delle pareti viene impiegata la tecnica delle correnti parassite in quanto notevolmente precisa e veloce, tanto che diverse centinaia di misure possono essere prese nell'arco di un'ora utilizzando adeguate apparecchiature ET portatili.

[5]



Fig.4.4.5 Esempio di contenitore a pressione.

4.4.3 Sistemi di tubazioni: rilevazione e misura dei difetti superficiali

In ambito pratico si osserva che normalmente le tubazioni sono costituite da acciaio inossidabile, il quale è molto suscettibile alla tensocorrosione se viene esposto a cloruri ed umidità.

Una tipica fonte di cloruri con cui può trovarsi a contatto il metallo è senza dubbio l'isolamento applicato ai tubi; nel campo tecnico esso è disponibile con diverse percentuali di tali sostanze chimiche.

Il metodo a correnti parassite è notevolmente efficace per individuare le cricche presenti sulla superficie esterna delle tubazioni, nel caso in cui vengano provocate da tensocorrosione. Questa tecnica di controllo, a differenza della prova del liquido penetrante, rileva anche discontinuità molto strette.

La prova ET inoltre segnala i difetti che si trovano appena sotto la superficie ed anche all'interno di quello spessore (pellicolare) del materiale in cui si propagano le correnti parassite.

L'esame viene svolto (sulla superficie del tubo) molto velocemente da un operatore specializzato utilizzando delle sonde a punto (spot probes). [5]

4.4.4 Soffietti: rilevamento di discontinuità superficiali

Le crepe nei soffietti sono causate anch'esse da tensocorrosione.

I soffietti nella maggior parte dei casi (nelle industrie petrolchimiche) sono costruiti in cromo-nichel oppure in acciaio inox. Nella figura 4.4.6 si vede che essi vengono testati per rilevare irregolarità superficiali interne ed esterne al diametro stesso.

Il controllo avviene mediante una sonda di superficie inserita tra i solchi del soffietto, la quale scansiona tutta la sua circonferenza. La frequenza viene regolata al fine di ottenere una piena penetrazione delle correnti parassite, in modo tale che sia le discontinuità del diametro interno che quelle esterne possano essere individuate. [5]



Fig. 4.4.6 Esempio di test ET su un soffietto.

4.4.6 Turbine e compressori

La tecnica delle correnti parassite viene impiegata anche per rilevare i difetti superficiali nei componenti dei compressore e delle turbine, compresi i dischi e le pale.

Le discontinuità che vengono individuate in particolare comprendono le crepe nei dischi, nei margini posteriori delle pale e negli attacchi scanalati delle pale (figura 4.4.7).

In questi casi anche la prova magnetoscopica può essere utilizzata ma essa non è molto vantaggiosa in quanto la prova ET è più sensibile alle cricche particolarmente strette, si veda l'esempio di figura 4.4.7. [5]



Fig. 4.4.7 Test sugli attacchi scanalati delle pale con metodo ET.

4.4.7 Misura dell'usura

Attraverso il metodo ET può essere effettuata la misura di usura di una superficie.

Un esempio significativo di usura è quello che si ha nelle pale di una turbina a gas, infatti esse con il passare del tempo (se in funzione) sono soggette ad erosione, ed in particolare si creano dei problemi in prossimità dei fori di raffreddamento.

La tecnica ispettiva impiegata non fa altro che misurare lo spessore effettivo del materiale nelle vicinanze dei fori di raffreddamento, successivamente queste indicazioni dello strumento vengono confrontate con i dati storici del componente e così si ottiene indirettamente l'entità dell'usura. Normalmente, se una pala ha uno spessore minore di 0.5 mm essa viene inevitabilmente sottoposta a riparazione o sostituzione. [5]

4.5 Formazione e certificazione dei tecnici ET

Il metodo delle correnti parassite è una tecnologia sofisticata ed impegnativa, per questo motivo è molto importante che i tecnici che la utilizzano comprendano correttamente le indicazioni di queste prove. A tal fine si richiede che il personale debba essere istruito adeguatamente attraverso nozioni teoriche e pratiche. Normalmente, un tecnico ET che effettua i controlli PnD necessita di una certificazione di livello II secondo la norma SNT-TC-1-ASTM oppure UNI EN 473.

Tuttavia il livello II contiene varie certificazioni, ogni una delle quali si riferisce ad un aspetto o ad un tipo di applicazione dell'ET, perciò esistono numerosi tecnici professionisti con competenze e conoscenze differenti, e ciascuno di essi è specializzato nell'applicazione di una determinata prova; ad esempio un tecnico qualificato per l'individuazione delle cricche non sarà in grado di misurare lo spessore di un rivestimento senza una formazione supplementare. [5]

Nella figura 4.5.1 sono riportate le norme a cui fanno capo i capitoli riguardanti la qualificazione del personale addetto alle PnD.

Qualificazione del personale

Norme di metodo	
UNI EN 473:2008-11	Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive - Principi generali
CEN/TR 14748:2004	Non-destructive testing - Methodology for qualification of non-destructive tests
UNI CEN/TS 15053:2005	Prove non distruttive - Raccomandazioni per i tipi di discontinuità nei campioni d'esame
CEN/TR 15589:2007	Non destructive testing - Code of practice for the approval of NDT personnel by recognised third party organisations under the provisions of Directive 97/23/EC
CEN ISO/TR 25108:2006	Non-destructive testing - Guidelines for NDT personnel training organizations
Norme di prodotto	
UNI EN 4179:2006	Serie aerospaziale - Qualificazione ed approvazione del personale per le prove non distruttive
UNI EN 10256:2002	Prove non distruttive dei tubi di acciaio - Qualificazione e competenza del personale per le prove non distruttive di livello 1 e 2

Fig. 4.5.1 Norme UNI-EN per la qualificazione del personale aggiornate al 5 febbraio 2010.

4.6.1 Controlli magnetoscopici nelle applicazioni industriali

La prova magnetoscopica si basa sull'analisi delle variazioni nel campo magnetico che si presentano in corrispondenza di difetti superficiali o sub-superficiali, questa tecnica ispettiva può essere applicata solo su materiali ferromagnetici (p.e. ferro, nichel, cobalto ed alcune delle loro leghe).

Casi tipici in cui viene applicata l'MT sono le fusioni in acciaio a struttura ferrosa, i fucinati, gli estrusi, gli stampati, le saldature (saldature testa a testa, ad angolo ecc.) ed altri componenti a

matrice ferrosa. Tali controlli vengono realizzati con un magnetoscopio a bancale oppure operando con attrezzature più maneggevoli quali giogo portatile oppure tramite magnetoscopio a puntali. È un tipo di controllo PnD estremamente diffuso nell'industria petrolchimica, automobilistica ed aerospaziale.

4.6.2 Applicazioni delle Prove MT

Nel campo pratico la magnetoscopia è particolarmente adatta per la ricerca di difetti superficiali e sub-superficiali quali: cricche, inclusioni, ripiegature, ecc., mentre risulta assolutamente inefficace o quasi nel rilevare difetti interni e difetti tondeggianti.

Le dimensioni minime del difetto che possono essere individuate dipendono soprattutto dalla distanza dell'irregolarità dalla superficie, tuttavia va ricordato che il limite di rilevabilità è migliore rispetto a quello della tecnica con liquidi penetranti.

Numerose sono le tecniche d'esame del metodo magnetoscopico. La scelta dipende da numerosi fattori, i principali sono:

- il tipo di prodotto da controllare (saldatura, fucinati, stampati, estrusi etc.),
- la sua forma
- lo stato superficiale del pezzo (saldato, molato, rettificato, sabbiato etc.)
- la metodologia di controllo (con puntali, con elettromagnete, con bancale fisso etc.)
- il tipo di particelle magnetiche da impiegare (fluorescenti, a secco, ad umido, a contrasto di colore etc.)

4.7.1 Metodologia pratica

All'atto pratico per poter effettuare delle prove PnD utilizzando il metodo magnetoscopico è necessario seguire in maniera propedeutica alcune procedure, esse vengono svolte per ottenere risultati attendibili durante l'ispezione dei materiali esaminati.

Queste operazioni, come imposto dalla specifica norma di riferimento UNI EN ISO 9934-1 [11], sono:

1. preparazione delle superfici sottoposte al controllo
2. magnetizzazione
3. applicazione del materiale rilevatore
4. ispezione della superficie

5. smagnetizzazione
6. pulizia finale

4.7.2 Preparazione delle superfici

Inizialmente prima di effettuare un controllo PnD le superfici da esaminare devono essere pulite ed asciutte, esenti da polvere, scorie, spruzzi di saldatura, grasso o qualunque altro fattore che potrebbe falsare il risultato dell'esame. Si evince perciò che la presenza di contaminanti può ostacolare o addirittura impedire il movimento delle particelle magnetiche sotto l'azione del campo esterno, rendendo difficoltosa la visualizzazione delle indicazioni dei difetti.

Per eseguire la pulizia vengono usati vari prodotti o utensili: sgrassanti, spazzole, solventi, idropulitrici e quant'altro. Nel caso di superfici irregolari è necessario eliminare o quanto meno ridurre il più possibile tutto ciò che può mascherare le discontinuità.

4.7.3 Magnetizzazione

Nella magnetoscopia fondamentale è la magnetizzazione delle superfici di un materiale, essa avviene tramite:

- sistema elettrico: facendo circolare nel pezzo una corrente elettrica ad alta intensità e bassa tensione
- sistema magnetico: si produce la magnetizzazione del materiale campione mediante immersione in un campo magnetico.

Per ulteriore chiarezza si veda l'immagine 4.7.1 nella quale vengono riportati questi sistemi di magnetizzazione.

La direzione del campo risulta piuttosto critica, infatti solo i difetti che presentano un orientamento tra i 45 e i 90 gradi (condizione di massima visibilità) rispetto alla direzione delle linee di forza del campo potranno essere individuati.

L'equipaggiamento più usato per la magnetizzazione solitamente è il giogo portatile (magnete permanente o elettromagnete foggiato ad "U") ma comunque si impiegano anche gli strumenti: a bobina passante, spire avvolgenti, bobina a spire concatenate, conduttore passante (si veda fig.4.7.2).

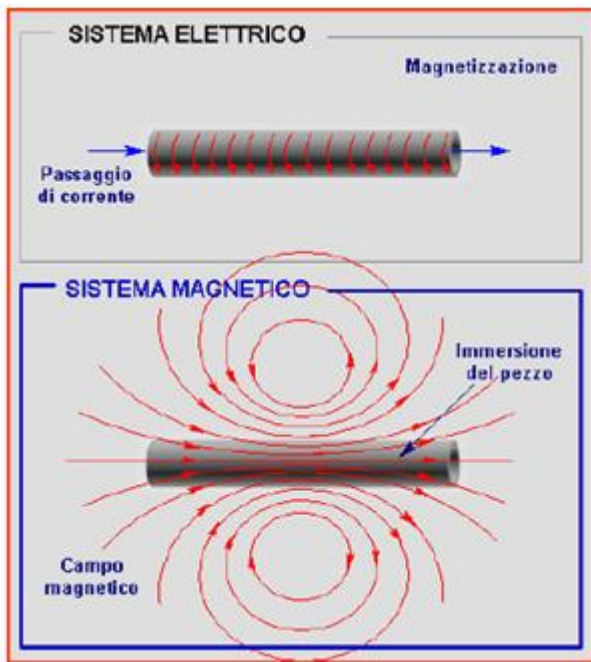


Fig. 4.7.1 Sistemi di magnetizzazione.

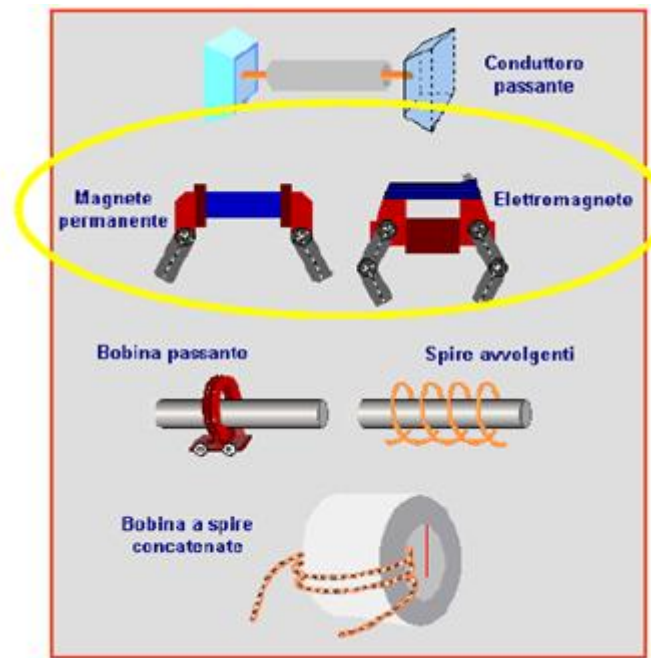


Fig. 4.7.2 Esempi di apparecchiature per effettuare la magnetizzazione.

