

# Relazione di fine Tirocinio

Oggetto : Misure non invasive a microonde ed ultrasuoni  
su materiali lapidei.

Tirocinante: Luca Algozino

Personale di riferimento: Ing. Salerno Emanuele

Tirocinio svolto presso: I.S.T.I., C.N.R. di Pisa

## INDICE

Sommario .....	3
Principi di funzionamento .....	4
Tecnica ultrasonora .....	4
Tecnica a microonde .....	5
Introduzione alle tecniche NDT a microonde .....	6
Modello generale per la definizione di un'antenna a patch.....	6
Modello impiegato per la definizione del sensore .....	9
Caratteristiche del sensore utilizzato .....	10
Introduzione alle tecniche NDT ad ultrasuoni.....	13
Tecnica d'ispezione per trasmissione .....	14
Procedura per l'ispezione di oggetti con sezione circolare .....	15
Caratteristiche del segnale .....	17
Rilevamento automatico.....	17
Strumentazione per misure a Microonde.....	18
Calibrazione .....	18
Campioni utilizzati.....	18
Protocollo di misura.....	19
Misure .....	20
Misure con antenna a patch .....	20
Discussione e Conclusioni.....	23
Bibliografia .....	25

## Sommario

Il tirocinio svolto presso l'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo" di Pisa è consistito nello svolgimento di test non distruttivi (NDT) su materiali lapidei, con l'obiettivo di riuscire ad identificare eventuali anomalie all'interno dei campioni sotto esame, senza dover danneggiare o intaccare i campioni stessi.

Il lavoro descrive, dunque, il proseguimento della sperimentazione di sensori a microonde, per l'individuazione, sul campo, di difetti, cavità o porosità, ed altre variazioni strutturali di beni appartenenti al patrimonio culturale, realizzati con materiali lapidei.

Saranno forniti dettagli tecnici e delucidazioni a riguardo delle due più promettenti tecniche di testing non distruttive (e dei sensori a loro associati), quali:

- *Tecnica a microonde:*
  - o Misura di campo elettrico "in campo vicino" :  
Per questo tipo d'ispezione si fa uso di un'antenna planare a banda stretta (antenna a patch), che risuona ad una frequenza il cui valore dipende dalla permittività dielettrica del materiale circostante l'antenna;
- *Tecnica ad ultrasuoni:*
  - o Metodo a trasmissione d'onda di pressione (sensori ad ultrasuoni).

Sarà fornita anche una descrizione della strumentazione impiegata, dei materiali esaminati e dei metodi di effettuazione della misura. Infine saranno presentati e commentati i dati e i risultati ottenuti.

Sebbene il progetto del tirocinio prevedesse l'approccio alle misure anche tramite la tecnica ad ultrasuoni, presso i laboratori del CNR, non è stato possibile realizzarle.

# Principi di funzionamento

## Tecnica ultrasonora

In generale, le tecniche ultrasonore sfruttano i fenomeni della propagazione nei solidi, liquidi o gas, di fasci d'onde elastiche, vale a dire onde di compressione e decompressione della materia, con frequenza superiore a quella dei suoni udibili dall'orecchio umano. Le onde ultrasonore, che sono inviate nel sistema spaziale da esaminare, sono attenuate dalla materia che incontrano e da essa riflesse, deviate o assorbite per causa dalle discontinuità presenti nella stessa.

Generando un segnale (ovvero un fascio d'onde ultrasonore) 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) si ottengono delle vibrazioni del cristallo che 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.

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 tale fascio incontra un ostacolo allora esso verrà riflesso, assorbito, deviato o diffratto, secondo le leggi comuni a tutti i fenomeni di propagazione delle onde.

Infine, attraverso l'uso di sensori o di sonde (adoperate in modo complementare a quelle generatrici del fascio di onde "ispezionanti") sfruttando la reversibilità degli effetti piezoelettrici, si procede alla raccolta di informazioni, tra le quali i tempi di ritardo delle onde e intensità delle stesse, per avviare l'analisi dei dati raccolti.

