

# Un'applicazione della metodologia sismica tomografica per lo studio di un problema di geologia urbana

Patrizio Torrese<sup>1</sup>, Mario Luigi Rainone<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DiGAT – Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio - Università "G. D'Annunzio" di Chieti-Pescara, Campo Universitario, Via dei Vestini 30, 66013 Chieti Scalo.

Autore Corrispondente. Tel: +39-0871-3556160. Fax: +39-0871-3556146. E-mail: p.torrese@unich.it

<sup>2</sup>DiGAT – Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio - Università "G. D'Annunzio" di Chieti-Pescara, Campo Universitario, Via dei Vestini 30, 66013 Chieti Scalo. E-mail: rainone@unich.it

## *An application of seismic tomography method for the study of an urban geology problem*

**ABSTRACT:** Geophysical methodologies have been used more recurrently within urban geology in the past years. These techniques, when correctly applied, offer a more or less complete frame on the physical and mechanical properties, on discontinuities and on subsurface geometries of investigated mediums. Geophysical prospecting is also used because of its low cost/advantages ratio. It's also capable of overcoming the limits of more classical geognostical investigations (ie. borehole drilling) that, being localised, can often give results which are not univocally interpretable, especially for reconstruction of subsurface geometries in complex scenarios. This work presents an example of the use of high resolution, P wave seismic tomography that has been applied within a study intended to securing an anthropic cavity so as to not represent a threat for human lives and possessions. Instability conditions are due to the poor mechanical conditions of existing lithotypes and the high degree of alteration of the lithologies. Proof of poor structural conditions have been the numerous falls of debris during seismic events (ie. after the seismic event of 1997). Firstly, applicability and intrinsic limitations of the methodology are discussed referring to the medium complexity. Eventually, the acquisition techniques and the data processing are discussed, coadiuvated by the use of direct investigations like geological and structural survey, exploration dig and rotary drilling.

*Key terms:* seismic tomography, urban geology, underground exploration, anthropic cavity

*Termini chiave:* tomografia sismica, geologia urbana, esplorazione del sottosuolo, cavità antropica

## **Riassunto**

Negli ultimi anni si è assistito ad un sempre maggiore utilizzo delle metodologie geofisiche nell'ambito di studi di geologia urbana. Tali metodologie, se correttamente e adeguatamente applicate, consentono di acquisire un quadro più o meno dettagliato sulle caratteristiche fisico-meccaniche dei mezzi indagati, sulla presenza di discontinuità e sulle geometrie del sottosuolo. Inoltre le prospezioni geofisiche sono spesso utilizzate anche in ragione di un buon rapporto costi/benefici e per superare quei limiti propri delle più classiche indagini geognostiche (ad es. sondaggi meccanici) che, per il loro carattere puntuale possono talvolta fornire, soprattutto in contesti geologici complessi, dati non univocamente interpretabili, in particolare per la ricostruzione delle geometrie del sottosuolo.

In questo lavoro viene presentato e discusso un esempio di utilizzo della tecnica di tomografia sismica ad alta risoluzione in onde P applicata nell'ambito dello studio delle condizioni di stabilità e degli interventi di messa in sicurezza per garantire l'incolumità di persone e manufatti,

di una cavità antropica denominata "Grotta di Bedo" situata all'interno del centro storico del comune di Monterchi (AR), Toscana, Italia. Il problema dell'instabilità della cavità è legato principalmente alle non buone caratteristiche meccaniche dei litotipi e all'alto grado di alterazione delle litologie presenti. La precarietà nella quale versa la struttura è testimoniata dagli innumerevoli crolli di materiale verificatisi soprattutto in concomitanza con eventi sismici (come ad esempio successivamente alla crisi sismica del 1997).

In un primo momento vengono discussi applicabilità e limitazioni intrinseche di tale metodologia, in relazione al differente grado di complessità dei materiali. Quindi, vengono illustrate le tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati e discussi i risultati ottenuti avvalendosi anche di indagini dirette come un rilievo geologico, un rilievo strutturale, pozzetti esplorativi e sondaggi a rotazione.

## **1. Introduzione**

La tomografia sismica (Carrion; 1991, Dines et al., 1979;

