

La galleria "Fleres" della nuova linea ferroviaria Verona-Brennero: risoluzione di alcune problematiche progettuali particolari

Prof. Ing. Pietro LUNARDI

SOMMARIO - L'articolo tratta gli aspetti progettuali e costruttivi della galleria "Fleres" della nuova linea ferroviaria Verona-Brennero, attualmente in avanzata fase di realizzazione, con particolare riguardo alle problematiche di attraversamento del contatto tettonico tra l'"Unità Austroalpina" e l'"Unità Pennidica", che hanno imposto lo studio di una variante progettuale.

1. Generalità

Alla fine del 1983, l'allora Ente *Ferrovie dello Stato* decise di intervenire sulla linea Verona-Brennero, con particolare attenzione alla tratta Bolzano-Passo del Brennero, dove le condizioni geomorfologiche ponevano il tracciato esistente sotto il pericolo della caduta di massi e valanghe, nonché, in certi punti, sotto l'insidia delle esondazioni del fiume Isarco.

Terminata la fase di studio e di valutazione, lo stesso Ente affidò al Consorzio COMER S.p.A. la concessione di prestazioni integrate per la progettazione esecutiva e la realizzazione costruttiva delle opere di variante. Il Consorzio, che è attualmente costituito dalle imprese Adanti S.p.A. di Bologna, Cariboni Paride S.p.A. di Colico (Lecco), Mondelli S.p.A. di Milano, Rabbiosi p.i. Giuseppe S.p.A. di Bolzano, Solazzi S.p.A. di Fano (Pesaro), ha a sua volta affidato la progettazione delle tratte in sotterraneo alla Rocksoil S.p.A. di Milano.

Le gallerie previste, nelle diverse tratte di variante, sono quattro:

- la Domegliara-Dolcè (Vr), lunghezza 4.300 m circa;
- la Cardano-Prato Tires (Bz), lunghezza 3.980 m circa;
- la Prato Tires-Ponte Gardena (Bz), lunghezza 13.230 m circa;
- la Fleres-Terme di Brennero (Bz), lunghezza 7.230 m circa, oggetto della presente nota, il cui tracciato (fig. 1), fortemente condizionato da vincoli topografici (necessità di innalzamento di quota) e politici (impossibilità di scavare sotto il territorio austriaco), attraversa, in successione da Sud verso Nord, le Unità Alpine, una zona di transizione fortemente tettonizzata e le Unità Pennidiche.

Per aumentare le scarse conoscenze disponibili all'epoca circa le caratteristiche geomeccaniche dei terreni da attraversare (fig. 2), essendo estremamente difficile una previsione geologica di dettaglio, data la complessa struttura regionale e le potenti coperture, si decise di far precedere lo scavo della galleria da un cunicolo esplorativo. Questo è stato realizzato per mezzo di una fresa a testa

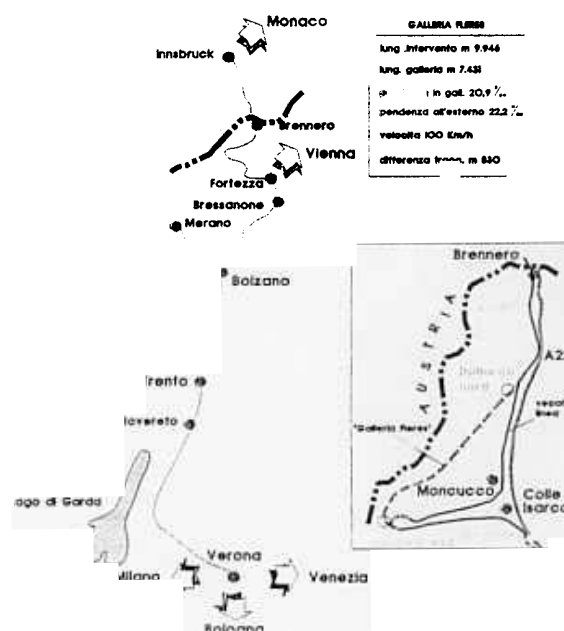


Fig. - Nuova linea ferroviaria Verona-Brennero. Schema planimetrico del tracciato di variante.

rotante (T.B.M.) del diametro di 3,5 m. I lavori d'avanzamento, incominciati nel gennaio 1987, sono stati sospesi nel maggio del 1988 a progressiva 5.248 m dall'imbocco Sud (Fleres), allorché fu raggiunta la zona di transizione, caratterizzata da un pessimo comportamento tenso-deformativo dell'ammasso roccioso, tale da impedire la prosecuzione del cunicolo.

2. Caratteristiche geologiche e geostrutturali dell'ammasso roccioso

Il tracciato della galleria "Fleres" (di seguito così denominata per brevità) ha, come abbiamo detto, una lunghezza complessiva di 7.230 m, con una pendenza media del

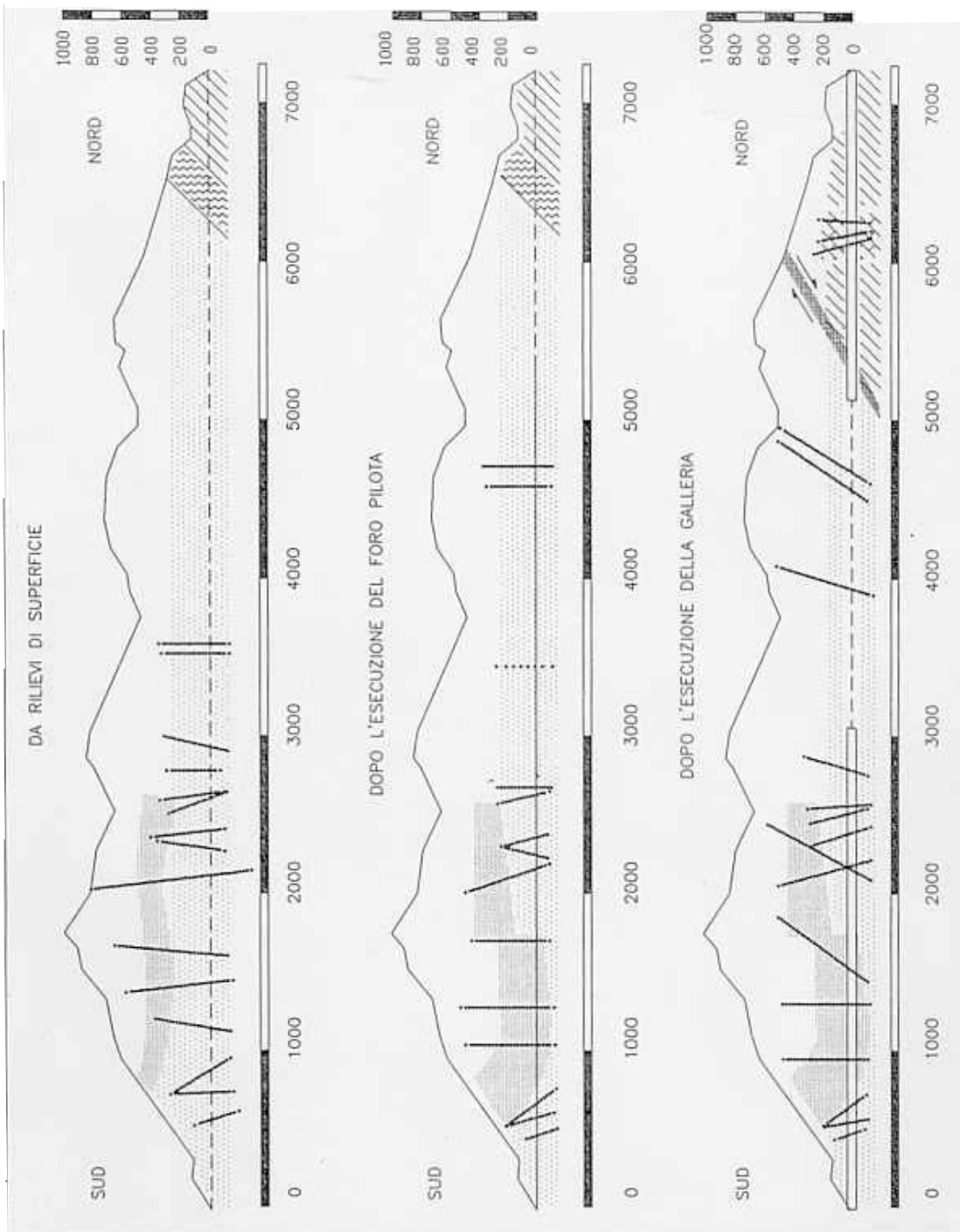
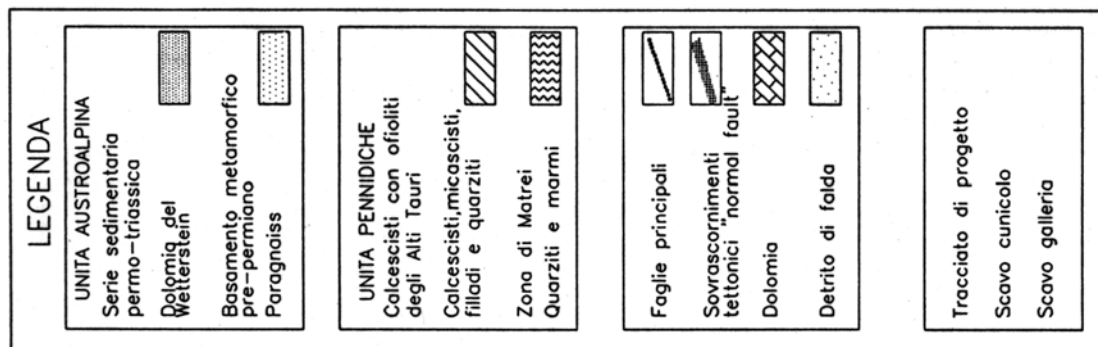


