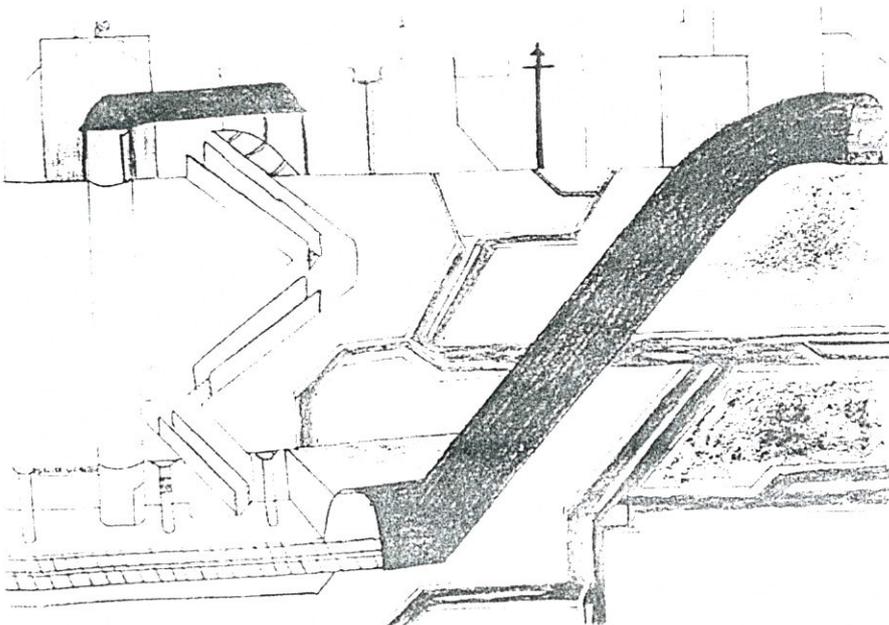
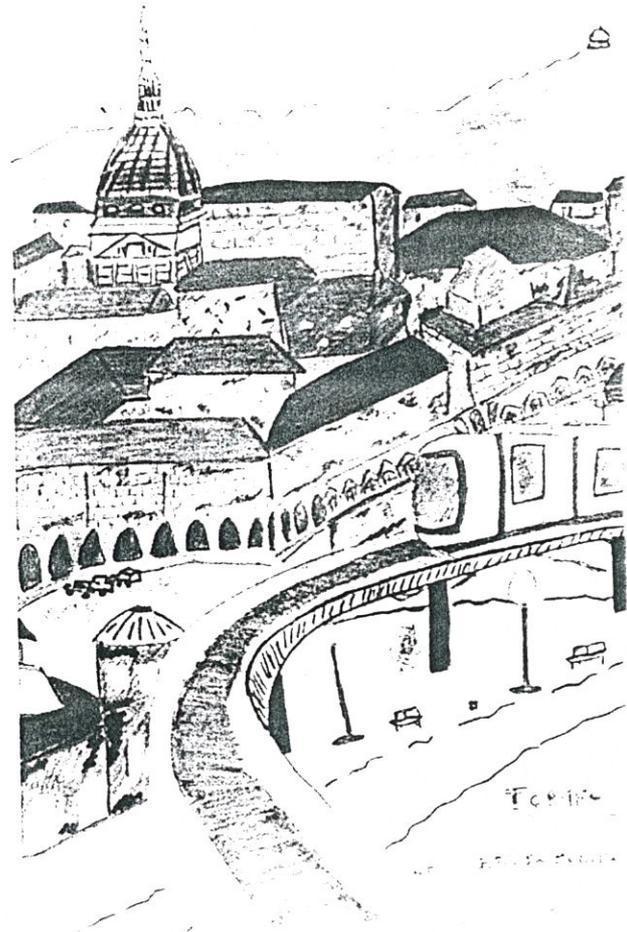


Mechanized Tunnelling

CHALLENGING CASE HISTORIES



International Congress
Turin, Italy
16-19 November 2004

PROCEEDINGS



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Georisorse e Territorio



ITALIAN TUNNELLING ASSOCIATION



GEORESOURCES AND ENVIRONMENT ASSOCIATION

INTERNATIONAL CONGRESS

on

**MECHANIZED TUNNELLING:
CHALLENGING CASE HISTORIES**

*dedicated to Prof. Lelio Stragiotti
on the 40th foundation anniversary of GEAM*

Turin, 16 – 19 November 2004

PROCEEDINGS

INDEX

	<i>Pag.</i>
S. PELIZZA Introductory Lecture	5
 <i>Rock Tunnels</i>	
P. GRASSO Key Lecture	11
WEN-LONG CHENG Hsuehshan Tunnel and TBM	13
R. GRANDORI, P. PERFETTI, D. VIZZINO Montegiglio conveyor belt tunnel – Bergamo (Italy)	21
M. CONCILIA, R. GRANDORI New Viola Water Transfer Tunnel	27
R. GRANDORI, P. ROMUALDI The Abdalajis tunnel (Malaga - Spain) - The new Double Shield Universal TBM challenge	35
R. LEONARDI Kunming Zhangjiuhe Water Diversion and Water Supply Project - The influence of geological adversities on TBM performances	43
P. GRASSO, M. PESCARA, G. CARRIERI, B. FABBRI, P. FALLITI Sörenberg tunnel - A 5 km gas-supply line under the mountain in Switzerland	53
 <i>Soil Tunnels</i>	
K. KOVARI Safety System in Urban Tunnelling - The Zimmerberg Tunnel	61
P. GRASSO, S. MACCAN, V. GUGLIELMETTI The rehabilitation of Line 1 of the St. Petersburg Metro	75
G. QUARTA, A. NICOLA, G. PONCETTA The west side CSO tunnel - Portland Oregon	83
R. BONO Barcelona - New Line 9 of Metro	91
G. PERRI, G. SICILIANO Los Tuneles del Metro de Valencia en Venezuela	99
B. CAVAGNA, M. CHIORBOLI The use of EPB tunnelling machine in the Milan subsoil: the line 1 extension of the Milan Tube to the new Fair Complex	107

