



Metodi innovativi per la costruzione di gallerie in rocce spingenti

Innovative tunnelling construction methods in squeezing rock

Prof. Ing. Giovanni BARLA^(*), Dott. Ing. Marco BARLA^(**)

SOMMARIO – Le recenti innovazioni nei sistemi di supporto per il controllo delle deformazioni stanno consentendo agli appaltatori di incrementare la velocità di avanzamento anche in difficili condizioni di scavo caratterizzate da ammassi rocciosi fortemente spingenti. Questi sistemi sono stati messi a punto e provati in gallerie nelle quali erano adottati sistemi di scavo convenzionali. La discenderia di Saint Martin La Porte appartenente al tunnel di base ferroviario Lione-Torino è presentata come caso di studio per illustrare alcune delle suddette innovazioni, applicate con successo nello scavo in ammassi spingenti quali la formazione del Carbonifero.

1. Introduzione

L'Europa sta sperimentando oggi una "Rinascita" nel settore delle opere in sotterraneo: si stanno costruendo nuove infrastrutture sotterranee e altre ne saranno realizzate, tra cui le metropolitane e altri sistemi di trasporto urbano, e si stanno migliorando strade ed autostrade esistenti.

Tuttavia, le sfide più significative nel settore delle gallerie sono probabilmente quelle associate alla realizzazione delle linee ferroviarie ad Alta Velocità. Di particolare importanza sono i nuovi attraversamenti delle Alpi, quali le gallerie di base ferroviarie, tra cui, in Svizzera, la recente galleria di base del Lotschberg, lunga 34 km, e la galleria del Gottardo, lunga 57 km, ancora in fase di costruzione. In Italia sono ormai quasi completate le gallerie della linea ferroviaria ad Alta Velocità tra Bologna e Firenze, con una lunghezza complessiva di oltre 80 km. Sono in fase di progettazione altri trafori delle Alpi: la galleria di base ferroviaria Lione-Torino, di 53 km di lunghezza, e la galleria del Brennero, di 54 km.

Durante lo scavo della galleria del Lotschberg, dopo lo scavo per circa 300 m nel granito Gastern, si è incontrata

SUMMARY – Recent innovations in yield-control support systems are allowing contractors to increase the rate of advance when tunnelling in difficult conditions associated with severely squeezing ground. Such systems are being implemented and proven in tunnelling projects using conventional excavation methods. The Saint Martin La Porte access tunnel along the Base tunnel of the Lyon-Turin rail line is presented as a case study to illustrate some of these developments which have been implemented successfully to deal with severely squeezing conditions encountered during excavation in a Carboniferous Formation.

1. Introduction

Europe is experiencing today a new "Renaissance" in tunnelling. New infrastructures are being constructed underground and will continue to be constructed, including subways and other urban transportation systems, as well as improvement for existing roads and highways.

However, the most significant excavation challenges probably are associated with the construction of high-speed railway lines. Of particular importance are the new crossings through the Alps in the form of base tunnels for rail transportation, such as the recently completed 34 km long Lotschberg Base tunnel and the 57 km Gotthard Base tunnel yet to be completed in Switzerland [1]. Nearly completed in Italy are tunnels with more than 80 km total length for the high-speed rail line between Bologna and Firenze [2]. Other tunnelling projects in the Alps include the 53 km long Base tunnel along the Lyon-Turin rail line [3] and the Brenner Base tunnel, which is planned to be 54 km long [4].

During the excavation of the Lotschberg Base tunnel, after a 300 m long section in Gastern granite, the tunnel

^(*) Ordinario di Meccanica delle rocce e Direttore del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino.

^(**) Ricercatore del Politecnico di Torino.

^(*) Professor of Rock Mechanics and Director of the Department of Structural and Geotechnical Engineering at Politecnico di Torino

^(**) Research Associate at the Politecnico di Torino.

una formazione di roccia sedimentaria (marna, arenaria e limo), contenente strati di carbone (antracite). Sono sorti seri problemi legati al comportamento spingente dell'ammasso roccioso, con convergenze significative e locali instabilità del cavo. Una zona critica con condizioni di comportamento spingente, per una lunghezza di circa 1150 m, è stata incontrata nel tunnel del Gottardo, mentre si scavava attraverso il Massiccio Settentrionale del Tavetsch. Qui sono stati rinvenuti strati alternati, di resistenza variabile, di gneiss cachirritico, ardesia e fillade. Anche durante lo scavo delle gallerie della Bologna-Firenze, le argille scagliose hanno mostrato un comportamento spingente. Le stesse difficili condizioni si sono riscontrate nello scavo della discenderia di Saint Martin La Porte appartenente al tunnel di base ferroviario Lione-Torino.

La costruzione di gallerie in condizioni di ammasso roccioso spingente è ardua a causa della difficoltà di poter formulare affidabili previsioni in fase di progetto. Durante lo scavo queste condizioni non possono essere facilmente previste, anche quando si lavora in una specifica formazione geologica in cui si potrebbero incontrare condizioni di comportamento spingente. Tali condizioni, infatti, possono variare anche a breve distanza, a causa dell'eterogeneità dell'ammasso e della variabilità delle proprietà meccaniche e idrauliche dello stesso.

Questo è il motivo per cui la scelta del metodo di scavo più appropriato è molto problematica e incerta. A causa della geometria fissa e della limitata flessibilità della macchina di scavo, TBM (Tunnel Boring Machine), le possibilità di controllare le deformazioni dell'ammasso sono limitate. Al contrario, nello scavo con metodo tradizionale si progetta una sezione di scavo più ampia per permettere lo sviluppo di grandi deformazioni. L'ovvia conseguenza è che nei tunnel profondi, dove si prevedono fenomeni di comportamento spingente dell'ammasso, lo scavo con metodo tradizionale è preferito allo scavo meccanizzato.

In genere lo scavo con metodo tradizionale in ammassi spingenti avviene con bassa velocità di avanzamento. Tuttavia, se il lavoro al fronte è ben pianificato e se sono adottati gli appropriati interventi di stabilizzazione, lo scavo può procedere anche in condizioni di ammasso fortemente spingente. Al contrario, se qualcosa non va nello scavo meccanizzato, l'avanzamento è significativamente rallentato, e in molti casi si può giungere persino ad un fermo completo. C'è, quindi, la chiara necessità di sviluppare sistemi tecnologici appropriati che aiutino ad incrementare la velocità d'avanzamento nello scavo tradizionale. Scopo di questa nota è descrivere alcuni di questi innovativi sviluppi tecnologici e presentare un caso di studio che ne illustri in breve l'applicazione.

2. Il comportamento delle rocce spingenti

Il termine "rocce spingenti" ha origine all'epoca dei pionieristici giorni dei trafori nelle Alpi. Si riferisce alla

encountered an unpredicted area of sedimentary rock (marlstone, sandstone and siltstone), containing alternating beds of coal (anthracite). Severe squeezing problems occurred with significant convergences and some local instabilities of the tunnel heading [5]. A critical zone with squeezing conditions, about 1150 m long, also was encountered in the Gotthard Base tunnel, while excavating through the Northern Tavetsch Massif. Here, alternating layers of intact and variable strength kikiritic gneisses, slates, and phyllites were encountered (kikirite describes a broken or intensely sheared rock, which has lost much of its original strength) [6]. During the excavation of tunnels between Bologna and Firenze, clay shales exhibited a very severely squeezing behaviour [7]. Severe squeezing problems have significantly impacted the excavation of the Saint Martin La Porte access tunnel along the Base tunnel of the Lyon-Turin rail line. Squeezing conditions are also anticipated in some lengths of the Brenner Base tunnel [8].

Tunnel construction in squeezing conditions is very demanding due to the difficulty in making reliable predictions at the design stage. During excavation such conditions are not easily anticipated, even when driving into a specific geological formation and experience is gained on the squeezing problems encountered. Squeezing conditions may vary over short distances due to rock heterogeneity and fluctuations in the mechanical and hydraulic properties of the rock mass. Indeed, the selection of the most appropriate excavation-construction method (i.e. mechanised tunnelling versus conventional tunnelling) is highly problematic and uncertain. Due to the fixed geometry and the limited flexibility of the TBM (Tunnel Boring Machine) allowable space to accommodate ground deformations is restricted. On the contrary, in conventional tunnelling a considerably larger profile can be excavated initially in order to allow for large deformations. The obvious consequence is that in deep tunnels, whenever severely squeezing conditions are anticipated, conventional tunnelling appears to be preferred over mechanised tunnelling.

