

Utilizzo di prospezioni sismiche a riflessione HR a supporto della realizzazione di gallerie: un esempio applicativo

Patrizio Torrese¹, Mario Luigi Rainone², Raffaele Madonna²

¹Dipartimento di Scienze della Terra, University of Pavia, patrizio.torrese@unipv.it

²DiGAT Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio, Università "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, rainone@unich.it, raffaelemadonna@unich.it

Use of HR reflection seismic surveys for tunnelling support: a methodological application

ABSTRACT: Tunnel planning and construction is a very complex and difficult task due to non homogeneous contacts between surface deposits and the bedrock, soil and rock properties, fractured zones and hydraulic conditions. Furthermore, the possibility of running into a thick filling material body, especially in urban areas, enhances dangers and further expenses. Subsoil geophysical exploration is a very useful tool to improve prognosis and to reduce risk and probability of damaging infrastructures and surface buildings. This note presents an application of a shallow reflection seismic survey aimed at a site investigation for an urban tunnelling program undertaken in a complex geotechnical environment. Time cross-sections are discussed and compared with geognostic data. The opportunity of comparing the obtained results before and after a jet-grouting treatment, that was carried out due to the presence of poor lithological conditions, enabled to assess the effects of ground improvement on subsoil seismic imaging.

Keyterms: Shallow reflection seismic survey, Site investigation, Urban tunnelling, Subsoil seismic imaging

Termini chiave: Sismica a riflessione HR, Esplorazione del sottosuolo, Tunnelling in area urbana, Immagine sismica del sottosuolo

Riassunto

Fattori come la forte variabilità del contatto tra i depositi di copertura ed il substrato, delle proprietà fisico-meccaniche dei mezzi, la presenza di zone fratturate, le differenti condizioni idrauliche, rendono complesse la progettazione e la realizzazione delle gallerie. La possibilità di intercettare, soprattutto in aree urbane, potenti corpi di materiale di riporto, aumenta le condizioni di rischio e conseguentemente i costi. Le prospezioni geofisiche possono rappresentare, in tal senso, uno strumento efficace per una migliore ricostruzione del modello geologico-tecnico del sottosuolo che si traduce in una riduzione dei rischi e della probabilità di danneggiare infrastrutture ed edifici sovrastanti la galleria. Questa nota mostra un'applicazione della metodologia sismica a riflessione HR finalizzata alla ricostruzione della geometria del sottosuolo in un sito interessato dalla realizzazione di una galleria in area urbana in un contesto geologico-tecnico complesso. Le sezioni sismiche ottenute vengono criticamente discusse in relazione alle stratigrafie dei sondaggi meccanici. Inoltre, il confronto tra i risultati delle indagini sismiche effettuate sia prima che dopo un trattamento mediante jet-grouting, condotto per migliorare le condizioni di resistenza meccanica dei litotipi, ha permesso di verificare sull'immagine sismica

del sottosuolo, gli effetti del consolidamento effettuato.

Introduzione

In fase di progettazione di gallerie è necessario avere un modello geologico-tecnico di sottosuolo attendibile in termini di geometria dei corpi, caratteristiche fisico-meccaniche ed idrauliche dei litotipi interessati dalla scavo: ciò è fondamentale sia per scegliere il tracciato, sia per progettare tecniche di scavo e sostegni. Una campagna geognostica basata solo su carotaggi e rilievi geologici di superficie, non è sufficiente nella generalità dei contesti: infatti un approccio del genere necessita di estrapolazione che non può che essere lineare, sottintendendo quindi, che "natura non facit saltus".

L'ipotesizzata regolarità della geologia è inoltre smentita dal numero di revisioni dei costi in corso d'opera dovute a "imprevisti geologici". In molte situazioni l'utilizzo di tecniche geofisiche può mettere in guardia sulla possibilità di incontrare situazioni geologiche complesse, fonti potenziali di problemi in fase di scavo ed indicare la necessità di ulteriori indagini preventive e mirate (Ashida, 2001; Cravero *et alii*, 2000; Pelizza & Grasso, 1998; Signanini & Torrese, 2004; Stumpel *et alii*, 1984).

Varie sono le tecniche che possono essere utilizzate come: sismica a riflessione, a rifrazione, tomografia

sismica, VSP in superficie (Eriksson *et alii*, 1998; Inazaki *et alii*, 1999; Ivor-Smith & Pettersson, 1988; Smith, 1988; Mari *et alii*, 1988; Mindle, 1992; Smith, 1999; Umney, 1996) e al fronte (Celse, 1999; Hayashi & Saito, 2001; Kneib *et alii*, 1999; Sattel *et alii*, 1992; 1996), misure georadar in fori e rilievi elettromagnetici con metodologie TDEM (Mari *et alii*, 1988; Wada *et alii*, 1996; 1997).

Questo lavoro mostra un'applicazione della metodologia sismica a riflessione HR con onde di taglio SH (Baker *et alii*, 1999; Clark *et alii*, 1994; Gasperini *et alii*, 1994; Knapp & Steeples, 1986a, b; Palestini *et alii*, 1988) finalizzata all'esplorazione del sottosuolo di un sito

in area urbana in cui realizzare una galleria.

Problematica

Durante lo scavo di una galleria autostradale, realizzata nei depositi dell'avanfossa Adriatica (Servizio Geologico d'Italia), a circa 24 m di profondità, si presenta al fronte di scavo una situazione non prevista dal progetto esecutivo: si intercetta il contatto tra le argille marnose del substrato plio-pleistocenico e i limi sabbiosi dei depositi di copertura quaternari (Figura 1).



Figura 1: Fronte di scavo prima (a sinistra) e dopo (a destra) del verificarsi del fornello.
 Figure 1: Excavation forehead before (left) and after (right) the saturated inflow occurring.