4.7.4 Applicazione delle particelle

Per il controllo MT possono essere utilizzati due tipi di polveri magnetiche:

- secche
- umide

Queste particelle a loro volta possono essere del tipo:

- colorate
- fluorescenti

La caratteristica fondamentale delle polveri magnetiche è quella di avere un'alta permeabilità magnetica ed un basso magnetismo residuo, ciò significa che si magnetizzano molto facilmente e nel momento in cui termina l'azione magnetica si distaccano dalla parte magnetizzata. Le polveri magnetiche inoltre devono presentare, sulla superficie sotto analisi, un adeguato contrasto, ed è appunto per tale motivo che si utilizzano dei colori piuttosto vivaci.

Nelle prove MT si possono utilizzare essenzialmente tre metodi per applicare le polveri magnetiche (ovviamente la scelta è ponderata in base ai vantaggi che offre ciascuna tecnica) :

1. a secco (rilevatori a secco)
2. ad umido o in sospensione liquida (rilevatori in sospensione liquida)
3. bombolette spray

Metodo a secco

Il metodo a secco consiste nell'applicare, attraverso un mantice (apparecchio atto a produrre un soffio d'aria), le particelle magnetiche sulla superficie del materiale in esame; questa operazione viene effettuata durante il passaggio di corrente all'interno del campione in analisi ed è interrotta prima della fine di tale circolazione. Analogamente anche la rimozione del possibile accumulo di polvere magnetica in eccesso si effettua, prima di interrompere l'alimentazione, con un leggero soffio d'aria.

La polvere a secco deve avere una granulometria compresa fra 50 e 300 micron. Questa polvere deve essere usata preferibilmente per i controlli in piano, su superfici non lavorate. [9]

La valutazione delle indicazioni deve essere eseguita durante il ciclo di magnetizzazione e durante la rimozione della polvere in eccesso.

Un vantaggio nell'utilizzo di queste polveri a secco è quello che esse sono più indicate per la rilevazione di difetti sub-superficiali.

Metodo a umido o in sospensione liquida

Tale tecnica considera una soluzione liquida contenente delle particelle magnetiche, essa viene spruzzata con adeguata attrezzatura, azionata manualmente o in maniera automatica, sulla superficie da studiare cercando di coprire tutta la zona in esame, prima e durante il passaggio di corrente. E' importante che l'impulso di corrente sia sufficientemente lungo, per permettere alle particelle di muoversi attraverso il liquido.

I rivelatori in sospensione umida, hanno la caratteristica di avere le particelle magnetiche diluite in un liquido a base di idrocarburi alifatici, che funge da mezzo di trasporto delle particelle.

Il rivelatore fluorescente viene utilizzato con il magnetoscopio a bancale, mentre il rivelatore a polvere nera, contenuta in bomboletta spray, viene utilizzato nei test condotti con l'ausilio del giogo magnetico.

La granulometria delle particelle in sospensione liquida deve essere compresa tra 0,5 e 35 micron.

Con queste particelle “liquide” la valutazione delle eventuali irregolarità deve essere eseguita durante o dopo il ciclo di magnetizzazione.

La concentrazione delle particelle colorate deve essere compresa tra 1,2% e 2,4% del volume totale del liquido mentre, per quanto riguarda le particelle fluorescenti, la concentrazione deve essere compresa fra 0,1% e 0,5% del volume del liquido.

Il controllo per determinare la concentrazione delle particelle nella sospensione, viene eseguito mediante una apposita provetta graduata (figura 4.7.3), all'interno della quale 100 ml di soluzione vengono lasciati decantare per circa 30 minuti. Trascorso questo periodo di tempo le particelle depositate devono segnare le tacche dal valore di 0,05 a 0,1 ml. Nel caso in cui le particelle decantate siano inferiori a quanto richiesto, occorrerà aggiungere altra polvere magnetica mentre, nel caso contrario, occorrerà aggiungere altro liquido. [9]

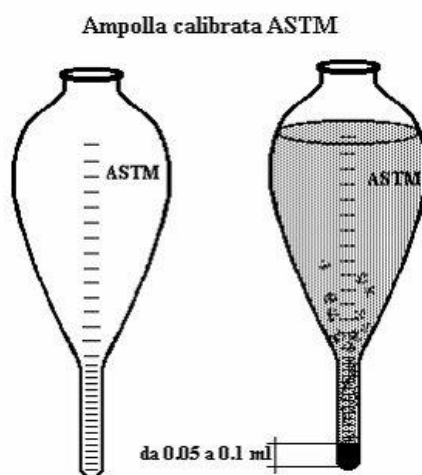


Fig. 4.7.3 Ampolla ASTM per il controllo della concentrazione nei rilevatori liquidi.

Metodo mediante uso di bombolette spray

Questo è il metodo più utilizzato nell'ambito industriale perché fondamentalmente rapido e comodo, tanto è vero che si utilizzano delle bombolette spray, le cui particelle magnetiche in soluzione sono già pronte per l'uso pratico.

Prima dell'uso, la bomboletta deve essere agitata con cura in modo da omogeneizzare il suo contenuto (le particelle), dopo di che il liquido deve essere spruzzato in modo uniforme durante, la magnetizzazione, sulla superficie da esaminare. La valutazione delle probabili indicazioni deve essere eseguita subito dopo il ciclo di magnetizzazione.

Nella figura 4.7.4 viene mostrata qualitativamente la sensibilità di vari metodi MT con polveri magnetiche a secco e ad umido.

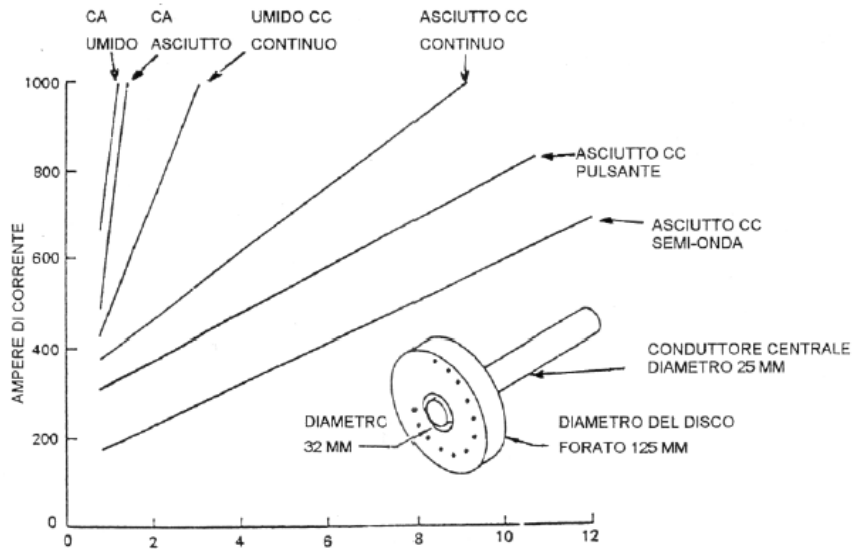


Fig.4.7.4 Metodi MT applicati ad un componente in fase di controllo.

4.7.5 Ispezione della superficie

Allo scopo di valutare le discontinuità, nell'ispezione MT viene impiegata una luce naturale se si utilizzano particelle a contrasto di colore, mentre nel caso di rilevatore fluorescente si utilizza una cabina oscurata in cui il pezzo sotto analisi viene illuminato da una luce nera o luce di Wood, mediante una omonima lampada che produce luce non direttamente visibile dall'occhio umano. Tale lampada inoltre può essere utilizzata per illuminare materiali in cui una radiazione ultravioletta induca effetti di fluorescenza e fosforescenza.

I difetti superficiali tendono a fornire segnalazioni nitide e ben delimitate infatti le particelle sono ben legate tra loro, mentre i difetti sub superficiali forniscono indicazioni più larghe e sfuocate.

Nella figura 4.7.5 vengono mostrati alcuni risultati ottenuti attraverso la tecnica magnetoscopica usando dei rilevatori ad umido.

Oltre a ciò si deve prestare particolare attenzione alle indicazioni non rilevanti come:

- spigoli o variazioni di sezione
- punti di unione tra differenti materiali
- contorni dei cordoni di saldatura
- lavorazioni meccaniche
- gap d'aria in presenza di accoppiamenti ottenuti mediante incastro.

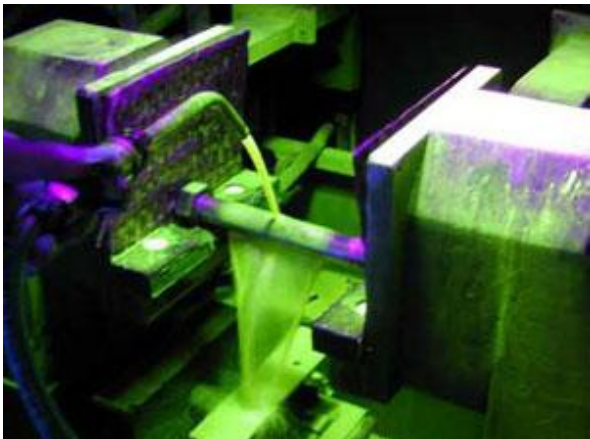
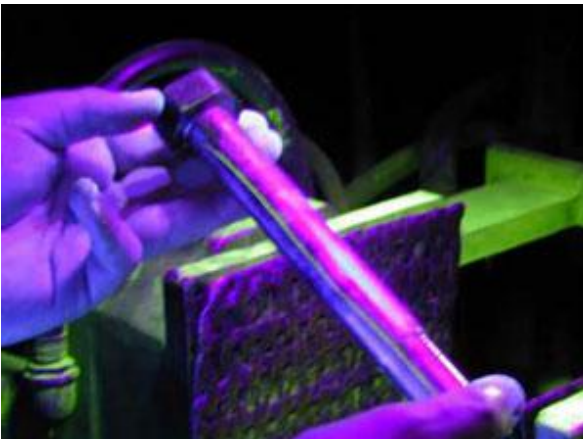
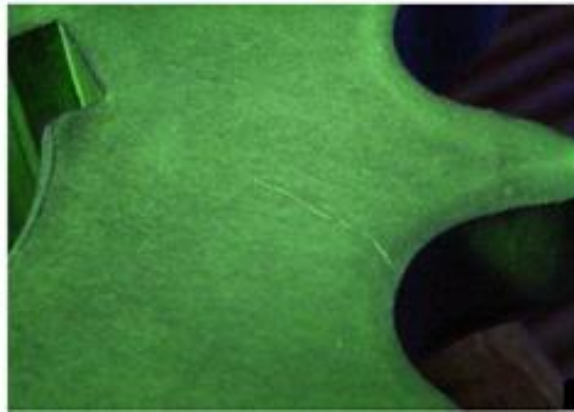
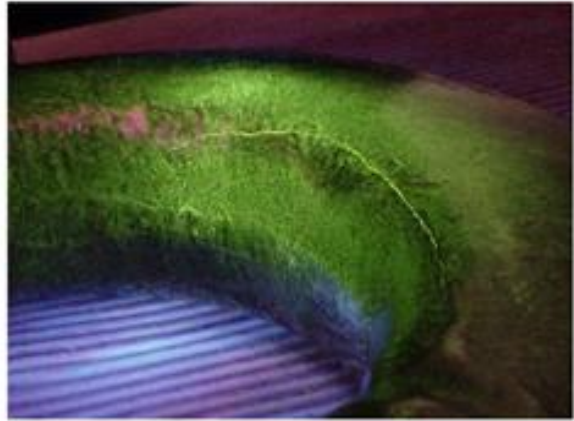


Fig.4.7.5 Esempi di MT con tecnica ad umido.

4.7.6 Smagnetizzazione

Dopo aver svolto la prova magnetoscopica sul materiale in esame, in esso è presente un campo magnetico residuo in grado di interferire negativamente con le funzionalità o con successive lavorazioni a cui potrà essere sottoposto il campione. Per evitare ciò si procede effettuando una smagnetizzazione del provino in analisi soprattutto laddove risulti particolarmente dannosa la presenza di una magnetizzazione residua.

Questa operazione consiste semplicemente nel far passare il campione in un tunnel smagnetizzante, in cui esso viene sottoposto ad un campo magnetico di polarità inversa al precedente e d'intensità gradualmente decrescente, in altre parole si agisce sul ciclo d'isteresi riducendolo progressivamente cercando di ripristinare le condizioni originarie del materiale.

Le possibili ragioni per cui è indispensabile la smagnetizzazione sono:

- interferenza con altri processi tecnologici (lavorazioni meccaniche, saldatura ecc.)
- interferenza con strumenti di misura posizionati in prossimità del componente
- particelle metalliche abrasive che possono rimanere attratte dal materiale e quindi essere causa di fenomeni di danneggiamento superficiale

4.7.7 Pulizia finale

Permette di eliminare i residui ovvero tutte le particelle in eccesso rimaste sulla superficie del provino in analisi, questa operazione viene effettuata allo scopo di ottenere nuovamente l'aspetto iniziale del materiale.

