



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELLE
TELECOMUNICAZIONI

Elaborato Finale

MISURE NON DISTRUTTIVE A MICROONDE ED
ULTRASUONI SU STRUTTURE ARCHITETTONICHE IN
MATERIALE LAPIDEO.

Relatori:

Prof. Ing, Paolo Nepa

Prof. Emanuele Salerno

Candidato:
Luca Algozino

ANNO ACCADEMICO 2008-2009

INDICE

1.0	INTRODUZIONE	3
1.1	Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo	6
1.2	Metodi e tecniche classiche	8
1.3	Metodi e tecniche innovative	10
2.0	GENERALITA' SUI TEST NON DISTRUTTIVI.....	16
2.1	Liquidi penetranti.....	19
2.3	Ultrasuoni	25
2.4	Radiografia (Raggi X e Gamma).....	29
2.5	Microonde.....	33
2.6	Indagine endoscopica.....	36
3.0	METODO DI ISPEZIONE MEDIANTE ONDE ULTRASONORE.....	38
3.1	Presentazione della Tecnica Ultrasonora	38
3.2	Stato attuale della tecnica ultrasonora.....	45
3.3	Introduzione alle Tecniche NDT ad Ultrasuoni.....	46
3.4	Procedura per l'ispezione a ultrasuoni di oggetti con sezione circolare ...	48
3.5	Tecnica d'ispezione per trasmissione	49
3.6	Caratteristiche del segnale.....	51
3.7	Rilevamento automatico.....	52
4.0	METODI DI ISPEZIONE A MICROONDE	53
4.1	Caratterizzare materiali dielettrici mediante misure con antenne a Patch	53
4.2	Modello generale per la definizione di un'antenna a patch.....	54
4.4	Caratteristiche del sensore utilizzato.....	61
4.5	Strumentazione per misure a microonde.....	64
4.5.1	Calibrazione.....	65
4.6	Campioni utilizzati.....	65
5.0	MISURE.....	67
5.1	Misure con antenna a patch	67
5.2	Discussione e Conclusioni.....	71
	Appendice A – Onda Sonora	75
	Appendice B - Propagazione delle onde elettromagnetiche	80
	Appendice C - Influenza della permittività dielettrica e della conducibilità dei materiali sulla propagazione delle onde elettromagnetiche	84
	Bibliografia.....	88

1.0 INTRODUZIONE

La valutazione dello stato di conservazione e della vulnerabilità rispetto ai rischi strutturali del patrimonio artistico e architettonico è una questione particolarmente importante nel nostro Paese.

L'utilità di questi interventi è legata ai vari tipi di degrado a cui i beni possono venire assoggettati, sia per cause legate a sorgenti naturali (avverse condizioni climatiche, inondazioni, frane, terremoti, fenomeni vulcanici, inquinamento, ecc.) sia per i sempre più frequenti disastri antropici possibili (manipolazione e trattamenti, pulizia e manutenzione, trasporti, ecc.).

In particolare, quando i beni sono movimentabili e (com'è oggi molto frequente) vengono spediti per l'esposizione in vari musei nazionali ed internazionali, risulta importante effettuare controlli in uscita ed in ingresso dal museo preposto alla tutela dei beni. Ciò avviene non solo per il controllo e la verifica di eventuali episodi di danneggiamento ma anche per assicurare un controllo sicuro dell'identità del bene (pericoli di clonazione e sostituzione).

In generale, gli scopi degli interventi possono essere suddivisi in tre grandi categorie:

- Studio ed analisi dei beni per la loro caratterizzazione fisica, anche finalizzato alla preparazione di schede tecniche d'archivio più o meno ricche di parametri analizzati e misurati;
- Studio ed analisi delle condizioni di degrado dei beni (diagnostica), anche come supporto tecnico dei progetti e degli interventi di restauro e di messa in sicurezza;
- Monitoraggio delle condizioni fisiche e chimico-fisiche dei beni, al variare di particolari parametri correlati alle condizioni ambientali.

In particolare, per manufatti di interesse storico/artistico l'indagine conoscitiva dello stato della struttura può richiedere la conoscenza degli aspetti costitutivi dell'opera e dello stato di conservazione. D'altra parte la valutazione dello stato di una struttura è spesso effettuato sulla base di informazioni parziali o di bassa affidabilità e gioca un ruolo essenziale la sensibilità, l'esperienza e la capacità

deduttiva del professionista nel dare un differente peso ai vari indici disponibili per ottenere informazioni finali. Tali valutazioni tecniche spesso sono eseguite con modalità non corrette a causa, per esempio, della scarsa risoluzione e precisione dei risultati delle indagini (dovute a strumenti matematici poco avanzati), della soggettività delle interpretazioni dei risultati stessi da parte dell'operatore (al quale si richiede ampia esperienza nel settore) e dalla difficoltà nell'utilizzo congiunto di dati e risultati provenienti da sistemi multisensore.

Per installazioni critiche, sono necessarie investigazioni preliminari: esse conducono ad una descrizione dettagliata delle procedure necessarie per testare l'intera struttura; dovrebbero indicare l'esatta natura dell'apparecchiatura per il testing, i parametri di funzionamento, il metodo di calibrazione dell'apparecchiatura, il riferimento a qualche campione con caratteristiche note, la locazione e la natura di alcuni difetti che possono essere tollerati e i requisiti tecnici delle persone impiegate come collaudatori. Allo stesso tempo bisogna prendere in considerazione gli ambienti in cui i beni sono conservati, come anche la possibilità di esposizione a temperature troppo alte o troppo basse, a sbalzi di pressione come quelli associati a venti molto forti e mari burrascosi, e alla presenza di sostanze corrosive o tossiche. Il monitoraggio di qualsiasi cambiamento strutturale e della

formazione e crescita di difetti durante queste investigazioni preliminari è spesso chiamato *valutazione non distruttiva* (NDE: *Non-Destructive Evaluation*).

1.1 Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

La tutela dei manufatti di particolare interesse storico-artistico presuppone una serie di indagini per acquisire dati sugli aspetti costitutivi dell'opera, sullo stato di conservazione e sugli eventuali processi di alterazione e degrado. Tale raccolta di informazioni deve essere effettuata in maniera sistematica e scientifica in modo da consentire una diagnosi accurata dei danni che si sono creati e dei meccanismi che provocano il deperimento delle opere in modo da intervenire con i rimedi più efficaci ed appropriati al caso. Quanto più la diagnosi si basa su dati certi e ricerche approfondite, tanto più è possibile attuare misure preventive e limitare le azioni sulla struttura del manufatto. L'attuale tendenza è senza dubbio quella di impiegare il massimo dello sforzo alla prevenzione, il che implica la capacità di monitorare l'eventuale degrado. Inoltre, poiché prolungato nel tempo, tale monitoraggio deve prevedere l'impiego di tecniche il più possibile non invasive.

La base per molte procedure automatiche di Non-Destructive Testing (d'ora in avanti indicate con N.D.T.) deriva dai settori della medicina, della geofisica e della ricerca aerospaziale; Metodi efficaci per distinguere regioni di differente struttura muraria includono tecniche soniche, ultrasoniche, analisi con onde elettromagnetiche e analisi mediante termografia infrarossa.

La decisione di effettuare o meno un test è spesso dettata da considerazioni economiche (connesse al costo del testing) per cui spesso l'esigenza di utilizzare metodologie di N.D.T. deve essere considerata molto attentamente. Allo stato attuale della ricerca, ci si propone lo sviluppo di un sistema integrato di acquisizione dati e gestione delle informazioni e delle conoscenze in grado di evidenziare le specifiche caratteristiche dell'opera muraria in modo automatico e completo. Tale sistema dev'essere in grado di fornire una valutazione oggettiva e ripetibile dello stato di conservazione, ed inoltre di classificare e misurare le tipologie di difetto individuato. Le tecniche sperimentali usate dovranno consentire di approfondire e verificare le informazioni acquisite nelle indagini, in modo da analizzare lo stato di fatto al di sotto della superficie apparente. Esse dovranno, inoltre, permettere di distinguere e misurare: la struttura dell'opera, le discontinuità, gli strati ed i materiali costituenti. Va da sé che l'attenzione delle

industrie del settore, e della ricerca, è attualmente impegnata alla realizzazione di apparecchiature di N.D.T. innovative, caratterizzate dalla semplicità d'uso e dall'alta affidabilità.

1.2 Metodi e tecniche classiche

Fino al decennio scorso, le tecniche più diffuse per il riconoscimento ed il controllo dell'identità dei beni culturali erano essenzialmente legate a quattro tipologie di controlli:

- Riconoscimento di alcune proprietà visive (aspetto, colori, forme geometriche, peso totale o parziale, composizione chimica, ecc.) più o meno ben controllate attraverso strumentazioni piuttosto precise (fotografia, immagini laser, bilance di precisione, colorimetria, ecc.);
- Microanalisi, con varie tecniche anche di grande precisione (Microscopia ottica, Spettroscopia e Diffrattometria, Microsonde con luce di sincrotrone,

Microanalisi con raggi X), effettuate su piccoli (o piccolissimi) campioni appartenenti ai beni culturali indagati;

- Tecniche di tomografia con campi di onde elettromagnetiche ad alta frequenza (raggi x) sia per trasparenza sia per modalità tomografiche particolari (TAC).
- Controlli speciali (tecnica nucleare, termoluminescenza, radioattività naturale o indotta, ecc.) per riconoscere speciali caratteristiche (età, composizione, ecc.) dei pezzi analizzati.

Tutti i tipi di metodologie predette presentano alcuni svantaggi ai fini di una buona analisi del manufatto. Infatti, si spazia da tecniche generalmente poco precise ad altre che presentano inconvenienti e svantaggi legati ai volumi ispezionabili (scarsa rappresentatività) nonché al costo generalmente elevato delle analisi e alla spesso elevata invasività degli interventi.

1.3 Metodi e tecniche innovative

Nel campo dei beni culturali, strumenti utili per la determinazione dei parametri di cui sopra sono quelli che permettono indagini poco invasive da applicare sia ad opere monumentali che ad oggetti di alto pregio e spesso assai vulnerabili.

Gli obiettivi più comuni da individuare e localizzare con tecniche N.D.T. consistono in volumi eterogenei rispetto al resto dell'oggetto, superfici sottili (patine esterne ed interne, carbonatazione, strati di ossidazione, lesioni, fessure, fratture, ecc.), caratteristiche fisiche dei materiali costituenti i beni, risposte dei beni alle sollecitazioni con campi di potenziale e campi d'onda (codice di risposta).

Le metodologie tipicamente adoperate sono [1]:

- Metodologie a campi d'onda: sia in modalità di trasmissione (o trasparenza) sia in quella di riflessione e/o rifrazione;
- Tomografia sonora ed ultrasonica multicanale;
- Tomografia elettromagnetica ad alta frequenza;
- Termografia IR;
- Metodologie a campi di potenziale;

- Potenziali spontanei, Resistività e Polarizzazione Indotta;
- Tomografia elettrica di resistività (ERT) multicanale (con corrente continua o utilizzando segnali a frequenze basse);
- Tecniche di microscopia elettronica e analisi strutturale;

Tuttavia la scelta di un metodo piuttosto che un'altro dipende dalle finalità dell'esame:

- *Valutazione della struttura e della composizione dei materiali:* i diversi fattori che determinano la composizione di un materiale comprendono la natura del materiale stesso, i costituenti di una lega e le concentrazioni dei componenti di un miscuglio. Le caratteristiche connesse alla struttura invece includono la durezza, la profondità, il contenuto di impurità e il grado di sollecitazioni interne. Queste caratteristiche modificano i valori delle costanti elastiche, della conducibilità elettrica, delle proprietà magnetiche e della permittività.
- *Misura delle dimensioni:* essa viene normalmente effettuata con le tecniche visuali (ottiche), ultrasoniche, delle correnti parassite e delle microonde. I metodi visuali sono tuttavia raramente utilizzati, mentre quelli ultrasonici

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

- *Rivelazione dei difetti superficiali e sottosuperficiali*: la rivelazione delle fessure superficiali è ottenuta mediante i metodi delle tinture penetranti e delle particelle magnetiche. Il metodo delle tinture penetranti tuttavia non può essere utilizzato per rilevare difetti sottosuperficiali, mentre il metodo delle particelle magnetiche è adatto solo per i metalli ferromagnetici e richiede l'applicazione di un forte campo magnetico. I metodi elettromagnetici sono generalmente i più accurati per misurare le profondità delle rotture superficiali in campioni di metallo. La tecnica della corrente parassita è più precisa per le misure di rotture meno profonde, mentre per le rotture più

profonde si utilizzano le misure con campo alternato. Il metodo della dispersione del flusso magnetico può essere usato per misurare le rotture superficiali e sottosuperficiali, ma solo per materiali ferromagnetici, e richiede l'applicazione di un forte campo magnetico. È spesso usato per testare ampi tubi.

