

# Problematiche affrontate nello scavo delle gallerie Bellosguardo e San Vito

Quadruplicamento ferroviario Firenze-Empoli tratta Signa-Montelupo

Prof. Ing. Pietro Lunardi - Studio di progettazione Lunardi, Milano  
Dott. Ing. Vincenzo Pantaleone - Ferrovie dello Stato S.p.A.

## Sommario

I lavori di scavo delle gallerie "Bellosguardo" e "San Vito", per il quadruplicamento della linea ferroviaria Firenze-Pisa nel tratto Firenze-Empoli, sono finalmente in via di ultimazione.

Si ritiene quindi di un certo interesse proporre ai nostri lettori questo articolo, preparato dal Prof. Ing. Pietro Lunardi e dal Dott. Ing. Vincenzo Pantaleone in occasione di una Conferenza, organizzata dal C.I.F.I. a Firenze il 20 giugno 1997, la cui pubblicazione era rimasta in sospeso a seguito del fermo subito dal cantiere per il fallimento del Consorzio FIREM. Nonostante i due anni trascorsi, gli argomenti esposti, come si vedrà, non hanno perso d'interesse.

## Generalità

Nell'ambito dei lavori di adeguamento della linea ferroviaria Firenze-Pisa, il quadruplicamento Firenze-Empoli si prefigge, tra gli altri scopi, quello di

eliminare le gravose soggezioni imposte dall'attuale tracciato, particolarmente tortuoso, nel tratto Signa-Montelupo. Per raggiungere l'obiettivo, il progetto prevede, in questo tratto, la costruzione di due gallerie: la galleria "Bellosguardo" e la galleria "San Vito", rispettivamente di 4042 e 1958 metri di lunghezza (fig. 1).

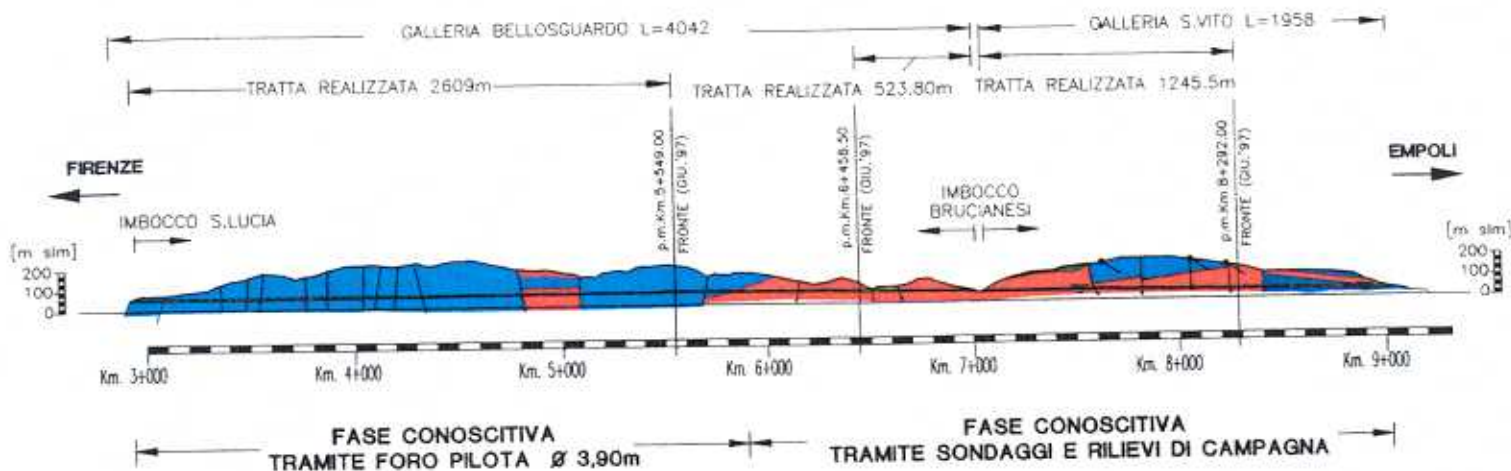
Entrambe sono ad oggi, 20 giugno 1997, in avanzata fase di realizzazione, essendo stati scavati e rivestiti, della prima, 2609 m dall'imbocco S. Lucia, lato Firenze, e 523,8 m dall'imbocco "Brucianesi", lato Pisa e, della seconda, 1245,5 m dall'unico attacco lato "Brucianesi".

I primi studi preliminari alla loro realizzazione risalgono al 1986, anno in cui ebbe inizio la campagna geognostica per l'acquisizione di tutte le informazioni e di tutti i dati indispensabili per la loro progettazione. In particola-



FIGURA 1 - Tracciato della linea ferroviaria «Firenze-Pisa» Tratta «Firenze-Empoli»





**LEGENDA**

| GEOLOGIA                                   | STRUTTURA                          |
|--|------------------------------------|
| CONGLOMERATI E GHIAIE (PLIOCENE SUPERIORE) | FAGLIA                             |
| ARENARIE DI M. MODINO                      | ORIENTAZIONE DELLA STRATIFICAZIONE |
| MARNE DE LE PIASTRE (OLIGOCENE SUPERIORE)  | LIVELLO DELLA FALDA ACQUIFERA      |
| COMPLESSO CAOTICO                          |                                    |

re, come meglio si illustrerà nel seguito, sulla base delle conoscenze geologiche della zona tratte dalla letteratura e dalla cartografia specializzata (vedi profilo geologico di tentativo in fig. 2), fu deciso di eseguire un foro pilota lungo l'asse del tracciato della galleria "Bellosguardo", nel tratto interessato prevalentemente dalla formazione arenacea di M. Modino, mentre per la restante parte e per la galleria "San Vito", collocate entro il complesso caotico appenninico, si preferì eseguire una campagna geognostica tradizionale, basata su sondaggi dall'alto spinti sino alla profondità degli scavi da compiere. Sulla base delle informazioni tratte da detta fase conoscitiva fu redatto, nel 1988, il progetto costruttivo delle gallerie e, contemporaneamente, iniziarono i lavori di scavo. Questi si sono protratti sino ad oggi più per difficoltà di finanziamento che per difficoltà tecniche o operative, visto che grazie all'accurata progettazione eseguita que-

ste ultime sono sempre state agevolmente superate, nonostante la complessità dei terreni e delle situazioni tenso-deformative affrontate. I lavori attualmente avanzano speditamente su tre fronti e si prevede che saranno ultimati entro il prossimo anno.

Nei paragrafi che seguono si illustreranno diffusamente le diverse problematiche che si sono dovute trattare durante la progettazione delle gallerie e gli aspetti operativi connessi alla loro pratica realizzazione.

**Inquadramento geologico dell'area**

L'area è compresa tra Lastra a Signa e Montelupo F.no. Lo studio geologico si è articolato in differenti fasi:

- studio di fotointerpretazione geomorfologica in scala 1:10000;
- rilevamento geologico di grande dettaglio;
- studio geostrutturale dell'area compresa tra il M. Modino e i M.ti del Chianti;
- campagna di indagini geognostiche lungo l'asse della galleria, al suo contorno ed agli imbocchi.

Lo studio eseguito a scala regionale, sulla base dei rilievi eseguiti, dei dati presenti in letteratura e delle indagini eseguite, ha permesso di ricostruire il seguente schema tettonico-stratigrafico,

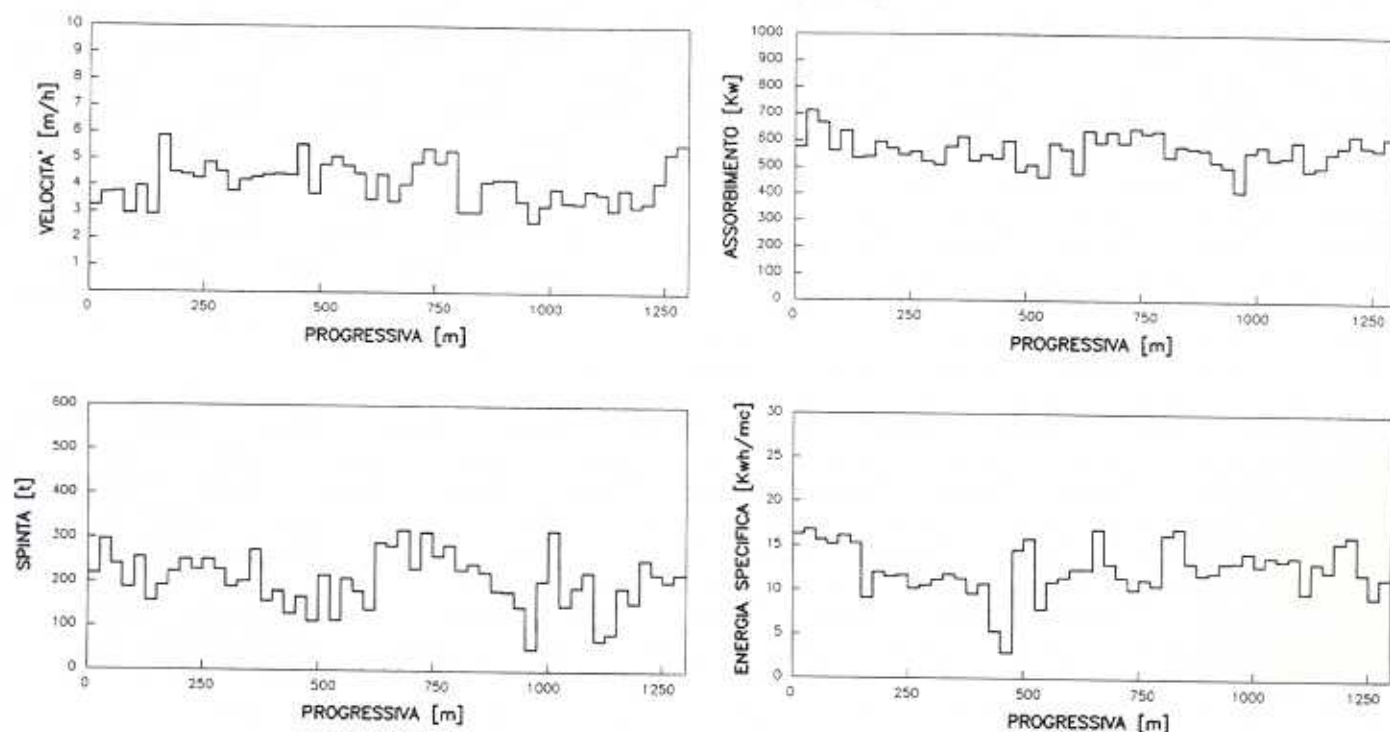
dal basso verso l'alto, per l'area in esame:

