

Progetto SP1a

“Nuove tecnologie per l’analisi non intrusiva dei manufatti”

Programma di ricerca

Ingegnerizzazione di prototipi e strumentazione per la diagnostica su manufatti monumentali in materiale lapideo

Rassegna sulle tecniche non distruttive per la caratterizzazione dei difetti all’interno di materiali lapidei

Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti, Ovidio Salvetti, Alessandra Zucchelli

Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione “Alessandro Faedo”.

Rapporto tecnico aprile 2003

B4-24

Sommario

Introduzione.....	3
1 Tecniche ad ultrasuoni.....	4
1.1 Applicazione delle tecniche ad ultrasuoni in strutture di marmo.....	6
1.2 Individuazione di fratture all'interno di campioni di granito attraverso emissioni acustiche ed elettromagnetiche	7
2 Tecniche soniche: la tomografia	10
2.1 Applicazioni dei metodi sonici ai materiali.....	11
3 Tecniche termografiche	15
3.1 Alcune applicazioni delle tecniche termografiche	16
4 Il G.P.R. (Ground Penetrating Radar)	18
4.1 Applicazioni in campo civile	18
4.2 Applicazioni G.P.R. per archeologia [11].....	18
Bibliografia	20

Introduzione

L'aspirazione di saggiare la capacità portante di una struttura o di rilevarne i difetti senza alterarla o comprometterne le funzionalità è, ovviamente, molto antica. Ciò nonostante, le prime applicazioni di prove non distruttive sono quelle indirizzate al campo delle strutture di ferro verso la metà del IX secolo, e bisognerà aspettare un secolo per parlare di prove non distruttive intese nel loro significato attuale. La necessità di accertare l'assenza di un qualsiasi difetto interno ai manufatti (difetto dovuto al fattore umano o alla caratteristica intrinseca di un materiale, e perciò imprevedibile) è importante per la sicurezza dell'opera e rende insufficiente la pratica del controllo distruttivo su campioni isolati, costringendo gli operatori ad un controllo sistematico. Un notevole contributo è dato dai progressi dell'elettronica che hanno consentito realizzazioni in campo strumentale, prima difficilmente immaginabili. I metodi non distruttivi sviluppati nell'immediato dopoguerra hanno raggiunto un ruolo ormai consolidato, e si può affermare che la maggior parte delle branche della fisica vengono utilizzate per l'accertamento delle proprietà dei materiali, o per seguirne l'evoluzione del danneggiamento nel caso di elementi sollecitati [1].

Il termine "test non distruttivo" (o prova non distruttiva) può essere applicato ad una qualsiasi procedura d'ispezione che sia non invasiva, e che non danneggi il materiale da esaminare. Generalmente tale termine è riferito ai metodi basati sull'uso delle irradiazioni magnetiche o acustiche, ai metodi termografici e olografici, ed altri in grado di determinare l'integrità meccanica o strutturale dei materiali.

L'utilizzo più comune delle tecniche non distruttive è finalizzato all'individuazione di difetti interni all'oggetto da esaminare: fratture, vuoti, porosità, delaminazioni e scollamenti. Altre applicazioni prevedono il riconoscimento del tipo di materiale, la misura dello spessore e il monitoraggio delle condizioni superficiali.

Gli oggetti da testare possono variare dalle materie prime ai prodotti finiti; in particolare sono esaminati materiali metallici, lapidei, plastica, vetro, cemento, marmo, ceramica, e materiali compositi [2].

L'attuale scopo della ricerca nell'ambito delle tecniche non distruttive è quello di sviluppare sistemi capaci di produrre informazioni relative ai difetti interni al materiale (posizione, forma geometrica, dimensioni) e di fornire risultati in un tempo ragionevolmente limitato.

I metodi noti in letteratura sono numerosi: si potrebbero elencare i metodi ad ultrasuoni, metodi elettromagnetici e a microonde, metodi meccanici, metodi ottici, metodi a raggi X e raggi γ , metodi di rilevamento delle variazioni termiche del materiale e molti altri. In questo testo verranno descritti alcuni tra quelli appena citati, scegliendoli tra i più significativi.

1 Tecniche ad ultrasuoni

Tra le prove non distruttive, quelle ad ultrasuoni sono le più diffuse, poiché hanno la caratteristica di fornire risultati accurati in tempo reale e di individuare difetti localizzati all'interno di un campione. Esse si basano sul principio che esiste una relazione tra la velocità del suono in un mezzo elastico, e le proprietà meccaniche del mezzo stesso: *modulo elastico, coefficiente di Poisson e densità*.

Il suono generato al di sopra della banda udibile dall'orecchio umano (tipicamente 20KHz) è chiamato *ultrasuono*. La banda di frequenze normalmente utilizzate nei test non distruttivi con ultrasuoni è compresa tra 100KHz e 50MHz. L'ultrasuono si comporta come il suono udibile, ma dato che possiede una lunghezza d'onda inferiore viene riflesso da superfici molto piccole come i difetti all'interno dei materiali, ed è questa la proprietà sfruttata per i test non distruttivi.

Il metodo tradizionale si basa sull'emissione, da parte di un trasduttore, di un impulso ad alta frequenza (ad esempio in una banda che va da 1MHz a 20MHz); il segnale è generato sfruttando le proprietà piezoelettriche o magnetostrittive di alcuni cristalli, cioè la loro capacità di contrarsi ed espandersi sotto l'azione di un campo elettrico o di un campo magnetico alternato. Le vibrazioni del cristallo producono onde elastiche di frequenza ultrasonora, purché il campo elettrico (o magnetico) alternato eccitante possieda l'adatta frequenza.

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 adeguato tra le due interfacce: vale a dire capace di trasferire l'onda senza eccessivo assorbimento (si usano frequentemente sospensioni o soluzioni acquose sature di colle cellulosiche).

L'impulso ad ultrasuoni generato si propaga attraverso il materiale da esaminare con la stessa frequenza del generatore, e con velocità che dipende dal materiale attraversato. Quando il fascio incontra un ostacolo sarà riflesso, assorbito, deviato o diffratto secondo le leggi comuni a tutti i fenomeni di propagazione delle onde. Le onde riflesse possiedono la stessa frequenza di quelle incidenti, ma sono sfasate rispetto ad esse in funzione del cammino percorso, cioè in funzione della distanza fra il trasduttore e i vari punti della superficie dell'ostacolo. Analoga sorte spetta alle onde diffratte [2].

L'energia assorbita dal difetto colpito dalle onde incidenti fa sì che esso possa vibrare, emettendo, a sua volta, onde elastiche con la propria frequenza di risonanza e sfasate tra loro.