4.8 Certificazioni

Come per il metodo delle correnti indotte anche nell'MT è indispensabile la formazione dei tecnici adetti a questa tecnica ispettiva. Infatti essendo il fattore umano una componente fondamentale nei controlli non distruttivi, lo svolgimento delle prove deve essere affidata a personale tecnico adeguatamente qualificato e certificato (secondo i livelli I-II previsti dalla UNI EN 473), di provata capacità, serietà professionale e che abbia maturato una notevole esperienza nel settore specifico.

4.9 Esempio di controllo MT nell'aeronautica

La magnetoscopia viene utilizzata in molti settori industriali tra questi anche quello aeronautico. Con questa tecnica PnD si valuta l'integrità superficiale di numerosi componenti costituiti da materiale con apprezzabili caratteristiche ferromagnetiche.

Nei velivoli questa metodologia di analisi viene applicata in particolare sia per il controllo di parti vitali come quelle dei motori come ad esempio i dischi della turbina, gli alberi di trasmissione ecc., sia per l'esame di altre strutture del velivolo quali cilindri dei carrelli d'atterraggio e tutta la bulloneria ferromagnetica utilizzata nelle giunzioni critiche presenti sull'aeromobile.

A titolo di esempio si ricordi che la tecnica magnetoscopica effettuata utilizzando particelle magnetiche fluorescenti, caratterizzate da una maggiore sensibilità rispetto ad altri tipi di polveri magnetiche, si è rivelata molto utile per riuscire a capire le cause di un incidente aereo verificatosi negli Stati Uniti, nei pressi di Sioux-City, nel luglio '89 ad un DC-10 di proprietà di una compagnia aerea americana. Il velivolo in oggetto, equipaggiato con 3 motori GE CF6-6, subì una completa avaria di tutti i sistemi idraulici a causa dell'esplosione in volo del motore di coda, innescata dalla frattura della ventola del compressore, lasciandolo completamente senza controllo da parte dei piloti. In quell'occasione la US-National Transportation Safety Board (NTSB) richiese alla Federal Aviation Administration (FAA) una "direttiva di aeronavigabilità" per una particolare ispezione dell'albero e del disco compressore a cui, nel malfunzionamento in volo, fu attribuita la rottura del motore.

Più precisamente la NTSB suppose che vi fosse stata una separazione del disco compressore dalla flangia dell'albero nello stadio compressore, successivamente quindi si sarebbe avuto il danneggiamento dell'anello di contenimento del disco ed il fatale sbilanciamento dell'intero stadio compressore sottoposto ad un elevato momento torcente.

A seguito dell'incidente di Sioux-City la stessa compagnia aerea individuò su un motore dello stesso tipo, tramite una ispezione con particelle magnetiche fluorescenti, una serie di incrinature su molti dei fori di fissaggio del disco all'albero del compressore. Le cricche si estendevano radialmente da 1 a 12 mm con una profondità massima di 6 mm; i risultati delle analisi ed i particolari difetti riscontrati sulla flangia consentirono di modificare le procedure di verifica del velivolo, imponendo un'accurata ispezione del componente in oggetto ad ogni sua rimozione dall'albero di bassa pressione della turbina.

Tuttavia numerosi interrogativi, inerenti al mancato ritrovamento dei bulloni di serraggio flangia-albero, rimasero irrisolti. Pertanto, nonostante il controllo con particelle magnetiche abbia consentito di individuare le possibili cause dell'incidente, solo una successiva analisi metallografica dei componenti in oggetto avrebbe potuto confermare i risultati ottenuti nell'esame non distruttivo effettuato e fornire quindi ulteriori informazioni alle unità competenti americane preposte alla sicurezza del volo. La magnetoscopia, come altri metodi di esame non distruttivo, si rivela quindi molto importante nel prevenire lo sviluppo di difetti che, se non individuati per tempo, porterebbero alla rottura di numerosi componenti compromettendo seriamente la sicurezza del servizio aereo.

CAPITOLO 5

ESEMPIO DI ANALISI DEI RISULTATI NELLA MAGNETOSCOPIA

5.1.1 Il metodo FEM

Il Metodo degli Elementi Finiti, definito con l'acronimo FEM (dall'inglese *Finite Element Method*) nasce in sordina negli anni 60 ma, successivamente allo sviluppo degli strumenti informatici, ha una evoluzione ed uno sviluppo esponenziale, suscitando notevole interesse per il vasto numero di campi cui è possibile applicare i suoi principi.

Grazie alla sua inoppugnabile flessibilità e versatilità, la modellazione FEM (procedimento in cui si passa dal sistema fisico ad un modello matematico) si afferma come uno dei migliori strumenti per l'indagine di sistemi complessi e sperimentazioni che in laboratorio comporterebbero spese eccessive, difficoltà logistiche e difficoltà legate alla misurazione fisica delle varie grandezze.

In breve tale metodo diviene una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche.

5.1.2 Generalità

F.E.M. si applica a quei corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni molto contenute. Ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee. La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la *discretizzazione* (trasformazione di un fenomeno continuo in un suo corrispondente discreto) attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da elementi finiti, aventi forma di:

- triangoli e quadrilateri per domini 2D
- esaedri e tetraedri per domini 3D

Nella sua formulazione originaria e finora più diffusa, il metodo agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere problemi basati su leggi costitutive di tipo lineare. Tipici i problemi di sforzi di:

deformazioni in campo elastico, la diffusione del calore all'interno di un corpo materiale, l'andamento del campo magnetico ecc.(si veda la figura 5.1.1).

Alcune soluzioni più raffinate consentono di esplorare il comportamento dei materiali anche in campo fortemente non lineare.

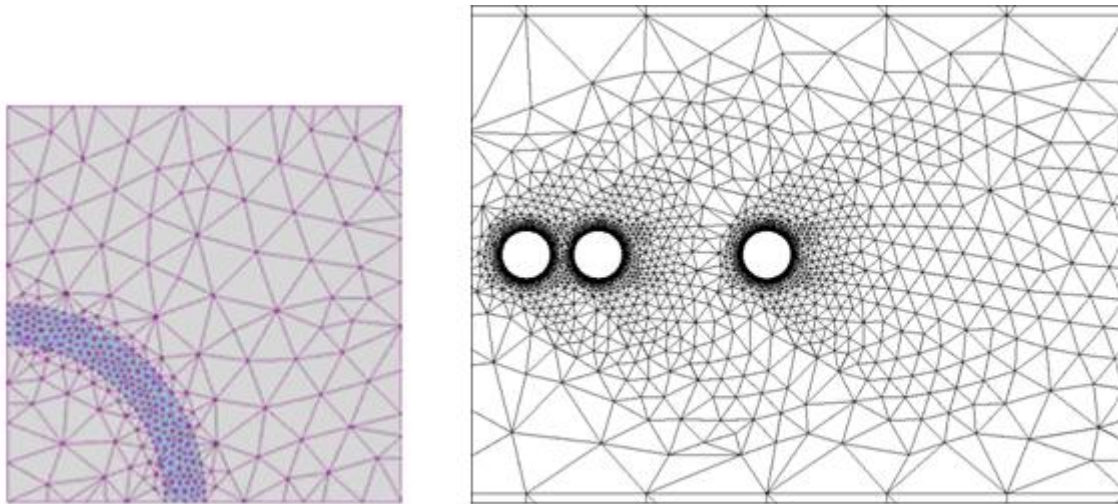


Fig. 5.1.1 Esempi di mesh o griglia di calcolo

5.2.1 Il Gradiente

Nella matematica il gradiente di un campo scalare è una funzione a valori reali di più variabili reali, viene definita in una regione a due, tre o più dimensioni. Il gradiente di una funzione è definito come il vettore che ha per componenti cartesiane le derivate parziali della funzione.

Perciò il gradiente rappresenta la direzione di massimo incremento di una funzione di n variabili

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Il gradiente è quindi una grandezza vettoriale che indica in che modo una grandezza fisica varia in funzione dei suoi diversi parametri. Nel nostro caso un gradiente di campo magnetico è una variazione del campo magnetico rispetto alla posizione.

5.2.2 Definizione e rappresentazione cartesiana

Si consideri una funzione scalare derivabile f (come per esempio la temperatura all'interno di una stanza o il valore del campo magnetico), definita in una regione dello spazio di volume V racchiusa

dalla superficie S . Il gradiente di f è un vettore, funzione di qualsiasi sistema di coordinate nello spazio (figura 5.2.1). Per una funzione di due variabili:

$$f: X \rightarrow \mathbb{R}$$

con X insieme aperto di \mathbb{R}^2 il suo gradiente nel punto (x_0, y_0) si esprime come un vettore che ha per componenti le derivate parziali prime calcolate nel punto:

$$\begin{aligned} \text{grad } f(x_0, y_0) &= \nabla f(x_0, y_0) = \begin{pmatrix} f_x(x_0, y_0) \\ f_y(x_0, y_0) \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{i} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

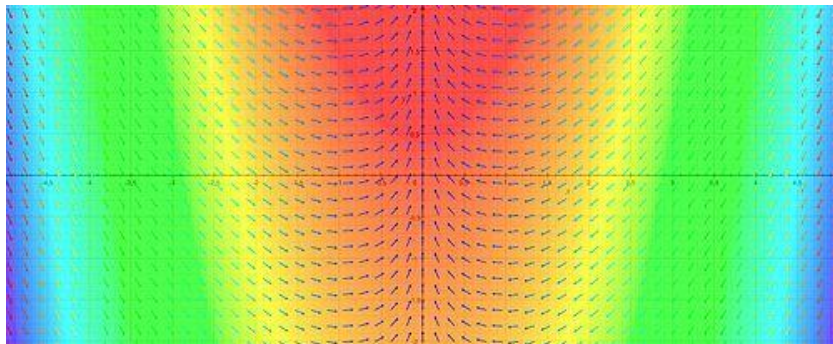


Fig. 5.2.1 Una funzione da $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ e il suo gradiente come campo vettoriale.

In \mathbb{R}^3 si definisce similmente:

$$\begin{aligned} \text{grad } f(x_0, y_0, z_0) &= \nabla f(x_0, y_0, z_0) = \begin{pmatrix} f_x(x_0, y_0, z_0) \\ f_y(x_0, y_0, z_0) \\ f_z(x_0, y_0, z_0) \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{e}_x \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} + \mathbf{e}_z \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z} \end{aligned} \quad (5.3.2)$$

In \mathbb{R}^n si definisce:

$$\begin{aligned} \text{grad } f(x_1, \dots, x_n) &= \nabla f(x_1, \dots, x_n) = \\ &= \mathbf{e}_1 \frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_1} + \dots + \mathbf{e}_n \frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_n} \end{aligned} \quad (5.3.3)$$

dove con \mathbf{e}_i si indica il versore della direzione i -esima con tutti gli elementi nulli tranne l' i -esimo che vale 1. [2]

5.3 L'utilizzo di FEM nella magnetoscopia

Nel corso degli anni il continuo miglioramento di tecniche simulative, come il metodo degli elementi finiti (FEM), ha portato ad una accuratezza sempre maggiore per la risoluzione di fenomeni o problemi molto complessi. Tali perfezionamenti inoltre hanno permesso delle realistiche ed affidabili simulazioni nel campo della magnetoscopia (MT) applicata.

Sperimentalmente si è visto che una miglior comprensione quantitativa della tecnica MT unita alla conoscenza di fattori che ne influenzano la sensibilità e l'affidabilità, contribuisce non solo ad una riduzione di tempo e costi nei controlli PnD (Prove non Distruttive), ma anche ad una migliore analisi dei dati sperimentali raccolti e quindi ad un continuo perfezionamento nell'ambito progettuale.

In generale nella magnetoscopia un campo magnetico, generato da apposite bobine, induce nell'oggetto sotto esame una forza magnetica responsabile dell'adesione delle particelle magnetiche nei difetti del materiale, dunque tale forza è proporzionale al gradiente del campo magnetico; inoltre è importante notare che la distorsione del campo magnetico è maggiore quando esso è perpendicolare all'asse di un difetto, perciò in tale condizione viene massimizzata l'ampiezza del gradiente dello stesso campo magnetico, un altro fattore da non trascurare in questo metodo ispettivo sono le proprietà fisiche del materiale di cui sono costituite le particelle magnetiche impiegate. [1]

5.4.1 Simulazione pratica della magnetoscopia

Per effettuare una simulazione pratica del metodo magnetoscopico, riferendosi alla bibliografia [1], si è analizzato un provino la cui forma è sostanzialmente quella di un tubo cilindrico in materiale ferromagnetico, in cui vengono risolte le equazioni di Maxwell con riferimento ad un sistema di coordinate cilindriche (r, θ, z) .

Nella figura 5.4.1 è riportata la geometria dell'oggetto, dotato di simmetria assiale, e le dimensioni della bobina indispensabile a creare il campo magnetico per l'orientazione delle particelle.

Per fare in modo che le particelle magnetiche aderiscano nel modo più opportuno ai difetti nelle pareti del materiale, è necessaria una adeguata sorgente di corrente allo scopo di generare una forza magnetica che attrae e mantiene i corpuscoli nel sito dell'imperfezione.