- *Rivelazione dei difetti interni:* questa è , probabilmente, l'applicazione più frequente. I metodi radiologici (raggi X e raggi gamma) sono quelli maggiormente utilizzati per questo scopo. Essi hanno il vantaggio di produrre un'immagine prontamente visibile e, spesso, ad alta risoluzione della regione interna dell'oggetto sotto test. I principali svantaggi sono rappresentati dalla necessità di proteggersi dai rischi legati alle radiazioni ionizzanti (il che richiede un'area protetta e il continuo controllo della salute del personale) e dal fatto che la profondità di penetrazione della radiazione nell'oggetto da testare può essere molto limitata (ad esempio 50 mm o meno in alcuni metalli e ancora meno in molti polimeri). Anche i metodi ultrasonici possono essere utilizzati per la rilevazione dei difetti interni. Essi presentano il vantaggio di essere adatti ad individuare le posizioni dei difetti in una singola operazione e di non essere soggetti ai rischi legati alle

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

Tale contesto ha dato vita, all'interno del programma di ricerca dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione del CNR di Pisa, ad un progetto indirizzato alla realizzazione di software e di apparecchiature volte al N.D.T..

E' stato dato un taglio esecutivo nettamente indirizzato allo sviluppo di congegni tecnologicamente avanzati e dai costi relativamente contenuti, non ingombranti durante l'utilizzo, e dunque di facile trasporto. Gli sforzi dei progettisti sono stati rivolti anche a dare un contributo alla maneggevolezza delle apparecchiature ed alla possibilità di un approccio di tipo User-Friendly. Tali premesse non devono però far trarre erronee conclusioni, in quanto l'utilizzo dei prototipi sviluppati è unicamente diretto a tecnici specializzati con competenze specifiche nel settore.

Il candidato ha preso parte al progetto summenzionato; nella fattispecie, ha dato il suo contributo alla realizzazione una serie di misure della costante dielettrica di alcuni campioni composti da materiale lapideo (in passato, già oggetto di simili indagini [2]). Tali rilevazioni sono state effettuate utilizzando una tecnica N.D.T. a

microonde, adoperando come sensore un'antenna a "Patch" della quale verranno date, in seguito, dettagliate delucidazioni circa i criteri di progettazione e le modalità di utilizzo; saranno, infine, discussi i risultati ottenuti.

2.0 GENERALITA' SUI TEST NON DISTRUTTIVI

I controlli non distruttivi sono utilizzati per stabilire l'affidabilità di un prodotto dal punto di vista della sua integrità fisica. Con essi si possono individuare le discontinuità che per tipo, dimensione e orientamento possono comportare una situazione di pericolo durante l'impiego del pezzo; il loro compito, solitamente, è quello di segnalare la presenza di discontinuità nei pezzi esaminati, identificandone anche il tipo.

Nati negli ospedali per la diagnostica medica (i più noti sono i raggi X, gli ultrasuoni, gli endoscopici), i controlli non distruttivi hanno trovato applicazione nelle industrie, dove è necessaria la sicurezza e la qualità del prodotto, e nei laboratori di restauro e conservazione delle opere d'arte.

I metodi a disposizione per i N.D.T. sono tantissimi. Oltre a quelli d'indagine endoscopica, indagine e misure ultrasoniche, soniche e di correnti indotte, liquidi penetranti e polveri magnetiche, raggi X e gamma, indagine termografica, ve ne sono molti altri quali le emissioni acustiche, l'olografia, la fotogrammetria, la betagrafia, ecc.

Si chiamano controlli non distruttivi in quanto non modificano, nemmeno su scala microscopica, le caratteristiche fisico-chimiche e le proprietà del prodotto in esame. I mezzi utilizzati per un N.D.T. costituiscono un sistema di controllo composto essenzialmente da due componenti:

1. *L'elemento penetrante:*

- a. una radiazione penetrante, per raggi x e gamma;
- b. campi elettromagnetici, per microonde;
- c. un fascio d'onde ultrasoniche, per gli ultrasuoni;
- d. un campo magnetico, per le polveri magnetiche;
- e. un fluido, per i liquidi penetranti;
- f. una corrente elettrica, per le correnti indotte;

2. *L'elemento rivelatore:*

- a. pellicole radiografiche, per i raggi x o gamma;
- b. antenne, per microonde;
- c. sonde ultrasoniche, per gli ultrasuoni;
- d. polveri magnetiche, per il metodo con polveri magnetiche;
- e. un rivelatore, per i liquidi penetranti;

- f. il segnale su un tubo a raggi catodici o l'indicazione di uno strumento di misura, per le correnti indotte;

In considerazione dell'ambito di interesse, ed in relazione alla tipologia di metodi e materiali a cui la nostra attenzione è rivolta, saranno, più in avanti, prese in esame le sole tipologie di testing a *microonde* ed ad *ultrasuoni*, sebbene, per completezza del lavoro svolto, si ritenga opportuno presentare adesso una descrizione delle più diffuse tipologie di testing non distruttivo; la breve esposizione che segue, dunque, ha lo scopo di fornire un quadro informativo generale.

2.1 Liquidi penetranti

Principio del metodo: la tecnica di controllo con liquidi penetranti è basata sulle proprietà “bagnanti” di particolari liquidi e viene impiegata per individuare difetti superficiali su materiali sia metallici che non metallici. Schematicamente si opera applicando sulla superficie del pezzo in esame un liquido in grado di penetrare per capillarità all’interno delle discontinuità affioranti in superficie; dopo aver rimosso il liquido residuo dalla superficie stessa, la frazione introdottasi nelle discontinuità è messa in evidenza da un particolare agente assorbente, dando luogo ad un’indicazione visibile corrispondente ai difetti superficiali. Le indicazioni ottenute devono essere osservate in luce bianca o in luce di Wood (radiazione UV) a seconda che siano utilizzati, rispettivamente, liquidi penetranti a contrasto di colore o fluorescenti. Questi ultimi, in virtù dell’elevato contrasto luminoso risultante, garantiscono una sensibilità di rivelazione più elevata di quella ottenibile con i liquidi penetranti a contrasto di colore, i quali, pertanto, vengono generalmente utilizzati nei casi in cui non è richiesta una sensibilità particolarmente elevata. La visualizzazione del difetto, quindi, avviene direttamente sul pezzo in esame, per contrasto fra penetrante e materiale sotto esame [3].

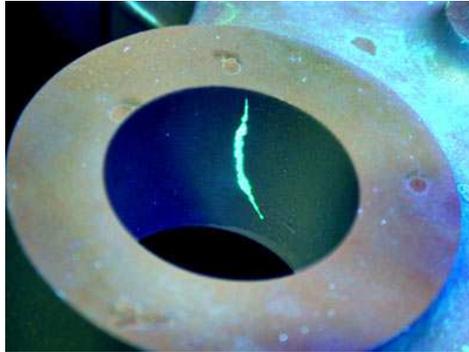


Illustrazione. Rottura all'interno di un pezzo metallico evidenziata attraverso i liquidi penetranti.

Limiti del metodo:

- Non rivela discontinuità sotto pelle o chiuse in superficie;
- Non è normalmente applicabile all'esame di superfici troppo rugose o porose;
- Si presta all'automazione solo per quanto riguarda la parte esecutiva, mentre l'interpretazione dei risultati deve essere fatta da personale qualificato;
- L'esame è di solito limitato a zone facilmente accessibili;
- Il campo di temperatura in cui è possibile il controllo con i prodotti per impiego normale va da 56°C a 120°C;
- La sensibilità del metodo è condizionata dal grado di finitura superficiale.

Applicazioni e sviluppi: il metodo con liquidi penetranti è adatto a rilevare difetti di qualunque tipo affioranti in superficie, a condizione che siano “aperti”. Possono essere rilevati difetti di fusione come giunti freddi, cricche di ritiro, ecc.; difetti di fabbricazione come cricche di tempra o di saldatura, filature, sdoppiature di laminazione, ecc.; difetti di servizio come cricche di fatica, di tenso-corrosione, ecc. Il metodo non è vincolato al tipo di materiale o alla sua struttura; il materiale tuttavia non deve essere poroso in superficie, come certi materiali ceramici. Possono essere controllati: acciaio, alluminio, materiali compositi, ghisa, vetro, ecc. I liquidi penetranti rilevano con esattezza ed estrema semplicità l’ubicazione del difetto sulla superficie, ma le sue dimensioni di solito risultano ingrandite rispetto a quelle reali.

La ricerca dei grandi gruppi industriali che operano in questo settore ha permesso lo sviluppo di nuovi prodotti più sensibili, meno tossici e facilmente biodegradabili. L’ultimo aspetto è senz’altro rilevante, in quanto il costo della depurazione, con leggi sempre più severe in materia, è uno degli elementi che incidono maggiormente sul costo dell’impianto. Un esempio significativo può essere tratto dall’introduzione degli emulsificatori a base d’acqua in luogo di quelli a base oleosa, che ha permesso di elevare la sensibilità dell’esame, e nel contempo di ridurre considerevolmente i costi della depurazione delle acque reflue.

2.2 Polveri magnetiche (o magnetoscopia)

Principio del metodo: il metodo magnetoscopico, atto ad evidenziare difetti superficiali e subsuperficiali su materiali ferromagnetici, è basato sulla generazione di un flusso magnetico disperso in corrispondenza delle discontinuità, in grado di attrarre delle particelle magnetiche, a granulometria molto fine, applicate sulla superficie dei particolari in esame. In tal modo si ottengono indicazioni visibili, relative ai difetti presenti. La tecnica di controllo è molto sensibile e può rilevare difetti anche su particolari ricoperti da sottili strati protettivi (ad esempio vernici), seppure con lieve riduzione di sensibilità.

La rilevazione dei difetti può essere effettuata impiegando particelle magnetiche applicate a secco o mediante una sospensione in un opportuno agente liquido, (tali particelle evidenziano il flusso magnetico disperso dalle discontinuità), o mediante sonde che individuano il flusso disperso, trasformandolo in un segnale elettrico. Le particelle possono essere colorate per risultare visibili in luce bianca o fluorescenti in luce di Wood. La tecnica di esame che impiega particelle magnetiche fluorescenti raggiunge una sensibilità più elevata [4].

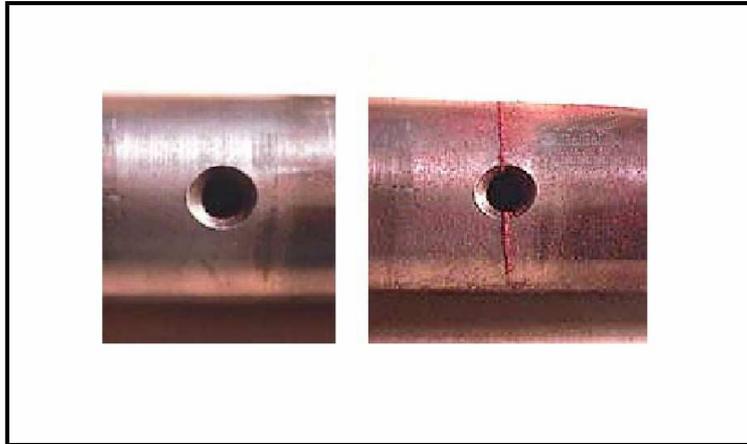


Illustrazione. Anomalia in un pezzo metallico, evidenziata da particelle magnetiche.

Limiti del metodo:

- Applicabilità ai soli materiali ferromagnetici;
- Scarsa sensibilità per i difetti rotondeggianti;
- Si presta 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;
- Il campo di temperatura in cui è possibile il controllo arriva fino a 50°C con rivelatori umidi e fino a 300°C con rivelatori a secco.

Applicazioni e sviluppi: l'esame magnetoscopico, detto anche esame con particelle magnetiche, è un metodo atto a rilevare difetti superficiali e subsuperficiali in materiali ferromagnetici come cricche, incollature, inclusioni, ripiegature, sdoppiature, mancanze di penetrazione nelle saldature, ecc. Casi tipici di applicazione del metodo magnetoscopico sono le fusioni in acciaio a struttura ferritica, i fucinati, gli estrusi, gli stampati, le saldature ed altri componenti a matrice ferritica. Importante per la rilevazione dei difetti è che questi siano orientati in modo da essere "intercettati" dalle linee di forza del flusso magnetico indotto; per tale ragione, lo stesso pezzo deve essere come minimo magnetizzato in due direzioni fra di loro ortogonali. L'impiego di lettori ottici ha permesso un significativo sviluppo per l'interpretazione automatica dei risultati.

2.3 Ultrasuoni

Principio del metodo: la tecnica di controllo si basa sull'impiego di onde ultrasonore. Nell'applicazione più consueta viene emesso un impulso ultrasonoro che, propagandosi nel particolare da controllare, viene riflesso dalle eventuali discontinuità presenti, e quindi rilevato e convertito in segnale elettrico tale da essere presentato su uno schermo oscillografico. Il tipo di presentazione più frequentemente adottata consiste nel visualizzare i segnali in funzione del tempo (A-scan); poiché gli spazi percorsi dagli impulsi ultrasonori sono proporzionali ai rispettivi tempi di transito, sullo schermo dell'oscillografico risulteranno visualizzati nell'ordine: l'impulso di emissione (coincidente con la superficie cui è applicato il trasduttore), eventuali echi di difetti e, infine, l'eco di "fondo" (relativo alla superficie opposta del pezzo). Le tecniche di esame si dividono in due classi: le "tecniche per contatto", in cui il trasduttore è accoppiato direttamente al pezzo in esame, e le "tecniche per immersione" che realizzano l'accoppiamento acustico mediante l'acqua, nella quale viene immerso il particolare da controllare. L'impiego dell'una e dell'altra tecnica è subordinato a considerazioni inerenti la forma geometrica dei pezzi da esaminare, il tipo e l'orientazione dei difetti da rilevare, la semplicità operativa e la velocità d'ispezione richiesta. Il difetto, quindi,

appare sullo schermo di un tubo a raggi catodici con la forma di un oscillogramma prodotto da un segnale elettrico. Oltre a questo tipo di rappresentazione, che è la più comune, ne esistono altre più sofisticate dove può essere evidenziata l'intera sezione del pezzo con le relative difettosità. Gli ultrasuoni, oltre che per rilevare difetti, sono anche impiegati per misure di spessore [5].