Dunque il segnale che ritorna verso il trasduttore è molto complesso perché è la risultante della somma di molte onde di uguale frequenza sfasate tra loro, e della somma di altre onde a frequenza diversa, anch'esse sfasate tra loro. Tale segnale contiene tutte le informazioni relative alle dimensioni, forma geometrica e natura dell'ostacolo incontrato dal fascio incidente.

Dato che il fenomeno fisico della piezoelettricità o magnetostrizione 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 è investito da un fascio di onde elastiche: l'onda riflessa o emessa dall'ostacolo ritorna alla sonda che l'ha generata e fornirà un segnale elettrico che, opportunamente amplificato e filtrato, potrà essere visualizzato sul quadrante di un oscilloscopio.

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, e 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, relativi alla parete di confine del pezzo esaminato, in parte attenuati in funzione dei difetti presenti.

Poiché il materiale da esaminare possiede sempre un confine (o parete di fondo) sul quale il fascio in ingresso si riflette, 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 di un difetto interno anche nel caso che questo non generi la riflessione, ma soltanto l'assorbimento del fascio incidente. Ciò è possibile perché lo strumento visualizza il fondo sia come distanza (tempo per la ricezione dell'eco di fondo), sia come assorbimento da parte della materia attraversata. Se l'intensità del fascio riflesso dalla parete di fondo diminuisce bruscamente in una certa posizione significa che qualche ostacolo o discontinuità l'ha parzialmente assorbito. In questo caso non è possibile individuare la posizione del difetto, ma solamente valutarne la presenza ed il potere assorbente.

Disponendo di un generatore di adeguata potenza è possibile individuare difetti distanti anche alcuni metri dal trasduttore. E' possibile anche valutare in modo approssimato la dimensione della discontinuità incontrata dal fascio d'ultrasuoni, confrontando l'intensità dell'eco ricevuto con quello relativo ai difetti standard.

Nella pratica corrente i test non distruttivi ad ultrasuoni si eseguono tarando lo strumento con adatti campioni standard, cioè cercando gli echi di difetti precostituiti (fori di dimensioni predeterminate eseguiti in posizioni definite del campione), oppure tarando lo strumento direttamente sul pezzo da esaminare, per cogliere l'eco di fondo e la sua scomparsa o attenuazione; lo strumento rivelatore d'ultrasuoni filtra i segnali ricevuti e questi possono essere amplificati o attenuati [2]

Quando la presenza di un difetto è individuata, l'intensità dell'eco del difetto o la diminuzione dell'intensità dell'eco del fondo, sono confrontate con quelle degli echi di difetti di entità note. In tal modo è possibile assegnare ad ogni difetto una dimensione equivalente, cioè affermare che le sue dimensioni e forma sono tali da generare un eco simile a quello di un foro, di diametro definito, situato alla stessa distanza dal trasduttore. La dimensione equivalente non è direttamente collegabile con quella reale, ma è un parametro approssimativo, necessario per classificare l'entità dei difetti rivelati.

L'efficacia del test migliora in base alla morfologia del pezzo da esaminare, ovvero dalla presenza di superfici piane o cilindriche, di piani paralleli o comunque

in grado di riflettere efficacemente l'onda di fondo; si complica invece in presenza di fori, scanalature, filettature, variazioni di sezione o di caratteristiche geometriche complesse. Anche la finitura superficiale gioca un ruolo importante: il metodo richiede uno stato superficiale che consenta o non ostacoli eccessivamente il passaggio degli ultrasuoni. Talvolta non è possibile valutare l'integrità di un campione operando direttamente sulla superficie: in tal caso gli esami devono essere eseguiti su campioni totalmente immersi in acqua, per migliorare la propagazione degli ultrasuoni all'interfaccia.

Il valore misurato in un test a ultrasuoni è il tempo di volo ovvero il tempo impiegato dal suono per attraversare il campione. A partire dal tempo di volo (t_s) e dalla velocità dell'onda (c) può essere misurato lo spessore del materiale (t).

1.1 Applicazione delle tecniche ad ultrasuoni in strutture di marmo

Numerose sono le applicazioni delle tecniche non distruttive ad ultrasuoni nella caratterizzazione dei difetti all'interno del marmo. Esse sono finalizzate all'individuazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche di monumenti antichi e sculture in marmo e del loro grado di invecchiamento dovuto agli agenti atmosferici e inquinanti, dal momento che in passato numerosi errori sono stati commessi a causa della scarsa conoscenza degli effetti dell'interazione tra le pietre naturali e l'inquinamento urbano e industriale [3].

Un esempio di applicazione è riferito al progetto di un dispositivo a ultrasuoni per l'indagine non distruttiva dei monumenti in marmo, sviluppatosi presso il Dipartimento di Meccanica dell'Università di Atene [4]. Sebbene il marmo sia un materiale di natura anisotropa e con una struttura stratificata, in questa sede è stato dimostrato che può essere relativamente semplice studiarne le caratteristiche utilizzando i metodi ad ultrasuoni. In base alla qualità del marmo e alla frequenza di lavoro, è possibile esaminare campioni di marmo di spessore variabile da un minimo di pochi centimetri ad un massimo di un metro. In tale progetto, il dispositivo è dimensionato in modo che le *onde longitudinali* (onde elastiche di compressione, il cui moto delle particelle è parallelo alla direzione di propagazione) e *trasversali* (onde di taglio, il cui moto delle particelle è perpendicolare alla direzione di propagazione) siano generate dalle rispettive sonde alla frequenza di 2MHz. Utilizzando le velocità di propagazione delle due onde all'interno di un campione di marmo, determinate con l'aiuto delle misure ad ultrasuoni, e sapendo che la densità del marmo varia intorno ad un valore $\rho = 2.73 \text{ g/cm}^3$, è possibile procedere alla stima del valore delle costanti elastiche: modulo di elasticità, E , modulo di rigidità, G , e coefficiente di Poisson, ν , dati da:

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho c_\lambda^2 \quad G = \rho c_t^2 \quad \nu = \frac{(c_\lambda / c_t)^2 - 2}{2[(c_\lambda / c_t)^2 - 1]}$$

La velocità dell'onda è calcolata attraverso il rapporto tra la distanza tra emettitore e ricevitore ed il tempo che l'impulso impiega a percorrere tale distanza; notare che la

velocità di propagazione delle onde sonore nel materiale degradato è nettamente inferiore alla velocità di propagazione nel materiale sano [1]. Con questi parametri è possibile determinare lo stato di invecchiamento dei monumenti e delle sculture in marmo.