Stratigraphy	Depth (m)		Classification		Pocket penetr. (Kpa)	Vane test (Kpa)	SPT (m) (N)	Piezom. level	Stratigraphy	Depth (m)		Classification		Pocket penetr. (Kpa)	Vane test (Kpa)	SPT (m) (N)	Piezom. level
	from g.l.	partial	lithological	geological						from g.l.	partial	lithological	geological				
1			Gravel						1	21	Clayey silt with rare stratification and sandy-silty levels. Presence of peat and CaCO ₃	Cover deposits (Quaternary)	330	90		21	
2	1,80	1,80							2	22			F.S.	45		22	
3									3	23	Marly clay with near-vertical fractures, sign of stratification	Eluvial deposits			23	23	
4			Clayey ground with pebbles, building material, demolition waste organic material	Filling material					4	24						24	
5									5	25	Oxidated marly clay with silt					25	
6									6	26						26	
7									7	27						27	
8	8,60	6,80			200				8	28	Sand with very rare clayey layers	Substratum deposits (Plio-Pleistocene)				28	
9			Clayey silt with peat and arenaceous pebbles	Colluvial deposits	300	9,50			9	29						29	
10	9,80	1,20			200	75			10	30						30	
11					300	105			11	31						31	
12					270	105			12	32						32	
13					150	80			13	33						33	
14					150	70	18,50		14	34	Marly clay with silt (none weathered)					34	
15			Clayey silt with rare stratification and sandy-silty levels. Presence of peat and CaCO ₃	Cover deposits (Quaternary)	170	56			15	35						35	
16					120	60			16	36						36	
17					150	50			17	37						37	
18					170	60			18	38						38	
19					320	90			19	39						39	
20					330				20	40						40	
21									21	41						41	

Figura 2: Stratigrafia del sondaggio meccanico a carotaggio continuo S14/06.
 Figure 2: Stratigraphy of S14/06 continuous coring borehole.

Successivamente, si verifica una fuoriuscita di una massa fangosa costituita da limi sabbiosi saturi d'acqua (Figura 1) dal lato destro del "cielo" del fronte di scavo della galleria. In superficie si apre una depressione (fornello) di alcuni metri di profondità, che fa sprofondare un elemento delle tribune di un campo da baseball (Figura 3).

Il verificarsi del fornello è legato alle condizioni di saturazione della massa refluita; infatti la presenza di una grande quantità d'acqua di falda o proveniente dall'intercettazione di una condotta fognaria, ha determinato il comportamento liquido del mezzo. Il fatto che gli "infilaggi" (disposti a raggiera sul fronte di scavo, lunghi 30 metri) non abbiano, fino a quel momento, rilevato la presenza di sacche di fango o di lenti in condizione di saturazione, rende plausibile che la causa del fornello sia da individuare nell'intercettazione o di una "sacca" di dimensione estremamente ridotta o di una frattura beante in continuità idraulica con questa o di una condotta fognaria.

Inquadramento geologico

Il sottosuolo dell'area (Figura 5) è costituito da:

- terreno di riporto con spessore variabile (Rf+R): terra con ciottoli e laterizi;
- copertura (Quaternario, C+Q+E): limi sabbiosi con rari accenni di stratificazione;
- substrato (Plio-Pleistocene, Ploa+Plom+Pla): argille

marnose con giunti siltosi.

In particolare, nell'ambito dei depositi argilloso-marnosi del substrato, sono individuabili un primo livello alterato (Ploa), la parte inalterata (Pla) e la presenza di intercalazioni di sabbie con rarissimi livelli argillosi (Plom, Figura 5).

Indagini precedenti e prospezione geofisica

Nell'area del campo da baseball era stata precedentemente effettuata una campagna di sondaggi meccanici a carotaggio continuo che aveva permesso la ricostruzione di sezioni geologiche sia parallelamente che trasversalmente al tracciato della galleria (Figura 3). In seguito al verificarsi del fornello è stata condotta una campagna geofisica costituita da 4 linee sismiche a riflessione HR in onde SH (Ln1a, Ln2, Ln3, Ln4) con le seguenti finalità:

- definire i rapporti geometrici tra terreno di riporto, depositi di copertura e substrato;
- individuare discontinuità o assetti litostratigrafici che potessero condizionare l'avanzamento del fronte di scavo della galleria e la stabilità della stessa;
- caratterizzare i litotipi in base ai valori di V_s misurati.

Un'ulteriore linea (Ln1b) è stata effettuata successivamente ad un intervento di consolidazione mediante jet-grouting con la finalità di:

- valutare l'effetto dell'intervento di consolidazione sulla sezione sismica del sottosuolo.