## Tecnica a microonde

La caratterizzazione di materiali dielettrici mediante misure a microonde attraverso l'utilizzo di antenne a patch 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, 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 dielettriche di un materiale. La frequenza di risonanza del sensore rappresenta il parametro che useremo per legare le osservazioni sperimentali alle caratteristiche dielettriche dei campioni testati.

La permittività dielettrica dei materiali varia al variare delle loro caratteristiche interne; di conseguenza, operando un confronto tra il valore di permittività misurato su un campione, ed il valore di un materiale di riferimento con caratteristiche perfettamente note, è possibile stabilire con una certa precisione l'eventuale tipo di difetto presente all'interno del campione (presenza di vuoti, altri materiali, disomogeneità).

Attualmente sono conosciuti diversi 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 che verrà descritta in seguito. Tale antenna, ha una doppia valenza: essa costituisce sia l'elemento che irradia le onde elettromagnetiche ispezionanti, sia il sensore che rileva le caratteristiche del campione da studiare.

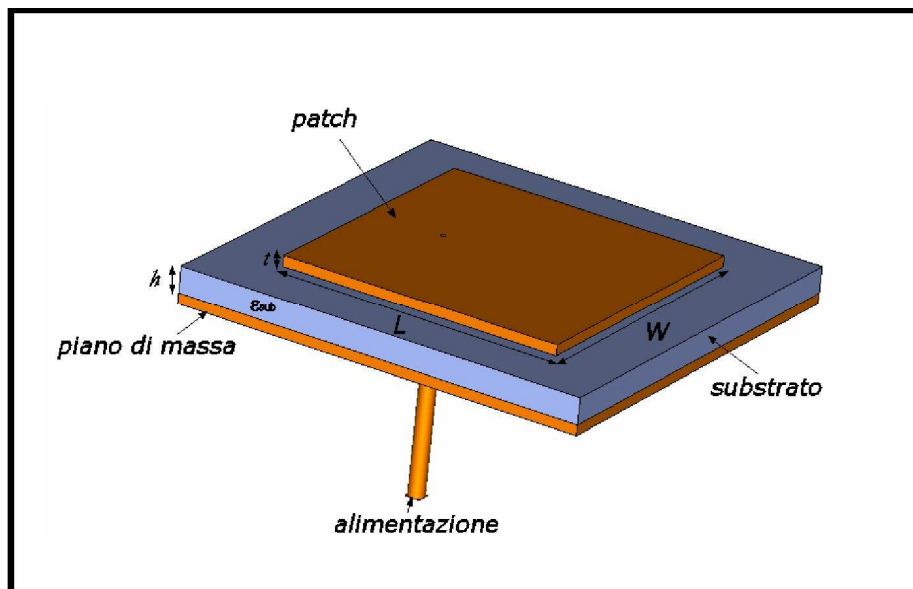
# Introduzione alle tecniche NDT a microonde

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

Un'antenna a patch è un tipo di antenna piuttosto semplice da realizzare. Il singolo elemento radiante di un tale tipo di antenna è costituito da un'area metallizzata di forma variabile (*patch*) ricavata su una faccia di un substrato di microstriscia, lasciando intatto il piano di massa sulla faccia opposta.

A differenza di quanto si fa con le microstrisce, nel progetto di antenne a patch (Figura 1) si fa in modo da avere spessori piuttosto alti ( $h$ ) e costanti dielettriche basse ( $\epsilon_{sub}$ ); in questo modo l'irradiazione globale sarà massimizzata. Il patch e il piano di massa formano una struttura risonante che riceve energia a radiofrequenza da un opportuno sistema di alimentazione.

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 ( $\epsilon_{sub}$ ), dallo spessore delle metallizzazioni ( $t$ ) e dalla permittività del semispazio a contatto con il patch ( $\epsilon_{mat}$ ).



