

MONITORAGGIO E MODELLAZIONE DELL'INTERFERENZA TRA LA LINEA 1 DELLA METROPOLITANA E LA GALLERIA EST DEL PASSANTE FERROVIARIO DI TORINO

Barla M., Alessio M., Antolini F., Gilardi M., Barla G.

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino

marco.barla@polito.it

Sommario

Si illustra il sistema di monitoraggio utilizzato per il controllo tensio-deformativo del rivestimento in conci prefabbricati della galleria della Linea 1 della Metropolitana automatica di Torino (in esercizio), in corrispondenza dell'interferenza con il sovrastante Passante ferroviario (in costruzione, nel tratto di linea est). Si descrive altresì la modellazione numerica tridimensionale effettuata per la comprensione dei fenomeni in atto.

Introduzione

Negli ultimi decenni l'area metropolitana di Torino ha vissuto un periodo di intensa attività legata alla costruzione di diverse infrastrutture in sotterraneo. Tra queste sono particolarmente rilevanti il Passante ferroviario e la Linea 1 della Metropolitana automatica.

La tratta urbana del Passante (Figura 1) ha una lunghezza di 12 km, 7 dei quali in galleria realizzata in gran parte in artificiale, mediante paratie a partire dal piano campagna, e in parte in naturale, mediante scavo a foro cieco. Il progetto, unico in Italia, prevede il totale interrimento della ferrovia, con la costruzione del passante nord-sud e di nuove stazioni, la copertura delle preesistenti trincee ferroviarie e la realizzazione di un nuovo viale, nonché di separare funzionalmente i collegamenti a media e lunga distanza da quelli del trasporto locale.

La Linea 1 della Metropolitana è un sistema completamente automatizzato di trasporto sotterraneo che è stato inaugurato nei primi mesi del 2006. I lavori sulla tratta Collegno - Porta Nuova, iniziati nel 2000, hanno comportato la costruzione di una galleria lunga 9,6 km e 15 stazioni, mentre nel 2011 è stata aperta la tratta Porta Nuova - Lingotto, di circa 4 km e ulteriori 6 stazioni. Attualmente sono in progetto i prolungamenti della linea ad ovest e verso sud. La galleria è stata scavata ad una profondità variabile tra 15 e 20 m dal piano campagna utilizzando tre macchine di scavo del tipo a pressione di fango (EPB), di diametro pari a 7,8 m con rivestimento in conci prefabbricati di calcestruzzo.

La costruzione di queste opere ha dato origine a problemi di interferenza con l'ambiente costruito di superficie, piuttosto che tra le opere stesse, che hanno richiesto particolare cura nelle fasi progettuali e costruttive. Una tra le più rilevanti interferenze è proprio quella tra il passante e la metropolitana stessa, i cui tracciati si intersecano nella zona di piazza Statuto. La Figura 2 mostra una sezione trasversale rappresentativa nella quale sono visibili le diverse infrastrutture costruite o in fase di costruzione. Qui i lavori di costruzione della seconda galleria del Passante ferroviario stanno avvenendo in condizioni di esercizio sia del servizio ferroviario, nella galleria Ovest, sia del servizio metropolitano nella sottostante galleria. Al fine di assicurare le condizioni di sicurezza delle linee in esercizio, è stato necessario mettere a punto un sistema di monitoraggio per l'analisi in continuo.

Il sistema di monitoraggio installato permette di evidenziare “near real time” il comportamento del rivestimento in conci della galleria della Metropolitana a seguito delle lavorazioni soprastanti. I dati analizzati vengono quotidianamente resi fruibili su piattaforma WEB GIS, sia in forma numerica che grafica.

Una modellazione numerica tridimensionale con il metodo degli elementi finiti è stata messa a punto per l’analisi e la comprensione completa dei differenti effetti associati allo scavo e alla sequenza di costruzione adottata.

