

Pietro Lunardi Storia del collegamento ferroviario tra Bologna e Firenze

Historique de la liaison
ferroviaire entre Bologne et
Florence

Dall'illustrazione sintetica delle vicende storiche del collegamento ferroviario tra Bologna e Firenze attraverso l'Appennino e dall'analisi dell'evoluzione dei tracciati scaturisce evidente la crescente qualità infrastrutturale delle opere e com'essa sia dovuta non solo ai progressi tecnologici conseguiti, ma anche all'affermazione di una nuova mentalità progettuale che porta a tenere nel giusto conto il rispetto dell'ambiente in cui viviamo.

L'illustration rapide des différents épisodes de la liaison ferroviaire entre Bologne et Florence à travers les Apennins et l'analyse de l'évolution des tracés révèle à l'évidence si besoin en était la qualité croissante de l'infrastructure des ouvrages due essentiellement aux progrès technologiques mais également à l'affirmation d'une nouvelle mentalité dans la conception qui oblige à prendre dûment en considération le respect de l'environnement où nous vivons.

Prof. Ing. Pietro Lunardi, Studio di progettazione Lunardi, Milano

Il collegamento ferroviario ad alta velocità tra Bologna e Firenze

Con i suoi 73 km di gallerie per un tracciato che si sviluppa attraverso l'Appennino per 78 km, la sensazione del viaggiatore che percorrerà la tratta tra Bologna e Firenze del sistema ferroviario italiano ad Alta Velocità sarà quella di passare attraverso un'unica lunghissima galleria. Sebbene opere d'ingegneria del sottosuolo di grande rilevanza siano già state realizzate in passato nel nostro Paese (si pensi ai trafori alpini e alla linea Direttissima attraverso l'Appennino che fu costruita nel 1934), quella di oggi, per lunghezza del tracciato in sotterraneo e per complessità del contesto geologico da affrontare, si presenta come opera di valore e interesse unici nel panorama mondiale. La sua realizzazione richiederà sette anni di lavoro su circa 40 attacchi contemporanei e avrà importanti ricadute sul settore delle costruzioni che ne riceverà un vigoroso stimolo alla riqualificazione, nella prospettiva di una competizione sempre più globale.

Negli articoli che seguono il lettore potrà non solo trovare una descrizione delle caratteristiche peculiari dell'opera dal punto di vista progettuale e costruttivo e un'aggiornamento sullo stato d'avanzamento dei lavori, ma anche trarre una chiara visione di come si sia evoluta nel tempo la mentalità progettuale e costruttiva, come conseguenza del progresso scientifico e tecnologico e della crescente sensibilità nei riguardi del rispetto dell'ambiente in cui viviamo.

Le vicende storiche del collegamento ferroviario fra Bologna e Firenze attraverso l'Appennino Tosco-Emiliano seguono di pari passo l'affermarsi della ferrovia come sistema principe per il trasporto terrestre di merci e persone nel quadro del contesto socio-politico che, al volgere della metà del secolo XIX, vede crescere le esigenze di relazioni commerciali fra l'area padana e quella centrale del Paese.

La maturazione degli eventi che conducono alla creazione dello Stato Unitario favorisce un formidabile impulso alla progettazione ed alla realizzazione di un collegamento che costituirà a tutti gli effetti la principale dorsale infrastrutturale del nuovo Stato Italiano il cui baricentro politico-amministrativo si sposta velocemente da Torino a Firenze e quindi a Roma. Le vicissitudini del collegamento rispecchiano senza dubbio lo sforzo tecnico ed economico motivato dal particolare momento storico che ha portato a progetti e realizzazioni che restano a testimonianza della lungimiranza e della elevata perizia dei tecnici impegnati nell'opera nonché degli elevati investimenti effettuati. Il primo collegamento tra Bologna e Firenze, i cui lavori vennero intrapresi nel 1856, è entrato in servizio nel novembre del 1864. Il tracciato, sviluppato su progetto dell'ing. Protche di Bologna, è quello della tuttora esistente linea "Porrettana", che si snoda lungo la valle del Reno e realizza il valico dell'Appennino a Pracchia (quota 616 m slm), collegandosi a Firenze attraverso Pistoia. Prima ancora che la costruzione di questa ferrovia fosse terminata, però, ci si rendeva conto che, per le sue caratteristiche costruttive (pendenze elevate), essa non sarebbe stata in grado di smaltire l'intenso traffico tra la valle del Po e la Capitale. Si evidenziava dunque la necessità

di una comunicazione più diretta e di maggiore potenzialità tra Bologna e Firenze. Il problema, affrontato da vari progettisti di fama, dava origine a una serie di proposte che prevedevano differenti alternative planoaltimetriche, ciascuna delle quali caratterizzata dai valori della quota di valico e dello sviluppo della galleria principale. L'esigenza di limitare lo sviluppo di tale galleria induceva i progettisti a mantenere le quote di valico intorno ai 500 m slm, cosa che avrebbe dato luogo a pendenze poco inferiori a quelle della linea esistente, con scarsi miglioramenti della potenzialità.

Nel 1882 veniva dato incarico all'ing. Protche, da parte degli Enti locali interessati al collegamento, di riferire in particolare sul progetto redatto dall'ing. Zanoni nel 1871 e di proporre eventuali miglioramenti. Le indicazioni di Protche furono per una linea che seguiva le valli del Setta e del Bisenzio, ricollegandosi alla linea esistente presso Sasso Marconi e Prato; l'attraversamento dell'Appennino sarebbe stato realizzato mediante una grande galleria di 18.032 m, con valico a 328 m slm, che consentiva di ottenere pendenze massime del 12 per mille.

Nel 1902 veniva istituita dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici un'apposita Commissione per esaminare i diversi studi fino ad allora presentati. Veniva scelto il progetto Protche in quanto rispondente maggiormente alle esigenze della linea, per le caratteristiche di pendenza e per la maggiore stabilità dei terreni attraversati.

La commissione ministeriale, presieduta dal senatore Ing. G. Colombo, non si limitò all'individuazione del progetto Protche, ma ne studiò alcune soluzioni di dettaglio pervenendo alla segnalazione di quella ottimale.

Nel 1908, sulla base della relazione della Commissione Colombo, il Governo, con la legge n. 444/1908, disponeva l'esecuzione di studi definitivi su tale progetto autorizzando una spesa di 150 milioni di lire per la costruzione della "Direttissima" Bologna - Firenze.

In realtà i lavori di costruzione iniziarono solo nel 1913, ma assai lentamente e in maniera discontinua, a causa del conflitto mondiale e delle successive vicende che contrassegnarono quel periodo di profondo turbamento della vita nazionale. Si poté cominciare a lavorare con continuità solo dopo il 1921, cosicché la "Direttissima" poteva essere finalmente inau-

gurata nel 1934, con una spesa complessiva di £. 1.122.000.000, dei quali £. 460 milioni devoluti solo per la galleria dell'Appennino (vedasi grafico di spesa della "Direttissima" in fig. 1).

A distanza di un cinquantennio dall'entrata in servizio della "Direttissima" Bologna-Firenze, nuove istanze di potenziamento e soprattutto l'esigenza di adeguare il sistema ferroviario nazionale al modello europeo integrandolo in una rete continentale ad alta velocità, hanno portato allo sviluppo del progetto "Treno ad Alta Velocità". Tale progetto ridisegna il sistema ferroviario italiano sulla base del quadruplicamento delle linee con nuovi assi ad alta velo-

cità, che si sviluppano in direzione Est-Ovest lungo la direttrice padana e in direzione Nord-Sud lungo quella peninsulare. Per quest'ultima in particolare, la tratta Bologna-Firenze costituisce il maggior impegno progettuale e costruttivo.

Pur senza anticipare in questa breve ricostruzione storica i dettagli del progetto T.A.V. (Treno ad Alta Velocità), che saranno trattati nell'articolo che segue, si vuole qui ricordare che è del 1991 la costituzione della T.A.V. S.p.A., cui le Ferrovie dello Stato hanno dato in concessione la progettazione, costruzione e gestione, per un periodo di 50 anni, delle nuove linee. La T.A.V. ha quindi selezionato alcuni gruppi imprenditoriali, che, in qualità di General Contractor, si sono impegnati alla progettazione e costruzione di queste linee. In particolare, per la tratta Bologna-Firenze il General Contractor prescelto è stato il gruppo FIAT, che a sua volta ha affidato le attività di progettazione e costruzione alla Fiat Engineering S.p.A. e al CONSORZIO CAVET. Per la progettazione delle opere in sottoterraneo è stata scelta la Rocksoil S.p.A di Milano. Dalla consegna da parte della T.A.V. alla Fiat del progetto di massima del tracciato, avvenuta all'inizio del 1992, sono stati avviati lo studio d'impatto ambientale e la progettazione esecutiva delle opere. Sulla scorta di tali studi si è giunti all'individuazione di un tracciato posto più a Est dell'esistente e avente uno sviluppo complessivo di 78 km, di cui 73 km in galleria e 5 km all'aperto; la quota di valico è a 413 m slm. A conclusione di questa breve rassegna storica, si presenta il grafico, in fig. 2, che riporta l'evoluzione dei tracciati dalla "Porrettana" del 1864 all'attuale linea ad Alta Velocità. Esso sintetizza forse meglio di altre descrizioni i progressi tecnologici conseguiti e la qualità infrastrutturale di quest'ultima. Si fa notare che: mentre l'evoluzione tra la "Porrettana" e la "Direttissima" era consistita in una ottimizzazione altimetrica e planimetrica del tracciato (che aveva comportato una diminuzione della pendenza massima, un aumento dei raggi di curvatura e una diminuzione del percorso, consentendo, in definitiva, una maggiore velocità di percorrenza), nel caso della nuova linea ad Alta Velocità i parametri geometrici del tracciato sono rimasti simili a quelli della "Direttissima", ciò che cambia è la mentalità progettuale, che porta a tenere nel giusto conto i fattori ambientali, ricorrendo alla opzione sottoterranea quanto più è possibile, grazie allo sviluppo delle tecnologie costruttive.