Conventional tunnelling in squeezing rock generally takes place with a slow rate of advance. However, if the work at the face is well planned and appropriate stabilisation measures are implemented, excavation can proceed even in severely squeezing conditions. On the contrary, if anything goes wrong in mechanised tunnelling the excavation is significantly hindered, and in many cases may come to a complete standstill. Thus, there is a clear need to develop appropriate technological systems that help increase the rate of advance in conventional tunnelling. It is the purpose of this paper to describe some of these recent innovative technological developments and to present a case study to illustrate some of the methods.

forte convergenza della sezione di scavo che si verifica durante l'avanzamento della galleria (fig. 1). Sulla base del lavoro di una apposita Commissione della International Society for Rock Mechanics (ISRM), che ha descritto il fenomeno del comportamento spingente e le sue principali caratteristiche, si concorda oggi sul fatto che il "comportamento spingente" sta a denotare grandi deformazioni (convergenze), dipendenti dal tempo, che si verificano durante lo scavo di una galleria. Questo fenomeno ha luogo quando una particolare combinazione di proprietà meccaniche della roccia e di tensioni indotte produce plasticizzazioni in alcune zone attorno allo scavo, superando la resistenza al taglio limite in corrispondenza della quale hanno inizio fenomeni deformativi dipendenti dal tempo (creep). Questo processo deformativo può terminare durante lo scavo o può continuare per un lungo periodo di tempo.

L'entità della convergenza della galleria, la velocità di deformazione e l'estensione della fascia plastica attorno al cavo dipendono dalle condizioni geologiche e geotecniche, dal rapporto tra stato tensionale in-situ e resistenza dell'ammasso roccioso, dalla presenza d'acqua e dalle relative pressioni interstiziali, nonché dalle proprietà dell'ammasso roccioso. Il comportamento spingente è pertanto sinonimo di plasticizzazione e dipendenza dal tempo; è strettamente correlato alle tecniche di scavo e ai sistemi di sostegno/stabilizzazione utilizzati. Se l'installazione del rivestimento è ritardata nel tempo, l'ammasso roccioso si muove verso l'interno dello scavo e si verifica una ridistribuzione dello stato tensionale al contorno. Al contrario, se le deformazioni sono impediti, il comportamento spingente porterà ad un incremento del carico sul sistema di sostegno, crescente nel tempo.



Fig. 1 – Le rocce spingenti riducono la sezione della galleria. La foto scattata all'interno della discenderia di Saint Martin La Porte, relativa al tunnel di base della linea Torino - Lione, mostra in modo particolarmente evidente tale fenomeno, che ha comportato la riprofilatura del cavo. *Squeezing rock reduces the tunnel cross section. This is shown dramatically in this photograph taken at the Saint Martin La Porte access tunnel along the Lyon-Turin Base tunnel, where re-profiling of the highly deformed cross section took place.*

2. Squeezing Rock Behaviour

The term "squeezing rock" originates from the pioneering days of tunnelling through the Alps. It refers to the reduction of the tunnel cross section that occurs as the tunnel is being advanced (fig. 1). Based on the work of a Commission of the International Society for Rock Mechanics (ISRM) [9], which has described squeezing and the main features of this mechanism, it is agreed today that "squeezing of rock" stands for large time-dependent convergence during tunnel excavation. This happens when a particular combination of material properties and induced stresses causes yielding in some zones around the tunnel, exceeding the limiting shear stress at which creep starts. Deformation may terminate during construction or continue over a long period of time.

The magnitude of tunnel convergence, the rate of deformation, and the extent of the yielding zone around the tunnel depend on the geological and geotechnical conditions, the in-situ state of stress relative to rock mass strength, the groundwater flow and pore water pressure, and the rock mass properties. Squeezing is therefore synonymous with yielding and time-dependence, and often is largely dependent on excavation and support techniques being used. If the support installation is delayed, the rock mass moves into the tunnel and a stress redistribution takes place around it. On the contrary, if deformation is restrained, squeezing will lead to long-term load build-up of the support system.

The squeezing behaviour during tunnel excavation has intrigued experts for years, and often has caused great difficulties for completing underground works, with major delays in construction schedules and cost overruns. There are numerous cases of particular interest in Europe and world-wide where squeezing phenomena have occurred, providing some insights into the ground response during excavation. A review of these case studies leads to the following remarks:

- Squeezing behaviour is associated with poor rock mass deformability and strength properties. Based on previous experience, there are a number of rock complexes where squeezing may occur if the loading conditions needed for the onset of squeezing are present: gneiss, micaschists and calcschists (typical of contact and tectonized zones and faults), claystones, phyllite, flysch, clay-shales, marly-clays, etc.
- Squeezing behaviour implies that yielding will occur around the tunnel. The onset of a yielding zone in the tunnel surround causes a significant increase in tunnel convergence and face displacements (extrusion); these are generally large, increase in time and form the most significant aspects of the squeezing behaviour.
- Orientations of discontinuities, such as bedding planes and schistosity, play a very important role in the onset and development of large deformations

Il comportamento spingente durante lo scavo di una galleria ha suscitato grande interesse in generazioni di esperti, e spesso ha causato notevoli difficoltà nell'esecuzione di opere in sotterraneo con ingenti ritardi nella costruzione e conseguente lievitazione dei costi. Ci sono numerosi casi di fenomeni di comportamento spingente di particolare interesse in Europa e nel mondo, che forniscono informazioni sulla risposta del terreno durante lo scavo. L'analisi di questi casi conduce alle seguenti considerazioni:

- Il comportamento spingente è associato a scadenti caratteristiche di deformabilità e resistenza dell'ammasso roccioso. Sulla base di esperienze precedenti, ci sono molti ammassi rocciosi in cui il comportamento spingente può verificarsi se sussistono le condizioni di carico necessarie per la comparsa del fenomeno: gneiss, micascisti e calcescisti (tipiche delle zone di contatto, tettoniche e zone di faglia), rocce argillose, flysch, ecc.
- Il comportamento spingente implica che la plasticizzazione ha luogo attorno alla galleria. La nascita di una fascia plastica causa un aumento significativo della convergenza e dell'estrusione del fronte; queste deformazioni sono in genere elevate, si sviluppano nel tempo e sono gli aspetti più evidenti del comportamento spingente.
- Le giaciture delle discontinuità, quali i piani di stratificazione e di scistosità, giocano un ruolo molto importante nell'innescare e nello sviluppo di grandi deformazioni attorno alle gallerie, e anche sul comportamento spingente. In generale, se le principali discontinuità hanno direzione parallela all'asse della galleria, la deformazione aumenterà significativamente, come è stato osservato in termini di convergenza durante l'avanzamento.
- La distribuzione della pressione interstiziale e il carico piezometrico possono influenzare il comportamento sforzo-deformazione dell'ammasso roccioso. Interventi di drenaggio che causano una diminuzione del carico piezometrico sia al contorno della galleria, sia in avanzamento spesso contribuiscono a ridurre le deformazioni del terreno.
- Le tecniche costruttive adottate per lo scavo e il supporto (ad esempio le sequenze di scavo e il numero delle fasi di scavo, inclusi i metodi di stabilizzazione) possono influenzare le condizioni di stabilità globale dello scavo. In generale, la capacità di provvedere ad un tempestivo confinamento sul contorno del cavo e in prossimità del fronte è considerato il fattore più importante per il controllo delle deformazioni del terreno.
- Grandi deformazioni associate al comportamento spingente possono aversi anche in rocce suscettibili al rigonfiamento. Sebbene i fattori che causano i due comportamenti siano diversi, è spesso difficile distinguere tra comportamento rigonfiante e spingente, poiché i due fenomeni possono avvenire contemporaneamente e indurre effetti simili. Ad esempio, in terreni argillosi sovraconsolidati, il rapido scarico tensionale dovuto al-

around tunnels, and therefore also on the squeezing behaviour. In general, if the main discontinuities strike parallel to the tunnel axis, the deformation will be enhanced significantly, as observed in terms of convergence during face advance.