**Figura 1.** Geometria di un'antenna a patch alimentata mediante cavo coassiale.

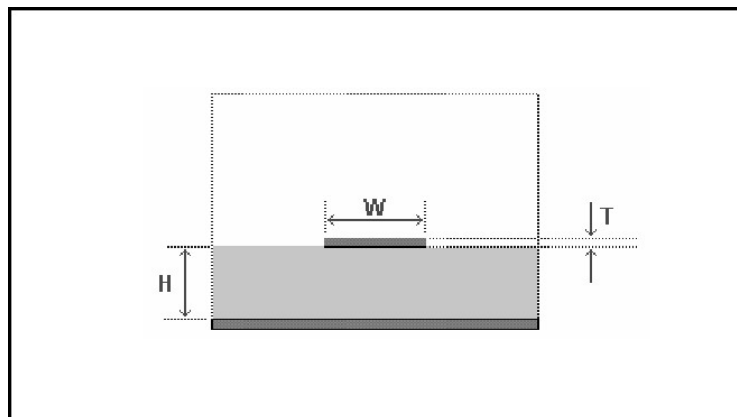
Si ha dunque:

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

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  $\epsilon_{eq}$ . Tale mezzo dielettrico viene caratterizzato da una permittività equivalente di valore intermedio tra la permittività del dielettrico reale ( $\epsilon_{sub}$ ) e quella dell'aria. Il calcolo approssimato di  $\epsilon_{eq}$  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 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*  $\Delta l$  presente nell'equazioni (3) e (4); per le antenne a patch si assume la seguente approssimazione:

$$\Delta l \cong h.$$



## Modello impiegato per la definizione del sensore

La struttura dell'antenna a patch utilizzata come sensore differisce lievemente dalla definizione classica di una linea in microstriscia. Infatti, nel nostro caso, lo spessore del substrato dielettrico,  $h$ , non è di dimensioni trascurabili (ma se si vuole che irradi deve essere così). Non è trascurabile nemmeno lo spessore ( $t$ ) delle due metallizzazioni (patch e piano di massa): queste approssimazioni vanno ad influire sul valore della costante dielettrica equivalente, come già dimostrato in altri lavori [1]. Per spessori finiti delle metallizzazioni, la costante dielettrica equivalente del sensore,  $\epsilon_{eq0}$  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  $\epsilon_{mat}$ , la costante dielettrica equivalente  $\epsilon_{eq0}$  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:

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

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.

### 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.

In [2], si è progettata un'antenna con frequenza di risonanza a vuoto di circa 2.4 GHz, in modo da rimanere all'interno della banda denominata ISM.

Tale antenna è definita dai parametri riportati nella seguente tabella:

$L$	$W$	$h$	$t$	$\epsilon_{sub}$
55 mm	55 mm	5 mm	2 mm	1.0048

**Tabella 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  $\epsilon_{eq0}$  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:

$$\Delta l = 4.9 \text{ mm}$$

L'equazione (10) diventa quindi:

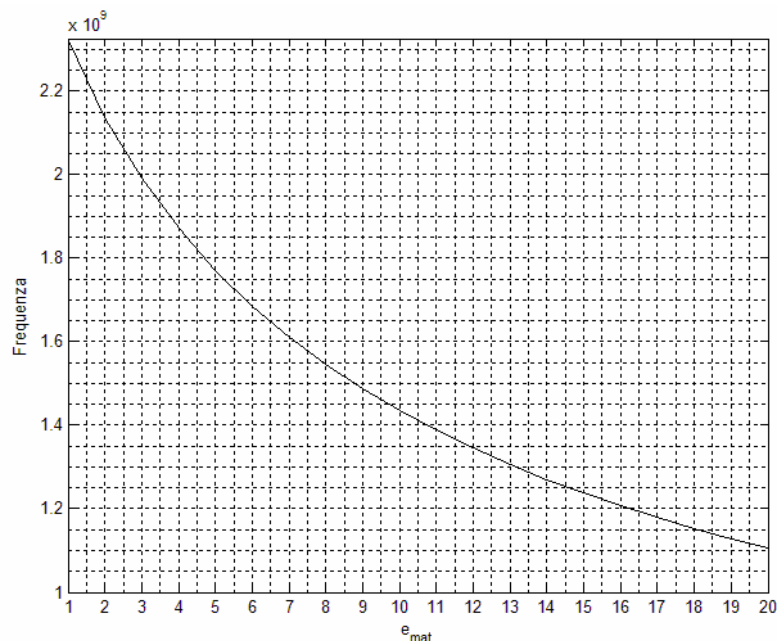
$$f_{mat} = \frac{2.998 \times 10^{11}}{2(55 + 2 \times 4.9) \sqrt{\frac{1.003 + \epsilon_{mat}}{2} + \frac{1.003 - \epsilon_{mat}}{2} (1 + 12 \times 5 / 55)^{-1/2} - \frac{1.003 - \epsilon_{mat}}{4.6} \cdot \frac{2 / 5}{\sqrt{55 / 5}}} \quad (12)$$