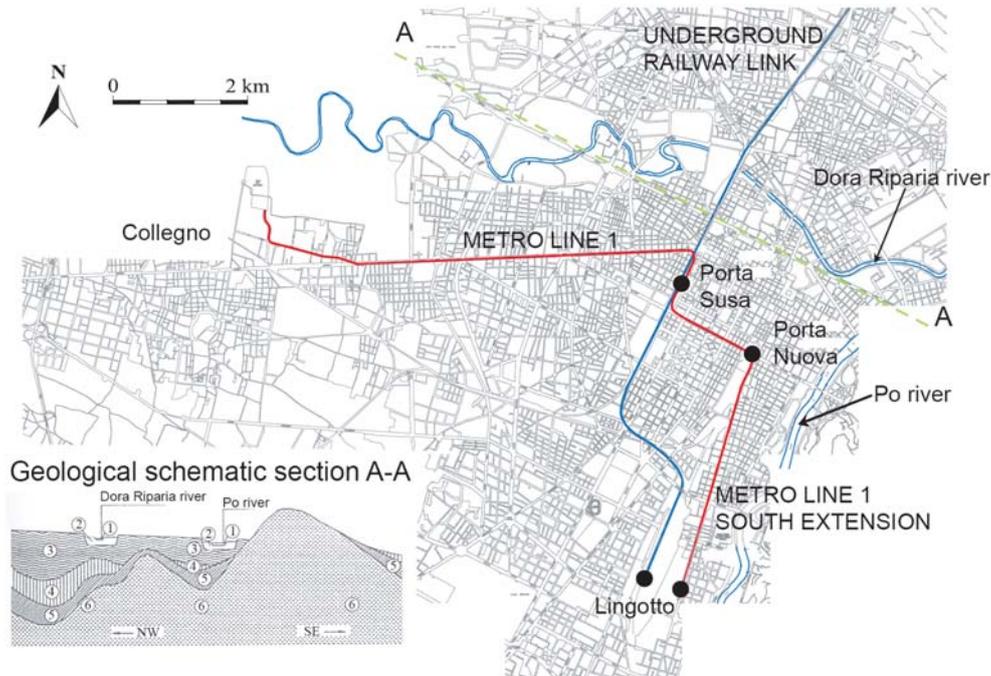


Figura 1. Passante ferroviario e Linea 1 della Metropolitana di Torino. Legenda: ① depositi alluvionali attuali; ② depositi alluvionali recenti; ③ depositi alluvionali antichi; ④ Villafranchiano; ⑤ depositi del Piacenziano; ⑥ depositi Miocenici (Bottino and Civita, 1986).

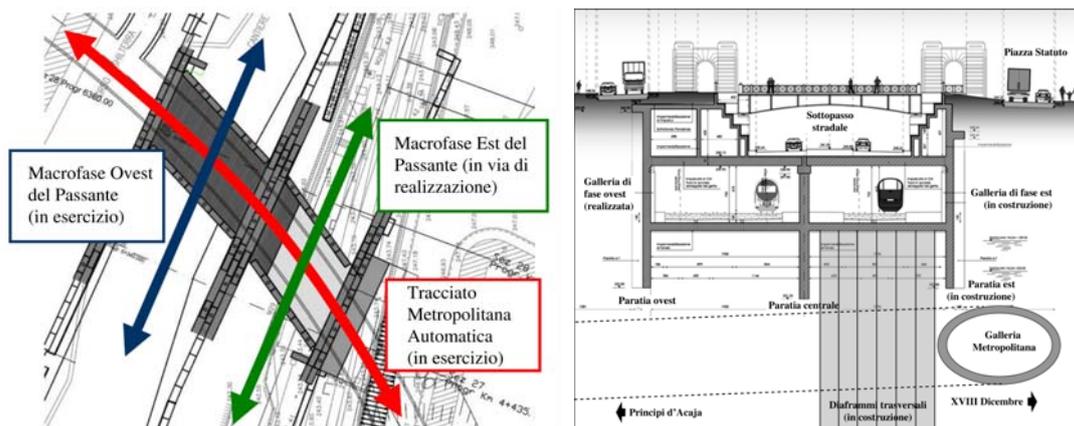


Figura 2. Schema planimetrico dell’interferenza tra Metropolitana e Passante ferroviario e sezione della galleria ferroviaria in corrispondenza dell’interferenza con la galleria metropolitana.

Caratteristiche del terreno

Il sottosuolo di Torino è caratterizzato dalla presenza di un deposito di sabbia e ghiaia avente densità medio - alta fino ad una profondità compresa tra gli 8 e i 10 m. Al di sotto di questo livello si osservano lenti di terreno cementato. Sulla base dei dati disponibili (Barla et al.