In un sistema di coordinate cilindriche, il campo magnetico \vec{H} può essere scomposto in una componente radiale H_r ed in una lungo la direzione assiale H_z .

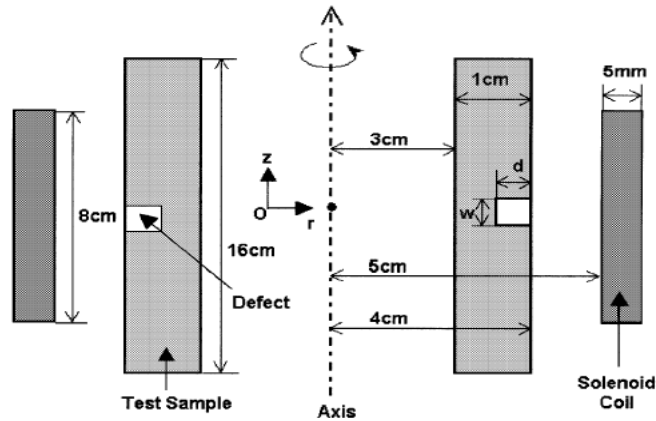


Fig 5.4.1 Geometria del provino con simmetria assiale.

La forza magnetica, nelle componenti assiali e radiali, esercitata sulle particelle magnetiche saturate può essere descritta dalle relazioni:

$$F_r = -K \left(H_r \frac{\partial H_r}{\partial r} + H_z \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \quad (5.4.1)$$

$$F_z = -K \left(H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} + H_r \frac{\partial H_r}{\partial z} \right) \quad (5.4.2)$$

dove:

- K è una costante che contiene informazioni sulle proprietà magnetiche delle particelle magnetiche, come la suscettività ed il volume di questi elementi infinitesimi.
- $\frac{\partial H_r}{\partial r}$ e $\frac{\partial H_z}{\partial z}$ rappresentano il gradiente del campo magnetico secondo le dimensioni di riferimento.

Ai fini del calcolo, si assume in prima approssimazione che la polvere magnetica venga depositata uniformemente sulla superficie del campione.

Il materiale in esame è dotato di permeabilità non lineare, quindi l'energia magnetica "immagazzinata" nel materiale sarà:

$$W = \int \left(\int_0^{\vec{H}} \vec{B}(\vec{h}) \cdot d\vec{h} \right) dV \quad (5.4.3)$$

Dove:

- $\vec{B}(\vec{h})$ rappresenta l'induzione magnetica in funzione di un campo magnetico arbitrario
- \vec{H} è il campo magnetico considerato in un volume infinitesimo dV

Il valore dell'energia totale, estrapolata dagli i -esimi elementi della mesh, può essere calcolata approssimativamente come:

$$W_i = \left(\sum_{i=1}^{n_H} \vec{B}(\vec{h}_i) \cdot \Delta \vec{h}_i \right) V_i$$

$$\text{Tale che: } \vec{h}_i = \sum_{k=1}^i \Delta \vec{h}_k \quad \text{e} \quad \vec{H} = \sum_{k=1}^{n_H} \Delta \vec{h}_k \quad (5.4.4)$$

Dove:

- \vec{H} è il campo magnetico
- V_i è il volume degli i -esimi elementi della mesh

Si evince che la sommatoria nella (5.4.4) approssima il valore dell'integrale all'interno delle parentesi dell'equazione (5.4.3).

L'aspetto che risulta più evidente da tale analisi è l'importante ruolo della componente radiale della forza magnetica, infatti essa causa l'adesione delle particelle magnetiche nelle irregolarità del provino; questo parametro è esprimibile, considerando un volume V e la sua suscettività non lineare $\chi(H)$ relativa al suo campo magnetico H , dalla relazione:

$$F_r = - \frac{dW}{dr} = \mu_0 \chi(|\vec{H}|) V \left(\frac{H_r \partial H_r}{\partial r} + \frac{H_z \partial H_z}{\partial r} \right) = \mu_0 \chi(|\vec{H}|) V A_r \quad (5.4.5)$$

Dove:

- A_r è una quantità data dal rapporto:

$$A_r = F_r / K \quad (5.4.6)$$

proporzionale alla componente della forza magnetica

- μ_0 è la permeabilità del vuoto

Per la facilitazione dei calcoli, si assume che l'intensità del campo magnetico H e la suscettività $\chi(H)$ delle particelle magnetiche siano costanti nell'area di ciascun elemento finito della mesh; chiaramente questa condizione è una semplificazione adottata solo per la trattabilità delle equazioni risoltrici.

Pertanto, dalla (5.4.5), il volume totale delle particelle magnetiche, degli i -esimi elementi finiti, che definiscono la quantità complessiva della polvere magnetica conservata all'interno di un difetto è dato dalla formula:

$$V_i = \frac{1}{\mu_0 \chi(|\vec{H}|)} \left(\frac{\frac{dW}{dr}}{-A_r} \right) \approx \frac{1}{\mu_0 \chi(|\vec{H}|)} \left(\frac{\Delta W}{\vec{H} \cdot \Delta \vec{H}} \right) \quad (5.4.7)$$

Con:

- $\Delta \vec{H}$ è la variazione del vettore \vec{H}
- ΔW è la variazione dell'energia W nella direzione radiale. [1]

5.5 Algoritmo di FEM nell'MT

Sia R_i il raggio di una particella magnetica i -esima all'interno di un difetto, il suo valore approssimato di volume (per un problema assial-simmetrico come quello analizzato) è il prodotto dell'area dell'elemento finito $2\pi R_i$ e della sezione trasversale A_i di esso, quest'ultima è data da:

$$A_i = \frac{1}{2\pi R_i \mu_0 \chi(|\vec{H}|)} \left(\frac{\Delta W}{\vec{H} \cdot \Delta \vec{H}} \right) \quad (5.5.1)$$

Ai fini della stima del volume delle i -esime particelle all'interno di un difetto, viene calcolata la sezione trasversale per ciascun elemento della polvere magnetica; per far ciò si è utilizzato un algoritmo il cui contenuto si basa principalmente sul confronto tra A_i e Δ_i (area della griglia o della mesh) quindi:

$$A_i \leq \Delta_i \quad (5.5.2)$$

Se A_i è molto minore dell'area Δ_i allora l'algoritmo della simulazione è terminato, ed il valore A_i è memorizzato su una struttura dati degli i -esimi elementi; perciò a fine ciclo per ottenere un risultato viene effettuata la sommatoria totale di queste aree ($\sum A_i$) da cui si ricava l'accumulo di particelle magnetiche all'interno della cricca.

Nel caso in cui sia $A_j \geq \Delta_j$ per qualsiasi elemento finito j , la polvere magnetica occupa completamente tutta la regione (suddivisa nei j -esimi elementi finiti) del campione. Ciò sta a significare che il parametro relativo alle proprietà e al tipo di materiale scelto per la simulazione non è corretto e perciò non è possibile raggiungere un risultato FEM realistico e affidabile. Quindi il parametro deve essere necessariamente modificato con valori di esso più appropriati. Successivamente il confronto (5.5.2) viene nuovamente svolto allo scopo di determinare l'accumulo di particelle nell'irregolarità.

Questo ciclo di simulazione quindi si ripete finché non vengano soddisfatte le condizioni del confronto (5.5.2).

Concludendo, l'algoritmo FEM considerato è un'applicazione utile per l'analisi dei dati relativi di una discontinuità usando un processo ricorsivo che aggiorna le caratteristiche del materiale (presenti negli elementi finiti) in base all'iterazione tra le particelle magnetiche e le condizioni aggiornate del campo magnetico. [1]

Nella figura 5.4.1 viene mostrato un semplice schema logico riassuntivo dell'algoritmo:

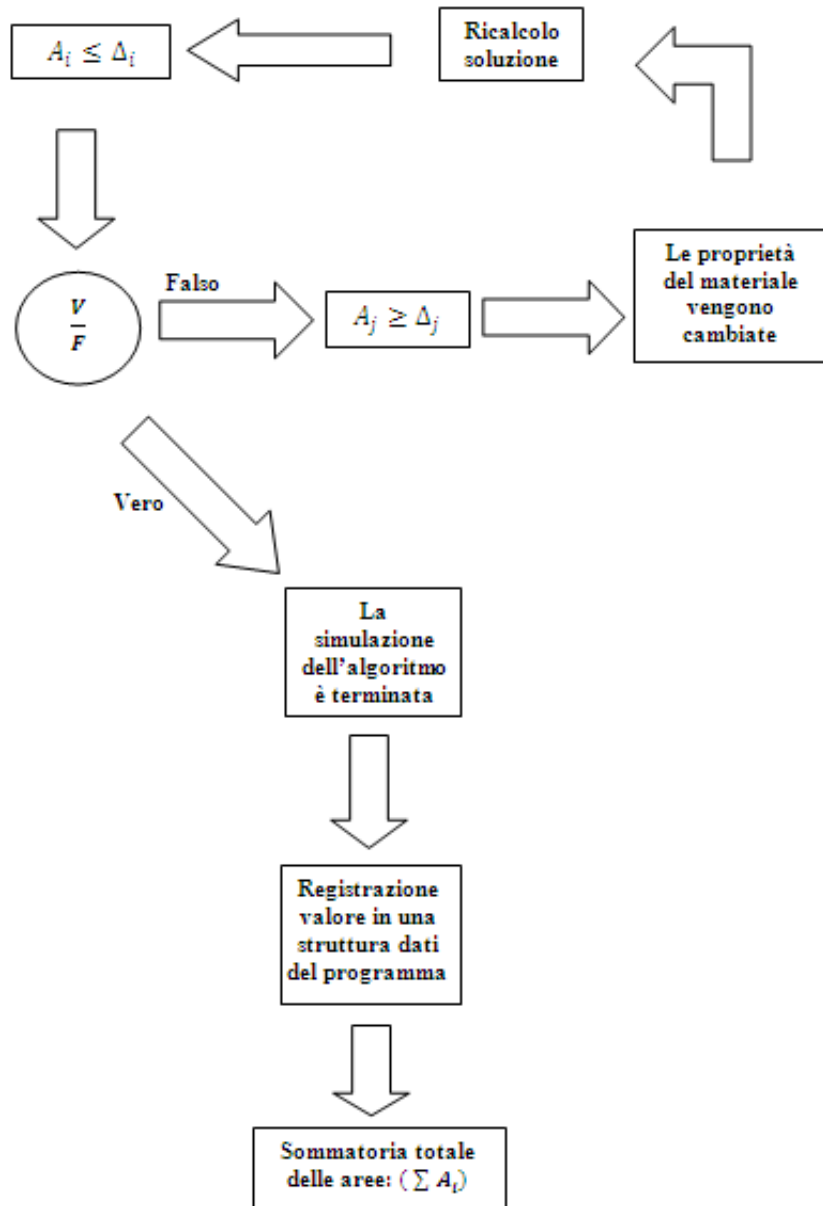


Fig.5.4.1 Schema logico dell'algoritmo

5.6 Sensibilità dell'analisi con l'uso di FEM

Simulando svariate taglie e geometrie di cricche in un materiale, con l'ausilio di un solenoide responsabile della sorgente del campo magnetico, con l'esperienza riportata dal testo di riferimento [1] si è potuto constatare un forte incremento nell'adesione delle particelle magnetiche alla pareti delle irregolarità con l'aumento della profondità del difetto, considerando però una larghezza di esso costante; mentre nel caso contrario l'accumulo di particelle all'interno di una discontinuità diminuisce all'aumentare della larghezza di esso.