da cui si ottiene:

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

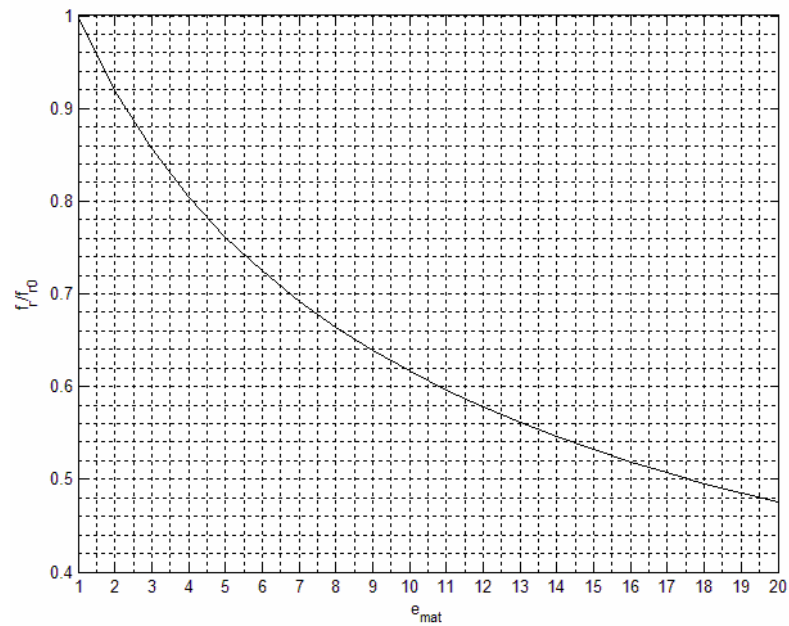
La frequenza di risonanza teorica a vuoto è 2.412 GHz e quella misurata, sempre in [6], è pari a 2.315 GHz.

La Figura 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  $\epsilon_{mat}$ .



**Figura 3.** Dipendenza della frequenza di risonanza dell'antenna dalla costante dielettrica del materiale, posto a contatto col patch.

La Figura 4 mostra il grafico in Figura 3 con scala delle frequenze normalizzata al valore della frequenza di risonanza a vuoto ( $f_{r,0}$ ) dell'antenna a patch.



**Figura 4.** Grafico di Figura 3 normalizzato rispetto alla frequenza di risonanza a vuoto.

## 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 [1],[3]. 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 [4].

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.

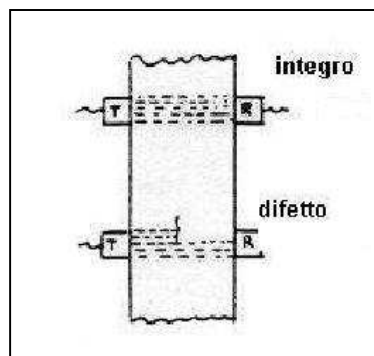
Nelle misure in trasmissione è essenziale la definizione della finestra temporale entro la quale si determina l'ampiezza del segnale. Poiché la sonda ricevente è raggiunta in tempi diversi da onde ultrasonore che hanno subito riflessioni sulle varie interfacce presenti nell'oggetto in esame, è opportuno 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).

