

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	10 dicembre 2004	79-105	2005
--------------------	--------------------------------	------------------	--------	------

MAURIZIO FURANI (*), GIUSEPPE GALASSI (*) & GABRIELE PULELLI (**)

INDAGINI GEOFISICHE INTEGRATE – AREA TEST «BOSCO DELLA CITTÀ» – ROVERETO (TN)

Abstract - MAURIZIO FURANI, GIUSEPPE GALASSI & GABRIELE PULELLI - Geophysical prospecting integrated – Test site «Bosco della città» – Rovereto (TN).

Not far from Rovereto (TN), in the green area where the «Museo Civico» created and digged different type of archaeological and engineering targets (walls of different dimensions and thickness, streets, fosse etc.) for the calibration of geophysical methodologies (between 3 m of rocky detrital deposits which overhang the calcareous bedrock of «Formazione del Biancone»), near Bosco della Città have been done some geophysics experiments to locate digged targets.

Methodologies used are high resolution seismic refraction prospecting with standard elaboration (GRM method - Palmer 1980), and tomography elaboration (Progeo software) and georadar prospecting.

Some seismic laying out in correspondence of aligned targets digged with the generation either of compression (P) and shear waves (S) and with the analysis of attenuation of seismic signal with the distance source-receiver; shot have been realized each 3-4 stations (geophone) with receiving through 3 Geometrics Geode units linked by a maximum of 72 simultaneous recording channels and with a range of 0,5-1 m between geophones.

All above in order to dispose of a good quantity and different data (P waves, S waves, attenuation of seismic signal) to choose the best way of acquisition showing the importance and the necessity of finding the good distance between geophones depending of research of targets known depth (either to less than 1 m or more of 10 m).

Considering sub-superficial depth of these targets, during the testing and validation of data, a complementary georadar survey has been done with GSSI instrument SIR 3000 matched to 400 MHz antenna even if calibration and space between geophones have been located with precision using a geophysical methodology (seismic tomography) more adapt to find target locates to major depths than distances used as standard (5-10 m).

Key words: Seismic refraction, Seismic tomography, Velocity rate, Seismic attenuation, Georadar.

(*) Dott. Geol., Direttore tecnico (Progeo s.r.l.).

(**) Dott. Geol., Direttore tecnico; Amministratore Unico (Progeo s.r.l.).

Sono state realizzate alcune sperimentazioni geofisiche atte a localizzare «bersagli» sepolti in località Bosco della Città, nell'area verde pubblica situata a pochi chilometri dal centro abitato di Rovereto (TN) nella quale il Museo Civico ha creato e seppellito per la taratura di metodologie geofisiche (entro i 3 m di spessore dei depositi detritici che sovrastano il substrato roccioso calcareo della Formazione del Biancone) diverse tipologie di target archeologico-ingegneristici (muri di varia natura, spessore e dimensione, platee, strade, fosse).

Le metodologie utilizzate sono consistite in prospezioni sismiche a rifrazione ad alta risoluzione con elaborazione sia standard (per rifrattori, G.R.M. method -Palmer 1980-) sia tomografica (software Progeo) e in prospezioni georadar.

Sono stati realizzati alcuni stendimenti sismici in corrispondenza di altrettanti allineamenti di «bersagli» sepolti con generazione sia di onde di compressione (P) sia di taglio (S) e con analisi dell'attenuazione del segnale sismico con la distanza sorgente-ricevitore; le energizzazioni sono state realizzate ogni 3-4 stazioni (geofoni) con ricezione mediante l'utilizzo di 3 Sismografi Geometrics Geode accoppiati fra loro per ottenere un massimo di 72 canali di registrazione simultanea e con spaziatore intergeofoniche variabili da 0.5 a 1 metro.

Il tutto per avere a disposizione una quantità ed una differenziazione di dati (onde P, onde S, attenuazione del segnale sismico) tale da identificare la scelta e l'utilizzo della tipologia di acquisizione più idonea evidenziando altresì l'importanza e la necessità di determinazione della giusta distanza intergeofonica in funzione della ricerca di obiettivi a profondità nota (siano essi a meno di 1 m come in questo caso o a decine di metri dal piano campagna).

Considerate le profondità subsuperficiali degli obiettivi stessi è stato altresì eseguito in sede di verifica e reciproca convalidazione dei dati, un rilievo complementare di tipo georadar coincidente con gli allineamenti sismici mediante strumentazione G.S.S.I. Sir 3000 accoppiata ad antenna da 400 MHz, anche se i target, con le opportune tarature e spaziature intergeofoniche, sono stati in gran parte individuati e localizzati con precisione pur utilizzando una metodologia geofisica (sismica tomografica) più adatta ad individuare bersagli posti a profondità maggiore se non altro per le normali distanze tra i sensori che si utilizzano di consuetudine (5-10 m).

Parole chiave: Sismica a Rifrazione, Tomografia Sismica, Gradiente di velocità, Attenuazione sismica, Georadar.

1. INTRODUZIONE

La Progeo di Forlì, società nata nel 1974 e tra le prime in Italia ad occuparsi delle applicazioni delle metodologie geosismiche ai settori dell'ingegneria civile e delle grandi opere pubbliche, ha avuto la possibilità di realizzare, grazie all'interessamento del Prof. Illiceto e del Dr. Finotti, una serie di test nell'area oggetto di studio che sono consistiti sostanzialmente in due tipologie di indagine geofisica: sismica a rifrazione e georadar.

Le disposizioni dei quattro stendimenti effettuati mediante entrambe le tipologie sono indicati nella Fig. 1; nella realizzazione di tali stendimenti si è cercato di «centrare» il maggior numero di bersagli noti.

I tre stendimenti disposti basso-alto in Fig. 1 (linee 1, 2 e 3) sono costituiti da 48 geofoni con distanza intergeofonica di 0.5 metri per un totale di 24 metri cadauno mentre lo stendimento disposto sinistra-destra sempre in Fig. 1 (linea 4) è costituito da 72 geofoni con una distanza intergeofonica di 1 metro per un totale di 71 metri lineari.

2.1. Sismogrammi

I sismogrammi sono stati registrati con un sistema elettronico modulare (24 canali per ogni box, di colore giallo in Fig. 2), all'avanguardia nel campo geosismico e in grado di registrare in un unico shot molti canali.

Un esempio di registrazione ottenuta è riportato nel sismogramma di Fig. 3 riferito alla linea sismica 4 (72 canali); la registrazione delle onde di compressione P è relativa all'energizzazione (shot) effettuata all'inizio della linea stessa (geofono 1).

Si osserva come, anche avendo energizzato con un sistema del tutto normale (grosso martello), la registrazione, effettuata su uno stendimento sufficientemente corto (71 m) e senza rumore di fondo, risulti sostanzialmente ottimale.

Le tracce sismografiche relative a ciascuno dei 72 canali (geofoni infissi sulla superficie topografica) sono presentate in successione lungo l'asse delle ascisse mentre l'asse delle ordinate è relativo al valore del tempo (millisec) a partire dall'istante di shot.

Per analizzare bene il segnale rifratto (punto di flesso sulla traccia in quiete), in particolare sulle tracce dei geofoni più vicini al punto di energizzazione, alla registrazione viene di solito assegnato un breve ritardo (delay) costante su tutte le tracce del sismogramma e prestabilito nei parametri di input (in questo caso - 10 millisec), in quanto sono possibili, in casi particolari (ad es. substrato veloce subaffiorante), acquisizioni anticipate che possono nascondere, sui geofoni più vicini al punto di shot, lo stesso segnale rifratto (f.b.p., first break pick) che si va a ricercare sul sismogramma.

Sul sismogramma di Fig. 3, anche solo visivamente su base sismografica, si può notare un'evidente anomalia in corrispondenza dei geofoni 56, 57 e 58 in quanto si interrompe la continuità, sostanzialmente regolare, del trend crescente di incremento temporale del segnale rifratto in funzione della distanza dal punto d'impatto; in parole più semplici si verifica un significativo ritardo nei tempi del primo arrivo (corrispondente ad un «bersaglio» noto).

Il sismogramma reciproco sulla stessa linea sismica 4 da 72 canali è relativo quindi alla registrazione delle onde di compressione P effettuata dall'altro estremo della linea sismica con energizzazione (shot) al termine della linea stessa (geofono 72) è riportato in Fig. 4; naturalmente valgono qui ancora le stesse

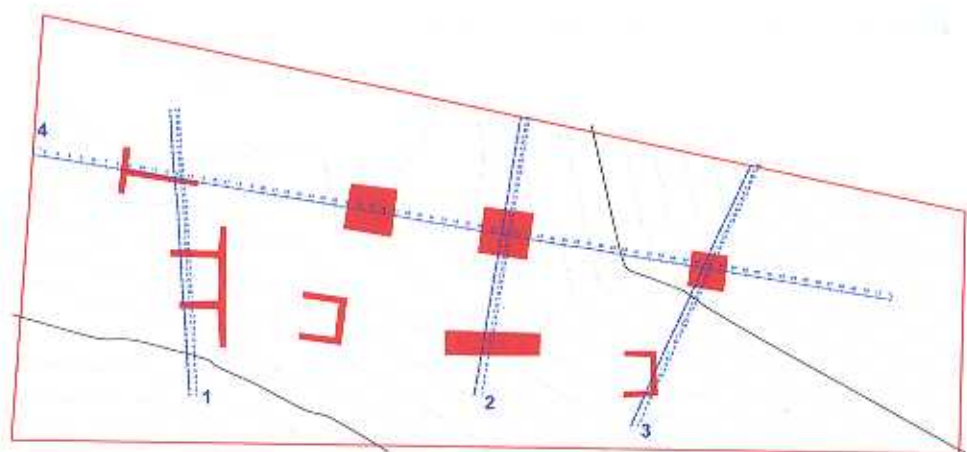


Fig. 1 - Planimetria indagini geofisiche.



