

LINEA ROMA – VITERBO: REALIZZAZIONE IN AREA URBANA DELLE DISCENDERIE DI STAZIONE A CIELO APERTO CON PROFONDITA' DI 40 M SOTTO IMPORTANTI BATTENTI IDRAULICI

Bircolotti F.L. *, Capata A. *

*SGS S.r.l. - Studio Geotecnico Strutturale Roma

SOMMARIO

Nell'articolo si illustrano i criteri progettuali, le modalità esecutive e i controlli in corso d'opera degli scavi per l'accesso alla galleria di stazione nella fermata Quattro Venti della linea FS Roma – Viterbo IV binario. Si tratta di un'opera a cielo aperto profonda 40 m scavata tra pannelli di paratia controventati da puntoni in calcestruzzo e metallici che costituiscono elemento portante delle scale fisse e mobili della discenderia in fase finale. La struttura è stata realizzata in ambiente urbano, densamente abitato e ha interessato terreni limo-argillosi con intercalazioni sabbiose in falda, con battenti idraulici oltre i 20 m che hanno richiesto in fase di approfondimento un sistema di *dewatering* controllato dall'interno dello scavo. Una frequente attività di monitoraggio effettuata tramite l'impiego di vari dispositivi di controllo dello stato tenso-deformativo e idraulico dell'opera ha consentito, durante le delicate operazioni di scavo, il continuo controllo delle condizioni di sicurezza ad assoluta garanzia delle quali erano stati anche approvvigionati ulteriori puntelli a pié d'opera, nonché la verifica delle ipotesi sul comportamento dell'opera assunte in fase progettuale.

Parole chiave: scavo armato, monitoraggio, condizioni di breve e lungo termine, metodo degli elementi finiti.

1. INTRODUZIONE

L'opera oggetto di studio è stata realizzata, tra la fine del 2004 e il 2005, in un'area fortemente urbanizzata in adiacenza alla sede della linea ferroviaria storica Roma – Viterbo. Lo scavo della discenderia, fino a 40 m di profondità dal piano campagna, ha interessato terreni con caratteristiche fortemente coesive solitamente frequenti nel distretto romano.

Scopo dell'articolo è porre l'accento, a partire dai dati di monitoraggio disponibili relativi alle strutture, sull'interpretazione del comportamento dei terreni sede degli scavi per la realizzazione dell'opera e di verificare le ipotesi assunte in fase di progettazione.

Gli scavi sono sostenuti da paratie contrapposte, realizzate con pannelli di diaframma in calcestruzzo armato dello spessore di 1 m e lunghezza fino a 45 m.

In figura 2 è riportata la sezione tipologica dell'opera in oggetto, la quale risulta vincolata tramite sistemi di ancoraggio attivo, nel caso tiranti a trefoli, e passivo, ovvero controventamenti realizzati mediante solettoni e puntoni gettati in opera, nonché puntoni metallici successivamente inglobati nelle strutture definitive costituenti le scale fisse e mobili.

La galleria di banchina adiacente alla fermata è stata realizzata successivamente alla discenderia.

Il livello di falda riscontrato in fase di indagine e considerato nella progettazione dell'opera è ubicato alla quota 34 m s.l.m., pertanto lo scavo fino a 10.75 m s.l.m. è stato eseguito sotto importanti battenti idraulici, motivo per il quale si è provveduto alla messa in opera di un sistema di pozzi drenanti per l'aggottamento della falda.



Figura 1. Rampa di accesso agli scavi della discenderia.

In fase di scavo particolare attenzione è stata prestata alle attività di monitoraggio per il continuo controllo sia del comportamento in termini di stato tenso-deformativo della struttura che degli spostamenti indotti nel terreno circostante. A garanzia delle condizioni di sicurezza, durante la realizzazione della fermata sono stati previsti puntelli metallici integrativi, la cui posa in opera era legata all'eventuale superamento dei valori di soglia e allarme stabiliti in fase di progettazione.

Nel seguito, dopo la parte relativa alla caratterizzazione geologico – geotecnica, si procede alla descrizione delle operazioni di scavo della discenderia e del sistema di monitoraggio.

Successivamente si illustrano i risultati delle verifiche numeriche effettuate confrontati con i valori sperimentali del monitoraggio.