## Tecnica d'ispezione per trasmissione

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 5).



**Figura 5** : Sopra: assenza di riflessione; Sotto: riflessione parziale.

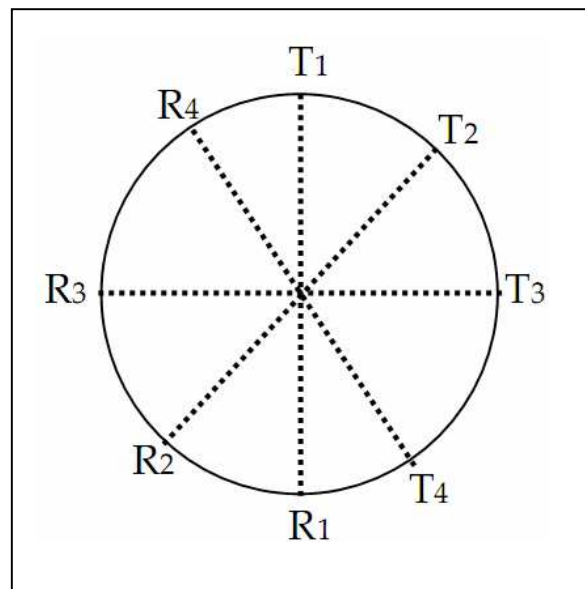
## Procedura per l'ispezione di oggetti con sezione circolare

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.

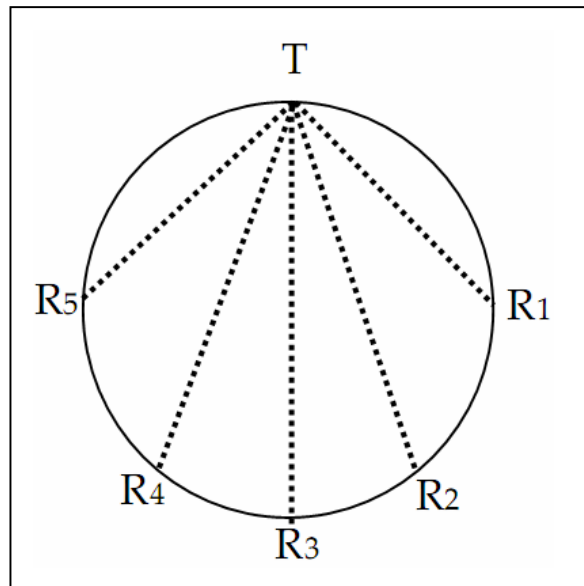
Nel caso d'ispezione di oggetti con facce parallele, si possono eseguire misure lungo percorsi che s'intersecano ad angolo retto, mantenendo le sonde perpendicolari alle superfici e ottenendo quindi il massimo del segnale.

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 6).



**Figura 6.** Misura in trasmissione: per ciascuna misura il trasmettitore (T) ed il ricevitore (R) sono posti agli estremi di un diametro.

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 7).



**Figura 7.** 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 [5].



## **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 ausiliarie, 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.

## **Rilevamento automatico**

Nel caso di 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: in riferimento a [5], 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.

# Strumentazione per misure a Microonde

## 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.

## Campioni utilizzati

I campioni di materiale lapideo utilizzati (Figura 10) sono i medesimi a cui fa riferimento il lavoro descritto in [6] nel quale le misure vennero fatte mediante l'impiego di sensori capacitivi.