Fig. 2 - Profili geologici della galleria "Fieres"

2,1% ed un percorso generalmente orientato verso SSW-NNE (fig. 1).

La situazione geologica della zona interessata è tra le più complicate delle Alpi Centro Orientali; qui, infatti, il tratto iniziale del Fiume Isarco erode il contatto tettonico tra le formazioni della cosiddetta "Finestra degli Alti Tauri", appartenenti alle Unità Pennidiche (poste principalmente in sinistra orografica), e quelle delle Unità Alpine (destra orografica).

In estrema sintesi si può affermare che la caratteristica principale è la tettonica causata dal sollevamento della "Finestra degli Alti Tauri" (di circa 30 km di lunghezza!) durante le fasi compressive dell'orogenesi alpina.

Di conseguenza, come già accennato, la galleria ha attraversato parti limitrofe al contatto tra le due importanti strutture caratteristiche delle Alpi Centrali: la cosiddetta "Unità Austroalpina" e quella denominata "Pennidica".

Nell'area interessata, la prima di queste unità è costituita da litotipi paragneissici del Basamento metamorfico prepermiano e dalla Dolomia del Wetterstein appartenente alla Serie sedimentaria permotriassica in sovrapposizione stratigrafica. Questi terreni erano generalmente classificabili, in conformità alle abitudini in uso all'epoca dell'indagine, come classi III, IV e V secondo BIENIAWSKI.

L'Unità Pennidica, invece, che affiora per abbondanti porzioni in prossimità dell'Imbocco Nord a Terme di Brennero, in destra orografica del fiume Isarco, è essenzialmente costituita dalla formazione denominata "Calcescisti con Ofioliti degli Alti Tauri", composta da calcescisti, micascisti, filladi e quarziti ed era classificabile nelle classi II e III secondo BIENIAWSKI.

La realizzazione del cunicolo pilota, sospesa, come abbiamo detto, a prog. 5.248 m in seguito ai rilevanti fenomeni tenso-deformativi che ne causavano in breve tempo la chiusura, ha potuto interessare unicamente i terreni appartenenti alla succitata "Unità Austroalpina".

Le informazioni ricavate dallo scavo stesso, opportunamente integrate con quelle ottenute dai rilievi di superficie e dalla bibliografia, hanno permesso di elaborare un nuovo e più accurato profilo geologico di previsione (fig. 2).

Era quindi noto che, durante lo scavo della galleria, si sarebbe attraversato il contatto tra le due strutture sopra descritte. Il punto esatto e le caratteristiche sia litologiche sia geomeccaniche della fascia di transizione restavano però avvolti, anche dopo l'esecuzione del foro pilota, da notevole incertezza, anche a fronte dell'impossibilità di integrare le conoscenze con indagini dirette e/o prospezioni geofisiche, per le elevate coperture e le difficoltà d'accesso alla superficie esterna.

Le informazioni disponibili facevano presumere che tale contatto, di natura tettonica, fosse "riempito" dalla cosiddetta "Zona di Matri", un insieme caotico ("melange tettonico") di quarziti, marmi, argilliti ed altri litotipi in frazioni minori. L'eterogeneità dei litotipi, descritta nella

bibliografia esistente, e i rilevamenti effettuati nelle aree affioranti rendevano assolutamente difficile prevedere il comportamento allo scavo di tale facies.

Dopo il recupero della fresa, ritenendo che le informazioni acquisite con il cunicolo pilota fossero comunque sufficienti per la progettazione e la realizzazione della galleria, nei primi mesi del 1991, ad opera dell'Impresa Cariboni, furono iniziati, dall'Imbocco Sud (lato Fleres), i lavori d'allargamento dello stesso e, a partire dall'Imbocco Nord (lato Terme di Brennero), quelli di scavo, a piena sezione, della galleria.

3. Aspetti progettuali

Sulla base del comportamento tenuto dall'ammasso roccioso durante lo scavo del foro pilota, il tracciato della galleria Fleres è stato suddiviso in tratte a comportamento tenso-deformativo omogeneo.

In particolare, si è distinto tra:

- zone dove la resistenza d'ammasso si era dimostrata superiore alle sovratensioni indotte nel terreno dall'apertura del foro pilota, che perciò aveva potuto avanzare sempre in campo elastico;

- zone dove la resistenza d'ammasso si era dimostrata inferiore a dette sovratensioni. In tali condizioni la roccia al contorno dello scavo si rompe formando una fascia di materiale a comportamento plastico che tende a convergere più o meno marcatamente verso il centro dello stesso. All'interno di queste zone si sono ulteriormente distinte le tratte in cui il fenomeno di rottura era avvenuto ad una certa distanza dal fronte di scavo, dando modo di stabilizzare il foro pilota senza interrompere l'avanzamento, da quelle in cui rilasci cospicui e forti convergenze si erano manifestati immediatamente in prossimità del fronte.

Tenendo conto anche dei seguenti fattori:

- condizione geostrutturale e idrogeologica dell'ammasso;

- presenza di rilasci e loro dimensioni;

- presenza di fenomeni di deformazione della cavità;

- entità e modalità di applicazione degli interventi di stabilizzazione operati durante lo scavo del foro pilota;

- parametri geotecnici ricavati da prove in sito o di laboratorio.

Si sono individuate le seguenti tre categorie di comportamento:

Categoria 1

- ammasso compatto o poco suddiviso, con fratturazione debolmente influente sulle sue caratteristiche geomeccaniche;

- rilasci, nel foro pilota, sporadici e localizzati, di volume contenuto e comunque sempre inferiore al metro cubo;

- fenomeni di convergenza quasi assenti;
- possibile presenza di acqua secondo venute di modesta entità e comunque non accompagnate da rifluimenti di materiale solido;
- necessità di interventi sporadici di stabilizzazione del foro pilota, quali: bulloni ad ancoraggio puntuale tipo Ankrall in numero di 0,5+2 al ml, rete elettrosaldata fino a 2 m² a ml, spritz-beton fino a circa 2+3 cm di spessore.