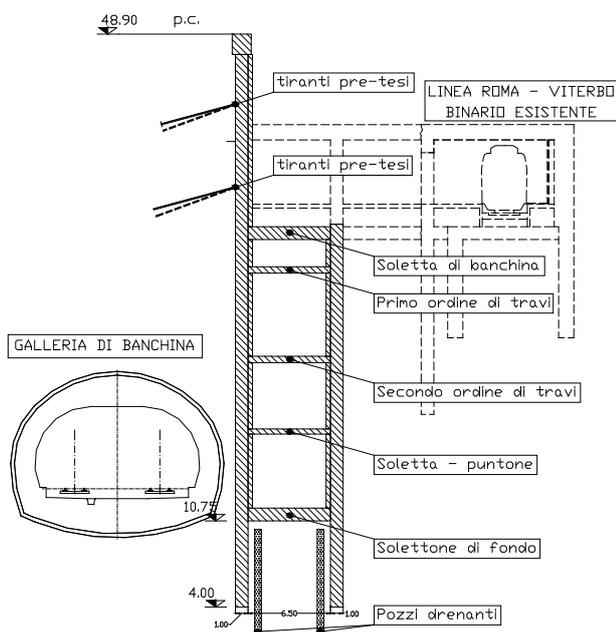


Figura 2. Sezione trasversale della discenderia di Quattro Venti.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO E IDRAULICO

La zona interessata dallo scavo della discenderia è costituita prevalentemente da terreni granulari sciolti con frequenti intercalazioni argillose, in presenza di falda.

I risultati delle varie campagne geognostiche effettuate hanno evidenziato, nella zona di interesse per l'opera in oggetto, la presenza di tre formazioni.

Il primo livello è costituito da terreni di riporto (R) caratterizzati da limi argillo – sabbiosi e sabbie argillo – limose; seguono i depositi alluvionali (Al), prevalentemente costituiti da argille limose e limi argillosi.

Procedendo nella stratigrafia si riscontra la formazione delle marne Vaticane (MV) caratterizzate da una elevata consistenza; in quest'ultima formazione sono distinguibili due diverse facies di cui la prima a maggiore componente

argillo – sabbiosa (MV1), la seconda prevalentemente sabbio – limosa (MV2) con frequenti intercalazioni argillose.

La caratterizzazione geotecnica è basata sui risultati di indagini in sito, consistite in prove penetrometriche dinamiche e prove *cross-hole*, nonché prove di laboratorio effettuate su campioni: prove di taglio diretto, triassiali e di compressione edometrica.

Dal punto di vista idraulico i terreni sono stati indagati attraverso prove di emungimento da pozzi; il livello di falda, ubicato a quota 34 m s.l.m., è stato individuato mediante piezometri, sia di tipo "a tubo aperto" che di tipo Casagrande.

Le caratteristiche dei terreni in termini di parametri di resistenza e deformabilità sono riportate nella tabella riassuntiva 1.

Tabella 1. Caratterizzazione geotecnica dei terreni.

litotipo	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	c_u (kPa)	k (m/s)	E' (kPa)	OCR
R	18	28	5	-	4E-06	50000	-
Al	19	26	10	-	1E-08	200000	1.2
MV1	20	28	35	350	1E-07	250000	5-10
MV2	20	30	20	300	5E-06	220000	4-8

Nella figura 3 è riportato l'andamento del modulo elastico di Young, determinato a partire dalle prove *cross-hole*.

Osservandone l'andamento sono chiaramente distinguibili le quattro formazioni prese in considerazione nella stratigrafia di progetto, riportata nella figura stessa.

3. PROCEDURE DI SCAVO

Le opere di sostegno degli scavi previsti per l'esecuzione della nuova fermata di Quattro Venti sono costituite da una coppia di paratie realizzate in adiacenza alla linea ferroviaria storica Roma – Viterbo.

La paratia multitirantata, lato Via Quattro Venti, è stata eseguita dal piano campagna (quota 48.90 m s.l.m.), mentre la paratia lato linea ferroviaria esistente è stata scavata, in seguito all'approfondimento dello scavo, da quota 33.10 m s.l.m.

Come si evince dalla sezione longitudinale (figura 4), in seguito all'esecuzione dei diaframmi in c.a., a partire dalla quota 33.10 m s.l.m. lo scavo è avanzato secondo una pendenza media del 20%, approfondendosi progressivamente fino alla quota di fondo.

In corrispondenza di ciascuna fase di approfondimento è stato predisposto un sistema di controventamenti tramite l'impiego di puntelli metallici inglobati nelle strutture definitive, puntoni in c.a. ad interasse 2.5 m, soletta di banchina gettata contro terra a quota 33.10 m s.l.m. e quindi del solettone di fondo (10.75 m s.l.m.).