Doser et alii, 1998; Ladas & Devaney, 1991; Kaczmarz; 1937) permette di ottenere una dettagliata stima della distribuzione di velocità delle onde elastiche nel sottosuolo (Signanini &, Torrese, 2004). Tuttavia, come è noto, tale metodologia è soggetta a limitazioni intrinseche del metodo che riguardano l'utilizzo di algoritmi che ammettono un numero infinito di soluzioni. La necessità, quindi, di utilizzare delle condizioni al contorno che vincolino la risoluzione del problema, fa sì che l'affidabilità della soluzione dipenda dal grado di conoscenza a priori del sottosuolo e, quindi, dalla veridicità del modello concettuale (Signanini &, Torrese, 2004). In secondo luogo il grado delle informazioni ottenibili, risulta essere fortemente legato alla complessità del mezzo in termini di porosità, fratturazione, presenza di vuoti, grado di saturazione. I limiti più evidenti della metodologia si manifestano relativamente ai mezzi più eterogenei (Pasculli et alii, 2002). Un approccio semiquantitativo si può ottenere generalmente in sistemi fisici relativamente semplici, caratterizzati da un alto grado di omogeneità ed isotropia. La lettura in termini di geometria (influenzata dal contrasto di lentezza) è in ogni caso più affidabile rispetto alla quella in termini di velocità. Infatti, anche con una copertura dei raggi adeguata, la velocità calcolata per le zone a maggior lentezza, come ad esempio le cavità, non è affidabile o comunque viene fortemente sovrastimata. In assenza di una copertura adeguata, inoltre, l'anomalia di lentezza (elemento in cui l'indeterminazione della velocità è massima) viene distribuita lungo la direzione dei raggi. Un approccio qualitativo si ottiene nei casi in cui il sistema fisico presenta un certo grado di eterogeneità ed anisotropia ed è caratterizzato da densità, grado di saturazione, porosità, geometria o fratturazione variabile. E' chiaro, inoltre, che le informazioni maggiori, in assenza di copertura adeguata, si hanno in trasmissione per strutture orientate parallelamente alla direzione dei raggi.

Nell'ambito degli interventi per la riduzione del rischio sismico che fanno capo al programma VEL (Valutazione Effetti Locali, Regione Toscana, 2000) della Regione Toscana, è stata effettuata un'indagine tomografica in onde P che ha avuto come finalità, la caratterizzazione in termini di  $V_p$  dell'ammasso roccioso in cui è presente una cavità antropica, attualmente in condizioni di instabilità, denominata "Grotta di Bedo" situata all'interno del centro storico del comune di Monterchi in provincia di Arezzo (fig. 1). Il problema dell'instabilità della cavità è legato principalmente alle non buone caratteristiche fisico-meccaniche e all'alto grado di alterazione delle litologie presenti. La precarietà nella quale versa la struttura è testimoniata dagli innumerevoli crolli di materiale verificatisi soprattutto negli ultimi anni all'interno della grotta. Tali crolli, che sono talvolta avvenuti in concomitanza con eventi sismici (come ad esempio successivamente alla crisi sismica del 1997), ma anche senza apparenti cause scatenanti, pongono in una situazione di pericolo gli abitanti residenti negli edifici situati al di

sopra della cavità. Il presente lavoro si inserisce nella campagna di studi iniziata nel 2001 dal Servizio Sismico della Regione Toscana per valutare la gravità del problema e progettare le opere per il consolidamento della grotta da realizzare per garantire l'incolumità di persone e manufatti.

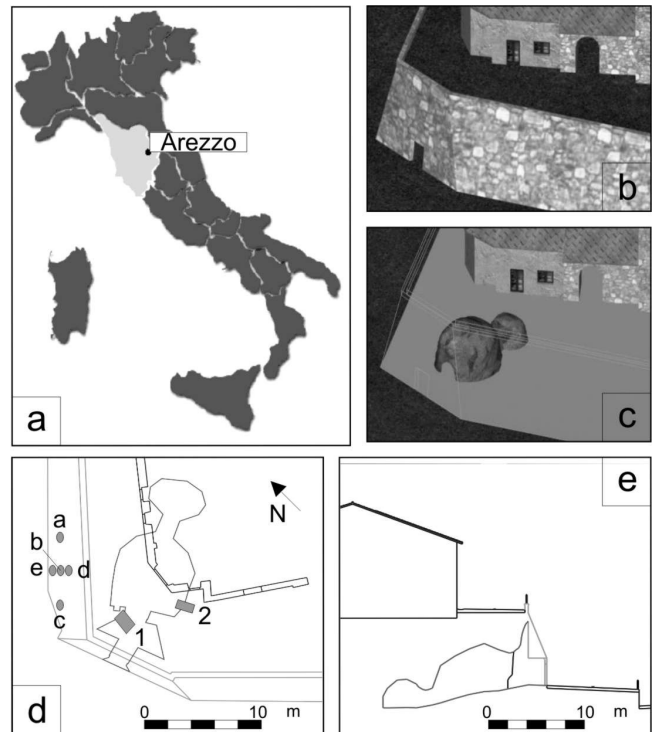


Fig. 1. Ubicazione del sito d'indagine (a), ricostruzione 3D del sito (b) e della grotta (c), prospetto in pianta (d) e in sezione (e) del sito

Site map (a), site (b) and cave (c) 3D visualization, site plan view (d) and section view (e)

## 2. La grotta di Bedo

La "Grotta di Bedo" è una cavità antropica caratterizzata da una lunghezza complessiva di 17 m, una larghezza massima di 6.40 m ed un'altezza massima di 5.20 m. E' costituita da 2 stanze a sviluppo orizzontale che sono raccordate da un piccolo cunicolo (fig. 1c). La stanza d'ingresso è la più grande, ha in pianta una forma ellissoidale ed una volta di forma irregolare; la seconda stanza ha dimensioni inferiori, anch'essa una pianta ellissoidale e una volta regolare ed emisferica a causa dei minori crolli subiti. E' stata ricavata nei depositi alluvionali Pleistocenici fluvio-lacustri della Val Tiberina che caratterizzano il colle sul quale è situato il centro abitativo di Monterchi.