Nella figura 5.6.1 è riportata l'analisi della sensibilità dell'accumulo della polvere magnetica in un difetto (dove la densità di corrente applicata è di 0.1 A/m^2):

- a) andamento con profondità del difetto variabile fissando quattro valori differenti di larghezza
- b) andamento con larghezza del difetto variabile e con quattro diversi parametri di profondità. [1]

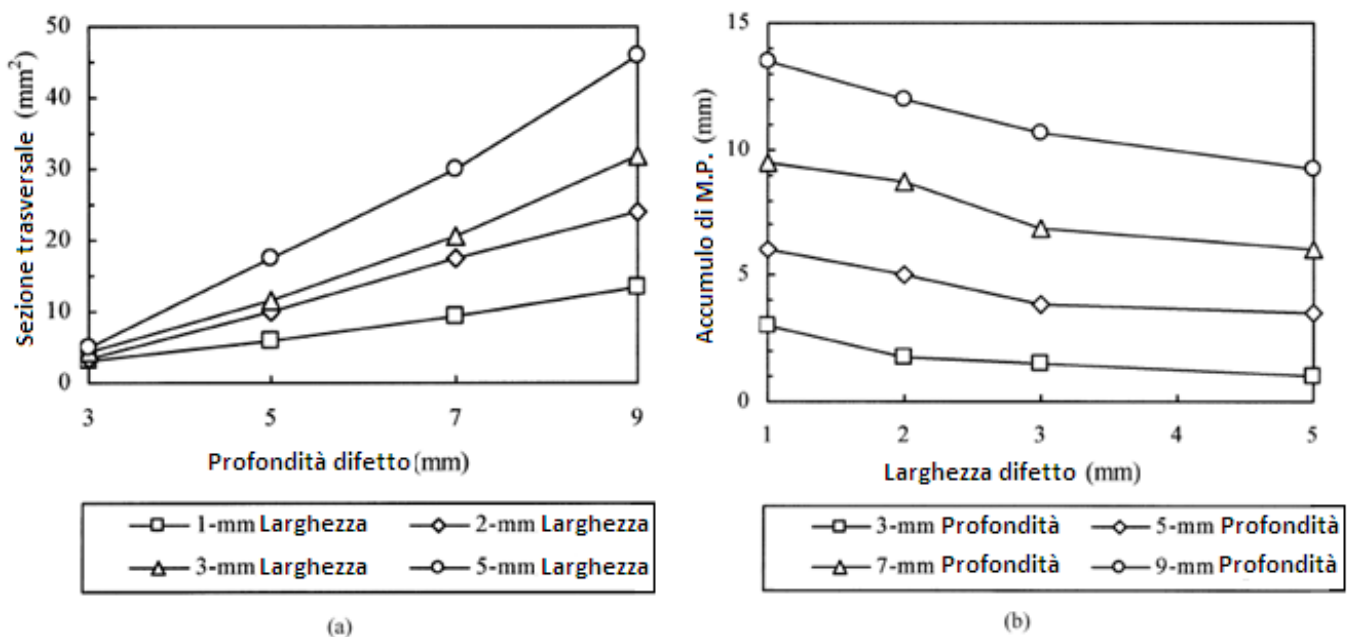


Fig. 5.6.1 Quantità di particelle magnetiche all'interno di un difetto.

Da tali considerazioni si deduce che l'MT è molto sensibile ai difetti acuti e profondi rispetto a quelli più "ampi" in larghezza.

In generale perciò è possibile affermare che questa tecnica di ispezione delle superfici non è sensibile a tutti i tipi di irregolarità.

5.7 Conclusione

Allo scopo di determinare le condizioni ottimali per un efficace rilevamento, tramite magnetoscopia, delle numerose e variegata geometrie e dimensioni dei difetti presenti nei materiali, si utilizza il metodo FEM.

Si è visto che con il suo impiego si arriva ad una riduzione dei costi e dei tempi nell'applicare il metodo ispettivo ed inoltre si ha un miglioramento nell'analisi dei dati sperimentali; essi infatti possono essere elaborati utilizzando simulazioni FEM combinate con un'attenta integrazione dei parametri del modello (del difetto) come: la fonte di campo magnetico, l'entità della corrente applicata, la dimensione e la posizione della cricca e infine le proprietà magnetiche dei campioni e delle particelle magnetiche.

CAPITOLO 6

MODELLO DEGLI ELEMENTI FINITI APPLICATO AD UN DIFETTO IMPIEGANDO IL METODO DELLE CORRENTI PARASSITE

6.1 Problematiche connesse utilizzando un modello che approssima le cricche

Il metodo delle correnti parassite (ET) è un'importante tecnica d'ispezione adottata a livello industriale per l'individuazione di eventuali crepe o irregolarità di un materiale. A tale scopo fondamentale è uno studio minuzioso delle correnti indotte.

Come per la magnetoscopia, anche nell'ET si utilizza l'analisi agli elementi finiti per ottenere un modello del difetto in esame; di seguito viene valutato il problema dello studio di cricche reali dove vengono individuati i parametri fondamentali su cui va concentrata l'attenzione.

Dallo studio dei difetti (all'interno di un campione), si è riscontrata una difficoltà nell'utilizzo degli elementi finiti nel caso in cui si debbano analizzare delle irregolarità particolarmente strette e di geometria assai complicata.

Si è visto infatti che il numero degli elementi finiti necessari per modellare una irregolarità aumentano considerevolmente con la complessità della sua forma e con la possibilità di contatti parziali dei lati della fessura. Conseguentemente, è difficile costruire il modello esatto della cricca. Ciò implica che, più curata sarà la simulazione tanto maggiore saranno le risorse del calcolatore da impiegare per una computazione delle distribuzioni delle correnti parassite.

Qualora fosse richiesto un uso pratico dell'analisi delle correnti parassite, i numerosi parametri del modello del difetto non potrebbero essere variati con il metodo convenzionale degli elementi finiti (come sarà spiegato in seguito). Con tale motivazione negli anni si sono sviluppate molte tecniche numeriche per espandere la versatilità e l'accuratezza delle analisi, e quindi valutare in modo preciso l'entità delle irregolarità. [3]

6.1.1 Scopo della prova

Orientativamente lo scopo della prova ET è quello di rilevare le cricche in un materiale campione attraverso la risposta di una sonda. Ciò è ottenuto dalla variazione delle correnti indotte attorno alle irregolarità, infatti esse cambiano per la dipendenza dalla forma e dal contatto dei lati della crepa. Nel dettaglio quindi il campo magnetico generato da una bobina (o sonda) alimentata con corrente alternata produce, nel pezzo da esaminare, delle correnti indotte che influenzano il valore di impedenza della bobina che le ha generate.

La presenza di una qualsiasi discontinuità modifica l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e quindi l'impedenza del circuito, la cui variazione è indice di possibile difettosità.

La risposta dello strumento determina la variazione dell'impedenza della bobina dall'entità del campo magnetico disperso; questa indicazione della sonda si ricava attraverso un calcolo integrale che tenga conto sia del vettore potenziale magnetico del conduttore che del materiale magnetico impiegato.

Dunque, in questo tipo di problemi, è più importante calcolare l'impedenza della bobina che fare un'analisi dettagliata della distribuzione delle correnti indotte.

6.2 Caratteristiche del campione esaminato

Nella prova dell'ET si è considerato un provino conduttore piano, contenente un difetto, le cui specifiche sono:

- Spessore: 1.25 mm
- Larghezza: 140 mm

le specifiche del difetto sono:

- Larghezza: 0.2 mm
- Lunghezza: 10 mm

Nella figura seguente (6.2.1) è riportato il campione in esame in cui è presente anche la bobina (costituita da 144 spire, diametro interno di 1.22mm e diametro esterno di 3.2 mm), responsabile delle correnti parassite, posizionata con un lift-off (altezza della bobina dal provino) di 0.5 mm tra il conduttore e la parte inferiore della bobina.

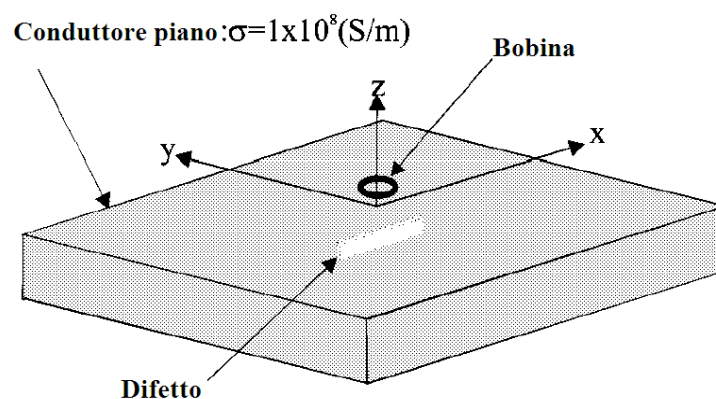


Fig. 6.2.1 Provino sotto esame.

Del campione si è analizzata la parte interessata dal difetto, si è ritagliato un elemento rettangolare contenente la discontinuità ed una piccola porzione del conduttore. Per lo studio del provino si è ricostruito il suo modello agli elementi finiti in cui un importante parametro ovvero la conducibilità viene espresso attraverso un tensore, esso risulta molto influente nella simulazione perché le caratteristiche geometriche, più o meno complesse, e le possibili condizioni di contatto delle pareti

dell'irregolarità vengono approssimate mediante dei coefficienti che rappresentano la conducibilità nelle tre direzioni x,y,z in cui essa può essere espressa.

Si è riscontrato che questo importante parametro sarà maggiore laddove vengano considerati dei materiali privi di cricche, rispetto a quelli che ne contengono.

Si evince che lo scopo finale è un confronto tra un "nuovo" tipo di metodo degli elementi finiti, applicato ai casi di difettosità realmente riscontrabili, e il metodo convenzionale, poco flessibile ad un adattamento delle svariate condizioni che si possono presentare nel campo pratico. [3]

Nella figura 6.2.2 si può osservare l'elemento del provino analizzato, il quale contiene il difetto del materiale, e le componenti della corrente parassita lungo le direzioni x,y,z. [3]

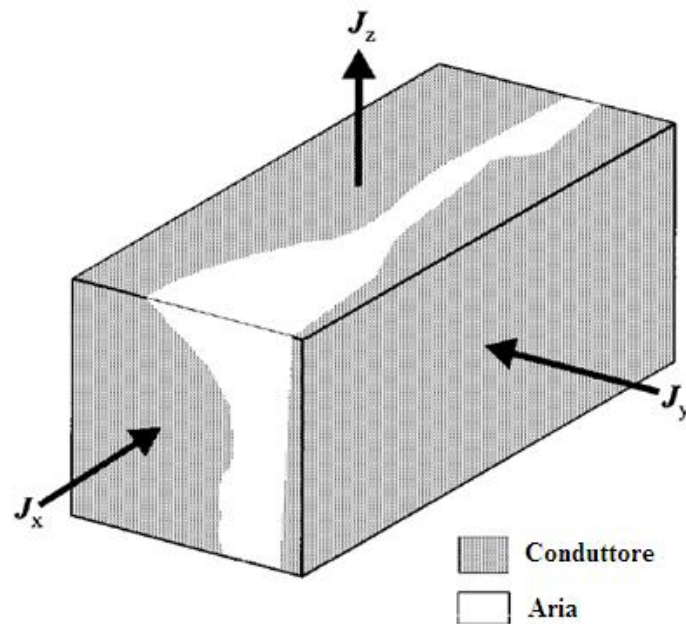


Fig. 6.2.2 Elemento finito del modello del campione in esame.

6.3 Formule per l'estrapolazione di un modello con FEM

L'equazione residua di Galerkin's ponderata per l'uso di FEM nei problemi con correnti parassite è data dalla seguente formula:

$$\iiint_V \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{N} \cdot \nabla \times \vec{A} + j\omega\sigma \vec{N} \cdot \vec{A} \right) dv = 0 \quad (6.2.1)$$

Dove:

- μ permeabilità
- σ conducibilità
- ω pulsazione
- \vec{A} vettore del potenziale magnetico
- \vec{N} funzione d'interpolazione
- V regione analizzata

D'altra parte il vettore della corrente parassita può essere scomposto ed espresso in:

$$J_x = -j\omega C_x \sigma A_x \quad (6.2.2)$$

$$J_y = -j\omega C_y \sigma A_y \quad (6.2.3)$$

$$J_z = -j\omega C_z \sigma A_z \quad (6.2.4)$$

Dove:

- J indica la densità della corrente parassita
- C è una costante con cui viene descritto l'elemento (contenente il difetto) quando si cambia il valor medio della conducibilità nelle varie direzioni

Si è potuto notare, nella prova, che la costante C per ogni elemento è determinata dal rapporto tra la forma della cricca e le sue possibili condizioni di contatto delle pareti.

Da tutto ciò si è constatato che è possibile approssimare la conducibilità (della regione sotto analisi) con l'equivalente conducibilità media per ogni direzione, il cui valore relativo (trattandosi di una simulazione) può essere fatto variare dallo 0% a 100%.

Di conseguenza dall'introduzione delle approssimazioni (6.2.2), (6.2.3), (6.2.4) nella formula di Galerkin's (6.2.1) si ottiene:

$$\iiint_V \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{N} \cdot \nabla \times \vec{A} + j\omega (\sigma^* \vec{A}) \cdot \vec{N} \right) dv = 0 \quad (6.2.5)$$

$$\sigma^* = \begin{pmatrix} C_x \sigma & & 0 \\ & C_y \sigma & \\ 0 & & C_z \sigma \end{pmatrix} \quad (6.2.6)$$

Dove:

- σ^* esprime la matrice anisotropa della conducibilità a causa del difetto.

6.4.1 Confronto dei modelli degli elementi finiti

I modelli degli elementi finiti che sono stati confrontati nello studio con l'ET, sono essenzialmente tre:

- **OD60** (outer defect 60%)
- **OD40** (outer defect 40%)
- **ND** (non defect)

Vengono scelti tali acronimi perché ciascun di esso differisce per la profondità della cricca che si è potuta determinare utilizzando il rispettivo metodo agli elementi finiti; perciò per OD60 si intende un modello calcolato per ottenere la profondità del difetto del 60% rispetto allo spessore della piastra; analogo discorso per OD40 mentre per ND si è considerato il metodo degli elementi finiti convenzionale in cui il calcolo della profondità risulta pari allo 0%, svoltosi con il valore della conducibilità pari a zero all'interno del difetto.