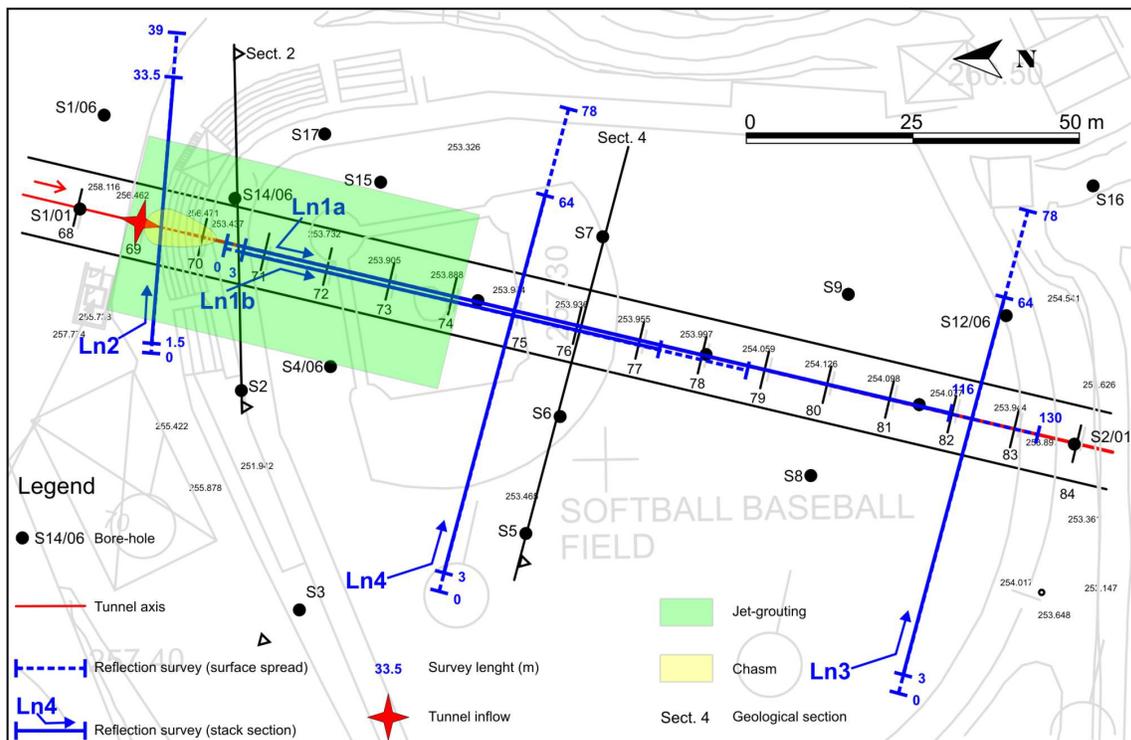


Figura 3: Planimetria con ubicazione delle indagini.
Figure 3: Survey map.

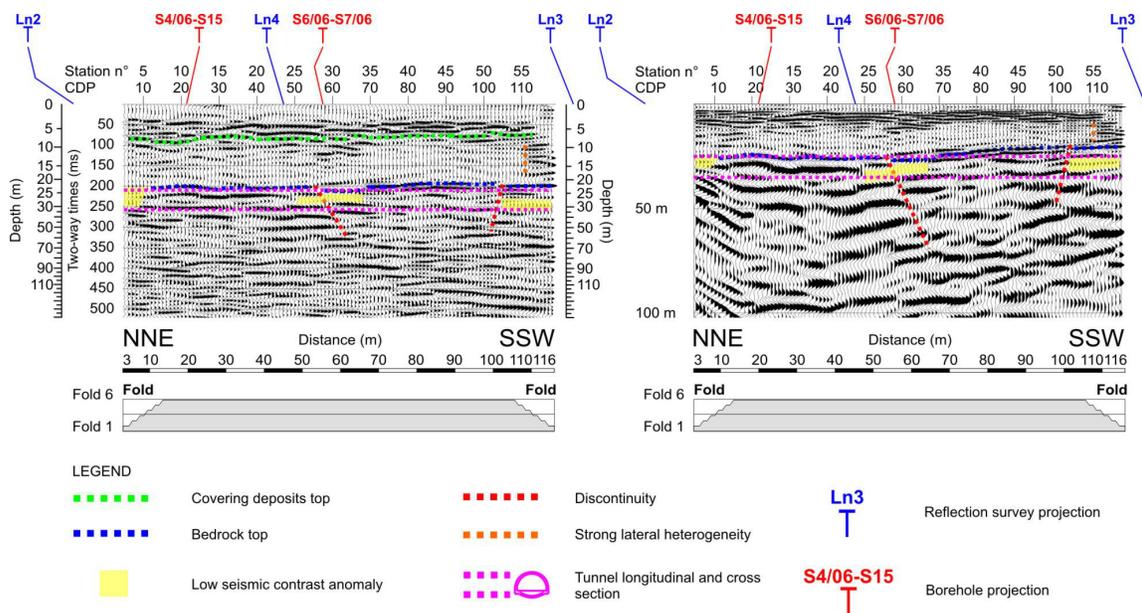


Figura 4: Linea sismica Ln1a: sezione in tempi doppi (a sinistra) e in profondità (a destra).
 Figure 4: Ln1a: two-way time (left) and depth (right) sections.

Le indagini effettuate sono state programmate sia parallelamente che trasversalmente al tracciato della galleria, con una lunghezza di linea variabile tra i 39 ed i 130 m (Figura 3), una geometria d'acquisizione costituita da 12 canali attivi, una distanza tra i geofoni pari a 1 m per la Ln2 e 2 m per le altre linee, un offset pari a 3 m per la Ln2 e 6 m per le altre, equivalente ad una copertura del 600 %. L'unico sondaggio meccanico ricadente esattamente su una linea sismica è l'S2. Un cassa in ferro e un martello da 10 Kg sono stati impiegati per la generazione di onde SH. Non è stato possibile effettuare l'indagine anche all'interno della galleria. I rumori dovuti al cantiere non hanno impedito lo svolgimento dell'indagine; l'applicazione di un filtro notch a 50 Hz ha eliminato il forte rumore dovuto alla linea elettrica.

La sequenza di elaborazione utilizzata è riportata in Tabella 1. Il segnale riflesso presenta un forte contenuto spettrale nell'intervallo di frequenza 25-105 Hz. L'analisi di velocità effettuata mediante CVS (*Constant Velocity Stacks*) ha riscontrato velocità variabili tra:

- 150-250 m/s per il terreno di riporto;
- 400-500 m/s per la copertura;
- 600-730 m/s per il substrato.