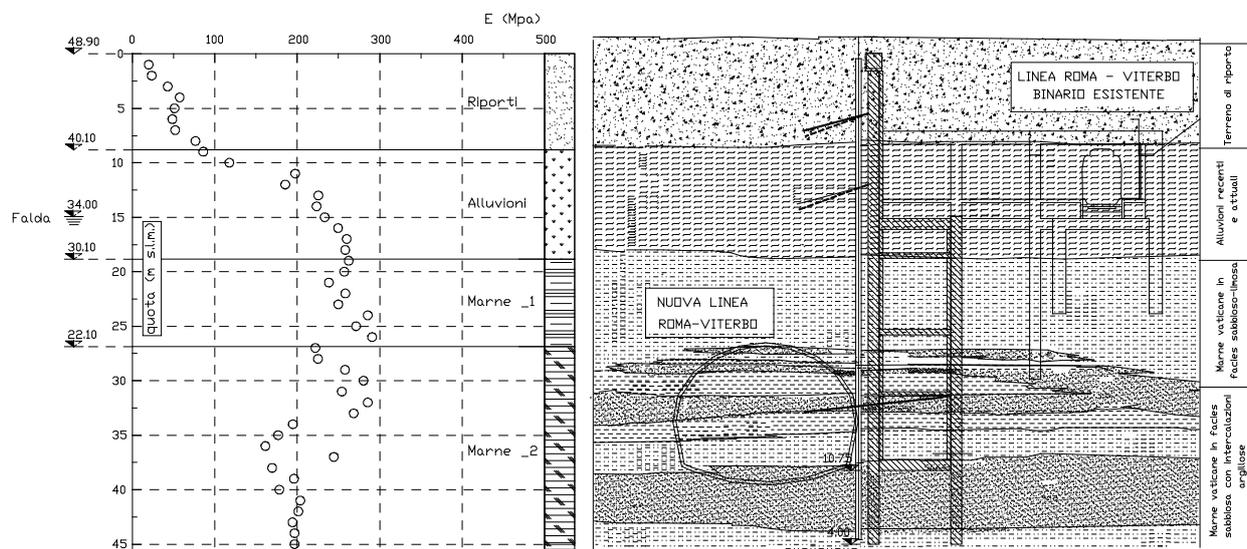


Figura 3. Risultati delle prove *cross hole* e stratigrafia di progetto.

Al raggiungimento del fondo scavo, il solettone è stato gettato in più fasi, seguendo una tecnica “a campione”, senza ricorrere all’utilizzo di puntellature aggiuntive in corso d’opera contrariamente a quanto previsto in fase progettuale.

L’approfondimento dello scavo dalla quota 33.10 m s.l.m. è stato preceduto dalla installazione di un sistema di drenaggio volto ad evitare il sollevamento del fondo a causa del crescente gradiente idraulico. Sono stati quindi eseguiti, all’interno, dei pozzi attrezzati con elettropompe sommerse che, abbassando il livello piezometrico nell’area compresa tra le due paratie, hanno permesso di ridurre la pressione dell’acqua al di sotto dello scavo. Una volta raggiunta la quota di fondo è stato messo in opera il sistema di drenaggio definitivo, consistente in uno strato di materiale ad elevata permeabilità con recapito dell’acqua nella vasca di aggotamento.

Successivamente, dopo il getto del solettone di fondo, sono state rimosse le pompe.

4. SISTEMA DI MONITORAGGIO

Attraverso un accurato piano di monitoraggio è stato effettuato il continuo e sistematico controllo del comportamento dell’opera, al fine di verificare, durante l’esecuzione dei lavori, le ipotesi progettuali e, qualora necessario, effettuare le opportune modifiche del sistema di puntellature.

In particolare l’attenzione è stata rivolta al controllo di:

- regime delle pressioni interstiziali e del livello di falda;
- deformazioni in corrispondenza delle paratie;
- tensioni e deformazioni nei puntoni metallici provvisori e definitivi (celle di pressione e *strain gauge*), e tensioni nelle travi in c.a. (celle di pressione).

Quest’ultimo aspetto, sul quale viene incentrato l’articolo, permette di stabilire, a partire dalla caratterizzazione del terreno e dalle ipotesi di comportamento dello stesso, il regime di spinte agenti sui pannelli di paratia.

Le misure di convergenza non vengono trattate nella presente memoria in quanto legate al solo aspetto della sicurezza globale dell’opera in fase di scavo, e sono comunque poco rilevanti in considerazione del basso livello deformativo riscontrato.

Nella figura 4 è riportata la disposizione, lungo il profilo longitudinale della fermata, dei controventamenti previsti.

I dati di monitoraggio a disposizione sono relativi all’intervallo temporale che va dal 21 Ottobre 2004 al 26 Luglio 2005, nel periodo in cui si è scavato all’interno delle paratie fino alla profondità di 13 m s.l.m.

5. VERIFICHE NUMERICHE

Al fine di valutare il comportamento del sistema terreno – struttura sono state eseguite analisi numeriche in condizione di deformazione piana, facendo riferimento alla sezione trasversale in figura 2.

In prima analisi è stato utilizzato il codice di calcolo agli elementi finiti *PARATIE* v. 6.1 (CeAS, Milano), il quale simula il problema di uno scavo sostenuto da diaframmi flessibili e permette di valutare il comportamento della parete di sostegno durante tutte le fasi di scavo e nella configurazione finale.