Pertanto i risultati delle analisi computazionali dei vari modelli sono confrontati in base al valore di conducibilità ipotizzato, per fare questo si deve quindi tenere conto delle condizioni geometriche e di contatto delle pareti della discontinuità.

Dalla figura 6.4.1 è visibile che questi modelli vengono applicati nella parte in bianco della mesh. In particolare nella zona inferiore dell'elemento è evidenziato il caso OD60. [3]

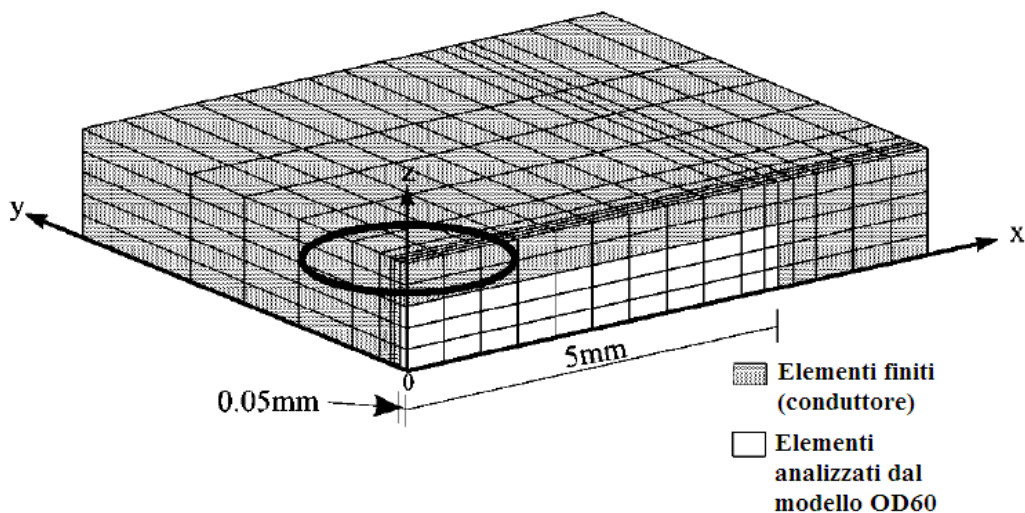


Fig. 6.4.1 Mesh di un quarto del conduttore piano

6.4.2 Distribuzione dei vettori delle correnti parassite

Dalla valutazione del disegno 6.4.3 si è osservato che il difetto in esame, presupponendolo incluso in un elemento finito (come in fig. 6.4.2), è parallelo al piano $x-z$, dove si è considerato che la componente y del vettore delle correnti parassite abbia un valore approssimato pari a zero. Quindi si è osservato che nell'elemento il vettore delle correnti parassite è parallelo alla cricca.

In altre parole sia i valori della costante C_x che quelli di C_z sono fissati al corrispondente valore della conducibilità della parte conduttrice mentre nella zona in cui è presente la cricca (la parte in bianco della figura 6.4.2) la C_y viene considerata nulla.

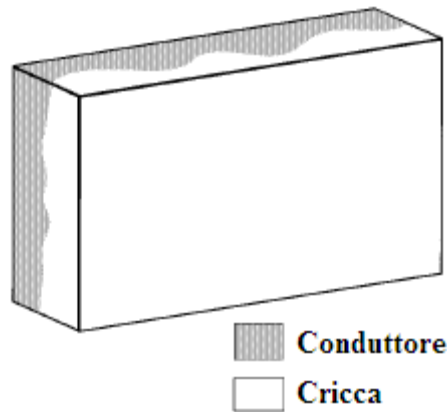


Fig. 6.4.2 Elemento finito contenete conduttore e difetto.

Nella figura seguente 6.4.3 si è presentata la distribuzione dei vettori (x,z) in cui sono scomposte le correnti parassite; si è visto che tali vettori risultano paralleli all'irregolarità: tutto ciò si è analizzato nient'altro che per verificare la validità del modello agli elementi finiti proposto attraverso la distribuzione delle correnti parassite. [3]

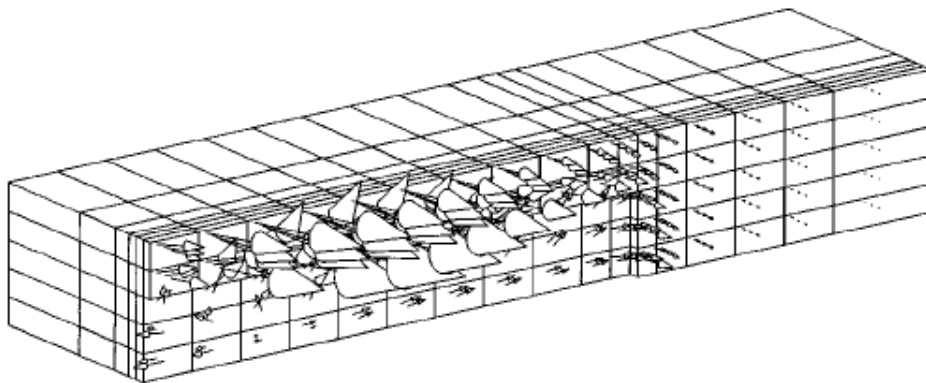


Fig.6.4.3 Vettori delle correnti parassite nel difetto con $C_y=0\%$.

6.4.3 Parametri di confronto

Per i confronti dei modelli si è considerato:

- Il valore dell'impedenza della bobina
- La traiettoria dell'impedenza della bobina, cioè la variazione del valore d'impedenza in funzione della posizione della bobina

Il primo parametro si trova sviluppando un calcolo integrale rispetto alle correnti parassite riferendosi sia al conduttore piano, che ai modelli degli elementi finiti proposti.

Nel corso dell'analisi dei dati, quando viene modificato il valore relativo della costante C_y dallo 0% fino ad arrivare al 100% a intervalli di 20% alla volta, si sono potute notare differenti soluzioni computazionali per ciascuno dei modelli analizzati.

Nel caso in cui $C_y = 0\%$, i risultati di calcolo dei modelli proposti (OD60 e OD40) sono quasi in accordo con quelli del modello convenzionale (ND), come è visibile nella figura 6.4.3.

Si evince che con il continuo decremento di C_y il valore dell'impedenza di OD60 e OD40 raggiunge quello corrispondente nell'ND (questo è osservabile nella fig.6.4.4).

In fig.6.4.4 è presentata l'entità dell'impedenza della bobina nei tre casi ND, OD60, OD40 in base alla costante C assegnata.

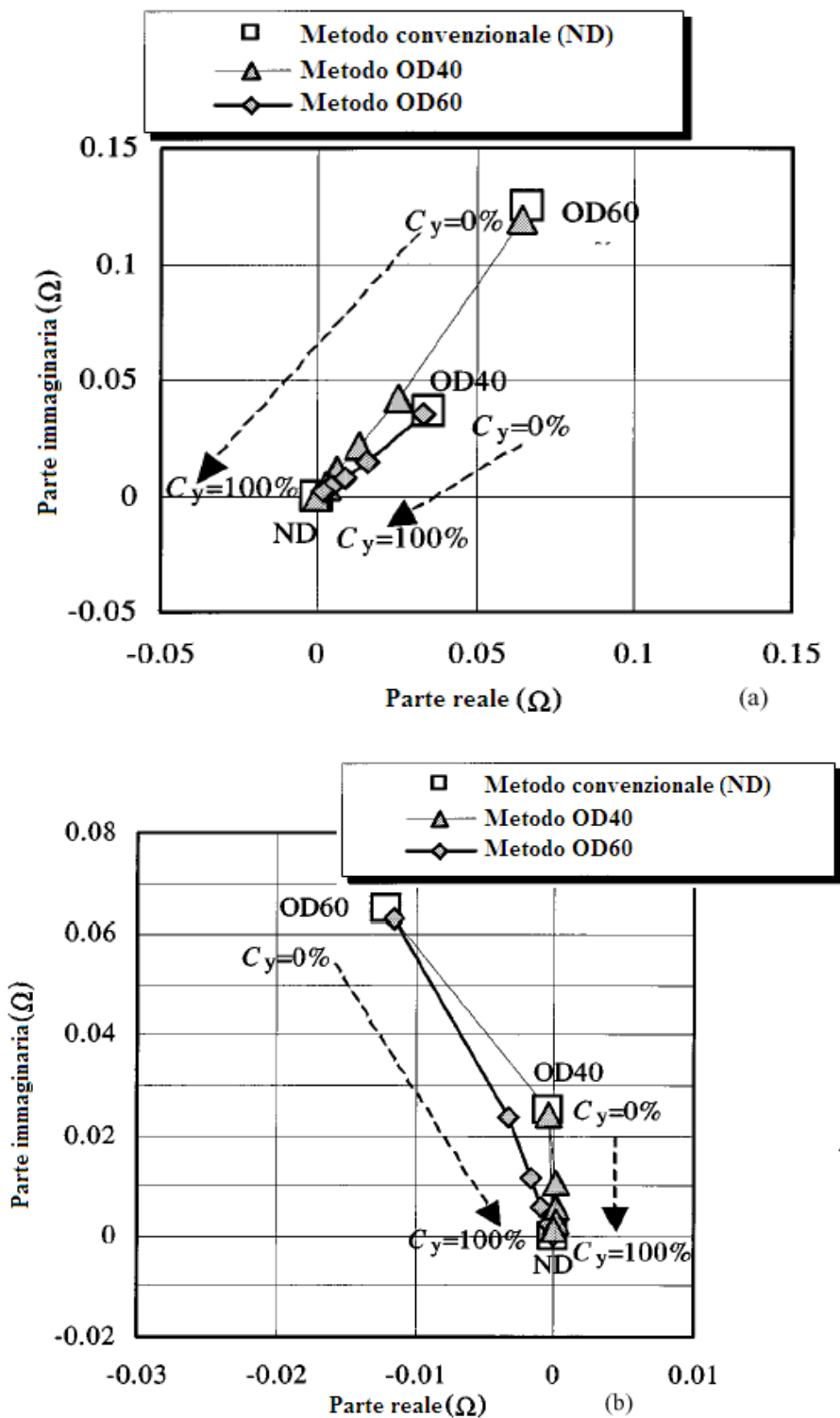


Fig. 6.4.4 Impedenza della bobina calcolata nei casi: (a) 300 kHz, (b) 150 kHz.

Il secondo parametro, nel confronto dei modelli, ovvero la traiettoria dell'impedenza della bobina, è calcolato dal movimento lungo l'asse x del rocchetto.

Per il tracciato della traiettoria sono stati fissati sette punti di campionamento presi partendo dal punto in cui $x=0$ mm, fino ad arrivare a 6 mm, ad intervalli di 1mm ciascuno.

La regione dell'analisi è una parte, circa la metà, del provino visto in figura 6.2.1.

Come esempio, nella immagine 6.4.5 si è riportato il risultato della traiettoria dell'impedenza della bobina per il caso del OD40.

Dalla variazione della costante C, in particolare nel caso $C_y=0\%$, le traiettorie del OC40 e quelle del modello convenzionale (ND) seppure appaiano simili, mostrano delle piccole differenze.

La discrepanza è causata dal tipo di approssimazione del difetto. Nel metodo convenzionale, infatti, non vi è corrente all'interno dell'irregolarità, mentre al contrario è presente nel modello proposto. Ciò è dovuto all'elemento finito contenente la cricca che ha le correnti parassite parallele al piano $x-z$, per il fatto che l'OD40 (come OD60) contiene una parte del conduttore e non solo la "la parte vuota" dell'elemento.

Si è visto che un vantaggio di quest'ultimo modello è la capacità di modellazione di un difetto anche di dimensioni modeste, cosa affatto non proponibile con il metodo convenzionale.

Nel caso in cui $C_y=50\%$ è visibile, nella parte in basso della figura 6.4.5, una variazione modesta dell'impedenza con conseguente andamento limitato della traiettoria d'impedenza della bobina.