Fig. 2 - Sistema elettronico modulare a 120 canali.

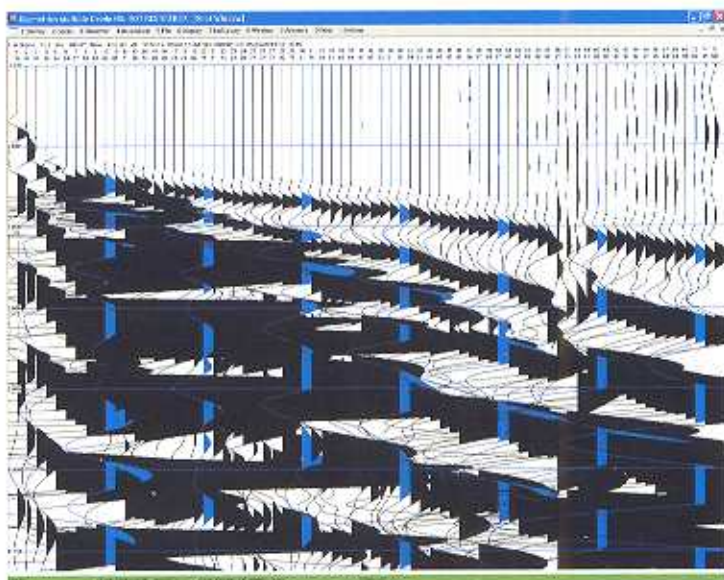


Fig. 3 - Sismogramma da 72 canali con energizzazione sul geofono 1.

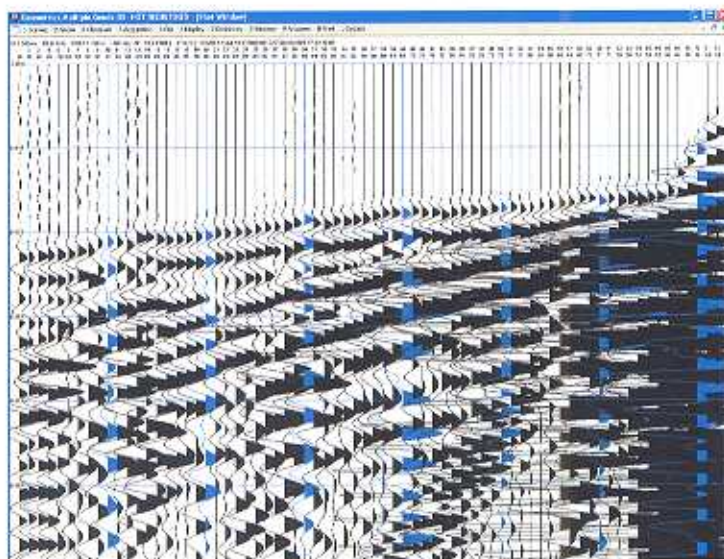


Fig. 4 - Sismogramma da 72 canali con energizzazione sul geofono 72.

considerazioni espresse in merito al precedente sismogramma di Fig. 3 in termini di pulizia del segnale (nel sito in esame non ci sono stati generalmente problemi di acquisizione in quanto l'energia generata era decisamente superiore al rumore di fondo), ritardo comune di acquisizione (delay) e anomalia con ritardo dei tempi (in questo caso appena accennato) tra i geofoni 56 e 58.

2.2. *Dromocrone*

Passando da considerazioni relative ai singoli sismogrammi al grafico spazio-temporale (dromocrone) che si ottiene dalla correlazione dei tempi di arrivo delle onde P (first break pick) di ciascuna traccia di ogni energizzazione effettuata, si fa rilevare come, per ciascuna linea sismica, sia stata realizzata una estrema «copertura» (shot ogni 3-4 metri) necessaria per poter effettuare anche un'analisi elaborativa di tipo tomografico (per celle analitiche di dimensione submetrica).

Osservando le dromocrone della linea sismica 4 (Fig. 5) nel loro insieme è subito evidente, in prima analisi, che si rilevano settori a comportamento anormale (cerchiati).

Anche senza sapere di cosa si tratta (cioè quale «bersaglio» noto è stato interessato), si rileva subito che nel settore di sinistra l'anomalia cerchiata è determinata da un corpo a velocità più elevata di quella del terreno circostante (settore con incremento minore dei tempi delle dromocrone) mentre nel settore di destra si rileva invece un materiale con velocità inferiore rispetto a quella del terreno incassante («picchi» con locale incremento dei tempi delle onde di compressione).

Altro esempio significativo che si può rilevare, sempre dall'osservazione delle sole dromocrone, è quello relativo alla diagrafia spazio-temporale delle onde di compressione della linea 1 (Fig. 6) dove si può soprattutto notare una evidente anomalia in corrispondenza del settore cerchiato e relativa ad un corpo sepolto con velocità più elevata di quella del terreno incassante.

Nella linea 2 si possono notare (Fig. 7), dalle dromocrone delle onde di compressione, anomalie diffuse ma a minor evidenza rispetto alle precedenti.

Nella linea 3 si nota invece (Fig. 8), sempre dalle dromocrone delle onde di compressione, soprattutto una marcata anomalia nel settore centrale di sezione (cerchiato) e relativa ad un settore a bassa velocità (caratterizzato cioè da «picchi» che presentano un locale incremento dei tempi delle onde di compressione) immerso in un terreno incassante più veloce.

Nella Fig. 9, relativa alle dromocrone delle onde di taglio effettuate sulla linea 4, si può notare come anche questo tipo di onde sismiche sia significativamente influenzato dai «bersagli» predisposti nel terreno.

La zona cerchiata in rosso, ad esempio, si riferisce ad una cavità ed è analoga a quella già riscontrata ed evidenziata sulle onde di compressione realizzate sulla stessa linea (vedasi dromocrone di Fig. 5).

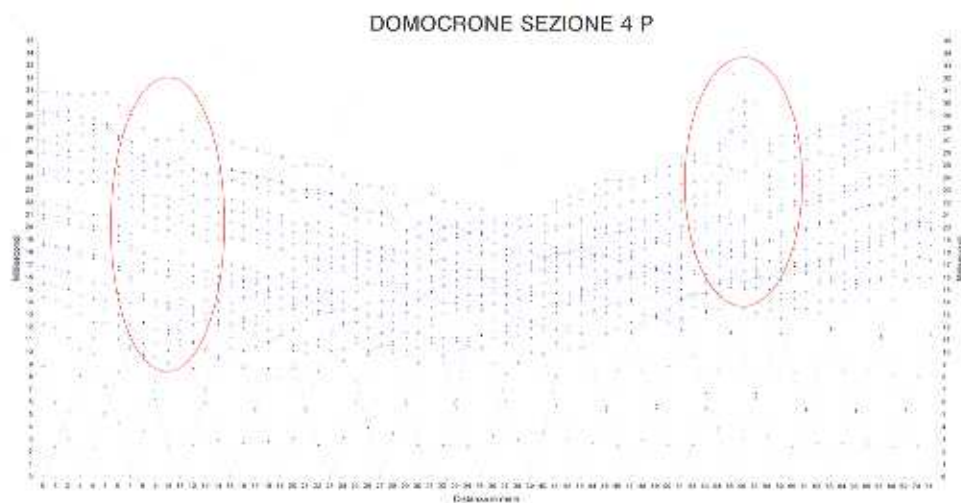


Fig. 5 - Dromocrone onde di compressione linea 4.

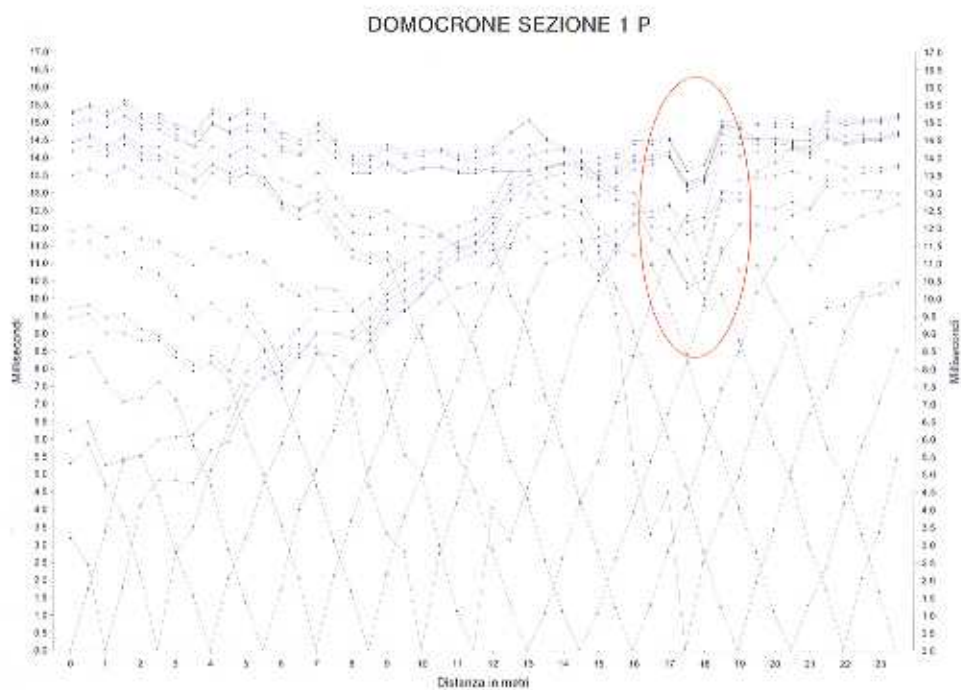


Fig. 6 - Dromocrone onde di compressione linea 1.