- Unità Toscane - Macigno della Falda Toscana;
- Unità di M. Modino - M. Cervarola;
- Unità Liguri e Subliguri s.l.;
- Seria del bacino pliocenico marino.

Questa situazione rappresenta un quadro particolare del più complesso quadro generale strutturale dell'edificio tettonico a falde dell'Appennino. In sintesi, in base ai dati acquisiti dalla bibliografia, l'attuale struttura della Toscana deriva da due fasi principali:

- una prima fase che determina la formazione dell'edificio a falde ed è caratterizzata da una tettonica compressiva; questa fase si estende fino al Miocene medio - superiore;
- una seconda fase, caratterizzata da una tettonica disgiuntiva distensiva che suddivide in blocchi l'edificio costruito nella precedente fase ed ha inizio nel Miocene superiore.

Nell'Oligocene s.l., si ha la messa in posto della Falda Toscana e le coltri liguri, fortemente tettonizzate nelle fasi precedenti, sovrascorrono verso est per gravità. L'avanzamento di queste coltri alloctone interrompe la sedimentazione del Macigno, ad est continua invece la sedimentazione dell'Unità di M. Modino - M. Cervarola. Nel Serravalliano, una ulteriore migrazione della fossa di sedimentazione dei flysch, determina la deposizione dei sedimenti che andranno a costituire la formazione Marnoso-Arenacea. Infine una



generale ripresa dei movimenti verso est si verifica nel Tortoniano ed ha fine con il Tortoniano superiore. La fase di tettonica distensiva ha inizio nel Messiniano e raggiunge l'acme nel Pliocene inferiore.

In base a questo schema generale ed alle indagini eseguite, l'assetto tettonico e geostrutturale dell'area può essere sintetizzato in tre distinte zone:

- Unità Toscana col Macigno della Falda Toscana;
- Sottounità di M. Modino che localmente (Le Lari-Appennino pistoiese) mostra relazioni stratigrafiche col tetto del sottostante Macigno, ma che generalmente mostra contatti tettonici con lo stesso;
- Sottounità del M. Cervarola, che affiora fuori zona nei settori orientali, e che è in rapporto tettonico sia con il Macigno che con la Sottounità di M. Modino.

Litologicamente i terreni presenti nell'area in esame sono rappresentati dalle seguenti unità:

- Unità di M. Modino - M. Cervarola.**
- Olistostroma basale costituito da argilliti grigie e nere in scaglette, con lapidei calcareo-marnosi, brecce ed arenarie calcaree. Questo livello è stato

individuato al tetto del Macigno da M. Modino alla pianura di Pistoia e rappresenta un marker regionale (Cretaceo inf. - Eocene).

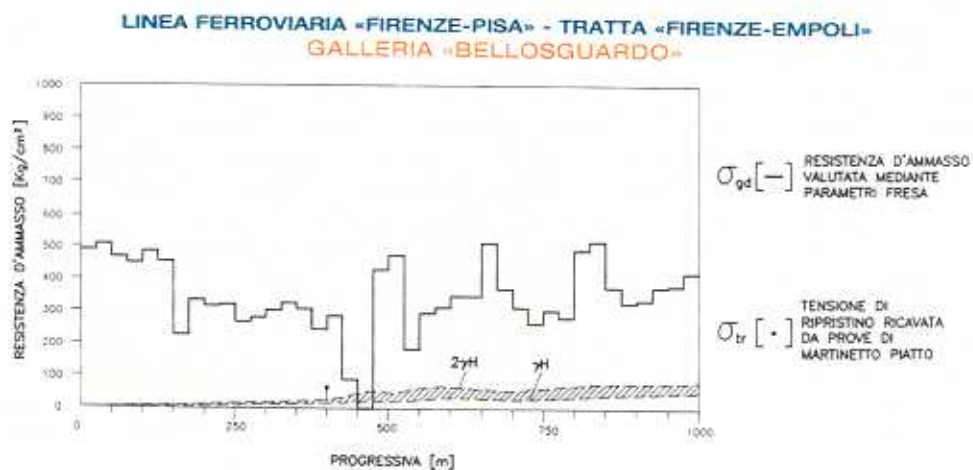
- Marne di Le Piastre, costituite da marne siltose grigie e giallastre con intercalazioni di arenarie in sottili strati (Oligocene sup.).
- Arenarie di M. Modino, costituite da arenarie fini e medie, silt, argille e marne, alternate, con spessore di qualche decimetro (membro siltoso), arenarie gradate, siltiti e, in subordinate argillo-

scisti (membro arenaceo).

Su alcuni campioni sono state eseguite analisi sedimentologiche che hanno permesso di riconoscere un ambiente di deposizione di conoide.

**Unità Liguri e Subliguri s.l.**

- Costituiscono le coperture alloctone dell'Unità M. Modino-M. Cervarola, sono formate da materiale privo di ordine sedimentario, con blocchi di varia natura e dimensione dispersi in materiale di natura argillitica. In particolare si distinguono due prevalenti litotipi:





▲ Foto 1 - Galleria "Bellosguardo": rilievo geostrutturale da foro pilota presso prog. 1250 m



▲ Foto 2 - Galleria "Bellosguardo": distacco gravitativo nel foro pilota



Foto 3 ▶ Galleria "Bellosguardo": interventi di stabilizzazione nel foro pilota a prog. 1640 m

- argilliti e marne prevalenti, generalmente agenti da complesso di base,
- calcari, calcari marnosi ed arenarie calcaree, alternati ad argilliti e marne.

Nell'area in esame non affiora il Macigno della Falda Toscana, in quanto sepolto sotto i sedimenti neogenici e quaternari della piana empoiese.

### La fase conoscitiva per le gallerie "Bellosguardo" e "San Vito"

Come precedentemente accennato, la fase conoscitiva si è basata essenzialmente:

- sull'esecuzione di un foro pilota in asse al tracciato, per la galleria "Bellosguardo"

▼ FIGURA 5

### ARCHIVIO DATI GEOLOGICI GALLERIA «BELLOSSGUARDO»

COBERTURA [m]  
PROGRESSIVA [m]

VENUTE D'ACQUA

SEZIONE

PIANTA

RIEMPIMENTO DISC.

SPESSORE DISC. [cm]

RIGETTO DISC. [cm]