Si pensa che la sua origine, così come quella di altre cavità presenti nel sottosuolo del centro storico del paese, sia da inserirsi tra le opere ad utilizzo abitativo o di necropoli rupestri delle popolazioni etrusche presenti nell'area fin dal VII secolo a.C., ma non è comunque da escludere che l'origine di tali strutture possa essere

collocata ancora più indietro nel tempo.

Le molteplici trasformazioni riguardanti forma ed utilizzo che questa cavità ipogea ha subito fin dalle sue origini, la pongono ai giorni d'oggi inserita nella realtà urbanistica del centro storico di Monterchi; la Grotta di Bedo rimane oggi accessibile tramite un ingresso ricavato dalla cinta muraria che circonda il centro storico del paese; tale cinta rappresenta la ricostruzione novecentesca dell'antica fortificazione medioevale i quali resti possono tuttora essere scorti proprio all'ingresso della Grotta di Bedo.

Superiormente alle mura e sopra la volta della grotta sono collocate alcune abitazioni del centro storico ed una sede stradale (fig. 1b, 1c, 1d, 1e).

### 3. Indagini e rilievi pre-esistenti

Le indagini precedenti alle prospezioni geofisiche realizzate a seguito della crisi sismica del 1997 e dell'intervento di restauro delle mura cittadine erano costituite da:

- rilievo litologico all'interno della grotta: nella prima cavità è stata riscontrata la presenza dalla base della grotta fino all'altezza di 1-1,60 metri, di conglomerati monogenici cementati in matrice limosa, caratterizzati da ciottoli con dimensioni da centimetriche a decimetriche; per il resto dell'affioramento all'interno della cavità sono state rilevate sabbie limose mediamente cementate; nella parte alta della parete Nord-Est della grotta, è visibile all'interno delle arenarie un'intercalazione di conglomerati stratificati in matrice avana e ciottoli con dimensioni che vanno da pochi centimetri a 15-20 centimetri; la grotta secondaria è caratterizzata esclusivamente da sabbie limose cementate; tali litologie sono ascrivibili ai depositi Pleistocenici di tipo QT<sup>2</sup> descritti come "argille, sabbie e conglomerati, talora cementati di facies fluvio-lacustre"; è stata inoltre riscontrata la presenza di una forte umidità che è tra l'altro ben evidenziata dalla presenza di muffe e concrezione carbonatiche di origine percolativa;
- rilievo strutturale e geomeccanico all'interno della cavità: è stata rilevata la presenza di 5 famiglie di fratture;
- mappatura di dettaglio delle strutture che si approfondiscono al di sotto del piano stradale e delle infrastrutture a rete;
- 2 pozzetti esplorativi (fig. 1d) realizzati sul piano stradale sovrastante la grotta. Il saggio S1, profondo 1.88 m, ha individuato un primo strato di riporto di circa 92 cm costituito da laterizi, sabbia e pezzi di cemento, quindi 6-7 cm di laterizi e nuovamente riporto fino al fondo dello scavo; il saggio S2, profondo 1,68 m, ha mostrato una stratigrafia completamente diversa trattandosi di sabbia grossolana con presenza di litoidi costituiti da sabbie cementate con inclusioni di miche verdi e siltiti ben cementate e vene di calcite;
- 5 sondaggi orizzontali a rotazione a carotaggio continuo (fig. 1d) realizzati sul fianco Sud-Ovest delle mura, di lunghezza compresa tra i 10 agli 11.5 metri: è stato

riscontrato:

- uno spessore variabile delle mura (costruite con blocchi di arenaria quarzoso-feldspatica – formazione del Macigno, Oligocene medio-superiore – Oligocene superiore) dai 30 cm nei fori A, B, C ai 150 cm nei fori D ed E;
- la presenza di materiali di riporto a ridosso dell'apparato murario nei fori A, B e C;
- la presenza di vuoti distribuiti in tutto il sondaggio nei fori A, B e C;
- livelli di terra sciolta nei fori B e C;
- un livello di breccie sciolte tra i 9 e i 10 metri di avanzamento del foro B;
- la sola presenza di arenarie nei fori D ed E.

### 4. L'indagine tomografica

#### 4.1 Acquisizione dati

Sono state effettuate 3 linee di tomografia in trasmissione in onde P (fig. 2).