R. P. LOVAT Design and manufacture of Tunnel Boring Machines for the North East Interceptor Sewer, Los Angeles, USA	119
B. CAVAGNA, G. COLOMBO, A. SCIOTTI The use of EPB TBM for tunnel digging in soft rock: the example of Naples underground	125
V. L. SHVARTSMAN, G. I. MURAVIN, S. N. VLASOV, M. HERRENKNECHT, J-V. VALETTE Moscow Largest Highway Tunnel Construction Project	135
P. LONGCHAMP Groene Hart project	141
G. KLADOS, Y. H. KOK Selection & Performance of TBM in Karstic Limestone - SMART Case	151
R. F. KRAUSE, W. E. BÖNSCH, K. WASCHKOWSKI S.M.A.R.T. - Project. Kuala Lumpur - Tunnelling with Hydro-Shield - Analysis of the Logistics	165
F. MINGUEZ, V. MARCHIONNI, E. BREVEGLIERI The High Speed Rail system in Bologna: an example of a complex urban EPB twin tunnels excavation	173
 <i>Microtunnelling</i>	
A. OLCESE, V. PETRUCCO Il Microtunnel Praoil a Genova Pegli	183
L. R. GRUBER, A. GUERINI Il microtunnel di Bakental in Svizzera	197
 <i>Late Papers</i>	
F. MENDAÑA Double shield tunnellers in the construction of the Guadarrama tunnels	207
G. GIACOMIN Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project - Lots II & III	225
M. NEUENSCHWANDER Geological risk sharing in underground works according to the Swiss conditions of contract - The Gothard base tunnel's TBM headings	235
G. CARRIERI, R. CROVA, P. GRASSO, V. GUGLIELMETTI Torino Metro Line 1, The Tunnels Excavation of the First Section	237
M. PADOVAN, M. BARBANTI Martignano road tunnel	249
ITA WORKING GROUP N. 17 ON LONG TUNNELS AT GREAT DEPTH Final Draft of WG Report, updated July 2003	255

The use of EPB tunnelling machine in the Milan subsoil: the line 1 extension of the Milan Tube to the new Fair Complex

Bruno Cavagna^a, Michela Chiorboli^a

^a Metropolitana Milanese, Via del Vecchio Politecnico 8, 20122 Milano, Italy

Abstract

In connection with the construction of the Milan Fair's New Complex, which is under way in the area that formerly hosted the Agip refinery in Rho-Pero, it is currently under construction the underground extension of the Milan Tube (line M1) that will link the Fair Complex, and the future High Speed Railway Station, with the center of the city.

The development of this project had to cope with some requirements related with boundary conditions, owed to new Fair infrastructures and because the tunnel is located under populated and built up areas; it had also to cope with extremely difficult geotechnical conditions connected to the presence of non-cohesive soil under water level.

In order to overpass all these aspects, also relating with the good results obtained in the construction of a single track of the "Passante Ferroviario" of Milan in 1995, it was been selected an EPB tunnelling machine.

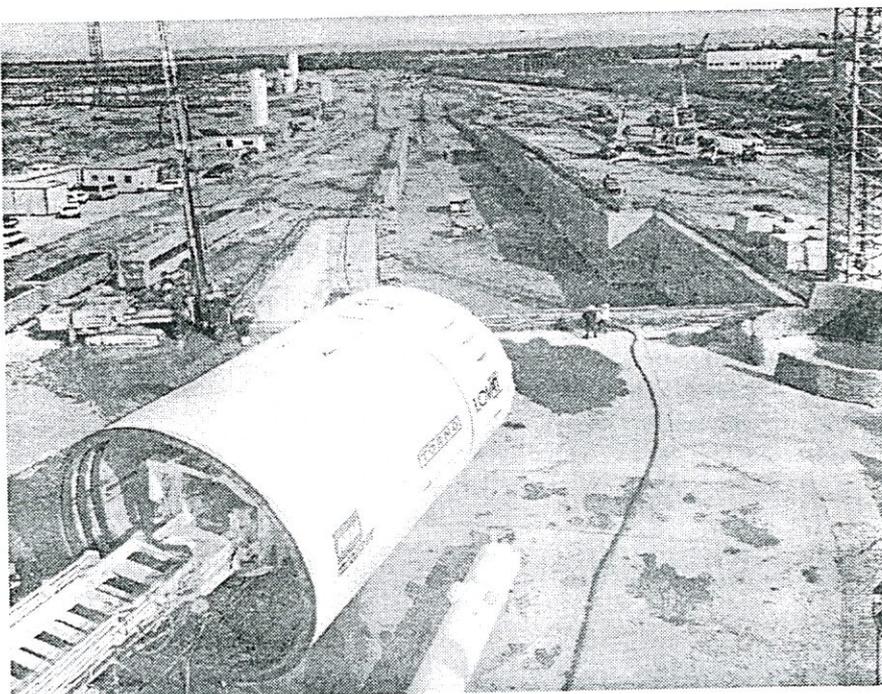
This paper gives a description of the main parameters influencing the performance of the tunnelling machine, comparing the results obtained in the M1 extension.

1. Introduzione

Con l'Atto Integrativo all'Accordo di Programma per la qualificazione e lo sviluppo del Sistema Fieristico Lombardo, il Comune di Milano si è assunto l'impegno di realizzare, entro la data di inaugurazione della nuova Fiera, il prolungamento della Linea 1 della Metropolitana.

Il prolungamento Molino Dorino-Rho Fiera, parte dall'attuale capolinea di Molino Dorino ed arriva nell'area individuata per il polo esterno, in connessione con le future stazioni del Sistema Ferroviario Regionale e dell'Alta Capacità. E'

lungo circa 2,1 km, si sviluppa sul territorio dei comuni di Pero (1,1 km) e Rho (1,0 km) e comprende due stazioni: *Pero* e *Rho Fiera SFR-AC*.



Il tracciato interferisce con un'area intensamente urbanizzata: zone abitate, edifici di differente tipologia e il Fiume Olona nell'ambito del Comune di Pero, l'autostrada A4 MI-TO tra i Comuni di Pero e Rho, l'area adibita a futuro polo fieristico, il rilevato delle FS della linea Milano-Torino e vari insediamenti della zona industriale nell'ambito del Comune di Rho.

In tutta la zona del prolungamento, gli attuali livelli di falda presentano escursioni notevoli, anche nel recente periodo, e interessano tutte le strutture previste dal progetto.

I metodi costruttivi previsti, sono i metodi già utilizzati nella realizzazione della rete metropolitana di Milano e del Passante Ferroviario.

Le soluzioni progettuali utilizzate, prevedono la costruzione di due gallerie a semplice binario, scavate con l'utilizzo di uno scudo meccanizzato EPB-S, di 6,60 m di diametro esterno per la maggior parte dello sviluppo del prolungamento. Sono presenti brevi tratte sia a cielo aperto tra paratie, sia a foro cieco con scavo in tradizionale.

Ad oggi risulta realizzata la prima canna (canna Nord) ed è in fase di avvio la realizzazione della canna Sud.