La modellazione numerica dell’interazione terreno – struttura è del tipo “trave elastica su suolo elastico”: le pareti di sostegno e i controventamenti vengono rappresentate con elementi finiti di tipo trave caratterizzati da rigidità flessionale (E·J) ed assiale (E·A), mentre il terreno viene simulato attraverso molle elastoplastiche monodimensionali connesse ai nodi della parete.

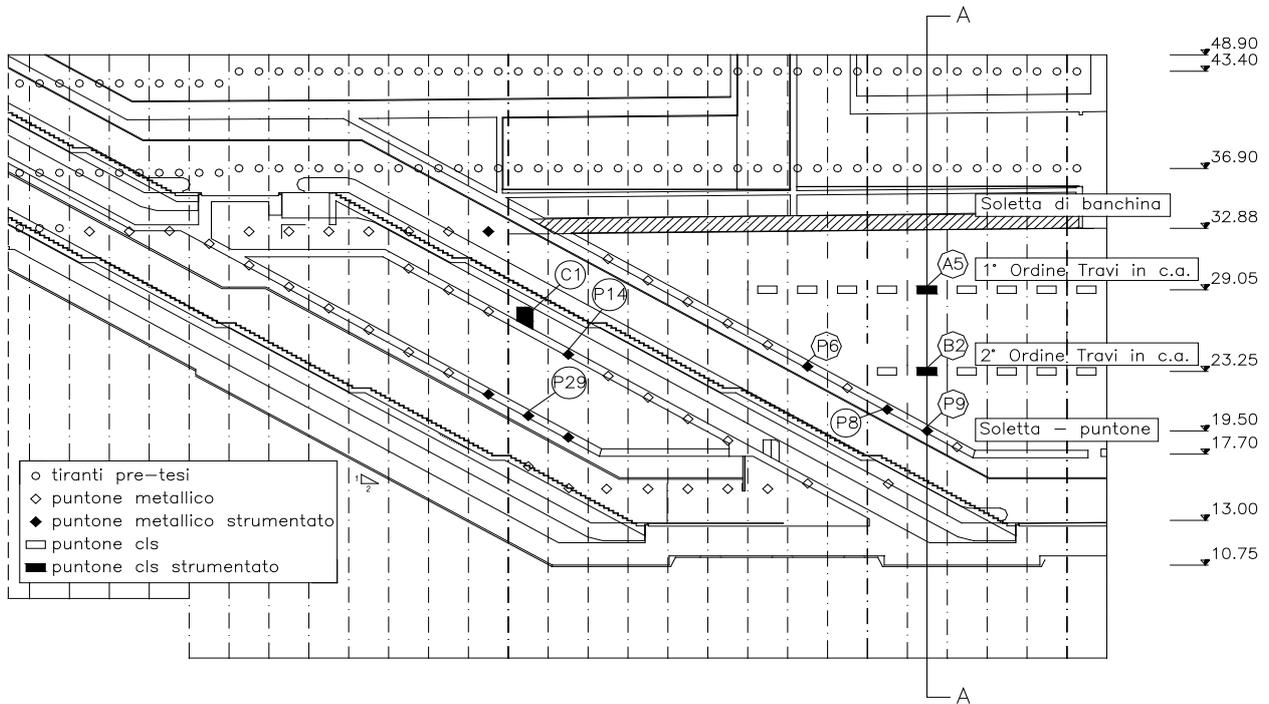


Figura 4. Profilo longitudinale della fermata di Quattro Venti e disposizione dei controventamenti.

Per quel che riguarda le caratteristiche meccaniche del terreno, si è scelto di considerare un modulo elastico dipendente dallo stato tensionale in sito.

Le analisi sono state eseguite con parametri di resistenza sia in termini di tensioni totali (condizioni non drenate, analisi PR_U) che in termini di tensioni efficaci (condizioni drenate, analisi PR_D).

E' stata inoltre eseguita una *back analysis* mediante il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS v.8.2.

Il programma consente la modellazione e l'analisi dello stato di sforzo piano, permettendo la riproduzione del comportamento dell'intero sistema terreno - struttura.

Nell'ambito del presente studio, tra i diversi modelli costitutivi si è scelto di adottarne uno con legge elastoplastica incrudente (*Hardening Soil Model*).

Tale analisi (PLX_D) è stata eseguita in termini di tensioni efficaci, considerando il moto di filtrazione indotto dalle operazioni di scavo e dall'installazione dei pozzi drenanti.

Il terreno è stato schematizzato con elementi bidimensionali a 15 nodi; per le paratie e per i controventamenti sono stati impiegati elementi di tipo *beam*, di tipo *anchor* per i tiranti e di tipo *geotextile* per i bulbi di ancoraggio.

In figura 5 è riportato lo schema di calcolo nella configurazione finale relativa al programma PARATIE, mentre le figure 6 e 7 si riferiscono all'analisi PLAXIS, rispettivamente nella fase iniziale e in quella per la quale sono disponibili gli ultimi dati di monitoraggio.

