

Impostazione progettuale e costruttiva delle opere in sotterraneo della Variante Sud della tratta A.V. Bologna-Firenze

Prof. Ing. P. Lunardi - Studio di Progettazione LUNARDI, Milano
 Dott. Ing. A. Focaracci - ROCKSOIL S.p.A., Milano

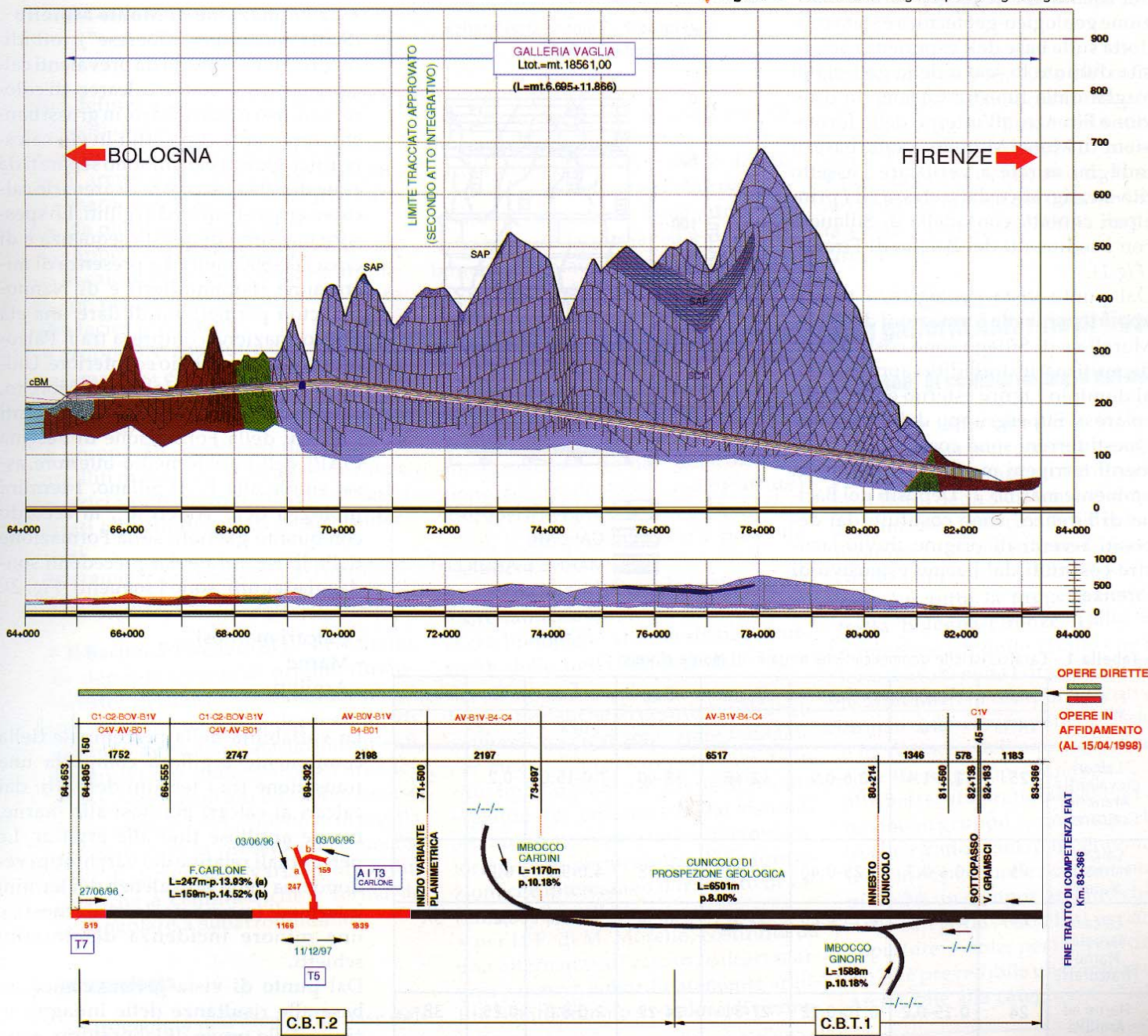
1. Inquadramento generale

La Variante di Firenze Castello completa la tratta Bologna-Firenze e si collega alle opere previste dal Nodo di Firenze. Il progetto esecutivo, per la