2. Quadro geologico-geotecnico di sintesi

Geologicamente, l'area interessata dal tracciato risulta ubicata sul "livello

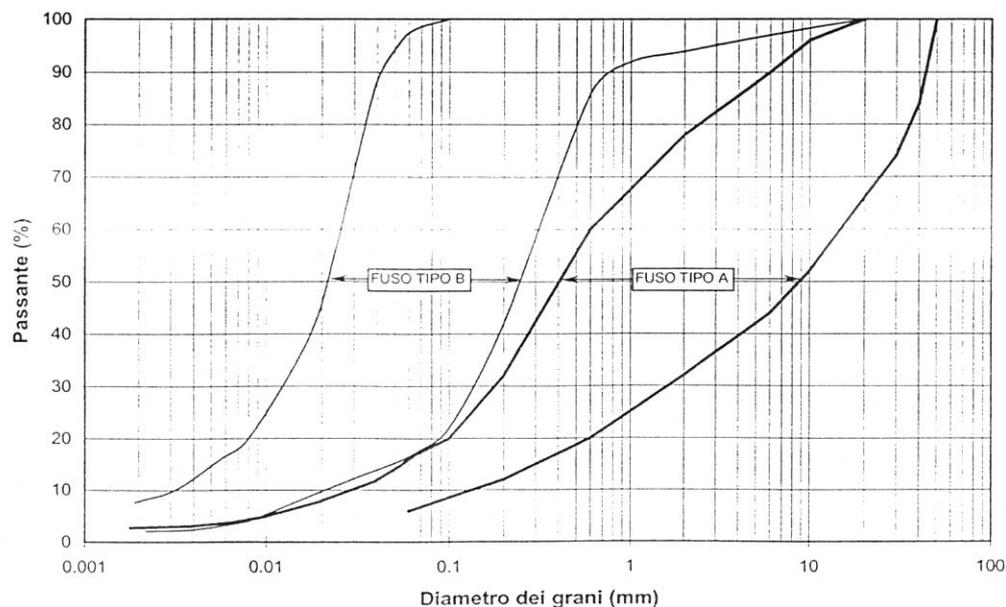
fondamentale della pianura padana", costituito, in affioramento, da depositi di origine fluvio-glaciale: tale unità geologica, indicata con il nome di "Fluvio-glaciale Wurm", è caratterizzata da un potente (50 – 60 m) deposito di ghiaie e sabbie in matrice limosa con locali lenti di argilla.

Tra copertura fluvio-glaciale e substrato, il cui tetto si individua a circa 250 m di profondità, si presentano altre formazioni deposizionali, che non risultano interessate dalle opere in oggetto.

In fase progettuale, è stata condotta una campagna di indagini, con prove in situ (sondaggi a carotaggio continuo e piezometri, prove penetrometriche in situ, prove di permeabilità, prove down-hole) e prove di laboratorio.

Le stratigrafie dei sondaggi evidenziano che il terreno è costituito principalmente da un potente deposito di ghiaie e sabbie ben addensate; la continuità del deposito è, talvolta, interrotta da livelli di spessore contenuto e discontinui di materiale più fine (sabbie limose e limi), la cui persistenza risulta molto variabile e di difficile previsione.

Il terreno in situ, interessato dalla costruzione dell'opera, può essere sostanzialmente caratterizzato mediante due "fusi granulometrici caratteristici" (si veda anche la figura successiva):



FUSO TIPO A – Ghiaia e sabbia

Ghiaia (passante a 2mm):	20÷70%
Sabbia (tra 0.075 e 2mm):	25÷60%
Limo (tra 0.002 e 0.075mm):	5÷15%
Argilla (inferiore a 0.002mm):	0÷2%
D50:	0.4÷9.0mm
D10:	0.04÷0.1mm

FUSO TIPO B – Sabbia fine limosa a limo sabbioso debolmente argilloso

Ghiaia (passante a 2mm):	0÷5%
Sabbia (tra 0.075 e 2mm):	10÷80%
Limo (tra 0.002 e 0.075mm):	15÷90%
Argilla (inferiore a 0.002mm):	2÷8%
D50:	0.02÷0.2mm
D10:	0.002÷0.02mm

limosi (fuso granulometrico tipo B di cui al seguito) che hanno evidenziato valori di permeabilità compresi tra 5×10^{-4} e 1×10^{-3} cm/sec.

I parametri geotecnici medi sono riassunti nella tabella che segue.

Per quanto attiene alla falda acquifera di progetto (livello massimo di falda nel lungo termine), sono stati utilizzati i seguenti criteri di analisi:

- ricostruzione della superficie freatica nel territorio milanese in base a dati storici, comprendenti condizioni in cui il sistema acquifero era soggetto ad uno sfruttamento molto diverso dall'attuale (superficie di saturazione freatica del 1954);
- osservazioni recenti del livello nei 6 pozzi installati da MM lungo il tracciato in oggetto.

Queste determinazioni consentono di prevedere l'asintoto superiore della dinamica di evoluzione del livello freatico sul medio-lungo periodo (falda di progetto).

Sono stati adottati, per la falda di progetto, valori variabili da quota + 136 m. s.l.m. a + 140 m. s.l.m. passando da inizio a fine prolungamento.

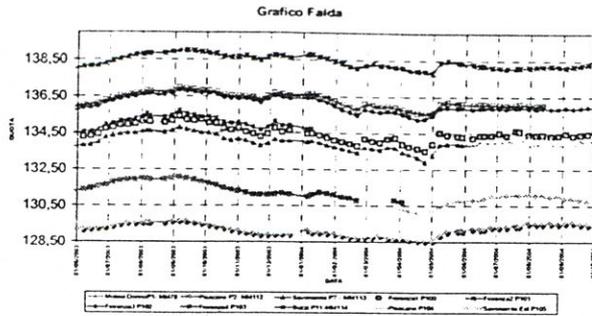
Per quanto relativo alla falda attuale, lungo il

Parametri geotecnici	U.M.	Sabbie e ghiaie
Peso di volume naturale	(KN/m ³)	18.0
Peso di volume immerso	(KN/m ³)	22.0
Coesione drenata	(MPa)	0.0
Angolo di attrito drenato	(°)	35
Modulo di elasticità	(MPa)	100 (z<10m) 120 (z>10 m)
Coefficiente di Poisson	-	0.30

I valori della permeabilità variano tra 2×10^{-3} e 1×10^{-2} cm/sec, valore che risulta pressoché costante al variare della profondità.

Fanno eccezione due sole prove eseguite nell'ambito di livelli più marcatamente

tracciato sono presenti una serie di piezometri che consentono il continuo monitoraggio del livello di falda, come indicato nella figura sotto riportata.



La falda presenta oscillazioni non del tutto regolari, con una tendenza complessiva che risulta comunque in crescita (negli ultimi 3 anni). Tale situazione ha richiesto, in fase di progettazione costruttiva, un adeguamento delle opere provvisorie rispetto a quanto originariamente previsto, ma non ha comportato modifiche alle strutture definitive in quanto, come già specificato, è stata assunta una falda di progetto (a lungo termine) che rappresenta un limite superiore della possibile evoluzione.