	Ln1	Ln2	Ln3
Shot-point number	26	23	28
Shot-point distance (m)	0.5	0.5	0.5
Wave	P	P	P
Channel number	24	24	24
Geophone distance (m)	1	1	1
Sample rate (ms)	0.03125	0.03125	0.03125
Record Length (ms)	256	256	256

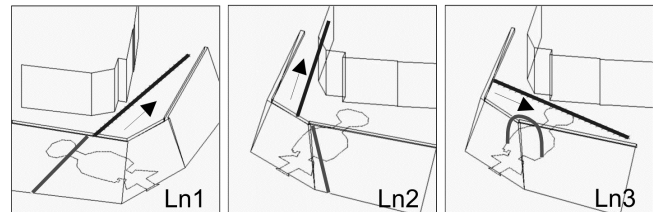


Fig. 2. Parametri di acquisizione e geometrie per le tre linee; linea grigio chiaro=punti sorgenti, linea grigio scuro=punti riceventi  
*Acquisition parameters and geometries of the 3 lines; light grey line=shot points, dark grey line=geophone points*

Sono state impiegate 3 differenti geometrie relative ai punti sorgenti; in particolare l'energizzazione, realizzata utilizzando una massa battente su una piastra metallica, è stata effettuata lungo la cinta muraria in Ln1 e Ln2 con l'ausilio di un elevatore, all'interno della prima cavità, lungo le pareti e la volta, in Ln3. I geofoni, aventi una frequenza propria di 10 Hz, sono stati disposti lungo la sede stradale al di sopra della cavità, alloggiati in fori opportunamente preparati nell'asfalto. Lo stesso stendimento è stato utilizzato per le linee Ln1 e Ln3; la linea Ln2 è stata acquisita con uno stendimento a diversa orientazione. In fig. 2 sono sintetizzate le caratteristiche di acquisizione per le 3 linee. È stato utilizzato un sismografo digitale Strataview della Geometrics a 24 canali e 24 bit. Il sistema di triggeraggio adottato ha previsto l'impiego di un

hammer switch.

E' da sottolineare che, mentre le Ln1 e Ln3 presentano punti sorgenti e riceventi giacenti circa nello stesso piano, ciò non si ha per la Ln2. Non è stato, infatti, possibile utilizzare un'altra geometria, per non coinvolgere zone in cui mura ed ammasso roccioso fossero visibilmente non accoppiate.

#### 4.2 Elaborazione dati

Dopo opportuno filtraggio in frequenza e picking dei primi arrivi dei segnali registrati, i travel-times sono stati inseriti nel codice di elaborazione, facendo riferimento ad un sistema di riferimento 3D comune alle 3 linee. Mentre le indagini Ln1 e Ln3 sono state elaborate in tomografia 2D, per la Ln3 si è dovuto operare mediante tomografia 3D a

causa della suddetta non complanarità dei punti sorgenti e riceventi.

Le griglie in cui i domini delle tre indagini sono stati discretizzati ed i relativi modelli di velocità di input (3 modelli per Ln1 e Ln3, 1 modello per Ln2) sono illustrati in tab.1. Notare che per la linea Ln2, elaborata in 3D è stato utilizzato un modello di velocità 1D. I modelli B per le linee Ln1 e Ln3 ed il modello unico utilizzato per la Ln2 hanno previsto l'utilizzo delle velocità tratte dalla banca dati del progetto V.E.L., ricavate da indagini di sismica a rifrazione effettuate nei pressi del sito d'indagine per le stesse litologie. Gli altri modelli di input sono stati utilizzati per valutare l'influenza che il modello iniziale ha sulla soluzione finale.

Tab. 1. Griglia e modelli di velocità di input utilizzati per le tre linee  
*Grid and input velocity model of the 3 lines*

<b>Ln1</b>	<b>Ln2</b>	<b>Ln3</b>
<b>-Griglia dominio: 75x25 celle quadrate</b> <b>-Modello di velocità 2D</b>	<b>-Griglia dominio: 25x25x11 celle cubiche</b> <b>-Modello di velocità 1D</b>	<b>Griglia dominio: 75 x 25 celle quadrate</b> <b>-Modello di velocità 2D</b>
<b>Modello A</b> -Vp=345 m/s nella cavità -Vp=1000 m/s altrove	<b>Modello unico</b> -Vp=2000 m/s per i conglomerati alla base della grotta -Vp=1000 m/s per le arenarie sovrastanti	<b>Modello A</b> -Vp=345 m/s nella cavità -Vp=1000 m/s altrove
<b>Modello B</b> -Vp=345 m/s nella cavità -Vp=2000 m/s per i conglomerati alla base della grotta -Vp=1000 m/s per le arenarie sovrastanti -Vp=2500 m/s per le mura		<b>Modello B</b> -Vp=345 m/s nella cavità -Vp=2000 m/s per i conglomerati alla base della grotta -Vp=1000 m/s per le arenarie sovrastanti
<b>Modello C</b> -Vp=345 m/s nella cavità -Vp=2000 m/s per i conglomerati alla base della grotta -Vp=1000 m/s per le arenarie sovrastanti -Vp=4000 m/s per le mura		<b>Modello C</b> -Vp=345 m/s nella cavità -Vp=1000 m/s per i conglomerati alla base della grotta -Vp=500 m/s per le arenarie sovrastanti

L'elaborazione delle tre linee è stata condotta mediante algoritmo A.R.T. (Algebraic Reconstruction Technique, Dines & Lytle, 1979), nelle seguenti fasi:

- risoluzione del forward problem (mediante raypaths)
- risoluzione del inverse problem (correzione mediante minimi quadrati)
- ottimizzazione della soluzione (mediante controllo del gradiente di velocità)
- iterazione dei processi.
- I residui (R) minimi sono stati raggiunti in assenza di convergenza della soluzione alla prima iterazione, sia per Ln1 (RA=14.685, RB=6.264, RC=31.400, fig. 3), sia per la Ln2 (R=-60.959, fig. 4).