Conferenza dei Servizi e l'Atto Integrativo alla convenzione tra la T.A.V. S.p.A. e il General Contractor FIAT S.p.A., ha tenuto conto dell'esperienza acquisita nell'ambito della gestione dei progetti per le linee del Sistema Alta Velocità: si

tratta quindi di un progetto approfondito in ogni sua parte, redatto in stretto contatto con tutti gli Enti interessati, per ottenere rapide approvazioni. Dal punto di vista progettuale le opere in sotterraneo rappresentano la conti-

▼ Figura 1 - Galleria di Vaglia: profilo geologico



nuità con quelle della tratta già in costruzione, acquisendo le esperienze maturate durante i lavori fino ad oggi condotti, ma vengono introdotti ancora altri elementi innovativi, specie per quanto riguarda il sottopasso di via Gramsci e la galleria di servizio scavata con fresa ad attacco integrale e continuo.

2. Quadro geologico-geotecnico

Le gallerie della Variante di Castello attraversano, dal km 71+500 verso Sud, la Formazione di Monte Morello, quella di Sillano ed i depositi alluvionali del Bacino di Firenze. La caratterizzazione geologico-geotecnica è stata condotta sulla base dell'esperienza acquisita durante lo scavo della galleria di Vaglia dalla finestra Carlone in direzione Firenze, all'interno della formazione di Monte Morello, e sulla base di indagini mirate a verificare l'assetto lito-stratigrafico della stessa ed i principali contatti con quella di Sillano e con i sedimenti del Bacino di Firenze (Fig. 1).

Dal punto vista geologico, i terreni appartenenti alle formazioni di Monte Morello e di Sillano sono costituiti da depositi marini torbiditici appartenenti al dominio Ligure esterno ed in particolare al Supergruppo della Calvana. Questi terreni sono costituiti da sedimenti terrigeni medio fini deposti in ambiente marino. I "Depositati del Bacino di Firenze" sono costituiti dai depositi recenti di origine fluvio-lacustre costituiti dal bacino estensivo di Firenze.

L'assetto strutturale a scala regionale per la F. di M. Morello è caratterizzato da una sinclinale strizzata con fianco superiore rovesciato, orientata NNE-SSO. Al nucleo la struttura risulta costituita da facies marnoso-argillitiche alternate a banchi calcareo-marnosi.

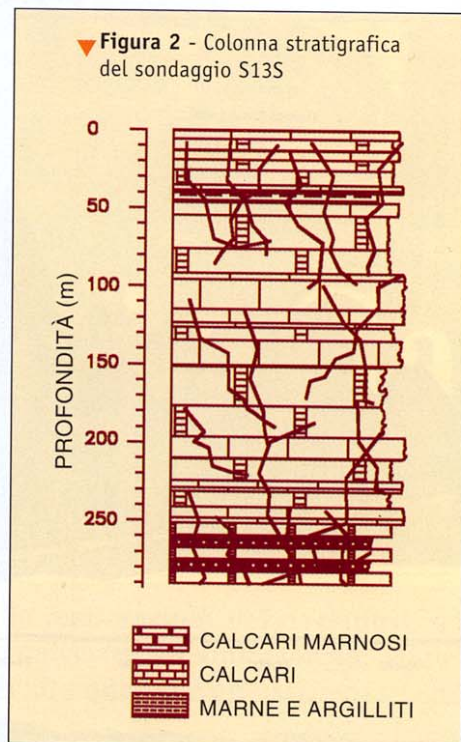
La successione stratigrafica sedimentaria può essere schematizzata nelle seguenti unità principali:

- **La Formazione di Sillano (SSi)** risulta costituita da argilliti varicolori con irregolari intercalazioni di arenarie quarzoso-calcaree e calcareniti, finemente stratificate, di marne e calcari marnosi di colore grigio chiaro. La presenza di microfossili nei livelli calcarei

e marnosi permette di datare detta formazione tra la parte bassa del Cretaceo superiore ed il Paleocene. Le argilliti sono prevalenti nella facies più comune. L'assetto strutturale della formazione non è sempre rilevabile in quanto molto disturbato tettonicamente e per questo molto simile al Complesso Caotico. Altre facies abbastanza diffuse sono formate da una maggiore quantità di arenarie, fittamente interstratificate con argilliti grigie con o senza intercalazioni di calcari marnosi e marne. Inoltre la F. di Sillano può contenere al suo interno, e più precisamente al tetto, grandi lenti di arenarie torbiditiche quarzoso-calcaree e di argilliti che costituiscono la Pietraforte.