DOMOCRONE SEZIONE 2 P

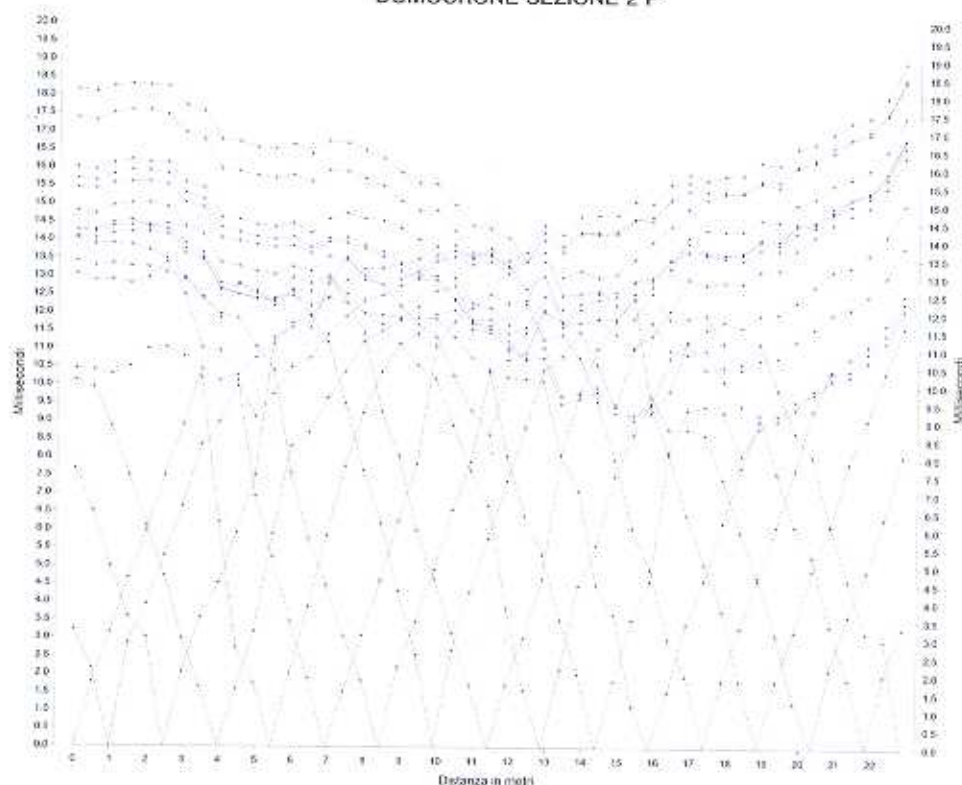


Fig. 7 - Dromocrone onde di compressione linea 2.

Si può notare in questo caso che le onde di taglio risentono in maggior misura rispetto alle onde di compressione delle interferenze prodotte dalla variabilità litologica e granulometrica della copertura (materiale morenico a grossi ciottoli presente subito sopra al bedrock calcareo-marnoso) determinando piccoli ma continui «scghezzamenti» delle dromocrone dovuti a frequenti variazioni cinematiche su scala ridotta prodotte dalla presenza dei clasti di dimensioni maggiori e puntualmente marcate nello «scattering» dei tempi anche per l'estrema vicinanza dei sensori in superficie.

2.3. Interpretazione per rifrattori

Passando ora dalla semplice individuazione delle anomalie, o su base sismografica o sulla base delle dromocrone, a quella più complessa di tipo interpretativo dei valori di velocità ricavati dopo aver individuato i primi arrivi (f.b.p.) del-

DOMOCRONE SEZIONE 3 P

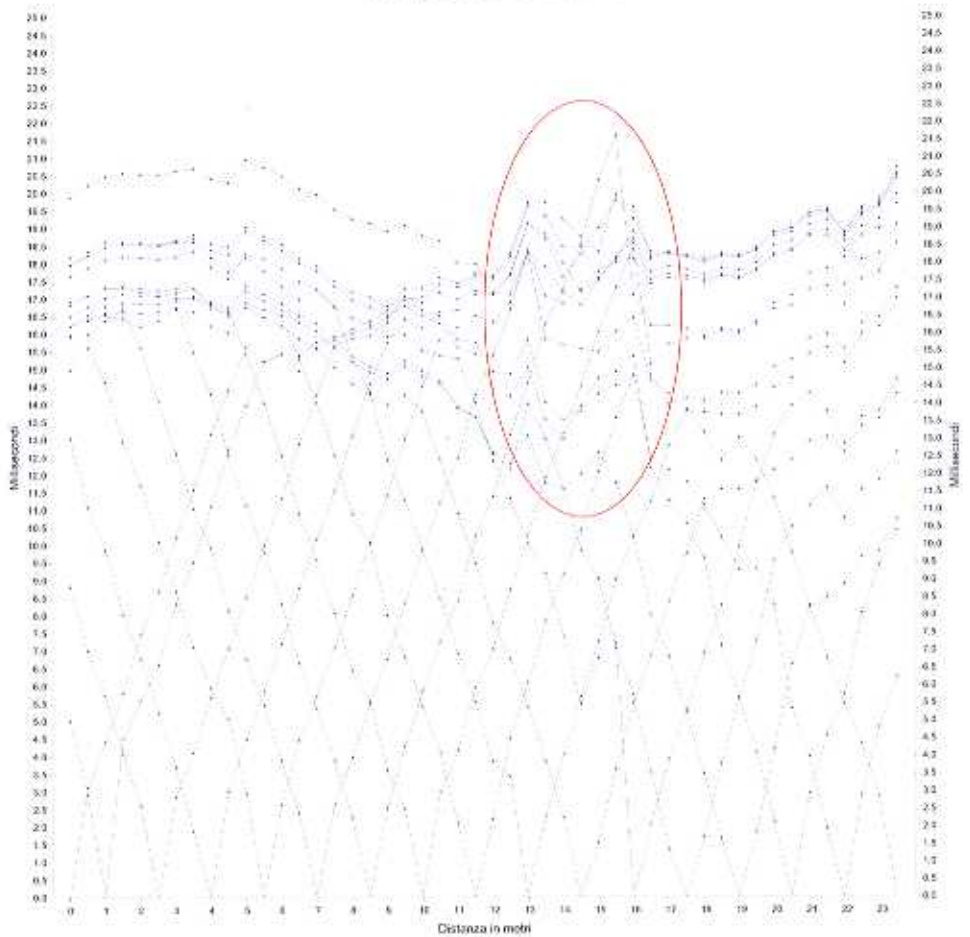


Fig. 8 - Dromocrone onde di compressione linea 3.

l'energia sismica su tutti i geofoni della linea sismica, si può affermare che esistono vari metodi di interpretazione della sismica a rifrazione e che tutti danno buoni risultati (chi più, chi meno) anche perché sono stati testati già da diverso tempo.

In questa sede non verranno presentate tutte le sezioni realizzate ma solo quelle più significative.

Ad esempio, elaborando per rifrattori (analisi bistrato tipo G.R.M.; Palmer D., 1980 – The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Kenneth B. S. Burke*, 104 pp., S.E.G., Tulsa, Oklahoma) la sezione 4 relativa alle onde di compressione si ha un risultato del tipo di quello presentato in Fig. 10.