3. Cronistoria scavo della canna Nord

La tratta scavata mediante EPB-S si estende dal manufatto Fiorenza al manufatto Pisacane, misura complessivi 1120 m. ed ha visto l'attraversamento a vuoto del manufatto

Savonarola e della stazione di Pero.

Lo scavo della prima canna, che ha avuto inizio il 9 febbraio 2004, è terminato il 10 settembre 2004, con un avanzamento medio sull'intera tratta di circa 5 m/giorno.

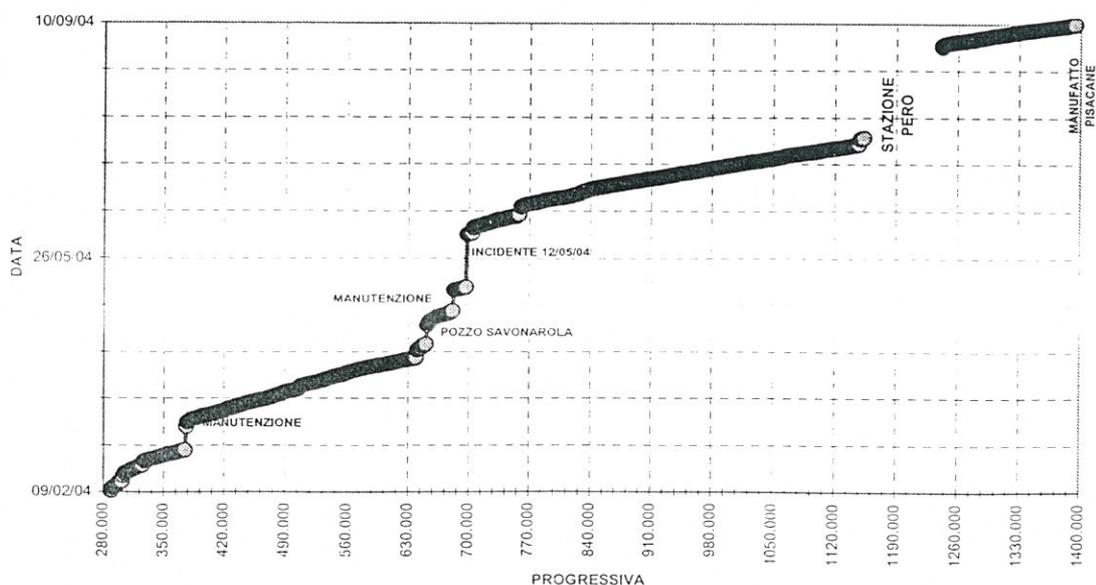
Lo scavo della prima canna è stato caratterizzato da diversi fermi del fronte dovuti a problematiche di vario genere, fra cui particolare evidenza ha assunto il fermo, di 24 giorni, verificatosi a seguito di un incidente meccanico avvenuto in galleria, che ha provocato il danneggiamento di buona parte delle apparecchiature della fresa.

Le produzioni massime sono state comunque superiori ai 16 m/giorno ed a regime, escludendo i fermi sopraccitati, si sono avute produzioni medie di circa 10 m/giorno nel tratto fino alla stazione di Pero e di circa 14 m/giorno nel tratto dalla stazione di Pero al manufatto Pisacane.

Nello scavo della prima canna, in particolare nel tratto in prossimità della zona di ripartenza dopo il citato incidente del 12/05/04, si sono verificate molte interruzioni dell'avanzamento, il che rende poco omogenei i dati registrati.

Lo scudo meccanizzato in utilizzo è, infatti, dotato di un acquisitore automatico dei parametri operativi che, interfacciato con un software dedicato, registra in continuo i

AVANZAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO



relativi valori.

Nella presente memoria, viene riportata una prima analisi critica dei dati dopo lo scavo della prima canna.

Dovranno essere condotte ulteriori analisi, in particolare filtrando i dati non significativi, ai fini dello studio delle correlazioni esistenti tra parametri operativi e comportamento tensodeformativo dell'ammasso, soprattutto in fase di esecuzione della seconda canna.

Questa prima analisi ha cercato di raggruppare i parametri in funzione di zone "omogenee", ossia caratterizzate da valori simili di copertura e di falda.

Questa suddivisione era già stata assunta in fase di progetto per la definizione dei parametri operativi della macchina e per l'analisi delle subsidenze superficiali, ma tralascia altri fattori fortemente condizionanti (come, ad esempio, la presenza di consolidamenti preventivi).

Viene comunque di seguito mantenuta, anche per avere un termine di confronto con quanto previsto in fase progettuale.

4. Parametri caratteristici dello scavo

La tratta ad oggi eseguita presenta valori di copertura variabili tra 10 e 20 metri ed altezze di falda che vanno da 0 a 12 metri circa (il tutto riferito all'asse della galleria).

Al fine di interpretare la mole di dati a disposizione, è stata impostata, come già detto, la suddivisione in 8 campi, caratterizzati da coperture ed altezze di falda simili. I campi, adottati in sede di progetto, sono i seguenti:

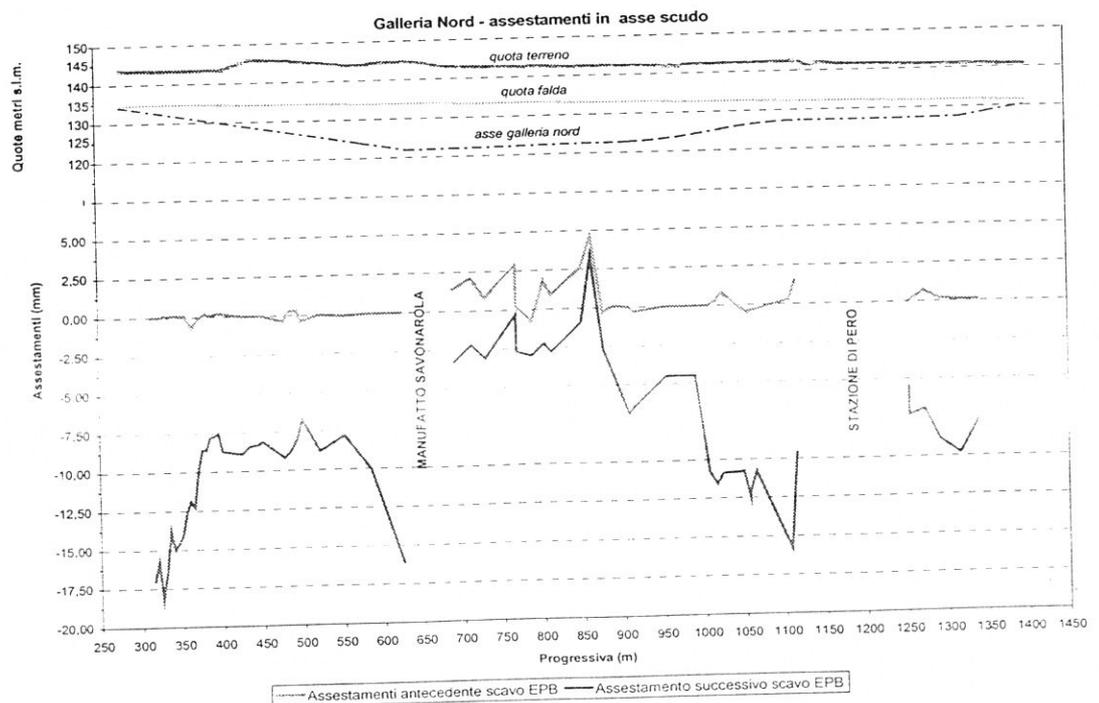
Campo	Progr. Inizio campo	lunghezza (m)	ricoprimento (m) (*)	falda (m) (*)	
1	289,5	92	11	2	da manufatto Firenze a manufatto Savonarola
2	381	76	15	5	
3	457	133	19	8	
4	590	94	21	11	da manufatto Savonarola a Stazione di Pero
5	684	288	19	10	
6	972	90	17	8	da Stazione di Pero a Pisacane
7	1062	90	15	6	
8	1152	249	12	3	

(*) rispetto all'asse galleria

La figura successiva riporta schematicamente l'andamento dell'asse della galleria con le corrispondenti quote del terreno e della falda ed il valore dei cedimenti finali a passaggio della fresa avvenuto e dei movimenti che si sono manifestati prima dell'arrivo della EPB (dovuti ai trattamenti di consolidamento).

I primi 3 campi, fino al manufatto Savonarola, sono caratterizzati da coperture medie crescenti di 11, 15 e 19 metri. C'è inoltre da sottolineare che il primo campo è quello corrispondente alla fase di avvio della fresa, mentre nel terzo c'è stata la prima uscita della fresa all'interno del manufatto Savonarola.

I 4 campi centrali presentano coperture variabili tra 21 e 15 metri, interessano una zona ove sono stati eseguiti consolidamenti preventivi e, per quanto concerne il settimo campo, c'è stata la nuova uscita della fresa all'interno del manufatto di stazione di Pero.



L'ottavo campo, infine, ha copertura di 12 m, simili a quelle del primo, ma interessa una tratta quasi totalmente consolidata, oltre ad essere caratterizzato, come ultimo eseguito, da condizioni operative ormai messe a punto. Dovrebbero essere inoltre introdotte ulteriori differenziazioni per tener conto degli interventi di consolidamento preventivi, eseguiti in alcune tratte, e dei relativi

Al di là delle varie correlazioni che possono essere analizzate mettendo a confronto i valori dei parametri operativi, l'attenzione viene posta sulle due grandezze fondamentali che caratterizzano la performance di una EPB: i cedimenti e la pressione.

5. Pressione al fronte

campi	Energia specifica [kJ/m ³]			Spinta[kN]			Coppia[kNm]		
	minimo	massimo	mediana	minimo	massimo	mediana	minimo	massimo	mediana
1	12074	65144	19602	8381	18093	12576	1824	3393	2663
2	13826	67308	27968	10736	19546	16904	2230	3598	3068
3	15180	112327	34397	14660	23449	17366	2192	3843	3226
4	7007	153141	32766	5186	176447	17521	1360	3770	3290
5	10777	185408	20971	14311	25800	18807	2274	3990	3555
6	9228	60710	19573	15543	25302	18636	2700	3928	3576
7	14361	85141	19371	7483	22658	17592	1201	4032	3592
8	9260	128291	16627	4189	21840	15655	1175	3542	3120

campi	Velocità avanz. [mm/min]			Velocità rotaz. [rpm]			Penetraz. [mm/giro]		
	minimo	massimo	mediana	minimo	massimo	mediana	minimo	massimo	mediana
1	27	118	61	1,3	2,0	2,0	14,2	58,3	33,3
2	30	94	58,5	0,7	2,0	1,9	23,3	307,0	35,9
3	15	121	42	1,3	2,0	1,4	11,3	68,3	30,0
4	8	170	46	1,4	2,0	1,9	4,2	92,1	24,2
5	12	158	83	1,7	2,0	1,9	6,4	135,0	43,8
6	35	172	101	1,6	1,9	1,9	18,5	108,0	58,0
7	22	128	88	1,8	2,9	1,9	12,0	196,5	48,1
8	14	182	96	1,8	2,7	1,9	5,6	93,0	50,3

campi	Pressione fronte - calotta (bar)			Pressione fronte - asse scudo			Pressione fronte - base (bar)		
	minimo	massimo	mediana	minimo	massimo	mediana	minimo	massimo	mediana
1	0,40	1,38	0,86	0,85	1,59	1,25	1,28	1,94	1,64
2	1,08	1,44	1,24	1,39	1,99	1,74	1,67	2,35	2,10
3	1,24	2,14	1,72	1,73	2,65	2,05	1,97	2,84	2,29
4	0,20	2,06	1,80	0,57	2,38	2,03	1,03	2,66	2,34
5	1,44	2,25	1,94	1,79	2,67	2,35	1,82	3,22	2,55
6	1,34	2,00	1,70	1,74	2,44	2,06	1,84	2,60	2,21
7	0,10	1,64	1,26	0,15	2,09	1,66	0,20	2,16	1,80
8	0,05	1,54	1,22	0,02	2,09	1,66	0,28	2,10	1,76

sollevamenti indotti, come evidenziato nella precedente figura.

La successiva tabella, riporta una sintesi dei principali parametri operativi in termini di valore massimo, minimo e mediana.

Si può notare come, per i parametri di velocità di avanzamento, si registra un aumento nei tratti finali rispetto a quelli iniziali, aumento che è pertanto legato più all'esperienza via via acquisita ed alla messa a punto della macchina e delle sue modalità operative, che alle condizioni al contorno.

Per quanto concerne i parametri energetici e di forza richiesti (spinta e momento torcente), oltre che per i valori di pressione al fronte, di cui parleremo più avanti, si può qualitativamente notare un andamento che segue i valori di copertura e di falda.

Tra i parametri descritti, quello che indubbiamente riveste maggiore importanza dal punto di vista operativo, è la pressione presente nella camera di scavo, ottenuta attraverso il

condizionamento, mediante schiume, del materiale scavato, ed il suo controllo volumetrico in camera mediante il bilanciamento tra velocità di avanzamento e materiale estratto dalla coclea.