- The pore pressure distribution and the piezometric head also can influence the rock mass stress-strain behaviour. Drainage measures that cause a reduction in piezometric head both in the tunnel surround and ahead of the tunnel face often help to reduce ground deformations.
- Construction techniques for excavation and support (i.e., the excavation sequences and the number of excavation stages which are adopted, including the stabilisation methods used) may influence the overall stability conditions of the excavation. In general, the ability to provide an early confinement on the tunnel periphery and in near vicinity to the face is considered the most important factor in controlling ground deformations.
- Large deformations associated with squeezing also may occur in rocks susceptible to swelling. Although the factors that cause either behaviour are different, it is often difficult to distinguish between squeezing and swelling, as the two phenomena may occur at the same time and induce similar effects. For example, in over-consolidated clays, the rapid stress-relief due to the tunnel excavation causes an increase in deviatoric stresses with simultaneous onset of negative pore pressure. In undrained conditions, the ground stresses may be such as not to cause squeezing. However, due to the negative pore pressure, swelling may occur with a more sudden onset of deformations under constant loading.

3. Tunnel and face stability in weak rock

In general, the major difficulties encountered when tunnelling in weak rock, are associated with both the stability of the tunnel and of the face. It is known that the tunnel face follows the same general deformation pattern as the tunnel itself, although the longitudinal face displacements are about 30% smaller than the radial displacements at the tunnel perimeter [10]. This pattern of behaviour is well illustrated in fig. 2, where the typical plastic zone and the deformation processes in the rock mass surrounding an advancing tunnel excavated full face are shown, as obtained by means of an axi-symmetric finite-difference model. For weak rock masses and in deep tunnels the stability problems of the face and of the "core" ahead of the same advancing face may become as important as the stability of the tunnel heading.

Of the available options for conventional tunnel excavation and construction in squeezing rock (e.g. multiple

lo scavo della galleria causa un incremento del deviatore di tensione ed una simultanea comparsa di pressioni interstiziali negative. In condizioni non drenate, le tensioni del terreno potrebbero essere tali da non produrre comportamento spingente. Tuttavia, a causa delle pressioni interstiziali negative, il rigonfiamento può avvenire con un più veloce raggiungimento delle condizioni di deformazione a carico costante.

3. Stabilità del fronte e del cavo in rocce scadenti

Generalmente, le maggiori difficoltà incontrate nell'esecuzione di gallerie in rocce scadenti sono associate sia con la stabilità del cavo, sia con la stabilità del fronte. È noto che il fronte della galleria segue lo stesso modello generale di deformazione della galleria stessa, sebbene gli spostamenti longitudinali del fronte siano circa del 30% più piccoli degli spostamenti radiali al contorno del tunnel. Questo modello di comportamento è ben illustrato nella fig. 2, in cui sono mostrate la tipica fascia plastica e i processi di deformazione nella roccia al contorno della galleria e in avanzamento, ottenuti da un modello assial-simmetrico alle differenze finite. Per ammassi rocciosi scadenti e per gallerie profonde, i problemi di stabilità del fronte e del nucleo in avanzamento possono divenire importanti quanto la stabilità del cavo.

Tra le opzioni disponibili per lo scavo con metodo tradizionale di gallerie in rocce spingenti (ad esempio avanzamento in scavo multiparzializzato, o a mezza sezione) il metodo che ha avuto più successo è quello dell'avanzamento a piena sezione. Un vantaggio significativo di questo metodo è la grande area di lavoro disponibile al fronte, in modo da poter utilizzare attrezzature per l'installazione di sistemi di sostegno/stabilizzazione al contorno della galleria e sul fronte. In condizioni di ammasso scadente, questo metodo richiede un consolidamento sistematico del fronte e del nucleo di avanzamento. Il rivestimento di prima fase è installato il più vicino possibile al fronte.

Quando si scava in condizioni di ammasso spingente, possono essere applicati due tipi di supporto (il "pesante" e il "leggero"). Per quanto riguarda il "metodo pesante" (principio di resistenza), il rivestimento di prima fase è progettato molto rigido (generalmente è composto da "centine pesanti" di acciaio e da calcestruzzo spruzzato fibro-rinforzato), l'anello è chiuso velocemente" (fig. 3) e il rivestimento definitivo di arco rovescio e di calotta sono gettati a stretto ri-

headings, top heading and bench, full face), the most successful method applied in many cases is the full-face method (Fig. 3). A significant advantage of this method is the large working space available at the advancing face, so that large equipment can be used effectively for installing support/stabilization measures at the tunnel perimeter and ahead of the face. In poor rock conditions, this method requires a systematic reinforcement of the working face and of the ground ahead. Generally, the cross section is entirely open and a primary lining is installed as near to the face as possible [11].

When tunnelling in squeezing conditions, one of two basic types of support ("heavy" and "light") can be applied. For the "heavy method" ("resistance principle"), the primary lining is designed to be very stiff (generally composed of steel fibre shotcrete and heavy steel sets), the "ring is closed quickly" (fig. 3), and the final concrete invert (first) and final concrete lining (second) are cast within a short distance from the face. It is apparent that if very high rock pressures are expected, this solution soon becomes impractical. With the "light method" ("yielding principle"), the aim is to accommodate the large deformations likely to develop in the tunnel surround with the expectation that rock pressure will decrease with increasing deformation. The excavation profile is chosen so as to maintain the desired clearance and to avoid the need for re-profiling. A key point when driving the tunnel this way is to be able to control the development of deformations. In addition to the requirement of maintaining stability at the face and the heading during tunnel driving, a suitable tunnel support system is to be adopted that will allow for accommodating deformations without damage of the lining.

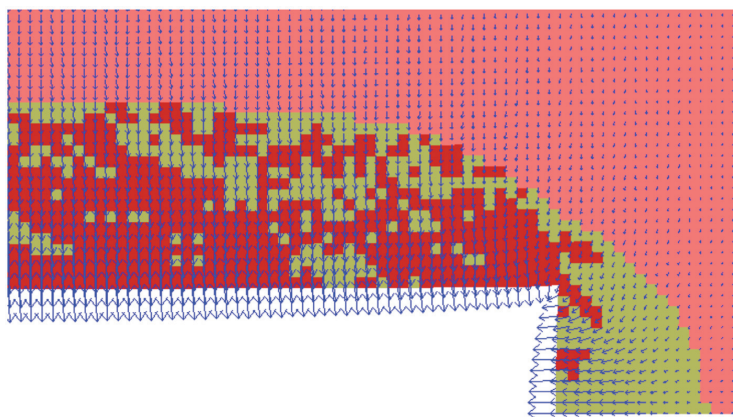


Fig. 2 – Zona plastica e processo deformativo (convergenza del perimetro di scavo ed estrusione del fronte) al contorno di una galleria con avanzamento a piena sezione in un ammasso roccioso spingente, calcolata con un modello alle differenze finite in condizioni assial - simmetriche. Plastic zone and deformation process (convergence of perimeter and extrusion of face) surrounding an advancing tunnel excavated full face in a squeezing rock mass calculated by means of an axi-symmetric finite difference model.



Fig. 3 – Metodi di avanzamento a piena sezione: operazioni di consolidamento del fronte e di chiusura dell'arco rovescio. *Full face excavation/construction method: face reinforcement and ring closure operations.*

dosso del fronte. E' evidente che laddove si prevedano carichi molto rilevanti questa soluzione è impraticabile.

Con il "metodo leggero" (principio di controllo della deformazione), lo scopo è quello di controllare lo sviluppo delle deformazioni attorno alla galleria, assumendo che i carichi diminuiscano con l'aumentare della deformazione. Il profilo dello scavo viene progettato prevedendo un sovrascavo in modo da evitare la necessità di una ri-profilatura. Un punto chiave quando si esegue lo scavo secondo questo principio è essere in grado di controllare lo sviluppo delle deformazioni. In aggiunta al requisito di mantenere la stabilità del fronte e del cavo, dovrebbe essere utilizzato un sistema di sostegno che permetta lo sviluppo delle deformazioni senza danneggiare il rivestimento.

3.1. La stabilità del fronte

Uno dei metodi più efficaci per garantire la stabilità del fronte quando si scava una galleria con avanzamento a piena sezione consiste nel consolidamento del fronte con barre in vetroresina cementate. Esistono diversi elementi strutturali in fibre di vetro, quali barre lisce o corrugate. Più recentemente, sono stati utilizzati elementi piatti (fig. 4) che possono essere assemblati in situ in un'ampia gamma di modi; sono molto semplici da iniettare e trasportare, permettono di raggiungere lunghezze fino a 25 m.