Dai risultati computazionali di $C_y=0\%$ e $C_y=50\%$, si è visto che il modello proposto agli elementi finiti è in grado di simulare la variazione della condizione di contatto nei difetti reali utilizzando una qualsiasi funzione di C_y . [3]

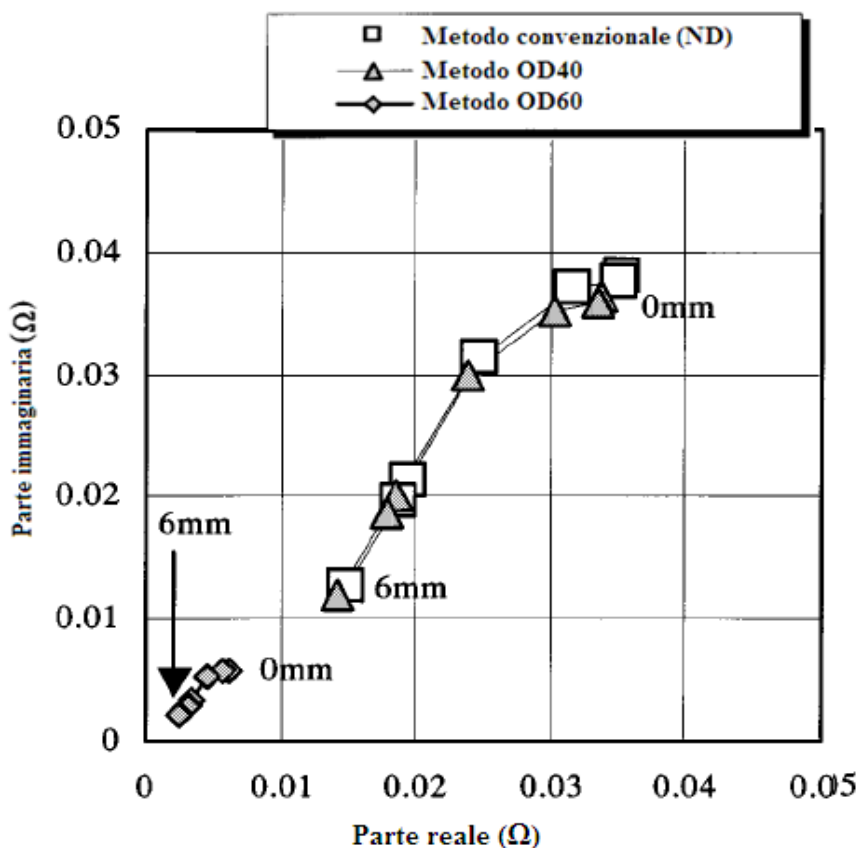


Fig. 6.4.5 Traiettoria dell'impedenza della bobina nel OD40.

6.5 Conclusioni

In questo capitolo si è riportato il risultato dei calcoli dei modelli agli elementi finiti proposti ed evidenziato come la loro validità sia dimostrata.

Riassumendo:

- Nei modelli esaminati la conducibilità nell'elemento finito comprendente il difetto è approssimata dalla conducibilità anisotropa.
- I metodi agli elementi finiti proposti sono stati verificati in un semplice conduttore piano nelle cui immediate vicinanze è presente una bobina.
- Dai risultati di calcolo, si è verificato che la condizione di contatto di entrambi i lati della cricca è in grado di essere simulata
- E' stato dimostrato che con gli elementi indicati si è in grado di modellare un difetto anche di dimensioni e forme particolarmente ridotte, cosa non ottenibile utilizzando il metodo convenzionale agli elementi finiti.

CAPITOLO 7

CONFRONTO DEI DUE METODI ISPETTIVI

7.1 Storia e confronto dei due metodi

Un efficace confronto delle due tecniche d'ispezione fin qui analizzate può essere svolto considerando alcune applicazioni industriali che necessitano di controlli non distruttivi ET e MT.

I due metodi presentano delle caratteristiche differenti: ciascuno di essi può avere in base al campo d'impiego una certa accuratezza, affidabilità ed un costo di utilizzo alquanto diverso.

In passato i primi rilevanti confronti di queste prove PnD furono effettuati nel campo della saldatura, in particolare nelle applicazioni off-shore per l'estrazione di gas e petrolio nel Mare del Nord. Per la verifica strutturale delle piattaforme veniva inizialmente usata la prova a particelle magnetiche ma, con lo sviluppo della tecnologia, si cercò successivamente di utilizzare la tecnica ET come valida alternativa. L'aspetto principale che facilitò l'affermazione del controllo PnD tramite prova a correnti parassite (ai danni della magnetoscopia) fu quello economico: nelle piattaforme off-shore l'utilizzo dell'MT comportava infatti ingenti costi prevalentemente causati dalla necessità di rimuovere lo strato di vernice (superiore a qualche mm) e gli accumuli organici depositati sui pilastri immersi di sostegno.

Nell'intento di effettuare prove non distruttive subacquee o solo superficiali che comportassero oneri finanziari meno gravosi, numerosi progetti di ricerca e sviluppo furono condotti sia nell'ambito magnetoscopico che in quello delle correnti parassite. A testimonianza di ciò un notevole sforzo fu compiuto da parte delle compagnie: Goldberg, 1985, Electric Power Research Institute 1988, American Petroleum Institute 1991. [4]

La prima svolta nello svolgimento di prove subacquee magnetoscopiche fu nei primi anni '80 con l'applicazione di un sottile film protettivo di ossido nero (black oxide) di circa 0,1-0,15 mm sui materiali strutturali delle piattaforme. Si vide infatti che la prova MT era in grado di rilevare i difetti anche in presenza di questo tipo di rivestimenti portando a riduzioni dei costi di oltre il 300%.

Fu un programma di ricerca sperimentale ad affermare che il controllo MT, applicato in componenti in cui era presente il film di ossido nero, era altamente affidabile e in grado d'individuare irregolarità più piccole di 1,5 mm. La verifica mediante particelle magnetiche attraverso lo strato di ossido nero fu ben accettata.

Nel 1988, l'Electric Power Research Institute emise un primo "certificato" che riguardava l'utilizzo della tecnica magnetoscopica per le rilevazioni attraverso rivestimenti (vernici ecc.) nelle gru della centrale nucleare di Wolf Creek (USA). I risparmi sui costi, sopraggiunti per la mancata rimozione della vernice e del suo ripristino, furono notevoli.

Negli anni '90, una serie di progetti di ricerca e sviluppo (Sea Test Services del 1996) elaborarono molteplici proiezioni probabilistiche per determinare la validità dei risultati ispettivi mediante impiego dell'ET nei materiali rivestiti, con particolare attenzione ai casi in cui la magnetoscopia non poteva, per varie ragioni, essere impiegata. Il metodo alle correnti parassite venne testato in

questi ambiti, come ad esempio nelle applicazioni non immerse in fluidi, allo scopo di verificarne l'attendibilità e la convenienza. Queste proiezioni probabilistiche comprendevano l'utilizzo dei metodi elettromagnetici assistiti al computer.

L'uso di dei primi sistemi a correnti parassite progettati per la saldatura (strumento e sonda) mostrarono dei risultati significativi, ma in ogni caso la loro affidabilità fu inferiore al caso MT nelle medesime condizioni di prova.

Un importante passo avanti nei risultati ispettivi avvenne quando la società CAN Off-shore, attraverso uno strumento commerciale a correnti parassite ed una sonda di saldatura, rilevò, nell'analisi di cricche nei materiali rivestiti da vernice, in media indicazioni di difetti nell'ordine di 0,4 mm; valori alquanto congrui con quelli derivati dai test delle particelle magnetiche in metallo nudo.

Un altro vantaggio dell'ET fu senz'altro quello derivante dalle dimensioni e dal modesto peso degli strumenti. Grazie a tali caratteristiche fu possibile per gli operatori PnD utilizzare nuove apparecchiature in fase di ispezioni strutturali delle piattaforme off-shore accedendovi mediante semplici corde e imbragature apposite (come è visibile nella figura 7.1.1), anziché mediante più costosi ponteggi.



Fig.7.1.1 Imbragatura per accedere alle zone d'ispezione nelle installazioni offshore.

7.2 Generalità e calibrazione

Quando nel campo della saldatura si effettua il controllo PnD utilizzando la prova ET, una piccola sonda viene fatta passare al di sopra del cordone di saldatura per la valutazione delle cricche.

Proprio come per il test delle particelle magnetiche, una corrente alternata è indotta nella parte in esame.

Va ricordato che, attraverso il controllo magnetoscopico, la presenza di una possibile irregolarità del materiale è indicata dalle particelle magnetiche le quali vengono attratte da un flusso disperso, creato appunto da una discontinuità. Anche nel metodo delle correnti parassite il possibile difetto genera un flusso disperso il quale è responsabile di una conseguente perturbazione elettrica che dà luogo ad una indicazione nello strumento ispettivo, successivamente “tradotta” e visualizzata su uno schermo a tubo catodico.

Nei test a particelle magnetiche si utilizzano dei piccoli provini già analizzati in precedenza da varie prove di controllo, che possono essere usati come mezzo di calibrazione oppure per dimostrare la sensibilità delle prestazioni del sistema. Allo stesso modo nell’ET questi campioni sono utilizzati per impostare la sensibilità dello strumento.

Nelle prove PnD per la verifica dei prodotti industriali mediante la tecnica a corrente parassite si deve tener conto della vernice di rivestimento dei materiali. A tal fine prima di effettuare le misure di controllo si impiegano delle sottili lastre di plastica, il cui spessore è scelto in base a quello del rivestimento del provino in analisi, avente la stessa grandezza dell’area dell’oggetto in prova. Le lastre vengono disposte sopra il provino permettendo di regolare in maniera opportuna il parametro guadagno dell’apparecchiatura di misura. In breve, lo strumento a correnti parassite viene impostato in modo tale che il segnale di controllo prodotto dall’analisi del campione sia proiettato sullo schermo, formando una linea verticale che può essere successivamente elaborata dall’eventuale rumore e dai segnali di disturbo prodotti dalle punte nelle geometrie di saldatura. [4]

In fig. 7.2.1 è mostrata nello schermo di uno strumento ET l’indicazione di un’analisi in un materiale.

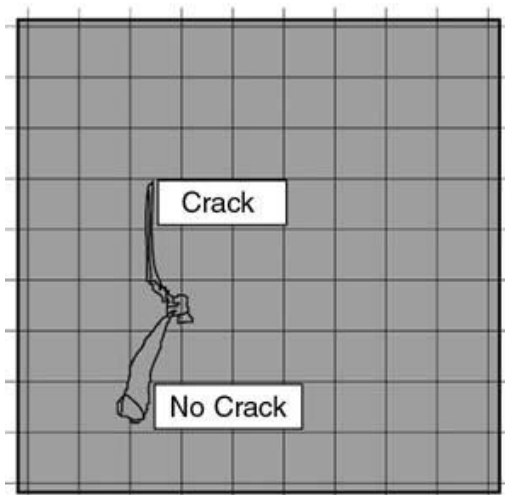


Fig. 7.2.1 Segnale di un difetto nel metodo delle correnti parassite in un test di saldatura.

7.3 Vantaggi e svantaggi nell'applicazione dei due metodi

La più grande differenza fra la prova ET e quella MT risiede nel fatto che con il metodo delle correnti parassite viene analizzata soltanto la zona nelle immediate vicinanze della sonda. Mentre nella tecnica magnetoscopica attraverso le magnetizzazioni longitudinali e trasversali viene analizzata un'area molto più vasta.

Altro aspetto fondamentale è il tempo impiegato per effettuare una prova. Si può constatare che nell'ET occorre svolgere parecchie misure per verificare la qualità di una saldatura completa. Questo rende intrinsecamente più lento questo metodo rispetto all'MT. Va considerato tuttavia che se quest'ultima tecnica richiede una rimozione di strati di vernice o quant'altro per un'efficace controllo, allora non è detto che il metodo delle correnti parassite sia meno performante.

Un vantaggio sicuramente da non trascurare nel metodo ET è quello che può essere sempre utilizzato anche su una superficie bagnata mentre, il metodo magnetoscopico, ad esempio in condizioni di pioggia, non può essere impiegato. Ulteriore privilegio è l'attrezzatura impiegata dalla tecnica delle correnti parassite che risulta essere particolarmente leggera e portatile grazie all'alimentazione a batteria.

7.4 Ricerca e sviluppo nell'analisi dei risultati

Il progresso della tecnica ET ha portato un livello di affidabilità dei risultati soddisfacente e tutt'ora è un metodo alternativo alle particelle magnetiche, soprattutto nelle prove non subacquee all'interno delle piattaforme mobili di perforazione situate nel mare aperto.

Un progetto industriale congiunto è stato sviluppato, nella seconda metà degli anni '90, per sancire la validità dell'utilizzo delle correnti parassite nel campo del controllo delle saldature a matrice ferrosa. [4]

Il progetto consisteva nel selezionare un gruppo di campioni di cui erano già ben noti il tipo di geometria e la taglia dei difetti.

L'obiettivo primario del programma era quello di esaminare, tramite adeguate prove ET, i numerosi componenti presenti nelle apparecchiature di perforazione off-shore durante il loro servizio. Si scelse che la dimensione minima rilevabile dei difetti dovesse essere di circa 6 mm, anche se da una piccola percentuale dei dati raccolti si vide che durante i test erano state analizzate irregolarità abbastanza piccole, di circa 1,6 mm. [4]

I campioni sotto esame, che potevano contenere sia cricche dovute a fenomeni di fatica sia difetti causati dai procedimenti industriali di realizzazione del materiale, furono selezionati in base al tipo di saldatura applicata ed anche in funzione all'oggetto o al materiale a cui essi venivano uniti (p.e. piastre, tubazioni, ecc.). Il controllo qualitativo si basava quindi nel rilevare la presenza di trucioli residui, piccoli fori, asperità della saldatura ecc..