Come si evince dalle figure, nella simulazione sono state schematizzate anche le strutture relative alla linea storica Roma-Viterbo: ciò ha permesso di analizzare l'effettiva influenza, durante le fasi di scavo, dell'interazione tra strutture di nuova realizzazione e le preesistenze.

6. ANALISI E INTERPRETAZIONE DEI DATI DI MONITORAGGIO

I risultati del monitoraggio hanno evidenziato valori massimi di sforzo assiale nei controventamenti inferiori a quanto determinato in fase progettuale, non è stato pertanto necessario ricorrere a ulteriori puntelli metallici rispetto a quelli previsti in sede di progettazione, inoltre ricorrendo alla tecnica che prevede lo scavo e il getto per campioni della solettona di fondo è stato di fatto eliminato l'ultimo ordine di puntoni provvisori.

In figura 8 è riportata la *time history* dello sforzo registrato sui singoli puntoni con l'avanzare dell'esecuzione dell'opera, ovvero con il progressivo approfondimento del fondo scavo.

Si riscontra innanzi tutto che, relativamente alle analisi effettuate con parametri di resistenza in condizioni non drenate (PR_U), i risultati hanno condotto ad una buona stima dei valori degli sforzi evidenziati dalla campagna di monitoraggio.

Per quanto riguarda invece le analisi in condizioni drenate (PR_D e PLX_D) si osserva una evidente sovrastima delle sollecitazioni nei puntoni.

In tabella 2 sono riportati i valori massimi riscontrati sui puntoni strumentati ($N_{c.p.}$ e $N_{s.g.}$).

Come si può osservare sussistono talora discordanze, anche rilevanti, tra misurazioni effettuate alle stesse quote tra puntelli monitorati con celle di pressione o *strain gauges* e perfino nell'ambito dello stesso puntello quando strumentato con entrambi i dispositivi.

Tali discordanze possono essere facilmente associate ad alcuni aspetti operativi quali:

- eccessiva pressurizzazione delle celle di carico in fase di predisposizione delle stesse;

- messa in opera di puntone strumentati in prossimità di altri già posizionati e sottoposti a carico;
- modalità di approfondimento dello scavo attraverso rampe e quindi con fondi scavi parziali in pendenza;
- effetti idraulici localizzati, non prevedibili, difficilmente schematizzabili;
- variazioni stratigrafiche e quindi dei regimi di spinta in senso longitudinale dello scavo;

- effetti termici o di ritiro del calcestruzzo delle solette e dei puntone definitivi.
- Pertanto non devono essere trascurati aspetti geometrici quali ad esempio:
- la non perfetta complanarità delle superfici di contrasto, in particolare delle piastre metalliche di ripartizione dei puntelli;
 - irregolarità nelle profondità di scavo in corrispondenza dei puntone;
 - irregolarità nelle luci libere tra i puntone.

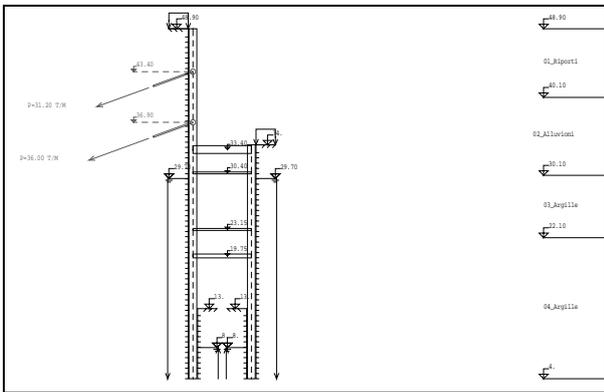


Figura 5. Configurazione finale dello schema di calcolo PARATIE.

Tabella 2. Sforzi massimi sui puntone espressi in kN (sono evidenziati in grassetto i puntone nella sezione verificata).

livello	puntone	SPERIMENTALI		TEORICI		
		N _{c.p.}	N _{s.g.}	N _{PR-U}	N _{PR-D}	N _{PLX-D}
2°	A5	978	n.d.	1480	3052	3900
3°	B2	330	n.d.	947	2237	2750
3°	P6	996	1228	947	2237	2750
4°	P9	737.3	660	2126	6303	5900
2°	C1	1531	n.d.	1480	3052	3900
3°	P14	638	1638	947	2237	2750
4°	P8	n.d.	637	2126	6303	5900
4°	P29	602	750	2126	6303	5900

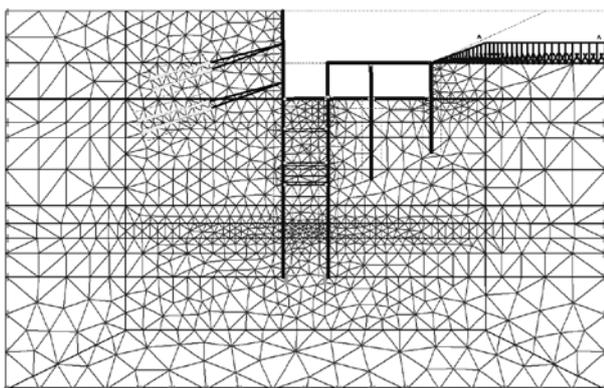


Figura 6. Configurazione iniziale dello schema di calcolo PLAXIS.