- **La Formazione di Monte Morello (ScM)** (sinonimo "Alberese"), torbiditica, risulta costituita da prevalenti calcari marnosi e marne calcaree, di colore biancastro o giallastro, in grossi banchi, raramente con sottili livelli calcarenitici. Questi banchi sono separati da zone di fitte alternanze di arenarie calcaree grigio-brune ed argilliti. Lo spessore massimo di questa sequenza è di circa 700-800 metri. La presenza di microfaune (Foraminiferi) e di Nannoplancton permettono di dare una età alla formazione compresa tra il Paleocene e l'Eocene medio ed inferiore. Unicamente nella zona del Monte Morello, al tetto della formazione sono presenti i terreni della Formazione di Pescina (SAP), dell'Eocene medio-inferiore, assai simile alla F. di Sillano. I termini litologici dell'"Alberese", in accordo con quanto già noto sulla Formazione dalla letteratura e dai precedenti sondaggi eseguiti, sono i seguenti (Fig. 2):

- Calcari e arenarie calcaree
- Calcari marnosi
- Marne
- Argilliti.

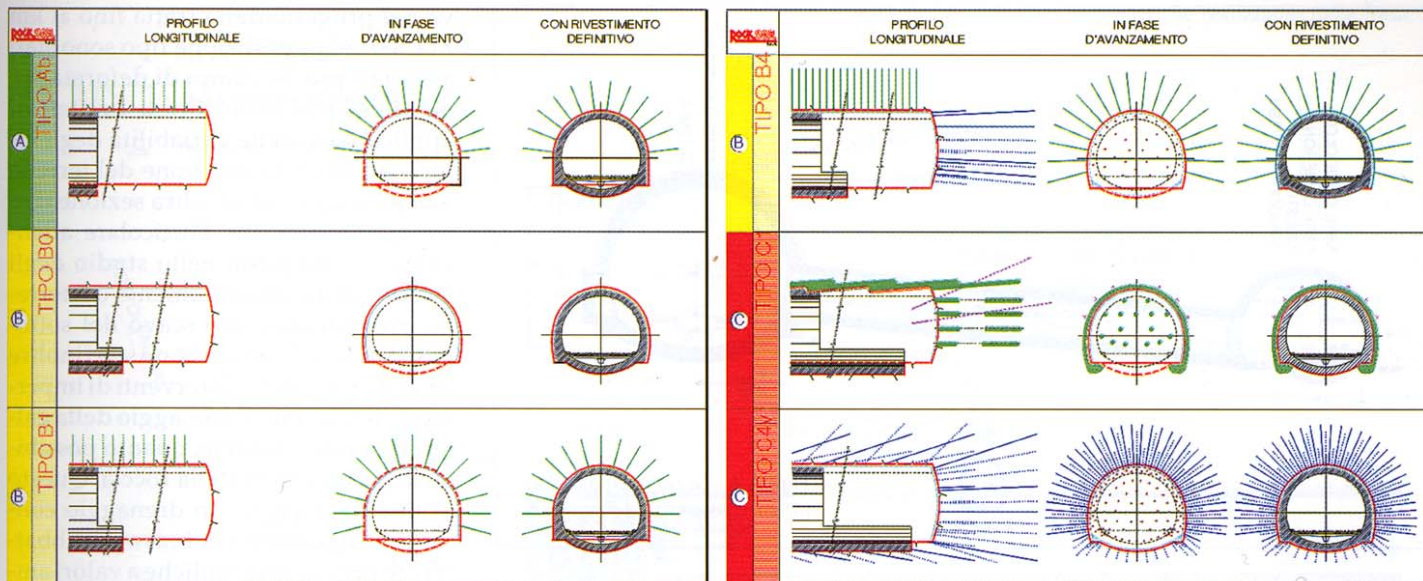


▼ **Tabella 1 -** Caratteristiche geomeccaniche della F. di Monte Morello

F. di M. Morello ScM	γ	C_{picco}	$C_{res.}$	ϕ_{picco}	$\phi_{res.}$	E	ν	Gruppo
	kN/m ³	MPa	MPa	°	°	GPa		
Calcari prevalenti/ Arenarie calcaree	25	1.0-1.4	0.6-0.9	42-45	38-40	7.0-15.0	0,2	1
Calcari marnosi/ Marne	25	0.4-0.7	0.25-0.40	38-41	35-38	4.0-9.0	0,2	2
Calcari marnosi/ Marne (fratturati)	24	0.24-0.3	0.15-0.20	33-37	30-34	3.0-6.0	0,25	3A
Marne ed Argilliti	24	0.15-0.2	0.10-0.12	27-31	24-27	2.0-8.0	0,25	3B