Campione	Materiale	$\epsilon_{rif}$
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 Zimbawe	9.6

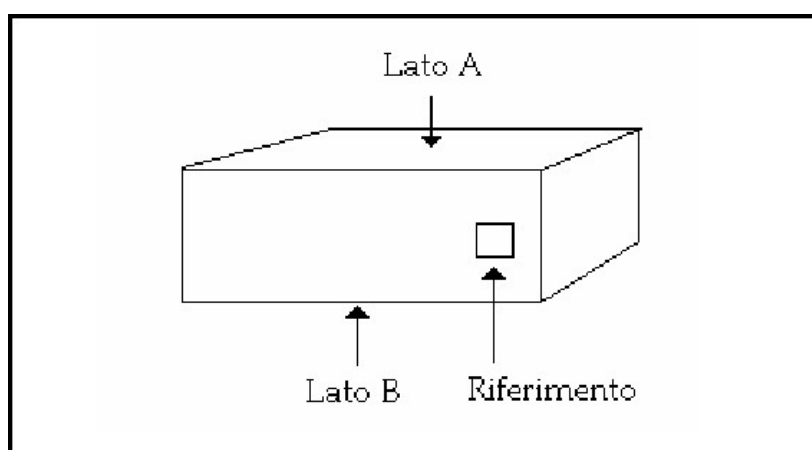
Tabella 2 : Campioni lapidei utilizzati per le misure.



**Figura 10.** Foto dei materiali lapidei utilizzati.

### **Protocollo di misura**

Sono state effettuate 2 serie di misure per ciascun materiale. La prima serie è stata fatta sul lato A del campione lapideo, la seconda sul lato B. Ogni serie è composta da una misura per faccia, eseguite al centro del blocco come mostrato in Figura 11.



**Figura 11.** Protocollo adottato durante le misure.

# Misure

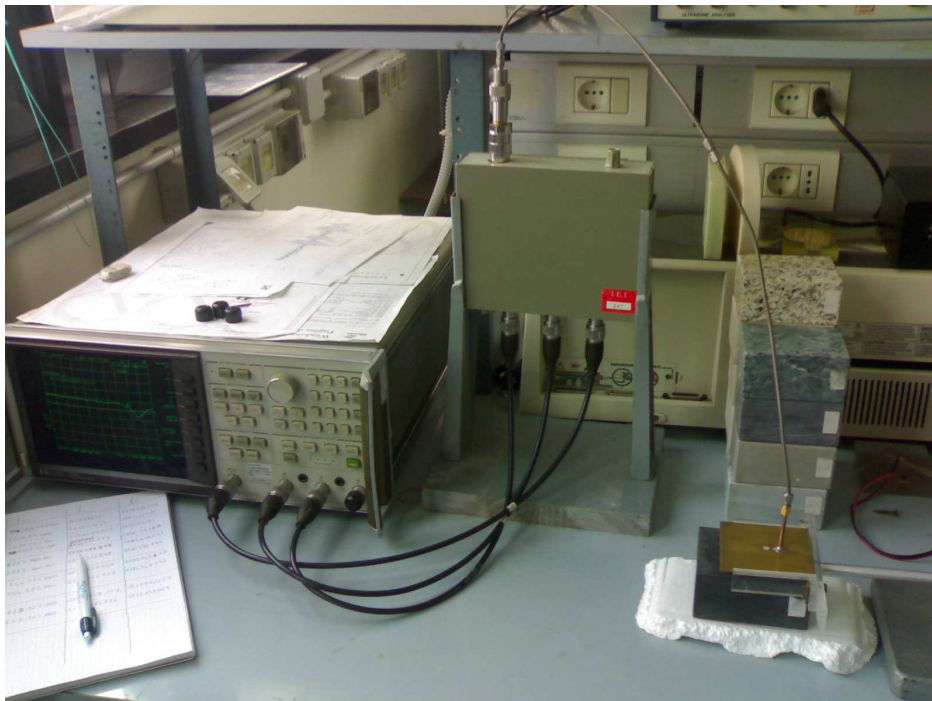
## Misure con antenna a patch

Per stimare la costante dielettrica del materiale sotto esame posto a contatto dell'antenna, si pilota l'antenna con degli stimoli elettromagnetici provenienti 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 12 si può vedere il banco di lavoro in cui sono state effettuate le misure.