1.2 Individuazione di fratture all'interno di campioni di granito attraverso emissioni acustiche ed elettromagnetiche

Le emissioni acustiche (AE), con frequenza che varia nell'intervallo tra 100KHz e 1MHz, possono essere utilizzate insieme alle emissioni elettromagnetiche (EME) per individuare la posizione di fratture o difetti e la loro dimensione e orientamento [5].

E' stato dimostrato che il fenomeno elettromagnetico creato in solidi sollecitati è in grado di rilevare la presenza di fratture o difetti interni ai materiali. Già da molti anni sono noti i fenomeni relativi all'emissione di segnali elettromagnetici ed acustici generati dalla creazione di crepe in solidi meccanicamente sollecitati. Da risultati sperimentali si osserva che i segnali relativi alle emissioni elettromagnetiche si presentano simultaneamente alle emissioni acustiche; in particolare le emissioni elettromagnetiche di grande ampiezza si presentano insieme grandi emissioni acustiche ed entrambi aumentano appena prima la formazione della rottura principale. I segnali di EME sono generati tramite la redistribuzione delle cariche elettriche, l'effetto piezoelettrico, l'effetto elettrocinetico e l'elettrificazione dovuti all'attrito fra le superfici di recente generazione. E' possibile quindi affermare che le emissioni elettromagnetiche sono le prime a scaturire in presenza di una nuova crepa; di conseguenza i segnali elettromagnetici aumentano velocemente appena prima che la rottura principale si formi, e possono essere utili come fenomeni precursori [5].

A dare la prova dell'effetto dei fenomeni accennati è stato effettuato un esperimento: sono stati utilizzati uno o quattro condensatori a piatti paralleli allo scopo di rivelare una componente del campo elettrico (Fig.1. e 2.).

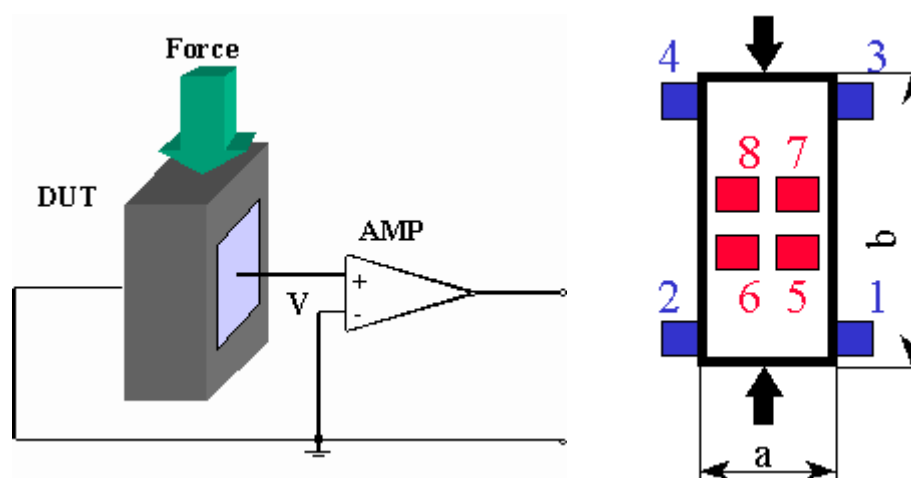


Figura 1. Set-up sperimentale con un'antenna a condensatore (a sinistra), set-up sperimentale con quattro antenne (a destra).

Negli esperimenti sono stati osservati soltanto gli effetti del campo vicino, perché la lunghezza d'onda delle radiazioni emesse è superiore alle dimensioni del campione esaminato.

Le dimensioni dei campioni di granito esaminati sono rispettivamente di $4 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ e di $4 \times 8 \times 1 \text{ cm}^3$. Tali campioni stati caricati con una forza costante fino al raggiungimento della loro rottura. Le antenne a condensatore sono state fissate sul campione come mostra la figura 1. Il segnale relativo all'emissione acustica (AE) è stato rilevato sui bordi del campione, dove la posizione di ogni sensore acustico è denotata con i numeri da 1 a 4. I segnali relativi all'emissione elettromagnetica sono rivelati attraverso le antenne a condensatore (i sensori di EME sono denotati con i numeri da 5 a 8) ed in seguito tali segnali sono amplificati dai pre-amplificatori a basso rumore. La dipendenza dal tempo dei segnali AE ed EME è mostrata in figura 2 dove è possibile osservare che i segnali elettromagnetici iniziano approssimativamente nello stesso istante, mentre i segnali acustici sono ritardati: la differenza temporale tra le due emissioni dipende dalla posizione della frattura e dalla velocità di propagazione dell'onda di entrambe le emissioni.

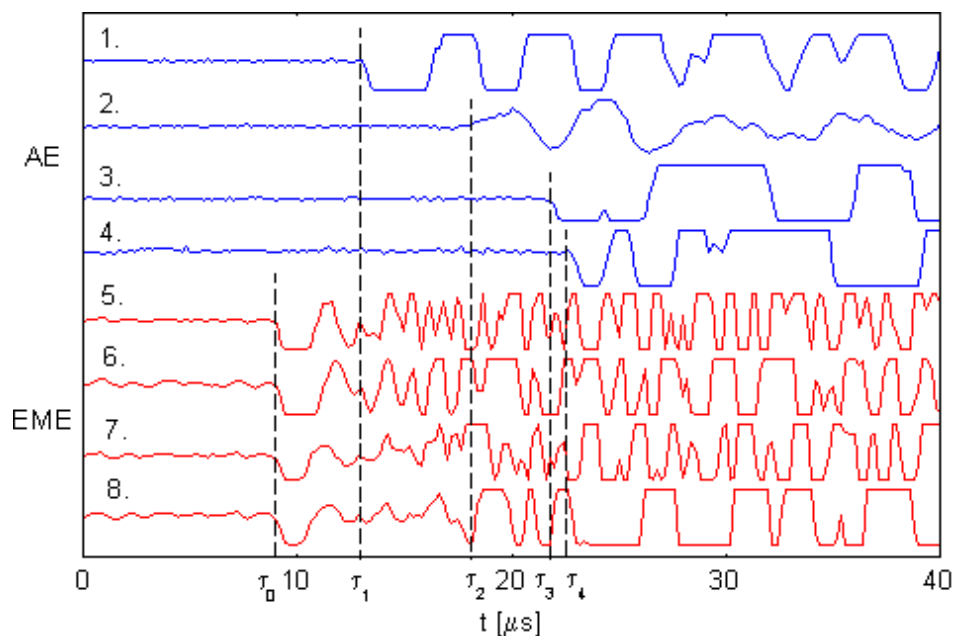


Figura 2. Andamento temporale dei segnali AE ed EME.