Il comportamento tenso-deformativo del materiale che ricade in questa categoria è in campo elastico, in quanto la resistenza d'ammasso è superiore alle tensioni derivanti dall'apertura della cavità, in relazione alla copertura in gioco.

Categoria 2

- ammasso da mediamente a molto suddiviso, con fratturazione considerevolmente influente sulle sue caratteristiche geomeccaniche;
- rilasci, nel foro pilota, frequenti, di dimensioni anche maggiori di 1 m³;
- fenomeni di convergenza di entità non elevata;
- possibili venute d'acqua, eventualmente accompagnate da modesti rifluimenti di materiale solido;
- necessità di interventi sistematici di stabilizzazione del foro pilota, quali: bulloni ad ancoraggio puntuale tipo Ankrall in numero di 2+4 al ml, rete elettrosaldata fino a 5 m² al ml, spritz-beton fino a circa 5 cm di spessore, centine tipo UNP 100 nel numero di 0,3 al ml.

Il comportamento tenso-deformativo del materiale che ricade in questa categoria può essere sia in campo elastico sia in campo plastico.

In entrambi i casi, però, la cavità necessita di interventi di contenimento che evitino rilasci e crolli. Gli interventi, sia nel caso di comportamento elastico sia nel caso di rottura della roccia al contorno del cavo, possono venir applicati nella zona dove ancora si risente dell'effetto del fronte, il quale si mantiene stabile a breve termine.

Categoria 3

- ammasso intensamente suddiviso, con fratturazione fortemente influente sulle sue caratteristiche meccaniche;
- rilasci, nel foro pilota, diffusi e voluminosi (frequentemente maggiori di 1 m³), possibilità di significativi franamenti;
- fenomeni di convergenza di forte entità;
- possibili venute d'acqua, anche accompagnate da rifluimenti, talora cospicui, di materiale solido;
- necessità di interventi sistematici di stabilizzazione del foro pilota, quali: bulloni ad ancoraggio puntuale tipo Ankrall o continuo tipo Swellex in numero di 5+7 al m, rete elettrosaldata fino a 11 m² al m, spritz-beton fino a circa 10 cm di spessore, centine tipo UNP 160 nel numero di 1,3 al m, blindatura continua mediante "liner plates".

Il comportamento tenso-deformativo del materiale che ricade in questa categoria è decisamente in campo plastico: già in prossimità del fronte di scavo si osservano forti convergenze e voluminosi rilasci. Il fronte può essere interessato da fenomeni d'instabilità, dal momento che la rottura dell'ammasso roccioso si verifica anche nella zona antistante lo stesso.

3.1. Progettazione delle sezioni tipo

La realizzazione di gallerie all'interno di ammassi rocciosi fortemente "spingenti" (le cui caratteristiche meccaniche in rapporto alle tensioni originarie comportano la formazione d'una importante fascia di terreno a comportamento plastico al contorno della cavità) come nel caso di alcune tratte della galleria Fleres, è praticabile solo attraverso una perfetta calibratura ed una corretta esecuzione temporale delle opere di stabilizzazione di 1^a fase e definitive.

Infatti:

- se il getto del rivestimento definitivo avviene troppo a ridosso del fronte, questo risulta sollecitato, ancor prima della maturazione, da spinte intense che ne possono produrre il collasso;

- se il getto dello stesso avviene a eccessiva distanza dal fronte, gli interventi di stabilizzazione di 1^a fase non sono in grado, da soli, di contenere in maniera adeguata i fenomeni deformativi. Di conseguenza, si producono:

- collasso, dislocazione ed allentamento della roccia al contorno della galleria, con conseguente costituzione di un pessimo sottofondo per il futuro rivestimento (che sarà sollecitato in misura inversamente proporzionale alle caratteristiche di deformabilità della roccia);

- convergenze di entità tale da costringere poi a ribattere lo scavo;

- rotture e lesioni nel prerivestimento, con possibilità di franamenti e rilasci di materiale.

In entrambi i casi il rivestimento definitivo sarebbe sottoposto a forti carichi "di montagna" e gravitativi, non contenibili incrementandone semplicemente lo spessore. Infatti, un anello di calcestruzzo di grosso spessore è estremamente rigido e fragile, quindi suscettibile di lesionarsi facilmente per effetto delle considerevoli deformazioni del contorno della galleria e delle scadenti caratteristiche del sottofondo.

In considerazione di ciò, i principi informativi sui quali si è basata la progettazione delle sezioni tipo sono stati:

1. avanzamento sempre a piena sezione. Infatti, avanzare a sezione parzializzata, specie in condizioni tenso-deformative difficili, invece di migliorare la situazione spesso l'aggrava poiché:

- s'introduce un'ulteriore, delicatissima fase esecutiva: quella di ribasso;

– a meno di non avere un cantiere estremamente corto con tutti i problemi conseguenti, si è costretti ad allontanare eccessivamente dal fronte le lavorazioni di chiusura dell'anello di rivestimento;

– si dà modo alla roccia di decomprimersi e allentarsi, per cui i successivi scavi di allargo e ribasso avvengono entro un materiale che ha perso gran parte della resistenza originaria, probabilmente alterato dalle percolazioni d'acqua, che può aver subito eventuali processi di rigonfiamento, ecc.;

2. contenimento dell'alterazione e della decompressione della roccia al contorno dello scavo mediante l'applicazione immediata di efficaci interventi di contenimento e/o

precontenimento del cavo (spritz-beton fibrorinforzato, tralicci reticolari, bulloni ad elevato limite di snervamento, tubi di vetroresina al fronte), dimensionati per essere in grado di incassare una significativa quota parte delle convergenze del cavo senza crollare;

3. realizzazione di un rivestimento definitivo di calcestruzzo, completo di arco rovescio, di spessore ridotto e quindi più flessibile rispetto a quelli impiegati tradizionalmente.

Così operando è possibile gettare il rivestimento definitivo di calcestruzzo ad una corretta distanza dal fronte, dando modo all'ammasso di sfogare buona parte delle spinte.

In definitiva, si sono progettate le seguenti sezioni tipo (fig. 3):

- sezione tipo A, associata alla categoria di comportamento 1, composta da un semplice rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato di 15 cm di spessore (di cui 10 fibrorinforzati con fibre in acciaio trafilato ad aderenza migliorata) + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di 90 cm di spessore chiuso con arco rovescio;

- sezione tipo B1, associata alla categoria di comportamento 2, consistente in un rivestimento di 1^a fase di calcestruzzo proiettato di 40 cm di spessore (di cui 30 fibrorinforzati con fibre d'acciaio trafilato ad aderenza migliorata), armato con tralicci reticolari in barre d'acciaio + un rivestimento definitivo di calcestruzzo di 90 cm di spessore chiuso con arco rovescio;

- sezioni tipo B2, B3 e B4, associate alla categoria di comportamento 3, che prevedono di realizzare, al contorno del cavo, una fascia di roccia armata mediante bulloni radiali disposti con intensità crescente, oltreché un manto di calcestruzzo proiettato armato con tralicci reticolari in barre d'acciaio. La sezione tipo B4 prevede, in più, di associare al consolidamento radiale un consolidamento longitudinale del nucleo di terreno al fronte della galleria, da realizzarsi con tubi di vetroresina.