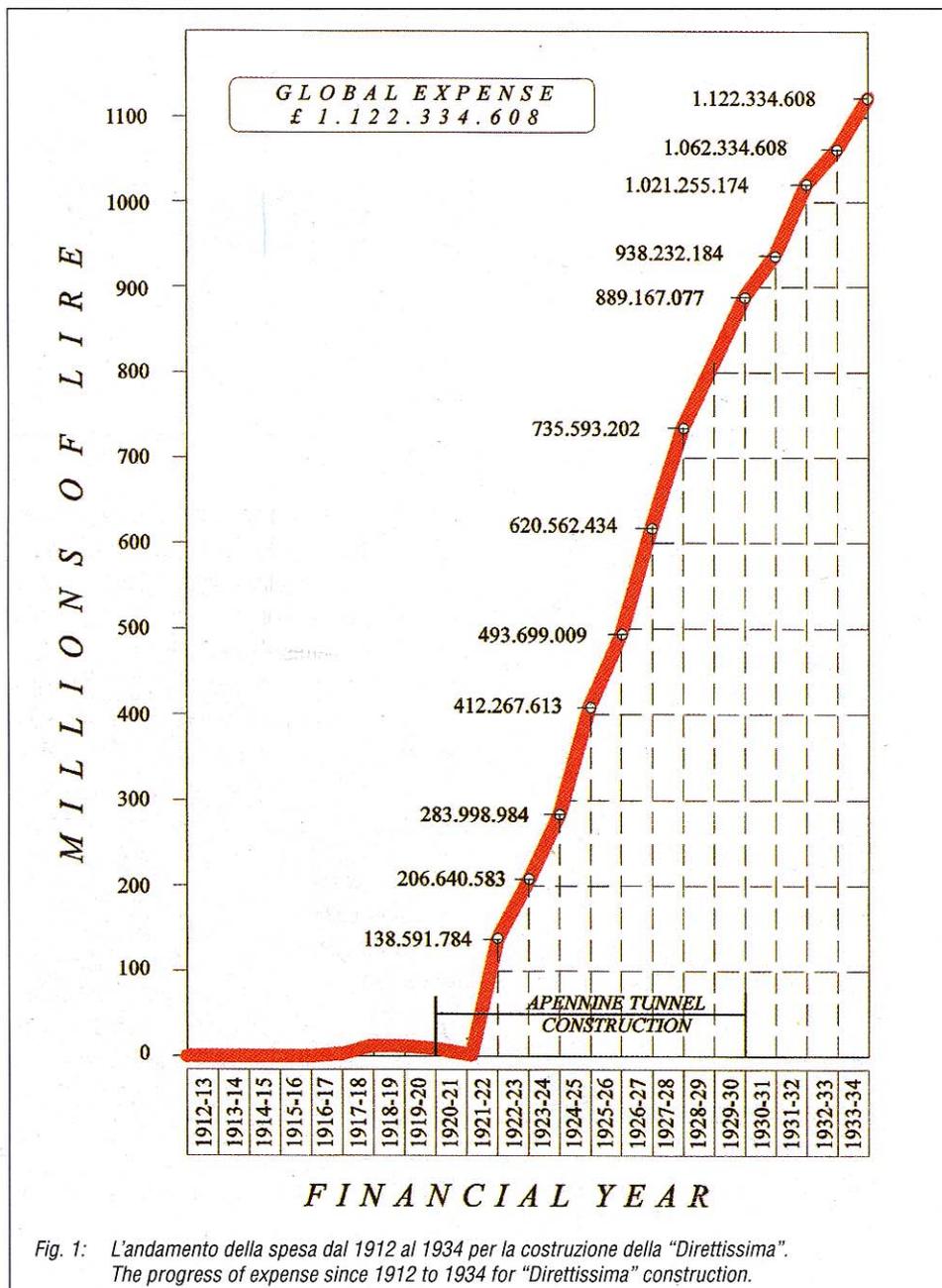
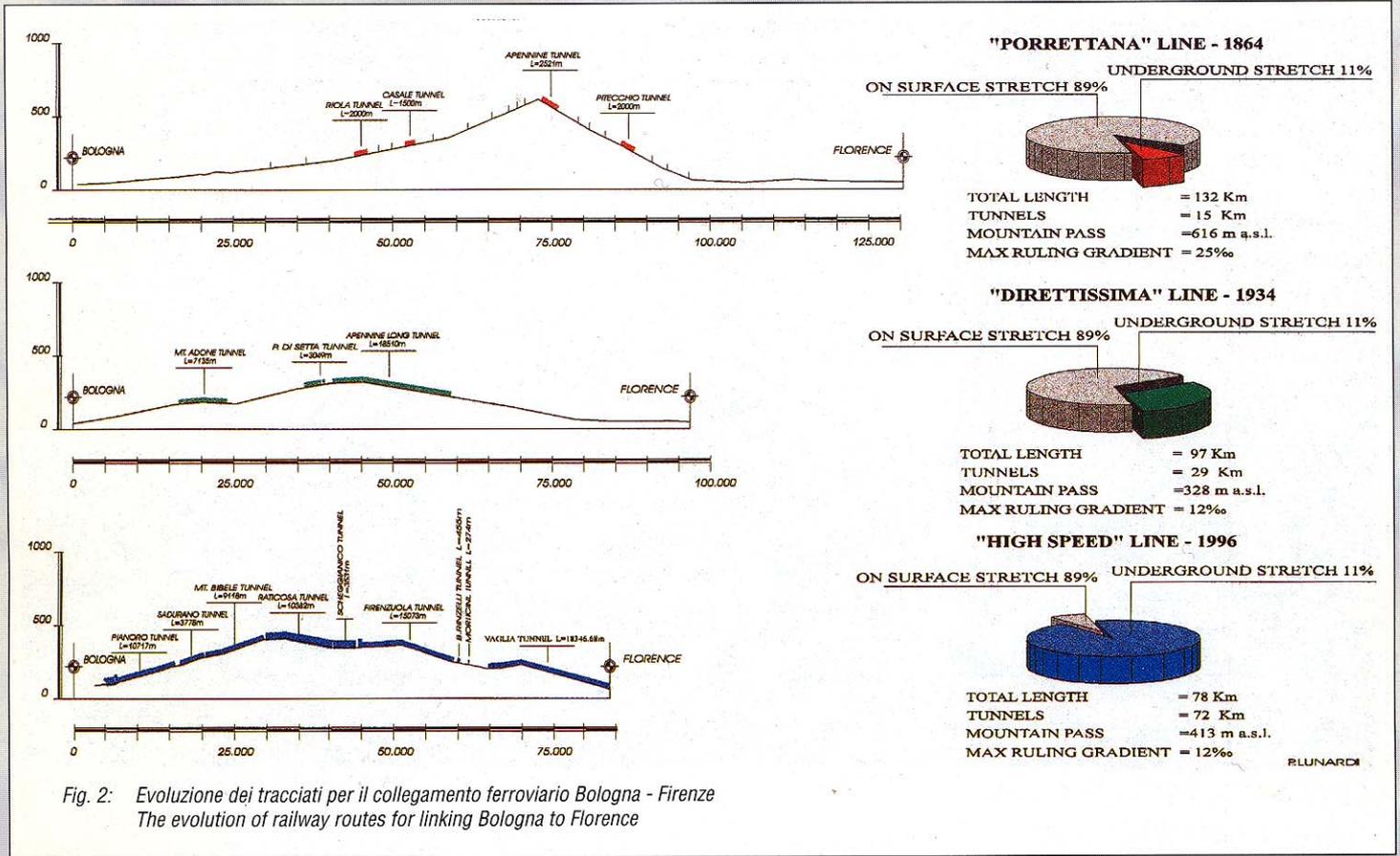


Fig. 1: L'andamento della spesa dal 1912 al 1934 per la costruzione della "Direttissima".
The progress of expense since 1912 to 1934 for "Direttissima" construction.

Bibliografia/References

- [1] "La "Direttissima" Bologna-Firenze", Ministero dei Lavori Pubblici, anno 1934



On the basis of the report produced by the Colombo Commission, in 1908 the government enacted Law No. 444/1908 which provided for final design specifications to be drawn up for the project and authorised expenditure of 150 million Lire for the construction of the Bologna to Florence "Direttissima" line. In actual fact construction work did not begin until 1913 and then very slowly with many interruptions due to the outbreak of the First World War. The "Direttissima" line finally went into service in 1934 for a total cost of 1,122,000,000 Lire of which 460 million was spent just on the tunnel under the Apennines (see graph on "Direttissima" costs (Fig. 1).

Half a century after the Bologna to Florence Direttissima went into service, new demands for improvement were made, demands above all to the bring railway system up to European standards and to integrate it in a continental "High Speed" network. This led to the development of the Treno ad Alta Velocità or "High Speed Train" project. This project redesigns the Italian railway system quadrupling the number of tracks on lines with new high speed routes in an East-West direction in the

Po Valley region and a North-South direction down the peninsula. The Bologna to Florence section constitutes the greatest design and construction commitment as far as the peninsula is concerned.

Without going into the details of the Treno ad Alta Velocità (T.A.V.) project in this brief history (they will be given later), it is worth recalling that the company T.A.V. S.p.a. was formed in 1991 and awarded, by the State Railways, the contract to design and construct the new lines as well as the concession to run them for a period of 50 years.

T.A.V. then selected various companies as general contractors to actually design and construct the lines. The general contractor chosen for the Bologna to Florence line was the FIAT group of companies which in turn subcontracted the work to the consortium CAVET and Fiat Engineering. The engineering consultants selected were Rocksoil S.p.a..

The general design specifications for the route were handed over to FIAT by T.A.V. at the beginning of 1992 and work then began on an environmental impact study and the final design spec-

ifications for the works. The outcome of these studies was a route further to the East of the existing line with a total length of 78 km., 73 of which in tunnels, 5 on the surface and a highest point of 413 metres above sea level.

This brief history concludes with the graph in figure 2 which shows the evolution of the route from the "Poretana" line in 1864 to the current High Speed line. It summarises perhaps better than other descriptions the technological progress and the improvement in the quality of the infrastructures which has been achieved. The improvements of the "Direttissima" over the "Poretana" consisted of optimising the geometry of the route with a reduction in the maximum gradient, an increase in the radii of curvature and a reduction in overall length, thereby resulting in shorter travelling times. While the geometry of the High Speed line is similar to that of the "Direttissima", what is different is the design mentality which takes due account of environmental factors and resorts to the underground option as much as possible thanks to the development of new construction technologies.

more extensive than

Pietro Lunardi Aspetti progettuali e costruttivi delle opere in sotterraneo

Conception et construction
des ouvrages souterrains

L'adozione di un innovativo approccio progettuale e costruttivo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli ha consentito di avviare i lavori di scavo delle gallerie della linea ad Alta Velocità tra Bologna e Firenze sulla base di un progetto completo e dettagliato, sottoscrivendo un contratto di tipo forfettario, con tempi e costi ben definiti.

L'adoption d'une approche innovante dans la conception et la construction des ouvrages souterrains fondée sur l'analyse des déformations contrôlées des roches et des sols a permis de mettre en place les travaux d'excavation des tunnels de la ligne Grande Vitesse entre Bologna et Florence sur la base d'un projet complet et détaillé, objet d'un contrat forfaitaire définissant les délais et les coûts.