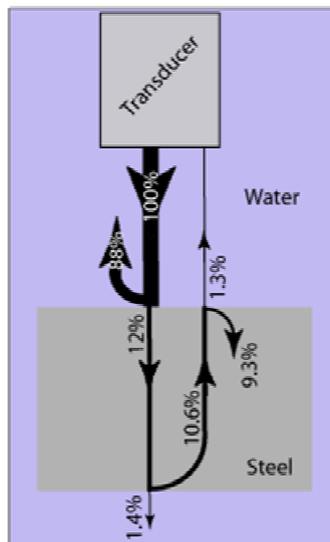


Illustrazione. Comportamento dell'onda sonora alla presenza di interfacce lungo il suo cammino.

Limiti del metodo:

- Difficoltà nel controllo di pezzi a geometria complessa;
- Difficoltà a controllare i materiali ad alta attenuazione acustica (legno, calcestruzzo e materiali ferrosi e non ferrosi a grano grosso) o ad alta temperatura;
- Sensibilità d'esame condizionata dallo stato superficiale del pezzo;
- Relativa difficoltà nell'interpretazione dei segnali, che richiede una prolungata esperienza ed uno specifico addestramento del personale.

Applicazioni e sviluppi: gli U.S. sono onde acustiche con frequenze (0.5÷25 MHz) superiori alla soglia dell'udibile. L'impulso ultrasonoro viene trasmesso nel materiale da un apposito trasduttore, detto comunemente sonda. Gli impulsi riflessi dalle superfici del difetto o dalle pareti del pezzo sono captati dal trasduttore, trasformati in segnali elettrici e rappresentati sullo schermo a raggi catodici dell'apparecchio. È sempre possibile stimare con una certa accuratezza le dimensioni reali del difetto interno, e quindi, accettare o scartare il pezzo sulla base delle prescrizioni dei codici o delle specifiche applicabili. Il campo di maggiore applicazione è il controllo di saldature, lamiere, fucinati, stampati, fusioni e

materiali compositi. Il metodo ad U.S. è sicuramente il più diffuso e con fattore di crescita più elevato rispetto ad altri metodi non distruttivi impiegati per il rilievo dei difetti interni. Tale diffusione è dovuta alla facilità con cui è possibile condurre l'esame, alla velocità d'esecuzione, all'elevato livello di sensibilità e all'ampio campo di spessori controllabili (fino a 10 m). Nel settore aeronautico, nucleare, petrolchimico e siderurgico, gli ultrasuoni hanno da tempo un impiego estensivo nei collaudi di accettazione, nei controlli di processo e nell'in-service-inspection. Trova spazi sempre più vasti anche nella caratterizzazione dei materiali (ne è un esempio la valutazione della resistenza del cemento in base alla velocità di transito degli U.S.). Recenti applicazioni degli U.S. si sono avute nel controllo della qualità dei materiali compositi e nella verifica degli incollaggi del legno, delle materie plastiche, ecc. Esso può praticamente individuare qualsiasi tipo di difetto. Richiede però un attento studio per la scelta delle apparecchiature, delle sonde e delle procedure d'esame per ottenere la sensibilità richiesta. Per superare il tradizionale sistema di valutazione delle indicazioni basato sulla misura delle ampiezze dei segnali ricevuti, si stanno sperimentando delle tecniche alternative. Notevoli speranze si nutrono per i buoni risultati ottenuti dall'analisi spettrale del segnale per la caratterizzazione dei difetti. In tal caso, sarebbe superata l'attuale fase di stallo, in cui la valutazione delle indicazioni è affidata solo alla capacità

dell'operatore che, in base al comportamento del segnale in relazione al movimento della sonda, lo interpreta per definire le dimensioni, la forma, e la localizzazione del difetto. Si sta cercando di superare, mediante la realizzazione di sistemi automatici d'acquisizione e d'elaborazione dei dati, i tradizionali sistemi di rappresentazione in A, B e C-scan con sistemi che danno migliori informazioni sulla localizzazione dei difetti. Sono state infine messe a punto nuove sonde in grado di trasmettere gli U.S. senza accoppiamento (sonde EMAT), garantendo la riuscita dell'esame anche su superfici ad alta temperatura e sonde in grado di localizzare con grande facilità difetti superficiali.

2.4 Radiografia (Raggi X e Gamma)

Principio del metodo: il metodo radiografico consiste nel rilevare su pellicola, o altri dispositivi, variazioni d'attenuazione che un fascio di radiazioni elettromagnetiche di elevata energia, generate da apposite apparecchiature (raggi X), oppure emesse spontaneamente da sorgenti radioattive (raggi gamma), subisce in funzione degli spessori attraversati penetrando nei particolari in esame. Le discontinuità eventualmente presenti nei materiali risultano pertanto evidenziate

sulla pellicola radiografica sotto forma di zone diversamente annerite. La visualizzazione del difetto, quindi, può avvenire sulla pellicola radiografica, sullo schermo fluorescente o sul monitor. L'immagine del difetto, pur con qualche deformazione, appare nella sua forma e dimensioni reali [6].



Illustrazione. Oggetto analizzato ai raggi X.

Limiti del metodo:

- Il massimo spessore di acciaio esaminabile con radiografia è dell'ordine di 400÷500 mm, impiegando gli acceleratori lineari ad alta energia; con apparecchi monoblocco tale spessore si abbassa a 70÷100 mm. In

radioscopia gli spessori esaminabili si riducono ulteriormente: 10÷20 mm per l'acciaio e 50 mm per le leghe leggere;

- I difetti bidimensionali, a seconda della loro inclinazione, possono non essere rilevati;
- L'utilizzazione, sotto qualsiasi forma, delle sorgenti di radiazioni ionizzanti richiede il rispetto delle leggi in materia di radioprotezione, con conseguente ovvio aumento dei costi di controllo.

Applicazioni e sviluppi: il metodo radiografico è stato tra i primi metodi d'indagine non distruttiva ad essere introdotto nell'industria per il rilievo dei difetti interni. Il campo applicativo della radiografia è molto vasto. Include il controllo di saldature, getti, prodotti stampati, fucinati, materiali compositi, materie plastiche, componenti di costruzioni civili, ecc.. Alla radiografia di oggetti statici si è aggiunta la radiografia di processi dinamici, come la traiettoria di un proiettile lungo la canna, il percorso di un metallo liquido durante la colata, la combustione del propellente all'interno di un missile, lo studio di un processo di saldatura, ecc.

Il progresso tecnologico ha portato grandi innovazioni nelle tecniche d'esame con il metodo radiografico. Tra le più significative figurano:

- L'impiego degli intensificatori di brillantezza e di tubi da ripresa, che hanno reso possibile negli impianti di radioscopia il trasferimento dell'immagine radiografica dallo schermo fluorescente al monitor, con un notevole miglioramento della sensibilità;
- La digitalizzazione dell'immagine radiografica per il trasferimento della radiografia su calcolatore, che permette un'elaborazione dell'immagine con conseguente miglioramento del contrasto e della definizione. È possibile inoltre la memorizzazione di una gran quantità di dati relativi alle lastre radiografiche, gettando in tale modo le basi per un procedimento in grado di facilitare l'archiviazione e la consultazione delle stesse;
- La tecnica Microfocus, la quale, utilizzando apparecchiature con dimensioni del fuoco radiografico dell'ordine dei centesimi di millimetro, può eseguire ingrandimenti dell'oggetto radiografato;
- La tomografia computerizzata, in grado di rappresentare sezioni radiografiche del pezzo.

2.5 Microonde

Principio del metodo: Nel caso di materiali compositi a matrice dielettrica, la scoperta e la caratterizzazione di questi difetti possono essere ottenute anche con le classiche tecniche di indagine basate sull'uso di Raggi X o Ultrasuoni ma, a seconda dei casi, si possono dimostrare poco efficienti. Le caratteristiche fisiche cui sono sensibili queste due tipologie di radiazioni risultano essere rispettivamente:

- La densità di massa, per i Raggi X;
- La velocità del suono, per gli Ultrasuoni;

Nella diagnostica dei materiali dielettrici, gli eventuali difetti da riscontrare danno un insufficiente contrasto nei confronti dei raggi X ed una elevata attenuazione nei confronti degli ultrasuoni, impedendo in alcuni casi un esame completo del pezzo.

Un parametro che caratterizza bene i materiali dielettrici è la loro permittività complessa, quindi si possono utilizzare i campi elettromagnetici come radiazioni esploranti: questo metodo di misura sfrutta la capacità delle microonde di penetrare all'interno dei materiali dielettrici. Il sensore viene posizionato in prossimità del materiale da investigare: esso opera in campo vicino, pertanto non

si ha la classica propagazione del segnale in spazio libero e quindi neanche l'approssimazione dell'onda elettromagnetica come onda piana. Nel caso in cui in prossimità del sensore sia presente del materiale dielettrico, si risale alla costante dielettrica equivalente (ϵ_{eq}); una volta identificate le caratteristiche del substrato (ϵ_{sub}), ci si riconduce al valore della costante dielettrica del materiale sotto test (ϵ_{MUT}).

Limiti del metodo:

- L'ispezione è possibile solo su corpi a bassa conducibilità, che siano quindi penetrabili da onde elettromagnetiche.
- Si ha una limitata profondità di ispezione: la profondità di penetrazione delle onde elettromagnetiche, in campo vicino, nei materiali dielettrici dipende dalla proprietà dielettriche di questi ultimi.
- Non sono attualmente disponibili pratiche apparecchiature di misura che permettano la diffusione del metodo e l'uso nelle svariate applicazioni possibili.

Applicazioni e sviluppi: caratterizzato da un impiego rivolto ai soli materiali dielettrici, questo metodo abbraccia una vasta varietà di impieghi nel settore dei

test non distruttivi, per applicazioni sia di tipo civile che industriale. Attraverso lo sviluppo di nuove e sempre più efficaci apparecchiature di diagnosi, si rende disponibile una nuova tipologia di indagine non distruttiva e non invasiva. Le caratteristiche degli oggetti esaminati, per tutta la durata delle indagini, non subiscono alcun tipo di danneggiamento; Sono in corso degli studi atti a rendere possibile interporre dei materiali dielettrici, di tipo spugnoso, tra le parti in contatto (cioè il sensore e la superficie dell'oggetto in esame); in questo modo si eliminano i rischi di danneggiamento accidentale su manufatti di valore. In alcuni, a seconda delle caratteristiche geometriche delle superfici esterne, è possibile condurre interamente le indagini dei parametri dielettrici senza alcun contatto tra i sensori e le superfici stesse. Sono questi i punti vincenti di questo tipo di ispezione, che permette di risalire alle caratteristiche fisiche dei materiali costituenti gli oggetti da esaminare e che lo rende particolarmente indicato alle applicazioni nella conservazione dei beni culturali. Lo sviluppo di apparecchiature e di software volti all'analisi automatica dei dati raccolti durante i rilievi porterà le tecniche N.D.T. a microonde in una posizione di rilievo nell'ambito dei metodi di ispezione non distruttiva su materiali dielettrici.

2.6 Indagine endoscopica

Principio del metodo: l'indagine consiste nell'esaminare una superficie non accessibile con i mezzi degli altri metodi di controllo non distruttivo. È un'indagine a vista con l'ausilio di apposite apparecchiature denominate boroscopi ed endoscopi, che per i loro diametri possono accedere all'interno di complessi o parti strutturali. Il boroscopio si compone di un tubo di opportuno diametro e lunghezza, munito di lampadina posta all'estremità, necessaria per illuminare l'interno della zona da ispezionare, e di un sistema ottico oculare-specchio, onde permettere la visione della zona. L'endoscopio, invece, si compone di un fascio di fibre ottiche di opportuno diametro e lunghezza, necessario per trasmettere la luce, la cui sorgente è remota, e di un sistema ottico oculare-specchio. Il boroscopio è rigido, mentre l'endoscopio è flessibile, permettendo così di accedere in posti defilati rispetto al foro d'accesso. La visualizzazione del difetto, quindi, è basata sull'osservazione della superficie esaminata così com'è o leggermente ingrandita.

Limiti del metodo:

- L'ispezione è possibile solo su corpi con fenditure di almeno qualche millimetro che si protendono lungo percorsi rettilinei o poco incurvati, a seconda del tipo di sonda utilizzato.
- L'utilizzo di sonde, implica una parziale "invasione" dell'oggetto da esaminare, rendendo rischioso l'intervento: si possono arrecare abrasioni o, peggio, rotture meccaniche dei materiali.