Tutte le sezioni tipo descritte, ad eccezione della B4, sono applicabili sia nella tratta di galleria dove è stato realizzato il foro pilota,

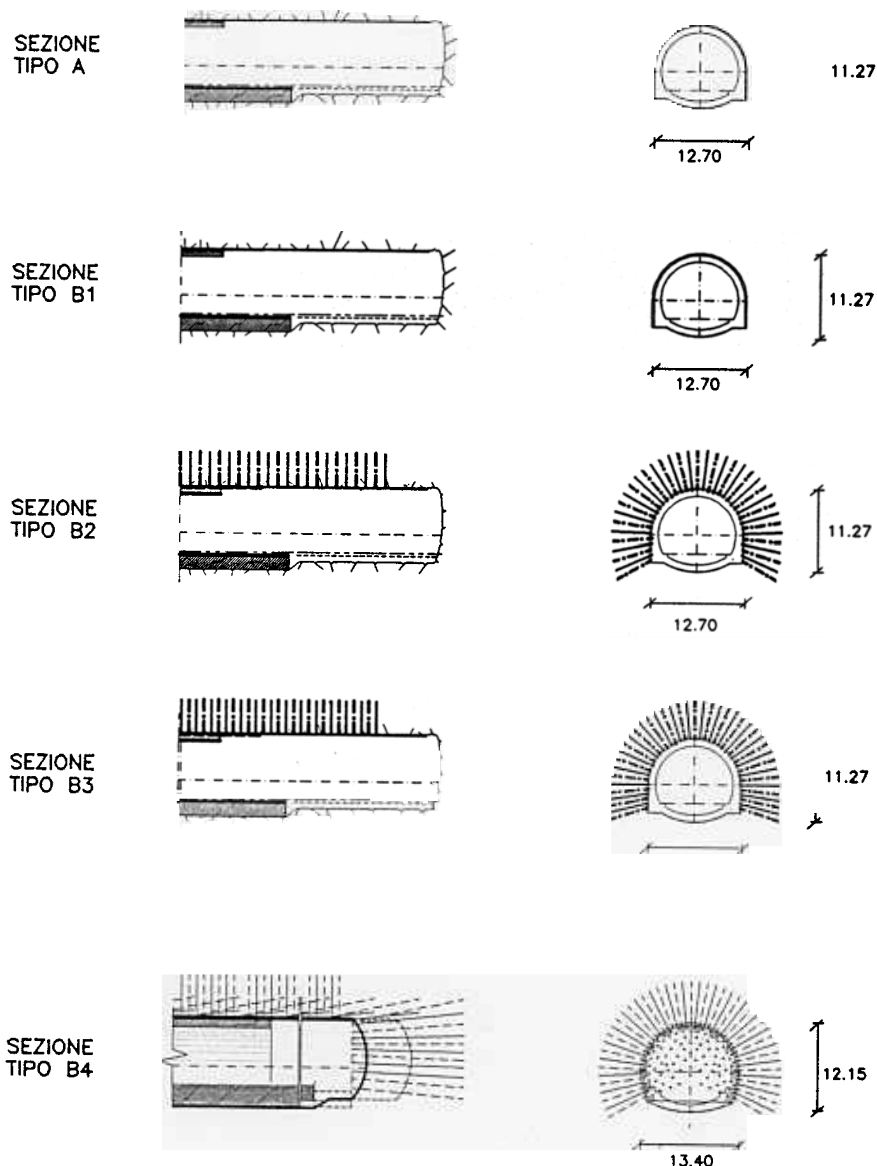


Fig. 3 – Sezioni tipo per la galleria "Fleres"

sia nell'altra (oltre progr. 5.248 m dall'Imbocco Sud).

3.2. Dimensionamento delle sezioni tipo

Il dimensionamento delle sezioni tipo è stato effettuato:

- con il metodo delle linee caratteristiche [1] per quel che concerne le opere di stabilizzazione di 1ª fase;
- mediante analisi computerizzata del manufatto (schematizzato in conci collegati in serie con supporti elastici discretizzati nei nodi) per il rivestimento definitivo di calcestruzzo.

I calcoli sono stati eseguiti in tre fasi distinte:

– in una prima fase, mettendo a frutto i risultati delle misure eseguite da foro pilota, si sono tarati, attraverso una procedura di back-analysis, i valori dei parametri di resistenza e deformabilità da assumere per il materiale costituente l'ammasso roccioso;

– in una seconda fase, considerando la sezione di scavo definitiva, si è valutata la pressione agente sui rivestimenti, tenendo conto delle deformazioni verificatesi nel terreno a seguito della realizzazione del cunicolo.

– nella terza ed ultima fase, tenendo conto dei contributi dei vari interventi di stabilizzazione previsti, si è valutata la pressione totale agente sui rivestimenti definitivi di calcestruzzo, provvedendo poi all'esecuzione dei calcoli di verifica tramite l'analisi computerizzata di cui sopra.

È interessante, in particolare, per quanto riguarda la seconda fase, illustrare sinteticamente la procedura seguita.

Considerando, tra le linee caratteristiche del foro pilota, quella dei punti, all'interno dell'ammasso roccioso, ubicati sul contorno della futura galleria finale e quella della galleria finale stessa, viene letto, in corrispondenza della pressione di equilibrio esercitata dalle opere di stabilizzazione del cunicolo, lo spostamento radiale δ_{B2} del futuro contorno della galleria finale, nonché la pressione radiale di contenimento P_2 fornita dal nucleo di terreno (attraversato dal cunicolo pilota) al fronte d'avanzamento di quest'ultima (fig. 4). È così possibile valutare la resistenza del mezzo nucleo di terreno al fronte della galleria finale e, successivamente, progettare le opere di stabilizzazione della stessa seguendo la procedura normale.

4. Aspetti esecutivi

4.1. Lo scavo della galleria ed il conseguente adeguamento dello studio geologico

Come già accennato nel paragrafo 2, i lavori di scavo della galleria vera e propria furono iniziati nei primi mesi del 1991: a partire dall'Imbocco Sud (lato Fleres) quelli d'allargamento del foro pilota, a partire da quello Nord (lato Terme di Brennero) quelli d'avanzamento a piena sezione.

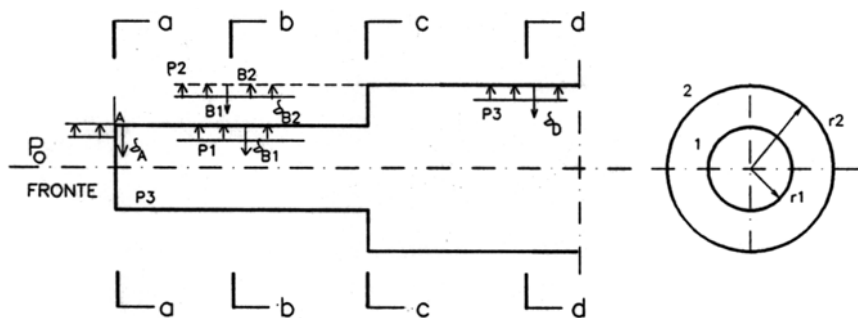
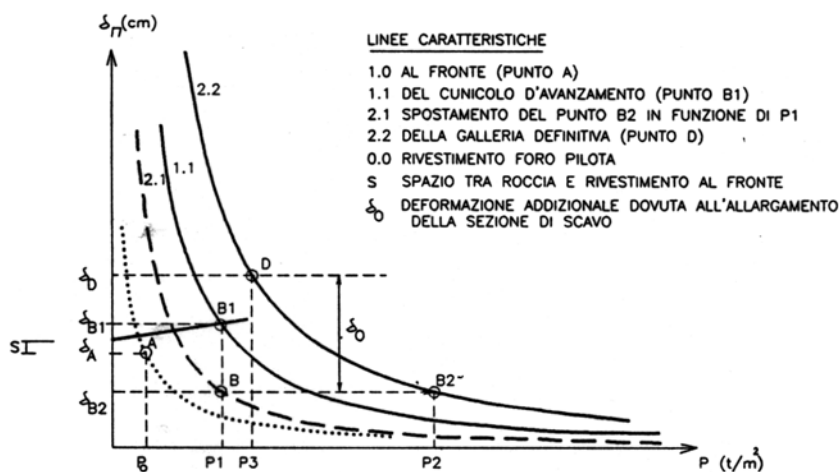


Fig. 4 - Linee caratteristiche: criterio per la valutazione dell'effetto della presenza del cunicolo pilota sulle pressioni finali agenti sulle opere di rivestimento della galleria.