1. Generalità

Il progetto prevede la realizzazione di nove gallerie naturali per uno sviluppo complessivo di circa 73 km. Sono inoltre previste 13 "finestre" per una lunghezza complessiva di 12 km. Le "finestre", oltre a servire come attacchi intermedi per le gallerie di maggior lunghezza (dai 10 ai 14 km) al fine di ridurre i tempi di esecuzione, serviranno, anche in fase di esercizio, come via di fuga in caso di emergenza. Per garantire la realizzazione dell'opera nei 78 mesi previsti dal contratto sono necessari circa 40 attacchi contemporanei, ciò richiede una mobilitazione di mezzi e di uomini tale da far risultare il cantiere uno dei più importanti attualmente in corso. La ridotta estensione dei tratti all'aperto, prevalentemente dell'ordine del centinaio di metri, realizzati per lo più in viadotto, fa sì che l'opera possa essere considerata come un'unica lunghissima galleria di 73 km. Tale, infatti, è stato l'inquadramento dato all'opera dai progettisti e tale sarà la sensazione del viaggiatore che percorrerà a 300 km/h la linea da Bologna a Firenze.

Il panorama geologico si presenta molto vario lungo il tracciato, si attraversa un'ampia varietà di ammassi, dalle formazioni flyschiodi alle argille e alle argilliti, fino ai terreni sciolti. Per far fronte a una situazione così eterogenea è prevista l'applicazione delle più moderne tecnologie, con particolare riguardo ai sistemi di consolidamento e rinforzo dei terreni ed ai "preconsolidamenti" (elementi strutturali di vetroresina, jet-grouting suborizzontale, pretaglio meccanico, pretunnel, ecc.) differenziati a seconda del tipo di terreno per rendere gli scavi sempre stabili in fase di avanzamento e consentire di adottare un'unica modalità di scavo e costruzione del tunnel.

La metodologia di avanzamento adottata, a "piena sezione", consente di conseguire il notevole vantaggio della industrializzazione delle lavorazioni, mentre nello stesso tempo la chiusura dell'anello strutturale con l'arco rovescio già a ridosso del fronte porta notevoli benefici nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine della galleria. Le ragguardevoli dimensioni dei tunnel ferroviari destinati all'Alta Velocità (circa 130-140 m² di sezione di scavo) richiedono di ricorrere a macchine di dimensioni notevoli e dotate di grande versatilità durante tutte le fasi di lavoro, in modo da soddisfare ogni esigenza progettuale e costruttiva che si presenterà nel corso dei lavori. A questo proposito è in studio, per realizzare in galleria la tratta più prossima a Firenze, una TBM (Tunnel Boring Machine) di dimensioni superiori a quelle fino ad oggi mai realizzate.

Tutte le tecnologie innovative sopra citate sono state

introdotte attraverso un'attenta e mirata progettazione che ha avuto come riferimento un nuovo approccio progettuale noto come Analisi delle DEformazioni COntrollate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS) [1], [2], [3], [4], [5].

Questo approccio, a cui si sono riferiti sin dall'inizio i progettisti di Fiat Engineering e Rocksoil e adottato già in buona parte dal manuale di progettazione ITALFERR, individua uno sviluppo logico di tutte le fasi progettuali e impone di studiare la galleria come problema a tre dimensioni e non solo come problema piano (come invece è sempre stato fatto in passato). La peculiarità delle opere in sotterraneo sta proprio nel fatto che l'opera per essere realizzata richiede l'asportazione del terreno e la messa in opera di interventi strutturali di rivestimento. Da come reagisce il terreno, a monte e a valle del fronte di scavo, all'azione combinata dell'avanzamento e della messa in opera delle opere di stabilizzazione dipende il comportamento a breve e a lungo termine della galleria. Pertanto chi progetta, sia nella fase di studio del comportamento del terreno allo scavo in assenza di interventi, sia in quella successiva di scelta e dimensionamento degli strumenti di stabilizzazione, deve riferirsi ad un problema a tre dimensioni in cui l'elemento centrale di studio è il nucleo di terreno al fronte di scavo.

Di seguito si riportano alcuni brevi cenni sull'Analisi delle DEformazioni COntrollate nelle Rocce e nei Suoli che costituisce la codifica dell'approccio di progetto sopra illustrato.

2. L'Analisi delle DEformazioni COntrollate nelle Rocce e nei Suoli

L'Analisi delle DEformazioni COntrollate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS) è un nuovo approccio progettuale e costruttivo la cui attendibilità si è definitivamente dimostrata nello scavo di gallerie in condizioni tenso-deformative particolarmente difficili, dove l'applicazione di altri metodi quali il NATM aveva dimostrato i propri limiti.

Questo nuovo tipo di approccio, partendo dalla semplice osservazione che il problema statico di una galleria in fase di avanzamento è assolutamente tridimensionale e non riducibile ad un semplice schema piano, giunge, sulla scorta dei risultati di oltre 25 anni di ricerche, alle seguenti conclusioni:

1. la stabilità di una galleria a breve e lungo termine dipende dalla formazione di un "effetto arco" nel terreno al contorno del cavo;
2. la formazione dell'effetto arco è segnalata dal tipo e dall'entità della risposta deformativa;

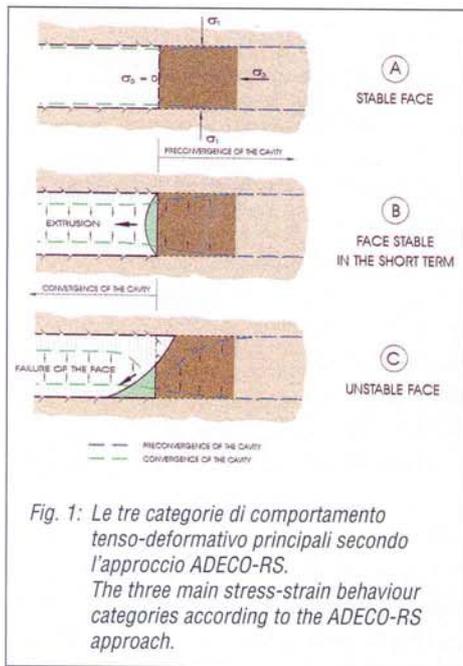


Fig. 1: Le tre categorie di comportamento tenso-deformativo principali secondo l'approccio ADECO-RS. The three main stress-strain behaviour categories according to the ADECO-RS approach.

- la risposta deformativa del terreno allo scavo si identifica nell'estrusione del nucleo di avanzamento al fronte di scavo ed evolve prima come pre-convergenza e poi come convergenza del cavo; in questo processo evolutivo quest'ultima rappresenta solo l'ultimo stadio del fenomeno;
- la risposta deformativa è condizionata dalla rigidità del nucleo d'avanzamento;
- la stabilizzazione di una galleria si persegue con azioni di precontenimento del cavo, oltre che di semplice contenimento.

Caratteristiche peculiari dell'approccio progettuale secondo l'Analisi delle DEformazioni COntrollate nelle Rocce e nei Suoli possono considerarsi: la possibilità di dare una risposta a tutte le situazioni geologico-geomeccaniche possibili indipendentemente dalla natura dei terreni, grazie ad un nuovo tipo d'inquadramento delle opere in sotterraneo [che fa riferimento a un unico parametro comune a tutti gli scavi, quale il comportamento tenso-deformativo del sistema "fronte di scavo - nucleo d'avanzamento" (fig. 1)] e all'introduzione del concetto di precontenimento del cavo e dei "sistemi conservativi"; la distinzione netta tra momento della progettazione e momento della costruzione di un'opera in sotterraneo, fondamentale per pianificare costi e tempi esecutivi, in quanto conduce ad una corretta impostazione del manuale di progettazione, del capitolato di costruzione e del manuale di controllo qualità. In particolare, il momento della progettazione si articola in (fig. 2):

una fase conoscitiva: durante la quale il progettista, in relazione ai terreni interessati dalla galleria, procede alla caratterizzazione del mezzo in termini di meccanica delle rocce e dei suoli, indispensabile per compiere l'analisi degli equilibri naturali preesistenti e per poter operare correttamente nella successiva fase di diagnosi;

una fase di diagnosi: durante la quale, sulla base degli elementi raccolti in fase conoscitiva, il progettista è chiamato a fare, per via teorica, previsioni attendibili riguardo alla risposta deformativa del mezzo all'azione dello scavo. Esse sono intese in termini di genesi, localizzazione, evoluzione ed entità dei probabili fenomeni che, in assenza di interventi di stabilizzazione, si innescherebbero al fronte di scavo e, di conseguenza, nella fascia di terreno al contorno del cavo. Dall'analisi combinata della risposta deformativa del sistema fronte di scavo - nucleo d'avanzamento e del cavo si deduce quale sarà il comportamento della futura galleria, per giungere, infine, ad una suddivisione della stessa in tratte a comportamento deformativo omogeneo nell'ambito delle tre categorie di comportamento fondamentali (categoria A: fronte stabile, categoria B: fronte stabile a breve termine, categoria C: fronte instabile); una fase di terapia: durante la quale, a seguito delle previsioni fatte in fase di diagnosi, il progettista opera la scelta del tipo di azione da esercitare (precontenimento o semplice contenimento) e degli interventi necessari, nell'ambito delle tre categorie di comportamento A, B, C, per ottenere la completa stabilizzazione della galleria e la perfezione in termini di sistemi, cadenze e fasi di scavo. Viene quindi definita la composizione delle sezioni tipo longitudinali e trasversali dimensionandole e verificandone l'efficacia attraverso gli strumenti del calcolo numerico.

Il momento della costruzione comprende:

una fase operativa: durante la quale si realizza l'avanzamento della galleria mettendo in opera, secondo le previsioni progettuali, gli strumenti di stabilizzazione, adattandoli in termini di contenimento e precontenimento alla reale risposta deformativa dell'ammasso e controllandoli secondo prestabiliti piani di controllo qualità;

una fase di verifica: in cui, mediante la lettura e l'interpretazione dei fenomeni deformativi (che sono la risposta del mezzo all'azione d'avanzamento), durante la costruzione dell'opera si verifica la correttezza delle previsioni fatte in fase di diagnosi e di terapia, onde perfezionare la messa a punto del progetto attraverso il bilanciamento degli strumenti di stabiliz-

zazione tra il fronte e il cavo. La fase di verifica non si esaurisce a galleria ultimata, ma va proseguita per tutto l'arco della sua vita allo scopo di controllarne costantemente la sicurezza d'esercizio.