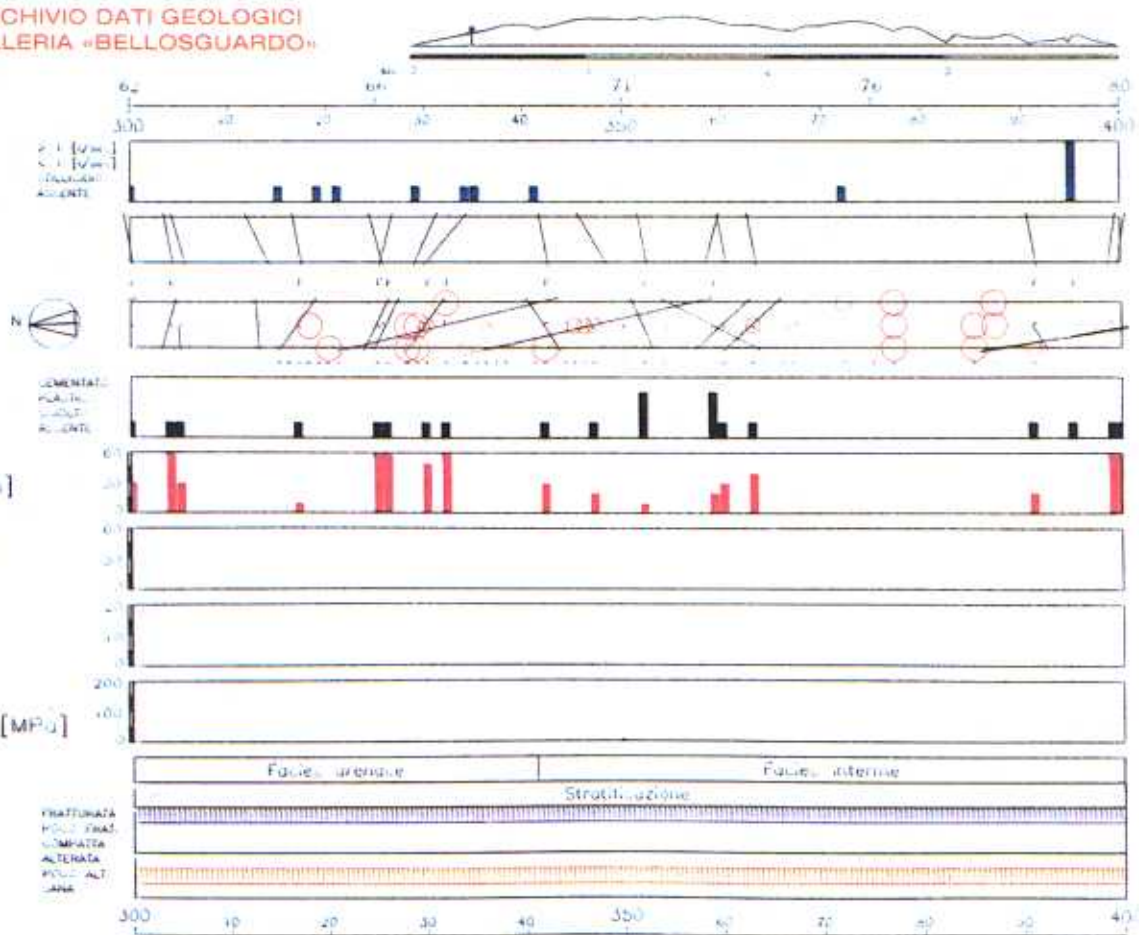
COEFFICIENTE DI RUGOSITÀ JRC

RESISTENZA ALLA COMPRESIONE JCS [MPa]

TIPO LITOLOGICO  
ASSETTO

CARATTERISTICHE DELLA ROCCIA

PROGRESSIVA [m]



do", nel tratto interessato prevalentemente dalla formazione arenacea di M. Modino (circa 3,5 Km);

- su una campagna geognostica tradizionale, per la galleria S. Vito e per la restante parte della galleria "Bellosguardo", non indagata col preforo.

Il foro pilota è stato realizzato mediante l'utilizzo di una fresa TBM ad attacco integrale di 3,90 m di diametro; questo ha permesso di acquisire in maniera diretta, continua e altamente automatizzata, gran parte degli elementi e dei dati utili alla successiva progettazione. In particolare:

- è stato studiato il comportamento della fresa durante lo scavo, raccogliendo sistematicamente i dati inerenti al suo avanzamento e al suo funzionamento, quali: spinta alla testa, velocità di avanzamento, potenza assorbita dai motori, ecc.

Tali dati, gestiti con l'ausilio di un computer, hanno costituito la base di una serie di elaborazioni aventi lo scopo di suddividere l'ammasso roccioso in zone a comportamento geomeccanico omogeneo e di determinare quantitativamente,



▲ Foto 4 - Galleria "Bellosguardo": prova di martinetto piatto nel foro pilota

vamente, per ogni zona, la resistenza  $\sigma_{pa}$  d'ammasso (metodo RS). Le figure 3 e 4 sono un esempio dei risultati ricavati da dette elaborazioni;

- è stato condotto visivamente un rilievo dettagliato all'interno del cunicolo della litologia, della stratigrafia, dei sistemi di discontinuità e dell'eventuale presenza di acqua che caratterizzano l'ammasso, nonché dei rilasci e degli interventi

di stabilizzazione resisi necessari (foto 1, 2, 3 e fig. 5);

- sono state eseguite prove di martinetto piatto e cilindrico (foto 4, 5 e fig. 6), prove di carico su piastra e prove di resistenza e deformabilità su campioni di roccia prelevati dal cunicolo e misure di convergenza, queste ultime assai preziose per la successiva taratura dei parametri geomeccanici di calcolo. I risultati ottenuti da

queste prove hanno costituito anche un'interessante verifica di quelli ottenuti attraverso l'elaborazione dei parametri d'avanzamento e funzionamento della fresa: infatti, la resistenza d'ammasso stimata si colloca ad un livello intermedio tra le resistenze di rottura della matrice, determinate in laboratorio, e le tensioni elastiche di ripristino determinate in situ con le prove di martinetto piatto (fig. 4).

Il profilo geomeccanico in fig. 7 riassume, in estrema sintesi, i risultati complessivi ottenuti in fase conoscitiva dal foro pilota.

Per quanto riguarda invece la campagna geognostica tradizionale, lo studio delle stratigrafie dei sondaggi ha permesso di costruire con buona attendibilità la geologia e la geomeccanica della restante parte del tracciato ferroviario sotterraneo non interessata dal foro pilota. Il relativo profilo geomeccanico di sintesi è riportato in fig. 8.



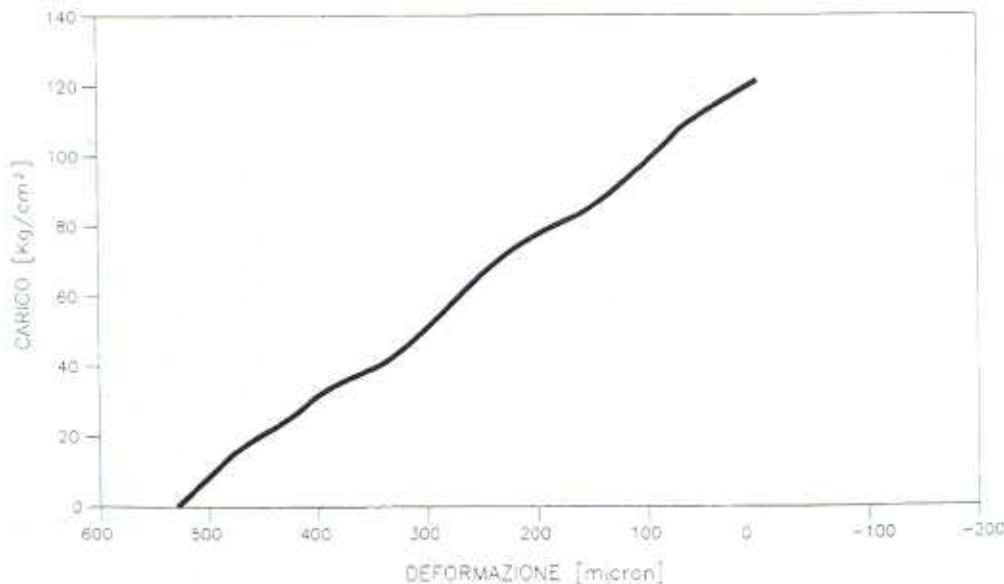
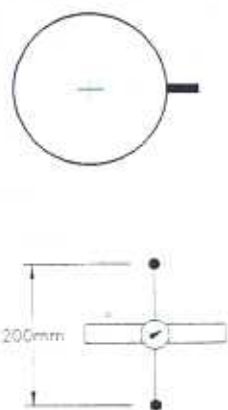
▲ Foto 5 - Galleria "Bellosguardo": prova di martinetto cilindrico nel foro pilota

FASE CONOSCITIVA

LINEA FERROVIARIA «FIRENZE-PISA» - TRATTA «FIRENZE-EMPOLI»  
GALLERIA «BELLOSGUARDO» - PROVA DI MARTINETTO PIATTO NEL FORO PILOTA

▼ FIGURA 6

PROGRESSIVA : 481m  
COPERTURA : ~90m  
TERRENO : ARENARIE



SOLLECITAZIONE DI RIPRISTINO = 120,75 Kg/cm<sup>2</sup>



## La fase di diagnosi per le gallerie "Bellosguardo" e "San Vito"

Una volta completato il quadro geologico-geomeccanico nel quale si sarebbero dovute costruire le gallerie in questione, è iniziata la fase di progettazione detta "di diagnosi", che, come noto, ha come fine la suddivisione del tracciato da realizzare in sotterraneo in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo, nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali A, B, C (fronte stabile, fronte stabile a breve termine, fronte instabile). A questo scopo, si sono fatte previsioni sulla risposta deformativa che il mezzo avrebbe fornito all'azione dello scavo, con particolare riguardo ai fenomeni deformativi che, in assenza di interventi di stabilizzazione, si sarebbero manifestati al fronte di scavo e, di conseguenza, nella fascia di terreno al contorno del cavo.

Gran parte dello studio è stato condotto sulla base degli andamenti delle

linee caratteristiche tracciate, a partire dai modelli e dai parametri geomeccanici individuati in fase conoscitiva, per le diverse situazioni geomeccaniche e tensionali da affrontare, dai quali è possibile desumere immediatamente se l'ammasso circostante allo scavo in assenza d'interventi di stabilizzazione avrà un comportamento tenso-deformativo elastico, elastoplastico, o in campo di rottura (fig. 9).