La variabilità della percentuale della componente argillosa comporta una transizione tra i termini descritti, dai calcari ai calcari marnosi alle marne, marne argillose fino alle argilliti. Le percentuali relative dei vari litotipi vedono una netta prevalenza dei termini intermedi (marne e calcari marnosi), e una minore incidenza dei termini schietti.

Dal punto di vista geomeccanico, in base alle risultanze delle indagini in situ e delle prove di laboratorio, sono



▲ Figura 3 - Sezioni tipo previste

stati definiti quattro gruppi geomeccanici così distinti:

- gruppo 1, costituito da calcari prevalenti, arenarie calcaree, calcari marnosi e marne subordinate, in strati o banchi da plurimetrici a metrici;
- gruppo 2, costituito da fitte alternanze di calcari marnosi, marne ed argilliti, con percentuale di marne superiore alla facies precedente;
- gruppo 3A, costituito da calcari, calcari marnosi e marne, con una elevata percentuale di cataclasi e di calcari fratturati;
- gruppo 3B, costituito da marne ed argilliti prevalenti, in strati o banchi da metrici a plurimetrici, con subordinati strati o livelli di calcari o calcari marnosi.

I parametri geomeccanici di riferimento sono riassunti nella *tabella 1*.

• **Il Bacino di Firenze (BF)**, è costituito da depositi recenti di origine fluvio-lacustre del tardo Pliocene, formati per riempimento della depressione di origine tettonica causata dai movimenti distensivi che interessarono l'area toscana. Sono costituiti da sabbie limose e limi sabbiosi con contenuto in argilla variabile, con la presenza di elementi litici di dimensioni variabili da millimetriche a centimetriche e forma da subangolare a subarrotondata.

Idrogeologia

L'idrogeologia dell'area, sulla base del-

le informazioni esistenti, sembra confermare la presenza di una falda di versante, il cui modello idrodinamico risulta in ogni caso di difficile definizione. La circolazione avviene per permeabilità secondaria, ossia attraverso le fratture della roccia, ed è presumibilmente regolata, nella direzione e nella quantità del flusso, da acquitardi (spessi strati di calcari compatti, pacchi di argilliti impermeabili) e di orizzonti acquiferi (zone fratturate di origine tettonica, fasce cataclastiche).

Vie preferenziali di circolazione potrebbero essere costituite anche da zone microcarsiche (originate dalla dissoluzione chimica dei calcari nelle fratture) o da veri e propri sistemi carsici sotterranei, la cui presenza non è possibile escludere.

La circolazione delle acque sotterranee è strettamente connessa alle caratteristiche litologiche, stratigrafiche e strutturali delle unità sedimentarie sopra descritte.

Le caratteristiche di permeabilità degli ammassi rocciosi sono state indagate per mezzo di prove di permeabilità in situ, tipo Lugeon, e di prove di risalita eseguite nei piezometri. Dai risultati ottenuti è stato possibile stimare i valori medi di permeabilità delle formazioni che interessano il tracciato di variante della galleria:

- per la F. di M. Morello, costituita da una alternanza di calcari, calcari marnosi e marne, subordinatamente argilliti, è stato stimato un valore di perme-