Risultati e discussione

Nelle Figure 4-7 sono mostrate le sezioni finali in tempi doppi e in profondità con *line-drawing*. La sezione della galleria è riportata in viola.

E' possibile individuare 3 unità sismiche corrispondenti a quelle geologiche.

Il terreno di riporto è costituito da forti contrasti di rigidità: esso presenta spessore variabile tra i 6 m e gli 8 m circa ed un elevato grado di eterogeneità in Ln1a.

I depositi di copertura (top dei depositi in linea verde) presentano una risposta sismica generalmente trasparente che denota una generale omogeneità; tuttavia si riscontra la presenza di due coppie di riflettori molto energetici in Ln3 (Figura 6): queste eterogeneità possono essere attribuite alla presenza di eventuali sacche o lenti. I depositi di copertura presentano uno spessore variabile tra i 2 m ed i 19 m. E' interessante notare in Ln1a (Figura 4) una forte eterogeneità locale presente intorno alla progressiva 110 m (linea arancione).

Il substrato (tetto del substrato in linea blu) appare interessato da alcune fratture (linee rosse) con dislocamenti dell'ordine di qualche metro in Ln3 e Ln4, mentre appare piuttosto continuo in Ln1a e Ln2. E' caratterizzato da una geometria abbastanza piatta in Ln1a, molto più articolata in Ln2, Ln3 e Ln4 come è possibile osservare soprattutto nelle sezioni profondità. Un approfondimento del substrato dai 10 ai 35 m si evidenzia sia in Ln4 alla progressiva 15 m che nella sezione geologica Sect. 4 prodotta precedentemente all'indagine geofisica (3 in Figura 7). La linea sismica e la sezione geologica sono ad una distanza di circa 10 m. Inoltre, all'interno del substrato sono individuabili delle zone con una risposta sismica più trasparente (aree gialle), che sono interpretate come intercalazioni sabbiose all'interno delle argille marnose. E' da notare come ci sia una buona corrispondenza tra queste anomalie evidenziate dalla sismica e quelle presenti nella Sect. 4. In particolare, il sondaggio S7/06 individua due intercalazioni sabbiose, che appaiono indistinte in Ln4 (1 in Figura 7). Un'altra intercalazione che interesserebbe soltanto la calotta della galleria (settore WNW) in Ln4, è stata estesa fino al sondaggio S7/06 in Sect. 4 (2 in Figura 7).

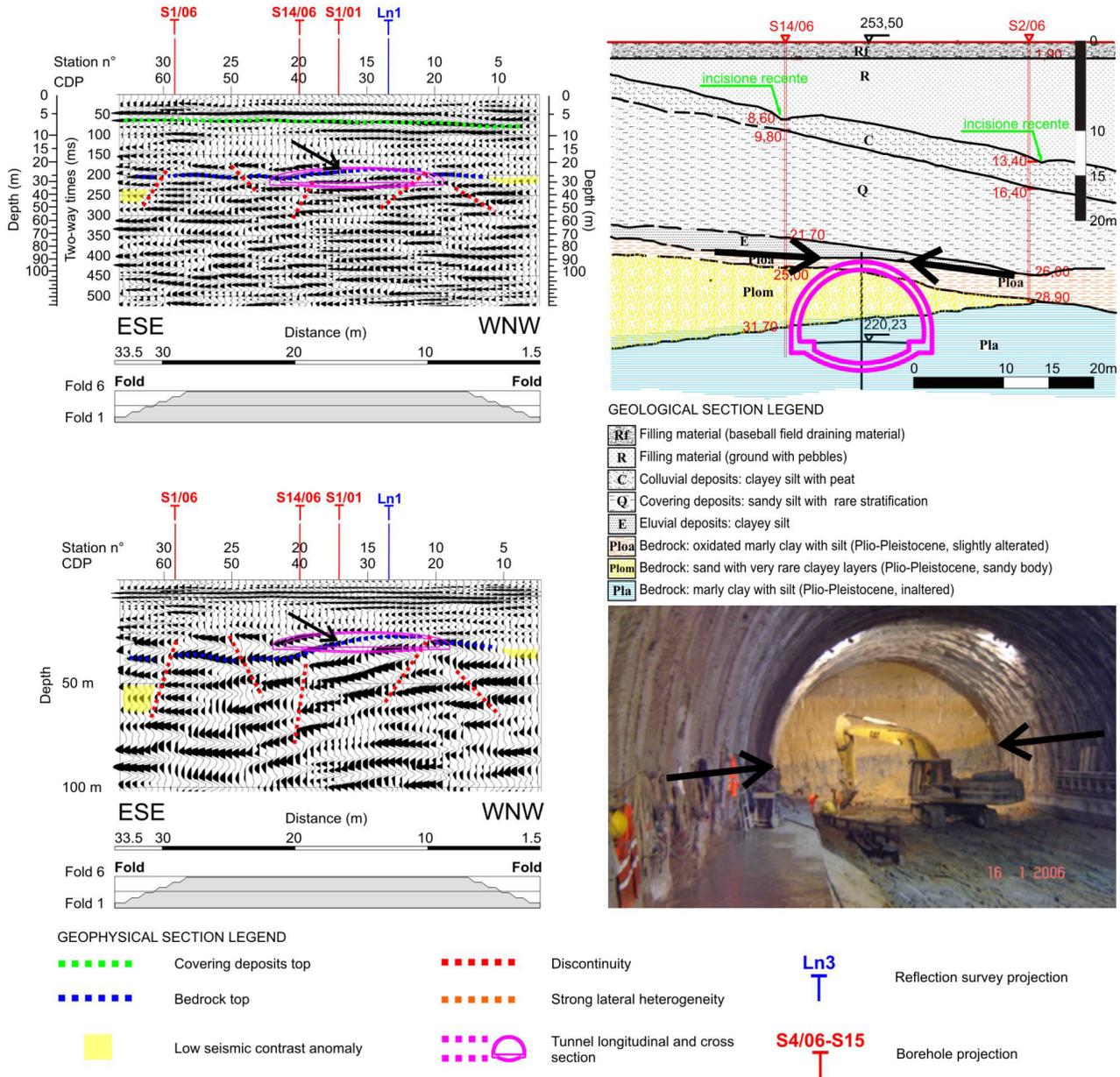


Figura 5: Linea sismica Ln2: sezione in tempi doppi (in alto a sinistra) e in profondità (in basso a sinistra); sezione geologica Sect. 2 (in alto a destra); fronte di scavo prima del verificarsi del fornello (in basso a destra).