DOMOCRONE SEZIONE 4 P

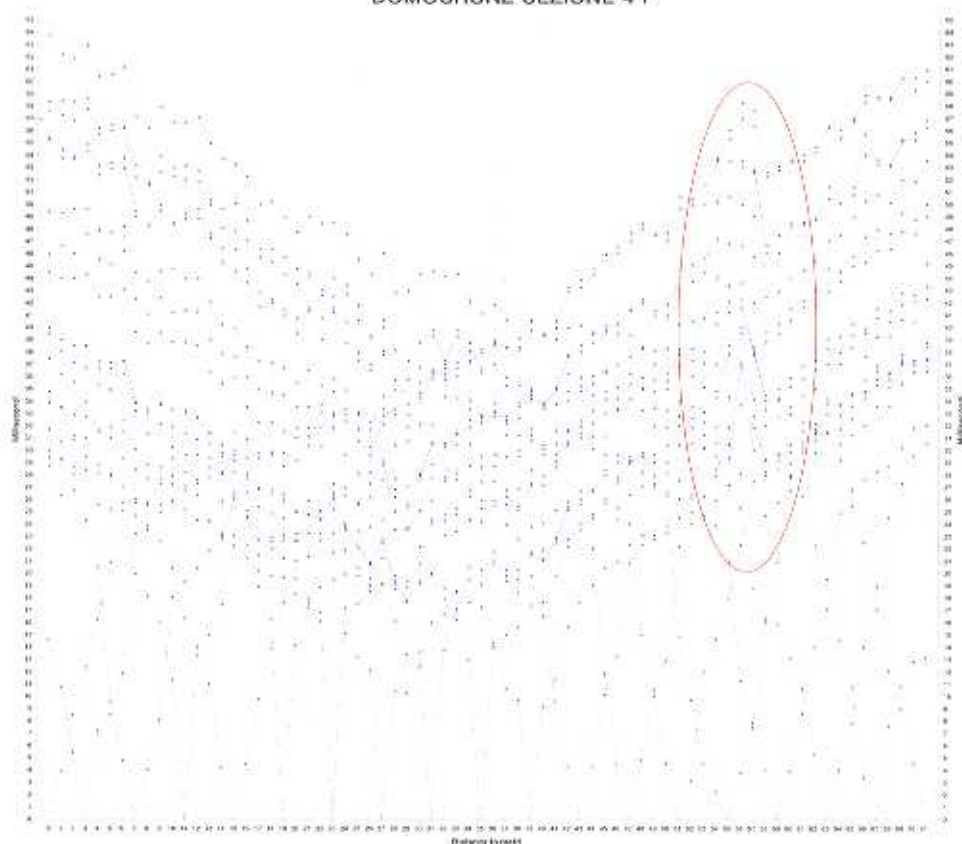


Fig. 9 - Dromocrone onde di taglio linea 4.

Sulla sezione sono stati indicati tutti i geofoni e gli incroci con le altre linee sismiche che sono circa ortogonali a questa; i valori numerici delle velocità sismiche sono espressi in km/sec mentre la linea rossa presente sulla sezione è il principale rifrattore che ha un andamento continuo, subparallelo alla superficie topografica e corrisponde indicativamente al tetto del substrato calcareo-marnoso.

Sulla sezione è stata riportata anche la posizione dei singoli bersagli noti; a tal proposito si può notare che la loro presenza, interferendo con il tetto del bedrock, ha innalzato lievemente ma significativamente la quota (profondità) del rifrattore.

In effetti questi bersagli noti sono costituiti rispettivamente da un muro, e da due platee in cemento quindi da materiale compatto anche se la loro posizione non è ottimale per essere discriminati correttamente poiché si tratta di ogget-

SEZIONE SISMICA 4 VELOCITÀ DI COMPRESSIONE

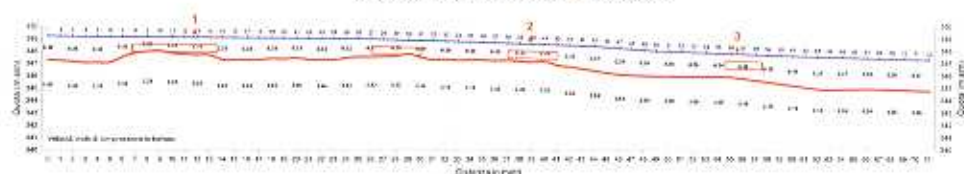


Fig. 10 - Sezione sismica 4 - Interpretazione G.R.M. onde di compressione.

SEZIONE SISMICA 4 VELOCITÀ DI COMPRESSIONE

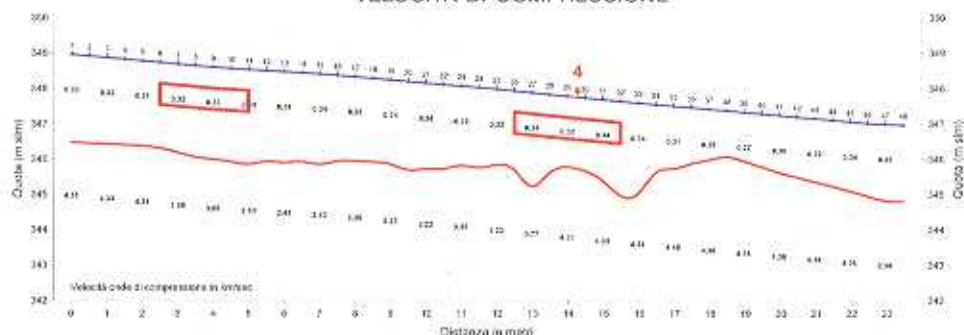


Fig. 11 - Sezione sismica 3 - Interpretazione G.R.M. onde di compressione.

ti a velocità relativamente alta posizionati subito sopra all'interfaccia copertura detritica-roccia.

La linea 4 intercetta nella sua parte terminale anche una anomalia nota costituita da una cavità riempita da polistirolo.

La sismica a rifrazione con interpretazione classica per rifrattori in questo caso non discrimina l'oggetto. In effetti non potrebbe essere altrimenti in quanto la velocità del terreno che ingloba la cavità è del tutto simile a quella del vuoto nell'aria e, molto probabilmente, a quella del polistirolo.

Se però diminuiamo la distanza intergeofonica a 50 cm come è stato realizzato sulla linea sismica 3 (Fig. 11) l'influenza della cavità crea una innaturale inflessione del rifrattore in corrispondenza dello stesso bersaglio mentre la fossa riempita con argilla, che è il bersaglio di sinistra, non viene comunque discriminata.

2.4. Interpretazione tomografica

I dati sismici possono essere interpretati anche con un metodo ormai comunemente acquisito e noto già da circa una decina di anni, ovvero con tecnica tomografica.

Per l'elaborazione tomografica sono necessari, ai fini di ottenere un buon risultato, un numero di tiri decisamente superiore rispetto a quelli necessari per l'interpretazione classica per rifrattori.

Il programma elaborato dalla Progeo S.r.l. permette di visualizzare in ogni momento lo stato dell'elaborazione; i principali step possono essere così riassunti.

La Fig. 12 illustra la prima fase di elaborazione. In questa immagine si possono notare nella porzione superiore le dromocrone e nella porzione inferiore il profilo topografico (le due immagini rappresentate non sono in scala).

Inizialmente è necessario impostare i parametri relativi alla cella unitaria minima di analisi tomografica che si intende utilizzare.

Da esperienze di elaborazione su molteplici siti d'indagine relative agli ultimi dieci anni possiamo affermare che i risultati migliori si ottengono con una cella elementare le cui misure sono approssimativamente la metà della distanza intergeofonica in larghezza e circa $\frac{1}{4}$ della distanza intergeofonica in profondità.

Quindi nel caso qui considerato della sezione 4 relativa alle onde di compressione la dimensione della cella minima unitaria utilizzata è stata di 50 cm in larghezza e di 20 cm in profondità.

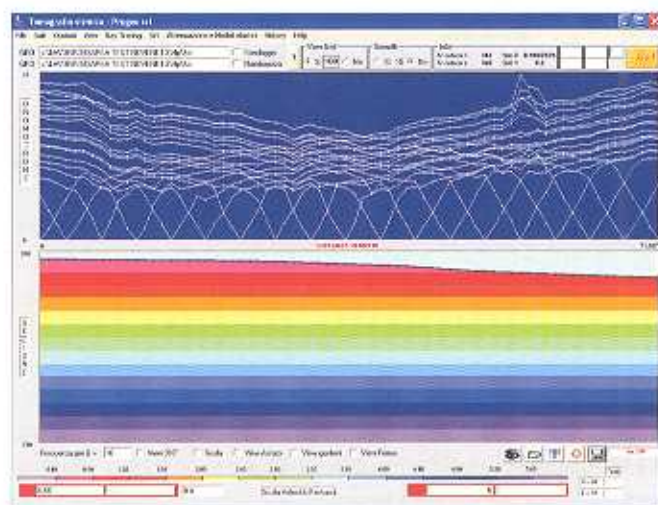


Fig. 12 - Software sismica tomografica Progeo - Modello iniziale.

Stabilito ciò si prosegue facendo realizzare al programma un ray tracing (Fig. 13), cioè vengono tracciati dall'elaboratore i singoli tragitti dell'onda sismica da ogni punto di shot fino ad ogni ricevitore sulla base di una prima modellazione in velocità del sottosuolo.

Ultimata questa fase, la quale necessita di un tempo che è funzione della quantità di dati da elaborare (numero di dromocrone, numero di geofoni della linea

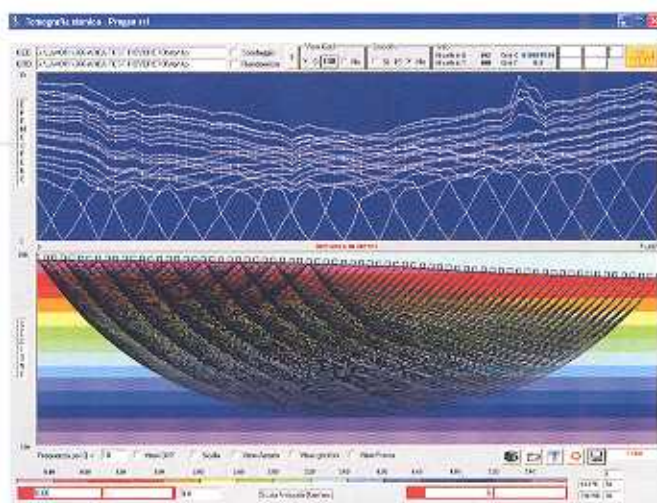


Fig. 13 - Software sismica tomografica Progeo - Ray tracing.