Al contrario, per la Ln3 si è ottenuta la convergenza delle soluzioni alla terza iterazione per tutti i modelli iniziali considerati, con residui pari a 0.514, 0.684 e -0.352 rispettivamente per i modelli A, B, C. La convergenza è avvenuta seguendo una funzione di minimizzazione simile e caratterizzata da un repentino avvicinamento al residuo minimo già dalla seconda iterazione (fig. 5). Inoltre a differenza degli altri modelli iniziali, le iterazioni ottenute con quello a velocità sottostimate (modello C), risultano convergere tramite valori negativi del residuo.

## 5. Risultati

Le sezioni finali ottenute per la Ln1 mostrano zone a

bassissima velocità (< 400 m/s, zona 1 in fig. 3) subito dietro le mura ed altissima velocità (> 3000 m/s, zona 2 in fig. 3) sopra la volta della cavità, per tutti i modelli iniziali

considerati. La velocità delle mura (zona 3 in fig. 3) è stata, inoltre, notevolmente sottostimata per il modello A (localmente < 700 m/s).

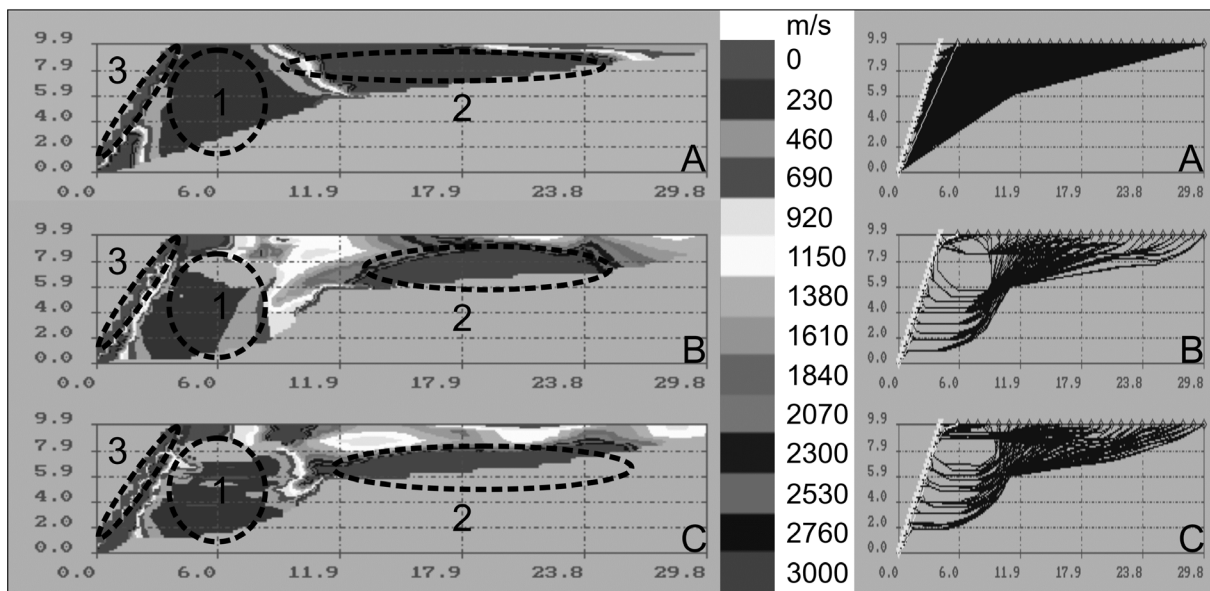


Fig. 3. Sezioni verticali finali ottenute per la Ln1 mediante l'utilizzo rispettivamente dei modelli di input A, B, C (unità assi in metri)  
*Final vertical sections of Ln1, using A, B, C input velocity model respectivel (axes units in metres)*