Applicazioni e sviluppi: Con l'avvento della microelettronica industriale moderni endoscopi dotati di telecamere (videoscopi) sono in grado di fornire immagini dettagliate attraverso monitor e display a colori; di largo utilizzo in medicina, come nei settori artigianali, civili, meccanici, cantieristici ed industriali. Indicati per analizzare zone inaccessibili, attraverso piccole aperture e per lunghezze che possono arrivare fino ad un paio di centinaia di metri; essi forniscono immagini luminose e ad alta risoluzione mediante sistemi di acquisizione digitali e tecniche di elaborazione all'avanguardia.

3.0 METODO DI ISPEZIONE MEDIANTE ONDE ULTRASONORE

Come già introdotto durante la presentazione delle tecniche N.D.T., scopo del progetto cui il candidato ha preso parte è il riesame di tecniche e misure precedentemente adoperate all'interno del programma di ricerca dell' I.S.T.I. "Alessandro Faedo", istituto del Consiglio Nazionale delle Ricerche in Pisa. A causa di problemi logistici presentatisi durante lo svolgimento di questo lavoro, non è stato possibile corredare, come previsto, questo capitolo di risultati sperimentali su elementi architettonici. Ci si limiterà dunque alla sola presentazione della tecnica ultrasonica, senza aggiungere dati di misura né relative conclusioni.

3.1 Presentazione della Tecnica Ultrasonora

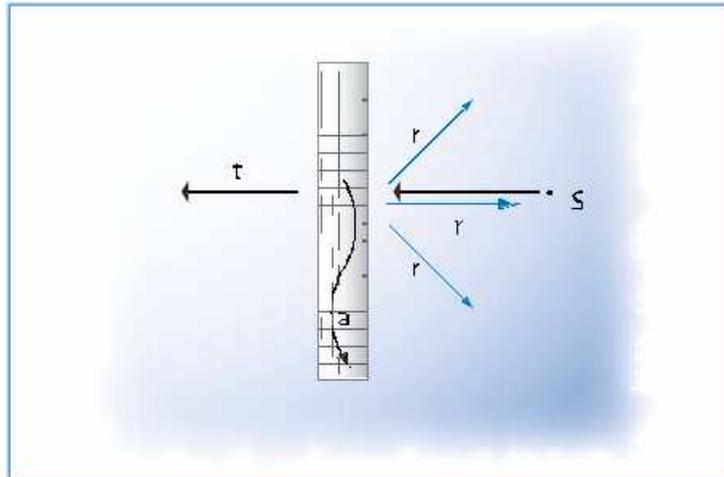
In generale, le tecniche ultrasonore sfruttano i fenomeni della propagazione di fasci d'onde elastiche nei solidi, liquidi o gas. Si tratta di onde di compressione e decompressione della materia, con frequenza superiore a quella dei suoni udibili dall'orecchio umano. Le onde ultrasonore inviate nel sistema da esaminare sono

attenuate dalla materia che incontrano e da essa riflesse, deviate o assorbite a causa dalle discontinuità presenti nella stessa.

Nella vita quotidiana sarà capitato a chiunque di sperimentare gli effetti dell'eco: il fenomeno dipende dalla riflessione delle onde sonore che incidono sulla superficie dell'ostacolo, che è di natura diversa da quella del mezzo di propagazione (aria), fino al ritorno all'orecchio dell'ascoltatore. Il metodo di rivelazione dei difetti con Ultrasuoni è l'applicazione tecnologica di questo principio. Il fascio d'onde ultrasonore, vale a dire il segnale, è generato sfruttando le proprietà piezoelettriche di alcuni cristalli, cioè la loro capacità di contrarsi ed espandersi sotto l'azione d'un campo elettrico o d'un campo magnetico alternato. Le vibrazioni del cristallo producono onde elastiche, di frequenza ultrasonora dipendente dal rapporto spessore-diametro del cristallo piezoelettrico. Gli ultrasuoni così generati sono trasferiti direttamente nel materiale da controllare grazie al contatto, o più propriamente al semplice accostamento del trasduttore alla superficie del pezzo, purché esista un mezzo di impedenza acustica adeguata tra le due interfacce; infatti un'eccessiva differenza d'impedenza rende difficile o impossibile il trasferimento degli ultrasuoni da un mezzo all'altro (l'acqua risulta essere il miglior accoppiante ed in alternativa si possono utilizzare sospensioni o soluzioni acquose sature di colle cellulosiche). Il fascio d'onde ultrasonore si propaga nel

materiale da esaminare, con la stessa frequenza con cui è stato generato dal cristallo, e con una velocità che dipende dal materiale attraversato.

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



(figura 3.1). Le onde riflesse **Figura 3.1.** Caso di incidenza normale di un'onda sonora.

possiedono la stessa frequenza di quelle incidenti, ma sono sfasate rispetto ad esse, anche in funzione del cammino percorso, cioè della distanza del trasduttore dai vari punti della superficie dell'ostacolo. Analoga sorte spetta alle onde diffratte. L'energia assorbita dal difetto colpito dalle onde incidenti fa sì che esso possa vibrare emettendo a sua volta (a condizione che tale frequenza sia contenuta nello spettro del segnale incidente) onde elastiche di frequenza tipica della sua risonanza e variamente sfasate. Dunque il segnale che ritorna verso il trasduttore è molto complesso. Il ritardo del segnale ricevuto rispetto al segnale trasmesso si definisce "tempo di volo": esso esprime, attraverso la semplice equazione spazio/tempo, la distanza percorsa dal treno di onde ultrasonore prima di tornare

al cristallo che le ha emesse. Proprio perché il segnale ricevuto è estremamente complicato, il tempo di volo è normalmente di difficile valutazione.

Le informazioni riguardanti il posizionamento geometrico di tale difetto e la sua natura vengono quindi ricavate con semplici calcoli trigonometrici e con la valutazione dinamica del comportamento del segnale.

Il fenomeno fisico della piezoelettricità o magnetostrizione, che è stato sfruttato per generare l'onda, è reversibile. Ne deriva che lo stesso cristallo capace di emettere ultrasuoni può generare un segnale elettrico o magnetico, quando sia investito da un fascio d'onde elastiche. Perciò, quando l'onda riflessa od emessa dall'ostacolo ritorna alla sonda che l'ha generata, darà un segnale elettrico che, opportunamente amplificato e filtrato, potrà essere visualizzato sul quadrante dell'oscilloscopio o su un monitor, di cui sono sempre dotati gli strumenti rivelatori d'ultrasuoni. Il filtraggio del segnale elimina di fatto tutte le informazioni utili per identificare la forma e la geometria della discontinuità, lasciando soltanto quelle relative alla distanza dell'ostacolo dal trasduttore ed all'attenuazione del segnale rispetto all'eco di fondo. Ciò è necessario per rendere il segnale pulito e comprensibile all'operatore, soprattutto perché ancora non sono diffusi per le prove non distruttive (NDT) strumenti asserviti al calcolatore, capace di elaborare l'intero segnale e ricostruire l'immagine del difetto. Gli sforzi della ricerca nel settore delle

NDT industriali con ultrasuoni sono attualmente tesi alla demodulazione dei segnali di ritorno attraverso l'applicazione delle trasformate di Fourier (FFT). Ciò permetterebbe non solo d'individuare la posizione e di valutare la dimensione equivalente dei difetti, ma di vederne realmente la forma, diagnosticandone la natura, come già accade nell'ecografia in campo medico, che consente di vedere sul monitor la forma e la posizione delle zone di interesse.

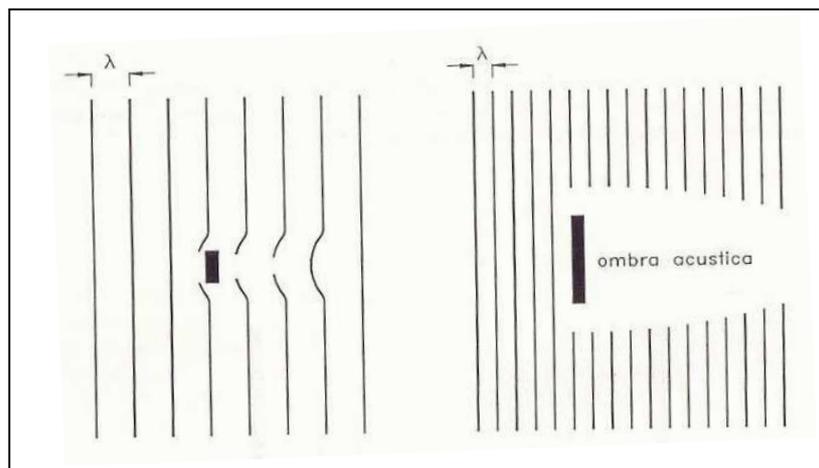


Figura 3.2. Propagazione di un'onda ultrasonica attraverso un mezzo con discontinuità : a sinistra, la lunghezza d'onda è paragonabile alle dimensioni dell'ostacolo rendendolo invisibile al rilevatore; a destra, l'ostacolo crea un'ombra acustica che ne permetterà la corretta rilevazione.

Attualmente tutti gli strumenti rivelatori d'ultrasuoni si compongono di due parti, unite o distinte: il generatore del segnale da inviare al materiale da esaminare ed il

rivelatore, che riceve, amplifica, filtra e visualizza i segnali che ritornano alla sonda dopo la propagazione. In tal modo è possibile rivelare soltanto gli echi riflessi da eventuali difetti interni o gli echi di fondo (o della parete di confine del pezzo esaminato) più o meno attenuati in funzione dei difetti presenti.

Poiché il materiale da esaminare possiede sempre un confine, cioè una parete di fondo sulla quale il fascio in ingresso si riflette comunque, è possibile ricavare informazioni sulla posizione del difetto presente nella massa, attraverso il rapporto dei tempi di ritorno dell'eco del segnale e dell'eco di fondo. Questo è possibile perché la propagazione delle onde ultrasonore avviene sempre a velocità costante in un mezzo omogeneo. Inoltre è possibile rivelare la presenza d'un difetto interno anche nel caso che questo non generi la riflessione, ma soltanto l'assorbimento del fascio incidente (Figura 3.2). Ciò è possibile perché lo strumento visualizza il fondo sia come distanza (tempo per la ricezione dell'eco di fondo), che per assorbimento (attenuazione dell'intensità del segnale di fondo riflesso, per assorbimento da parte della materia attraversata). Se l'intensità del fascio riflesso dalla parete di fondo diminuisce bruscamente in una certa posizione significa che qualche ostacolo o discontinuità l'ha parzialmente assorbita. In questo caso non è possibile individuare la posizione del difetto, ma solamente valutarne la presenza ed il potere assorbente. È altresì possibile valutare approssimativamente la dimensione

della discontinuità incontrata dal fascio d'ultrasuoni, confrontando l'intensità dell'eco ricevuta con quella di difetti standard, o con grafici appositamente costruiti. L'attuale tecnica ha prodotto una vasta gamma di sonde (trasduttori e ricevitori) i cui fasci d'onde ultrasonore si propagano in linea retta rispetto all'asse della sonda stessa, oppure obliquamente (assai usate sono le sonde con propagazione a 30, 45, 60 e 70°), e perfino in direzione ortogonale, cioè con onde perfettamente tangenti alla superficie.

I trasduttori ed i ricevitori possono esser incorporati nella stessa sonda od esser separati per ottimizzare alcuni rilevamenti. Ogni sonda possiede caratteristiche specifiche che ne ottimizzano l'uso per ogni morfologia e giacitura del difetto da evidenziare, nonché per ogni tipo di materiale da esaminare (acciaio comune, acciaio inossidabile, ghisa, alluminio, ecc.). Ogni sonda opera ad una data frequenza che può esser o meno ottimale per lo scopo specifico dell'esame ultrasonico. Dunque esiste una vastissima gamma di sonde, (trasduttori e rivelatori) e d'accessori, tali da consentire enormi possibilità e versatilità d'impiego, dal più elementare esame, alla più sofisticata ricerca.

Il controllo con ultrasuoni è reso più efficace e semplice dal grado di simmetria del pezzo da esaminare, ovvero dalla presenza di superfici piane o cilindriche, di piani paralleli o comunque in grado di riflettere efficacemente l'onda di fondo. Si

complica invece in presenza di fori, scanalature, filettature, variazioni di sezione o di caratteristiche geometriche complesse. Il metodo richiede uno stato superficiale che consenta o non ostacoli eccessivamente il passaggio degli ultrasuoni. Gli ultrasuoni rivelano con difficoltà i difetti che giacciono troppo vicino al trasduttore. Riassumendo, il metodo permette l'identificazione di difetti interni che causino la riflessione, la deviazione o l'assorbimento d'un fascio d'ultrasuoni e distanti dal trasduttore da pochi mm a diversi metri. Con particolari sonde si possono rivelare anche i difetti affioranti, ma la tecnica US non è particolarmente adatta per gli esami di superficie. L'interpretazione dei segnali richiede una grande preparazione ed esperienza e magari una controprova con altre tecniche.