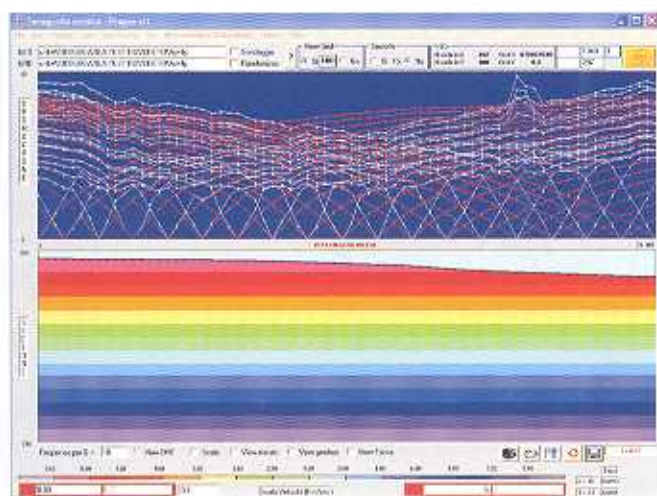


Fig. 14 - Software sismica tomografica Progeo - Dromocrone calcolate.

sismica, ma soprattutto numero di celle in cui è suddivisa la porzione di terreno da analizzare – per questa linea sono stati necessari una decina di minuti –) appaiono a monitor le dromocrone fittizie ottenute dall'elaborazione del modello di velocità preimposto.

Naturalmente, i dati calcolati non corrispondono esattamente a quelli delle dromocrone reali cioè le dromocrone che appaiono in Fig. 14 di colore rosso differiscono dalle dromocrone reali (in bianco).

Il software a questo punto varia la velocità delle singole celle finchè le dromocrone fittizie coincidano con quelle reali (raggiungendo una tolleranza stati-

stica media dell'insieme dei dati inferiore allo 0.5%). Per tale fase di elaborazione può essere necessaria anche qualche ora, in funzione della quantità di dati da affinare e da far convergere ma soprattutto dello «scattering» maggiore o minore che possono presentare le dromocrone reali.

Terminata l'elaborazione della sezione con il massimo affinamento possibile si ottiene per ogni cella unitaria costituente la sezione in oggetto il valore proprio di velocità tomografica.

Con un semplice software di «contour line» si ottengono sezioni come quella rappresentata nella Fig. 15. L'operatore deve solamente ottimizzare i dati per consentire le migliori facoltà di rappresentazione (definizione della scala della sezione, suddivisione delle countour line, ripartizione delle campiture di colore, ecc.).

In conclusione si ottiene una sezione a curve isocrone alla quale sono associati alle singole velocità sismiche (esprese generalmente in km/sec) partizioni di tonalità diverse di colore; indicativamente, a tonalità più chiare corrispondono minori valori cinematici.

2.5. Differenziale (gradiente) di velocità sismica

È importante rilevare che le risultanze ottenute nella sezione sismica 1 di Fig. 15 sono relative al calcolo dei parametri cinematici all'interno di circa 4000 celle unitarie di dimensione decimetrica nelle quali è stato possibile suddividere l'ammasso investigato mediante l'opportuna definizione di minime spaziature intergeofoniche (0.5 m), copertura dettagliata (shot ogni 4 geofoni) e da un estremo all'altro della sezione delle registrazioni sismiche.

Conoscendo perciò sia la posizione delle singole celle unitarie sia il valore di velocità sismica tomografica della cella stessa è possibile elaborare sezioni particolari come quella della Fig. 16 che esprime il differenziale (gradiente) di velocità sismica tomografica fra una cella e quella ad essa sottostante.

Nella sezione 1 rappresentata in tale figura, si sono associati a gradienti elevati di velocità cromatismi più scuri mentre bassi differenziali tra celle analitiche sono caratterizzati da cromatismi più chiari.

Mediante tale elaborazione dei parametri cinematici è stato possibile individuare due orizzonti significativi (principali discontinuità fisico-meccaniche) dei quali quello più superficiale coincidente sostanzialmente al rifrattore individuato con l'analisi G.R.M. mentre quello rilevato a maggior profondità risulta non più subparallelo alla superficie topografica come quello sovrastante.

In sostanza, in questa sezione sismica 1 elaborata mediante analisi tomografica e di gradiente, si può, con buona approssimazione, indicare che l'orizzonte superiore corrisponde al «Bedrock Litologico» mentre quello inferiore al «Bedrock Geofisico».

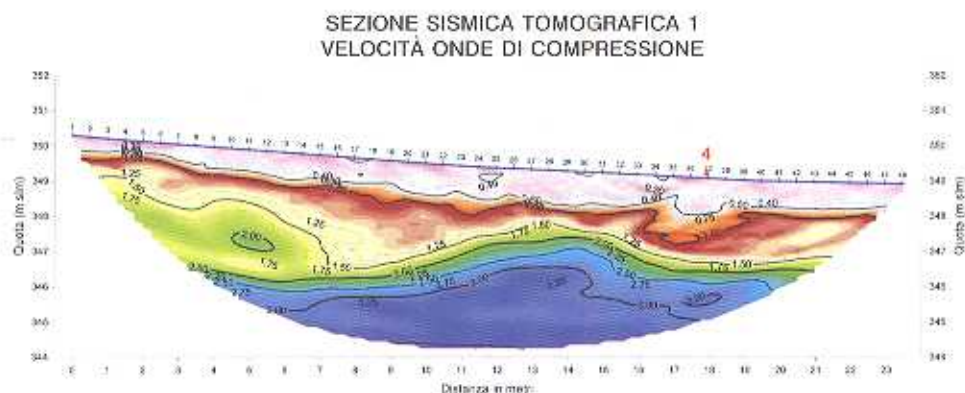


Fig. 15 - Sezione sismica tomografica 1 - Velocità onde di compressione.

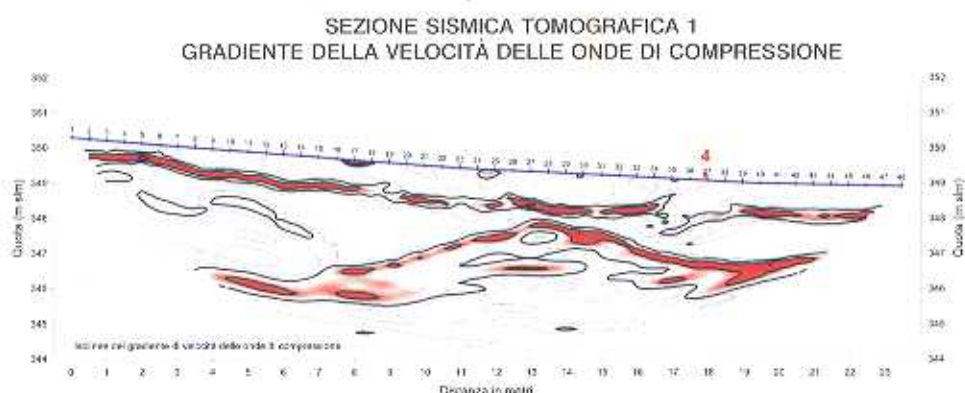


Fig. 16 - Sezione sismica tomografica 1 - Gradiente velocità onde di compressione.

In altre parole, l'orizzonte superiore indica il passaggio fra la copertura detritica superficiale morenica e/o alluvionale ed il calcare-marnoso del substrato roccioso («Biancone») mentre l'orizzonte inferiore separa, all'interno dello stesso substrato litologicamente analogo, una porzione superiore a contatto con i sedimenti di copertura (che presenta un elevato grado di fratturazione e/o alterazione) da un materiale roccioso più profondo e mediamente meno fratturato.