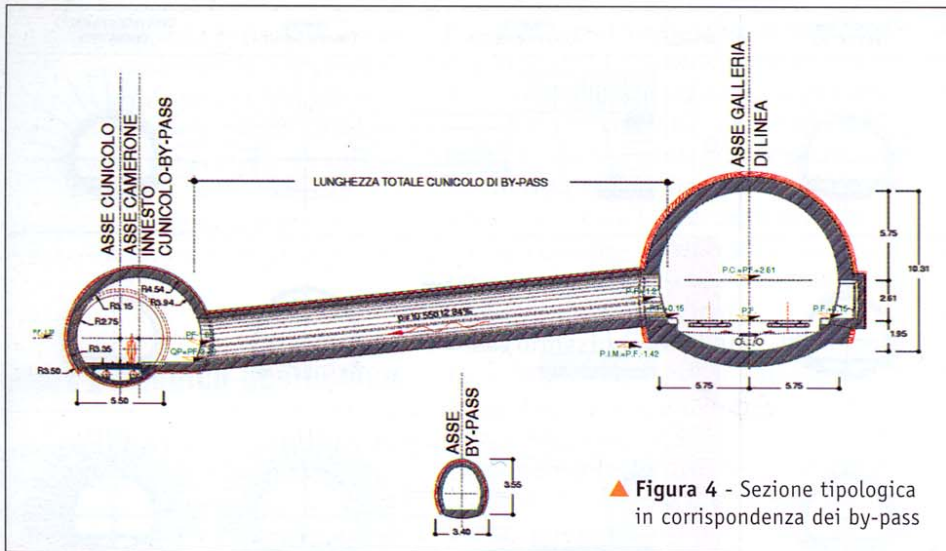
abilità compreso tra 10^{-7} e 10^{-8} m/sec;

- per la F. di Sillano, costituita prevalentemente da argilliti, è stata stimata una permeabilità di circa 10^{-8} m/sec;
- per i depositi del Bacino di Firenze, nel tratto terminale del tracciato, è stata stimata una permeabilità media di circa 10^{-6} m/sec.

3. La galleria naturale di linea

Previsioni di comportamento del cavo

Sulla base della caratterizzazione dei terreni attraversati sono state condotte previsioni sul comportamento del cavo per effetto degli stati tensionali indotti al contorno della cavità e dei battenti idraulici presenti in fase di scavo, secondo l'approccio ADECO-RS, utilizzato per tutta la progettazione della tratta Bologna-Firenze. Dalle analisi numeriche condotte risulta che la galleria scavata nella Formazione di Monte Morello avrà comportamenti condizionati dalle caratteristiche litologiche e meccaniche dell'ammasso. Con riferimento ai gruppi di *tabella 1*, si può attribuire, alle tratte di galleria appartenenti al gruppo 1, un comportamento che ricade principalmente nella categoria A, per quelle ricadenti nei gruppi 2 e 3A un comportamento che passa dalla categoria A alla B al variare delle coperture, mentre per i terreni del gruppo 3B è prevedibile un comportamento ascrivibile alla categoria C. Nella For-



▲ Figura 4 - Sezione tipologica in corrispondenza dei by-pass

mazione di Sillano, anche sulla base di quanto riscontrato durante lo scavo della galleria Vaglia tra il km 68+100 e 68+900, si prevede una categoria di comportamento prevalente B con passaggi a C nelle tratte maggiormente tettonizzate. L'attraversamento del tratto entro i terreni del Bacino di Firenze, per le scarse caratteristiche dei terreni stessi e per l'intensa urbanizzazione, richiederà un attento controllo delle deformazioni indotte dallo scavo.

Proposte d'intervento

Per la tratta da realizzare entro la Formazione di Monte Morello si sono confermate le previsioni a suo tempo fatte per quella in fase di costruzione, mentre le tipologie d'intervento per la tratta nel Sillano tengono conto dell'esperienza acquisita durante lo scavo avvenuto nella stessa formazione alcuni chilometri più a nord (Fig. 3). Secondo quanto introdotto in maniera innovati-