Durante l'analisi dei provini, si constatò che i risultati delle prove manuali con il metodo delle correnti parassite rispetto a quello magnetoscopico erano molto promettenti. Prendendo come riferimento la tecnica delle particelle magnetiche, nel confronto si ebbe un significativo 87% di concordanza dei risultati. Nei successivi test, svolgendo le prove in un banco di prova apposito, si arrivò ad una corrispondenza di circa 100% dei risultati.

Da queste prove sperimentali si osservò che un fattore chiave per raggiungere un'elevata affidabilità è l'alta specializzazione sperimentale dei tecnici ispettori delle correnti parassite.

I risultati ottenuti con il metodo ET con l'ausilio di un computer comportarono la necessità di un ulteriore sviluppo dei software e dei programmi per la rilevazione (nel modo più corretto possibile) delle irregolarità; infatti inizialmente i risultati riscontrati con la prova a correnti parassite furono, rispetto a quelli magnetoscopici, con concordanza del solo 62% con numerosi falsi allarmi. [4]

7.5 Sostituzione del metodo MT con quello ET nel campo nucleare

Un esempio importante per chiarire come e dove può essere sostituito il metodo magnetoscopico è sicuramente quello nell'ambito nucleare.

All'interno delle centrali nucleari sono impiegati per il trasferimento del combustibile nucleare esaurito degli speciali contenitori (figura 7.4.1). L'involucro di questi contenitori solitamente viene realizzato utilizzando acciaio ASTM A588. Dato il loro delicato ruolo in questo settore industriale, per questioni di sicurezza essi richiedono dei severi collaudi in conformità con la norma ANSI N14.6.

Nel passato, per la verifica delle saldature portanti di questi involucri di trasferimento si usava la prova MT. Al fine di ottenere migliori risultati si richiedeva la rimozione della vernice protettiva del materiale da entrambe le superfici, interna ed esterna.

Tuttavia, anche se la prova delle particelle magnetiche è adatta idealmente per la rilevazione delle irregolarità superficiali sui materiali ferromagnetici, essa perde notevolmente la sua sensibilità qualora venga applicata in materiali con rivestimenti (vernici o altro) di spessore maggiore di 0.2-0.3 mm. [4]



Fig.7.4.1 Contenitore di trasferimento.

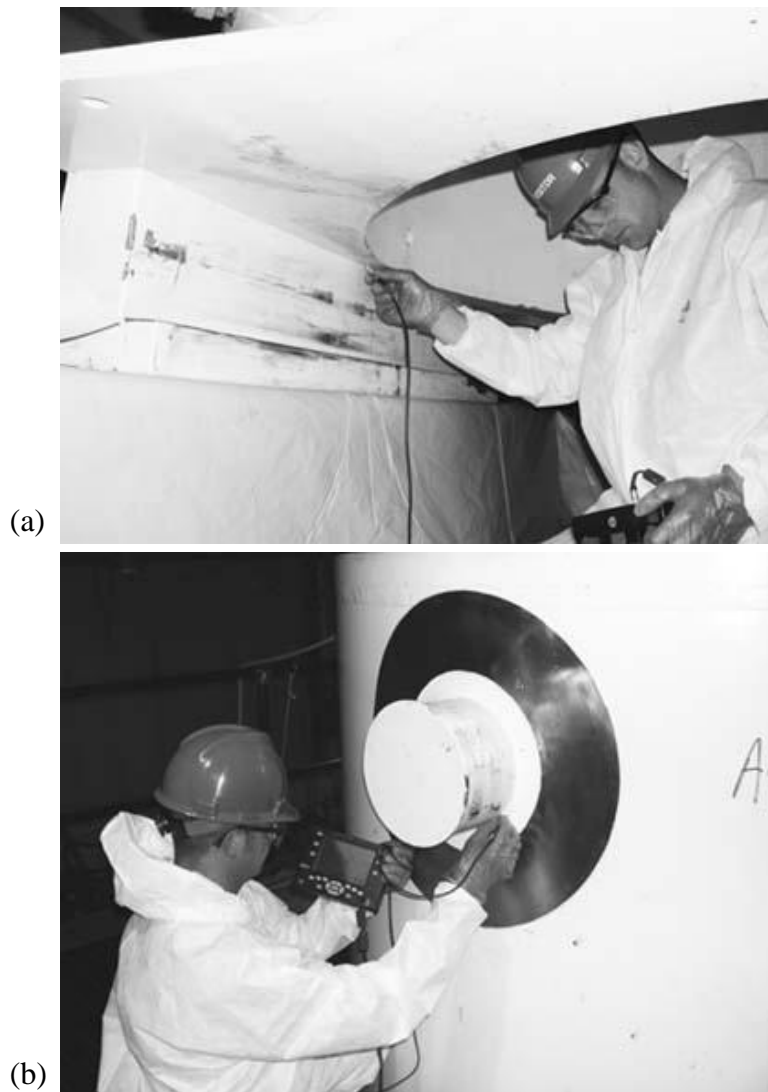


Fig.7.4.2 Metodo ET applicato ai contenitori di trasferimento: (a) controllo delle rotaie; (b) controllo di un perno saldato.

7.6 Benefici e vantaggi nelle prove nel settore nucleare

I contenitori di trasferimento richiedono un'ispezione PnD annuale. Ciò può rappresentare un vincolo economico e finanziario significativo che normalmente non è molto gradito dalle aziende nucleari, in quanto questi contenitori vengono impiegati normalmente 24 ore al giorno all'interno della centrale comportando dunque, in caso di mancato utilizzo, un danno economico.

Si evince che questo requisito di sicurezza essenziale diventa ancor più gravoso se in ciascun dispositivo si debba rimuovere e poi riapplicare lo strato di vernice protettivo depositato sulle saldature principali poste sotto verifica. La sverniciatura è ulteriormente aggravata dal fatto che un involucro di trasferimento è considerato per default contaminato, a meno che si utilizzino delle particolari tecniche che ne provino il contrario. Come risultato, la società che produce l'energia

nucleare deve anche sobbarcarsi costi significativi in termini di tempo e denaro per lo sviluppo di specifiche custodie atte alla conservazione della vernice contaminata rimossa.

Fino a pochi anni fa la prova di controllo annuale mediante MT provocava un tempo di fuori servizio dei contenitori di circa un mese, mentre attualmente con l'uso dell'ET si evita la rimozione e la riapplicazione dei rivestimenti protettivi, riducendo il tempo ed i costi per il disservizio di questi dispositivi.

Inoltre il metodo delle correnti parassite non impiega materiali di consumo come invece accade nella magnetoscopia e nella prova dei liquidi penetranti (particelle, liquido penetrante, vernice bianca di contrasto e così via), permettendo il risparmio di grandi costi di pulizia dei materiali potenzialmente contaminati prima dell'applicazione del metodo ispettivo, cosa invece essenziale nella MT e liquidi penetranti. [4]

7.7 Validità della prova

In campo pratico nel caso in cui si svolgano dei controlli PnD impiegando la tecnica delle correnti parassite per verificare l'attendibilità dei risultati dell'analisi, generalmente si applica anche il test delle particelle magnetiche. Le motivazioni sono triplici:

- la prova magnetoscopica fornisce una visualizzazione dell'irregolarità
- la prova MT fornisce un supplementare livello di affidabilità al risultato della prova
- il collaudo di una struttura o qualsiasi altro manufatto attraverso il metodo delle particelle magnetiche risulta più sensibile nella definizione dell'indicazione di una cricca o di una scanalatura profonda.

7.8 Conclusione

La tecnica delle correnti parassite è un metodo testato ed accettato per la rilevazione dei piccoli difetti anche al di sotto di un sottile strato di rivestimento superficiale. Dopo numerosi sviluppi e ricerche si è verificato che l'ET può sostituire il più noto metodo magnetoscopico in alcune applicazioni industriali con un'affidabilità dei risultati soddisfacente. Un tipico caso in cui subentra il metodo delle correnti parassite è quello del collaudo dei componenti nucleari, impiegati per il trasferimento del materiale combustibile esausto. In questo tipo di applicazione infatti gli sforzi compiuti per ottenere un metodo ispettivo efficace nell'individuazione di cricche od altre irregolarità, ha portato alla diminuzione degli aspetti più influenti nel settore industriale ovvero i costi e il tempo impiegato nei controlli non distruttivi.

Conclusione

In questo lavoro di tesi sono stati presi in considerazione due metodi non distruttivi: quello a correnti parassite e quello magnetoscopico. Il loro impiego ha un'importanza rilevante per determinare degli standard qualitativi dei prodotti industriali.

E' facile infatti intuire, che l'esistenza di una costante verifica dei cicli produttivi e dell'affidabilità dei manufatti risulta di interesse prioritario soprattutto in tutti quei casi in cui siano preminenti gli aspetti di sicurezza preventiva verso l'uomo e verso l'ambiente; basti pensare a quei settori quali il nucleare, il petrolchimico, l'aerospaziale e similari, ove la qualità dei prodotti è di fondamentale importanza per la sicurezza di mezzi e persone, nonché per la salvaguardia dell'ambiente, aspetto questo particolarmente sentito negli ultimi vent'anni.

Ciascuna delle due tecniche ispettive ha pregi, difetti e limiti che le rendono applicabili solo in specifici settori e per la ricerca di difetti ben definiti.

Nella fattispecie, il controllo magnetoscopico è poco adatto ad analizzare materiali con superfici troppo scabrose, rugose, filettate e di geometria troppo complessa. E' un processo difficilmente automatizzabile se non con l'impiego di rivelatori a sonda, peraltro costosi e non sempre utilizzabili. Tuttavia in alcuni casi l'MT può sostituire la tecnica ET soprattutto nei settori in cui i prodotti da testare possiedono dimensioni particolarmente significative.

Il metodo delle correnti parassite (come per quello magnetoscopico) risulta molto diffuso nel campo industriale. Esso si è velocemente affermato in quanto richiede apparecchiature poco costose, di semplice impiego ed inoltre è facilmente automatizzabile, mentre uno svantaggio è sicuramente la specifica esperienza ed abilità che l'operatore deve possedere.

Tutti i dati ottenuti dalle prove ET ed MT possono essere analizzati mediante calcolatori con l'ausilio di appositi programmi, i quali sostanzialmente sfruttano il metodo degli elementi finiti (FEM). Con il loro impiego si ha un miglioramento nell'analisi dei dati sperimentali. Essi infatti possono essere elaborati per ricostruire un modello della possibile discontinuità ed effettuare relative simulazioni FEM al fine di ottenere ulteriori informazioni nel caso in cui vengano modificati alcuni parametri del materiale sotto esame.

Gli indiscussi vantaggi offerti dalle correnti indotte come metodo PnD, hanno determinato una sempre maggiore richiesta d'impiego, imponendo ai costruttori di apparecchiature ET un rapido sviluppo tecnologico.

In conseguenza a ciò, in numerosi campi pratici nei quali la tecnica magnetoscopica da sempre veniva impiegata per il controllo dei difetti, essa venne gradualmente soppiantata dal metodo delle correnti parassite.

Sebbene oggi si possa già disporre di sofisticate attrezzature che consentono ampie applicazioni e alto grado di affidabilità, è lecito supporre che in un prossimo futuro nuovi mezzi di elaborazione dei segnali amplieranno ulteriormente le possibilità di impiego del metodo ET.

BIBLIOGRAFIA

1. J. Y. Lee, S. J. Lee, D. C. Jiles, M. Garton, R. Lopez e L. Brasche, "Sensitivity Analysis of Simulations for Magnetic Particle Inspection Using the Finite-Element Method". IEEE transactions on magnetics, Vol. 39, no. 6, November 2003
2. Tonti Enzo, Nuzzo Elisa, "Gradiente, rotore, divergenza". Editore: Pitagora 2007.
3. Motoo Tanaka, Hajime Tsuboi, "Finite Element Model of Natural Crack in Eddy Current Testing Problem". IEEE transactions on magnetics, VOL. 37, no. 5, September 2001.
4. Lawrence Goldberg, "The Use of Eddy Current for Ferritic Weld Testing in Nuclear Power Plants". ASNT (American society for nondestructive testing).
5. A.S. Birring, G.A. Marshall, "Eddy Current Testing in the Petrochemical Industry". ASNT (American society for nondestructive testing).
6. Magnetic particle inspection. Riferimenti dal sito internet www.asnt.org (American society for nondestructive testing).
7. AIPND (Associazione Italiana Prove non Distruttive), norma UNI EN 13018: "Prove non Distruttive – Esame visivo – Principi generali".
8. Testing and consulting Eurolab srl, Prove non distruttive: magnetoscopia e correnti parassite.
9. NDT resource center and Iowa State University, NDT Course Material: Magnetic Particle Testing (MT) and Eddy Current Testing (ET).
10. Don Hagemaiier, "Eddy Current Depth of Penetration". ASNT (American society for nondestructive testing).
11. AIPND (Associazione Italiana Prove non Distruttive), norma UNI EN ISO 9934-1: "Prove non distruttive - Magnetoscopia - Principi generali".
12. Multiservice CND srl, Controlli Non Distruttivi: controlli magnetoscopici e a correnti indotte.