La Fig. 17 mostra l'aspetto della linea sismica 2 ottenuto dall'elaborazione tomografica espressa in velocità sismica (porzione superiore) ed in gradiente di velocità (porzione inferiore) delle onde di compressione; come nella precedente sezione sismica 1 è interessante notare, nella porzione inferiore della figura, la presenza di due orizzonti di discontinuità fisico-meccanica principali (cromatismi più scuri) e riconducibili molto probabilmente anche in questo caso al be-

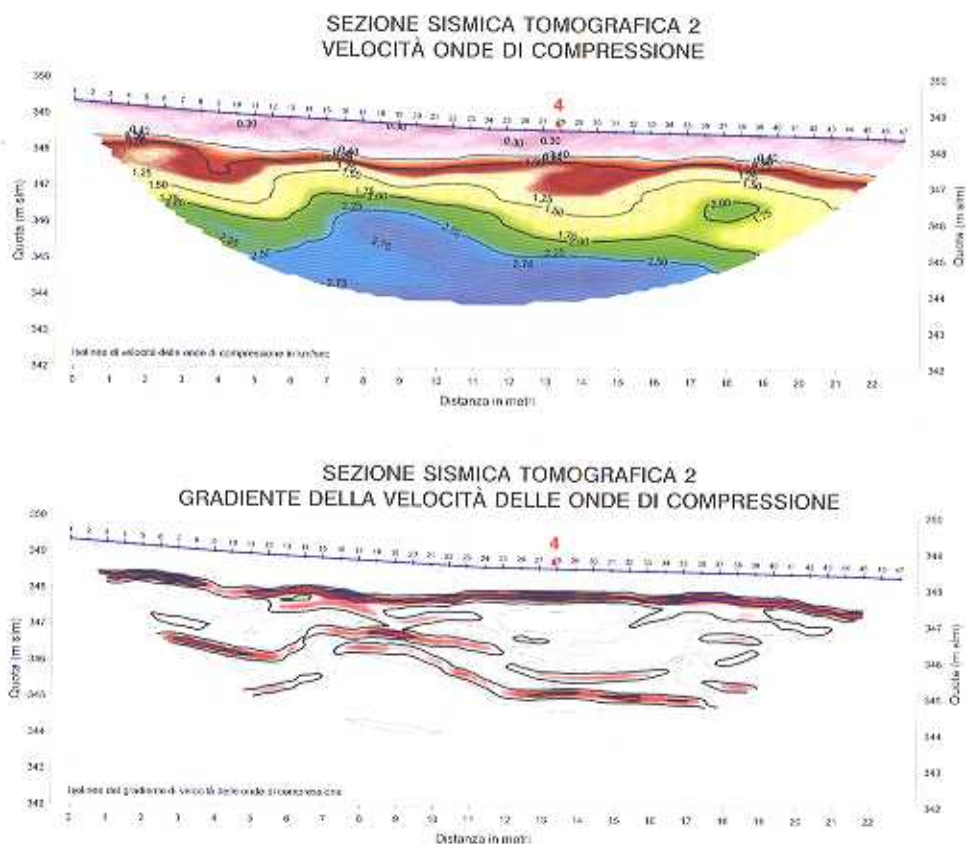


Fig. 17 - Sezione sismica tomografica 2 - Velocità e Gradiente onde di compressione.

drock litologico (gradiente più superficiale) e al bedrock geofisico (gradiente più profondo).

La Fig. 18 riporta, con le stesse modalità di rappresentazione viste in precedenza, l'elaborazione tomografica in velocità e in gradiente della sezione sismica 3.

In questo caso si rileva la relativa maggior profondità, rispetto alle precedenti sezioni sismiche, del bedrock litologico sia in termini di velocità sia in termini di gradiente ed inoltre il bedrock geofisico appare meno marcato delle sezioni precedenti e ben evidente solo nella prima metà di sezione.

La Fig. 19 mostra la sezione sismica 4 sempre con la rappresentazione in velocità e in gradiente; in questo caso si fa rilevare che il dettaglio tomografico risulta la metà rispetto alle sezioni sismiche precedenti in quanto la distanza intergeofonica, pur minima, è il doppio (1 m) di quella adottata per le altre sezioni che intersecano trasversalmente la suddetta linea.

Essendo, tale allineamento, di lunghezza superiore (72 m) e coperto per intero dai «tiri» di energizzazione anche la profondità raggiunta dall'indagine è decisamente superiore rispetto alle precedenti linee sismiche (anche se per gli scopi della ricerca non era in questo caso significativa trattandosi dell'analisi di «bersagli» noti a livello subsuperficiale).

La geometria d'investigazione dei raggi sismici mediante elaborazione tomografica consente il raggiungimento di profondità massime al centro della sezione (come si vede la figura geometrica della sezione sismica è assimilabile a quella di un trapezio con la base maggiore in superficie) di circa 1/4-1/6 della lunghezza dell'allineamento in superficie considerando che questo sia stato in-

teramente coperto da un estremo all'altro dal « tiro » sismico. Considerando inoltre che per l'elaborazione tomografica si utilizzano, come precedentemente esposto, celle di analisi di larghezza coerente con la geometria d'indagine ed approssimativamente con larghezza pari alla metà della spaziatura ed altezza pari ad un quarto di questa, l'analisi della sezione sismica 4 ha interessato un totale di circa 8400 celle unitarie di dimensione decimetrica.

Nella rappresentazione tomografica è ben evidente il bedrock litologico (con forte contrasto di velocità e gradiente) mentre quello geofisico sottostante all'interno del substrato roccioso è decisamente meno marcato e anzi, in questa sezione sismica 4, l'incremento di velocità delle onde di compressione appare graduale con l'aumentare della profondità (l'ammasso calcareo-marnoso risulta cioè in questo settore sostanzialmente più omogeneo senza significative o ben delineate differenziazioni dal punto di vista meccanico, di fratturazione o di alterazione).

Più interessante dal punto di vista geognostico risulta la stessa sezione sismica 4 rilevata mediante le onde di taglio (S) soprattutto se consideriamo la ricerca dei corpi sepolti oggetto primario dell'indagine geofisica (Fig. 20).

Infatti, se inseriamo nella rappresentazione tomografica in velocità e in gradiente anche la posizione dei bersagli noti si può rilevare che in corrispondenza degli stessi sono presenti delle anomalie più o meno accentuate.

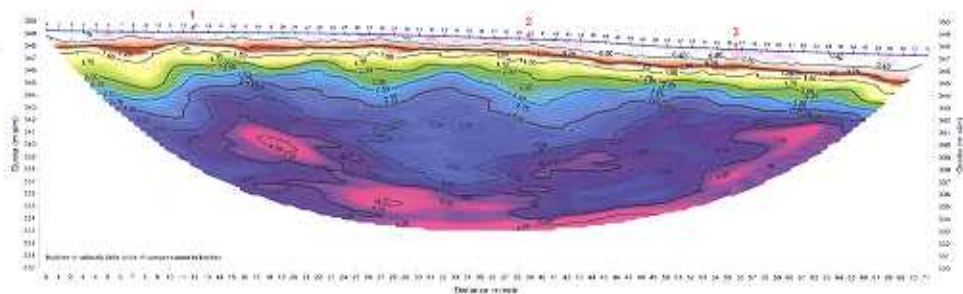
In corrispondenza delle solette in calcestruzzo si ha un parziale innalzamento dei valori cinematici e decisamente più evidente risulta l'anomalia («positiva») in corrispondenza della cavità posizionata all'intersezione delle linee sismiche 3 e 4.

Anche in questo caso si è analizzato il gradiente della velocità delle onde di taglio il quale ha definito anch'esso la discontinuità fisico-meccanica del bedrock litologico (contatto copertura-substrato) nell'intorno delle stesse profondità determinate dalle onde di compressione della sezione 4 presentata nella precedente Fig. 19.

Analoghi appaiono anche i risultati con la precedente sezione ad onde P per quanto riguarda il bedrock geofisico di separazione all'interno del substrato roccioso tra materiale a diverso stato di fratturazione e/o alterazione, il quale non sempre è evidente (materiale sostanzialmente omogeneo) e dove è presente, come specialmente agli estremi di sezione, si rileva a profondità limitate poco sotto la discontinuità più superficiale.

In Fig. 21 è riportata, a titolo indicativo, una rappresentazione di come possa essere utilizzato il gradiente di velocità su grande scala. In questa figura, presentata con tecnica ad ombreggiatura («shaded relief») è presentata una sezione della lunghezza di 700 metri di un rilievo sismico a rifrazione ad onde P con elaborazione tomografica il cui scopo era la ricerca lungo un versante alpino del contatto tra copertura detritico-morenica e bedrock e la cui profondità è risultata tra 50 e 70 metri dal p.c.

SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 4 VELOCITÀ ONDE DI COMPRESSIONE



SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 4 GRADIENTE DELLA VELOCITÀ DELLE ONDE DI COMPRESSIONE

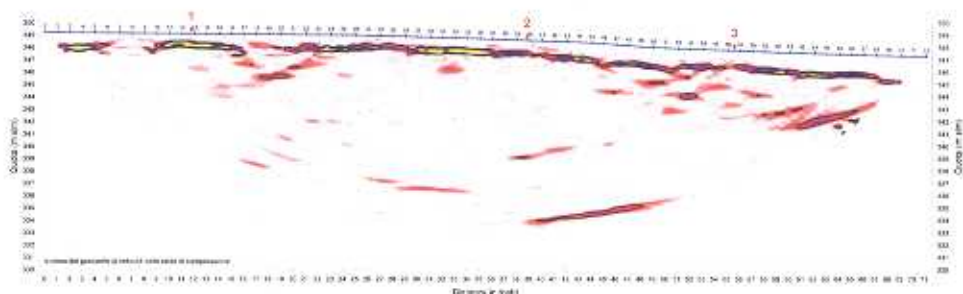


Fig. 19 - Sezione sismica tomografica 4 - Velocità e Gradiente onde di compressione.