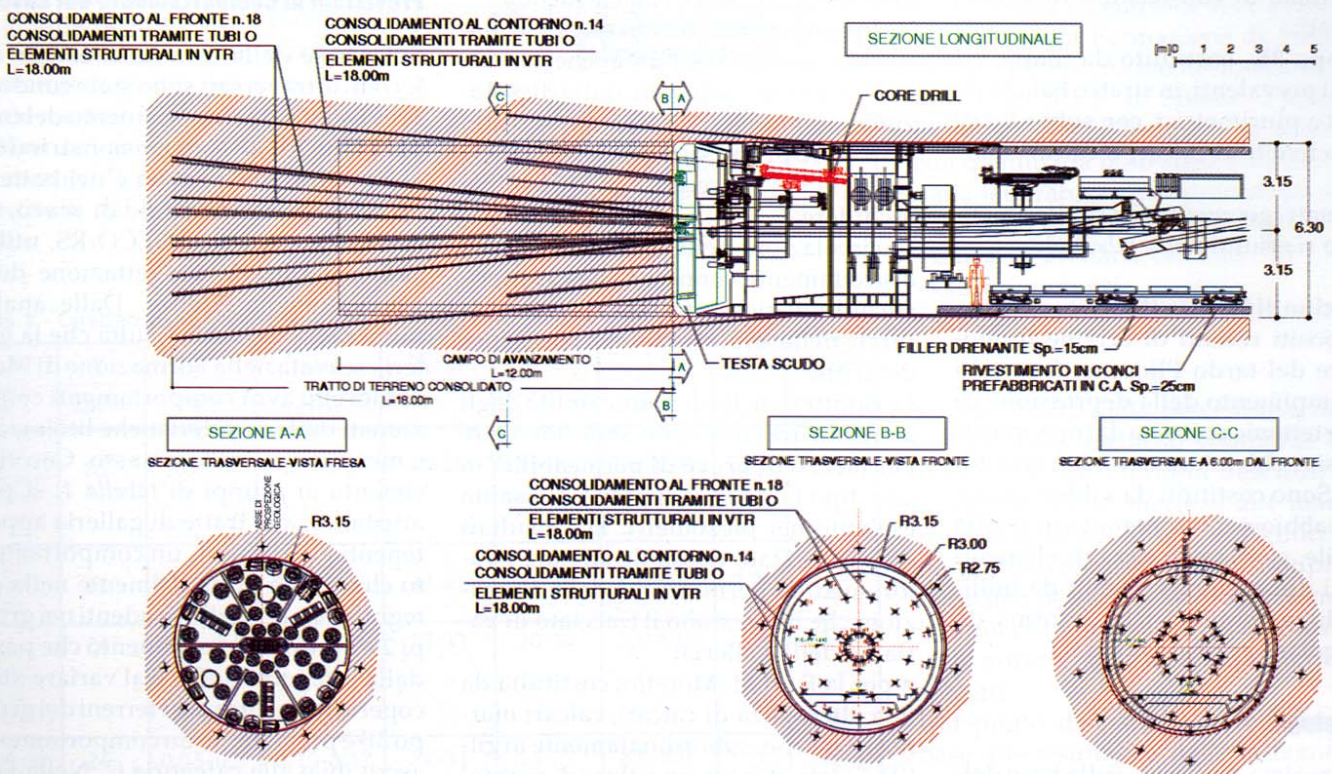
va nel progetto della tratta fino al km 71+500, ad ogni sezione tipo sono stati associati precisi campi di deformazione attesa e si sono forniti i criteri di applicazione delle variabilità degli interventi di stabilizzazione del terreno e di passaggio ad un'altra sezione tipo tra quelle previste. Particolare attenzione è stata posta nello studio degli interventi di consolidamento del terreno propedeutici allo scavo del sottopasso di Via Gramsci. Sono stati inoltre inseriti in progetto interventi di impermeabilizzazione e drenaggio della galleria, mirati a ridurre, quanto possibile, la permeabilità della roccia. Questo al fine di ottenere un drenaggio controllato al contorno del cavo per abbattere le pressioni idrauliche a valori ammissibili per i rivestimenti.