Una volta suddiviso il tracciato da realizzare in galleria in tratte a comportamento deformativo omogeneo e, una volta associata a ciascuna tratta la corretta categoria di comportamento si sono studiate:

- le tipologie di deformazione che si sarebbero potute sviluppare al contorno dello scavo (estrusione, preconvergenza e convergenza);
- le manifestazioni d'instabilità conseguenti e attese, quali:
  - distacchi gravitativi e splaccaggi al fronte, prodotti dall'estrusione del nucleo e dalla preconvergenza;
  - distacchi gravitativi e splaccaggi al

contorno del cavo, prodotti dalla convergenza;

- collasso della cavità prodotto dal crollo del fronte;

• i carichi che sarebbero stati mobilitati dallo scavo, secondo modelli a solidi di carico e ad anelli plasticizzati.

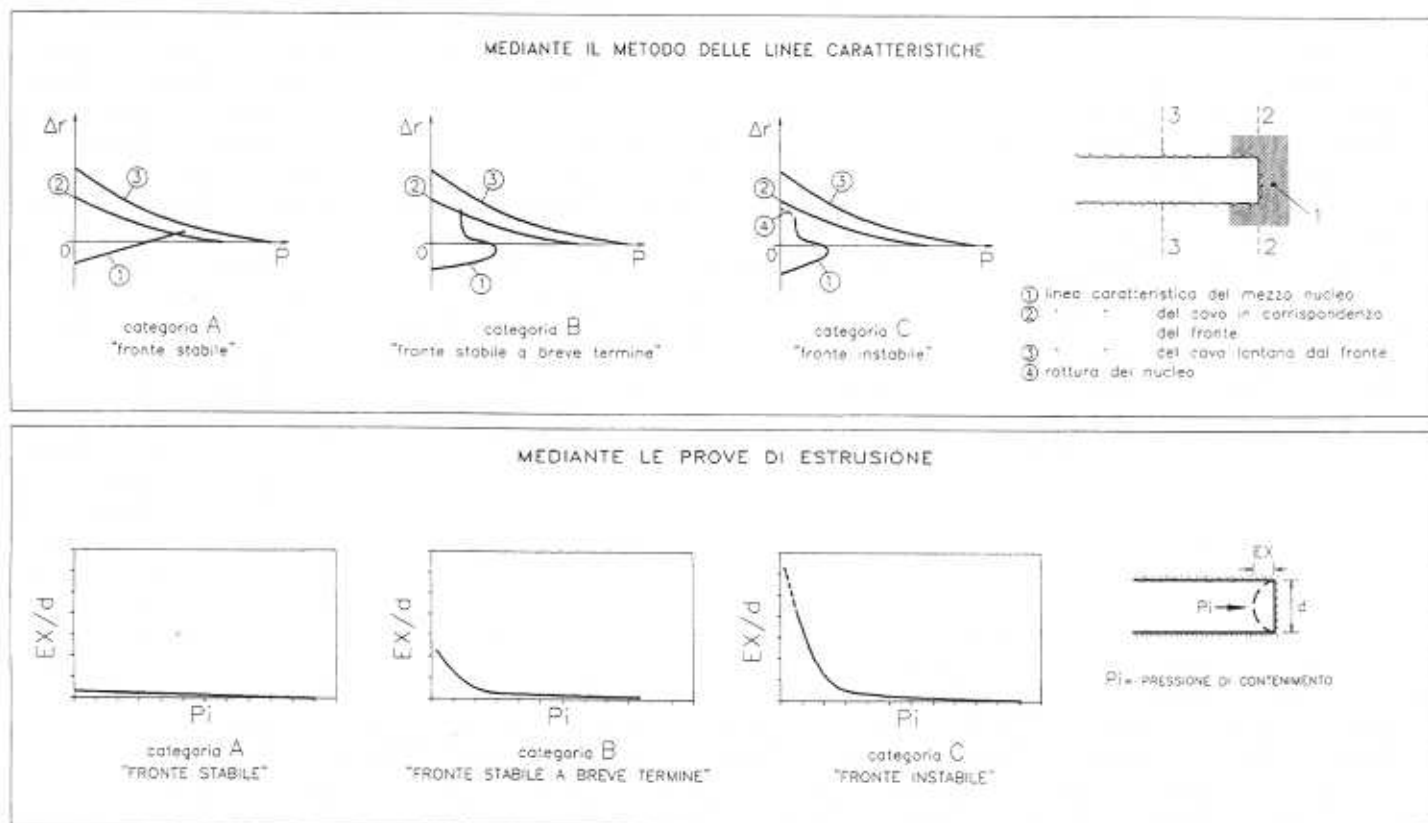
Naturalmente, lo studio di diagnosi per la tratta di galleria "Bellosguardo" dove era stato eseguito il foro pilota è risultato considerevolmente facilitato, essendo stato possibile verificare direttamente, sebbene in piccola scala, gli effetti dello scavo in termini di convergenza, manifestazioni d'instabilità e interventi necessari per ottenerne la stabilizzazione.

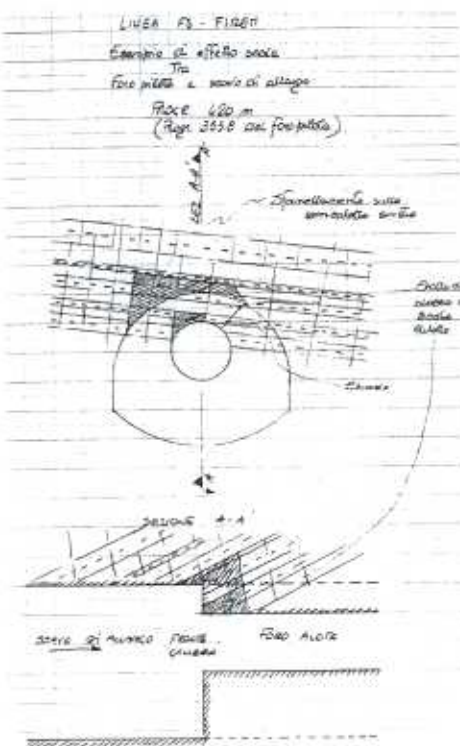
Le osservazioni si sono poi proiettate alla scala della futura galleria, traendo informazioni preziosissime sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, e soprattutto caratterizzate da un'elevatissima attendibilità. In fig. 10 è riportato un tipico studio eseguito su un distacco gravitativo osservato alla progr. 353,8 del foro pilota per riportare il fenomeno alla scala della futura galleria.

FASE DI DIAGNOSI

LINEA FERROVIARIA «FIRENZE-PISA» - TRATTA «FIRENZE-EMPOLI»  
PREVISIONE DELLA CATEGORIA DI COMPORTAMENTO

FIGURA 9





▲ FIGURA 10

## La fase di terapia per le gallerie "Bellosguardo" e "San Vito"

Sulla base delle previsioni fatte in fase di diagnosi in tema di tipo ed entità dei fenomeni deformativi e delle manifestazioni d'instabilità del fronte e del cavo, in fase di terapia si sono progettati gli interventi di stabilizzazione necessari per contenere o annullare detti fenomeni e dette manifestazioni onde garantire, in primo luogo, la sicurezza degli scavi, e, a lungo termine, quella dell'esercizio della galleria.

In particolare, per quelle tratte in cui, all'apertura del cavo, si era previsto che l'ammasso circostante avrebbe mantenuto condizioni elastiche (categoria di comportamento A), si sono ipotizzati:

- avanzamento a piena sezione con abbattimento della roccia mediante esplosivo;
- fenomeni deformativi (estrusione, preconvergenza e convergenza) immediati e molto ridotti;
- manifestazioni d'instabilità al fronte e al contorno del cavo localizzate e riconducibili per lo più al distacco gravitativo di blocchi o volumi rocciosi definiti dall'intreccio delle superfici di di-

scontinuità preesistenti nell'ammasso o prodotte da fenomeni di decoesione e distensione generati dallo sparo delle volate;

Per tali tratte di galleria si è quindi optato per l'adozione di:

- **interventi immediati**, quali la messa in opera di bulloni radiali, centine metalliche e spritz-beton, eventualmente fibrorinforzato;
- **interventi definitivi**, quali la realizzazione di un rivestimento di calcestruzzo, completo di arco rovescio, di-

mensionato per contrastare l'azione dei possibili carichi gravitativi simmetrici e non.