**Figura 12.** Banco di lavoro.

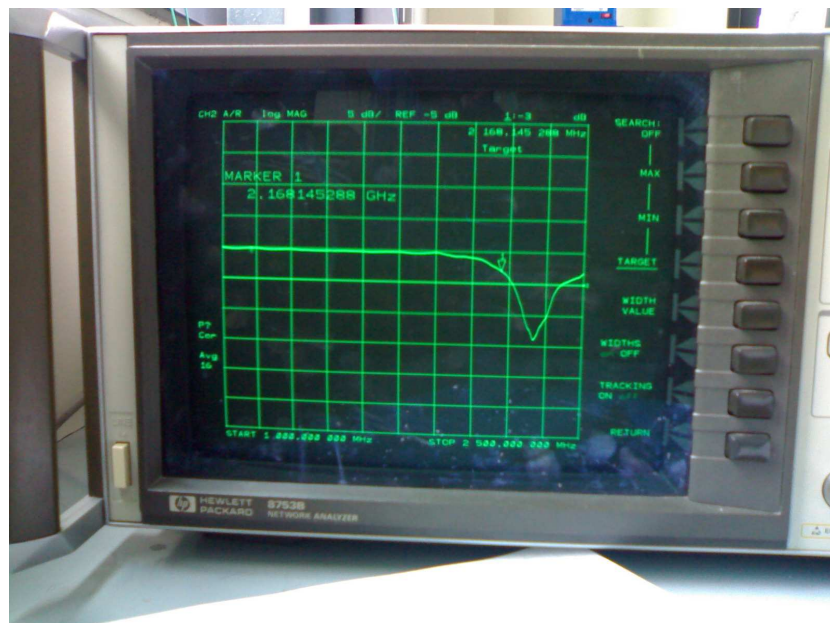
I vari componenti che formano il banco sono:

- Analizzatore vettoriale di rete HP 8753B;
- Blocco di test GP 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 sensore utilizzato; 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 13.** Analizzatore di rete durante un'operazione di lettura dei dati.

In seguito alle misure sono state calcolate le costanti dielettriche  $\epsilon_{mis}$  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)	$\epsilon_{mis}$
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 3.** Corrispondenza tra la frequenza di risonanza media e la costante dielettrica calcolata.

## Discussione e Conclusioni

Nelle prove sperimentali la permittività del materiale in esame è stata determinata individuando la frequenza del picco di risonanza ( $f_{mat}$ ) attraverso l'utilizzo dell'analizzatore vettoriale, e calcolando successivamente tale valore mediante l'equazione 13; in tabella 3 sono riportati i valori per ciascun campione esaminato.

Durante le suddette letture, come peraltro già evidenziato [2], sono state riscontrate alcune difficoltà nell'individuare i parametri di interesse ed in modo particolare per il picco di frequenza 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 delle 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 tecniche dell'apparecchiatura utilizzata, dal punto di vista prettamente tecnico-manuale.

Per quanto riguarda le misure di permittività (tabella 3) dei materiali esaminati, va tenuto da conto che i valori presi come riferimento sono tratti da lavori precedentemente svolti presso il C.N.R. [2] 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 permeabilità inferiori a 6-7 abbiamo ottenuto risultati decisamente in accordo con quelli tipici di questo tipo di 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 7; per

valori di permittività superiori a 7 i valori ottenuti con la suddetta equazione sono sottostimati.

Come già verificato in [2], 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 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 [2], si può asserire che il sensore utilizzato è in grado di fornire una buona stima dei valori assoluti di permittività all'interno del range :  $1 \leq \epsilon \leq 7$ .

L'approccio seguito permette di caratterizzare materiali lapidei mediante prove non distruttive.



## Bibliografia

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

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

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

[6] E. Bozzi, M. Chimenti, "Misura della costante dielettrica di campioni solidi mediante sensore elettromagnetico" Rapporto tecnico ISTI, 2005-B4-02, febbraio 2005.