3.2 Stato attuale della tecnica ultrasonora

Le prove non distruttive a ultrasuoni sono state utilizzate per molti decenni dopo i primi veloci sviluppi tecnologici seguiti alla seconda guerra mondiale. Dall'analisi dei meccanismi di frattura, si è potuto stabilire se, data una determinata crepa e dato il carico da sopportare, un determinato materiale avrebbe mantenuto le proprietà meccaniche richieste. Sono state anche trovate delle leggi che predicono

il tasso di crescita delle crepe quando un materiale è sottoposto a un carico ciclico (fatica). A questo punto, la sola rilevazione del difetto non era più sufficiente, ma era necessario approfondirne la conoscenza intrinseca in relazione alle caratteristiche del materiale (informazioni quantitative sulla forma e l'influenza del difetto). Queste esigenze, manifestatesi fortemente nel settore della difesa e dell'industria nucleare, hanno condotto all'istituzione di un certo numero di programmi di ricerca a livello mondiale ed all'emergere della valutazione non distruttiva quantitativa (QNDE) come disciplina autonoma.

3.3 Introduzione alle Tecniche NDT ad Ultrasuoni

L'ispezione mediante ultrasuoni con la tecnica per trasmissione è un efficace metodo non distruttivo che consente sia di determinare alcuni parametri caratteristici del materiale esaminato, sia di confrontare agevolmente i risultati ottenuti in differenti posizioni di misura sullo stesso campione o in posizioni identiche su campioni diversi, sia infine di ricavare mappe di trasmissione, utili per la descrizione di un oggetto [7,8]. Se si usano sonde non a contatto, il metodo

diventa anche non intrusivo, e può essere usato per l'ispezione di oggetti di cui non si debbano alterare le superfici [9].

L'ispezione ad ultrasuoni in trasmissione consente di rilevare la presenza di anomalie all'interno di un oggetto: questa determinazione è fatta confrontando due parametri caratteristici del segnale ricevuto, come il ritardo rispetto all'eccitazione della sonda e la sua ampiezza, coi valori ottenuti in una condizione di riferimento. Nelle misure in trasmissione è essenziale la definizione della finestra temporale entro la quale si determina l'ampiezza del segnale. Poiché la sonda ricevente è raggiunta in tempi diversi da onde ultrasonore che hanno subito riflessioni sulle varie interfacce presenti nell'oggetto in esame, è opportuno considerare soltanto il segnale di primo transito, prodotto dall'onda che incide sulla sonda ricevente dopo aver percorso il tragitto più breve tra le due sonde: considerando questo segnale si ottiene il tempo di volo dell'onda ultrasonora e conseguentemente la sua velocità media di propagazione nell'oggetto. Una singola misura con la tecnica in trasmissione può rivelare la presenza di un'anomalia lungo il percorso esaminato, ma non dà indicazioni sulla posizione di essa: per localizzare l'anomalia si devono eseguire misure lungo percorsi che s'intersecano (da un tale insieme di dati, si può anche applicare un qualche metodo di tomografia ultrasonora).

3.4 Procedura per l'ispezione a ultrasuoni di oggetti con sezione circolare

Al fine di rilevare anomalie interne a materiali di tipo lapideo, come intrusioni o discontinuità, si può eseguire un'ispezione ad ultrasuoni con la tecnica per trasmissione, in cui sono impiegati due trasduttori, uno per la generazione di un impulso a ultrasuoni, e l'altro per la ricezione dell'onda che ha attraversato il materiale. Se il fascio ultrasonoro generato dal primo trasduttore incontra una discontinuità, sul suo percorso si ha una riflessione parziale e il fascio trasmesso risulta perciò indebolito; il segnale ricevuto dal secondo trasduttore si presenta quindi ridotto in ampiezza rispetto al caso di assenza di discontinuità (vedi figura 3.2 e 3.3).

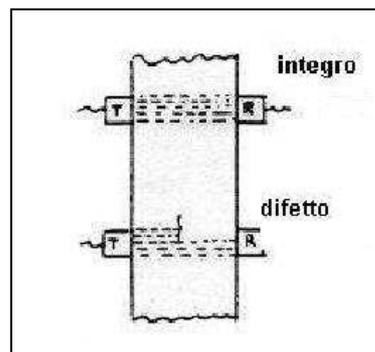


Figura 3.3 : Sopra: assenza di riflessione; Sotto: riflessione parziale.

3.5 Tecnica d'ispezione per trasmissione

Una singola misura eseguita con la tecnica per trasmissione consente di rilevare un'anomalia ma non di determinare la profondità o la forma della discontinuità presente sul percorso dell'onda ultrasonora; in teoria, queste informazioni possono essere ottenute disponendo di misure lungo percorsi diversi, che intersecano l'elemento di volume contenente la discontinuità. La misura eseguita per trasmissione dipende dall'inclinazione delle sonde rispetto alle superfici dell'oggetto, poiché l'onda ultrasonora viene rifratta quando incontra un'interfaccia aria-materiale, ed il massimo della trasmissione è ottenuto con incidenza normale.

Nel caso d'ispezione di oggetti con facce parallele, si possono eseguire misure lungo percorsi che s'intersecano ad angolo retto, mantenendo le sonde perpendicolari alle superfici e ottenendo quindi il massimo del segnale.

Nel caso d'ispezione di oggetti con sezione circolare, come una colonna di marmo, per ottenere il massimo del segnale il trasmettitore ed il ricevitore devono essere posti agli estremi di un diametro (vedi figura 3.4).

Per ottenere percorsi che s'intersecano coi diametri, si possono eseguire le misure ponendo il trasmettitore ed il ricevitore agli estremi di una corda (vedi figura 3.5).

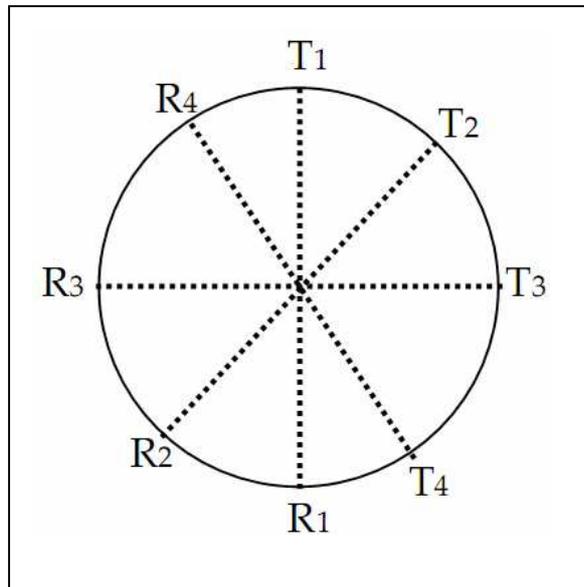


Figura 3.4. Misura in trasmissione: per ciascuna misura il trasmettitore (T) ed il ricevitore (R) sono posti agli estremi di un diametro.

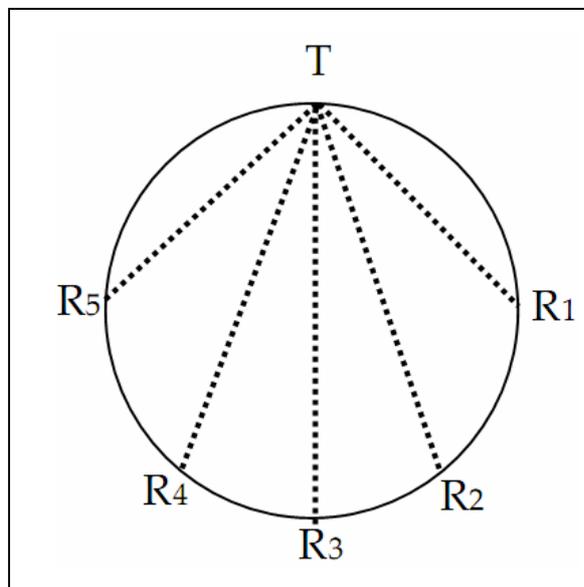


Figura 3.5. Misure in trasmissione: per ciascuna misura il trasmettitore (T) ed il ricevitore (R) posti agli estremi di una corda.

Le misure così eseguite sono condizionate dal lobo di emissione della sonda trasmittente e dalla dispersione dell'onda ultrasonora nel materiale; in condizioni favorevoli, l'esame complessivo dei dati di misura può consentire sia di rivelare la presenza di anomalie, sia di fornire una stima della loro posizione all'interno della sezione esaminata.[10]

3.6 Caratteristiche del segnale

Convenzionalmente, il segnale ottenuto con una misura in trasmissione viene esaminato per ricavare il valore di picco all'interno di una finestra temporale di durata e ritardo opportuno rispetto al tempo di emissione dell'impulso ultrasonoro. In certe applicazioni, può essere utile la determinazione di varie caratteristiche del segnale, come tempo d'inizio, durata, valore di picco, valore efficace o pendenza. Alcune di queste caratteristiche sono determinabili solo quando il rapporto segnale/rumore è sufficientemente elevato e dipendono comunque dalla scelta della finestra temporale in cui il segnale viene analizzato. La finestra può essere definita in base a informazioni ausiliare, oppure in base all'andamento stesso del segnale. In questo caso, gli standard d'ispezione

ultrasonora definiscono l'inizio e la fine del segnale, e conseguentemente la sua durata, in base ad una percentuale (20% o 1%) del segnale di picco, e si possono quindi avere finestre differenti in base al criterio adottato.

3.7 Rilevamento automatico

Per il rilevamento automatico delle caratteristiche del segnale ultrasonoro, è necessario campionare il segnale analogico all'uscita della sonda ricevente con una frequenza di almeno il doppio dell'estremo superiore della banda del segnale: il vettore di dati così ottenuto può essere quindi elaborato con algoritmi che estraggono dal segnale un opportuno insieme di parametri.

La presenza di un'anomalia sul percorso relativo ad una misura può essere rivelata mediante il confronto dei parametri attuali coi valori di riferimento ricavati in condizioni note. La posizione dell'anomalia nell'oggetto ispezionato è stimabile in base ai valori dei parametri ricavati da misure lungo percorsi che si intersecano: si assume che l'anomalia sia localizzata nella zona in cui si intersecano almeno due percorsi per i quali si ottengono parametri con valori differenti da quelli di riferimento [10].

4.0 METODI DI ISPEZIONE A MICROONDE

4.1 Caratterizzare materiali dielettrici mediante misure con antenne a Patch

Questo metodo di ispezione sfrutta la capacità delle microonde di penetrare all'interno di materiali dielettrici, con modalità dipendenti dalle caratteristiche dei materiali stessi, esprimibili come parametri di permittività elettrica e magnetica e profondità di penetrazione. Questi parametri influenzano sia la propagazione in campo lontano dell'onda elettromagnetica, sia la conformazione del campo vicino: quest'ultimo, a sua volta, influenza il comportamento risonante di un'antenna a banda stretta, la quale può essere utilizzata come sensore a contatto per studiare le caratteristiche di un materiale.

Infatti, il campo vicino è influenzato dalla costante dielettrica, ϵ_r , o permittività del materiale, a contatto con il sensore: la permittività varia al variare delle caratteristiche interne di un materiale, di conseguenza, confrontando il valore di permittività misurato su un campione con quello ottenuto con un materiale di riferimento noto, è possibile stabilire con una certa precisione l'eventuale tipo di difetto presente all'interno del campione (presenza di vuoti o di altri materiali).

In letteratura sono stati proposti molti metodi validi per il calcolo della costante dielettrica di vari tipi di materiali, sia liquidi sia solidi, che fanno uso di sensori di tipo coassiale o di tipo planare. In questo ambito sarà utilizzato un sensore planare, antenna a patch, avente una particolare struttura.

Le antenne a patch sono descritte in modo approfondito in [11], dove sono esposti i principi teorici di questo tipo d'antenne e le loro caratteristiche principali.

Il metodo d'ispezione proposto in [12] si è rivelato in grado di soddisfare gli obiettivi della ricerca, volta alla determinazione delle variazioni della permittività dielettrica in differenti regioni di uno stesso oggetto, ed al confronto tra campioni differenti.

4.2 Modello generale per la definizione di un'antenna a patch

La frequenza di risonanza f_r di un sensore costituito da un'antenna a patch dipende dalla geometria del patch (L,W,h), dalla permittività del substrato (ϵ_{sub}), dallo spessore delle metallizzazioni (t) e dalla permittività del semispazio a contatto con il patch (ϵ_{mat}).

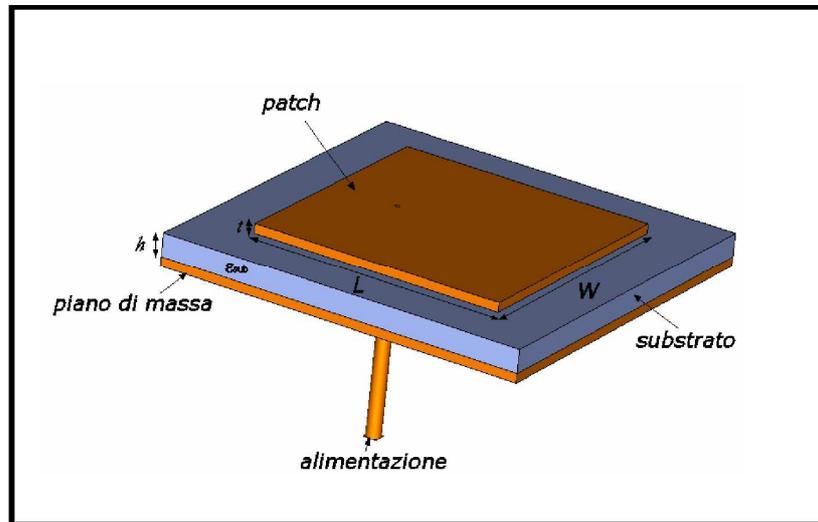


Figura 4.1. Geometria di un'antenna a patch alimentata mediante cavo coassiale.