Analizzando l'andamento dei singoli puntone nella sezione verificata si osserva quanto segue:

- i dati di monitoraggio in corrispondenza del puntone A5 mostrano un livello di compressione pressoché costante con l'avanzare delle operazioni di scavo, comportamento che si riscontra anche nelle analisi PR_U e PR_D, mentre nella PLX_D si ha un progressivo, se pur contenuto, aumento dello sforzo;
- relativamente al B2 risulta evidente che esso, dopo aver preso carico nella fase di approfondimento dello scavo, subisce un progressivo scarico successivo all'installazione del puntone metallico P9. Tale andamento è concorde con quello determinato nelle PR_D e PR_U, mentre nella PLX_D il puntone conserva un andamento pressoché costante fino all'ultima fase. La stessa tendenza è evidenziata nel P6, posto alla stessa quota del B2, con valori riscontrati nella cella di pressione del tutto confrontabili con quanto determinato nella PAR_D, mentre lo *strain gauge* mostra un andamento all'incirca costante imputabile in parte al riscontrato aumento della temperatura del sensore nel mese di Luglio, periodo nel quale il fondo scavo è stato approfondito da quota 17.5 m a quota 13 m;

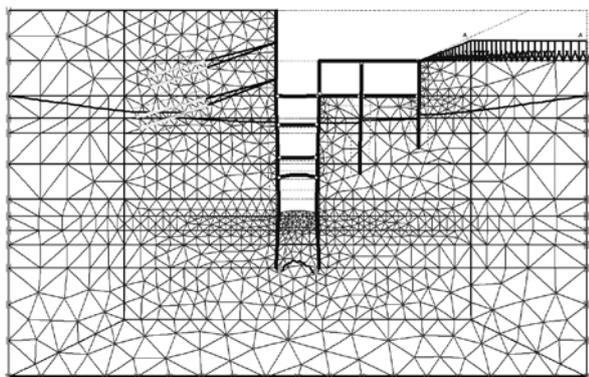


Figura 7. Configurazione finale del reticolo di calcolo analisi PLAXIS.