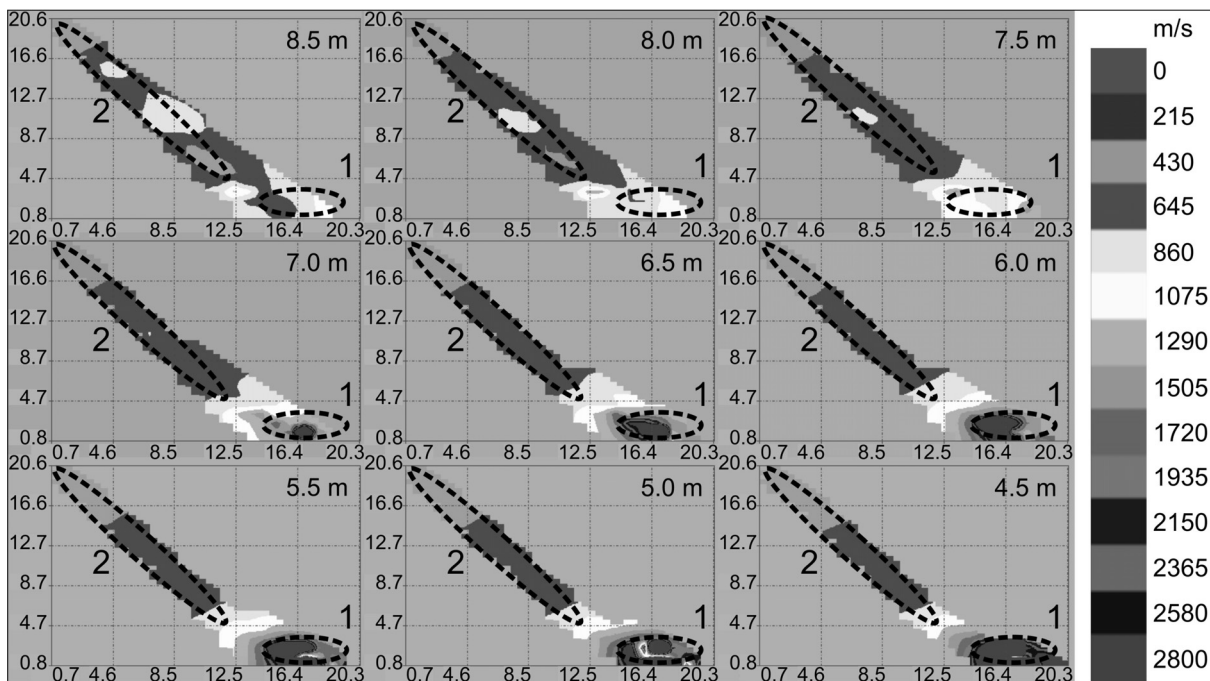


Fig. 4. Sezioni orizzontali finali ottenute per la Ln2 alle varie quote (unità assi in metri)  
*Final horizontal sections of Ln2 at different heights (axes units in metres)*

La soluzione ottenuta per la Ln2 è rappresentata in fig. 4 tramite sezioni orizzontali ad intervalli di 0,5 metri e per le altezze comprese tra 8,5 metri e 4,5 metri rispetto alla quota dell'ingresso della grotta. E' riscontrabile una zona ad alta

velocità in prossimità degli scoppi (zona 1 in fig. 4) e zone a velocità bassissime (< 400 m/s, zona 2 in fig. 4) altrove.

E' da sottolineare che le indagini Ln1 e Ln2 non hanno fornito distribuzioni di velocità attendibili in base alle

conoscenze sull'ammasso roccioso disponibili dalle indagini dirette. Ciò è attribuibile principalmente alla presenza delle mura e all'irregolare contatto tra le mura sulle quali si è energizzato e l'ammasso roccioso all'interno del quale è stato scavato l'ipogeo. Inoltre la Ln2, elaborata in 3D, avrebbe necessitato di una maggiore copertura di raggi per ottenere una soluzione affidabile, cosa che il tipo di acquisizione effettuata non ha permesso di avere. Il mal condizionamento del problema verificatosi sia in Ln1, sia e soprattutto in Ln2 è confermato dalla divergenza delle soluzioni e dai residui molto elevati.

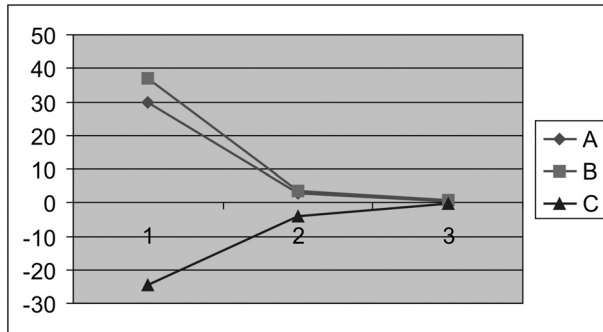


Fig. 5. Grafico di minimizzazione dei residui in relazione al numero di iterazione, relativi alla Ln3 per i tre modelli di input A, B, C

*Ln3 error minimization graph respect to iteration number for the 3 input models A, B, C*

Le sezioni finali ricavate per la Ln3 mostrano come la scelta del modello iniziale di velocità abbia avuto un'importanza non determinante ai fini delle elaborazioni che infatti hanno fornito risultati confrontabili. Si possono osservare:

- anomalie a bassissima velocità (< 500 m/s) lungo le pareti e la volta della grotta che evidenziano le scadenti qualità fisico-meccaniche dei litotipi fortemente alterati e fratturati, riscontrabili anche in affioramento (1 in fig. 6, area, pareti e volta della cavità);
- anomalie a bassa velocità (< 600 m/s) in corrispondenza del saggio S2 eseguito con escavatore meccanico superiormente alla grotta lungo il piano stradale: probabilmente il colmamento dello scavo è stato eseguito con il materiale estratto dal saggio o con altro materiale di riporto. Il passaggio della linea geofonica al di sopra dello scavo ha favorito la sua buona ubicazione ed il suo buon dimensionamento (2 in fig. 6);
- due anomalie ad alta velocità (> 1500 m/s) localizzate lateralmente a quella generata dal saggio 2 (3 in fig. 6): queste sembrano corrispondere con il canale di raccolta delle acque superficiali (tubo o vasca in metallo) che borda l'edificio prossimo all'indagine;
- anomalie ad alta velocità (> 2500 m/s) correlabili con lo strato conglomeratico presente alla base della grotta (4 in fig. 6).
- un'anomalia ad alta velocità evidenziata in 5 in fig. 6

(1500 m/s) riscontrata in Ln3 e attribuibile all'intercalazione conglomeratica all'interno delle arenarie, identificata durante il rilievo sulla parete nord-est della grotta.

- anomalie ad alta velocità (1500 m/s) riscontrate in Ln1 e Ln2 riconducibili a corpi con migliori caratteristiche meccaniche o saturazione in acqua (6 in fig. 6);
- anomalie a bassa velocità (< 850 m/s) con valori minimi di 350-400m/s riconducibili alle zone caratterizzate da terre sciolte e vuoti (non indicate in fig. 6).

Contrariamente alle Ln1 e Ln2, la congruenza delle sezioni tomografiche finali con le indagini dirette disponibili, insieme alla convergenza della soluzione ed i bassi residui ottenuti, permettono di considerare affidabile la soluzione ottenuta per la Ln3. Un fattore che è stato determinante per il raggiungimento di un tale risultato è il fatto di aver posizionato i punti sorgenti direttamente all'interno della grotta; ciò ha permesso di evitare i problemi incontrati nelle LN1 e LN2 relativi all'accoppiamento tra mura e ammasso.

## 6. Conclusioni

Le indagini geofisiche effettuate, pur confermando le limitazioni intrinseche della metodologia tomografica, più pesanti in presenza di un forte grado di eterogeneità ed anisotropia, hanno permesso di acquisire un quadro conoscitivo dei mezzi circostanti la cavità ipogea, maggiore di quanto era stato possibile ottenere mediante le sole indagini dirette. Quest'ultime, tuttavia, sono risultate di fondamentale importanza per la creazione del modello di input. In particolare la linea LN3, caratterizzata da convergenza delle soluzioni e bassi residui, ha fornito risultati soddisfacenti grazie ai punti sorgenti localizzati direttamente all'interno della grotta. Le soluzioni ottenute mediante l'utilizzo dei tre differenti modelli di velocità sono risultati confrontabili. Di particolare interesse è stata l'individuazione di alcune zone dell'ammasso roccioso comprese tra la volta della grotta ed il piano stradale, che risultano possedere  $V_p < 850$  m/s. Le peggiori condizioni fisico-meccaniche dei mezzi si riscontrano, comunque lungo le pareti della cavità ( $V_p < 500$  m/s) interessate, peraltro, da evidenti e ben documentati crolli. Tali risultati sono in accordo con quanto emerso dal rilievo geomeccanico delle litologie affioranti nella grotta. Sono stati calcolati, infatti, dei valori compresi tra 41 e 50 (roccia mediocre) per l'indice di classificazione RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski, 1973, 1984) e tra 4.3 e 5.4 (roccia con scadenti qualità) per l'indice di classificazione RMQ (Rock Mass Quality, Barton et al., 1974).

Essendo la copertura dei raggi sismici sufficientemente elevata al di sopra della cavità, le sezioni ottenute riescono a caratterizzare quantomeno in maniera qualitativa se non semiquantitativa l'ammasso considerato. La localizzazione delle anomalie a bassa velocità, correlabili con la presenza di terra sciolta, vuoti o roccia fortemente fratturata ed

alterata, deve essere tenuta in considerazione negli interventi di consolidamento dei mezzi e nella progettazione delle opere per la messa in sicurezza della Grotta di Bedo.