La pressione esercitata in camera di scavo, permette di esercitare il "confinamento" del fronte, necessario a garantire condizione di

stabilità ed a limitare i volumi persi.

La pressione interna alla camera di scavo, viene determinata sia controllando i parametri operativi sopra elencati, sia controllando le caratteristiche di plasticità e fluidità del materiale scavato (tipologia del condizionamento).

Il condizionamento del terreno di scavo, indispensabile per i terreni in esame, oltre a permettere il controllo della pressione, produce una serie di altri benefici effetti quali:

- il miglior controllo dell'ingresso di flussi di acqua verso la camera di scavo (soprattutto nei terreni in oggetto caratterizzati da un alto valore della permeabilità)
- una riduzione dell'usura degli utensili di scavo e dei sistemi di smarino

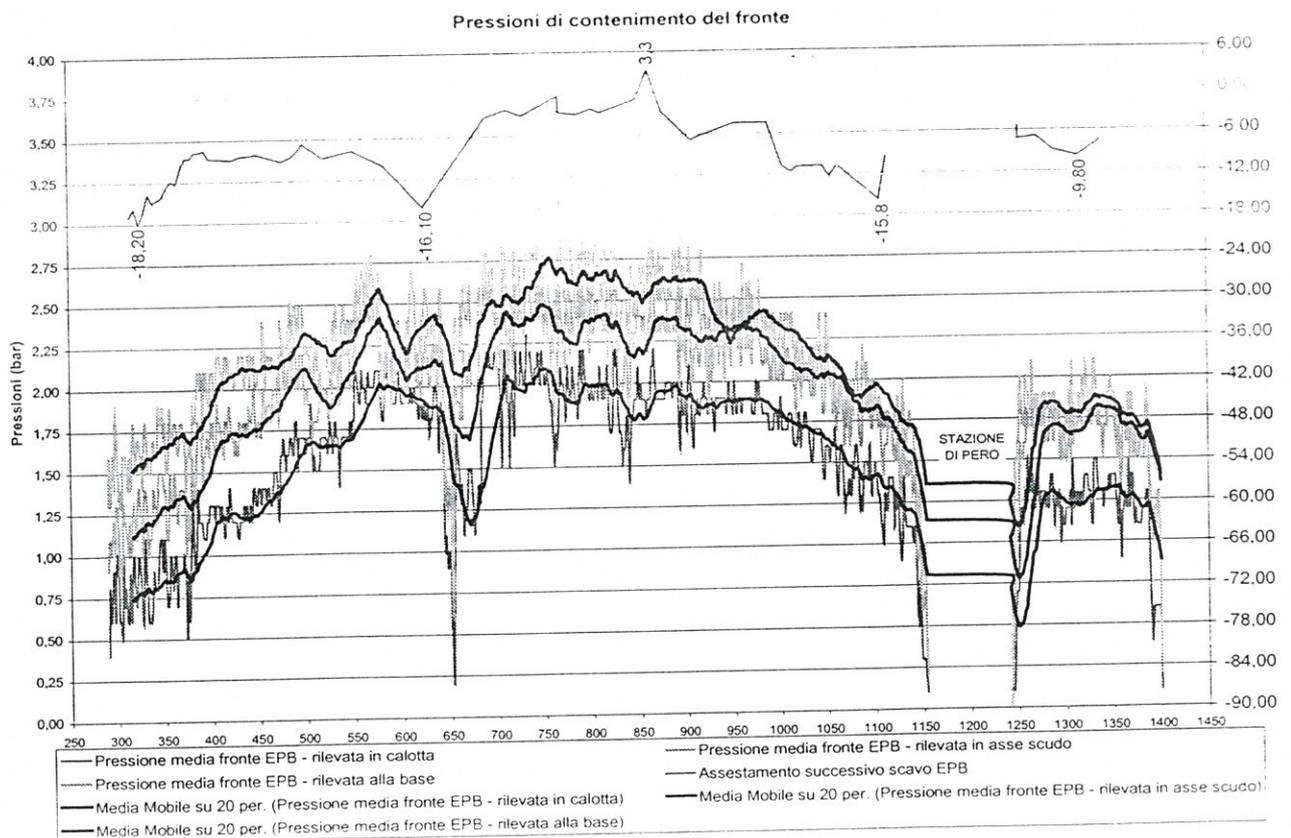
- un miglioramento dell'ingresso del materiale nella camera di scavo
- una riduzione della potenza richiesta
- una riduzione dell'attrito e degli associati innalzamenti di temperatura
- un miglior trasporto del materiale scavato
- la riduzione della possibilità di creare blocchi di materiale all'interno della camera di scavo
- un miglior controllo del flusso di materiale attraverso la coclea.

estremamente bassi, soprattutto in termini di picchi di valore minimo.

I cedimenti massimi si registrano infatti, oltre che in fase iniziale, in corrispondenza delle zone di uscita della macchina nei manufatti, zone ove è risultato operativamente difficile mantenere condizioni di pressione regolari (velocità di avanzamento ridotte, presenza di terreni consolidati per impedire l'ingresso in galleria di acqua, ecc).

La successiva figura confronta i valori

La successiva figura, riporta, in sintesi, i



valori di pressione nei tre punti di misura (base, calotta e punto intermedio) registrati durante lo scavo della canna Nord, ed i valori dei cedimenti finali misurati in asse alla galleria.

Oltre ad un andamento qualitativamente concorde (aumento delle pressioni e diminuzioni dei cedimenti), si può notare come i valori di cedimento massimo siano sempre associati a valori di pressione

(media statistica) di pressione registrati alla base ed in calotta dello scudo con i corrispondenti valori di progetto calcolati in condizioni di spinta a riposo (k_0).

Si possono fare le seguenti osservazioni:

- i valori registrati sono leggermente più bassi dei valori di progetto anche se, sostanzialmente, li confermano
- rispetto ai valori di progetto si riduce la differenza tra pressione di base e di

dopo i primi 500 metri, fatto confermato dai report di cantiere ove è stata segnalata una messa a punto dell'additivazione di schiuma, passando da un valore di FER di circa 15, ad un valore compreso tra 40 e 50 per tutta la restante tratta.

Il grafico evidenzia inoltre una zona anomala (campo 4 intorno alle progressive 690) ove la differenza di pressione cresce moltissimo.

Questo andamento segnala una perdita di pressione in calotta che si è effettivamente manifestata con un extrascavo. Fortunatamente, l'evento si è verificato in una zona già consolidata, per cui non si sono risentiti effetti particolari in superficie (cedimento finale pari a circa 3 mm).