La frattura responsabile dei segnali indicati in figura, si trova vicino al sensore capacitivo no.5 ed è per questo che il segnale relativo al sensore acustico no.1 presenta un minimo ritardo, mentre il segnale relativo al sensore no.4 presenta un ritardo massimo poiché si trova nella direzione opposta rispetto al no.1.

Per determinare l'orientamento di una frattura si fa riferimento alla relazione tra la differenza di potenziale ai capi dell'antenna a condensatore e il tempo:

$$V(t) = V_0 e^{-t/\tau} - \frac{g e^{-\gamma t}}{\sqrt{\omega_0^2 + \omega^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

L'espressione descrive il segnale continuo (DC) con costante $\tau = RC$ e il segnale in alternata (AC) con dumping constant, $\gamma = \delta + \beta$, con δ dovuta al dumping meccanico e β conduttività elettrica del campione. V_0 è una costante di integrazione, $\omega_0 = \gamma - t/\tau$ è la pulsazione angolare di cut off, ω è la pulsazione angolare dovuta alla vibrazione della frattura e il fattore g è dato dalla seguente relazione:

$$g = \frac{2q_0 v_0 \cos \alpha}{Cd}$$

dove v_0 è il modulo della velocità, d è lo spessore del piatto del condensatore ed α è l'angolo formato dai vettori intensità del campo elettrico, \vec{E} , e velocità della carica, \vec{v} .

Si osserva che le fratture interne ad una struttura muraria sono orientate principalmente in accordo alla struttura cristallina della roccia. Dalle sperimentazioni è stato ottenuto il seguente risultato: le frequenze di emissione dei segnali elettromagnetici per i campioni di granito oscillano tra 1 e 6 MHz, e la lunghezza della frattura può essere stimata attraverso queste frequenze; per i campioni esaminati con velocità di propagazione dell'onda di 3Km/s si possono misurare lunghezze dell'ordine di 0.25 ÷ 1.5 mm. Le vibrazioni delle fratture sono attenuate a causa dello smorzamento dell'onda all'interno del materiale e a causa della sua conducibilità. Per il caso preso in esame, questa vibrazione è stata osservata per un tempo dell'ordine di 10µs. Dopo questo tempo la fonte principale della vibrazione della frattura è causata dalla vibrazione dell'intero campione per l'energia delle emissioni acustiche. Queste frequenze sono ottenute in base alla geometria del campione esaminato e le frequenze del segnale EME sono circa un ordine inferiore rispetto alle vibrazioni iniziali della frattura.

2 Tecniche soniche: la tomografia

I metodi sonici sono basati sul legame tra le proprietà del segnale che si propaga all'interno del materiale (velocità, ampiezza dell'onda e frequenza) e le proprietà elastiche e sonore del materiale stesso. In pratica tali metodi sono basati sullo studio della trasmissione di un segnale sonico, consistente in treni di onde elastiche, con frequenze comprese nel range $5 \div 30$ KHz, generato e ricevuto da speciali trasduttori elettroacustici. Gli impulsi che si propagano nel materiale sono formati da tre componenti distinte: onde elastiche di compressione (P), onde tangenziali (S) e superficiali (pseudo-Rayleigh, Stoneley) [6]. Il metodo consiste nell'acquisire i tempi impiegati dai segnali sonici per compiere una fitta rete di percorsi che coprono, il più uniformemente possibile e con diverse inclinazioni, la sezione di terreno o di struttura sulla quale sono eseguite le misure. Per quanto riguarda la velocità delle singole componenti possiamo dire che le onde di compressione sono quelle più veloci, e ciò significa che il loro tempo di volo viene rilevato con sufficiente precisione; le onde tangenziali e le superficiali pseudo-Rayleigh hanno velocità e frequenze inferiori rispetto a quelle di compressione, perciò il loro contenuto informativo è molto scarso. Le onde superficiali Stoneley sono caratterizzate invece da basse frequenze e da ampiezze elevate (parametri notevolmente influenzati dalla presenza di vuoti all'interno del materiale) e vengono facilmente riflesse dalle discontinuità.

Nell'ambito dei metodi sonici il più recente, innovativo e versatile, specie per quanto riguarda le indagini su grandi strutture, è sicuramente quello della tomografiaonica. Tale tecnica trova i suoi fondamenti nella ben nota Tomografia Assiale Computerizzata (TAC), utilizzata nella diagnosi medica con l'impiego di raggi X. La tomografiaonica consente di tracciare la mappa dettagliata della velocità delle onde elastiche longitudinali (P), su sezioni piane della struttura investigata, in modo da poter definire localmente lo stato di integrità di tale struttura. Ogni colore della mappa corrisponde ad una velocità, ed ogni velocità corrisponde ad una resistenza della struttura investigata. Quindi la tomografiaonica si realizza eseguendo un numero elevato di misure "microsismiche", secondo direzioni oblique incrociate e su diversi piani, mediante le quali è possibile delineare un esatto quadro fessurativo all'interno dello spessore della struttura, necessario per l'individuazione di ulteriori zone sospettate di essere degradate, non valutabili visivamente.

La tomografiaonica si è dimostrata un efficiente metodo d'indagine atta a verificare l'integrità delle murature. Attraverso la mappatura delle velocità all'interno del manufatto viene ricostruita la geometria interna della muratura e si possono determinare alcune delle sue caratteristiche fisiche. Può inoltre essere controllata l'area interessata da eventuali iniezioni e verificato l'aumento delle velocità soniche da esse determinato.

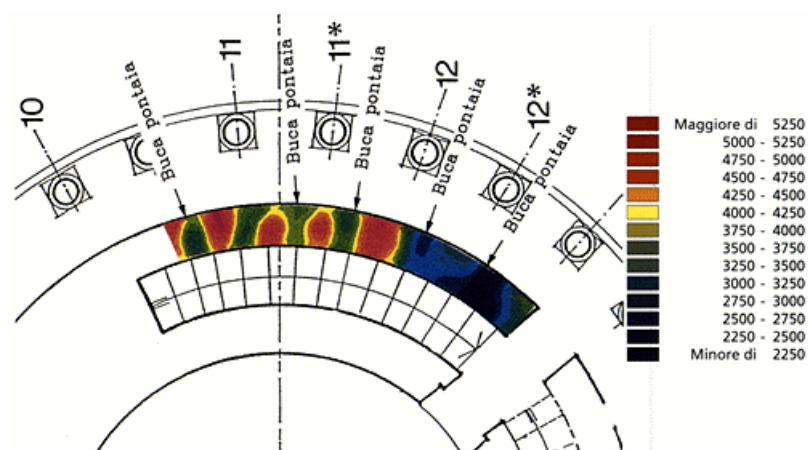


Figura 3. Immagine tomografica relativa alla Torre di Pisa.