Nel seguito si illustreranno solo quelle "sorprese" geologiche e strutturali che hanno influito negativamente sull'andamento dei lavori al fronte Nord e che sono all'origine della peculiarità di questa galleria e delle soluzioni progettuali adottate.

Mentre l'attraversamento della formazione dei Calcescisti degli Alti Tauri non aveva incontrato difficoltà di rilievo, a partire da progressiva 1.730 m da Nord (5.500 m da Sud) si cominciava a riscontrare un progressivo peggioramento delle condizioni dell'ammasso, costituito dalle filladi sommitali di detta formazione.

Qualche sintomo d'instabilità del fronte di scavo, la comparsa dei primi accentuati fenomeni di convergenza, unitamente alla tessitura sempre più cataclastica delle rocce ed alla consapevolezza di essere con il fronte d'avanzamento oramai a soli 250 m circa dalla progressiva dove era stato necessario sospendere l'avanzamento del cunicolo esplorativo, fecero ipotizzare l'imminente ingresso nella "Zona di Matrei". Solo dopo aver raggiunto, nel giugno 1994, l'estremità Nord del cunicolo pilota si è potuto stabilire che:

- nella fascia di contatto la cosiddetta "Zona di Matrei" era assente;
- ad esclusione di una limitatissima fascia di riempimento limoso, dello spessore di circa 1,5 m (a progr. 1.845 m circa da Nord), il contatto tra l'unità settentrionale (Pennidica) e quella meridionale (Austroalpina) avveniva in maniera pressoché diretta;
- e definire, una volta per tutte, il profilo geologico corretto (fig. 2).

Le conseguenze di ciò sono state assai negative perché l'assenza della fascia eterogenea di transizione del "Matrei" aveva determinato l'estrema cataclaszizzazione dei mate-

riali nelle porzioni contigue delle due strutture principali, per un'estensione totale di circa 500 m e con effetti più marcati nell'Unità Austroalpina, decisamente più rigida e fragile di quella pennidica.

4.2. Difficoltà incontrate a causa delle ingenti spinte tettoniche

Il cunicolo pilota, per le note vicende legate all'interruzione dell'avanzamento, aveva evidenziato un lineamento tettonico e quindi un campo tensionale notevolmente alterato, tale da implicare forti ripercussioni di carattere statico in fase d'allargo; la sua presenza, però, non aveva consentito di comprendere in maniera esaustiva le modalità d'evoluzione della risposta deformativa dell'ammasso: il solo constatare che il cunicolo era completamente collassato, infatti, non dava informazioni sulla velocità con cui ciò era accaduto dopo l'arretramento della fresa, quindi non consentiva di avere dati sufficienti per valutare il tempo di risposta dell'ammasso all'apertura del cavo.

L'aspetto imprevedibile di questo attraversamento di faglia nella galleria di Fleres, infatti, è stata proprio l'evoluzione quantitativa e soprattutto temporale delle convergenze, che ha imposto lo studio di una variante progettuale con soluzioni tecniche innovative, oggetto di discussione del prossimo paragrafo.

Il progressivo decadimento delle condizioni dell'ammasso riscontrato a partire dal progr. 1.730 m da Nord e la presenza di valori di copertura significativi in relazione al contesto geostrutturale, inducevano infatti, nel terreno, uno sviluppo deformativo in campo marcatamente plastico, con un'evoluzione dei valori di convergenza e di veloci-

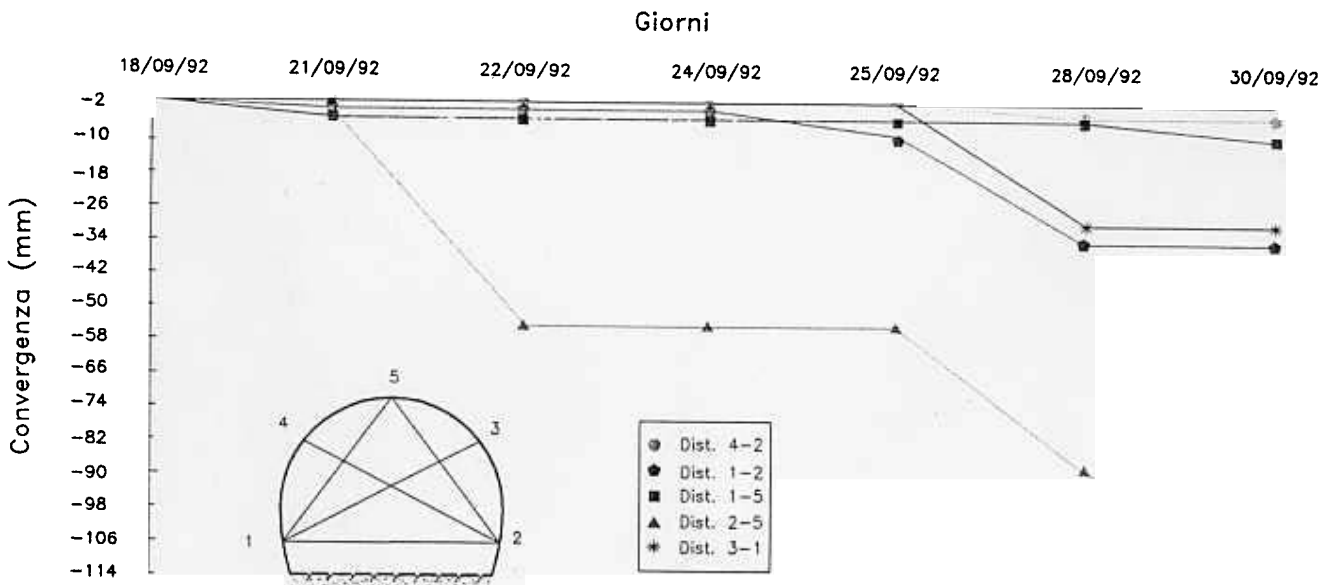


Fig. 5 - Diagramma delle convergenze misurate a progr. 1880 m.

tà della stessa che, a partire da progr. 1.810 m circa, erano notevolmente superiori rispetto a quelli riscontrati in precedenza. Le convergenze, vistosamente asimmetriche, si sviluppavano in maniera estremamente rapida ed incontrollabile già in prossimità del fronte di scavo (oltre 65 cm di deformazione diametrale misurati a progressiva 1.900 m da Nord e sviluppatasi per la maggior parte in due sole settimane), con picchi iniziali di velocità superiori agli 8 cm/giorno, pur in presenza di sezioni tipo B4 applicate su una sezione di scavo parzialmente ridotta (fig. 5).

Di conseguenza, si verificavano rotture diffuse nel rivestimento di 1ª fase di calcestruzzo proiettato, benché armato con tralicci reticolari. Le ingentissime tensioni inducevano una serie di ulteriori danni dalle pesantissime conseguenze tecnico-economiche. Tra questi:

- il restringimento del cavo a misure incompatibili con la rigidità del rivestimento definitivo;

- la necessità di demolire e ripristinare immediatamente intere tratte di rivestimento di 1ª fase (circa 100 m sono stati profilati per ben due volte, a seguito di convergenze complessive di oltre due metri diametrali!);

- il sollevamento di circa 1 m dell'intero arco rovescio (fig. 6) per 90 m di lunghezza.

Il grafico in fig. 7 riassume, quale esempio, la storia deformativa della galleria in corrispondenza alla progressiva 1.890 m da Nord e degli interventi che sono stati di volta in volta eseguiti.