2.6. Attenuazione sismica

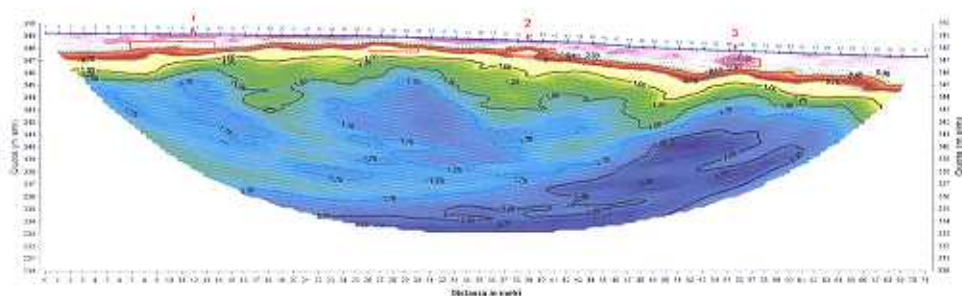
Oltre allo studio dei parametri cinematici, un'indicazione sintetica delle caratteristiche fisiche e dello stato dei materiali è offerta pure dall'analisi delle frequenze dei segnali sismici che si propagano entro l'ammasso investigato.

È noto che più ci si allontana dalla sorgente di energia più il segnale sismico si attenua in frequenza.

L'attenuazione sismica consiste nella misura della perdita in frequenza di un segnale sismico con l'aumentare della distanza fra il punto di shot ed i vari ricevitori.

In Fig. 22 è sinteticamente riportata la descrizione e le relative funzioni del metodo del rapporto spettrale che normalmente viene utilizzato per determinare l'attenuazione (Vassiliou M. S., Salvado C. A., Tittmann B. R., 1984 - «Seismic attenuation» in: Handbook of Physical Properties of Rocks, Ed. Carmicha-

SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 4
VELOCITÀ ONDE DI TAGLIO



SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 4
GRADIENTE DELLA VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO

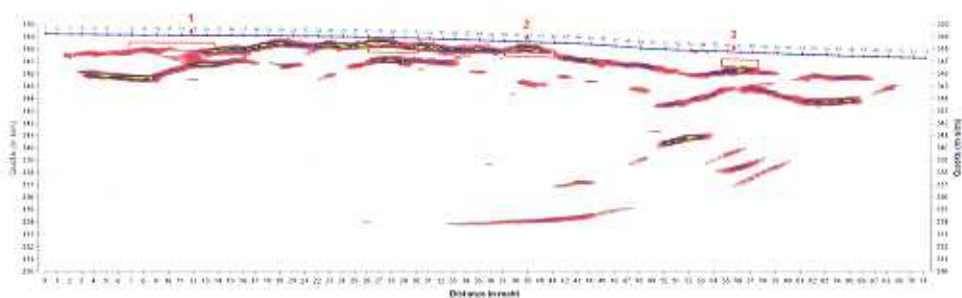


Fig. 20 - Sezione sismica tomografica 4 - Velocità e Gradiente onde di taglio.

LINEA SISMICA TOMOGRAFICA 5
ANALISI DEL GRADIENTE DI VELOCITÀ



Fig. 21 - Esempio di sezione a grande scala in gradiente di velocità onde di compressione.

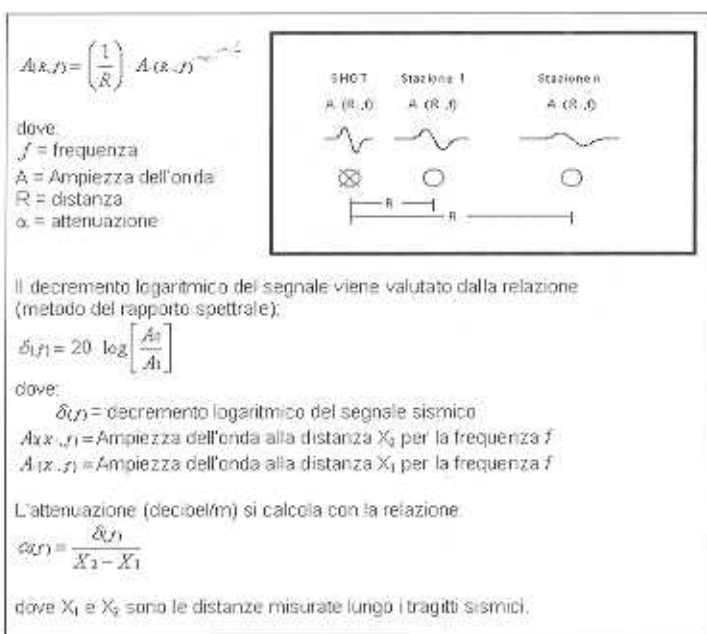


Fig. 22 - Definizione di attenuazione sismica.

ed R. S., Volume III, Chapter 5, 295-328, 21 figg., 12 tavv., C.R.C., Boca Raton, Florida).

In pratica l'attenuazione di un segnale sismico è direttamente proporzionale all'ampiezza del segnale ed inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente.

L'analisi dell'attenuazione viene effettuata per ogni energizzazione e per ciascun geofono di registrazione del segnale utilizzando gli stessi picking dei primi arrivi rifratti e procedendo nell'elaborazione dei dati di attenuazione come se si trattasse di valori di velocità e analogamente il programma calcola per ogni singola cella unitaria tomografica il valore ottimale di attenuazione per successivi affinamenti affinché i dati del modello impostato convergano con quelli reali misurati sui sismogrammi.

Il risultato finale è una sezione tomografica in attenuazione del segnale sismico analoga a quella del parametro cinematico (ovviamente con termini numerici diversi e possibilità di ulteriori differenziazioni del materiale investigato).

Nella Fig. 23 della sezione sismica 1 è riportata la sezione tomografica in attenuazione delle onde P.

Si può notare come anche la sezione in attenuazione rilevi settori caratterizzati da valori più o meno anomali nel contesto dell'ammasso nei quali si inseriscono abbastanza bene i bersagli sepolti.

Nella sezione sismica 3, rappresentata in Fig. 24, si può poi notare come il bersaglio noto (cavità con polistirolo) venga messo meglio in evidenza mediante il parametro sismico dell'attenuazione piuttosto che con quello cinematico poiché l'impulso sismico non propagandosi nel vuoto ma percorrendo il bordo esterno della cavità subisce solo un lieve ritardo in termini di velocità mentre lo stesso segnale sismico si manifesta in maniera molto diversa se adiacente ad un vuoto (max attenuazione) o ad un materiale compatto.

I valori di attenuazione possono essere rappresentati anche in maniera tridimensionale soprattutto per far risaltare i principali dati anomali; un esempio, riferito sempre alla sezione sismica 3, è riportato in Fig. 25 nella quale si nota con maggior efficacia il settore (cavità) caratterizzato da più alti valori di attenuazione rispetto all'insieme dei dati d'ammasso.

La Fig. 26 rappresenta la sezione sismica 4 elaborata in attenuazione delle onde di compressione.

Come nella precedente sezione 3 a questa ortogonale, si rileva anche in tale sezione, seppur con minor intensità, l'effetto attenuante del polistirolo; inoltre si può anche evidenziare un effetto contrario (minor attenuazione) in settori nei quali sono presenti gli altri bersagli noti a maggior compattezza.

È altresì importante notare come questo tipo di analisi metta in evidenza in maniera significativa anche le zone a più elevata fratturazione del substrato roccioso, dove cioè il segnale sismico manifesta un maggior attenuazione attraversando settori meno compatti e più degradati del bedrock.

Tale metodologia (analisi oltre che in velocità anche in attenuazione del segnale sismico) è perciò veramente indicata per determinare lo stato di consistenza e fratturazione del materiale specialmente se l'ammasso è caratterizzato, nel suo complesso, da valori di velocità globalmente elevati dove cioè i soli valori cinematici, essendo poco differenziati per aumento generalizzato del carico litostatico, possono non mostrare significative discriminazioni.

A tal proposito si riporta, a titolo indicativo, una sezione profonda realizzata sull'Appennino bolognese alcuni anni fa (Fig. 27).

Tale sezione è stata realizzata a supporto della progettazione di una Galleria di servizio (indicata in sezione e in asse a questa); in tale sezione le profondità d'investigazione sono risultate di qualche centinaio di metri e, per analisi di questa ampiezza, le distanze intergeofoniche non erano come nel caso dell'area test in esame di 1 metro bensì tra 10 e 20 metri.

Nonostante questa differenza di dettaglio, avendo ugualmente a disposizione lungo tutta la sezione un numero di canali sufficientemente ampio per poter determinare le variazioni di segnale tra settori diversi dell'ammasso, si possono rilevare con efficacia pattern tomografici attribuibili ad una tettonica strutturale fondamentalmente caratterizzata da faglie alle quali sono associate fasce cataclastiche di materiale lapideo; tali settori fortemente fratturati sono evidenziabili

SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 3
COEFFICIENTE DI ATTENUAZIONE

Fig. 25 - Rappresentazione tridimensionale del Coefficiente di attenuazione della linea sismica tomografica 3.

Topographic map of the area around the 'S. Maria' church in the municipality of S. Maria del Giudice. The map shows elevation contours, roads, and the church location. The map is oriented with North at the top. The church is located in the upper right quadrant of the map. The map includes a scale bar and a north arrow.