1995, Barla 1997, Barla e Vai 1999, Barla et al. 2005, Barla et al. 2010) è stato definito un modello geotecnico delle condizioni del sottosuolo, distinguendo le seguenti unità geotecniche (GU):

- GU1: strato superficiale (limo sabbioso e argilloso);
- GU2: sabbie e ghiaie da sciolte a leggermente cementate;
- GU3: sabbie e ghiaie da leggermente a mediamente cementate;
- GU4: sabbie e ghiaie da mediamente a molto cementate.

Le condizioni geologico-stratigrafiche sono variabili lungo la linea.

Il livello della superficie piezometrica è noto attraverso misure piezometriche e previsioni a lungo termine (Barla 1997).

Le fasi dell'intervento in esame

L'intervento può essere sinteticamente suddiviso nelle seguenti fasi (Figura 2):

- consolidamento dall'alto (previa perforazione) della zona all'intorno del cavo della galleria metropolitana con iniezioni cementizie e chimiche;
- costruzione mediante idrofresa delle paratie longitudinali rispetto alla galleria ferroviaria (paratia est) e dei pannelli di diaframma trasversali rispetto al Passante;
- scavo tra le paratie centrale ed est fino a quota 2,6 m;
- esecuzione del solettone di copertura;
- progressiva demolizione dei pannelli trasversali mediante microfresa, scavo della galleria e posa di due ordini di tiranti rispettivamente ad una profondità di 5 e 10 m;
- getto del solettone di fondo.

Il sistema di monitoraggio

Nella Figura 3 è riportata l'area dell'interferenza tra il Passante e la galleria della Metropolitana e il sistema di monitoraggio installato. Tale sistema di monitoraggio comprende:

- una stazione totale automatizzata installata in calotta per il monitoraggio degli spostamenti del rivestimento della galleria mediante mire ottiche (Figura 3a e 3e);
- 16 trasduttori di spostamento LVDT (Figura 3b, dove la freccia indica la calotta della galleria) per la misurazione della variazione delle deformazioni dei conci nel piano della sezione trasversale della galleria;
- 16 trasduttori di spostamento LVDT (Figura 3c) per la misurazione dello spostamento reciproco dei conci lungo lo sviluppo longitudinale della galleria;
- 10 accelerometri triassiali con amplificazione di 1000 mV/g (Figura 3d) per la misura dello stato di vibrazione indotto dal traffico del sovrastante Passante ferroviario, dal traffico della linea metropolitana e dalle diverse lavorazioni connesse alla costruzione della galleria ferroviaria di fase Est;
- 2 termocoppie per la misura della temperatura ambientale;
- un interferometro radar ad apertura reale (Figura 3f), composto da sistema trasmittente e ricevente, PC di controllo ed acquisizione dati e prismi riflettenti artificiali ("corner reflector") per il monitoraggio delle convergenze su una sezione della galleria (sezione 404).

Dopo un iniziale periodo di prova in cui si è provveduto a verificare il corretto funzionamento del sistema, la strumentazione ha iniziato ad acquisire i primi dati a partire dal 12 giugno 2010 per quanto riguarda gli accelerometri e dal 16 giugno 2010 per quanto riguarda la stazione totale e gli LVDT. Le misure di deformazione, scostamento ed accelerazione vengono analizzate e rese disponibili quotidianamente mediante piattaforma WEB GIS.