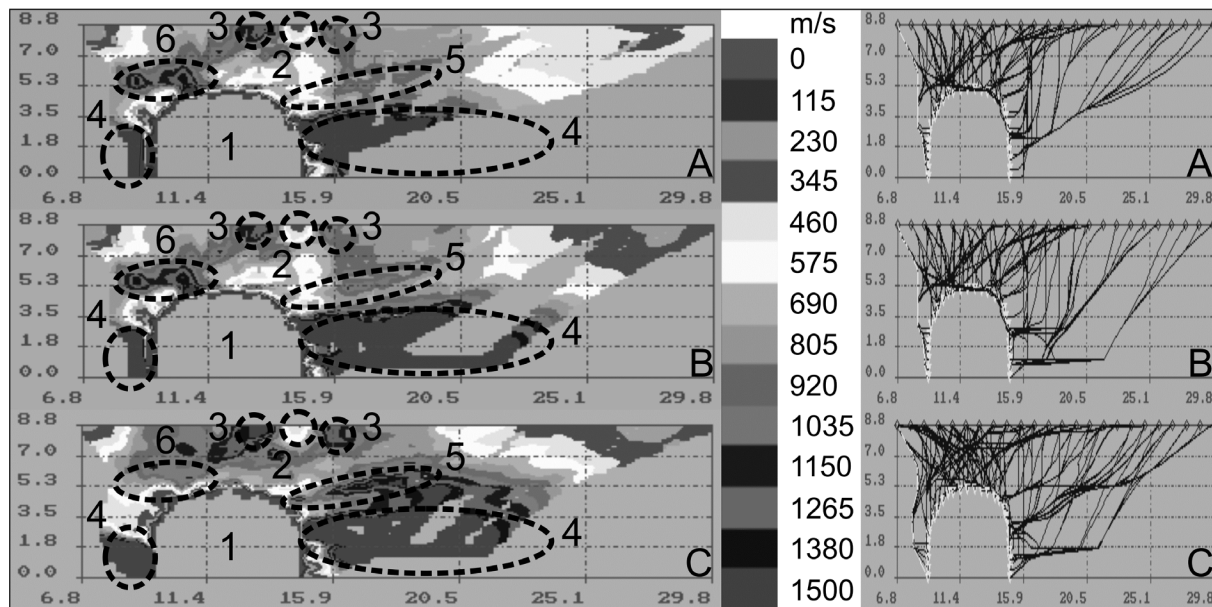


Fig. 6. Sezioni verticali finali ottenute per la Ln3 mediante l'utilizzo rispettivamente dei modelli di input A, B, C (unità assi in metri)  
*Final vertical sections of Ln3, using A, B, C input velocity model respectively (axes units in metres)*

D'altra parte, Le linee LN1 e LN2 non hanno fornito soluzioni accettabili. Ciò può essere attribuito al malcondizionamento del problema, alla presenza delle mura ed alla mancanza locale di accoppiamento tra la cinta muraria e l'ammasso roccioso. Il locale disaccoppiamento è visibile all'ingresso della grotta ed è stato verificato anche durante il disassemblaggio e risistemazione di una piccola porzione delle mura avvenuti durante un restauro effettuato nel 2001. Un'ulteriore problema che ha interessato la Ln2 è stata la non sufficiente copertura per un'elaborazione 3D. La distribuzione dei raggi all'interno di un volume anziché di una superficie, ha infatti abbassato notevolmente la densità dei raggi per ogni singola cella della matrice

considerata. Il mal condizionamento del problema verificatosi sia in Ln1, sia e soprattutto in Ln2 è confermato dalla divergenza delle soluzioni e dai residui elevati.

## 7. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare l'Arch. Maurizio Ferrini dirigente responsabile del Servizio Sismico della Regione Toscana per aver permesso la pubblicazione dello studio, il Dr. Geol. Pizzingrilli Lorenzo, il Dr. Geol. Raffaele Madonna, il Dr. Geol. Paolo Sammartino, il Dr. Geol. Francesco Di Credico per la preziosa collaborazione.

## Bibliografia

- Barton N., Lien R. & Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol.6, No.4, pp.189-236.
- Bieniawski Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. Afr. Instn Civ. Engrs*, Vol.15, No.12, pp.335-344.
- Bieniawski, Z.T., 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling*, Balkema, Rotterdam.
- Carrion P., 1991. Dual tomography for imaging complex structures. *Geophysics*, 56, 1395-1376.
- Dines K.A. & Lytle R.J., 1979. Computerised Geophysical Tomography Proceedings of I.E.E.E., 67, 7, 1065 - 1073.
- Doser Diane I., Krein David D., Baker Mark R., Kreinovich V., Gerstemberger M., 1998. Estimating Uncertainties for geophysical Tomography. *Reliable computing* Vol. 4, pp.241-268. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Ladas K. T., Devaney A. J., 1991. Generalized ART algorithm for diffraction tomography. *Inverse Problems*, Vol. 7, pp.109-125. Printed in the UK.
- Kaczmarz S., 1937. Angenaeuerte Aufloesung von Systemen linearer Gleichungen. *Bull. Acad. Polon. Sci. Lett. A*, 35, 355 - 357.
- Signanini P. & Torrese P., 2004. Application of high resolution shear wave seismic methods for a geotechnical problem. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 6, N.4, 329-336.
- Pasculli A., Rainone M.L., Sciarra N., Signanini P., 2002. Scale experimental testing of the resolution capabilities of seismic tomography techniques. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*. ISSN: 0006-6729.
- Regione Toscana, Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali, U.O.C. Rischio sismico, 2000. Valutazioni degli effetti locali, Programma VEL - Istruzioni tecniche per le indagini geologico-tecniche, le indagini geofisiche e geotecniche, statiche e dinamiche finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici. "Progetto Terremoto" in Garfagnana e Lunigiana, atto di programmazione negoziata tra regione Toscana e Dipartimento della Protezione Civile. Firenze.