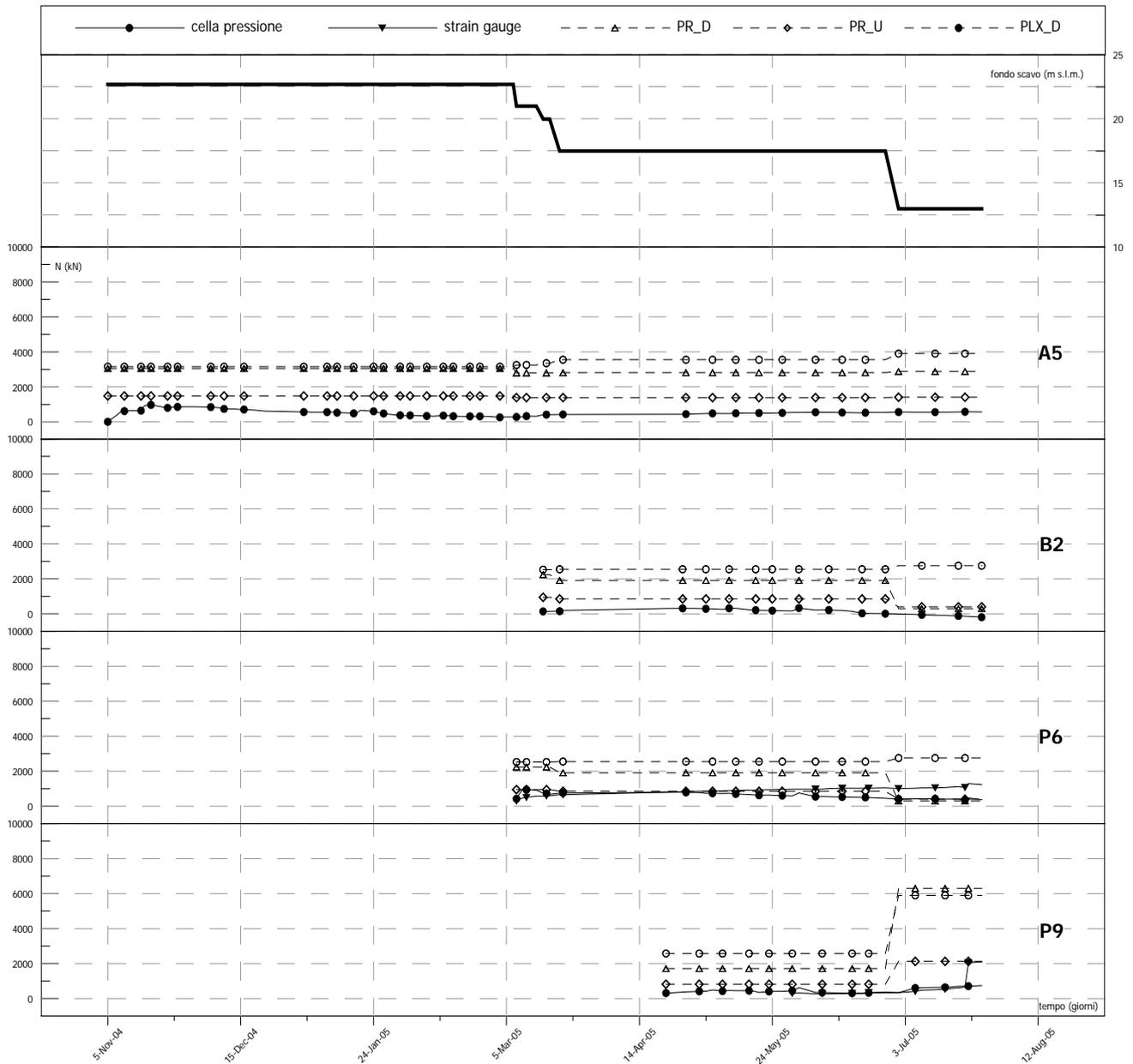


Figura 8. Time history degli sforzi assiali (in kN) registrati sui puntoni e risultati delle analisi numeriche effettuate.

- il puntone P9 mostra un andamento del valore di compressione dapprima costante, che tende quindi ad aumentare nell'ultima fase di scavo monitorata, concordemente con quanto evidenziato dai risultati delle analisi numeriche. Tale comportamento è messo alla luce sia dalla cella di pressione che dallo *strain gauge*, tranne per gli ultimi valori che risultano del tutto anomali e imputabili al getto di calcestruzzo, per la realizzazione della soletta, tra i puntoni P7, P8 e P9.

Secondo quanto esposto fino ad ora, l'analisi che meglio approssima il comportamento effettivamente riscontrato durante l'attività di monitoraggio risulta essere la PR_U.

Correlando quindi la sollecitazione assiale agente sui controventamenti con lo stato tenso-deformativo in cui viene a trovarsi il terreno durante le fasi di scavo, si

conferma come l'ipotesi progettuale che prevede, per formazioni caratterizzate da una forte componente coesiva, di valutare le condizioni di spinta in termini di tensioni totali sia quella più realistica.

Nella figura 9 si riportano i valori di spinta orizzontale per la paratia alta, lato Via Quattro Venti, relativi alle analisi eseguite.

Le verifiche PR_U e PR_D, riproducono un andamento del regime di spinta abbastanza simile, evidenziando comunque il diverso comportamento dei terreni, rispettivamente in condizioni non drenate e drenate.

L'analisi PLX_D presenta, invece, un andamento notevolmente diverso, imputabile principalmente alla tipologia del modello costitutivo impiegato, che conduce a valori di spinta tendenzialmente maggiori della analoga PR_D.

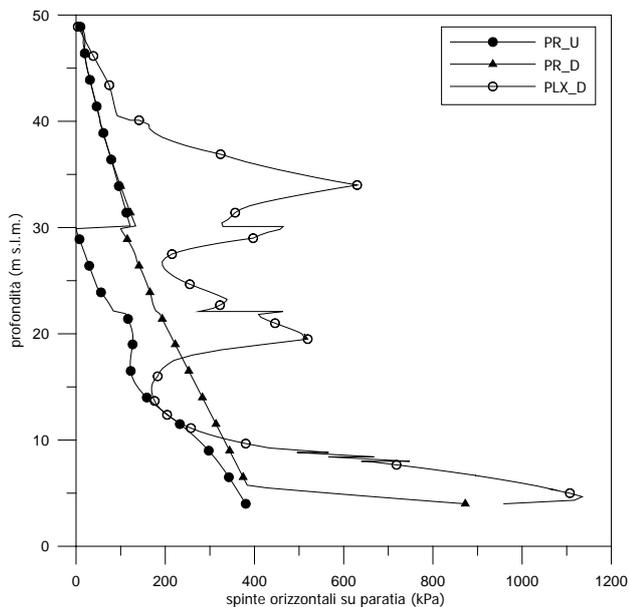


Figura 9. Andamento delle spinte orizzontali risultanti dalle analisi numeriche, agenti sulla paratia alta (lato Via Quattro Venti).