Si ha dunque:

$$f_r = f(L, W, h, t, \epsilon_{sub}, \epsilon_{mat})$$

dove:

- L = lunghezza del patch
- W = larghezza del patch
- t = spessore delle metallizzazioni
- h = spessore del substrato
- ϵ_{sub} = permittività del substrato
- ϵ_{mat} = permittività del semispazio a contatto con il patch.

Per la presenza di un'interfaccia tra due diversi dielettrici, le linee in microstriscia non supportano modi trasversi, dunque sia il campo elettrico sia il campo magnetico avranno delle componenti non nulle in direzione longitudinale.

Si dimostra che in una linea di trasmissione in microstriscia non si possono propagare né modi di tipo TM né modi di tipo TE. Entro certe frequenze, tuttavia, le componenti longitudinali dei campi elettrico e magnetico sono di entità trascurabile rispetto alle componenti trasverse. Questo consente di considerare questa configurazione di campo come una perturbazione del modo fondamentale TEM, detta "quasi TEM".

Tuttavia, si è soliti condurre un'analisi ben approssimata assumendo che la propagazione in microstriscia sia quella in modo TEM puro, che si avrebbe in una linea di trasmissione in microstriscia immersa in dielettrico omogeneo di permittività ϵ_{eq} . Tale mezzo dielettrico viene caratterizzato da una permittività equivalente di valore intermedio tra la permittività del dielettrico reale (ϵ_{sub}) e quella dell'aria. Il calcolo approssimato di ϵ_{eq} si basa su un certo numero di assunzioni semplificative note in letteratura, che sono state prese in considerazione in fase di progettazione dell'antenna.

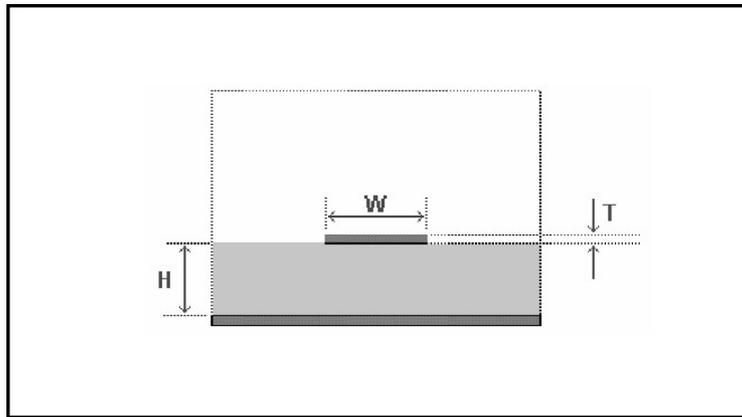


Figura 4.2. Linea equivalente alla microstriscia per un modo quasi_TEM.

Con questo modello è possibile definire la costante dielettrica equivalente per un'antenna a patch, usando l'espressione valida per le linee a microstriscia con $W > h$, dove W è la larghezza del patch (o della microstriscia) e h è lo spessore del substrato dielettrico;

Si ha:

$$\epsilon_{eq} = \frac{\epsilon_{sub} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{sub} - 1}{2} F(W/h) \quad (1)$$

Con

$$F(W/h) = (1 + 12h/W)^{-1/2} \quad (2)$$

La frequenza di risonanza dell'antenna a patch, f_r , è quindi determinata in base alla geometria ed alla costante dielettrica equivalente, secondo la relazione:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eq}}} - 2\Delta l \quad (3)$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto.

Risolvendo, si ottiene:

$$f_r = \frac{c}{2(L + 2\Delta l) \sqrt{\epsilon_{eq}}} \quad (4)$$

Questa espressione è ricavata dal metodo quasi statico [1], in cui si considera un modo di propagazione TEM puro e si suppone che le caratteristiche dell'antenna possano essere determinate in base alla capacità elettrostatica della struttura. Si deve intendere quindi che l'equazione (4) fornisca la dipendenza dalla frequenza di risonanza dell'antenna caricata con il dielettrico sotto misura solo in maniera approssimata e valida all'interno di un range di frequenze finito.

Dalla teoria delle microstrisce è possibile ottenere una relazione valida per il calcolo del *fattore di correzione* Δl presente nelle equazioni (3) e (4). Per le antenne a patch si assume $\Delta l \cong h$.

4.3 Modello impiegato per la definizione del sensore

Le caratteristiche della struttura di un'antenna a patch si differenziano da quelle tipiche di una linea in microstriscia. Infatti, mentre una linea è dimensionata in modo da ridurre al massimo l'irradiazione, lo scopo di un'antenna è quello di massimizzare l'irradiazione. Per questo motivo, lo spessore h del substrato dielettrico non è ridotto al minimo, ma è anzi massimizzato, compatibilmente con tutti gli altri parametri di progetto. Nel nostro caso poi, per esigenze di carattere meccanico, lo spessore t delle metallizzazioni non è trascurabile come normalmente si assume. Come già dimostrato in altri lavori [1], queste differenze vanno ad influire sul valore della costante dielettrica equivalente. Per spessori finiti delle metallizzazioni, la costante dielettrica equivalente del sensore, ϵ_{eq0} è data da:

$$\epsilon_{eq0} = \frac{\epsilon_{sub} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{sub} - 1}{2} F(W/h) - C \quad (5)$$

dove C è un coefficiente di correzione definito da:

$$C = \frac{\epsilon_{sub} - 1}{4.6} \cdot \frac{t/h}{\sqrt{W/h}} \quad (6)$$

Di conseguenza, la frequenza di risonanza a vuoto del sensore è data da:

$$f_{r0} = \frac{c}{2(L + 2\Delta l)\sqrt{\epsilon_{eq0}}} \quad (7)$$

Quando il sensore è posto a contatto con un materiale omogeneo e isotropo, di spessore infinito e permittività ϵ_{mat} , la costante dielettrica equivalente ϵ_{eq0} diventa:

$$\epsilon_{eqmat} = \frac{\epsilon_{sub} + \epsilon_{mat}}{2} + \frac{\epsilon_{sub} - \epsilon_{mat}}{2} F(W/h) - C' \quad (8)$$

con $F(W/h)$ dato ancora dalla (2) e

$$C' = \frac{\epsilon_{sub} - \epsilon_{mat}}{4.6} \cdot \frac{t/h}{\sqrt{W/h}} \quad (9)$$

La frequenza di risonanza del sensore in contatto con il materiale diventa quindi:

$$f_{rmat} = \frac{c}{2(L + 2\Delta l)\sqrt{\epsilon_{eqmat}}} \quad (10)$$

Di conseguenza, si ha:

$$\frac{f_{rmat}}{f_{r0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{eq0}}{\epsilon_{eqmat}}} \quad (11)$$

In conclusione, è possibile determinare il valore della costante dielettrica del materiale esaminato in base alle misure della frequenza di risonanza a vuoto e sotto carico [12].

4.4 Caratteristiche del sensore utilizzato

L'antenna a patch considerata ha una particolare struttura formata da due lamine di ottone parallele, di spessore $t = 2$ mm, che costituiscono rispettivamente il piano di massa e il patch. Le due lamine sono separate da un substrato di aria e da un supporto rigido di materiale dielettrico posto al centro della struttura per garantire che la loro distanza sia fissa. Tale supporto non influisce sul normale comportamento dell'antenna, in quanto è posizionato in un punto di minimo del campo elettrico tra le due lamine.

L'antenna utilizzata è progettata per avere una frequenza di risonanza a vuoto di circa 2.4 GHz, in modo da rimanere all'interno della banda denominata ISM [7].

Tale antenna è definita dai parametri riportati nella seguente tabella:

L	W	h	t	\mathcal{E}_{sub}
55 mm	55 mm	5 mm	2 mm	1.0048

Tabella 4.1. Parametri di progetto del sensore a patch.

Sostituendo i valori dei parametri di progetto nelle equazioni (5) e (6) si ottengono

i valori di ϵ_{eq0} e C; si ha:

$$\epsilon_{eq0} = 1.0039$$

$$C = 110.04 \cdot 10^{-6}$$

Misurando la frequenza di risonanza a vuoto, uguale a 2.315 GHz, si ottiene il valore:

$$\Delta l = 4.9mm$$

L'equazione (10) diventa quindi:

$$f_{mat} = \frac{2.998 \times 10^{11}}{2(55 + 2 \times 4.9) \sqrt{\frac{1.003 + \epsilon_{mat}}{2} + \frac{1.003 - \epsilon_{mat}}{2} (1 + 12 \times 5 / 55)^{-1/2} - \frac{1.003 - \epsilon_{mat}}{4.6} \cdot \frac{2/5}{\sqrt{55/5}}} \quad (12)$$

da cui si ottiene:

$$f_{mat} \cong \frac{f_{r0}}{\sqrt{0.822 + 0.178\epsilon_{mat}}} \text{GHz} \quad (13)$$

La frequenza di risonanza teorica a vuoto è 2.412 GHz e quella misurata è pari a 2.315 GHz [12].

La Figura 4.3 mostra il grafico ottenuto dall'equazione (13), che rappresenta la risposta del sensore, quando esso è posto a contatto con materiali omogenei di spessore infinito, con differenti valori di costante dielettrica ϵ_{mat} . La Figura 4.4 mostra il grafico in Figura 4.3 con la scala delle frequenze normalizzata al valore della frequenza di risonanza a vuoto (f_{r0}) dell'antenna a patch.

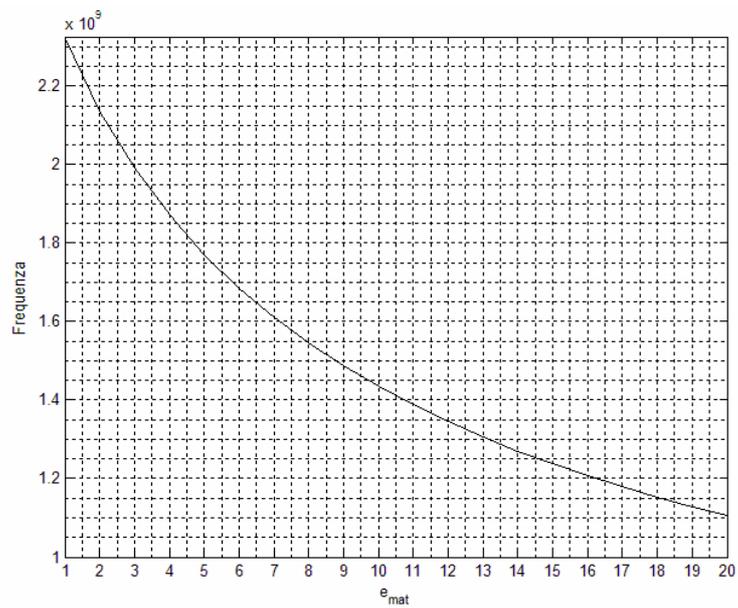


Figura 4.3. Dipendenza della frequenza di risonanza dell'antenna dalla costante dielettrica del materiale, posto a contatto col patch.

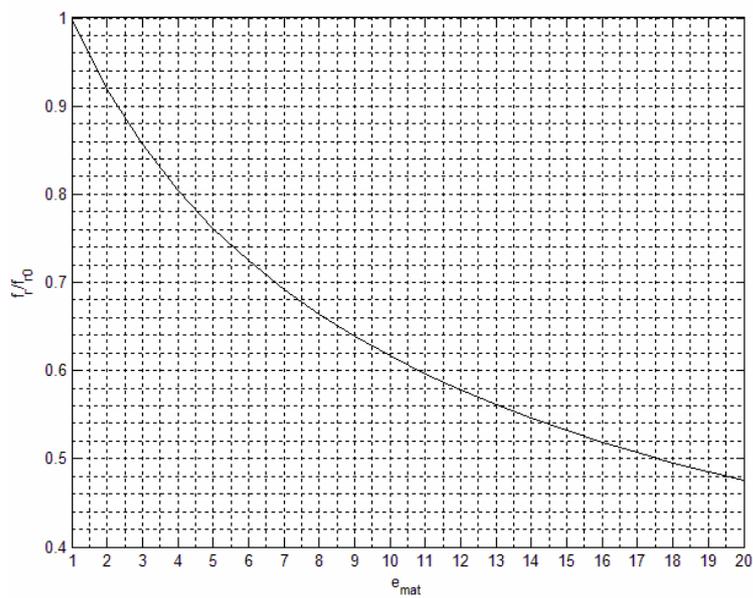


Figura 4.4. Grafico di figura 4.3 normalizzato rispetto alla frequenza di risonanza a vuoto.

4.5 Strumentazione per misure a microonde

L'ispezione dei materiali mediante microonde viene fatta impiegando la strumentazione da laboratorio disponibile presso l'Istituto, costituita da:

- 1) Analizzatore vettoriale di rete (VNA) HP 8753B.
- 2) Test set HP 85044A.

Per eseguire la misura con controllo remoto del parametro S in riflessione occorrono anche:

- 3) Calibration Kit 85032B.
- 4) Cavi di connessione HP-IB.
- 5) Sensore.