Figure 5: Ln2 two-way time (up left) and depth (down left) sections; Sect. 2 geological section (up right); excavation forehead before the saturated inflow occurring (down right).

Tabella 1: Sequenza di elaborazione del dato sismico.

Table 1: Seismic processing sequence

1. Geometry	2. Mute	3. Gain	4. FK Filter	5. Sort	6. Static correction	7. Velocity analysis	8. NMO	9. Stack
10. F Filter	11. Spike Decon	12. F Filter	13. Predictive Decon	14. Migration	15. Gain	16. Editing	17. Depth Conversion	18. Editing

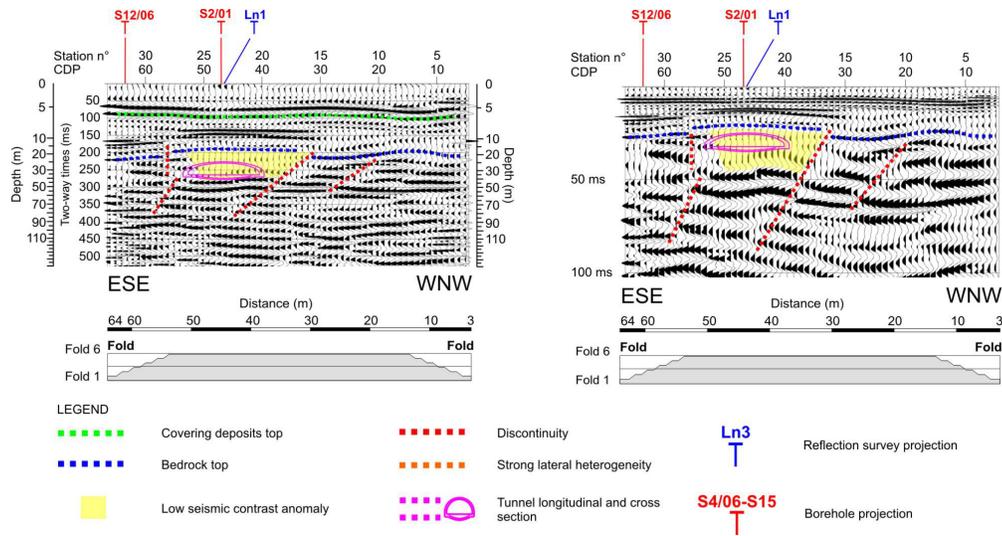


Figura 6: Linea sismica Ln3: sezione in tempi doppi (a sinistra) e in profondità (a destra).
 Figure 6: Ln3: two-way time (left) and depth (right) sections.