Tutto questo ha comportato una lunga sospensione dei lavori, sia per l'impossibilità di operare in sicurezza, verificandosi continui rilasci di blocchi di calcestruzzo dalle pareti del prerivestimento, sia per poter riconsiderare, dal punto di vista progettuale, gli interventi e le modalità esecutive da applicare per il proseguimento dei lavori.

Risultava evidente, infatti, che i fenomeni deformativi riscontrati non erano compatibili con gli interventi di contenimento e di rivestimento previsti fino a quel momento.

4.3. Criteri generali di progettazione e messa a punto in fase esecutiva

Alla luce di quanto sopra, è stato necessario, come già detto, riconsiderare gli interventi di consolidamento e di

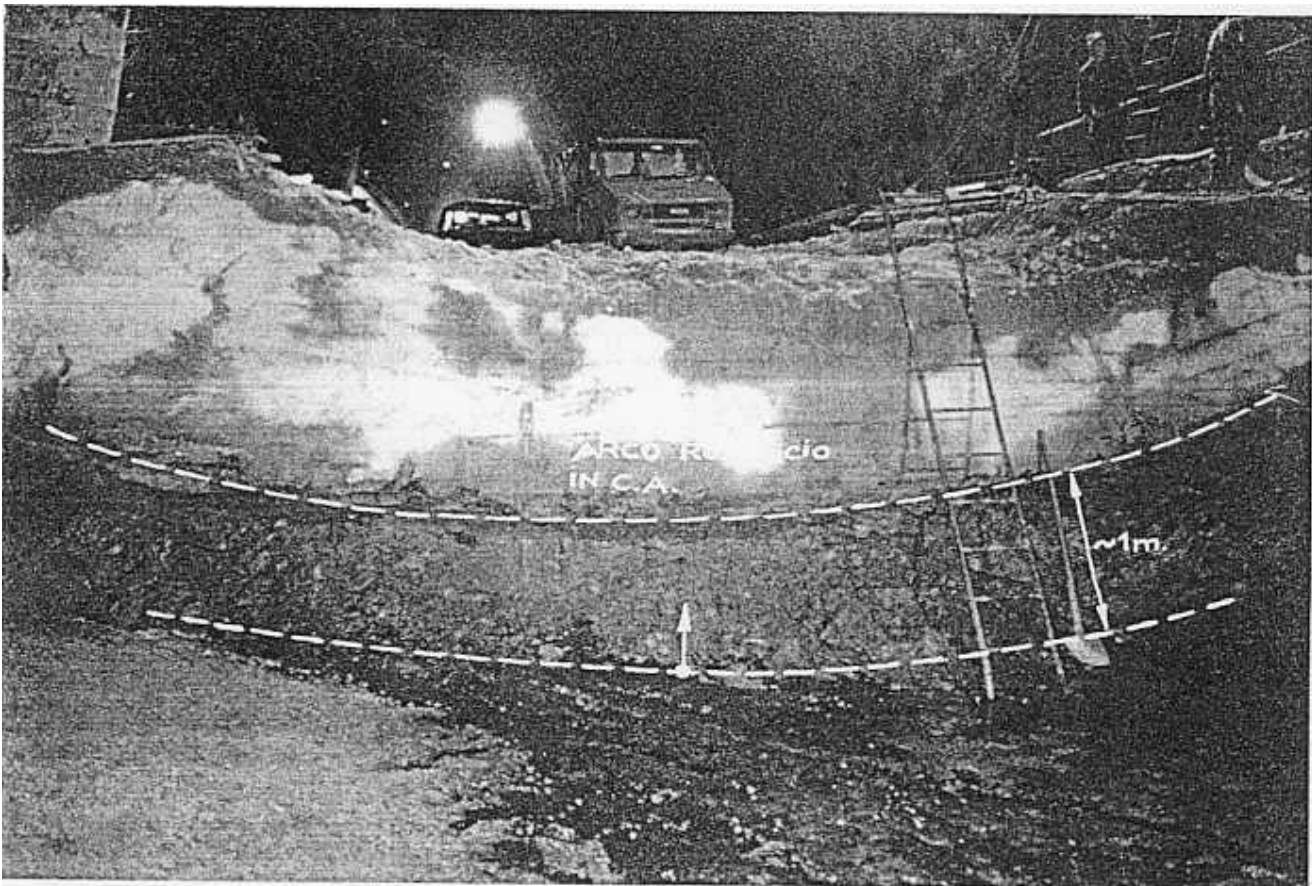


Fig. 6 - Fase di riprofilatura dell'arco rovescio (in c.a. con incidenza del ferro pari a circa 80 kg/m^3) a seguito del sollevamento di circa 1 m prodottosi per effetto delle spinte di montagna.

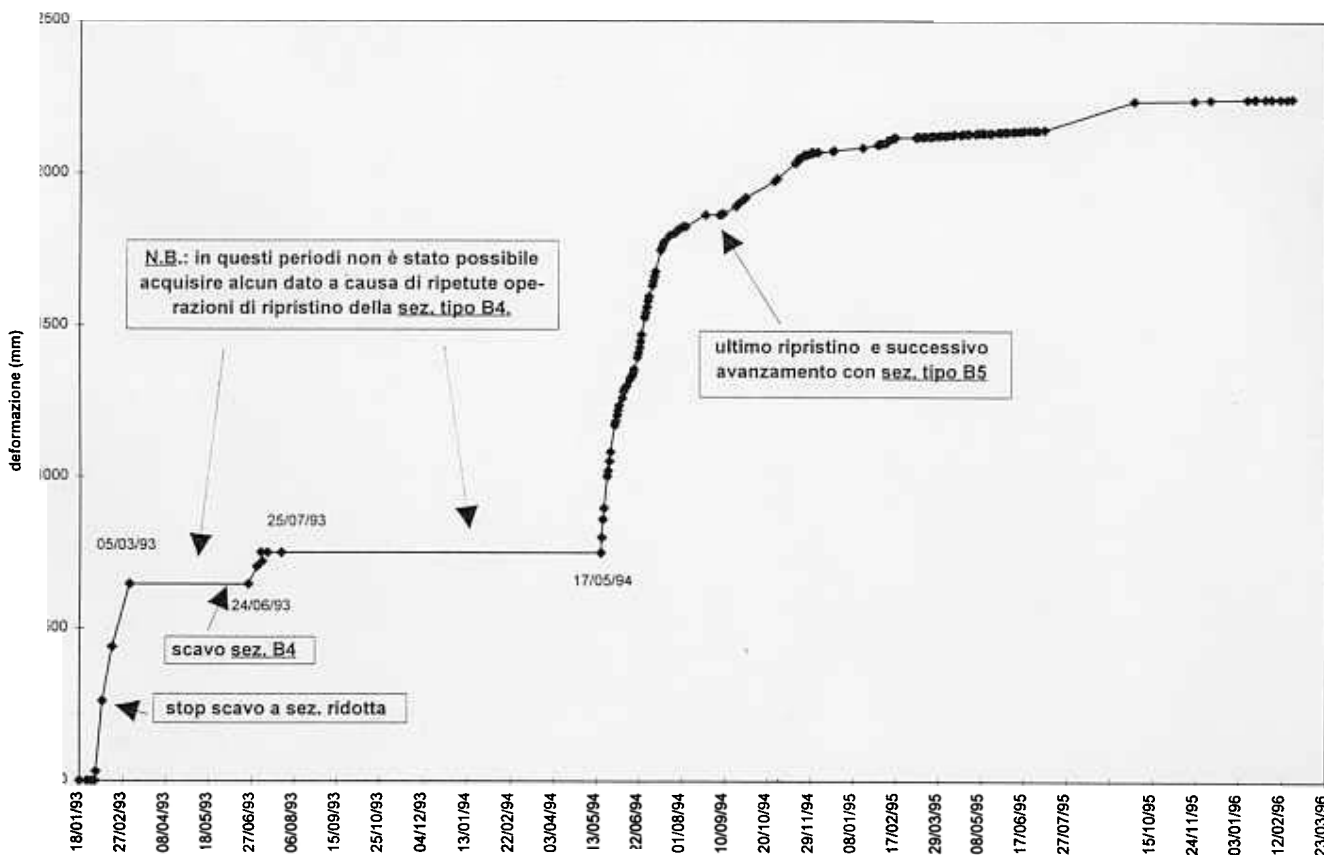


Fig. 7 – Convergenze diametrali e interventi eseguiti alla progr. 1890 m da Nord.

contenimento del terreno impiegati, nonché le modalità esecutive degli stessi, facendo riferimento ad elementi strutturali in grado di assecondare, entro corretti limiti, le deformazioni dell'ammasso.