6. Analisi dei cedimenti

I cedimenti causati dall'avanzamento mediante EPB-S, in un contesto geotecnico quale quello in oggetto, possono essere classificati in tre categorie:

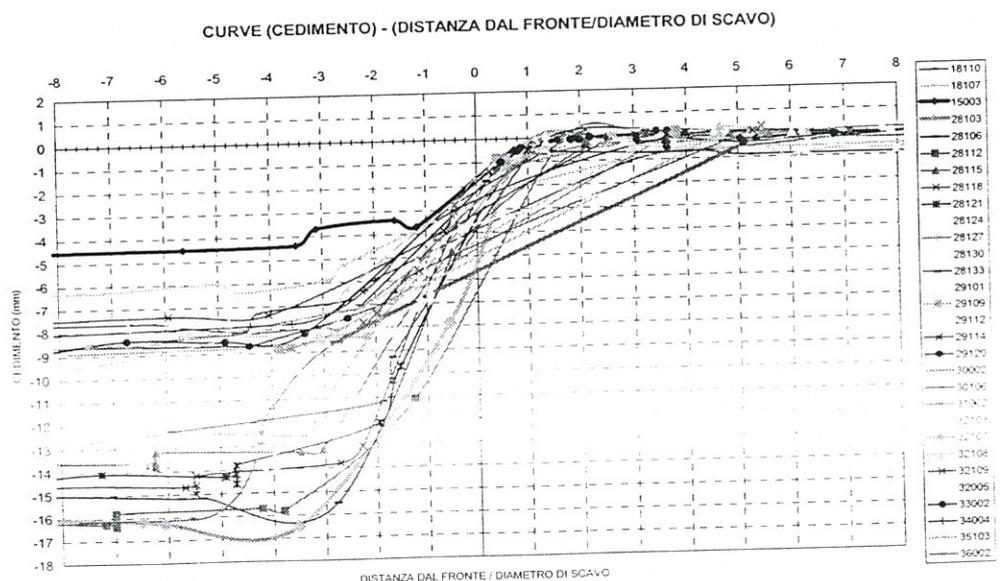
- cedimenti davanti e sopra il fronte, che dipendono in particolar modo dalla pressione adottata in camera di scavo
- cedimenti lungo lo scudo dove si verifica la chiusura del profilo di scavo contro l'estradosso dello scudo. Si evidenzia, a tal proposito, che il diametro di scavo della macchina è pari a 6539 mm, mentre lo scudo metallico ha un diametro in estradosso di 6526 mm, per garantire la possibilità di movimento senza correre il rischio di essere bloccato in fase di avanzamento. Ne deriva un valore

massimo di possibile convergenza radiale pari a circa 6.5 mm (corrispondente ad un volume perso di 0.4% del volume di scavo teorico), contrastato solo dal contributo di rifluimenti, al contorno dello scudo, dell'impasto terreno-acqua-schiume utilizzato per il sostegno del fronte.

- cedimenti lungo i conci, funzione della qualità di esecuzione dell'intervento di intasamento mediante betoncino cementizio a partire dalla coda dello scudo mediante n.4 ugelli.

Nelle figure successive si riportano i profili di subsidenza longitudinali con i cedimenti in termini assoluti e normalizzati al cedimento massimo. In ascissa è riportata la posizione del fronte normalizzata rispetto al diametro. Vengono rappresentati tutti i capisaldi in asse tracciato; i valori, nel caso del cedimento normalizzato, sono depurati dei valori di eventuali sollevamenti.

In termini di cedimenti assoluti, si registrano valori massimi variabili da circa 5 mm a circa 16 mm. Si può osservare che i cedimenti, in corrispondenza del fronte macchina, risultano variabili da un minimo di



circa 2 mm ad un massimo di circa 6 mm; in corrispondenza della fine dello scudo risultano variabili da un minimo di circa 4 mm ad un massimo di circa 12 mm.

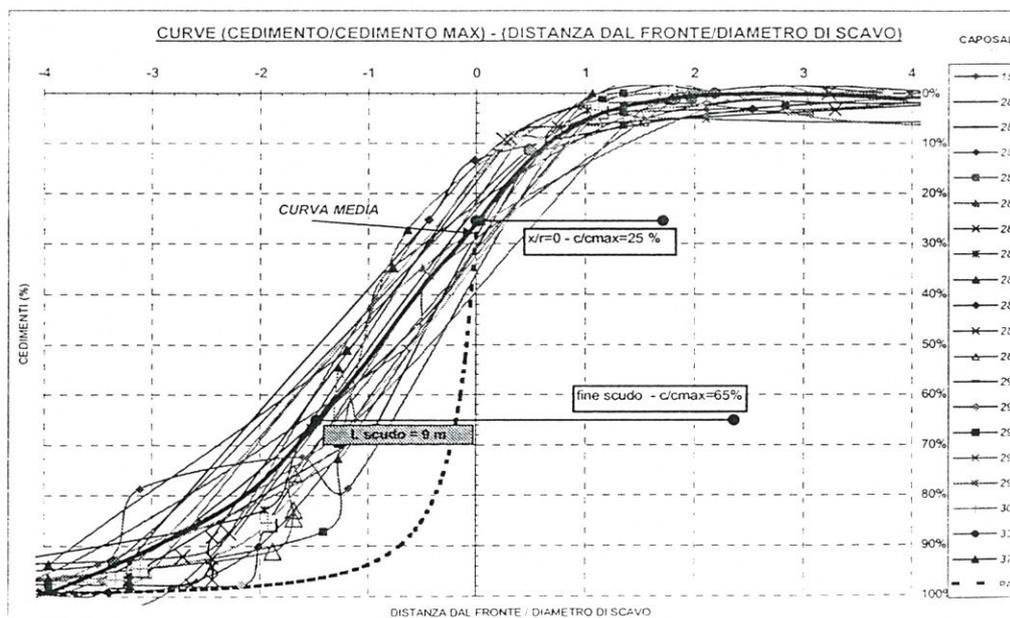
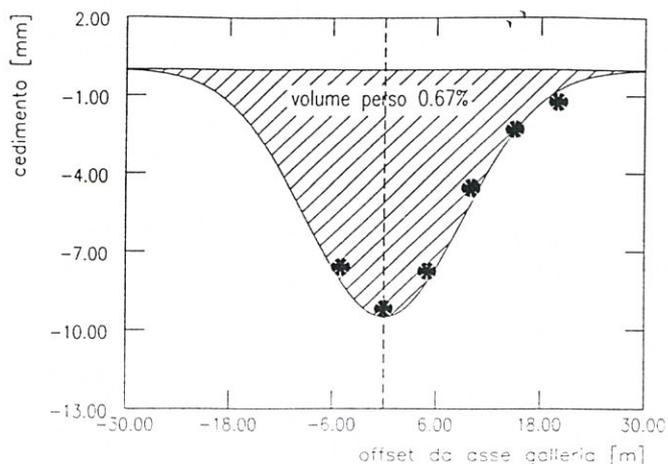
In termini di cedimenti normalizzati al cedimento massimo, si osserva che i cedimenti prodotti si manifestano per circa il 40% in corrispondenza dello scudo (9 m a tergo del fronte macchina) e, considerato circa il 25% prima del fronte, per il restante 35% in coda alla macchina, in fase di iniezione dello spazio anulare in estradosso del concio.