Per le tratte di galleria dove si era previsto che l'ammasso circostante all'apertura del cavo sarebbe entrato in elastoplasticità (categoria di comportamento B), si sono ipotizzati:

- avanzamento a piena sezione, con abbattimento della roccia mediante esplosivo o, nei materiali più teneri, mediante mezzi meccanici;
- fenomeni deformativi di ordine deci-

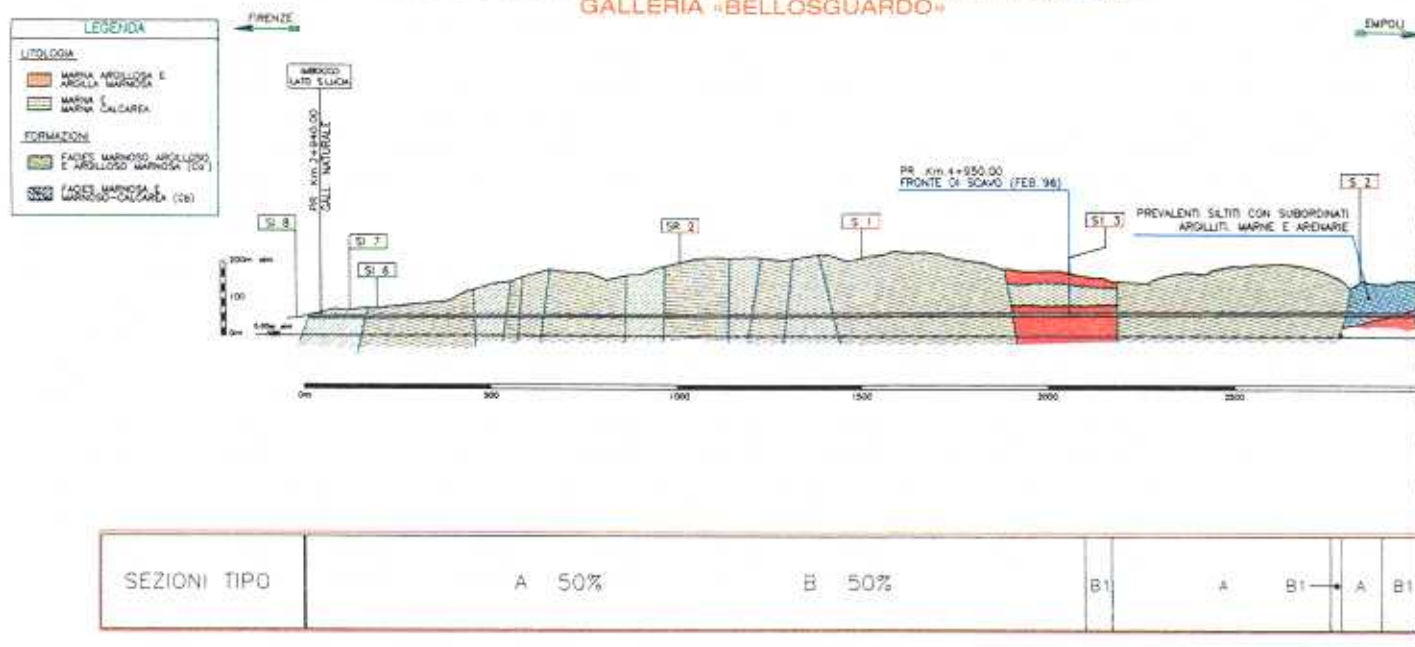
FASE DI TERAPIA

▼ FIGURA 11

LINEA FERROVIARIA «FIRENZE-PISA» - TRATTA «FIRENZE-EMPOLI»  
GALLERIE «BELLOSGUARDO» E «S. VITO» - SEZIONI TIPO

| SEZIONI | PROFILO LONGITUDINALE | SEZIONE TRASVERSALE |
|---------|-----------------------|---------------------|
| TIPO A  |                       |                     |
| TIPO B1 |                       |                     |
| TIPO C1 |                       |                     |
| TIPO C2 |                       |                     |
| TIPO C3 |                       |                     |





metrico, al fronte e al contorno del cavo, conseguenti alla plasticizzazione dell'ammasso, che, se non regimati tempestivamente in maniera opportuna, avrebbero potuto comportare una decompressione progressivamente crescente dell'ammasso, con conseguente possibile alterazione chimico-fisica del materiale e importanti manifestazioni d'instabilità a lungo termine;

- conseguenti manifestazioni d'instabilità al fronte e al contorno del cavo riconducibili alla plasticizzazione del materiale (splaccaggi diffusi al fronte e al contorno del cavo).

Per tali tratte di galleria si è quindi optato per l'adozione di:

- **interventi immediati** capaci di fornire una pressione di contenimento al fronte e al contorno del cavo adeguata a regimare i predetti fenomeni deformativi, quali: l'armatura sistemica del nucleo con bulloni di vetroresina iniettati con malte cementizie e la messa in opera di bulloni radiali cementati ad aderenza continua, centine metalliche e spritz-beton, eventualmente fibrorinforzato, al contorno del cavo.

- **interventi definitivi**, quali la realizzazione di un rivestimento di calcestruzzo, completo di arco rovescio, dimensionato in funzione delle situazioni geostrukturali della formazione di volta in volta attraversata, per elevare opportunamente il coefficiente di sicurezza della galleria in fase di esercizio.

L'armatura sistemica del nucleo d'avanzamento persegue un duplice scopo:

- a breve termine, garantisce la tenuta del nucleo d'avanzamento evitando l'insorgere di importanti movimenti estrusivi, tali da compromettere seriamente la stabilità della galleria;

- a lungo termine, grazie alla riduzione della preconvergenza del cavo ottenuta attraverso l'irrigidimento del nucleo, permette di beneficiare di una miglior conservazione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso, che per raggiungere il nuovo equilibrio richiederà interventi di stabilizzazione più ridotti.

Per le tratte di galleria dove si era previsto che all'apertura del cavo l'ammasso circostante sarebbe entrato in campo di rottura (categoria di comportamento C), si sono ipotizzati:

- avanzamento a piena sezione, con abbattimento della roccia mediante mezzi meccanici;

- fenomeni deformativi inaccettabili al fronte e al contorno del cavo conseguenti alla rottura dell'ammasso, che, se non anticipati e regimati con adeguati interventi di precontenimento del cavo lanciati a monte del fronte di scavo, avrebbero potuto dar luogo a:
  - conseguenti manifestazioni d'instabilità gravi e immediate, quali il crollo del fronte e il collasso della cavità.

Per tali tratte di galleria si è quindi optato per l'adozione di:

- **interventi immediati** capaci di esercitare un'efficace azione di precontenimento e contenimento del cavo, quali: per il precontenimento, l'armatura sistemica del nucleo con bulloni di vetroresina iniettati con malte cementizie e il preconsolidamento di una fascia di terreno al contorno del nucleo stesso mediante bulloni di vetroresina valvolati e iniettati ad alta pressione, per il contenimento, la messa in opera di centine metalliche e spritz-beton, eventualmente fibrorinforzato, al contorno del cavo.

- **interventi definitivi**, quali la realizzazione di un rivestimento di calcestruzzo, completo di arco rovescio, dimensionato in funzione delle situazioni geostrukturali della formazione di volta in volta attraversata, per elevare opportunamente il coefficiente di sicurezza della galleria in fase di esercizio. Sulla base dei criteri sopra enunciati, si sono infine composte e dimensionate le sezioni tipo illustrate in fig. 11.

I calcoli di dimensionamento e verifica si sono eseguiti con metodi di calcolo diversi (linee caratteristiche, teoria dei blocchi chiave, elementi finiti, ecc.), in funzione delle situazioni tenso-deformative e delle caratteristiche dei terreni, quindi del tipo di carichi (gravitativi o di montagna) ad esse associati.

La distribuzione finale delle sezioni tipo lungo il tracciato è riportata nei profili di fig. 12 e 13.

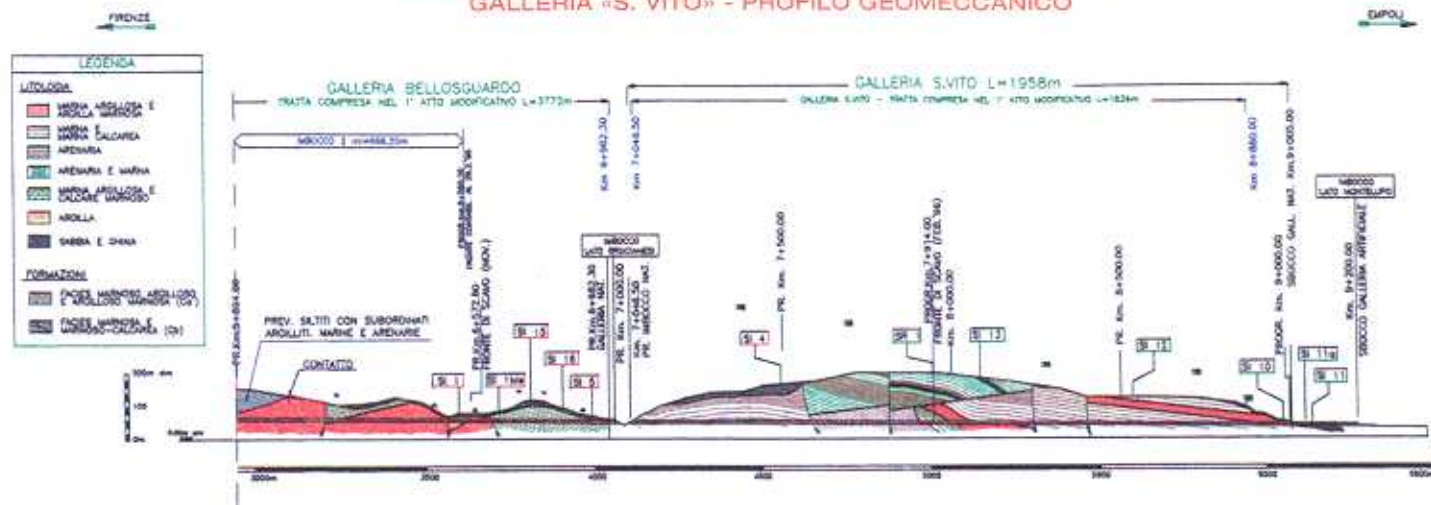


FIGURA 14



DATI GENERALI

OPERA: GALLERIA BELLOSGUARDO - LINEA FERROVIARIA FIRENZE-EMPOLI  
COMITENTE: ENTE FERROVIE DELLO STATO  
IMPRESA: RTI: FIREM (COGI - CIR - COMI - JOGI)