4. La galleria di servizio

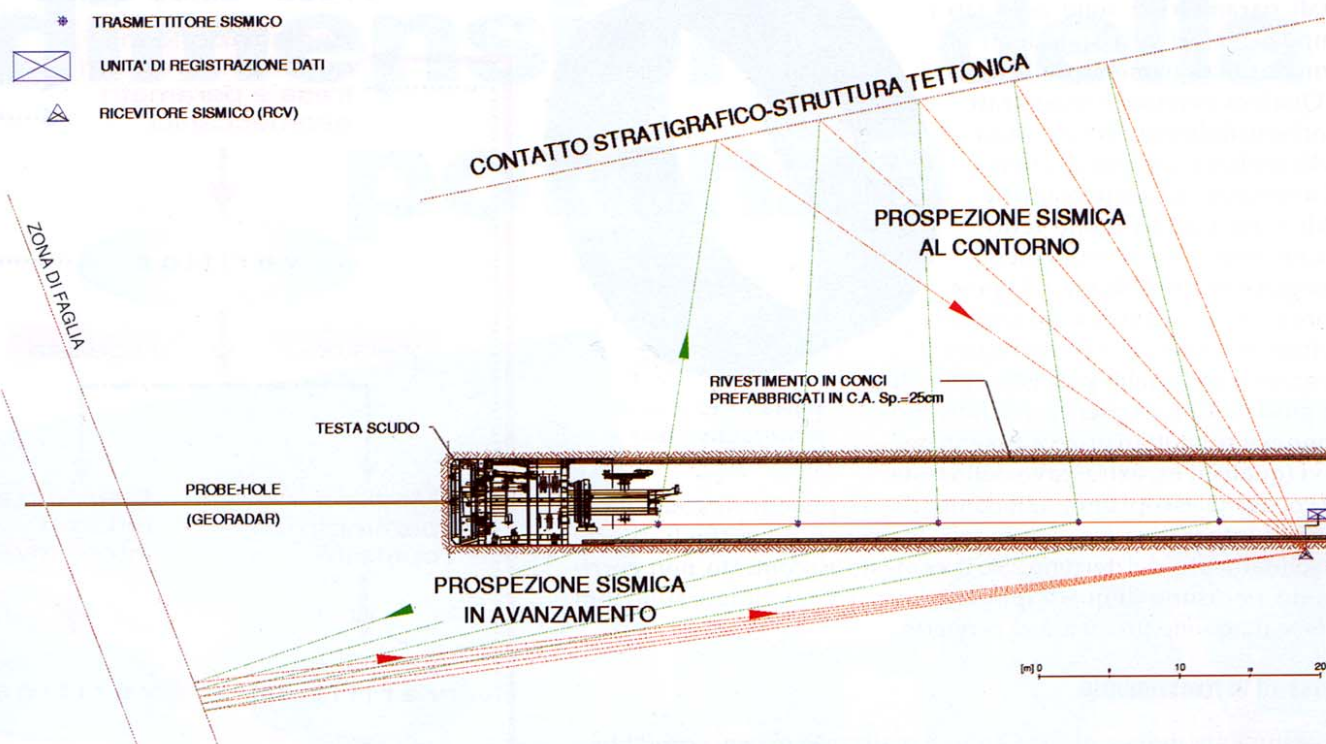
Caratteristiche geometriche

La galleria di prospezione geologica e di servizio "Ginori" ha una lunghezza di 9.259 m e corre per un tratto di 6.501 m parallelamente alla galleria di linea "Vaglia". Ad essa è collegata con by-pass

▼ Figura 5 - Interventi di preconsolidamenti del terreno realizzabili dalla fresa



▼ Figura 6 - Indagini geonostiche realizzabili dalla fresa



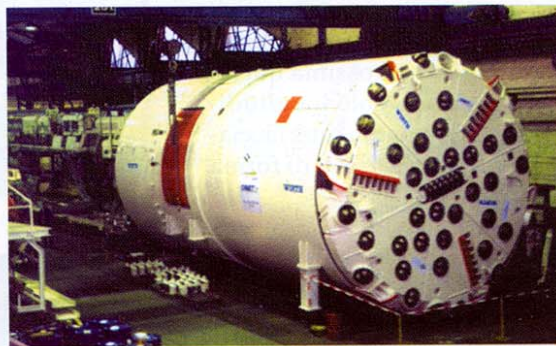
pedonali ogni 250 m (Fig. 4). Il tratto iniziale da cava Ginori per 1.588 m ed il tratto finale per 1.170 m corrono in pendenza, rispettivamente a scendere e a salire, del 10.18%.

Il diametro interno della galleria di servizio è di 5.60 m. Questa, per la funzione assegnata sia in fase di costruzione che in esercizio, per i criteri di realizzazione previsti e per le sue dimensioni, rappresenta certamente l'opera più interessante della Variante di Firenze Castello.

La necessità ambientale di procedere allo scavo della galleria dall'unico attacco di Ginori, quella di realizzare lo scavo controllando, quanto possibile, l'interferenza con le acque ipogee ed infine quella di contenere i tempi di realizzazione entro limiti accettabili hanno condotto a scegliere una modalità di costruzione del tunnel completamente meccanizzata.