Il metodo di calcolo utilizzato per la costruzione della mappa si basa sulla applicazione della trasformata di Radon, in particolare sulla trasformata inversa, che consiste nella risoluzione di integrali di linea relativi alle proprietà fisiche della struttura. Nel caso di tomografia a raggi X questi integrali rappresentano l'attenuazione totale subita dai singoli fasci a raggi X; nel caso della tomografia sonora corrispondono ai tempi impiegati dalle onde sonore sui vari percorsi di misura. Nel caso di raggi X non esistono rifrazioni, di conseguenza gli integrali di linea sono relativi a percorsi rettilinei. Nel caso di segnali sonici, i percorsi possono essere considerati rettilinei soltanto nel caso in cui si presentino piccole variazioni percentuali di velocità sonora; se le variazioni sono più consistenti, l'andamento può essere determinato in base alle leggi dell'ottica geometrica [6].

I trasmettitori utilizzati sono quelli piezoelettrici, e come ricevitori si utilizzano gli accelerometri o gli idrofoni.

2.1 Applicazioni dei metodi sonici ai materiali

Le tecniche non distruttive tomografiche, basate sulla formazione della mappa di resistività, sono state applicate all'area dell'antico tempio di Olympian Zeus ad Atene. I test sono stati condotti con lo scopo di rilevare dei vuoti sotto la superficie, responsabili dei cedimenti del suolo osservati durante lavori di costruzione di un palco con supporti in acciaio nell'anfiteatro del tempio. Il modello sintetico di resistività ottenuto attraverso la formazione delle mappe (figg. 4 e 5), ha identificato un certo numero di potenziali lineamenti, alcuni dei quali attribuibili a cavità dovute con probabilità ai resti di un antico condotto sotterraneo, mentre altri sono attribuibili a resti archeologici strutturali, quali pareti o resti di pietra delle basi delle colonne [7].

Successivamente ad una descrizione della provenienza dei marmi e delle pietre costituenti i vari resti, sono state condotte valutazioni ad alta risoluzione di resistività, allo scopo di evidenziare la presenza di cavità sotto superficiali, responsabili dei cedimenti del terreno, verificatisi al momento della locazione di pesanti colonne di acciaio.

Per rilevare la resistività elettrica è stato condotto un apposito test, Electrical Resistivity Test, secondo il quale la corrente viene introdotta nel suolo attraverso una coppia di elettrodi, ed un'altra coppia di elettrodi è utilizzata per misurare la tensione alla superficie dovuta al flusso di corrente indotto dalla prima coppia di elettrodi. Aumentando il numero degli elettrodi è possibile analizzare in modo più accurato l'area ed eseguire il test a varie profondità. I valori così ottenuti vengono poi elaborati utilizzando approcci numerici, come il metodo degli elementi finiti o delle differenze finite, che sono in grado di fornire una descrizione bidimensionale del modello [7].

CAVITY SYNTHETIC MODELING

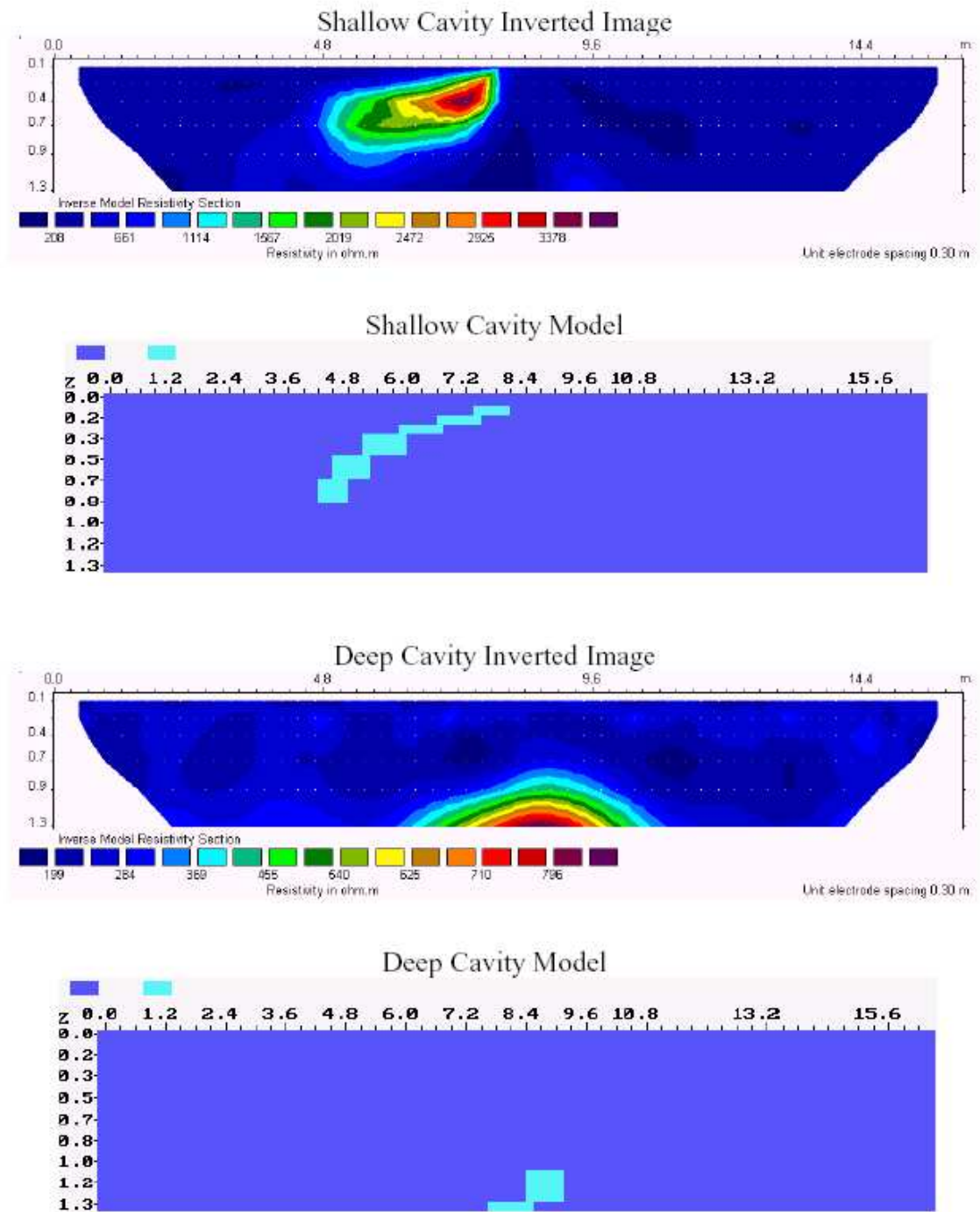


Figura 4. Modelli sintetici di resistività relativi ai tipi di cavità: poco profonde e profonde.