Attraverso questa impostazione concettuale ed operativa, l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, mettendo a frutto le evidenze di uno studio approfondito della dinamica evolutiva dello scavo, offre ai progettisti una semplice guida per inquadrare l'opera in sotterraneo nell'ambito di tre categorie di comportamento fondamentali e giungere ad una suddivisione della stessa in tratte a comportamento deformativo omogeneo. Ad ogni tratta vengono poi associate sezioni tipo che prevedono sistemi di attacco ed opere di stabilizzazione, eseguite anche in fasi successive, per le quali si definiscono i costi ed i tempi esecutivi. L'introduzione dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli nei manuali e nei capitolati presenta allora, come immediata ed intuibile conseguenza, due aspetti principali:

- la valorizzazione del momento progettuale, in quanto il progettista è in grado di fornire le soluzioni tecniche adeguate prima dell'affidamento dei lavori;
- la programmazione economica delle opere in sotterraneo, che risulta assai più aderente alla realtà ed affetta da percentuali d'errore molto modeste. È quindi possibile, per la prima volta, un'attendibile programmazione dei costi e dei tempi esecutivi. Quanto affermato trova la propria dimostrazione nelle positive esperienze compiute negli ultimi vent'anni per la realizzazione di alcune gallerie progettate e costruite secondo l'ADECO-RS, dove l'impiego delle moderne tecnologie di meccanizzazione dell'avanzamento ha consentito di ottenere, anche in terreni in condizioni tenso-deformative difficili, eccellenti velocità d'avanzamento e, soprattutto, una marcata linearità della produzione (fig. 3), che è la migliore conferma della tesi: anche le gallerie, oggi, possono essere progettate come vere e proprie opere d'ingegneria.

3. Applicazione dell'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli alle opere in sotterraneo della linea ferroviaria ad Alta Velocità Bologna - Firenze

La procedura descritta dianzi è stata applicata alla progettazione esecutiva delle gallerie della linea ad Alta Velocità Bologna - Firenze. Nei paragrafi seguenti

- of the phenomenon;
- 4. the deformation response is conditioned by the rigidity of the advance core;
- 5. the stabilisation of a tunnel is achieved by pre-confinement in addition to simple confinement action;

The distinguishing features of the ADECO-RS approach are as follows:

the capability of providing an answer to all possible geological and geomechanical conditions thanks to a new way of viewing underground works (which employs a single parameter, the stress strain behaviour of the face-advance core system (fig. 1), common to all excavations) and to the introduction of the concept of pre-confinement of the cavity and of the "conservation systems";

a clear distinction between the design "moment" and the construction "moment" of underground works, fundamental for planning construction times and costs since it leads to a proper framework for the design manual, the construction specifications and the quality control manual.

The design "moment" consists of (fig. 2):

a survey phase: in this phase the design engineer characterises the medium (the ground through which the tunnel passes) in terms of its rock and soil mechanics; this is indispensable for an analysis of existing natural equilibriums and to be able to perform the subsequent diagnosis phase;

a diagnosis phase: in this phase the design engineer is called upon to employ theoretical means to make reliable predictions of the deformation response of the medium to the action of excavation on the basis of the results of the preceding survey phase. The predictions are understood as being in terms of genesis, localisation, evolution and entity of the probable phenomena which would be triggered at the face and as a consequence in the band of ground around the cavity in the absence of stabilisation intervention. The behaviour of the future tunnel is deduced from the combined deformation response of the face-advance core system and the cavity. Finally the future tunnel is divided into uniform sections each having the same deformation behaviour on the basis of three fundamental behaviour categories (category A: stable face, category B face stable in the short term and category C: unstable face);

a therapy phase: in this phase, given the predictions from the preceding phase, the design engineer decides the type of action to exert (preconfinement or simple confinement) and the necessary intervention, in terms of the three behaviour types, required

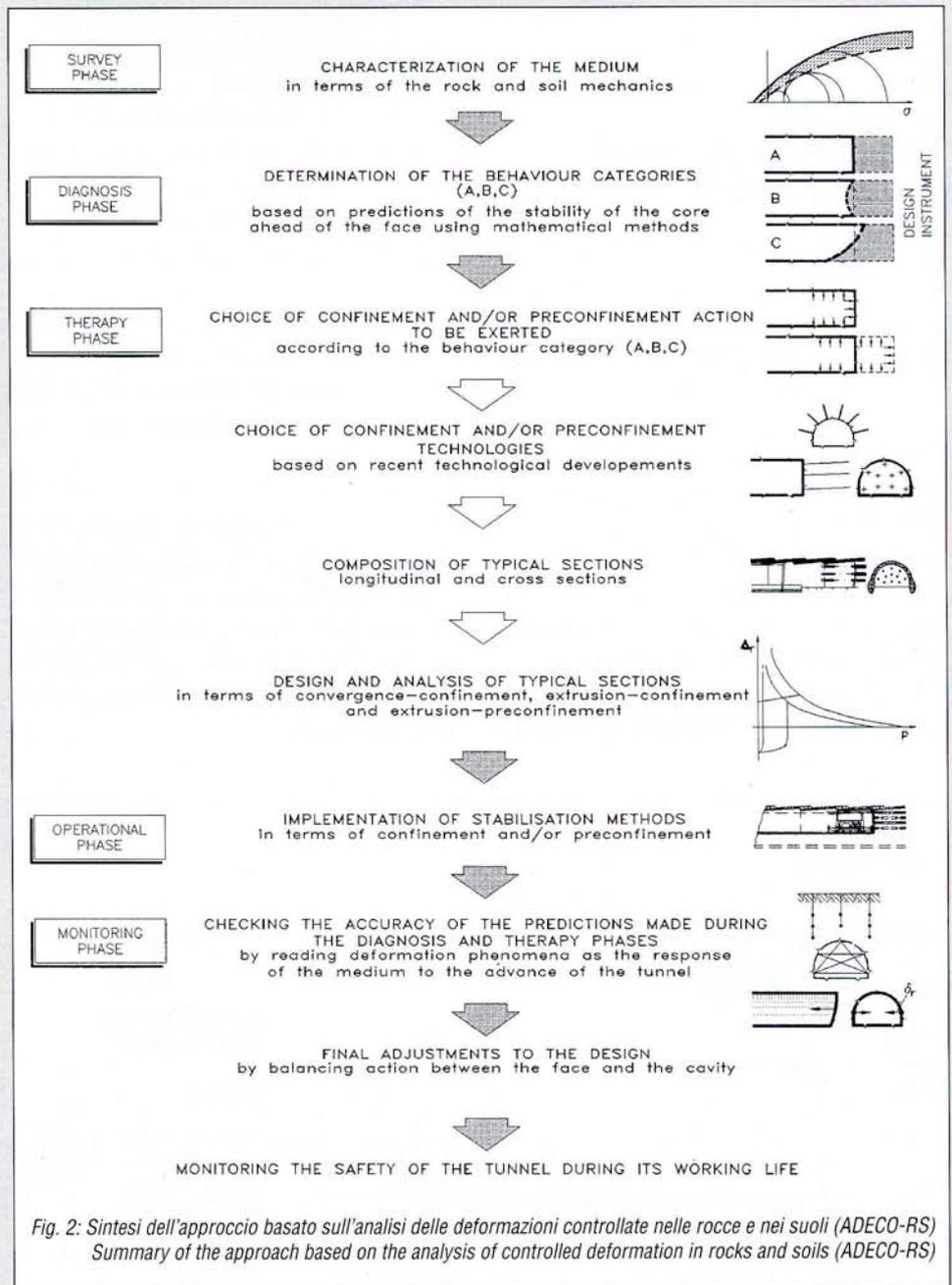


Fig. 2: Sintesi dell'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (ADECO-RS) Summary of the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS)

to achieve complete stabilisation of the tunnel and then perfects this with regard to excavation systems, stages and schedules. The composition of the longitudinal and transverse sections is then defined, designing them and testing their effectiveness using mathematical tools.

The construction moment consists of:

an operational phase: in this phase tunnel advance is performed employing the means of stabilisation selected according to the design, adapting it in terms of design, confinement and preconfinement to the actual deformation response of the ground and mon-

itoring it according to set quality control plans; a monitoring phase: in this phase, deformation phenomena (the response of the medium to the action of tunnel advance) are measured and interpreted during construction and compared to design forecasts made in the diagnosis and therapy phases in order to perfect and "fine tune" the design by adjusting the balance of stabilisation tools between the face and the cavity. The monitoring phase does not end with the completion of the works but continues during the entire life of the tunnel to constantly monitor safety during operation.

With this conceptual and operational perspective, the

si fornisce una descrizione di dettaglio del momento progettuale articolato nelle fasi previste dalla procedura.

3.1 Fase conoscitiva: Caratterizzazione geologico-geotecnica del tracciato

Lo sviluppo del progetto esecutivo delle gallerie del tracciato ferroviario ad Alta Velocità tra Bologna e Firenze ha evidenziato un'elevata complessità della natura geologico-geomeccanica dei terreni attraversati. Le campagne geognostiche integrative per le varianti al tracciato e per l'ottimizzazione del progetto esecutivo hanno permesso una più puntuale e dettagliata ricostruzione geologico-geomeccanica dei terreni interessati dallo scavo delle gallerie (fig. 4).

La presenza di un quadro geologico alquanto articolato e variabile ha suggerito l'opportunità di finalizzare l'acquisizione dei dati della campagna geognostica in corso d'opera alla ricostruzione di:

- un modello stratigrafico-sedimentologico delle principali formazioni sedimentarie (Sinclinale bo-

lognese, Molassa di Loiano, Formazione di Bismantova, Formazioni di Monghidoro, Marnoso-Arenacea e di M. Senario);

- un modello tettonico-strutturale del settore toscano e in particolare della zona del valico della Raticosa e del M. Senario (Sillano);
- un modello stratimetrico delle principali formazioni flyschoidi a cui fare riferimento nella fase di parametrizzazione degli ammassi rocciosi;
- un modello idrogeologico di tutto il tracciato al fine di comprendere l'entità dell'interferenza dell'opera in sotterraneo con gli equilibri idrici ipogei, sia in fase di costruzione che a lungo termine.

Nell'ambito di questi punti e per una completa caratterizzazione geomeccanica, si è considerato necessario enfatizzare la cura riposta nelle operazioni di campionamento e di sperimentazione in sito e in laboratorio dei terreni meno resistenti presenti nelle successioni sedimentarie e di quelli meno permeabili, al fine di arrivare ad una parametrizzazione il più realistica possibile.

L'espletamento degli studi e delle indagini sopra descritti ha permesso l'ottimizzazione delle procedure progettuali al fine di ridurre l'alea tradizionalmente connessa ai lavori in sotterraneo.