Elemento fulcro del processo d'adeguamento del progetto è stata la misura e l'analisi delle deformazioni dell'ammasso all'atto dello scavo, effettuate con le stesse metodologie di calcolo e verifica utilizzate per il progetto base.

Anche alla luce dei nuovi dati emersi, la nuova sezione tipo avrebbe dovuto prevedere opere di consolidamento e di contenimento di prima fase, da mettere in opera immediatamente a ridosso del fronte di scavo, che fossero subito in grado di assecondare e regimare le deformazioni della cavità e che solo successivamente fossero in grado di fornire la pressione di contenimento necessaria a stabilizzare la galleria a lungo termine.

Si è progettata, quindi, la sezione tipo B5, che si caratterizza per l'adozione di centine di profilati d'acciaio con giunti scorrevoli "a deformazione controllata", tali da assicurare l'assorbimento delle convergenze del profilo di scavo senza che risulti compromessa l'efficacia statica del rivestimento di 1ª fase.

In definitiva, essa prevede (fig. 8):

- avanzamento a piena sezione, con sovrascavo dimensionato per consentire convergenze radiali di entità massima pari a circa 80 cm. Il valore del sovrascavo viene continuamente verificato mediante analisi numeriche effettuate sulla base dei dati acquisiti con un sistema di rilevamento e restituzione delle convergenze, denominato "sistema ottico", che sarà dettagliatamente illustrato in un apposito paragrafo. Durante questa fase il fronte di scavo verrà profilato a cupola e costantemente protetto con un manto di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato;

- protezione delle pareti di scavo mediante uno strato di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di 20 cm di spessore;



Fig. 8 – Sezione tipo B5 per l'attraversamento della faglia.

- posa, sopra il calcestruzzo proiettato, di una rete elettrosaldada Ø 4 mm, maglia 10x10 cm;
- messa in opera delle centine a deformazione controllata (tipo TH44/58);
- esecuzione della chiodatura radiale costituita da chiodi d'acciaio ad asta cava autoperforanti;
- completamento del rivestimento di prima fase;
- getto delle murette e dell'arco rovescio ad una distanza dal fronte di scavo decisa con continuità in funzione della velocità di convergenza misurata;
- getto del rivestimento definitivo di calotta, anch'esso in funzione della velocità di convergenza misurata.

4.4. Verifiche statiche

Le nuove sezioni tipo sono state verificate con il metodo delle linee caratteristiche.

Si sono calcolate le linee caratteristiche: del nucleo di terreno al fronte di scavo, della cavità in corrispondenza del fronte, della cavità in una sezione lontana dal fronte,

dei rivestimenti e dell'estensione della fascia di terreno a comportamento plastico che si forma al contorno della galleria (fig. 9).

In particolare, la linea caratteristica della cavità in una sezione lontana dal fronte è stata valutata a partire dai parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso, corretti dell'incremento di coesione residua fornito dalla bullonatura radiale al contorno del cavo.

La convergenza già avvenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo è stata valutata in corrispondenza dell'intersezione fra la linea caratteristica della cavità in prossimità dello stesso e quella del nucleo ancora da scavare (≈ 68 cm radiali, per una pressione di mezzo nucleo di circa 40 t/m²).

Si sono quindi tracciate le linee caratteristiche delle opere di stabilizzazione. Tenuto conto del sovrascavo e della presenza delle centine deformabili, che insieme permettono all'ammasso roccioso di deformarsi quasi liberamente per circa 80 cm radiali, si individua in circa 52 t/m² la pressione radiale finale di equilibrio che dovrà essere garantita a lungo termine dalle strutture di rivestimento.

Grazie alla presenza delle centine a deformazione controllata, il coefficiente di sicurezza dopo l'ultimazione del

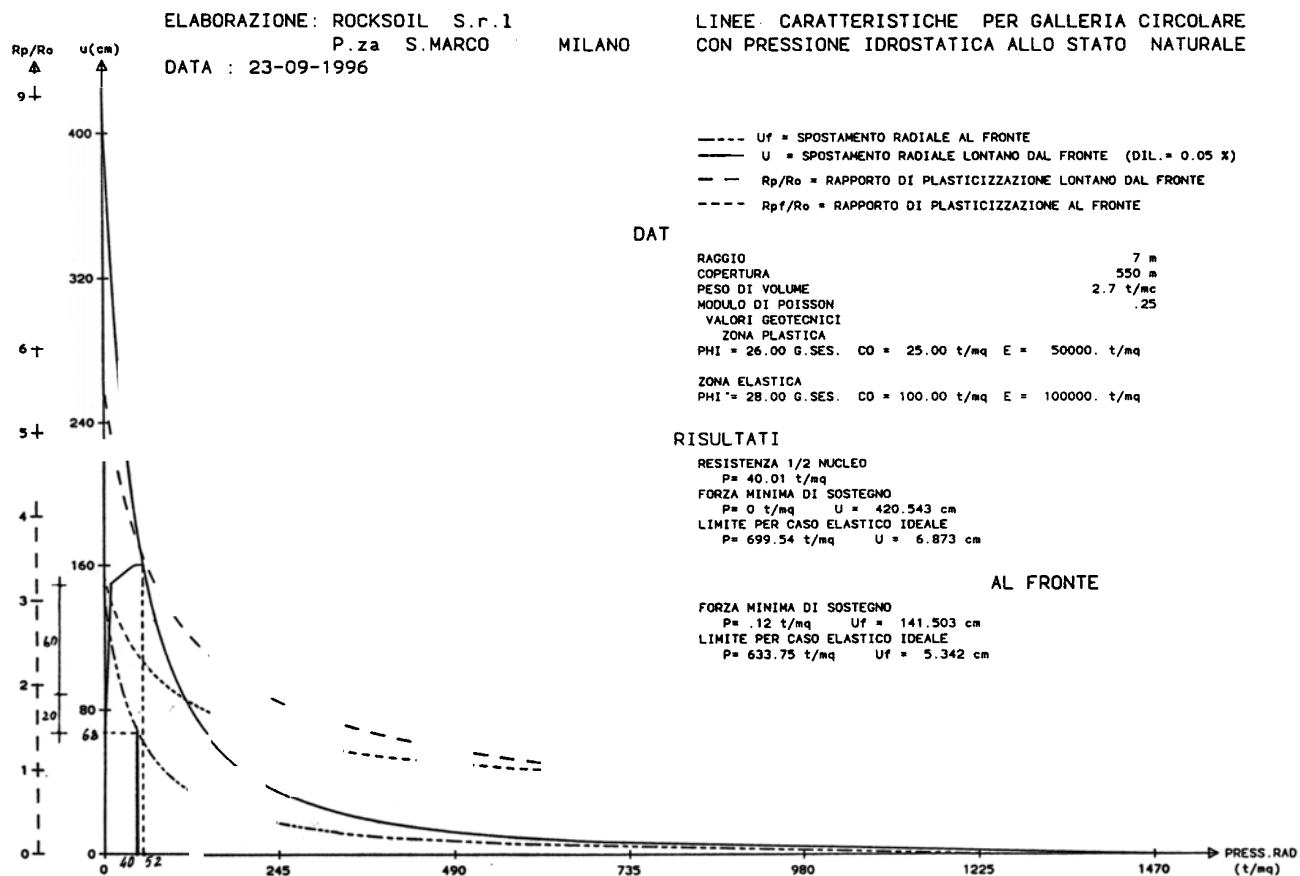


Fig. 9 - Verifiche statiche della sezione tipo B5 con il metodo delle linee caratteristiche.

rivestimento definitivo risulta pressoché indipendente dal valore della deformazione subita da queste prima della messa in opera del rivestimento di 1ª fase di calcestruzzo proiettato.