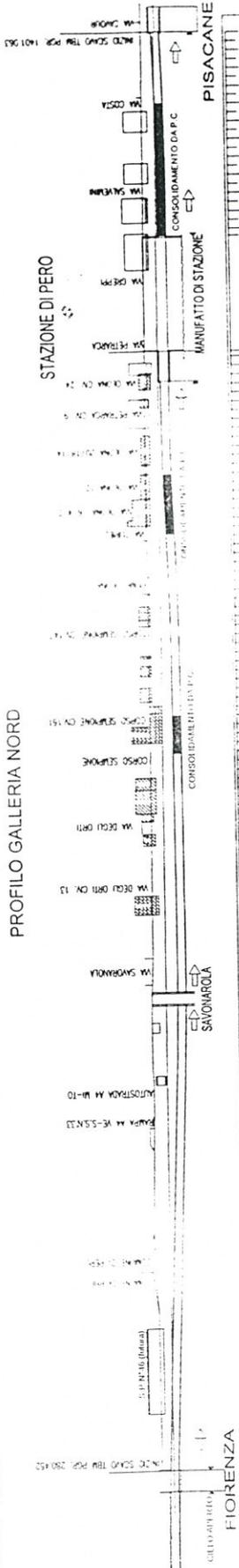
Una prima analisi dei dati derivanti dallo scavo della prima canna, evidenzia una buona gestione della pressione in camera di scavo, che consente di contenere i cedimenti prima dell'arrivo del fronte di scavo sia in termini assoluti che percentuali rispetto al cedimento massimo; appare invece piuttosto elevata la percentuale di cedimento a valle dello scudo, ad indicare possibili miglioramenti di questa fase esecutiva e la conseguente ulteriore riduzione del cedimento massimo.

Nella figura che segue è evidenziato un bacino di subsidenza

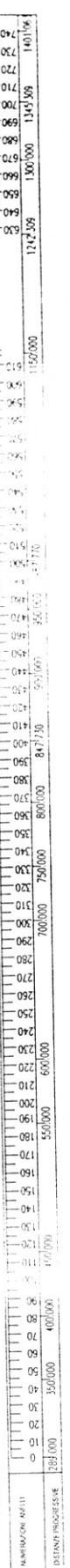
trasversale per copertura di circa 22 m con indicato il corrispondente volume perso teorico.

Osservazione importante è quella relativa ai valori massimi dei cedimenti differenziali che non superano il valore di 1/1000 da considerare di assoluta sicurezza nei confronti degli edifici presenti lungo il tracciato del costruendo prolungamento.

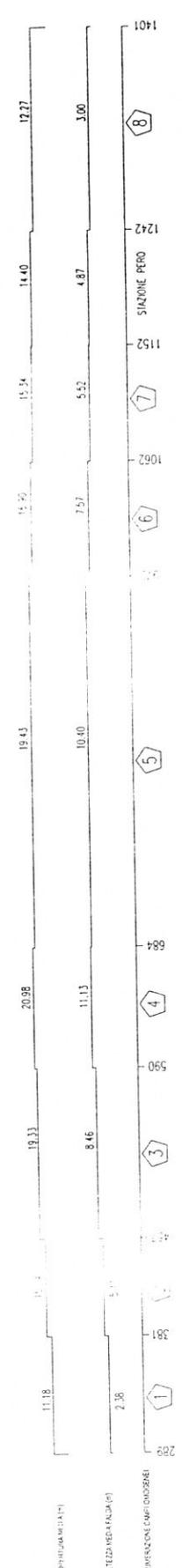




PROFILO GALLERIA NORD



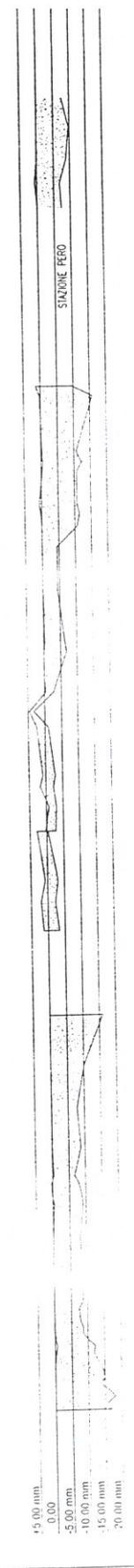
CAMPI OMOGENEI



PRESSIONE TOTALE EPB-S



ASSESTAMENTI RILEVATI IN ASSE GALLERIA



Si riportano i valori medi registrati durante l'avanzamento. Tra parentesi si riportano i valori previsti in progetto.

Bibliografia

Anagnostu G. 1993. Modelling seepage flow during tunnel excavation. Proc. ISRM International Symposium - EUROCK '93, Safety and Environmental Issues in Rock Engineering 21-24 / 06/1993, Lisbon, Vol. 1, 3-10. Rotterdam: A. A. Balkema.

Anagnostou G., Kovari K. 1994b. The Face Stability of Slurryshield driven Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology 9(2).

Anagnostou G., Kovari, K. 1994c. Stability analysis for tunnelling with slurry and EPB shield. Proc. Gallerie in condizioni difficili. Torino, 29.11-1.12. 94.
Anagnostou G., 1995. Influence of tunnel excavation on hydraulic head. Int. Journal of Num. and Analyt. Meth. in Geomechanics, 19.

Anagnostou G., Kovari, K. 1996 Face stability conditions with EPB shield. Tunnel and deep space technology 11/2 1996

Chiorboli M., Marcheselli P. - Il fenomeno della subsidenza nello scavo meccanizzato con EPB. Il caso del Passante ferroviario di Milano - Quarry & Construction - Maggio 1995

Chiorboli M., Marcheselli P. - Analysis and control of subsidence due to Earth Pressure Shield tunnelling in Passante Ferroviario of Milano - Proceedings of the International Conference on North American Tunnelling '96 - Washington DC - USA - 21-24 april 1996

Peron, J. Y., Marcheselli P. 1995. La construction du tunnel ferroviaire de la liaison Passante Ferroviario a Milan. Tunnels et Ouvrages Souterrains 128