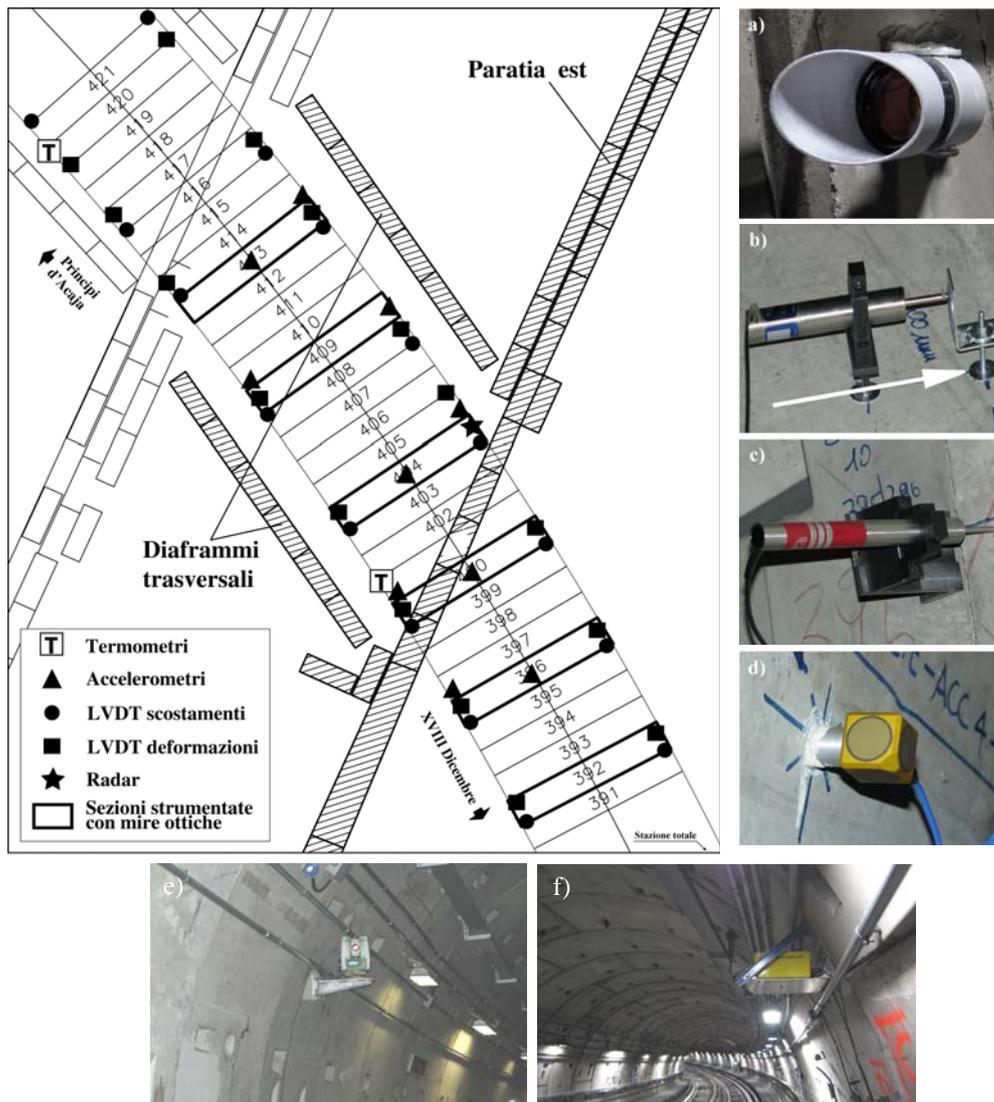


Figura 3. Sistema di monitoraggio installato. a) Mire ottiche installate sulla via di corsa; b) Trasduttore di spostamento per la misura delle deformazioni dei conci; c) Trasduttore di spostamento per la misura del mutuo scostamento tra due conci adiacenti; d) Accelerometro triassiale; e) Stazione totale; f) Interferometro radar.

Analisi dei risultati

Nella Figura 4 è possibile osservare le deformate delle sezioni strumentate 400, 409 e 413 ottenute mediante i dati di spostamento delle mire ottiche. L'analisi di questi dati ha permesso di evidenziare un abbassamento della galleria della Metropolitana pari a circa 2 mm legato alla riduzione del confinamento laterale causato dalla realizzazione dei diaframmi paralleli all'asse della galleria nel periodo 12 - 18 giugno 2010. Il successivo scavo di avvicinamento fino al raggiungimento del diaframma trasversale lato Sud, avvenuto nel periodo 23 marzo - 10 aprile 2011, ha causato un sollevamento sostanzialmente rigido di circa 1 mm. L'ultima fase di scavo al di sopra della galleria della Metropolitana ed oltre il diaframma lato Nord, avvenuta nel periodo 15 maggio - 17 giugno 2011, ha causato un ulteriore sollevamento rigido compreso tra 3 e 4 mm sulle sezioni 404, 409 e 413.

Nella Figura 5 sono riportati gli spostamenti misurati dal sistema radar lungo la linea di vista del sensore, diagrammati insieme agli spostamenti dalla stazione totale in direzione x (direzione coincidente con la linea di vista del sensore interferometrico) sulle mire installate sulla sezione 404. Nel grafico è riportato anche l'andamento della temperatura all'interno

della galleria. Il confronto tra gli spostamenti evidenzia un buon accordo tra le due tipologie di misura nel periodo compreso tra il 21 giugno e il 4 luglio 2010. Successivamente tra luglio ed agosto 2010 le misure RAR e le misure della stazione totale si discostano maggiormente, probabilmente a causa della discontinuità di acquisizione dei dati RAR e a causa degli effetti differenziali legati allo scarico tensionale provocato dallo scavo dei diaframmi. La successiva fase di scavo non ha provocato spostamenti significativi in direzione orizzontale e le oscillazioni lette in prima analisi sono da imputare ad effetti termici. Tale comportamento risulta in buon accordo con quanto registrato dalle mire ottiche della stazione totale.