Realizzazione con fresa

I terreni attraversati dalla galleria "Ginori" appartengono ad un'unica formazione, quella di Monte Morello, che certamente ha caratteristiche di formazione complessa, con caratteristiche meccaniche molto variabili, passando da quelle di un'argillite a quelle di un



calcare compatto. Per questo motivo il progetto meccanico della fresa ha avuto una serie di input progettuali dal progettista statico, che hanno portato a realizzare una macchina innovativa, attrezzata con avanzati sistemi geonostici, che dovrebbe risultare capace di adeguare le modalità di avanzamento alle diverse situazioni geomeccaniche riscontrate e, all'occorrenza, di realizzare interventi di preconsolidamento del terreno sia nel nucleo di avanzamento che al contorno del cavo (Fig. 5). Le modalità di acquisizione dei parametri di funzionamento della fresa e dei parametri geomeccanici, ed i criteri di adeguamento delle modalità di avanzamento della macchina e d'intervento preventivo sul terreno, sono contenute in un documento allegato al progetto, denominato "Linee guida per la realizzazione delle indagini in avanzamen-

to, l'adozione delle modalità operative più adeguate e la realizzazione degli interventi di consolidamento del terreno". Tale documento intende definire, già in sede di progetto, i criteri che l'operatore della fresa e/o il progettista dovranno adottare in corso d'opera per:

- confermare le modalità operative in corso;
- eseguire indagini integrative per meglio comprendere la natura della

roccia oltre il fronte di scavo;

- variare le modalità operative per adeguarle alle necessità riscontrate;
- adottare interventi progettuali di rinforzo del terreno al fronte e al contorno del cavo, che la macchina è progettata per realizzare.

Le "linee guida" indicano, quindi, descrivendo e quantificando, i principali parametri che saranno registrati in corso d'opera. Si tratta in particolare di:

- i parametri di avanzamento fresa, che consentono un controllo continuo e sistematico delle caratteristiche dell'ammasso e del suo comportamento allo scavo;
- i parametri geologico-geomeccanici ottenuti dalle indagini sismiche realizzate sistematicamente in avanzamento, eventualmente integrate da prove georadar in probe-hole realizzati sul

fronte (Fig. 6).

A tali parametri si sono associati i campi di valori corrispondenti al normale funzionamento della fresa. Qualora venissero riscontrati valori sensibilmente differenti da quelli ipotizzati, e quindi riferibili a condizioni geomeccaniche locali e particolari (zone tettonizzate, improvvisi cambiamenti litologici e strutturali, etc.), l'operatore e/o il progettista dovranno adottare le idonee azioni correttive o integrative tra quelle previste nelle "linee guida". Con i criteri predefiniti potranno essere adottati provvedimenti operativi (quali ad es. extrascavo della testa, blocco del telescopismo, azionamento dei pistoni di coda, etc.), indagini integrative (es. carotaggi), interventi progettuali di pre-consolidamento del terreno. Se il contesto riscontrato non corrisponde a nessuno di quelli ipotizzati occorrerà valutare soluzioni diverse da quelle previste nel progetto.

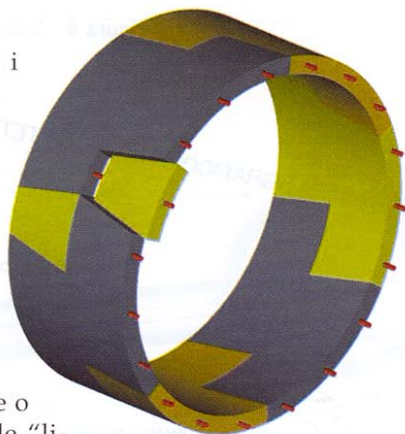


Figura 7 - Cunicolo di servizio: carpenteria

Interventi di rivestimento

Il rivestimento della galleria Ginori è realizzato in conci prefabbricati di 25 cm di spessore. L'anello è composto da cinque conci più il concio-chiave ed ha forma trapezia per essere collocato in n posizioni diverse per tracciare un percorso che meglio approssima quello teorico della galleria. I conci sono collegati tra loro solo longitudinalmente, mentre trasversalmente sono semplicemente interfacciati. Il piano viario è realizzato mediante conci prefabbricati di forma e dimensioni appositamente studiate (Fig. 7).