4.5.1 Calibrazione

La prima operazione, fondamentale, che precede tutte le misure è rappresentata dalla calibrazione dello strumento. Sono note, infatti, le problematiche, relative all'incertezza nelle misure ed alla possibilità di commettere errori di lettura, nelle quali ci si imbatte inevitabilmente quando ci si appresta a compiere dei rilievi, con ordini di precisione arbitrari.

Dopo la calibrazione, l'accuratezza dello strumento è limitata soltanto dal rumore del sistema, dalla stabilità e qualità dei connettori e dell'accuratezza con cui si conoscono le caratteristiche delle terminazioni standard utilizzate per la calibrazione. Brevemente, si riesce in questo modo ad eliminare tutti gli errori di tipo sistematico, come direttività, riflessioni spurie ecc.

4.6 Campioni utilizzati

I campioni di materiale lapideo utilizzati (Figura 4.5) sono i medesimi a cui fa riferimento il lavoro svolto in [2] nel quale le misure vennero fatte mediante l'impiego di sensori capacitivi.

Campione	Materiale	ϵ_{rif}
M1	Marmo Bianco statuario	7.1
M2	Marmo Rosa Portogallo	6.8
M3	Marmo Botticino Classico	6.6
M4	Marmo Pietra di Trani	13.8
M5	Marmo Verde Cipollino	8
M6	Pietra Serena	58.2
M7	Pietra di Cardoso	9.2
M8	Marmo Verde Aver	13.7
M9	Granito grigio Sardegna	29.9
M10	Marmo Nero Africa Zimbabwe	9.6

Tabella 4.2 : Campioni lapidei utilizzati per le misure.

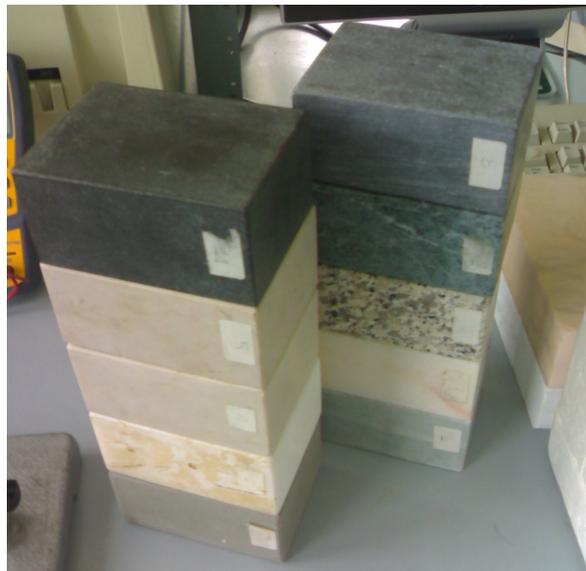


Figura 4.5. Foto dei materiali lapidei utilizzati.

5.0 MISURE

5.1 Misure con antenna a patch

Per stimare la costante dielettrica del materiale sotto esame posto a contatto dell'antenna, si pilota l'antenna con un segnale a microonde proveniente dal Network Analyzer.

L'analizzatore di rete vettoriale, per ciascuna lettura, è stato configurato in modo da rappresentare la media dei valori letti durante 16 *spazzolate* in frequenza.

Si può risalire alla costante dielettrica del materiale attraverso la frequenza di risonanza dell'antenna, che è data dal valore di frequenza che coincide con il minimo dell'ampiezza nello spettro del segnale di ritorno allo strumento.

In Figura 5.1 si può vedere il banco di lavoro in cui sono state effettuate le misure.



Figura 5.1. Banco di lavoro.

I vari componenti che formano il banco sono:

- Analizzatore vettoriale di rete HP 8753B;
- Blocco di test HP 85044A;
- Antenna a patch risonante in ottone.

Sono state effettuate delle misurazioni a vuoto per cercare di stabilire l'effettiva frequenza di risonanza, la corrispondente attenuazione, e la banda a -3dB del

sensores utilizzati; il valore nominale di ciascuno di essi è stato ottenuto svolgendo la media aritmetica dei risultati di 3 misurazioni indipendenti. In questa maniera si è tentato di compensare eventuali errori casuali che possono essere intervenuti durante le misurazioni.

I risultati sono i seguenti:

- Frequenza media di risonanza : 2.316 GHz
- Banda media a -3dB : 314 MHz



Figura 5.2. Analizzatore di rete durante un'operazione di lettura dei dati.

In seguito alle misure sono state calcolate le costanti dielettriche ϵ_{mis} corrispondenti a ciascun campione riferendosi ai valori medi (media calcolata tra il valore letto tra i lati A e B del campione) delle frequenze misurate.

I dati ottenuti dalle misure sono riassunti nella seguente tabella:

MUT	F_{min} media (GHz)	ϵ_{mis}
M1	1,836	4,32
M2	1,838	4,33
M3	1,841	4,26
M4	1,838	4,30
M5	1,858	4,10
M6	1,718	5,59
M7	1,697	5,84
M8	1,885	3,86
M9	1,744	5,28
M10	1,853	4,15

Tabella 4.3. Corrispondenza tra la frequenza di risonanza media e la costante dielettrica calcolata.

5.2 Discussione e Conclusioni

Nelle prove sperimentali la permittività del materiale in esame è stata determinata individuando la frequenza del picco di risonanza, f_{mat} , per mezzo dell'analizzatore vettoriale, e calcolando successivamente tale valore mediante l'equazione 13; in tabella 4.3 sono riportati i valori per ciascun campione esaminato.

Durante le suddette letture, come peraltro già evidenziato in lavori precedenti [7], sono state riscontrate alcune difficoltà nell'individuare i parametri di interesse, in modo particolare per il picco di risonanza; tali difficoltà caratterizzano soprattutto le letture su materiali ceramici e lapidei perché tipicamente hanno una struttura non omogenea. È stato riscontrato che tali materiali presentano in genere vari picchi di risonanza, talvolta affiancati, per cui è stato necessario stabilire un criterio per l'individuazione della frequenza di risonanza: si è scelto di assumere come valore di risonanza quello individuato dal picco di frequenza con valore minimo sulla scala in dB.

Un altro genere di difficoltà riscontrate sono legate alla natura del sensore ed alle dimensioni dei marmi utilizzati; la risposta dell'antenna a patch, infatti, è decisamente sensibile ad eventuali, seppur piccoli, spostamenti lungo la superficie

del materiale lapideo, imponendo agli operatori tecnici la massima accuratezza durante le fasi di preparazione alla lettura.

La necessità di ottenere letture per quanto possibile precise ci ha condotti ad impostare l'analizzatore vettoriale di reti in modo da restituire la media dei valori letti su più scansioni, come descritto al paragrafo sulle misure. Ci sono state imposte, dunque, attese di alcuni secondi tra il posizionamento del sensore e la lettura dei parametri di interesse dall'analizzatore di rete vettoriale, al fine di ottenere valori più stabili dei parametri.

Tali premesse sono volte a dare un contributo circa le caratteristiche dell'apparecchiatura utilizzata, dal punto di vista prettamente tecnico.

Per quanto riguarda le misure di permittività dei materiali esaminati (Tabella 4.3) va tenuto da conto che i valori presi come riferimento sono tratti da lavori precedentemente svolti presso il C.N.R. [7] e si riferiscono a valori tipici delle costanti dielettriche. La natura decisamente non omogenea dei marmi utilizzati nelle nostre misure ci permette dunque di concludere che per valori di permittività inferiori a 6 abbiamo ottenuto risultati decisamente in accordo con quelli tipici di questi materiali.

I risultati non hanno avuto, invece, lo stesso esito per le letture sui mezzi lapidei con caratteristiche di permittività superiori alla summenzionata soglia. I risultati sperimentali lasciano quindi supporre che il comportamento del sensore sia approssimabile mediante l'equazione 12 per un intervallo di permittività da 1 a 6. per valori di permittività superiori a 6 i valori ottenuti con la suddetta equazione sono sottostimati.

Come già verificato [7], c'è comunque da tenere presente che l'equazione 12 è valida per spessori infiniti, mentre nel caso pratico si hanno sempre spessori finiti e quindi il comportamento reale del sensore dipende sia dallo spessore reale del materiale, sia dalla profondità di penetrazione e dall'attenuazione nel materiale.

Per quanto concerne i mezzi con coefficiente dielettrico superiore alla soglia stabilita, è plausibile che, in futuro, si possano ottenere risultati migliori tramite l'utilizzo di un altro sensore a microonde, con caratteristiche differenti.

In conclusione, salvo ulteriori prove sperimentali volte a determinare l'incidenza del rumore sui dati di misura, in accordo con gli esperimenti precedentemente svolti [7], si può asserire che il sensore utilizzato è in grado di fornire una buona stima dei valori assoluti di permittività all'interno del range : $1 \leq \epsilon \leq 6$.

L'approccio seguito permette di caratterizzare materiali lapidei mediante prove non distruttive. Infittendo i punti su cui effettuare misure locali, è possibile creare mappature precise della permittività dei campioni. Attraverso uno scanner elettromeccanico si potrebbe effettuare addirittura una scansione su un piano X-Y con passi grandi a piacere (da pochi millimetri a qualche centimetro) e ottenere una mappa completa delle caratteristiche dielettriche, rappresentabile attraverso colori e profili caratterizzando così in maniera completa ciascuna struttura di interesse.

Viste le premesse, ed analizzati di dati ottenuti, dopo lo studio effettuato in questa sede siamo del parere che nel futuro prossimo apparecchiature capaci di effettuare test non distruttivi su materiali lapidei troveranno sempre più largo uso nei contesti professionali che gravitano attorno alla caratterizzazione, catalogazione, studio e conservazione di beni culturali di natura dielettrica.

Appendice A – Onda Sonora

Per la fisica, il suono è un'oscillazione (un movimento nello spazio) compiuta dalle particelle (atomi e molecole) in un mezzo. Le oscillazioni sono spostamenti delle particelle, intorno alla posizione di riposo e lungo la direzione di propagazione dell'onda, provocati da movimenti vibratori, provenienti

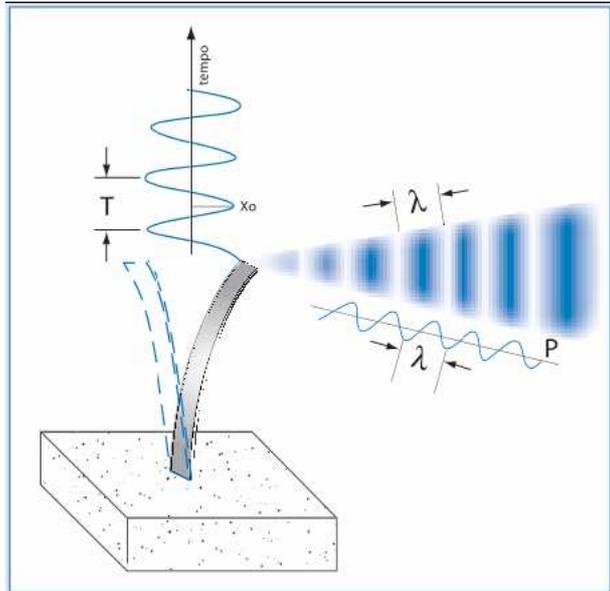


Figura A.1 : Generazione di un'onda di pressione da movimenti vibratori, provenienti

da un determinato oggetto, chiamato sorgente del suono, il quale trasmette il proprio movimento alle particelle adiacenti, grazie alle proprietà meccaniche del mezzo (vedi Figura A.1); le particelle a loro volta, iniziando ad oscillare, trasmettono il movimento alle altre particelle vicine e queste a loro volta ad altre ancora; in questo modo, un semplice movimento vibratorio si propaga meccanicamente dando vita all'onda sonora (o onda acustica), che si definisce pertanto onda longitudinale.

Per studiare le onde sonore è possibile avvalersi un supporto visivo, utilizzando un grafico cartesiano, riportante il tempo sull'asse delle ascisse, e gli spostamenti delle particelle su quello delle ordinate. Il tracciato esemplifica gli spostamenti delle particelle: all'inizio, la particella si sposta dal suo punto di riposo (asse delle ascisse) fino al culmine del movimento oscillatorio, rappresentato dal ramo crescente di parabola che giunge al punto di massimo parabolico. Poi la particella inizia un nuovo spostamento in direzione opposta, passando per il punto di riposo e continuando per inerzia fino ad un nuovo culmine simmetrico al precedente, questo movimento è rappresentato dal ramo decrescente che, intersecando l'asse delle ascisse, prosegue in fase negativa fino al minimo parabolico. In fine, la particella ritorna in dietro e ripete nuovamente la sequenza di spostamenti, così come fa il tracciato del grafico.

Il periodo T (fissato un punto nello spazio) è l'intervallo di tempo che intercorre tra due massimi successivi della funzione pressione, quindi lo spazio interposto tra due creste successive fornisce la lunghezza d'onda. La distanza dalla cresta all'asse delle ascisse indica, invece, l'ampiezza del movimento, in altre parole la distanza massima percorsa dalla particella dalla sua posizione di riposo durante l'oscillazione. Tuttavia, il periodo e l'ampiezza, nonostante siano due grandezze da

sole sufficienti per descrivere le caratteristiche di un'onda, non sono frequentemente utilizzate, perlomeno non in forma pura. Quando si sta trattando di un'onda sonora, si preferisce infatti usare altre grandezze da queste derivate. Dal numero di periodi fatti in un secondo si ottiene la frequenza, misurata in hertz, che indica il numero d'oscillazioni compiute dalla particella in un secondo. Dall'ampiezza dell'onda, invece, otteniamo l'intensità, che nel caso dell'onda sonora è intesa come pressione esercitata dalla stessa su una superficie: un aumento dell'ampiezza corrisponde ad un aumento della pressione esercitata sulle particelle vicine e dunque pure della forza esercitata contro un ostacolo. L'unità di misura usata per l'intensità della pressione sonora è il Pascal (simbolo P).