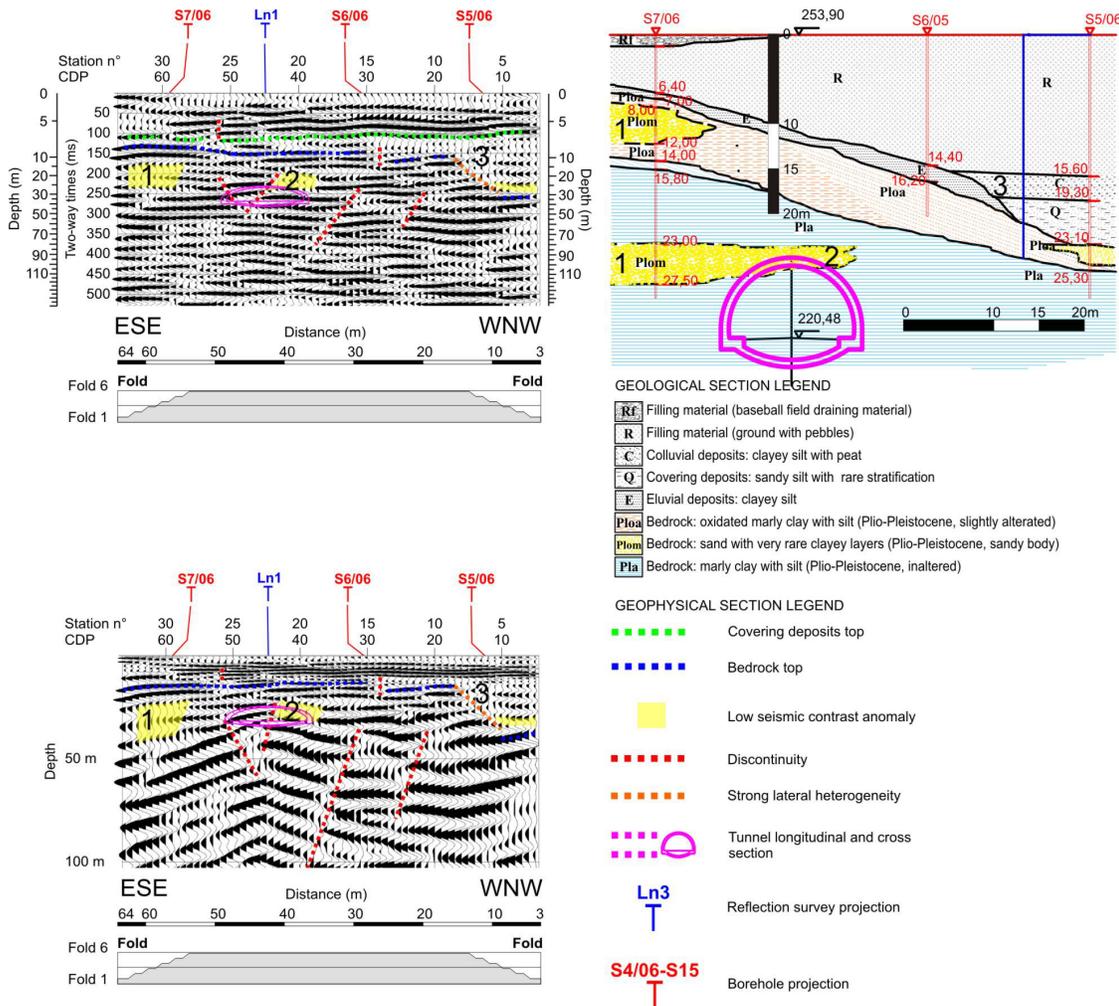


Figura 7: Linea sismica Ln4: sezione in tempi doppi (in alto a sinistra) e in profondità (in basso a sinistra); sezione geologica Sect. 4 (a destra).
 Figure 7: Ln4 two-way time (up left) and depth (down left) sections; Sect. 4 geological section (up right).

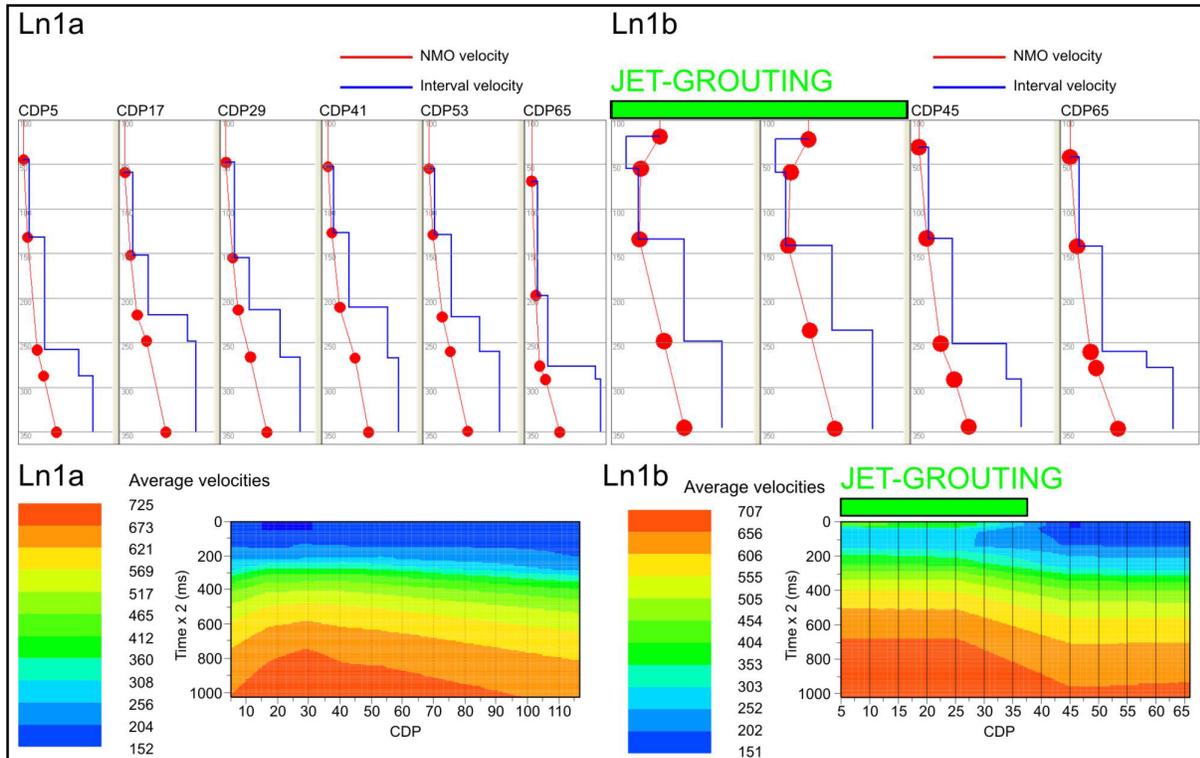


Figura 8: Modello di velocità per la sezione Ln1a (a sinistra) e Ln1b (a destra).
 Figure 8: Ln1a (left) and Ln1b (right) velocity model.