101

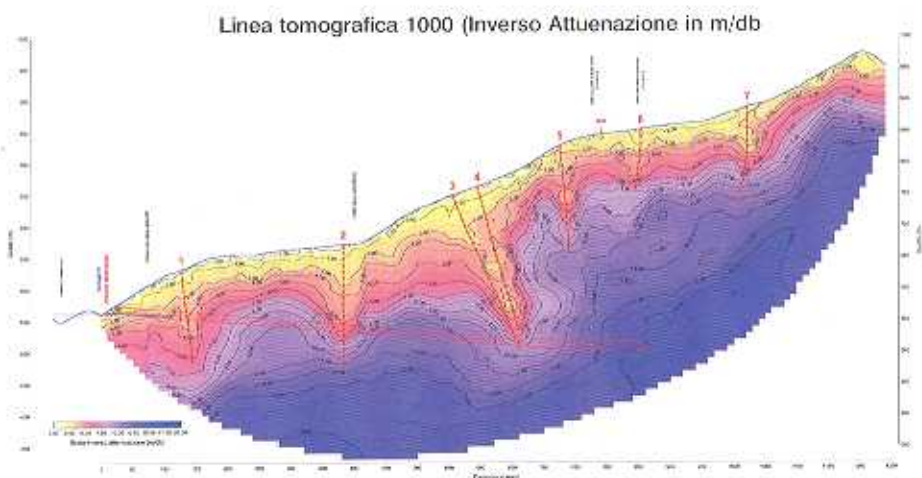


Fig. 27 - Esempio di sezione a grande scala in attenuazione delle onde di compressione.

soprattutto mediante l'analisi dell'attenuazione (quindi nel dominio delle frequenze) piuttosto che nell'analisi della velocità delle onde di compressione (quindi non nel dominio dei tempi), appunto per il fatto che i valori cinematici risultano, specie verso le maggiori profondità investigate, sempre piuttosto elevati.

3. GEORADAR

In maniera complementare all'indagine sismica appena illustrata sono stati altresì realizzati 4 stendimenti georadar esattamente coincidenti con gli allineamenti di geofoni.

L'apparecchiatura utilizzata è stata un georadar G.S.S.I. SIR 3000 accoppiato con un'antenna da 400 Mhz.

Considerata la minima profondità (entro il metro) dei bersagli sepolti, la tecnica georadar si presta molto bene ad essere utilizzata in casi come questi.

Si riconosce comunque anche al rilievo sismico (e gli esempi precedentemente illustrati ne sono la prova), specialmente se di estremo dettaglio e di tipo tomografico e polivalente (analisi complementare di vari parametri come V_p , V_s , attenuazione, ecc.), una valenza significativa seppur, in questi casi, non sempre ottimale in quanto coinvolge uno spazio investigativo decisamente più ampio (normalmente metri e decine di metri fino, come si è visto, a centinaia di metri di profondità).

A livello subsuperficiale la tecnica georadar risulta quindi più immediata e di maggior praticità in quanto l'apparecchiatura utilizzata permette di ottenere,



Fig. 28 - Radar-gramma linea 4.

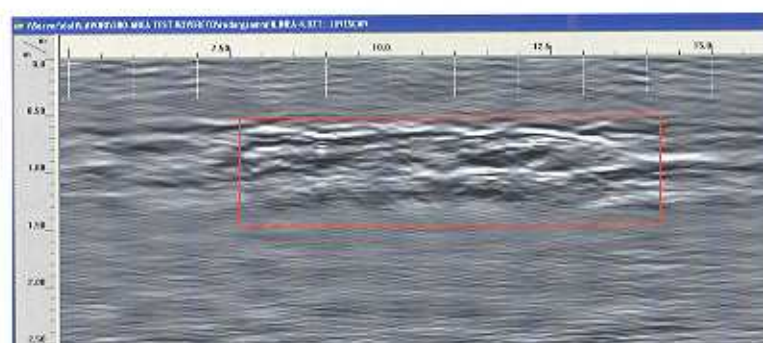


Fig. 29 - Radar-gramma di dettaglio della linea 4 relativo all'anomalia generata dal muro in sassi, malta ed intonaco.

praticamente in tempo reale, sezioni come quella di Fig. 28 (realizzata esattamente in coincidenza con la linea sismica 4) dove sono rilevabili efficacemente, direttamente sul radar-gramma, alcuni motivi attribuibili ai bersagli sepolti (contrassegnati da rettangoli rossi).

Procedendo da sinistra verso destra il primo è riconducibile ad un muro, il secondo e il terzo a due platee ed il quarto alla cavità riempita di polistirolo.

All'estrema destra del radar-gramma si rileva altresì una quinta anomalia la quale può essere riconducibile o ad un bersaglio sepolto non cartografato o ad un'anomalia litologica della copertura. Nelle figure seguenti si riportano in dettaglio i settori del radar-gramma di Fig. 28 con le anomalie riscontrate contrassegnate da rettangolo rosso.

Nella Fig. 29 è riportata l'anomalia elettromagnetica generata dal sepolto muro in sassi, malta ed intonaco (anomalia nota posizionata all'estrema sinistra nella Fig. 28).

La Fig. 30 invece rappresenta l'anomalia radar determinata dalla platea in calcestruzzo (seconda da sinistra anomalia nota nella Fig. 28).

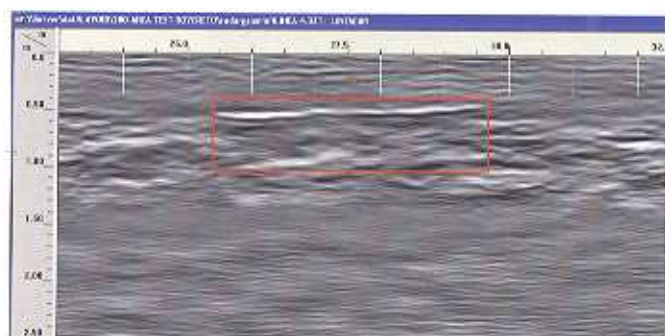


Fig. 30 - Radargramma di dettaglio della linea 4 relativo all'anomalia generata dalla platea in calcestruzzo.

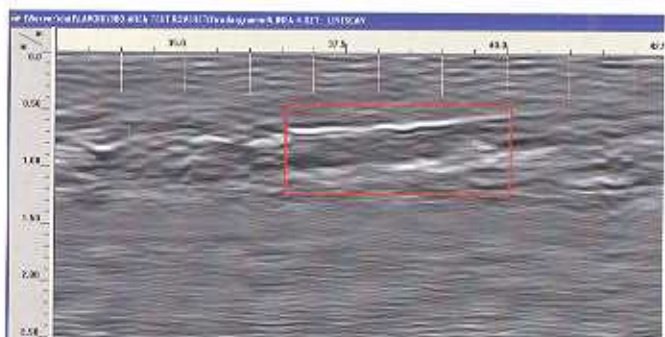


Fig. 31 - Radargramma di dettaglio della linea 4 relativo all'anomalia generata dalla platea in calcestruzzo armato.

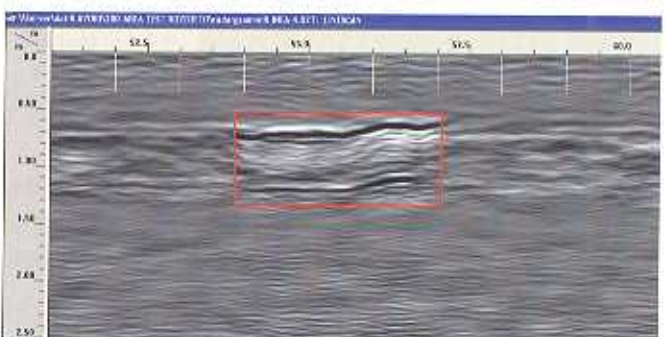


Fig. 32 - Radargramma di dettaglio della linea 4 relativo all'anomalia generata dalla cavità riempita di polistirolo.



Fig. 33 - Radargramma di dettaglio della linea 4 relativo ad anomalia non nota.



Fig. 34 - Radargramma di dettaglio della linea 3 con anomalie di cavità e di paleomorfologia sepolta.

La Fig. 31 si riferisce al dettaglio di radargramma relativo alla platea in calcestruzzo armato (terza da sinistra anomalia nota nella Fig. 28).

La Fig. 32 rappresenta un tratto di radargramma dove è presente l'anomalia determinata dalla cavità riempita di polistirolo (quarta da sinistra anomalia nota nella Fig. 28).

Nella Fig. 33 è riportato il settore dove è riscontrabile l'anomalia radar dovuta o ad un bersaglio sepolto non cartografato o ad un'anomalia litologica della copertura (quinta ed ultima da sinistra anomalia non nota nella Fig. 28).

Si presenta infine un particolare di dettaglio del radargramma realizzato esattamente in coincidenza della linea sismica 3 (Fig. 34) nel quale si evidenziano almeno due anomalie significative (settori marcati da quadrati rossi); quella nel tratto centrale di radargramma è relativa al bersaglio noto costituito dalla cavità riempita di polistirolo (vedasi anche Fig. 32), mentre la seconda è di incerta attribuzione, molto probabilmente si tratta di una paleomorfologia sepolta.

Indirizzo dell'autore:

Progeo s.r.l. - Via Talere 10/8, 47100 Forlì - Tel 0543 723580 - Fax 0543 721486

E-mail: progeo@tin.it