STONE BLOCK SYNTHETIC MODELING

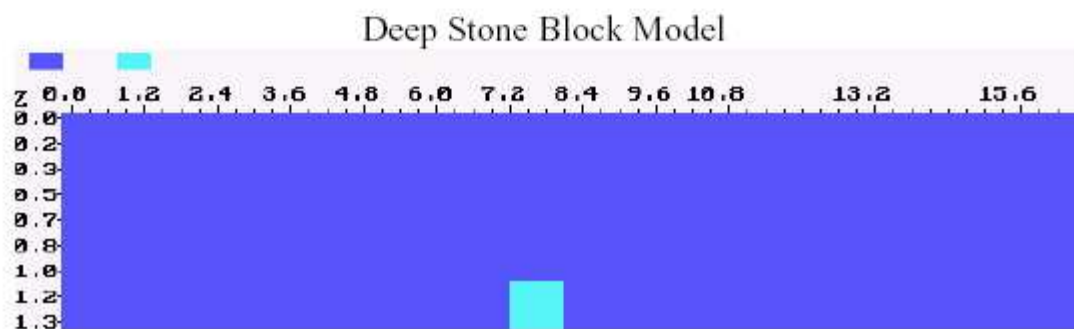
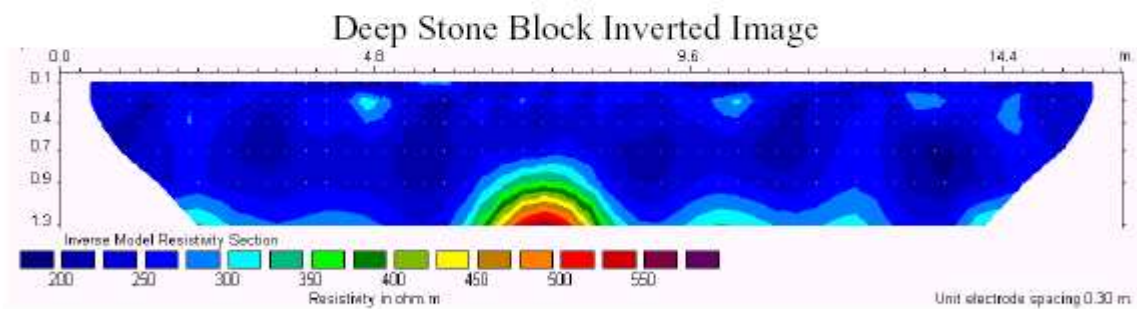
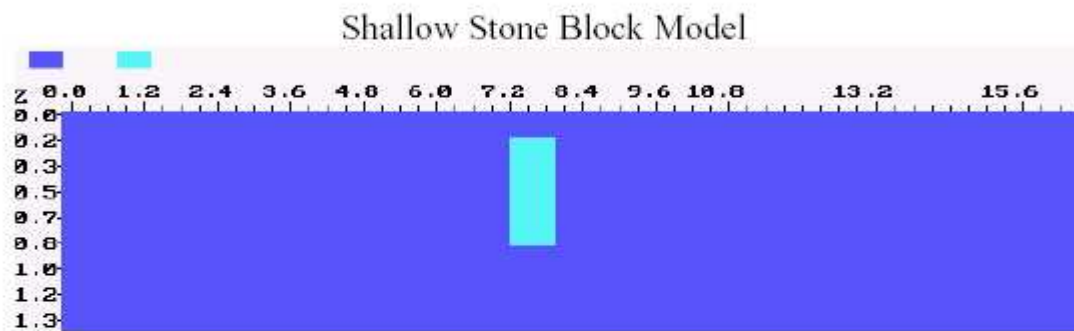
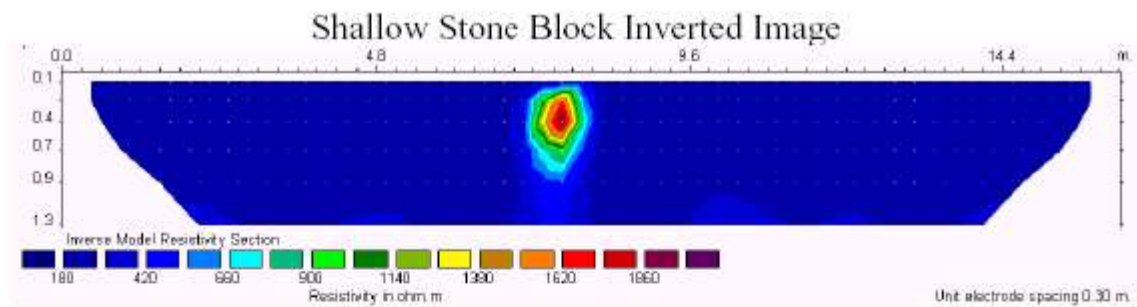


Figura 5. Modelli sintetici di resistività relativi ai tipi di pietra.

3 Tecniche termografiche

L'indagine termografica, o termovisiva, per lo studio degli elementi strutturali, costituisce un'importante applicazione della tecnologia dell'immagine nell'infrarosso lontano.

Com'è noto la propagazione del calore avviene in tre modi diversi: per conduzione, per convezione e per irraggiamento. Ogni materiale possiede un proprio coefficiente di conducibilità termica che è legato alle caratteristiche fisiche, in particolare alla densità e alla condizione di umidità nella quale si trova. La misura della temperatura superficiale mediante la termografia, è basata sulla constatazione che i corpi emettono continuamente energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche e che tale energia è funzione della temperatura e della emissività della superficie, oltre che della lunghezza d'onda delle radiazioni [1].