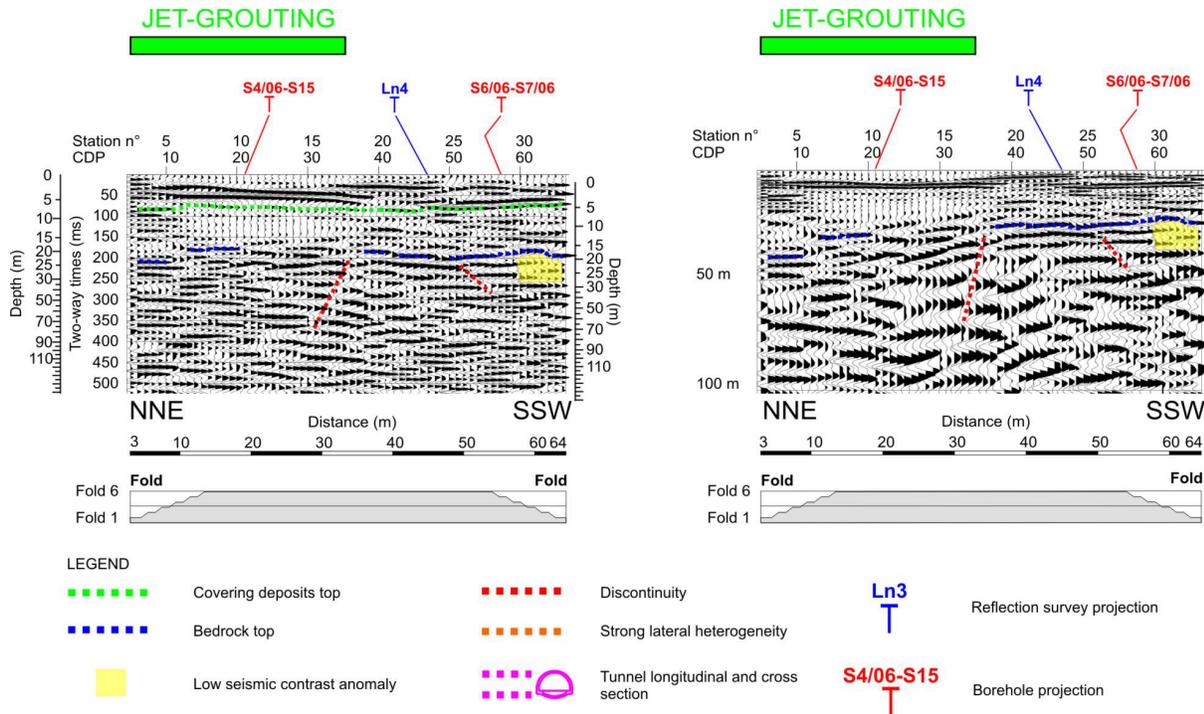


Figura 9: Linea sismica Ln1b: sezione in tempi doppi (a sinistra) e in profondità (a destra).
 Figure 9: Ln1b: two way time (left) and depth (right) sections.

In Ln1a la galleria sembra essere posizionata appena al di sotto del contatto tra i depositi di copertura ed il

substrato, in Ln3 la sezione della galleria è quasi completamente inclusa all'interno di un'intercalazione

sabbiosa (zona gialla) riconoscibile anche sulla Ln1a dalla progressiva 103 m (Figure 6, 4).

Per quanto riguarda il rifluimento verificatosi, è interessante notare che, mentre nella sezione geologica Sect2, ricostruita sulla base dei soli sondaggi meccanici, la galleria non intercetta i depositi di copertura alla progressiva del fornello, la sezione sismica Ln2 (Figura 5) mostra una geometria congruente con quanto riscontrato durante lo scavo (anche per quanto riguarda l'immersione dell'interfaccia): risulta infatti evidente dall'indagine sismica, che il contatto tra i depositi di copertura ed i sottostanti depositi argilloso-marnosi (freccie nere in Figura 5) passi all'interno dalla sezione della galleria; ciò è ancora più evidente nella sezione con scala in profondità (in cui la geometria dovrebbe essere più rispondente alla realtà) rispetto a quella in tempi doppi.

Imaging sismico post jet-grouting

In Figura 8 sono riportati i modelli tempi-velocità risultanti dall'analisi di velocità effettuata sulla Ln1a e Ln1b. La Ln1b, effettuata in sovrapposizione alla Ln1a per i primi 78 m di progressiva, è stata acquisita circa 3 settimane dopo la fine dell'intervento di jet-grouting. Si osserva che la consolidazione del sottosuolo ha avuto come effetto un aumento di velocità per i primi 20 ms (circa 4 m, 400 m/s contro i 150 m/s della Ln1a); a profondità maggiori si ha un'inversione di velocità (200 m/s): questa può essere dovuta al fatto che mentre nei primi metri di profondità la miscela cementizia si sia solidificata, a profondità maggiore sia ancora fluida al momento dell'acquisizione della linea sismica.

La parte della sezione non interessata dall'intervento presenta moderate analogie con la Ln1a.

In Figura 9 è riportata la sezione Ln1b. In corrispondenza del tratto consolidato, si possono notare le seguenti differenze rispetto alla Ln1a:

- all'interno del terreno di riporto è individuabile un doppietto di riflettori molto energetici e molto continui; ciò è probabilmente dovuto all'infiltrazione della miscela cementizia in una ristretta zona a permeabilità elevata;
- i depositi di copertura, sebbene abbiano mantenuto la loro tipica risposta sismica trasparente e quindi poco contrastata, appaiono più omogenei; ciò è probabilmente dovuto al fatto che la miscela cementizia abbia avuto modo di infiltrarsi in modo omogeneo data l'elevata permeabilità;
- il substrato appare molto più discontinuo e fratturato; ciò può essere dovuto al fatto che, data la sua bassa

permeabilità, l'iniezione a forte pressione della miscela cementizia abbia prodotto fessurazione.

Conclusioni

La sismica a riflessione ha permesso la ricostruzione delle geometrie del sottosuolo estrapolando le informazioni ottenute mediante le indagini puntuali. La produzione di sezioni 2D ha consentito di conoscere l'estensione dei corpi geologici sia parallelamente che trasversalmente al tracciato della galleria. In particolare sono state individuate le situazioni critiche per l'avanzamento del fronte:

- intercettazione dei depositi di copertura quaternari;
- intercettazione dell'unità sabbiosa del substrato plio-pleistocenico;
- intercettazione di fratture;
- intercettazione di "sacche" o lenti nei depositi di copertura.