3.1. Face stability

One of the most effective methods for achieving face stability when driving a tunnel full-face consists in reinforcing the rock mass ahead by means of grouted fiber-glass dowels. There are a number of fiber-glass structural elements that may be adopted. Both smooth and corrugated tubes are available. More recently, flat elements (fig. 4) are being used which can be assembled in situ in a wide variety of types; they are very easy to inject and transport, and they allow reinforcement advance steps up to 25 m.

A typical reinforcement scheme is shown in fig. 5 where the fiber-glass elements are used for both the face and a thick ring surrounding the tunnel. In line with the

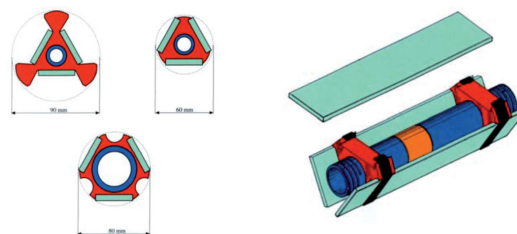


Fig. 4 – Elementi di fibra di vetro utilizzati per il consolidamento del fronte nel metodo di scavo a piena sezione. *Flat fiber-glass structural elements adopted for face reinforcement in the full-face excavation/construction method.*

Uno schema tipico di consolidamento è quello mostrato nella fig. 5, in cui gli elementi in fibre di vetro vengono utilizzati sia per il consolidamento del fronte, che per un anello attorno alla galleria. In linea col “principio di resistenza”, centine a ridotto interasse sono incorporate in un guscio di calcestruzzo spruzzato di spessore significativo per formare il rivestimento di prima fase, che viene installato vicino al fronte, appena terminato lo scavo.

3.2. Rivestimento deformabile

Le prime applicazioni di un sistema di prerivestimento deformabile consistevano in una serie di profilati di acciaio in un rivestimento di calcestruzzo spruzzato, contenente una serie di “tagli”, in abbinamento con una intensa chiodatura della roccia. Sono state proposte e applicate diverse soluzioni progettuali per affrontare il comportamento spingente nei trafori alpini. Nelle figg. 6 e 7 sono illustrate due soluzioni tecnologiche che recentemente hanno dimostrato di essere in grado di mantenere la flessibilità del rivestimento di prima fase consentendone le deformazioni senza danni significativi. Queste due soluzioni possono essere entrambe installate nei “tagli” predisposti nel calcestruzzo, in corrispondenza degli accoppiamenti scorrevoli delle centine. In questo modo, il sistema di rivestimento di prima fase cede, permettendo alla galleria di convergere (Δr) in modo controllato, mantenendo lo sforzo tangenziale costante σ_θ e applicando uno sforzo di contenimento σ_r (fig. 8).

Il primo elemento compressibile (LSC) fu sviluppato dal Geotechnical Group Graz tra il 1996 e il 1999. Nel suo sviluppo più recente, ogni unità di LSC consiste di 3 cilindri coassiali che vengono caricati in direzione assiale e si deformano in successione, accorciandosi fino a 200 mm sotto un carico di 150-200 kN. Come mostrato in fig. 6, le 3 unità LSC vengono installate in appositi “tagli” del rivestimento.

Il secondo elemento compressibile (HiDCon) ha una forma prismatica ed è composto da un mix di cemento, fibre d'acciaio e particelle cave di vetro. Le particelle di vetro aumentano il volume dei vuoti del mix e collasano ad un predeterminato sforzo di compressione. La resistenza di snervamento dipende dalla composizione del mix e varia tra 4 e 18 MPa. La deformazione massima ammessa è approssimativamente pari al 50%.

Anche in questo caso, come mostrato nella fig. 7, gli elementi sono incorporati nel calcestruzzo. E' questo l'ultimo tipo di elemento che è stato applicato con successo

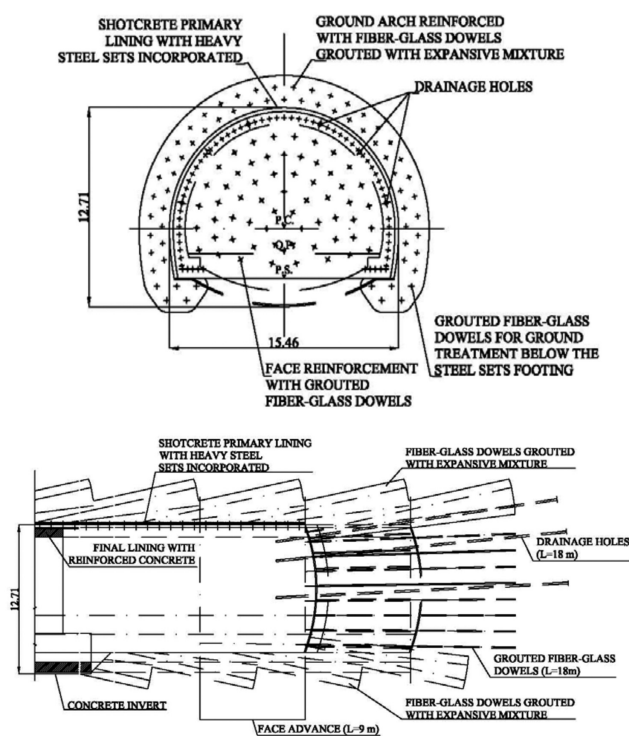


Fig. 5 Tipico consolidamento del fronte utilizzato con lo scavo a piena sezione. Sezione trasversale e longitudinale rappresentati in modo schematico (fuori scala). Typical face reinforcement system used with the full face method. Cross section (above) and Longitudinal Section (below). Schematic drawings only, not to scale.

“resistance principle”, closely spaced steel sets are incorporated in a thick shotcrete shell to form the primary lining which is installed close to the face as early as possible.

3.2. Yielding support

Early applications of a yielding support system consisted of yielding steel sets embedded in a shotcrete lining containing a number of open gaps, in conjunction with dense rock bolting. Various design options have since been proposed and applied in order to deal with squeezing conditions in Alpine tunnels [12]. Two technical options that recently have demonstrated the ability to maintain flexibility in the primary lining and to accommodate deformations without significant damage are shown in figg. 6 and 7. They both can be installed in the gaps of a shotcrete lining and between steel sets with yielding couplings. In this way, the lining system yields, allowing the tunnel to converge (Δr) in a controlled manner while

nella discenderia di Saint Martin La Porte appartenente alla galleria di base Lione-Torino.

4. La discenderia di Saint Martin La Porte

La discenderia di Saint Martin La Porte è stata scavata nella formazione del Carbonifero, "Zone Houillière Briançonnaise- Unite des Encombres" (fig. 9), che è composta da scisti neri (dal 45 al 55%), arenarie (dal 40 al 50%), carbone (5%), argilloscisti e rocce cataclastiche. Un aspetto caratteristico del terreno osservato sui fronti di scavo (fig.10) sono le condizioni fortemente eterogenee delle rocce, che si presentano disarticolate e fratturate, e che manifestano importanti fenomeni di comportamento spingente. La formazione è spesso interessata da faglie che hanno prodotto una degradazione delle condizioni dell'ammasso roccioso. La copertura lungo il tracciato nella zona di interesse è compresa tra i 300 m e i 550 m. Lo scavo ha luogo essenzialmente in condizioni asciutte.

Per valutare la qualità dell'ammasso roccioso sono stati condotti durante lo scavo dettagliati rilievi delle condizioni geologiche riscontrate al fronte, come mostrato nella fig. 10. Ciò ha consentito di ricavare le informazioni utili

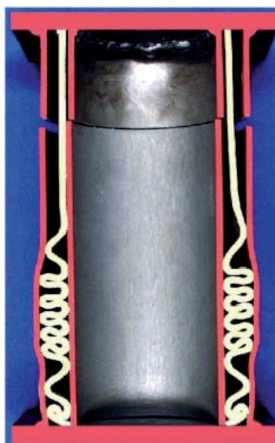
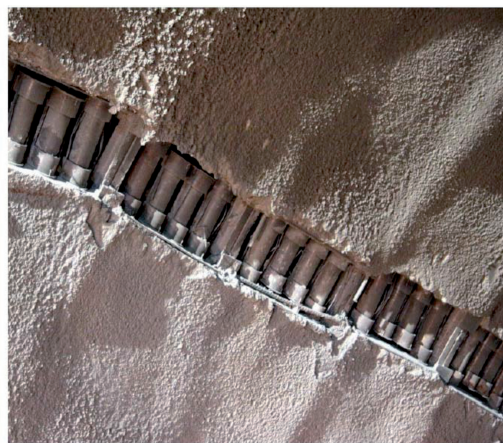


Fig. 6 – Supporti deformabili con elementi LSC incorporati nel rivestimento di calcestruzzo spruzzato e in centine deformabili. *Yielding support with LSC elements incorporated in the shotcrete lining and between steel sets with yielding couplings [12].*



keeping the tangential stress σ_θ constant and applying a confinement stress σ_r (fig. 8).