Il livello di pressione sonora (SPL) o *livello sonoro* L_p è, invece, una misura logaritmica della pressione sonora efficace di un'onda meccanica (sonora) rispetto ad una sorgente sonora di riferimento. Viene misurata in decibel sonori (simbolo db_{SPL}):

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0} \right) = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) dB$$

dove p_0 è la pressione sonora di riferimento (è circa la soglia uditiva a 1000 Hz) e p è il valore efficace della pressione sonora che si vuole misurare.

Esistono tre diverse tipologie di onde sonore e ognuna è identificabile da un particolare andamento grafico:

- Le onde semplici: onde dal tracciato regolare con picchi speculari alle valli e che assume la caratteristica forma di seno. Le principali caratteristiche sono appunto il grafico sinusoidale e la periodicità.
- Le onde complesse: sono sempre onde dal tracciato regolare, in quanto i picchi sono speculari alle valli, ma la loro forma risulta più complessa della precedente, perché presenta diverse anomalie nelle curve. Le caratteristiche sono: la periodicità e il grafico non sinusoidale.
- Le onde aperiodiche: sono onde non regolari, il loro tracciato ha forma caotica e zigzagante. Sono caratterizzate dall'assoluta irregolarità del grafico e dall'aperiodicità; sono tracciati caratteristici dei rumori.

A differenza delle onde aperiodiche, per la descrizione delle onde semplici, i parametri di frequenza e d'ampiezza sono sufficienti. Nella descrizione delle onde complesse sono utili sia la frequenza che l'ampiezza ma, date le anomalie del tracciato, questi semplici parametri da soli non sono sufficientemente esaurienti: si

ricorre alla scomposizione dell'onda fondamentale in una serie d'onde semplici, che sono invece analizzabili con le normali grandezze. Le onde semplici o formanti, ottenute dalla scomposizione di un'onda complessa, sono dette armoniche, e nel loro insieme costituiscono quello che è chiamato spettro dell'onda sonora. Una caratteristica molto importante delle armoniche è che le loro frequenze corrispondono sempre a multipli interi della frequenza dell'onda complessa, e sono indicate con F_0 , F_1 , F_2 , ecc. con il pedice che corrisponde al rapporto tra la frequenza dell'onda fondamentale e quella dell'armonica.

Appendice B - Propagazione delle onde elettromagnetiche

La propagazione delle onde elettromagnetiche è descritta dalle Equazioni di Maxwell che possono essere espresse, per un regime sinusoidale, nella seguente forma:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} &= \gamma^2 \vec{E} \\ \nabla^2 \vec{H} &= \gamma^2 \vec{H}\end{aligned}\tag{1.1}$$

dove \vec{E} ed \vec{H} sono i fasori (numeri complessi) vettoriali del campo elettrico e magnetico esprimibili nel seguente modo:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= E_0 e^{j\omega t} \\ \vec{H} &= H_0 e^{j\omega t}\end{aligned}\tag{1.2}$$

E_0 ed H_0 sono le ampiezze dei campi, $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione (misurata in rad/sec) mentre f è la frequenza dell'onda elettromagnetica (misurata in Hz).

Nelle (1.1) la quantità complessa γ è detta *numero d'onda* ed è esprimibile come:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}\tag{1.3}$$

dove $\mu = \mu_0\mu_r$ è la permeabilità magnetica misurata in [H/m] del mezzo in cui l'onda si propaga; μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto pari a circa 1.257×10^{-7} H/m; μ_r è la permeabilità magnetica relativa, generalmente pari ad 1 nei mezzi di nostro interesse.

La permittività dielettrica è definita dalla seguente relazione $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ed è misurata in [F/m]; ϵ_0 è la permeabilità dielettrica del vuoto, pari a circa 8.5×10^{-12} F/m e ϵ_r è la permeabilità dielettrica relativa.

La conducibilità del materiale, σ , è espressa in [S/m].

I due principali fenomeni che mettono in relazione la propagazione delle onde elettromagnetiche ed il moto delle cariche elettriche nei mezzi sono la *conduzione* e la *polarizzazione*.

Applicando dall'esterno un campo elettrico ad un materiale conduttore si ha conduzione, in altre parole gli elettroni di conduzione cominciano a migrare nel verso opposto alla direzione del campo elettrico.

Applicando invece un campo elettrico ad un materiale dielettrico si ha polarizzazione, cioè si ha un orientamento delle molecole dipolari del materiale sotto l'azione del campo applicato dall'esterno in modo da generare un campo che si opponga ad esso. Qualora il materiale non sia costituito da molecole dipolari si ha una deformazione delle molecole causata dalla separazione delle cariche positive e negative sotto l'effetto del campo elettrico.

Esplicitando la prima equazione delle (1.1) si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{E} = j\omega\mu\sigma\vec{E} - \omega^2\mu\epsilon\vec{E} \quad (1.4)$$

dove il primo termine al secondo membro tiene conto dei fenomeni di conduzione, mentre il secondo termine tiene conto dei fenomeni di polarizzazione.

Introduciamo ora un parametro che quantifica le perdite conduttive dei mezzi, detto *tangente dell'angolo di perdita*, definito come:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad (1.5)$$

Nel caso di un buon conduttore essa è molto maggiore di 1, mentre per un buon isolante essa è molto minore di 1.

Analizzando la diffusione dell'onda elettromagnetica e considerando la sua parte progressiva che può essere scritta nella forma:

$$\vec{E}(z,t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1.6)$$

Essa indica che l'onda si propaga lungo l'asse z in un sistema di assi cartesiani. α è il *coefficiente di attenuazione* e β è il *coefficiente di fase* rispettivamente pari a:

$$\alpha = \omega \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} - 1 \right]^{1/2} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (1.7)$$

$$\beta = \omega \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} + 1 \right]^{1/2} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (1.8)$$

A questo punto possiamo dire che il numero d'onda indicato nella (1.3) può essere espresso, in funzione dei due coefficienti appena indicati, nella forma:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.9)$$

Sempre in funzione dei coefficienti di attenuazione e di fase possiamo indicare due quantità fondamentali per la valutazione delle prestazioni del sistema utilizzato, cioè la *lunghezza d'onda* e la *velocità di propagazione dell'onda nel mezzo*, pari, rispettivamente, a:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad [\text{m}] \quad (1.10)$$

$$v_m = \lambda f = \frac{\omega}{\beta} \quad [\text{m/sec}] \quad (1.11)$$

Appendice C - Influenza della permittività dielettrica e della conducibilità dei materiali sulla propagazione delle onde elettromagnetiche

E' opportuno esprimere la costante dielettrica del mezzo come un numero complesso:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (2.1)$$

Di conseguenza la costante dielettrica relativa è esprimibile come:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_r - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

Nella (2.1) il termine ε' tiene conto degli effetti di polarizzazione e decresce al crescere della frequenza a causa dell'inerzia delle particelle cariche che si orientano: il suo andamento in funzione della frequenza è costante a tratti e decresce velocemente in corrispondenza delle frequenze alle quali avviene, in natura, l'orientamento dei dipoli.

Il termine ε'' , invece, tiene conto delle perdite dovute al processo di conduzione ed ha un andamento in funzione della frequenza caratterizzato da dei picchi in corrispondenza delle variazioni di ε' . Una volta definite le (2.1) e (2.2) possiamo combinarle con le espressioni precedentemente scritte per ottenere le seguenti

espressioni per la tangente dell'angolo di perdita (2.3) e per il coefficiente di attenuazione (2.4):

$$tg \delta_p = \frac{\varepsilon_r'' + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}{\varepsilon_r'} \quad (2.3)$$

$$\alpha = \omega \frac{\mu \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{(\varepsilon_0 \varepsilon_r')^2}} - 1 \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

C'è da dire che la maggior parte dei materiali di interesse nelle indagini non distruttive a microonde sono buoni isolanti ed inoltre per l'intervallo di frequenze di indagine nella banda ISM il termine ε_r' si può assumere costante.

Nei materiali isolanti ($tg \delta \ll 1$) si hanno le seguenti espressioni semplificate per il coefficiente di attenuazione in un mezzo omogeneo e per il coefficiente di riflessione sulla superficie di separazione tra due mezzi:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r'}} \quad (2.5)$$

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_1'} - \sqrt{\varepsilon_2'}}{\sqrt{\varepsilon_1'} + \sqrt{\varepsilon_2'}} \quad (2.6)$$

Analizzando la (2.6) si nota che l'intensità della riflessione dipende dalla differenza tra le costanti dielettriche relative dei due mezzi, tanto maggiore sarà la differenza tra le due tanto maggiore sarà l'intensità del campo riflesso.

Da essa si nota inoltre che se $\epsilon'_1 < \epsilon'_2$ si ha un'inversione di fase dell'onda riflessa (perché $\Gamma < 0$), mentre se $\epsilon'_1 > \epsilon'_2$ non si ha inversione di fase del segnale riflesso (perché $\Gamma > 0$).

Sempre per materiali isolanti, l'espressione della velocità di propagazione può essere semplificata per ottenere la seguente forma:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.7)$$

Nelle indagini non distruttive, la possibilità di individuare difetti dipende dal tipo di materiale ispezionato, in particolare dalla profondità di penetrazione, d_p , della radiazione elettromagnetica all'interno del materiale.

La d_p è definita come la distanza dalla superficie alla quale l'intensità della radiazione elettromagnetica è ridotta del fattore $1/e$; infatti, l'onda si attenua gradualmente penetrando nel materiale senza mai scomparire del tutto.

La profondità di penetrazione nei materiali dielettrici dipende sia dal segnale, ed in particolare dalla sua lunghezza d'onda, sia dalle caratteristiche del mezzo in cui si propaga, come la permittività dielettrica e le perdite. In genere d_p aumenta con

l'aumentare della lunghezza d'onda, mentre diminuisce con l'aumentare delle perdite nel materiale. La relazione valida per i materiali dielettrici può essere approssimata nel modo seguente :

$$d_p \approx \frac{\lambda_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{\epsilon_r'}}{\epsilon_r''} \quad (2.8)$$

dove $\lambda_0=c/f$ è la lunghezza d'onda nello spazio libero; ϵ' ed ϵ'' sono rispettivamente la parte reale e immaginaria della permittività.

In letteratura, la profondità di penetrazione (indicata con δ) è generalmente legata alla efficacia di schermatura di un materiale conduttore: la bontà del conduttore è legata ad un piccolo valore del parametro δ .

Bibliografia

[1] Cosentino P. L., "Geophysical Solutions for Environment and Engineering" Volume 2, pag 650-657., 2006.

[2] E. Bozzi, M. Chimenti , "Ingegnerizzazione di prototipi e strumentazione per la diagnostica su manufatti monumentali in materiale lapideo", Rapporto tecnico ISTI, 2005-B4-02, febbraio 2005.

[3] Peter J. Shull, Nondestructive evaluation theory techniques and applications; Marcel Dekker, inc 2002, Chapter 2: Liquid penetrant.

[4] Peter J. Shull, Nondestructive evaluation theory techniques and applications; Marcel Dekker, inc 2002, Chapter 4: Magnetic particle.

[5] Peter J. Shull, Nondestructive evaluation theory techniques and applications; Marcel Dekker, inc 2002, Chapter 6: Acoustic emission.

[6] Peter J. Shull, Nondestructive evaluation theory techniques and applications; Marcel Dekker, inc 2002, Chapter 7: Radiology.

[7] E. Bozzi, M. Chimenti, O. Salvetti, A. Zucchelli "Rassegna sulle tecniche non distruttive per la caratterizzazione dei difetti all'interno di materiali lapidei" Rapporto tecnico ISTI, 2003-B4-24, aprile 2003.

[8] E. Bozzi, M. Chimenti, O. Salvetti, A. Zucchelli "Ispezione mediante ultrasuoni di materiali lapidei; risultati preliminari su campioni di marmo" Rapporto tecnico ISTI, 2003-B4-27-, ottobre 2003.

[9] E. Bozzi, M. Chimenti "Valutazione delle prestazioni di differenti sonde per l'ispezione a ultrasuoni" Rapporto tecnico ISTI, 2007-B4-001, gennaio 2007.

[10] E. Bozzi, M. Chimenti , "Analisi automatica di misure ad ultrasuoni su percorsi a simmetria radiale" Rapporto tecnico ISTI, 2007-B4-007, marzo 2007.

[11] E. Bozzi, M. Chimenti, O. Salvetti, A. Zucchelli, "Le antenne a patch come sensori per indagini non distruttive a microonde su campioni di marmo" Rapporto tecnico ISTI, 2003-B4-25, settembre 2003.

[12] E. Bozzi, M. Chimenti, A. Zucchelli, "Un metodo per la caratterizzazione di materiali dielettrici, mediante misure in campo vicino con antenne a patch" Rapporto tecnico ISTI, 2005-B4-10, ottobre 2005.