In particolare, la possibilità di intercettare nei depositi di copertura, eventuali "sacche" o lenti di materiale saturo o fratture beanti che pongano in continuità idraulica la galleria con tali masse a comportamento liquido, è potenzialmente rischiosa per la realizzazione dello scavo.

E' stato inoltre possibile osservare gli effetti dell'intervento di consolidazione mediante jet-grouting:

- l'inversione di velocità riscontrata nei primi metri di profondità può dipendere dalle condizioni di indurimento della miscela cementizia;
- la sezione Ln1b mostra che l'infiltrazione della miscela cementizia è stata molto localizzata nel terreno di riporto ed omogenea nei sottostanti depositi di copertura caratterizzati da una permeabilità elevata; l'intervento di jet-grouting sembra, invece, aver avuto un effetto peggiorativo per il substrato, dato che quest'ultimo appare più discontinuo, probabilmente a causa della fratturazione prodotta dalla miscela iniettata a forte pressione in un mezzo a bassa permeabilità.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dr. Geol. U. Lenzi e l'Ing. A. Ferranti per aver permesso la pubblicazione dello studio, il Prof. P. Signanini per aver contribuito alla qualità del lavoro, il Dr. A. Cilli, il Dr. Geol. D. Di Tommaso, il Dr. Geol. F. Pizzica, la Dr.essa Geol. R. Raiti per la collaborazione prestata.

Bibliografia

Ashida Y., 2001, Application of geophysical techniques to geotechnical engineering, ISRM News Journal, v.7, n.1, pp.34-43.

Baker G.S., Schmeissner C. & Steeples D.W., 1999, Seismic reflection from depths of less than two meters, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 279-282.

Celse B., 1999, Reconnaissance tridimensionnelle en avant du front de taille par méthodes sismiques, These, Université de Lille.

Clark J.C., Johnson W.J. & Miller W.A., 1994, The application of high resolution shear wave seismic reflection surveying to hydrogeological and geotechnical investigation, Symposium on

the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 235-245.

Cravero M., Iabichino G., Godio A., Sambuelli L., 2000, Metodologia per controlli e misure di tipo geomeccanico e geofisico per lo scavo meccanizzato di gallerie, Atti VIII ciclo di Conferenze di meccanica ed ingegneria delle

rocce .Torino, MIR 2000.

Eriksson S., Grov E., Haroaron B., Kroyer J., 1998, Crossing the north atlantic, World Tunnelling, October.

Gasperini M., Giorgetti F., Rainone M.L. & Signanini P., 1994, SH waves high resolution and very high resolution seismic reflection prospecting: some examples, Atti 1st. European Congress on Regional Geological Cartography and Information System, Bologna, 13-16 June 1994.

Hayashi K., Saito H., 2001, Prediction ahead of the tunnel face by a high resolution seismic refraction method with sources placed in the tunnel, ISRM News Journal, v.7, n.1, pp.28-33.

Inazaki T., Isahai H., Kawamura S., Kurahashi T., Hayashi H., 1999, Stepwise application of horizontal seismic profiling for tunnel prediction ahead of the face, The Leading Edge.

Ivor-Smith D. J., Pettersson C. B., 1988, Houston northwest lateral project, World Tunnelling, June.

Knapp R.W. & Steeples D.W., 1986(a), High resolution common depth point seismic reflection profiling: Instrumentation. Geophysics, 51, 276-282.

Knapp R.W. & Steeples D.W., 1986(b), High resolution common depth point seismic reflection profiling: Field acquisition parameter design, Geophysics 51, 283-294.

Kneib G., Kassel A. and Lorenz K., 1999; Automatic seismic prediction ahead of the tunnel bore machine. Atti dell'EAGE 61st Conference and Technical Exhibition Helsinki, Finland, 7-11 June. 4-45

Mari J.L., Arens G., Chapellier D., Gaudiani P., 1998, Geophysique de gisement et de genie civil, Publication de l'Institut francais du petrole, editions Technip, Paris.

Mindle D., 1992, Third Blackwall tunnel, World Tunnelling, November.

Palestini R., Signanini P. & Tombolini F., 1988, Esempio di prospezione sismica a riflessione con onde di taglio, Acts of VII Convention of Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida vol. I, 313-323.

Pelizza S., Grasso P., 1998, Tunnel collapses: are they unavoidable?, World Tunnelling, March.

Sattel G., Frey P., and Amberg R., 1992, Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland. First Break, 10(1), 19-25.

Sattel G., Sander B. K., Amberg F., and Kashiwa T., 1996, Tunnel seismic prediction, TSP - some case histories. Tunnels & Tunnelling.

Servizio Geologico d'Italia, Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000.

Signanini P. & Torrese P., 2004, Application of high resolution shear wave seismic methods to a geotechnical problem. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 63, 4, 329-336.

Smith M., 1988, Channel rail tunnel gets under way, World Tunnelling, March

Smith M., 1988, The Oslo Tunnel, World Tunnelling, March.

Smith M., 1999, Frøya strait crossing", World Tunnelling, May.

Stumpel H., Kahler S. & Meissner R., 1984, The use of seismic shear waves and compressional waves for lithological problems of shallow sediments, Geophysical Prospecting 32, 662-675.

Umney A.R., 1996, Under Port Hetland, World Tunnelling, August.

Wada K., Tsutsui T., Saito A., Hara T., Zhdanov M., 1996, Three dimensional transient electromagnetic model study for fracture prediction from tunnel face, Proc. of the 95th SEG Conference, 297-301.

Wada K., Tsutsui,T., Saito A., Ohya T., Hara T., 1997, An approach to fracture prediction from tunnel face by transient Electromagnetic method, Proc. of Int. Workshop Application of Geophysics to Rock Engineering, ISRM Sympoium, New York, 75-82.