The first compressible element (Lining Stress Controller - LSC) was developed by the Geotechnical Group Graz [12] between 1996 and 1999. In its most recent design each LSC unit (Triple Tube System) consists of three coaxial cylinders which are loaded in the axial direction and buckle in stages, shortening up to 200 mm under a load of 150-200 kN. As shown in fig. 6, three LSC units are installed in the gaps of the shotcrete lining. The second compressible element (High Deformable Concrete - HiDCon) has a beam shape and is composed of a mixture of cement, steel fibres and hollow glass particles

[13,14]. The glass particles increase the void fraction of the mixture and collapse at a predetermined compressive stress. The yielding strength depends on the composition of the mixture and ranges from 4 to 18 MPa [13]. The maximum allowable strain is approximately 50 percent. Also in this case, as depicted in fig. 7, the elements are incorporated into shotcrete. It is this latter element type that has been successfully applied in the Saint



Fig. 7 Supporti deformabili con elementi HiDCon incorporati nel rivestimento di calcestruzzo spruzzato e in centine deformabili. Dettagli delle installazioni all'interno della discenderia di Saint Martin La Porte. *Yielding support with HiDCon elements incorporated in the shotcrete lining and between steel sets with yielding couplings. Installation details as adopted in the Saint Martin La Porte access tunnel.*



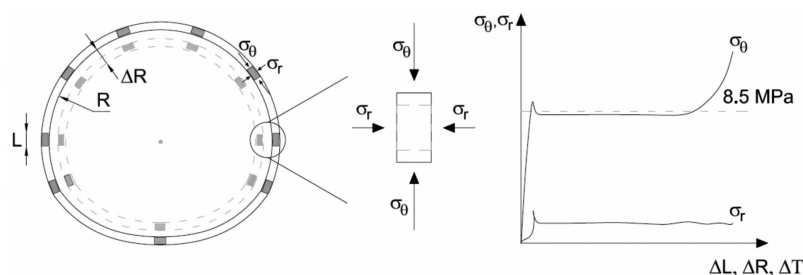


Fig. 8 – Rappresentazione schematica del comportamento di un supporto deformabile con elementi compressibili incorporati in un rivestimento. *Schematic representation of the behaviour of a yielding support with compressible elements incorporated in the shotcrete lining.*

li per valutare la percentuale di distribuzione di rocce “consistenti” (arenarie e scisti) e “deboli” (carbone e argiloscisti) sul fronte di scavo.

4.1. Il sistema di supporto adottato

Nella zona del Carbonifero sono stati usati numerosi sistemi di supporto. Tuttavia, è sembrato presto evidente che un supporto rigido non sarebbe stato compatibile con le severe condizioni di ammasso spingente incontrate. La soluzione progettuale scelta si è basata sull'adozione di un prerinvestimento deformabile, accoppiato ad uno scavo a piena sezione e ad un sistematico intervento di rinforzo del fronte di avanzamento con elementi in fibre di vetro.

Il sistema di supporto inizialmente adottato (fig. 11) consisteva in centine scorrevoli, bullonatura e un sottile strato di calcestruzzo spruzzato, con una sezione di scavo a forma di ferro di cavallo. Questa sezione tipo manifestò elevate deformazioni con convergenze fino a 2 m e la conseguente necessità di interventi di riprofilatura (fig. 1).

Per migliorare le condizioni di lavoro e per controllare le deformazioni è stato adottato un nuovo sistema di sup-

port which is composed of black schists (45 to 55%), sandstones (40 to 50%), coal (5%), clay-like shales and cataclastic rocks. A characteristic feature of the ground observed at the face during excavation (fig. 10) is the highly heterogeneous, disrupted and fractured conditions of the rock mass which exhibits very severe squeezing problems. The formation often is affected by faulting that results in a degradation of the rock mass conditions. The overburden along the tunnel in the zone of interest ranges from 300 m to 550 m. Excavation takes place in essentially dry conditions.

In order to assess the rock mass quality during excavation detailed mapping of the geological conditions at the face was undertaken as depicted in fig. 10. This provides information to evaluate the percent distribution of “strong” (sandstones and schists) and “weak” (coal and clay-like shales) rocks at the face.

4.1. Excavation-support system adopted

Several support systems were used in the Carboniferous zone. However, it soon became apparent that a stiff support would not be feasible in the severe squeezing conditions encountered. The design concept finally chosen [15] was based on allowing the support to yield while using full-face excavation with systematic face reinforcement by fiber-glass dowels. The support system initially implemented (fig. 11) consisted of yielding steel ribs with sliding joints (TH, Toussaint-Heintzmann type), anchors and a thin shotcrete layer in a horse-shoe profile. These sections of the tunnel underwent very large deformations with convergences up to 2 m and later needed to be re-profiled (fig. 1).

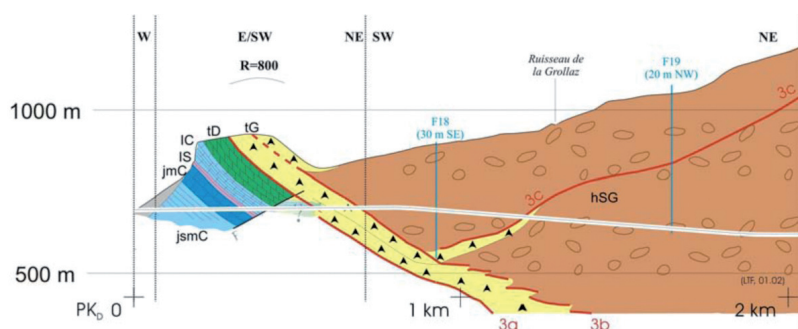


Fig. 9 – Profilo geologico lungo la discenderia di Saint Martin La Porte. *Geological profile along the Saint Martin La Porte access tunnel.*

Martin La Porte access tunnel along the Lyon Turin Base tunnel.

4. The Saint Martin La Porte Access Tunnel

The Saint Martin La Porte access tunnel (figg. 9 and 10) is being excavated in the Carboniferous Formation, “Zone Houillère Briançonnaise-Unité des Encombres” (hSG in fig. 9),

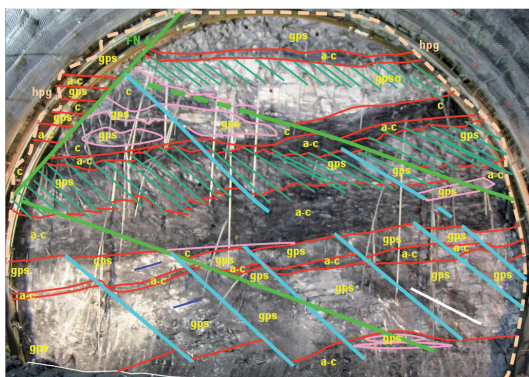


Fig. 10 – Tipiche condizioni geologiche al fronte (gps-arenarie, a-argilliti, c-carbone, etc.). Typical geological conditions at the face (gps-sandstones, a-clay like shales, c-coal, etc.).

porto con una sezione di scavo quasi circolare, che può essere sintetizzato come segue (fig. 12):

- fase 0: precontenimento del fronte, costituito da elementi in vetroresina disposti ad andamento tronco-conico per incrementare le caratteristiche dell'ammasso in una fascia da 2 a 3 m di spessore al contorno della galleria;
- fase 1: lo scavo viene effettuato in sfondi di 1 m, con l'installazione di un pririvestimento che consiste in ancoraggi passivi radiali (lunghi 8 m), centine deformabili (profilati TH) e uno strato di calcestruzzo spruzzato di 10 cm di spessore. La sezione prevedeva un sistematico sovrascavo per permettere convergenze fino a 600 mm;
- fase 2: scavo in arco rovescio ad una distanza di 15-25 m dal fronte, con l'applicazione di un pririvestimento costituito da uno strato di calcestruzzo spruzzato di 20 cm, centine scorrevoli (tipo TH) con 9 tagli longitudinali riempiti con elementi HiDCon. Alla galleria è permessa una deformazione controllata fino a una convergenza massima di 400 mm;
- fase 3: installazione del rivestimento definitivo alla distanza di 80m dal fronte.