Quindi grazie alla termovisione è possibile produrre le immagini degli oggetti in scala di grigio (o a pseudo-colori), che vengono interpretate in termini di temperatura degli oggetti stessi. L'apparecchiatura della termovisione comprende una telecamera sensibile alle radiazioni termiche ed un'unità di controllo. Con un rivelatore fotovoltaico si fornisce una differenza di potenziale elettrico dipendente dall'intensità delle radiazioni ricevute. Per ciascun punto dell'oggetto si forma sullo schermo dell'unità di controllo un punto luminoso: la luminosità è direttamente proporzionale all'intensità delle radiazioni elettromagnetiche ricevute e alla temperatura.

Un sensore termico può coprire un range di temperature che va da -20° a 2000°C , con risoluzioni superiori a 0.25°C ; la risposta in frequenza si può trovare nell'intorno di 1MHz e permette di ottenere più di 10^6 misure di temperatura per secondo allo scopo di assicurare la costruzione di un'immagine sul monitor in tempo reale.

La camera, generalmente, è calibrata per le irradiazioni di corpo nero, ma bisogna tenere di conto anche dell'emissività dell'oggetto da esaminare.

Un recente sviluppo ha permesso di osservare variazioni termiche in metalli, ceramiche e materiali compositi [2]. Viene utilizzato un tubo che emette una luce ad alta intensità (flash) allo scopo di generare impulsi di calore che permangono solo pochi secondi sulla superficie di un campione. Una camera termica è utilizzata per catturare le immagini sequenziali su un nastro in modo da poter monitorare il flusso di calore. La presenza di difetti interni al campione va ad influire sul flusso di calore che attraversa il campione, con il risultato di una variazione della temperatura in prossimità del difetto. La termovisione rappresenta così un efficace strumento, non a contatto in grado di fornire rapidi risultati; è particolarmente adatta per il rilevamento di scollamenti e delaminazioni nelle strutture composite, e per l'investigazione di materiali, come la ceramica, che sono cattivi conduttori di calore. I metalli, invece, rappresentano problematiche maggiori a causa dell'elevata conduttività di calore che porta ad una rapida equalizzazione della temperatura. Tuttavia, recentemente sono stati raggiunti buoni risultati dall'utilizzo della

termografia nella misura dello spessore di difetti, a pochi millimetri dalla superficie di campioni metallici [2].

3.1 Alcune applicazioni delle tecniche termografiche

Nel settore della diagnostica per il restauro architettonico, le indagini termografiche occupano un posto di rilievo per la vastità dei possibili campi d'impiego e per la possibilità di integrazione con le altre metodologie di indagine (magnetometria, endoscopia, termoflussimetria).

I campi di applicazione di questo metodo possono dividersi in quattro gruppi.

Indagini termografiche finalizzate alla conoscenza del manufatto.

E' possibile, grazie alle differenti caratteristiche termiche dei materiali individuare delle "anomalie" all'interno del tessuto murario quali tamponamenti di porte e finestre, inserimenti di travi in legno, variazioni del tessuto murario e struttura delle coperture voltate [8].

Indagini termografiche finalizzate all'individuazione di patologie dei materiali in opera.

E' possibile individuare l'umidità di risalita capillare, distacchi localizzati del manto di intonaco dalle pareti, fessure passanti e decoesione di elementi in cotto [8].

Indagini termografiche finalizzate alla verifica qualitativa di interventi per la conservazione del manufatto.

In alcuni casi risulta essere necessaria la programmazione di un monitoraggio termografico per verificare l'effettiva riuscita degli interventi di conservazione eseguiti, o per tenere sotto controllo l'evoluzione di alcune patologie [8].

Indagini termografiche finalizzate al contenimento energetico edilizio. La termografia ad infrarossi viene spesso impiegata per individuare e ridurre le dispersioni di energia degli edifici [8, 9]. La capacità di identificare la causa dei difetti imputabili ad una costruzione scadente, o ad una condensa formatasi a causa di un isolamento non adeguato o del tutto inesistente, può assumere un ruolo importante nell'incremento dell'efficienza in termini di risparmio energetico. L'impiego della termografia ad infrarossi al fine, di identificare tempestivamente guasti in edifici e tetti, e di ripararli prima che il danno assuma proporzioni ingenti, consente a sua volta di limitare gli investimenti affrontati in termini di attrezzatura e materiali collocati all'interno degli edifici in questione.

Anche l'umidità nascosta in un tetto costituisce una causa ancor più grave per quanto riguarda dispersione di energia e deterioramento del sistema di isolamento. Utilizzando un dispositivo ad infrarossi che permette di localizzare con esattezza i guasti, si riducono sensibilmente i costi derivanti da un tetto non in perfette condizioni.

Quindi le termocamere ad infrarossi sono in grado di individuare aree cariche di umidità all'interno dell'isolamento del tetto perché quest'ultimo è come un ampio collettore termico che, in una calda giornata d'estate, raggiunge la temperatura di circa 70° C. Questo tipo di isolamento immagazzina una maggiore quantità di energia solare rispetto all'isolamento a secco. Durante la notte, infatti, le aree umide

si raffreddano lentamente grazie a questa energia accumulata, che si traduce in una differenza di temperatura della superficie visibile termograficamente [9].

4 Il G.P.R. (Ground Penetrating Radar)

Tra le prove non distruttive applicate alle strutture civili o ai siti archeologici, esistono anche quelle basate sull'utilizzo dei metodi radar.

4.1 Applicazioni in campo civile

Le applicazioni in campo civile (indagini su murature) prevedono l'utilizzo del radar sia in modalità eco, sia in modalità tomografica. Nel primo caso l'acquisizione dati è più rapida e quello che ci si aspetta di vedere sono le discontinuità di conducibilità elettrica e di costante dielettrica all'interno del mezzo. E' possibile osservare, con questo metodo, la presenza di cavità o di distacchi tra lo strato più esterno di mattoni e l'interno della muratura. In linea di principio, questa modalità di indagine dovrebbe consentire anche di identificare diversi paramenti e la presenza di fratture, almeno quelle di spessore maggiore di qualche millimetro.

Nel caso di acquisizioni tomografiche, le procedure di misura sono più laboriose (benché molto più rapide di quelle per tomografie soniche) e l'intento è quello di renderle più snelle mettendo a punto tecniche semiautomatiche di monitoraggio delle posizioni di misura.

Sono state messe a punto diverse procedure di elaborazione di questi dati [10] (tomografie per tempi di volo, per ampiezze e per diffrazione) che permettono di estrarre mappe della distribuzione spaziale della velocità, dell'attenuazione e delle proprietà di scattering all'interno della muratura. Queste elaborazioni richiedono la conoscenza della funzione di direttività delle antenne e a questo scopo sono stati effettuati studi sia teorici che sperimentali ottenendo risultati convergenti e non noti in letteratura [10]. Interpretando le suddette mappe è stato possibile trarre conclusioni sulla presenza di cavità e identificare zone più umide o più fratturate.