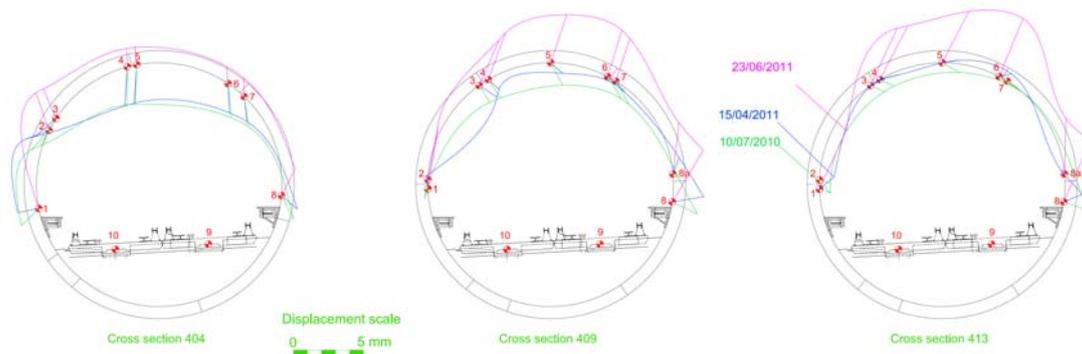


Figura 4. Deformate delle sezioni 400, 409 e 413 dopo lo scavo dei diaframmi (10/07/2010), dopo lo scavo di avvicinamento (15/04/2011) e durante lo scavo al di sopra della galleria (08/06/2011)

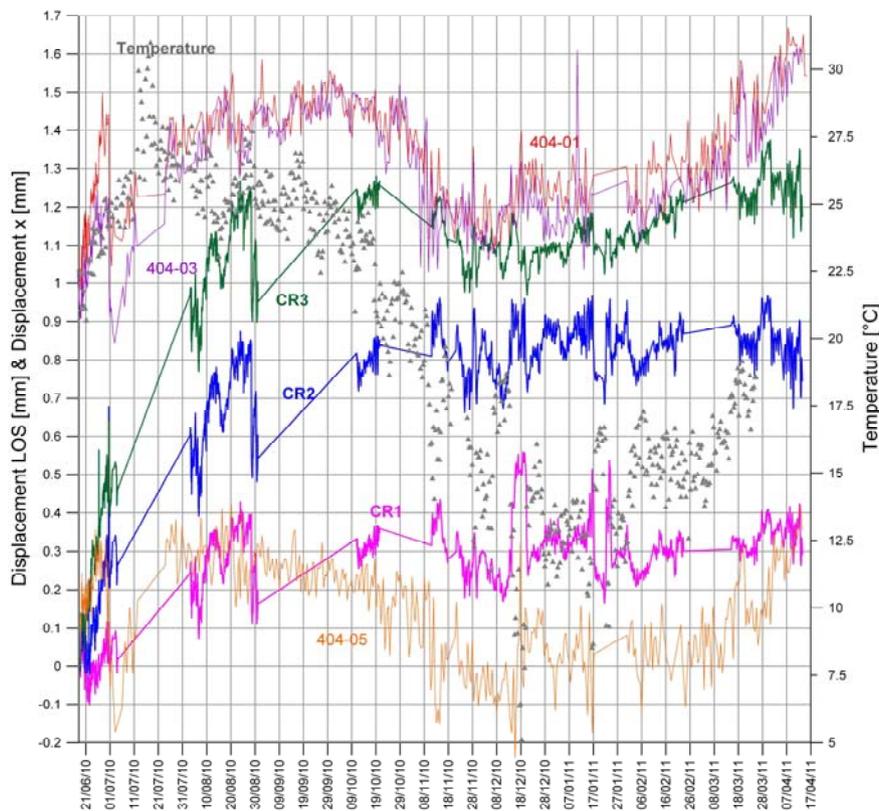


Figura 5. Risultati del monitoraggio interferometrico radar. Spostamenti lungo la linea di vista del sistema misurati sui corner reflector CR1, CR2 e CR3 confrontati con gli spostamenti orizzontali relativi misurati dalla stazione totale su alcune mire ottiche dell'anello 404 e la temperatura.