Al termine di detti studi, per ogni formazione o gruppo di formazioni aventi caratteristiche geologico-geomeccaniche simili, si sono attribuiti i principali parametri geomeccanici, in termini di resistenza e deformabilità, da assumere nelle successive analisi numeriche sul comportamento dell'ammasso allo scavo, in assenza di interventi (fase di diagnosi) e a seguito dell'applicazione degli strumenti di stabilizzazione individuati per garantire le condizioni di stabilità del tunnel a breve e a lungo termine (fase di terapia).

3.2 Fase di diagnosi: previsione del comportamento degli ammassi rocciosi e dei terreni allo scavo

In questa fase si sono fissati i criteri omogenei ed univoci che consentissero di schematizzare il tracciato (certamente caratterizzato da differenti proble-

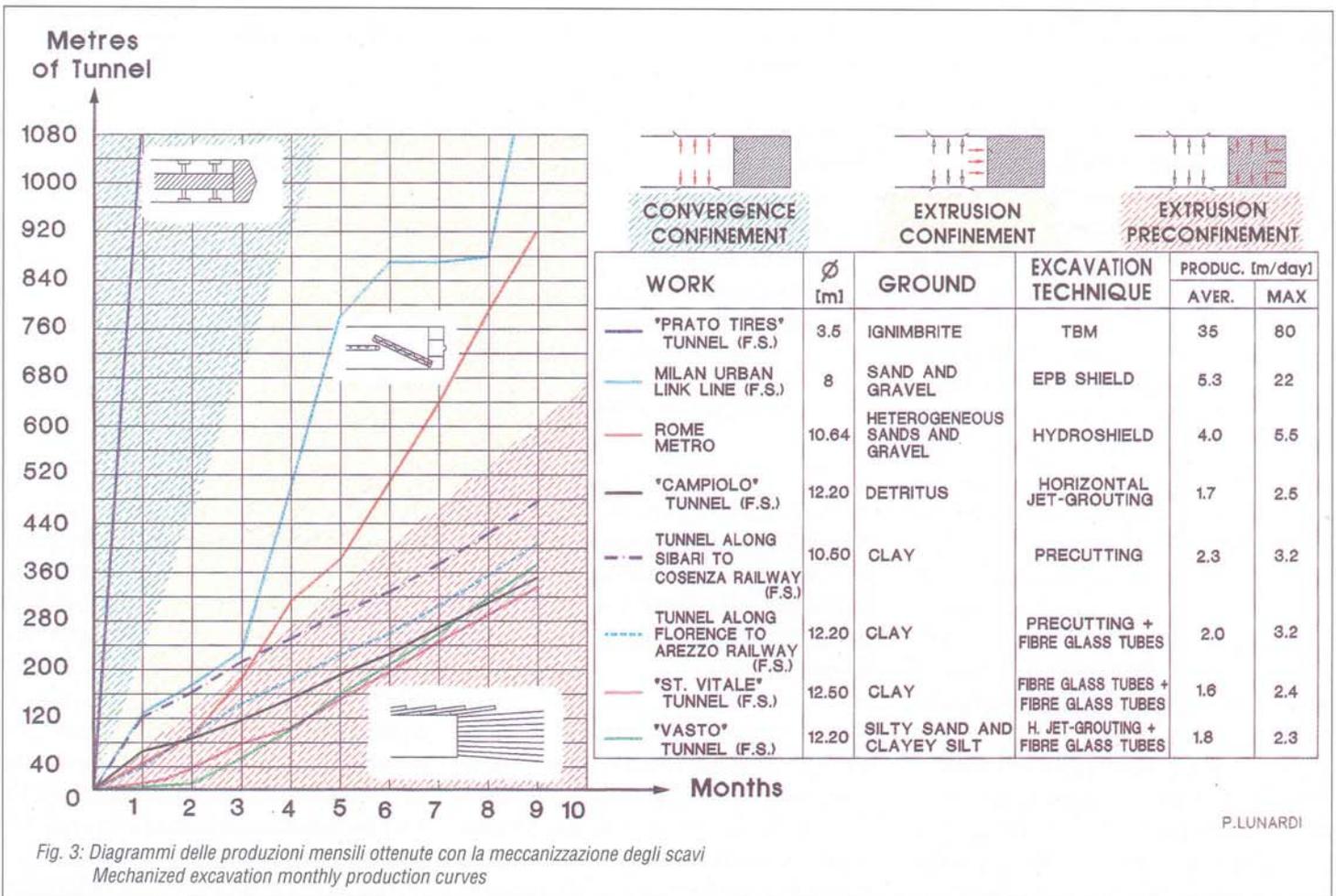


Fig. 3: Diagrammi delle produzioni mensili ottenute con la meccanizzazione degli scavi
Mechanized excavation monthly production curves

P.LUNARDI

approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils exploits the results of a detailed study of the dynamics over time of the excavation to provide design engineers with a simple guide to the classification of underground works in terms of the fundamental behaviour categories so that a tunnel can be divided into sections each having a uniform behaviour. A specific type of design section is then assigned to each length of tunnel involving specific excavation systems and stabilisation methods in subsequent stages and the construction times and cost of these for the underground works are calculated. The introduction of the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils into manuals and specifications possesses as an immediate and foreseeable consequence, two important aspects:

- a) the value assumed by the design moment, because the design engineer is able to furnish adequate technical specifications before construction commences;
- b) the financial planning of the underground works,

which adheres very much more closely to reality and is subject to very small percentage errors. Thus for the first time reliable planning of construction times and costs is possible.

What is claimed has been demonstrated by the positive recent experiences in the design and construction of tunnels according to the ADECO-RS approach in which the use of modern mechanisation technology produced excellent and above all decidedly constant advance rates (fig. 3) even in ground with difficult stress-strain conditions. This is the best possible confirmation of the belief that today even tunnels can be designed as genuine works of engineering.

3. Application of the Analysis of Controlled DEformation in Rocks and Soils to the underground works on the Bologna to Florence High Speed railway line.

The procedure described above was followed for the final design of the tunnels on the Bologna to Flo-

rence High Speed line. A detailed description of the design moment performed in the phases prescribed by the procedure is given below.

3.1 The survey phase: geological and geotechnical characterisation of the route

The work on the final design of the tunnels on the route of the line showed that the geological and geomechanical nature of the ground concerned was highly complex. The additional geological survey campaigns for the changes to the route and for optimisation of the final design made it possible to reconstruct the geology and geomechanics of the route more accurately and thoroughly (fig. 4).

The extremely complex and varied geology suggested that it would be best to set the objectives of the survey campaign as follows:

- the construction of a model of the stratigraphy and sedimentology of the main sedimentary formations (Bolognese sinclinal, Molassa di Loiano, Bismantova, Monghidoro, Marnoso-Arenaceo, M.

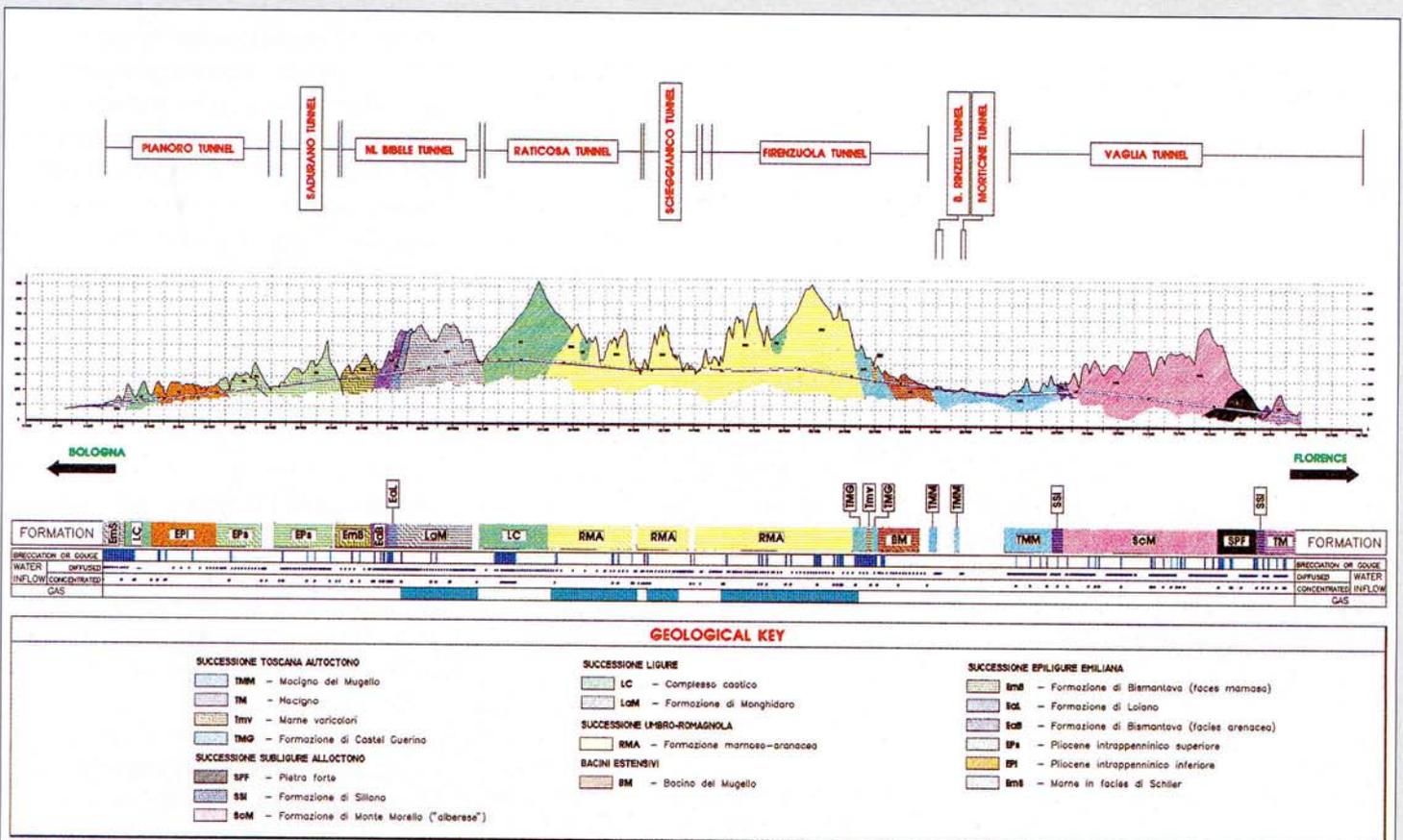


Fig. 4: Linea ferroviaria ad Alta Velocità Bologna-Firenze: profilo geologico longitudinale. Bologna to Florence High Speed Railway Route: longitudinal geological section.

matiche di tipo geomeccanico, idrogeologico, tensionale, ecc.) in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo.