Come mostrato nella fig. 12, gli elementi HiDCon, che rappresentano lo sviluppo tecnologico più recente per condizioni di ammasso spingente, sono installati nei tagli del pririvestimento tra una centina scorrevole e l'altra (fig. 13). Questo sistema di supporto deformabile permette di controllare le deformazioni, come mostrato nel grafico di fig. 8. Gli elementi HiDCon di progetto hanno un'altezza di 40 cm, una lunghezza di 80 cm e uno spessore di 20 cm. Sono stati progettati per raggiungere una tensione di snervamento pari a 8.5 MPa con una deformazione del 40% esibendo un comportamento duttile. La fig. 14 mostra il diagramma sforzi-deformazioni ottenuto in laboratorio.

In order to improve the working conditions and to control deformations a novel support system was implemented with a near circular cross section. This can be summarized as follows (fig. 12):

- Stage 0: face pre-reinforcement, including a ring of grouted fiber-glass dowels around the opening perimeter, designed to reinforce the rock mass over a 2 to 3 m thickness.
- Stage 1: mechanical excavation carried out in steps of one meter length, with installation of a support system consisting of untensioned rock anchors (length 8 m) along the perimeter, yielding steel ribs with sliding joints (TH type), and a 10 cm thick shotcrete layer. The tunnel is opened in the upper cross section to allow for a maximum convergence of 600 mm.
- Stage 2: the tunnel is opened to the full circular section at a distance of 15-25 m from the face, with application of 20 cm shotcrete lining, yielding steel ribs with sliding joints (TH type) with 9 longitudinal slots (one in the invert) fitted with HiDCon (High Deformable Concrete) elements. The tunnel is allowed to deform in a controlled manner so as to develop a maximum convergence which should not exceed 400 mm.
- Stage 3: installation of a coffered concrete ring at a distance of 80 m from the face.

As shown in fig. 12, the HiDCon elements, which represent indeed the most recent technological development when tunneling in squeezing rock conditions, are installed in slots in the shotcrete lining between TH type steel ribs (fig. 13). These yield-control support system for the tunnel allows controlled deformations to take place as explained in principle in the diagram of fig. 8. In the project condi-

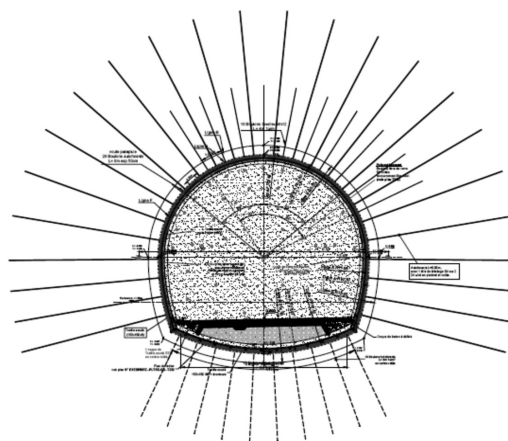


Fig. 11 – Sezione trasversale del tunnel (P7.3) con il sistema di sostegno del cavo adottato tra le progressive 1267 e 1324 m, dove si sono manifestate forti convergenze ed è stato riprofilato lo scavo. Tunnel cross section (P7.3) showing the excavation-support system adopted between chainage 1267 and 1324 m, where large convergences were experienced and re-profiling was required per Fig. 1.

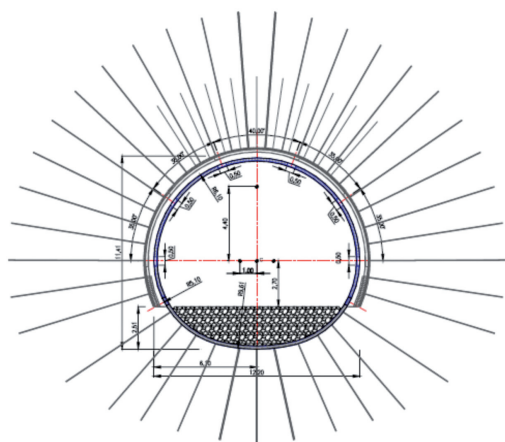


Fig. 12 – Sezione trasversale del tunnel (DSM) con il sistema di sostegno adottato per il profilo di scavo. *Tunnel cross section (DSM) showing the excavation/support system adopted.*

4.2. La deformazione controllata della galleria

Il monitoraggio sistematico delle convergenze della galleria è tuttora in corso. Le convergenze sono misurate per mezzo di prismi ottici installati sul prerivestimento della galleria (5 prismi in fase 1, 7 in fase 2). Alcune sezioni speciali sono state attrezzate con estensimetri multi-base e strain-gauge installati negli elementi HiDCon. Sono stati installati anche estrusometri per controllare l'estrusione del fronte di scavo. Inoltre strain-gauge sono stati predisposti anche nel prerivestimento.

Per comprendere la risposta deformativa della galleria allo scavo, è interessante considerare il grafico della fig. 15, che mostra le convergenze misurate lungo le corde 1-3, 3-5 e 1-5 (DL_{1-3}) tra le progressive 1200 e 1650 m, con il fronte che ha oltrepassato di 15 m la sezione di monitoraggio. Nella figura le convergenze sono espresse in percentuale rispetto alla lunghezza di ciascuna corda di misura. E' importante sottolineare che si sono verificati 3 fermi dell'attività di scavo:

- alla progressiva 1494 m, per 18 giorni per le festività del Natale 2006;
- alla progressiva 1545 m, per 28 giorni, per la procedura di gara tra l'aprile e il maggio 2007;
- alla progressiva 1605 m, per 14 giorni, per lo scavo di una nicchia laterale alla progressiva di 1488 m.

Si può osservare quanto segue:

tions of the Saint Martin access tunnel the HiDCon elements have a height of 40 cm, a length of 80 cm, and a thickness of 20 cm. They have been designed to yield up to approximately 40 percent strain in a ductile manner, while the yield stress has been chosen to be 8.5 MPa. fig. 14 shows the characteristic stress-strain diagrams obtained in our MASTRLAB laboratory.

4.2. Controlled response of the tunnel deformation

Systematic monitoring of tunnel convergence is underway along the tunnel where the support system described above is being adopted systematically. Convergences are measured by means of optical targets placed along the tunnel perimeter (5 in phase 1 and 7 in phase 2). A number of special sections have been equipped with multi-position borehole extensometers and strain meters located across the HiDCon elements. Extrusometer monitoring has been used to measure the longitudinal displacement ahead of the tunnel face. In addition, the strain level in the primary lining has been monitored.

In order to gain an understanding of the tunnel response so far, it is of interest to consider the diagram of fig. 15, which shows the convergences measured along arrays 1-3, 3-5 and 1-5 (DL_{1-3}) between chainage 1200 m and 1650 m, with the tunnel face being 15 m ahead of the monitoring section. Also illustrated in fig. 15 is the tunnel "deformation" that has occurred (i.e. the convergence divided by the length of each array measured at the time of installation of the optical targets). It is relevant to point out that three stops of face advance took place as follows:

- at chainage 1494 m, for 18 days due to the 2006 Christmas holidays;
- at chainage 1545 m, for 28 days, in relation to the tendering procedure that took place between April and May 2007;
- at chainage 1605 m, for 14 days, for the excavation of a side drift at chainage 1488 m.