Le analisi relative alle condizioni drenate, ad ogni modo, non riproducono effettivamente quanto messo alla luce dai dati reali del monitoraggio, conducendo pertanto, per questo tipo di terreni, ad una sovrastima delle sollecitazioni in fase di scavo fino a tre volte il valore registrato.

7. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Nell'ambito del progetto del raddoppio della linea ferroviaria Roma – Viterbo, la fermata Quattro Venti è stata realizzata tra paratie contrapposte di lunghezza fino a 45 m.

Lo scavo della discenderia è stato realizzato predisponendo, in ciascuna fase di approfondimento, un opportuno sistema di vincoli attivi (tiranti) e passivi (puntone e solette), ed è stato completato nell'arco di circa dieci mesi dall'inizio delle operazioni.

Il continuo monitoraggio dello stato tenso-deformativo della struttura ha permesso di confermare, in fase di realizzazione, le ipotesi effettuate per il dimensionamento dell'opera.

In particolare i valori registrati di sforzi e deformazione in corrispondenza dei controventamenti, sia provvisori che definitivi, hanno evidenziato che i terreni sede dello scavo, con particolare riferimento alla formazione delle Marne Vaticane, hanno avuto un comportamento prettamente coesivo classificabile come "non drenato".

Tale comportamento, simulato tramite l'impiego di due codici di calcolo agli elementi finiti, conferma a pieno quanto previsto e ipotizzato in fase progettuale.

Si è potuto anche constatare come il ricorso a codici di calcolo sofisticati ad elevata potenzialità, peraltro in continua diffusione, non sempre riesca a simulare il reale comportamento dell'insieme terreno – struttura con particolare riferimento ai regimi di spinta effettivi.

8. BIBLIOGRAFIA

- AA. VV., 1998. *Plaxis, finite element code for soil and rock analysis*. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1998.
- AA. VV., 1995. *Paratie for Windows – un programma non lineare ad elementi finiti per l'analisi di strutture di sostegno flessibili*, CeAS Milano.
- Barla G., Becci B., Colombo A., Nova R., Peduzzi R., 1988, *A method for the analysis and design of flexible retaining structures. Application to a strutted excavation*, Proceedings of the Sixth Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Vol 3.
- Becci B., Nova R., 1987, *Un metodo di calcolo automatico per il progetto di paratie*, Rivista Italiana di Geotecnica, 21,1,33-47.
- Bowles J.E., 1988, *Foundation Analysis and design*, 4th edition Mc Graw-Hill.
- Burghignoli A., 2002, *Scavi e opere di sostegno*, Atti XXI Convegno nazionale di Geotecnica, L'Aquila 2002, p.103-110.
- Cestari F., 1990. *Prove geotecniche in sito*, Geo.Graph.
- Holtz R.D., ASCE M., Jamiolkowski M., 1985, *Time dependence of lateral earth pressure*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No.10.
- Lambe T.W., Whitman R.V., 1979. *Soil Mechanics*, SI Version. John Wiley & Sons, New York.
- Lancellotta R., 1988, *Geotecnica*, Zanichelli.
- Pane V., Tamagnini C., 1997, *Problemi generali dell'analisi delle opere di sostegno*, IV Convegno Nazionale dei Ricercatori Universitari, Perugia, Ottobre 1997, Hevelius.

ABSTRACT

ROMA – VITERBO LINE: REALIZATION IN URBAN ENVIRONMENT OF A FOURTY METERS DEEP RAILWAY STATION WITH HIGH VALUES OF WATER PRESSURE

Keywords: diaphragm walls, monitoring activities, short and long term, finite elements method.

The purpose of this paper is to show the design criteria, the executive procedures and the real time checks of the excavation activities for the realization of the Quattro Venti railway station in Rome.

The structure consists in an underground construction, more than forty meters deep, realized through the excavation between diaphragm walls bound by means of active (anchors) and passive (trusses and slabs) devices, which become load bearing structures of the escalators in the final configuration.

The structure has been realized in a highly urbanized environment, in silty – clayey soils with several saturated sandy levels, in presence of high values of pore pressure which required, during excavation, the installation of a controlled dewatering system.

A wide monitoring activity, by means of several devices for the determination of the stress - strain and

hydraulic state of the system, allowed the continuous check, during excavation phases, of safety conditions.

In case of overcoming of the alert values in terms of axial stress in the slabs, they were predisposed further trusses, which, however, were not used since the alert values have not ever been overcome.

The purpose of the monitoring system was consequently to check also the design hypothesis about the soil tensional behaviour.

Several numerical analysis, using the finite elements method, have been performed, both contemplating the drained and undrained behaviour for the silty and clayey soils.

The results of these analysis highlight that, during the excavation phases, the silty and clayey soils have an undrained behaviour in terms of resistance parameters.