Ad eccezione delle tratte di imbocco e per le tratte a bassa copertura, per individuare, in funzione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi e degli stati tensionali in gioco (coperture), il tipo di comportamento del fronte e del cavo, si è ricorso al metodo delle "linee caratteristiche". Con riferimento

a quanto indicato dal manuale di progettazione di ITALFERR si è quindi proceduto ad individuare lungo tutto il tracciato le tratte in cui:

il nucleo al fronte ed il cavo risultano stabili; ovvero dal calcolo con le linee caratteristiche sia il nucleo di terreno al fronte che l'ammasso al contorno del cavo risultano sollecitati in campo elastico; il nucleo al fronte risulta stabile a breve termine ed il cavo instabile; dalla figura 5 si vede come nel

caso B sia il nucleo che il cavo risultano sollecitati in campo elastoplastico;

il nucleo al fronte ed il cavo risultano instabili; è il caso in cui la linea del nucleo non incontra quella della cavità presso il fronte o la incontra con delle deformazioni incompatibili con le caratteristiche residue del terreno interessato.

Da questa analisi è risultato che il 27% del tracciato si sviluppa entro ammassi che all'atto dello scavo rimangono sollecitati in campo elastico, il 53% sarà prevedibilmente interessato da fenomeni deformativi che evolveranno in campo elastoplastico richiedendo interventi immediati di contenimento al contorno del cavo, infine circa il 20% del tracciato sarà caratterizzato da evidenti fenomeni d'instabilità già al fronte di scavo che dovranno essere risolti a monte del fronte stesso per portare artificialmente la situazione verso la stabilità.

3.3 Fase di terapia: individuazione degli interventi stabilizzazione; compilazione delle sezioni tipo e loro distribuzione lungo il tracciato

Sulla base delle analisi condotte nella precedente fase di diagnosi, per ogni tratta definita a comportamento tenso-deformativo omogeneo, tenendo conto tra l'altro delle caratteristiche idrogeologiche, mineralogiche e quindi reologiche, si sono individuati gli interventi ritenuti più idonei per risolvere le principali problematiche statiche, e costruttive.

Nella figura 6 sono riportate le sezioni tipo principali (ovvero prevalenti), raggruppate in funzione delle categorie di comportamento riferite alla stabilizzazione del fronte di scavo.

Per ogni tratta omogenea sono state quindi individuate una o più sezioni tipo adeguate alle prevedibili condizioni dell'ammasso e, per ognuna, il campo di variabilità delle deformazioni attese (estrusioni, convergenze), a seguito della loro applicazione.

Oltre alle sezioni tipo principali si sono progettate delle sezioni tipo "derivate", da applicare in concomitanza di situazioni statisticamente probabili, la cui ubicazione, però, non è prevedibile sulla base dei dati a disposizione.

Sezioni tipo principali e sezioni tipo "derivate" sono comunque definite in maniera univoca in quanto per ognuna, oltre ad essere descritti dettagliatamente la tipologia, l'intensità, le fasi e le cadenze di messa in opera degli interventi, sono anche individuate con chiarezza le condizioni geologico-geomeccaniche e tenso-deformative (estrusioni e con-

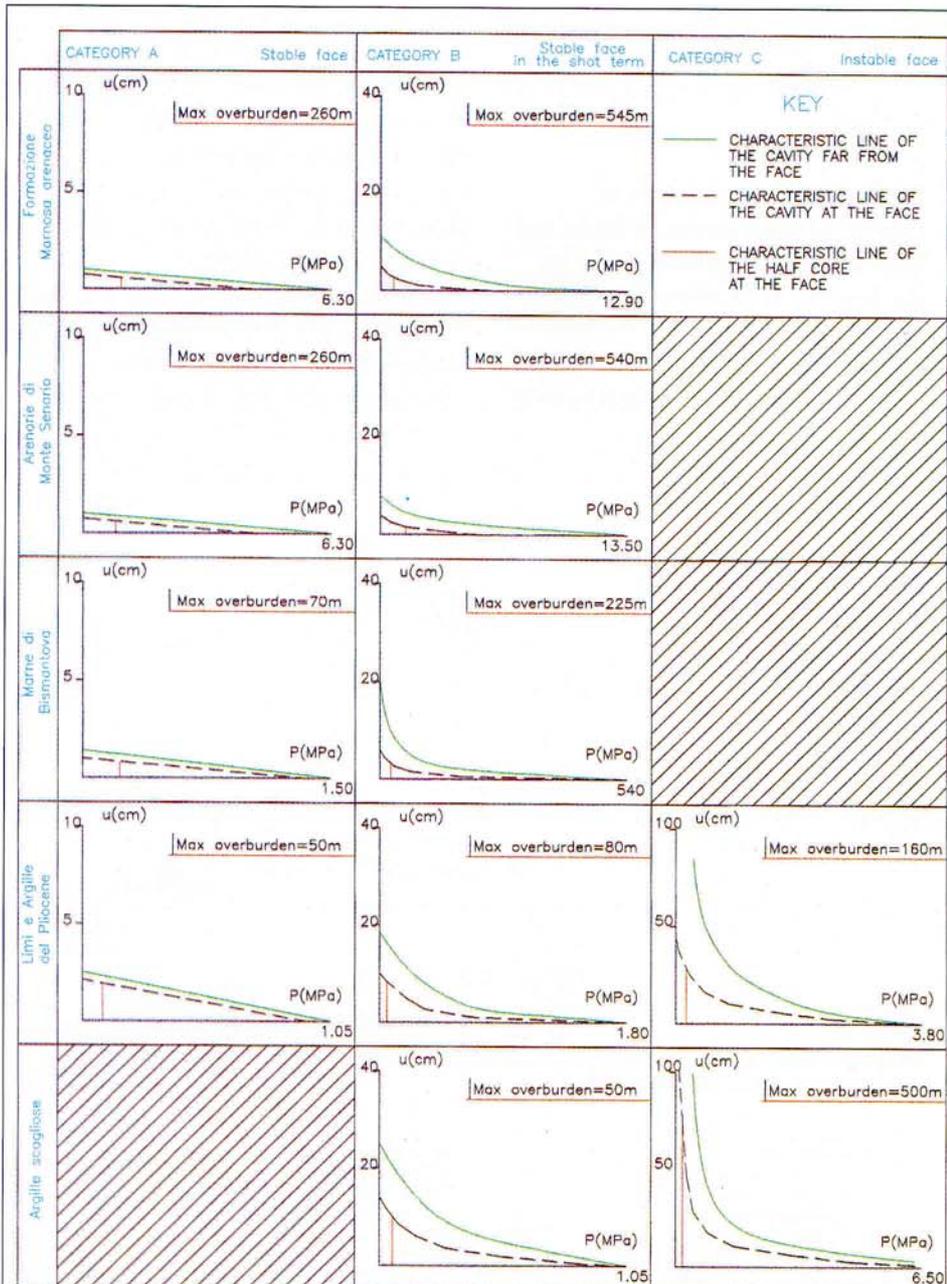


Fig. 5: Previsioni di comportamento tenso-deformativo delle gallerie da scavare per il collegamento ferroviario ad Alta Velocità Bologna-Firenze. Predictions of the stress-strain behaviour of tunnels to be excavated for the Bologna to Florence High Speed Railway Route.

Scenario);

- a structural-tectonic model of the Tuscan sector and in particular of the Raticosa pass and M. Senario (Sillario) zones;
- a model of the strata of the main flyschoid formations for use in calculating the parameters of the rock masses;
- a hydrogeological model of the entire route for an understanding of the entity of the interference of the underground works with subterranean hydrological equilibriums both during construction and in the long term.

For these objectives and for a complete geomechanical characterisation, it was felt necessary to take great care with operations involved in sample taking and in situ and laboratory experiments on the weaker grounds present in the sedimentary layers and on the less permeable grounds in order to obtain parameters that were as realistic as possible.

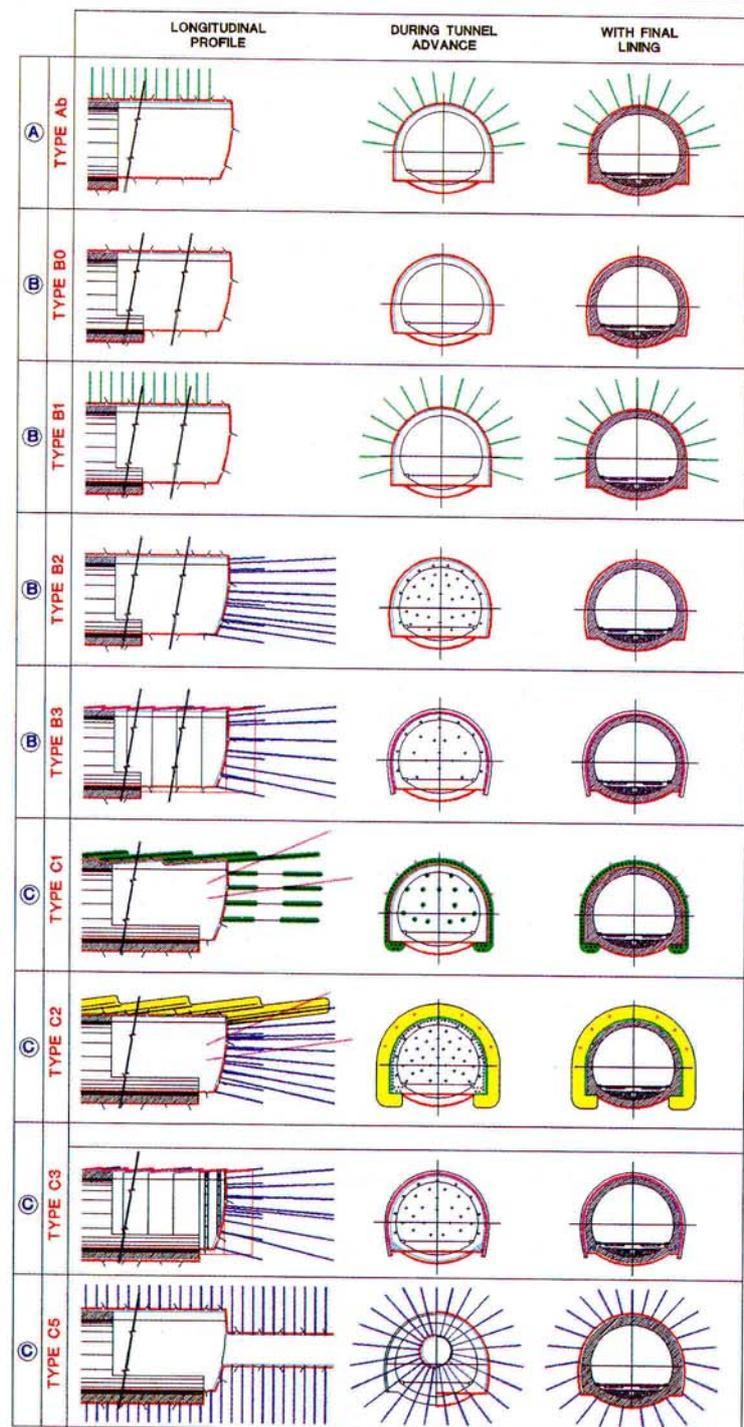
The surveys and studies described above allowed design procedures to be optimised and the uncertainty traditionally connected with underground works to be reduced.