Fig. 13 – (a) Rivestimento deformabile con elementi HiDCon; (b) Dettaglio di un elemento HiDCon alla massima deformazione nel corso di una prova nel laboratorio MASTRLAB del Politecnico di Torino. *(a) Deformable lining with HiDCon elements, (b) Detail of a HiDCon element at maximum strain during testing in the MASTRLAB laboratory, by Politecnico di Torino.*

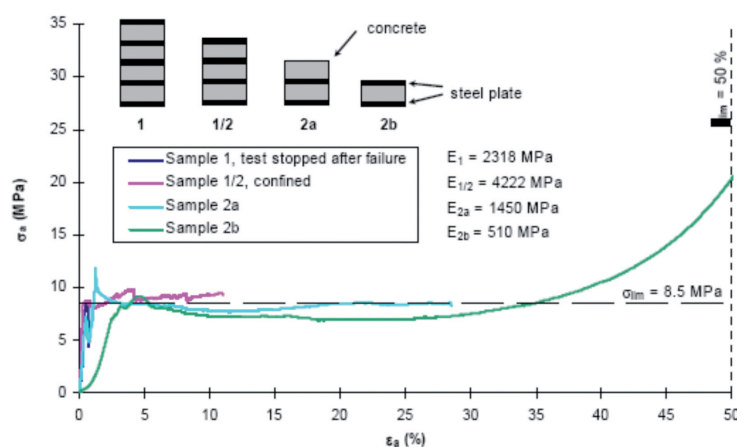


Fig. 14 – Diagramma caratteristico sforzo–deformazione di un elemento HiDCon testato nel laboratorio MASTRLAB del Politecnico di Torino. *Characteristic stress-strain diagram of a HiDCon element tested in the MASTRLAB laboratory, by Politecnico di Torino.*

- le deformazioni più grandi si sono misurate nelle sezioni P7.3 tra le progressive 1200 e 1400 m; nelle sezioni trasversali DSM le convergenze nella fase 1 sono risultate generalmente più piccole con deformazioni mai superiori al 6-7%;
- la massima convergenza di 600 mm nelle sezioni DSM è stata superata solo localmente (ad esempio tra le progressive 1525 e 1550 m dove le condizioni di ammasso sono risultate estremamente scadenti) ed hanno richiesto una ri-profilatura della sezione della galleria prima dell'installazione del rivestimento di fase 2;
- le deformazioni della galleria nelle sezioni P7.3 sono risultate molto variabili da sezione a sezione, cosa che non si è riscontrata nelle sezioni DSM.

E' inoltre importante considerare la convergenza della galleria in funzione del tempo misurata in fase 2, come mostrato nella fig. 16. Tale comportamento si osserva ad una distanza significativa dal fronte, quando il prerivestimento deformabile è stato in-

neighboring one, which is not the case for cross section DSM.

It also is important to consider the tunnel convergence versus time in phase 2 depicted in fig. 16 above. This behavior occurs at a significant distance from the advancing face and when the yielding support has been

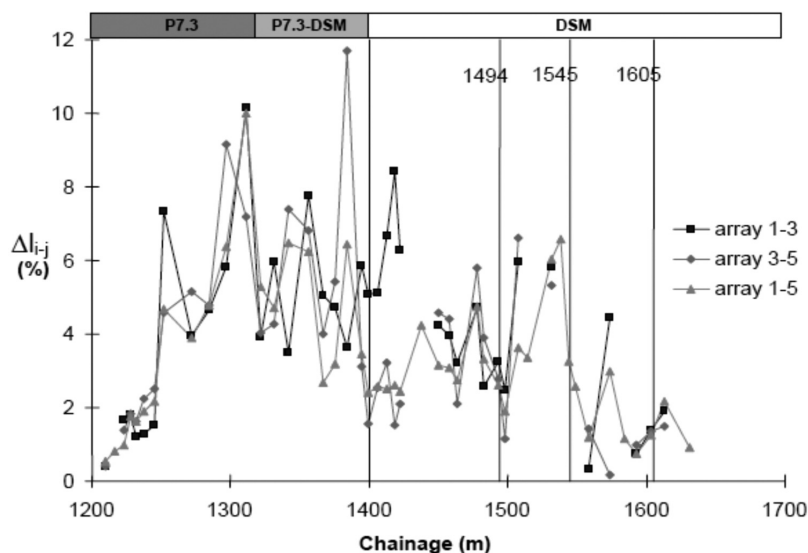


Fig. 15 – Convergenza misurata lungo gli allineamenti 1-3, 3-5 e 1-5 a 15 m dal fronte in fase 1. *Convergences measured along arrays 1-3, 3-5 and 1-5 at 15 m from face in phase 1.*

The following observations can be made:

- large deformations are associated with cross section P7.3 between chainages 1200 and 1400 m; with cross section DSM the convergences in phase 1 generally are smaller with the tunnel strain never in excess of 6-7%;
- the 600-mm allowed convergence with cross section DSM has been exceeded locally (e.g., between chainages 1525 and 1550 m where the rock mass quality was very poor) and required re-profiling of the tunnel cross section before installing the composite lining adopted in phase 2;
- the tunnel deformation associated with cross section P7.3 appears to be rather different in one section with respect to the

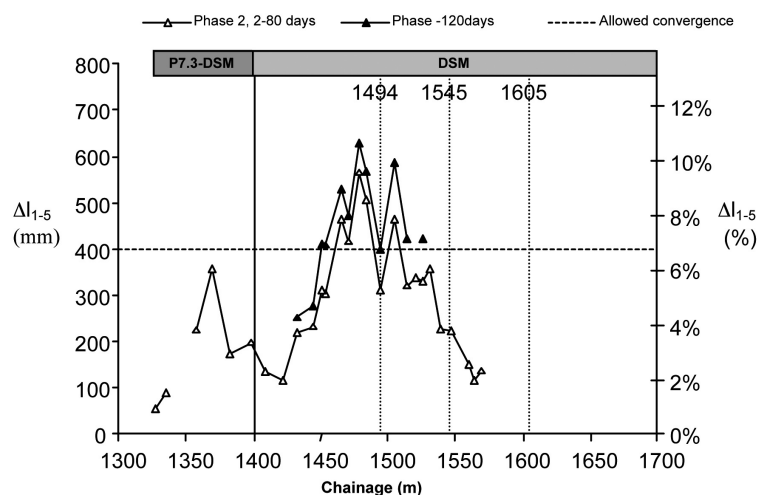


Fig. 16 – Convergenza a 80 e 120 giorni dopo lo scavo con fase 2 installata. *Convergences at 80 and 120 days following excavation with phase 2 installed.*

stallato da un certo periodo di tempo e il rivestimento finale non è stato ancora gettato. Il grafico in fig. 16 illustra le deformazioni misurate a 80 e 120 giorni. Si osserva che tra le progressive 1450 e 1525 m sulla corda 1-5 si misurano deformazioni superiori a quelle teoriche permesse: in questo caso gli elementi cedevoli sul paramento destro (guardando il fronte) arrivano alla deformazione limite del 40% (fig. 14), tanto da indurre un incremento di tensione negli elementi stessi che, tuttavia, non ha dato particolari problemi nelle successive fasi di installazione del rivestimento definitivo. Un'analisi a ritroso dei dati di monitoraggio tra le progressive 1394 e 1507 m fornisce $C_{\infty} = 602.6$ mm, $X = 41.2$ m, $T = 35.3$ giorni e $m = 1.09$, basati sulla seguente relazione:

$$C(x,t) = C_{\infty} \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x+X} \right)^2 \right] \cdot \left\{ 1 + m \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{t+T} \right)^{0.3} \right] \right\}$$

dove $C(x,t)$ è la convergenza alla distanza x dal fronte a un tempo t , C_{∞} è la convergenza alla distanza x ottenuta nel caso in cui ci sia un avanzamento a velocità sostenuta (con nessun effetto dipendente dal tempo), m è un parametro adimensionale che dipende dalle condizioni dell'ammasso, X è la distanza correlata alla zona di influenza del fronte (per un modello di comportamento elasto-plastico $X = 0.84 R_{pl}$ con R_{pl} = raggio plastico della galleria), T è il parametro caratteristico delle proprietà dell'ammasso dipendenti dal tempo.

È interessante comparare questi parametri caratteristici con quelli ottenuti nel tunnel del Lötschberg nell'attraversamento della formazione del Carbonifero, come mostrato nella tabella.

	C_{∞} (mm)	X (m)	T (days)	m (-)
Saint Martin La Porte tunnel	602.6	41.2	35.3	1.09
Lötschberg tunnel	536-890	38.3-48.0	35.7-41.0	0.688-0.768

active for a certain time duration and the final concrete lining has not yet been installed. The graph is for 80 and 120 days following excavation of the monitored section. It is noted that between chainages 1450 and 1525 m the tunnel cross section experienced along array 1-5 deformations in excess of that theoretically allowed (400 mm). In such a case the yielding elements on the right wall (looking at the tunnel face) attained the 40% limit strain (fig. 14) so that visible overstressing occurred in them, which did not seem to be an issue because no difficulty was encountered before installing the final lining.