La tomografia radar è stata anche confrontata in alcuni casi con quella sonica ricavando le seguenti conclusioni preliminari [10]. Le due metodologie sono, in generale, complementari dato che le proprietà elastiche del mezzo sono per certi aspetti duali a quelle elettromagnetiche; la tomografia sonica è più lenta e faticosa in acquisizione ma richiede una strumentazione meno costosa, mentre per la ricerca di vuoti, il segnale radar sembra più indicato, perché il segnale elastico tende a correre laddove il mezzo è più denso mascherando così la presenza di piccole cavità. Il segnale radar offre inoltre maggiore risoluzione perché la lunghezza d'onda, associata alla frequenza massima che si riesce ad usare, è normalmente minore rispetto al metodo sonico. Il metodo radar è però in grossa difficoltà quando il livello di umidità non è trascurabile, poiché questa rende il mezzo molto assorbente.

4.2 Applicazioni G.P.R. per archeologia [11]

L'antenna viene trascinata lungo un reticolo di profili con spaziatura adeguata alle dimensioni dei possibili reperti, che permette la precisa ricostruzione geometrica delle strutture sepolte, mentre informazioni circa i materiali possono essere ottenute mediante l'elaborazione dei segnali riflessi. Durante questa fase è già possibile

visualizzare nello schermo dell'unità di controllo una "radargrafia" del sottosuolo che mette in evidenza i principali elementi presenti. I risultati sono generalmente forniti in forma di mappe riportanti l'ubicazione dei profili eseguiti (vedi figura 6), la posizione delle strutture rilevate e la loro tipologia. L'indagine radar, per poter fornire dei risultati utili e significativi, deve essere eseguita con precisi criteri attuativi. E' infatti indispensabile operare sempre su un reticolo topografico agganciato a un caposaldo facilmente individuabile sulla cartografia fornita, per poter riportare sul punto di campagna gli elementi rilevati nell'indagine.

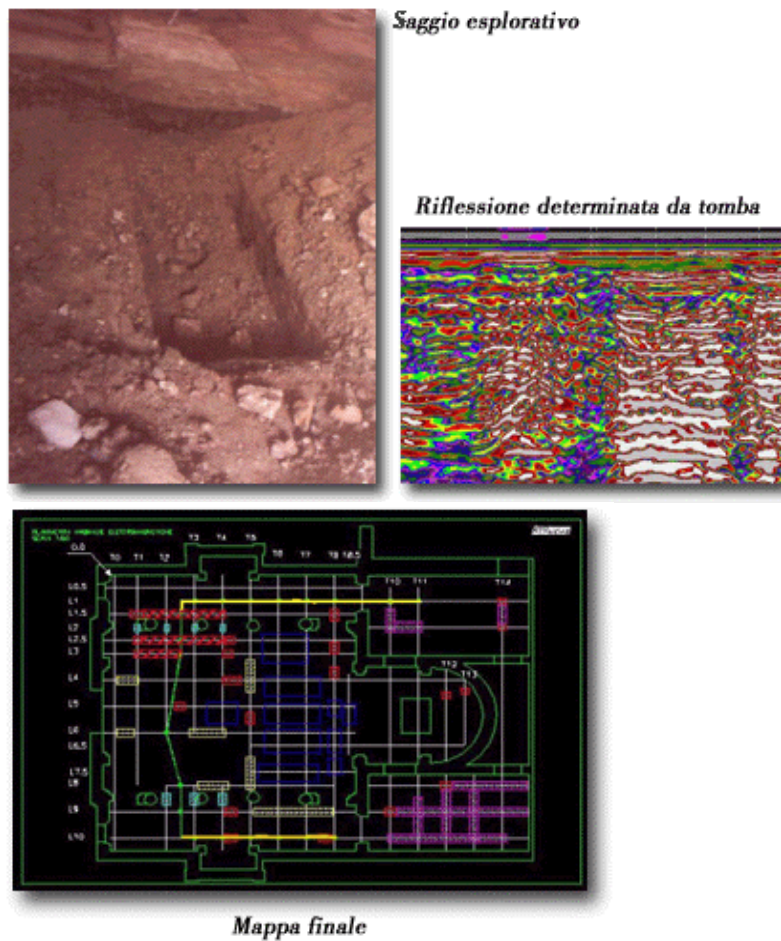


Figura 6. Esempio di segnale riflesso e mappa ricostruita mediante la tecnica GPR.

Bibliografia

- [1] A. Carpinteri *“Meccanica dei materiali e della frattura”*, Pitagora Ed. Bologna (1992)
- [2] TECHTRENDS *“ Non destructive testing ”*, Innovation 128, Paris (1988)
- [3] Monuments project – smt4-ct96-2130 *“Characterization of Mechanical Properties and Damage of Natural Building Stones in Historical Monuments”* – www.mred.tuc.gr
- [4] I. N. Prassianakis, S. K. Kourkoulis, I. Vardoulakis, *“ Marble monuments examination using the NDT method of ultrasounds”*- Proceedings 15th WCNDT, Roma 2000, www.ndt.net
- [5] J. Sikula, B. Koktavy, V. Sedlakova *“Cracks Detection by Electromagnetic and Acoustic Emission”*, Proceedings 15th WCNDT, Roma 2000, www.ndt.net
- [6] A. Pasquale *“Indagini nelle strutture civili”*, Diagnostica per le Immagini, Vigo Cursi Editore, Pisa (1997).
- [7] F.L. Ioannis, K.K. Vassilios, P.V. Antonios, I.L. Filippou, *“Resistivity Modelling and Imaging Methods for Mapping Near-Surface Feature: Application to a site characterization at the ancient Temple of Olympian Zeus in Athens”*, Journal of the Balkan Geophysical Society, Vol. 5, no 4, november 2002, p. 135-144.
- [8] L. Rosi *“Indagini termovisive per la conservazione e lo studio dei Beni Culturali: Esperienze”*, Diagnostica per le Immagini, Vigo Cursi Editore, Pisa (1997)
- [9] Servizi e tecnologie dei controlli, *“Controlli non distruttivi”*, www.controlli.com
- [10] L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi, S. Valle, L. Zanzi *“Prove non distruttive o poco distruttive”*, Unità di Ricerca di Milano, MURST.
- [11] Indagini Geofisiche, www.eurokos.it