On conclusion of these studies the main geomechanical parameters in terms of strength and susceptibility to deformation were attributed to each formation or group of formations with similar geological and geomechanical characteristics. These parameters were then used as the assumptions for subsequent mathematical analysis of the behaviour of the ground in response to excavation in the absence of stabilisation intervention (diagnosis phase) and then following the application of the stabilisation tools selected to ensure tunnel stability in the short and long term (therapy phase).

3.2 Diagnosis phase: prediction of the behaviour of the rock and soil masses in response to excavation

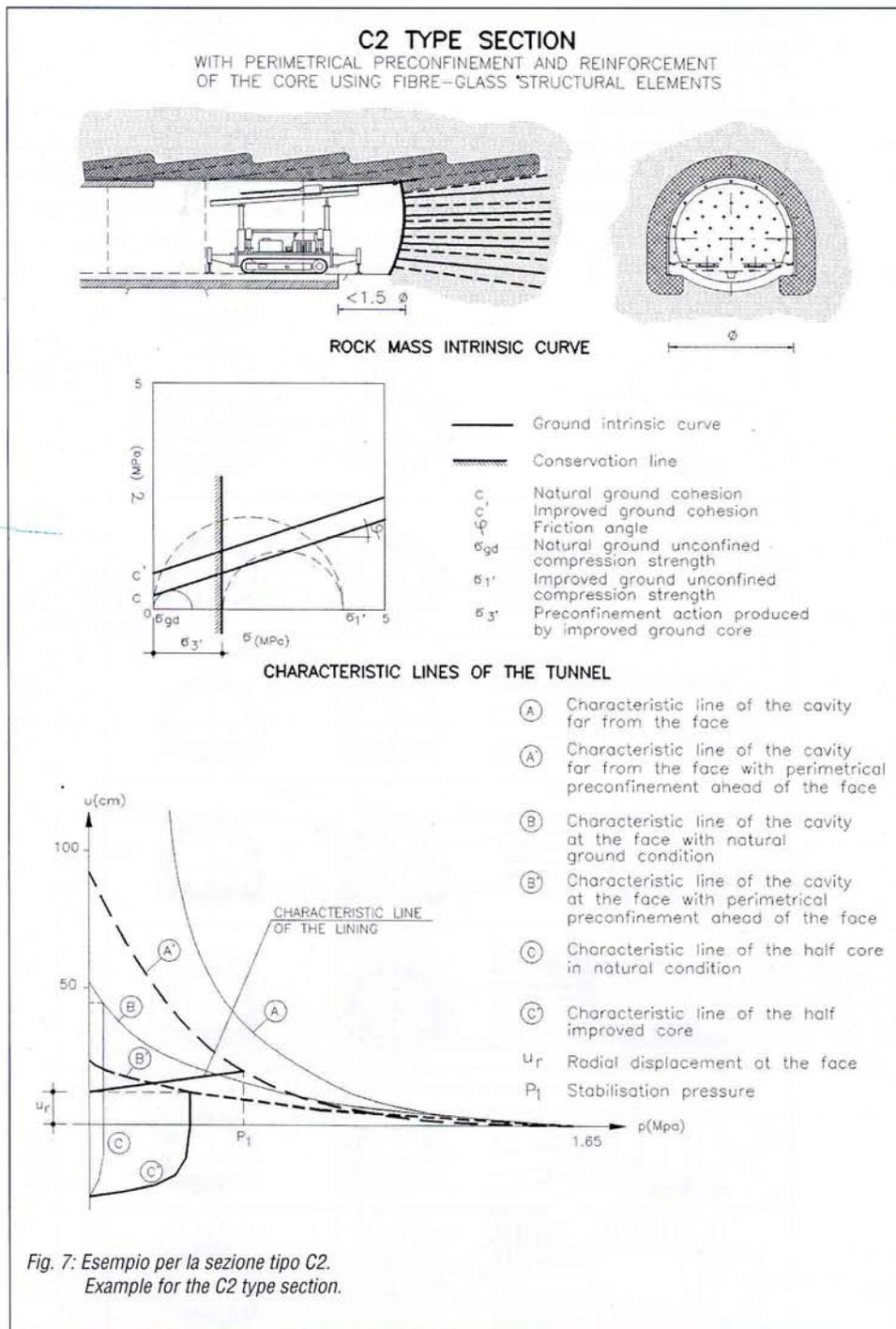
In this phase we fixed uniform and standard criteria with which to divide the route (very definitely characterised by very different geomechanical, hydrogeological and stress problems) into sections having the same stress-strain behaviour.

Except for the portal sections and for those with a shallow overburden, resort was made to the "characteristic line" method to identify the type of behaviour of the face and the cavity which depended on the geomechanical characteristics of the rock masses and the stress states in play (overburdens). Following the procedures laid down in the ITALFERR de-



KEY	
[Red line]	Excavation outline
[Blue line]	Shoot-crete
[Green line]	Steel arches
[Black dot]	Bolts
[Blue line]	Glass-fibre elements
[Red line]	Drainages
[Grey area]	Final lining
[Black area]	Invert
[Pink area]	Mechanical precutting
[Green area]	Horizontal jet-grouting
[Yellow area]	Ground improvement around the cavity

Fig. 6: Le sezioni tipo longitudinali e trasversali previste per le gallerie da scavare per il collegamento ferroviario ad Alta Velocità Bologna-Firenze.
The types of longitudinal and cross sections designed for the tunnels to be excavated for the Bologna to Florence High Speed Railway Route.



vergenze) entro le quali la sezione deve essere applicata.

Nella figura 7, a titolo esemplificativo, sono riportate, la sintesi di tutte le valutazioni connesse all'applicazione di una sezione tipo C nei terreni da semicoerenti a incoerenti. In generale si sottolinea come per ogni formazione siano ammessi solo determinati interventi ritenuti adeguati alle caratteristiche dell'ammasso roccioso o del terreno. Si evidenzia inoltre la

necessità di individuare la posizione, rispetto al fronte di scavo, in cui devono essere posti in opera i diversi interventi strutturali (preconsolidamento, prerinvestimento, arco rovescio, ecc.) che vanno a comporre la sezione finale del tunnel (fig. 8). Viene riportato poi come possa essere valutato l'effetto del consolidamento sul piano di Mohr. Infine si evidenzia come, attraverso le linee caratteristiche della cavità e del nucleo, si possano calcolare le pressioni di sta-

bilizzazione del cavo necessarie a garantire la stabilità a lungo termine dell'opera.

3.4 Fase di verifica: progetto di monitoraggio in corso d'opera ed in fase di esercizio

La particolarità e l'importanza dell'opera hanno imposto un accurato programma di monitoraggio sia in corso d'opera che in fase di esercizio.

In corso d'opera saranno monitorati: i fronti di scavo delle gallerie attraverso sistematici rilievi geomeccanici degli ammassi presenti al fronte di scavo. I rilievi, condotti secondo gli standard dell'ISRM, serviranno ad avere un primo riferimento sulle caratteristiche dell'ammasso, da confrontare con quelle previste in sede di progetto; il comportamento deformativo del fronte. Sono previste, in funzione delle diverse categorie di comportamento, misure dell'estrusione del fronte sia superficiali che profonde. Quelle superficiali saranno condotte con sistemi ottici di precisione attraverso l'applicazione di 6-9 mire topografiche sul paramento del fronte di avanzamento, che verranno lette durante le soste delle operazioni di avanzamento, ad esempio in concomitanza dell'esecuzione dell'arco rovescio o del preconsolidamento del fronte, quelle profonde con estrusometri introdotti longitudinalmente all'asse galleria per almeno 2 e letture sia a fronte fermo che in fase di avanzamento; il comportamento deformativo del cavo attraverso misure di convergenza. Le stazioni di convergenza sono previste ogni 30 m nelle tratte a comportamento tipo C, ogni 50 m nelle tratte a comportamento tipo B, ogni 100 m nelle tratte a comportamento tipo A; il comportamento tensionale dell'insieme ammasso-rivestimento attraverso celle di pressione da collocare al contatto terreno-rivestimento e all'interno del rivestimento stesso, sia quello di prima fase che quello definitivo. Tutte le celle di pressione saranno provviste di sistemi di acquisizione automatici che verranno mantenuti in fase di esercizio.

In fase di esercizio saranno collegati a sistemi di acquisizione automatica tutti gli strumenti già utilizzati in corso d'opera, la cui ubicazione è riportata nella figura 9.

In ogni momento della vita dell'opera il sistema di acquisizione potrà essere interrogato per ricevere i dati raccolti e verificare il comportamento reale della stessa, confrontandolo con quanto previsto in sede di progetto.

In corso d'opera i risultati del monitoraggio guide-

sign manual, the following sections were identified for the whole length of the route:

sections with the core at the face and the cavity stable; or in other words where calculation by the characteristic lines show that the core of ground at the face and the ground surrounding the cavity will be stressed in the elastic range;

sections with the face stable in the short term and the cavity unstable: it can be seen from fig. 5 that in category B both the core and the cavity are stressed in the elastic-plastic range;

sections with the core at the face and the cavity unstable; this is the case where the line for the core does not meet that of the face or where it is met with deformation that is incompatible with the residual characteristics of the ground concerned.

The results of this analysis showed that 27% of the route passed through ground which at the moment of excavation would remain stressed in the elastic range, 53% would probably be subject to deformation which develops in the elastic-plastic range and which needs immediate radial confinement inter-

vention around the cavity and finally that 20% of the route would be characterised by clear instability right at the face, a problem that would have to be solved ahead of the face itself by artificially creating conditions of stability.

3.3 The therapy phase: identification of the stabilisation methods; composition of the design section types and distribution of these along the route

On the basis of the analyses conducted in the diagnostic phase, the methods felt most appropriate for solving the main statics and construction problems were identified for each section defined as having the same stress-strain behaviour taking account of hydrogeological, mineralogical and therefore rheological characteristics.

Figure 6 shows the main types of design section grouped according to the categories of face behaviour.