DATI GEOLOGICI

LITOLOGIA: ARENARIE DI S. LUCIA, ARENARIE E SUBORDINATE MARINE E ARGILLIT  
GENESI / NATURA: SEDIMENTARIA ELYSIOIDICA  
FORMAZIONE: ARENARIE DI MONTI TORNIO (OLIGOCENE SUPERIORE)  
UBICAZIONE: LASTRA A SIGNA (FIRENZE)

DATI TOPOGRAFICI

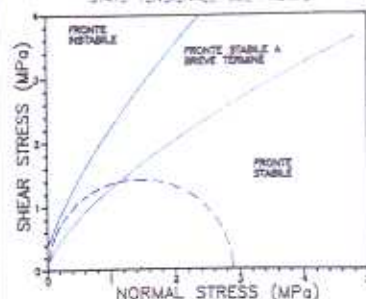
PROG: REL. 656/m ASS. 3596  
COPERTURA V (m): ~110  
COPERTURA H (m):

DATI GEOMECCANICI

PESSO DI VOLUME (%): ~26  
COEFF. LAMBERG (λ):  
RMP (BERNARDINI) (massa volume) = 50  
DISTURBED: SOSTANZIALI  
σ<sub>c</sub> = 60 MPa σ<sub>t</sub> = 60 MPa  
σ<sub>1</sub> = 0.427 σ<sub>2</sub> = 2.5152  
σ<sub>3</sub> = 0.00024 σ<sub>4</sub> = 0.000386  
σ<sub>pd</sub> = 0.93 MPa σ<sub>pd</sub> = 3.75 MPa

NOTE

STATO TENSIONALE SUL FRONTE



### La fase operativa per le gallerie "Bellosguardo" e "San Vito"

Come già precedentemente accennato, i lavori di scavo, iniziati nel 1988, si sono protratti sino ad oggi per difficoltà che esulano dalle questioni tecniche o operative che costituiscono il tema del presente rapporto.

Le problematiche che si sono dovute affrontare o che dovranno essere affrontate sono le seguenti:

- scavo di allargo nelle Arenarie di M. Modino, già attraversate dal foro pilota;
- avanzamento a piena sezione nel caotico;
- scavo di sbocco con bassa copertura sotto l'abitato di S. Lucia.

#### Scavo di allargo

Lo scavo di allargo nelle Arenarie di M. Modino che interessano per circa 3000 m la galleria "Bellosguardo" è ad oggi quasi

ultimato. La presenza del foro pilota si è dimostrata utilissima non solo perché ha permesso di eseguire una progettazione particolarmente aderente alla reale situazione dell'ammasso, ma anche perché è agevole consolidare preventivamente l'ammasso al contorno della galleria da realizzare (sezione tipo B1) ogni qualvolta la tessitura delle discontinuità della roccia evidenziate e le instabilità verificatesi nel cunicolo ne suggeriscono l'opportunità.

Man mano che lo scavo d'allargo avanza viene eseguito un rilievo geolitologico e geomeccanico del fronte (circa ogni 100 m) e i dati raccolti e classificati in modo da renderli utili per futuri studi sul comportamento delle gallerie in fase di scavo (in fig. 14 è riportato un esempio di scheda tipo).

L'avanzamento medio dello scavo di allargo, che avviene mediante esplosivo, al



▲▲  
**Foto 6** - Galleria "Bellosguardo": avanzamento a piena sezione nel "Complesso caotico" previo consolidamento del nucleo con chiodi tubolari di vetroresina

**Foto 7** - Galleria "San Vito": tipico fronte nel "Complesso caotico"

netto dei fermi del cantiere non riconducibili a difficoltà tecniche od operative è stato di circa 3,5 m/giorno di galleria finita.

### Avanzamento a piena sezione nel caotico

In questo tipo di terreno si sono adottate prevalentemente le sezioni tipo C2 e C3, che differiscono essenzialmente per il grado d'intensità dei trattamenti da operare in avanzamento rispetto al fronte di scavo.

Appare interessante analizzare nel dettaglio il ciclo delle lavorazioni per la sezione tipo C2 (quello per la sezione tipo C3 differisce leggermente nei tempi) (figg. 15 e 16).

La prima operazione che viene realizzata è il consolidamento del nucleo mediante n. 30 elementi strutturali di vetroresina a 3 piatti da 800 KN. Tali elementi hanno una lunghezza di 18 m e si sovrappongono al consolidamento del precedente campo di avanzamento per almeno 5 m. Al termine del trattamento viene immediatamente realizzato il consolidamento in coronella costituito da 49 elementi strutturali in VTR di caratteristiche e geometria analoghe a quelle degli elementi utilizzati per il fronte, ma valvolati con 1 valvola/m ed iniettati.

Queste due lavorazioni, comprensive,

FASE OPERATIVA

▼ FIGURA 15

### GALLERIA «S. VITO» - CICLO DELLE LAVORAZIONI D'AVANZAMENTO MEDIE OTTENUTE SU 8 CAMPI

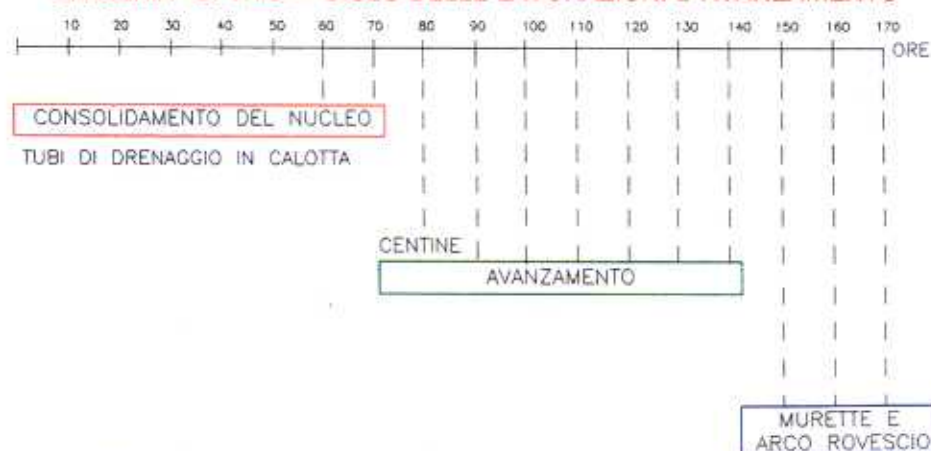
(TUTTI I TEMPI MORTI PER GUASTI, IMPREVISTI, ECC... NON SONO CONSIDERATI)

|   |   |      |
|---|---|------|
| <b>CONSOLIDAMENTO DEL NUCLEO</b><br>IN MEDIA 49 CORONELLE<br>20 TUBI O DRENI<br>17,3 m/ora di lavoro  |   | 40 % |
| <b>AVANZAMENTO:</b><br>scavo, centine<br>spritz-beton<br>IN MEDIA: m 12,98<br>0,19 m/ora 1,45 m/turno |   | 40 % |
| <b>ARCO ROVERSCIO:</b><br>scavo, cassetatura,<br>getto<br>IN MEDIA: m 13,50<br>0,38 m/ora             |   | 20 % |
| <b>CONSOLIDAMENTO DEL NUCLEO</b>  | Getti durante le operazioni di consolidamento del nucleo<br>Distanza fronte di scavo-rivestimento : 30,00 m |      |
| <b>DURATA MEDIA DEL CICLO : 180 ORE (7,5 GIORNI)</b>  |   |      |