A back analysis of the monitored data between chainages 1394 and 1507 m gives: $C_{\infty} = 602.6$ mm, $X = 41.2$ m, $T = 35.3$ days and $m = 1.09$, based on using the following relationship [16]:

$$C(x,t) = C_{\infty} \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x+X} \right)^2 \right] \cdot \left\{ 1 + m \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{t+T} \right)^{0.3} \right] \right\}$$

where $C(x,t)$ is the convergence at the distance x from the tunnel face and at the time t , C_{∞} is the convergence at distance obtained in the case of an infinite rate of face advance (no time dependent effect), m is a non dimensional parameter which depends on the ground conditions, X is a distance related to the distance of influence of the face (for an elasto-plastic model of behaviour $X = 0.84 R_{pl}$ with R_{pl} taken as the plastic radius of the tunnel), T is a characteristic parameter of the rock mass time dependent properties.

It is of interest to compare these characteristic parameters with those obtained for the Lötschberg Base tunnel when crossing the Carboniferous Formation [5] as shown in the table below.

It is noted that the characteristic parameters in the two tunnels are remarkably similar. In both cases the distance of influence of the face (this length may be esti-

Si osserva che i parametri caratteristici nelle due gallerie sono molto simili. In entrambi i casi la distanza di influenza del fronte (questa lunghezza può essere stimata pari a 4 volte X) è maggiore di 160 m; inoltre, le caratteristiche d'ammasso dipendenti dal tempo, che sono legate al parametro T , sembrano essere uguali.

5. Osservazioni conclusive

Questo articolo illustra la realizzazione di una galleria in severe condizioni di ammasso spingente, sia con scavo eseguito con metodi tradizionali, sia con lo scavo condotto applicando una metodologia costruttiva innovativa che consiste nel rinforzo del fronte, abbinato al controllo delle deformazioni della galleria. Elementi chiave della metodologia costruttiva adottata sono l'introduzione di una sezione quasi circolare, il consolidamento del fronte con elementi in vetroresina e l'uso di elementi deformabili di calcestruzzo installati all'interno del prerivestimento costituito da calcestruzzo spruzzato e centine scorrevoli.

E' stato illustrato il caso della discenderia di Saint Martin La Porte appartenente al tunnel di base della Lione-Torino, nella tratta scavata nella formazione carbonifera nella "Zone Houillère Briançonnaise- unité des Encombres". Si sono evidenziate l'innovativa metodologia costruttiva di supporto e la risposta deformativa misurata attraverso un accurato sistema di monitoraggio durante le fasi di avanzamento. E' stato dimostrato che, nonostante le condizioni dell'ammasso siano caratterizzate da un comportamento fortemente spingente, l'avanzamento procede ora con regolarità.

mated to be four times the value of X [16]) is greater than 160 m; also, the time dependent properties of the rock mass, which are related to the T parameter, appear to be nearly the same, which is to say that the severity of the squeezing conditions in the two tunnels might be similar.

5. Concluding Remarks

This paper discusses tunnel construction in very severe squeezing conditions when excavation takes place with the conventional method and an innovative construction technique is applied which consists of reinforcing the face, while allowing for controlled deformation of the tunnel cross section behind. Central to the construction method adopted is the introduction of a near circular tunnel cross section, the reinforcement of the tunnel face by fibreglass dowels, and the use of highly deformable concrete yielding elements incorporated in the tunnel primary lining which is formed with shotcrete and yielding steel ribs.

The case study of the Saint Martin La Porte access tunnel along the Lyon-Turin high speed rail line, in a length which is being excavated through the Carboniferous Formation, "Zone Houillère Briançonnaise-Unité des Encombres", is illustrated. Emphasis is placed on the description of the excavation-support method adopted and of the tunnel response as observed by careful performance monitoring during face advance. It is shown that, although the ground conditions met are characterized by an unusually very severe squeezing behaviour, face advancement is now taking place regularly and continuously.

REFERENCES

- [1] LÖW S., "Geologie und geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg", Tagungsband Zum Symposium Geologie Alptransit, Zürich, 26-28 September 2005, vdf Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich, 2006, 311pp.
- [2] LUNARDI P. and FOCARACCI A., "The Bologna to Florence high speed railway line. Progress of underground works", International Conference on Challenges for the 21st Century, Oslo, 1999, pp. 585-593.
- [3] CIG, "Nuovo collegamento ferroviario Torino-Lione", Rapporto del Gruppo di Lavoro Tunnel, 163 pp.
- [4] SCHNEIDER E., JOHN M. and BRANER R., BBT 2007, BBT 2007, "Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken", Innsbruck University Press, 2007, 231pp
- [5] SANDRONE F., DUDT. J. P., LABIOUSE V. and DESCOEUDRES F., "Analysis of delayed convergences in a carbon zone of the Lötschberg tunnel", Eurock 2006. Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics. Taylor & Francis Group, London, 2006, pp. 351-356.
- [6] CANTIENI L. and ANAGNOSTOU G., "On the variability of squeezing in tunnelling", 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. Taylor & Francis Group, London, 2007, pp. 983-986.
- [7] BONINI M., DEBERNARDI D., BARLA M. and BARLA G., "The mechanical behaviour of clay shales and implications on the design of tunnels". Rock Mech. Rock Engng. Online First, 2007.

- [8] BARLA G., BARLA M., BONINI M. and DEBERNARDI D., "Lessons learned during the excavation of the Saint Martin La Porte access gallery along the Lyon-Turin Base tunnel". BBT 2007, Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken. Innsbruck University Press, 2007, pp. 45-52.
- [9] BARLA G., "Tunnelling under squeezing rock conditions", Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling, D. Kolymbas editor. 2002, pp. 169-268.
- [10] HOEK E., "Big tunnels in bad rock-2000 Terzaghi Lecture", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 127, no. 9, September 2001, pp. 762-740.
- [11] BARLA G., "Large size tunnels excavated full face in difficult conditions. Invited Lecture", Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg, Tagungsband Zum Symposium Geologie Alptransit, Zürich, 26-28 September 2005, vdf Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich, 2006, pp. 275-286.
- [12] SCHUBERT W., "Dealing with squeezing conditions in Alpine tunnels", Rock Mech. Rock Engng. vol. 29, 3, pp. 145-153.
- [13] KOVARI K., "Method and device for stabilizing a cavity excavated in underground construction", US Patent Appl. 20050191138, 2005.
- [14] THUT A., NATEROP D., STEINER P., and STOLZ M., "Tunnelling in squeezing rock-yielding elements and face control", 8th International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, Ljubljana, 2006.
- [15] BARLA G. and PANET M., "Avis sur les conditions de soutènement de la descenderie de Saint Martin La Port dans les Schiste Houiller", Rapport interne LTF, 2006.
- [16] SULEM J., PANET M. and GUENOT A., "Closure analysis in deep tunnels", International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, (1987), vol. 24-3, pp. 145-154.

Sommaire

MÉTHODES INNOVATRICES POUR LA CONSTRUCTION DE TUNNELS DANS LES ROCHES POUSSANTES

Les récentes innovations dans les systèmes de support pour le contrôle des déformations sont en train de permettre aux entreprises contractées d'accroître la vitesse d'avancement aussi dans des conditions difficiles de creusement caractérisées par des masses rocheuses fortement poussantes. Ces systèmes ont été mis à point et testés dans des tunnels dans lesquels des systèmes de creusement conventionnelles avaient été adoptés. La descenderie de Saint Martin La Porte appartenant au tunnel ferroviaire de base Lyon-Turin est présentée comme cas d'étude afin d'illustrer quelques unes de ces solutions innovatrices, appliquées avec succès dans le creusement dans des masses de roches poussantes, comme la formation du Carbonifère.

Inhaltsübersicht

INNOVATIVE TUNNELBAUVERFAHREN DURCH VORSPRINGENDEN GESTEINEN

Neue Tragsystemen, die die Fähigkeit der Formänderungskontrolle besitzen, erlauben höhere Tunnelbohrgeschwindigkeiten, auch in schweren Ausgrabungszuständen, wie durch sehr vorspringenden Gesteinablagerungen. Diese Systemen wurden in Tunnel entwickelt und geprüft, in denen traditionelle Bohrsystemen angenommen worden waren. Der Abfahrtstunnel Saint Martin wird als Forschungsfall gewählt um einigen dieser Lösungen vorzustellen; dieser Tunnel ist Teil des Basistunnel der NBS Lyon-Turin. Die vorgenannte Lösungen wurden mit Erfolg in der Ausgrabung durch vorspringenden Gesteine benutzt, auch im Fall von kohlenhaltigen beschichteten Felsen.