Modello numerico FEM tridimensionale

Al fine di studiare gli effetti delle diverse fasi di scavo e costruzione è stato messo a punto, mediante il software MIDAS GTS 2011 v 1.1, un modello tridimensionale costituito da circa 800000 elementi tetraedrici, particolarmente complesso vista la geometria del problema (Figura 7) che comprende la galleria della Metropolitana, la paratia centrale (che separa la galleria ovest già realizzata dalla galleria est in fase di costruzione) e la paratia est, i diaframmi paralleli all'asse della Metropolitana, il solettone di copertura e il solettone di fondo. Si è dovuto infatti tenere conto delle diverse strutture presenti e della curvatura dell'asse della galleria della Metropolitana, delle caratteristiche meccaniche delle unità di terreno e delle fasi di scavo.

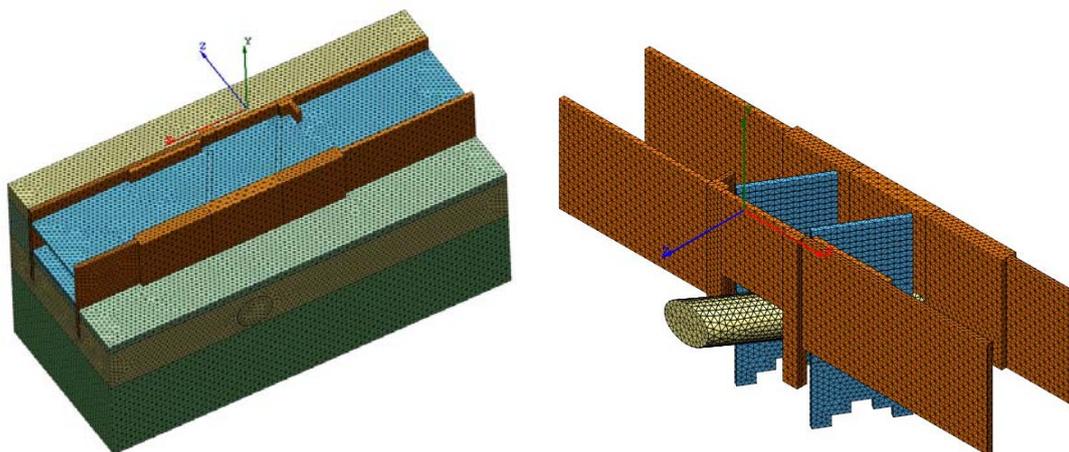


Figura 7. Modello FEM 3D dopo lo scavo e la realizzazione dei solettoni, paratie centrale ed est e diaframmi paralleli alla galleria della metropolitana

Nonostante la complessità del fenomeno, il confronto tra i dati misurati in sito ed i risultati delle analisi FEM è molto promettente, sia con riferimento alla fase di realizzazione dei diaframmi che alle successive fasi di scavo.

Bibliografia

- Barla G., Macchi A., Mattalia C., Rabagliati U. 1995. Mathematical modelling and performance monitoring for the Corso Vittorio Emanuele II Underpass in Turin. Proc. FMGM 95. Field Measurements in Geomechanics. 4th International Symposium. Bergamo.
- Barla G. 1997. Tunneling for Turin railway link. Proc. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Volume 4. pp. 2387-2390.
- Barla G. & Vai L. 1999. Indagini geotecniche per la caratterizzazione del sottosuolo di Torino lungo il tracciato del Passante Ferroviario. XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma, 22-25 Settembre 1999, pp. 335-342.
- Barla G., Barla M., Bonini M., Crova R., 2005. Back analysis of monitoring data for the Torino Metro. 5th Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground June 2005.
- Barla G., Barla M., Camusso M., 2010. Geotechnical characterisation of the Torino subsoil by combining site investigations and numerical modelling, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., in revisione.
- Barla G., Antolini F., Barla M., Mensi E., Piovano G., 2010. Monitoring of the Beauregard landslide (Aosta valley, Italy) using advanced and conventional techniques. Eng. Geol., 116, 3-4 (2010), pp. 218-235.