FASE OPERATIVA

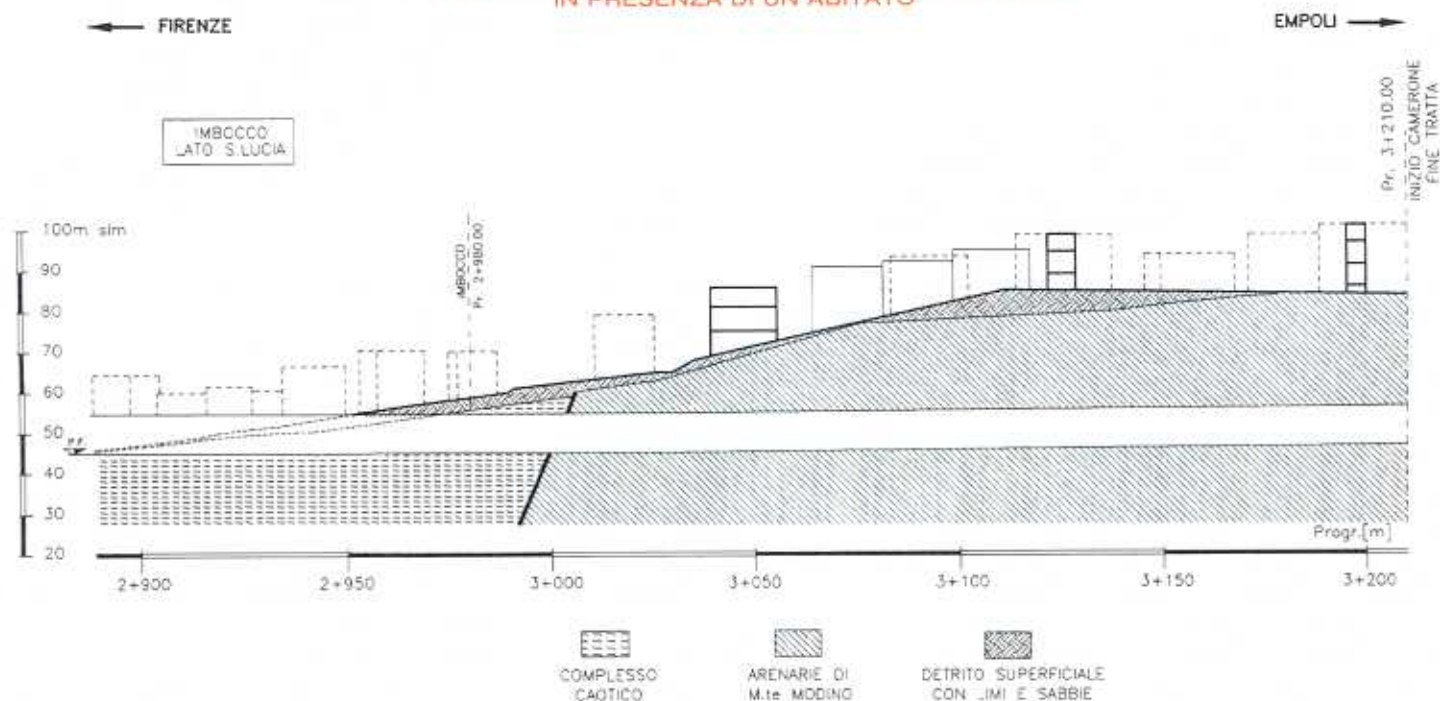
▼ FIGURA 16

### GALLERIA «S. VITO» - CICLO DELLE LAVORAZIONI D'AVANZAMENTO



INTERASSE TRA LE CENTINE 1,10 m  
 I TEMPI MORTI NON SONO CONSIDERATI  
 AVANZAMENTO PER OGNI CICLO 13,20 m

PRODUZIONE MEDIA : 1,7 m/giorno DI GALLERIA FINITA



in presenza d'acqua, delle perforazioni per la realizzazione di 6 drenaggi in avanzamento della lunghezza di 30 m, avvengono in circa 72 h, che rappresentano il 40% del tempo totale impiegato per realizzare un avanzamento di 15 m.

Lo scavo a piena sezione per campioni di 1 m, con posa di centine 2IPN180 e di spritz-beton fibrorinforzato dello spessore di 35 cm, fino a raggiungere i 13 m di sfondo, avviene nelle successive 72 h.

Infine lo scavo, la cassatura ed il getto dell'arco rovescio, che di fatto completano la stabilizzazione della cavità, avvengono ad una distanza non superiore ad 10 dal fronte ed in circa 36 h. La durata media del ciclo di avanzamento è dunque di 180 h.

#### Scavo di sbocco con bassa copertura sotto l'abitato di S. Lucia

Una problematica particolare che si dovrà affrontare per il completamento della galleria "Bellosguardo" è la realizzazione dello sbocco lato Firenze, che comporterà di dover avanzare per un centinaio di metri, con copertura assai ridotta, sotto l'abitato di S. Lucia

(fig. 17). Da un lato, il tipo di roccia da attraversare, assai resistente, sconsiglia l'abbandono della tecnica d'abbattimento tradizionale mediante esplosivo adoperata nel tratto già scavato nello stesso materiale, dall'altro lato, la presenza di edifici civili abitati a pochi metri di distanza dall'estradosso del profilo della futura galleria rende assai problematico il suo impiego. Le vibrazioni che si produrrebbero ad ogni brillamento di volata sarebbero, infatti, inammissibili.

Tra le varie soluzioni possibili, quella che appare più praticabile e sicura è lo smorzamento delle vibrazioni perseguibile con la tecnica "Buffer Blasting", che consiste nel realizzare una superficie di discontinuità nell'ammasso tra il punto dove avviene il brillamento e il volume di terreno da schermare.

In pratica, si tratterà di realizzare in avanzamento, lungo l'intradosso del profilo di scavo, un taglio di 10 cm di spessore e 110 di profondità (fig. 18).

Tra i sistemi che è possibile adottare per l'esecuzione di una simile incisione, si sta valutando la possibilità di utilizzare l'idrofratturazione, da qui il nome "idrotaglio" attribuito alla tecnologia che è tuttora in fase di studio.

#### La fase di verifica per le gallerie "Bellosguardo" e "San Vito"

Avendo basato la progettazione delle due gallerie su previsioni di comportamento tenso-deformativo del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento e del cavo, era indispensabile prevedere, in fase di costruzione, un adeguato programma di monitoraggio che consentisse di ottimizzare la distribuzione degli interventi di stabilizzazione e soprattutto di verificare l'attendibilità delle suddette previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia. La verifica avviene attraverso la misura e il controllo della reale "risposta" del mezzo all'azione dello scavo, risposta che, come sappiamo, si manifesta sotto forma di fenomeni deformativi:

- all'interno della cavità, in corrispondenza del fronte e delle pareti di scavo;
- in superficie, in corrispondenza del tracciato della galleria.

Il piano di monitoraggio progettato per le gallerie "Bellosguardo" e "San Vito", per quanto riguarda la rete di strumentazione da collocare internamente alle gallerie, prevedeva, in par-

icolare, l'installazione di un sistema di controllo costituito da stazioni di misura principali, sistematiche e correnti. Le stazioni principali, 5 per la galleria "Bellosguardo" e 3 per la galleria S. Vito, equamente intervallate nelle tratte in caotico, sono costituite come illustrato in fig. 19 e messe in opera immediatamente a ridosso del fronte di scavo. Esse hanno lo scopo di:

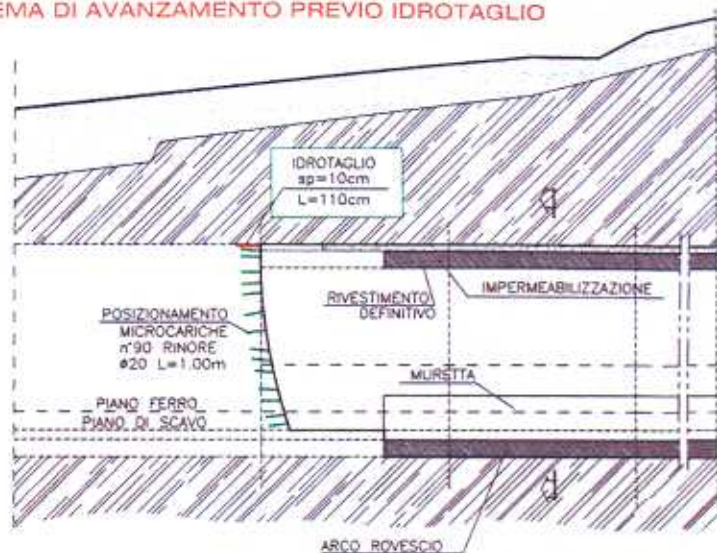
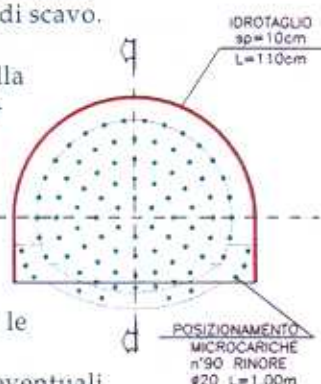
- monitorare l'evoluzione della situazione tensionale e deformativa dell'ammasso;
- misurare lo stato tenso-deformativo al fronte e al contorno del cavo conseguente agli interventi di stabilizzazione immediati e definitivi realizzati durante le diverse fasi lavorative;
- valutare l'estensione delle eventuali zone d'ammasso plasticizzate.

Rimarranno al loro posto anche dopo il completamento della galleria, permettendo di controllarne la sicurezza anche durante l'esercizio.

Le stazioni sistematiche, messe in opera subito a valle del fronte di scavo nelle tratte di applicazione delle sezioni tipo C1, C2 e C3 ogni tre/quattro campi d'avanzamento, sono costituite come in fig. 19 ed hanno lo scopo di fornire una misurazione tridimensionale

FASE OPERATIVA

LINEA FERROVIARIA «FIRENZE-PISA» - TRATTA «FIRENZE-EMPOLI»  
GALLERIA «BELLOSGUARDO»  
SCHEMA DI AVANZAMENTO PREVIO IDROTAGLIO



nale dell'evoluzione deformativa della cavità, allo scopo di valutare l'efficacia degli interventi di consolidamento eseguiti, di decidere la necessità o meno di ricalibrare il consolidamento del nucleo nell'ambito delle variabilità previste dal progetto, di evidenziare eventuali improvvisi movimenti del terreno in senso longitudinale, che necessitano di un fermo del fronte per interve-

nire con ulteriori consolidamenti prima che possano innescarsi fenomeni di crollo.