For each section of tunnel belonging to the same stress-strain behaviour one or more design section types were identified appropriate for the forecast con-

ditions of the ground and, for each design section type, the range of variation for deformations (extrusions, convergences) expected after placing of it.

In addition to the main (or prevalent) design section types, some derived design section types were also identified to be used in situations that were statistically probable but the localisation of which could not be predicted on the basis of the available data.

The prevalent and derived design sections are in any case defined unequivocally in the sense that for each type not only are the type, intensity, stages and sequence of the construction operations described in detail, but the geological and geomechanical conditions in which the design section must be placed are also clearly identified.

For the sake of example, fig. 7 gives a summary of the all the factors considered in connection with the use of a type C design section in semi-cohesive and loose ground. In general, importance is given to allowing only determined methods felt appropriate for the characteristics of the rock mass or the ground to be used for each formation. It should also be noted that the position with respect to the face in

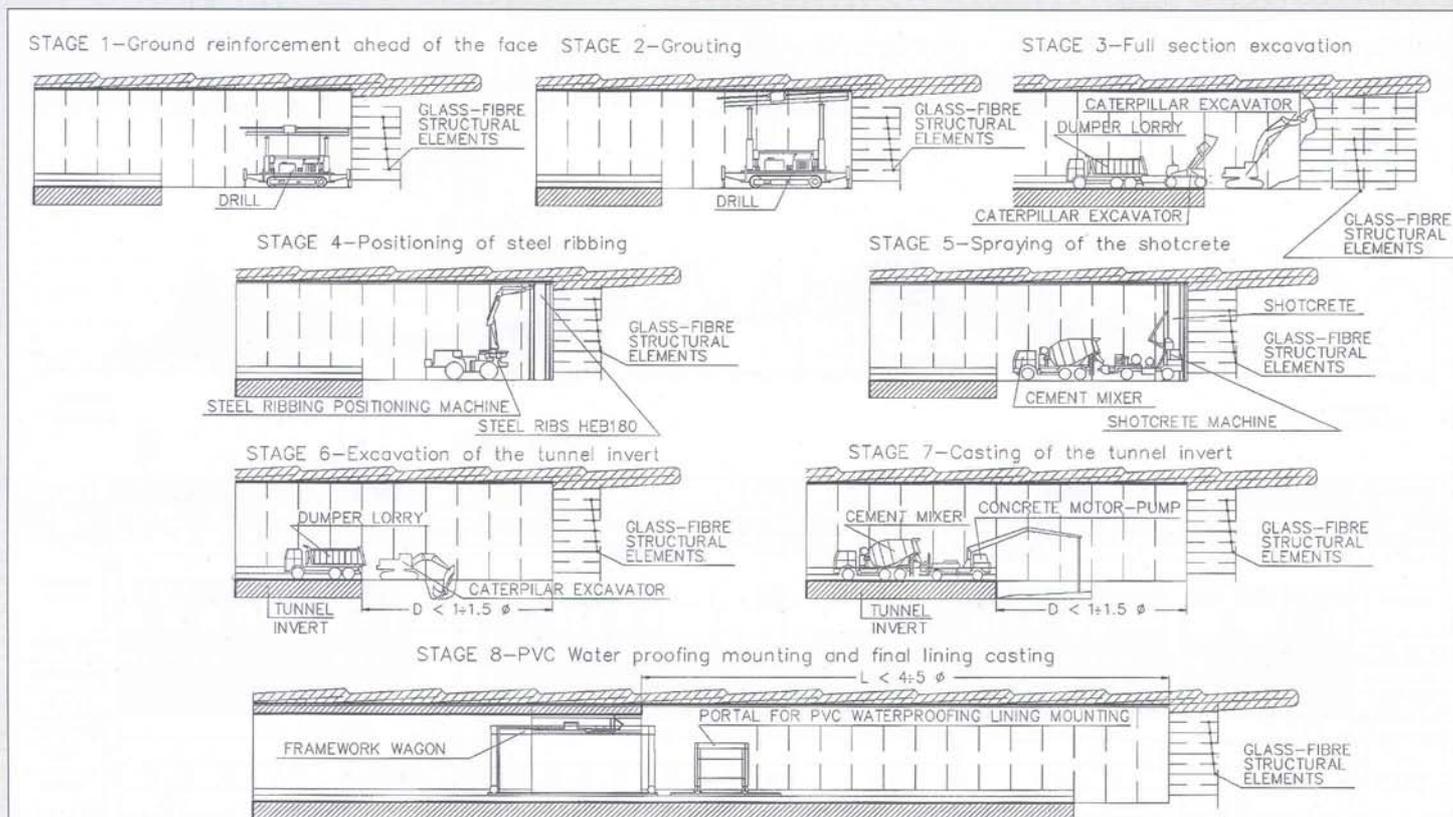


Fig. 8: Fasi costruttive per la sezione tipo C2. Construction stages for the C2 type section.

ranno Progettista, Direzione Lavori e Alta Sorveglianza nel decidere circa l'opportunità di proseguire con la sezione tipo principale prevista o eventualmente modificare alcune quantità di lavorazioni (secondo i criteri preindicati nel progetto) adottando una sezione tipo "derivata" (sempre comunque prevista dal progetto per la tratta in esame), oppure procedere alla progettazione di una nuova sezione tipo per far fronte a situazioni particolari non individuate in fase conoscitiva e quindi non previste nel progetto.

4. Conclusioni

L'adozione dell'approccio progettuale basato sull'Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS), in luogo dei consueti metodi osservazionali, ha consentito di avviare i lavori sulla base di un progetto completo e dettagliato, sottoscrivendo un contratto di tipo forfettario con tempi e costi ben definiti.

Nel complesso ed eterogeneo contesto geologico degli Appennini, particolarmente difficile da caratterizzare preventivamente anche attraverso indagini approfondite, il raggiungimento di tale obiettivo con

i metodi di progettazione e costruzione correnti sarebbe stato inimmaginabile.

Bibliografia/References

- [1] LUNARDI P., "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte prima: Presostegno e precontenimento", Quarry and Construction, marzo 1994
- [2] LUNARDI P. "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - Parte seconda: Ruolo e risultati della ricerca sperimentale", Quarry and Construction, marzo 1995
- [3] LUNARDI P., "L'importanza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie", Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 45 anno 1995
- [4] LUNARDI P. "Progetto e costruzione di gallerie secondo il metodo basato sull'analisi delle defor-

mazioni controllate nelle rocce e nei suoli" - Parte terza: Proposta del nuovo approccio. Quarry and Construction, aprile 1996

- [5] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works. The ADECO-RS Method", 6th European Forum on Cost Engineering, Milano, 13-14 maggio 1993

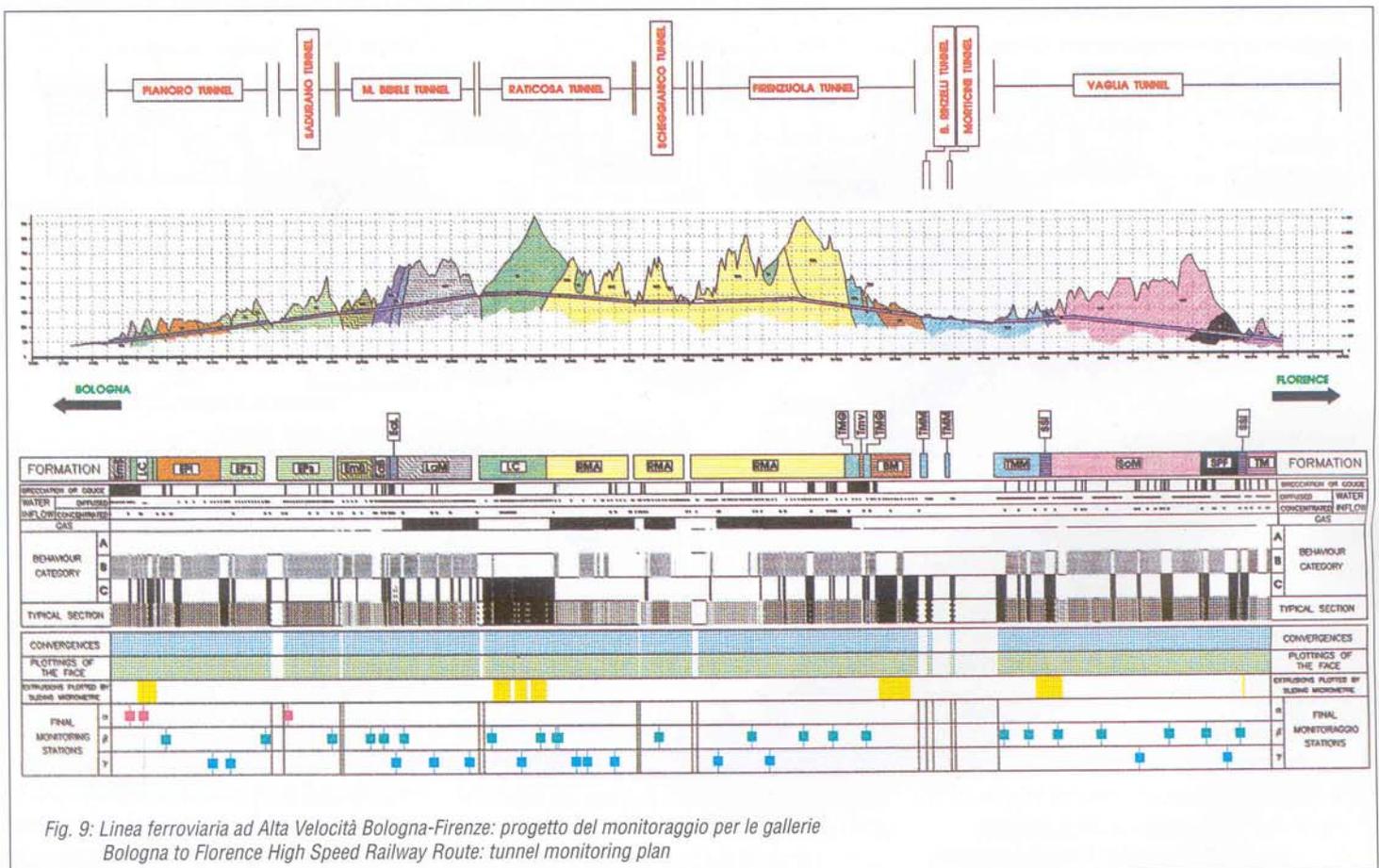


Fig. 9: Linea ferroviaria ad Alta Velocità Bologna-Firenze: progetto del monitoraggio per le gallerie Bologna to Florence High Speed Railway Route: tunnel monitoring plan