Le stazioni correnti, costituite come illustrato in fig. 19 e messe in opera ogni 15+30 m, invece, hanno lo scopo di realizzare un economico ma efficace monitoraggio dello stato deformativo del cavo, con notevole frequenza temporale e spaziale nello sviluppo della

FIGURA 18

FASE DI VERIFICA

LINEA FERROVIARIA «FIRENZE-PISA» - TRATTA «FIRENZE-EMPOLI»  
MONITORAGGIO DELLE GALLERIE «BELLOSGUARDO» E «S. VITO»

FIGURA 19

STAZIONE DI MISURA PRINCIPALE

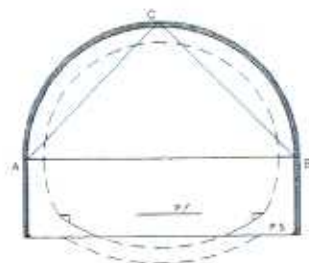
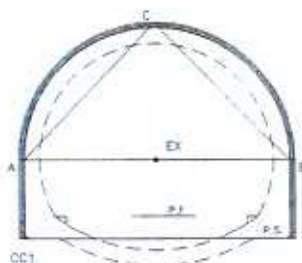
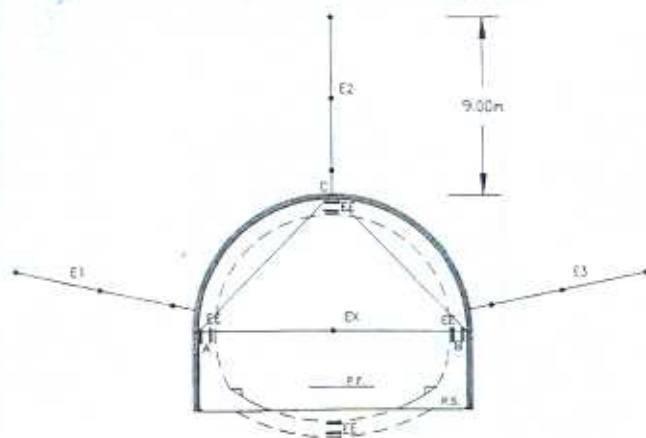
STAZIONE DI MISURA SISTEMATICA

STAZIONE DI MISURA CORRENTE

GALLERIA BELLOSGUARDO : PROGRESSIVA 6+548  
6+523  
6+300  
6+000  
5+500  
GALLERIA S.VITO : PROGRESSIVA 8+100  
8+400  
8+600

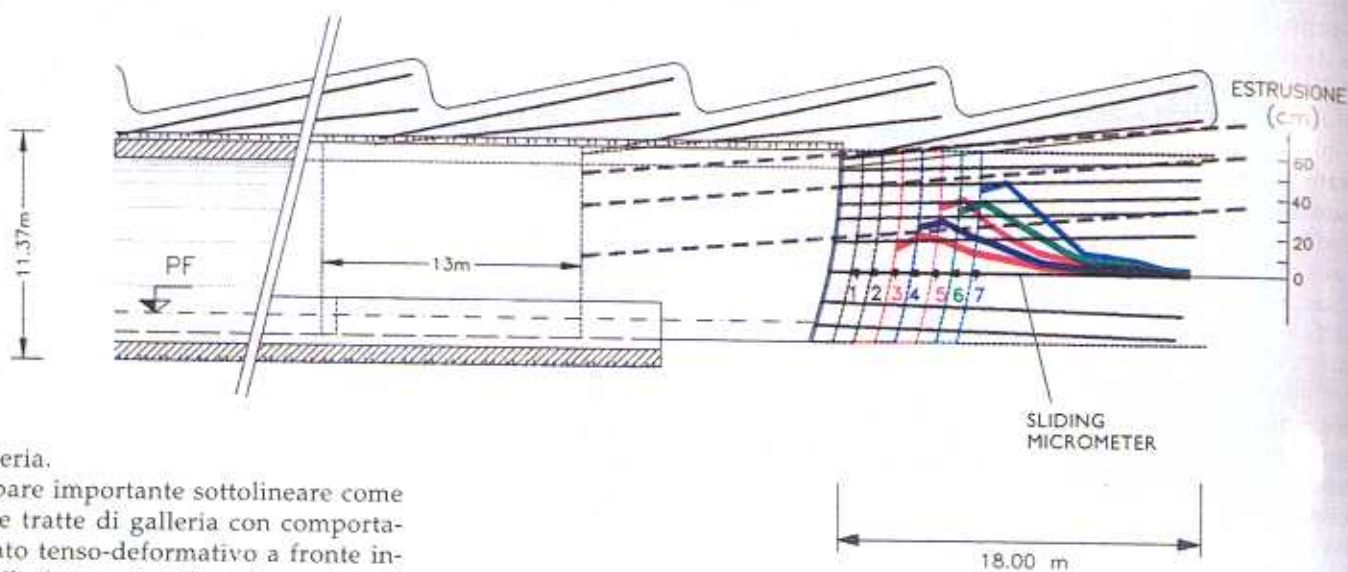
SEZ. TIPO C2/C3 :  
OGNI 3/4 CAMPI DI AVANZAMENTO

SEZIONE TIPO A : OGNI 30m  
SEZIONE TIPO B1 : OGNI 25m  
SEZIONE TIPO C2/C3 : OGNI CAMPO DI AVANZAMENTO



E = ESTENSIMETRO A TRE BASI L = 9.00m  
EE = BARRETTE ESTENSIMETRICHE  
EX = ESTRUSOMETRO

A, B e C = PUNTI PER LA MISURAZIONE DELLE CONVERGENZE



galleria.

Appare importante sottolineare come nelle tratte di galleria con comportamento tenso-deformativo a fronte instabile (categoria C), si è previsto di completare le stazioni di misura principali e sistematiche con la messa in opera di uno *sliding micrometer* di 20 m di lunghezza inserito nel fronte, allo scopo di monitorare l'evoluzione dei movimenti estrusivi del sistema fronte di scavo-nucleo d'avanzamento in funzione dell'intensità degli interventi di irrigidimento dello stesso.

In figura 20 si riportano, quale esempio, le misure di estrusione compiute a progr. 7.893 m della galleria "San Vito", dove, avendo la galleria un comportamento "a fronte instabile", si avanzava con una sezione tipo C2. Dalla lettura dei diagrammi si nota come al ridursi della profondità del nucleo consolidato, a seguito dell'avanzamento, si sviluppa un comportamento deformativo del nucleo (e conseguentemente della cavità essendo la convergenza funzione della preconvergenza a sua volta funzione diretta dell'estrusione) da elastico (estrusione max 18 cm) a sempre più marcatamente elasto-plastico (estrusione max 50 cm).

Sulla base di queste misure si poteva decidere il momento in cui era opportuno arrestare l'avanzamento per eseguire un nuovo consolidamento e ripristinare la profondità di nucleo consolidato minima per mantenere l'ammasso in campo elastico.

Per quanto concerne, invece, la strumentazione da collocare esternamente alle gallerie, essa ha lo scopo di monitorare gli assestamenti del terreno in superficie a seguito del passaggio del-

la galleria, nonché la sicurezza dei versanti e delle eventuali preesistenze limitrofe (per esempio edifici civili). Nel caso delle gallerie in questione si pone questo problema per lo sbocco del tunnel "Bellosguardo" in località S. Lucia, dove, come già abbiamo illustrato, sarà necessario avanzare sotto un abitato con coperture dell'ordine di soli 15 m.

Per controllare la sicurezza dei lavori è prevista la messa in opera di un'ade-

guata strumentazione composta da assestimetri per il controllo dei cedimenti in superficie, inclinometri per il rilievo degli eventuali movimenti orizzontali del terreno, estensimetri sugli edifici per controllarne l'integrità.

## Conclusioni

La realizzazione delle gallerie "Bellosguardo" e "S. Vito" è di sicuro interesse per chiunque s'interessi di scavi in sotterraneo. L'eterogeneità dei terreni da attraversare ha determinato sin dall'inizio l'adozione di due "filosofie" progettuali e costruttive distinte: il foro pilota e il metodo "RS" nella tratta delle Arenarie di M. Modino da un lato, una campagna d'indagini più tradizionale e l'adozione di tecnologie d'avanzamento speciali quali il consolidamento del nucleo e del contorno del cavo nella tratta del Caotico, dall'altro lato. I lavori si sono svolti a tutt'oggi senza incontrare particolari inconvenienti di tipo tecnico e con produzioni di tutto rispetto, considerando i terreni in gioco. I risultati delle misure di estrusione e convergenza confermano la validità del progetto e la buona esecuzione delle lavorazioni. ■

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Dott. Ing. Roberto Contiero per l'aiuto prestato nel reperimento dei dati di produzione del cantiere.

scheda tecnica

### COMMITTENTE

**Ferrovie dello Stato S.p.A.**

Ufficio di Vigilanza

Dott. Ing. Vincenzo Pantaleone

Dott. Ing. Franco Arrighi

Dott. Ing. Riccardo Lenzi

### IMPRESA

**CIR Costruzioni S.r.l.**

(ex FIREM S.c.a.r.l.)

### SUBAPPALTO

**VIENNE S.r.l.**

Direzione tecnica

Dott. Ing. Luciano Gennai

Geom. Ezio Neve

Direzione dei lavori

Dott. Ing. Roberto Contiero

Direzione del cantiere

Geom. Tino Sciaini

### PROGETTAZIONE

**ROCKSOIL S.p.A.**

Prof. Ing. Pietro Lunardi

Dott. Ing. Alessandro Focaracci

Dott. Ing. Giovanna Cassani

Dott. Ing. Antonio Voza