Ciò dimostra che l'assetto di equilibrio raggiunto a lungo termine è pressoché indipendente dal valore della velocità di deformazione e quindi dalla quota parte di convergenze regimate dalle centine deformabili prima della messa in opera del rivestimento di 1ª fase.

In definitiva, la nuova sezione tipo realizza lo scopo di costituire un rivestimento di 1ª fase in grado di assorbire le deformazioni iniziali della cavità senza oltrepassare il proprio limite di resistenza e, successivamente, assecondarle nei limiti delle proprie caratteristiche di progetto.

Il diagramma convergenza-distanza dal fronte, atteso sulla base delle analisi progettuali, è riportato in fig. 10.

4.5. Ripresa dell'avanzamento al fronte Nord

Contemporaneamente alla ripresa dei lavori con la nuova sezione tipo B5 - d'accordo Impresa, Ente Ferrovie e progettista - si è ritenuto utile interpellare, per un parere tecnico super partes su quanto accaduto, il Prof. Kalmann KOVARI del Politecnico di Zurigo. Egli, dopo due sopralluoghi

sul cantiere compiuti nei primi mesi del 1995, ha affermato che "il progetto fondato sulle sezioni tipo B3 e B4 prendeva correttamente in considerazione i fatti osservati nel cunicolo pilota e le ipotesi sulla situazione geologica e tettonica all'epoca disponibili. I fenomeni di intensa convergenza dell'ammasso roccioso, osservati tra le progressive 5.250 e 5.411 da Sud hanno pochi casi paragonabili al mondo. Essi devono sicuramente essere considerati accidenti geologici imprevedibili. Non potrei trovare alcun errore nelle argomentazioni che hanno portato al progetto come specificato nel contratto n. 2 (sezioni tipo B3 e B4). I progettisti responsabili erano ben preparati ad affrontare terreni spingenti introducendo tutti i necessari elementi di contenimento ed il monitoraggio sistematico del campo. La differenza non è stata nella qualità del fenomeno, ma nella sua intensità. Nessuno, applicando un corretto giudizio ingegneristico, avrebbe potuto prevedere fenomeni di spinta così eccezionali basandosi sulle informazioni accessibili a quel momento. Nel marzo 1992 era corretto ritenere che sezioni tipo B2, B3 e B4 per l'insorgente zona difficile fossero sicure ed economiche".

I lavori d'avanzamento al fronte Nord sono ripresi da progr. 2.057 m nel marzo 1995. L'adozione della nuova sezione tipo con centine deformabili ha permesso di tenere sotto controllo l'evoluzione dei fenomeni deformativi, che si sono sempre mantenuti entro i valori previsti. La produzione media, tenuto conto dei fermi cantiere non causati da motivi tecnici, è stata di circa 20 m/mese. Una volta superata la zona di faglia, a partire dall'1 settembre 1996, i lavori sono proseguiti con la sezione tipo B3. L'allargamento della galleria è terminato il 15 novembre 1996 senza ulteriori difficoltà, facendo registrare convergenze medie diametrali delle pareti di scavo inferiori a 10 cm.

5. Monitoraggio

Come già accennato, il monitoraggio è stato l'elemento centrale del processo d'adeguamento del progetto. Esso è consistito soprattutto nella misura, analisi ed interpretazione sistematica dei fenomeni deformativi manifestatisi in galleria durante l'avanzamento, effettuati con sistemi di rilievo sofisticati, che consentono di controllare le deformazioni in termini di quantità, velocità ed accelerazione. Tutti i dati rilevati e registrati in tempo reale venivano inviati via modem alla società di progettazione, Rocksoil S.p.A. di Milano, per la valutazione.

5.1. Scopo delle misure

Come noto, il rilevamento con restituzione grafica delle misure di deformazione e di tensione in galleria ha lo scopo di controllare l'evoluzione dei fenomeni deformativi del cavo e dello stato di sollecitazione del rivestimento definitivo durante il processo di assestamento tenso-deformativo conseguente all'avanzamento dei lavori di scavo, al fine di consentire, in fase operativa, la verifica e la calibra-

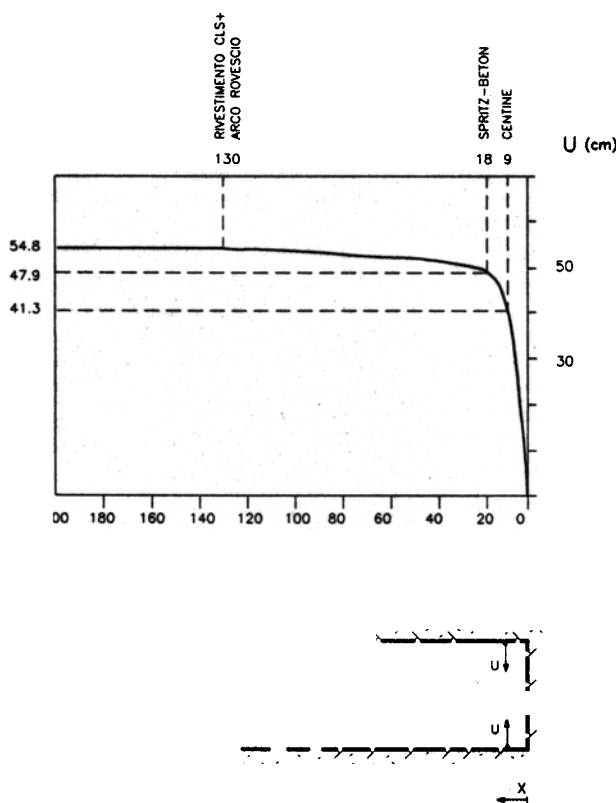


Fig. 10 - Diagramma convergenza radiale - distanza dal fronte.

tura continua degli interventi previsti dal progetto, nonché l'ottimizzazione continua del sistema costruttivo adottato.

5.2. Controllo delle deformazioni

Gli spostamenti assoluti nel piano trasversale alla galleria vengono rilevati sistematicamente mediante la messa in opera di stazioni di controllo, intervallate a distanza variabile in funzione della velocità d'avanzamento, ciascuna composta da cinque mire ottiche rilevabili con uno strumento topografico di precisione.

Le misure vengono eseguite giornalmente durante la prima settimana dall'installazione, e, successivamente, con cadenza definita in funzione dell'evoluzione delle convergenze, con il minimo di una lettura al mese.

5.2.1. Procedimento di misura

Il sistema di acquisizione dei dati è costituito da un teodolite e un distanziometro elettronici che rivelano le

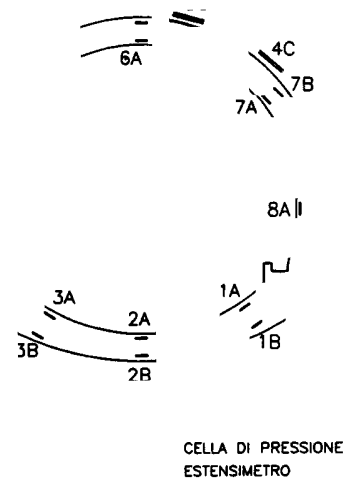


Fig. 11 - Schema del posizionamento degli estensimetri e delle celle di pressione per il controllo delle sollecitazioni nel rivestimento definitivo.

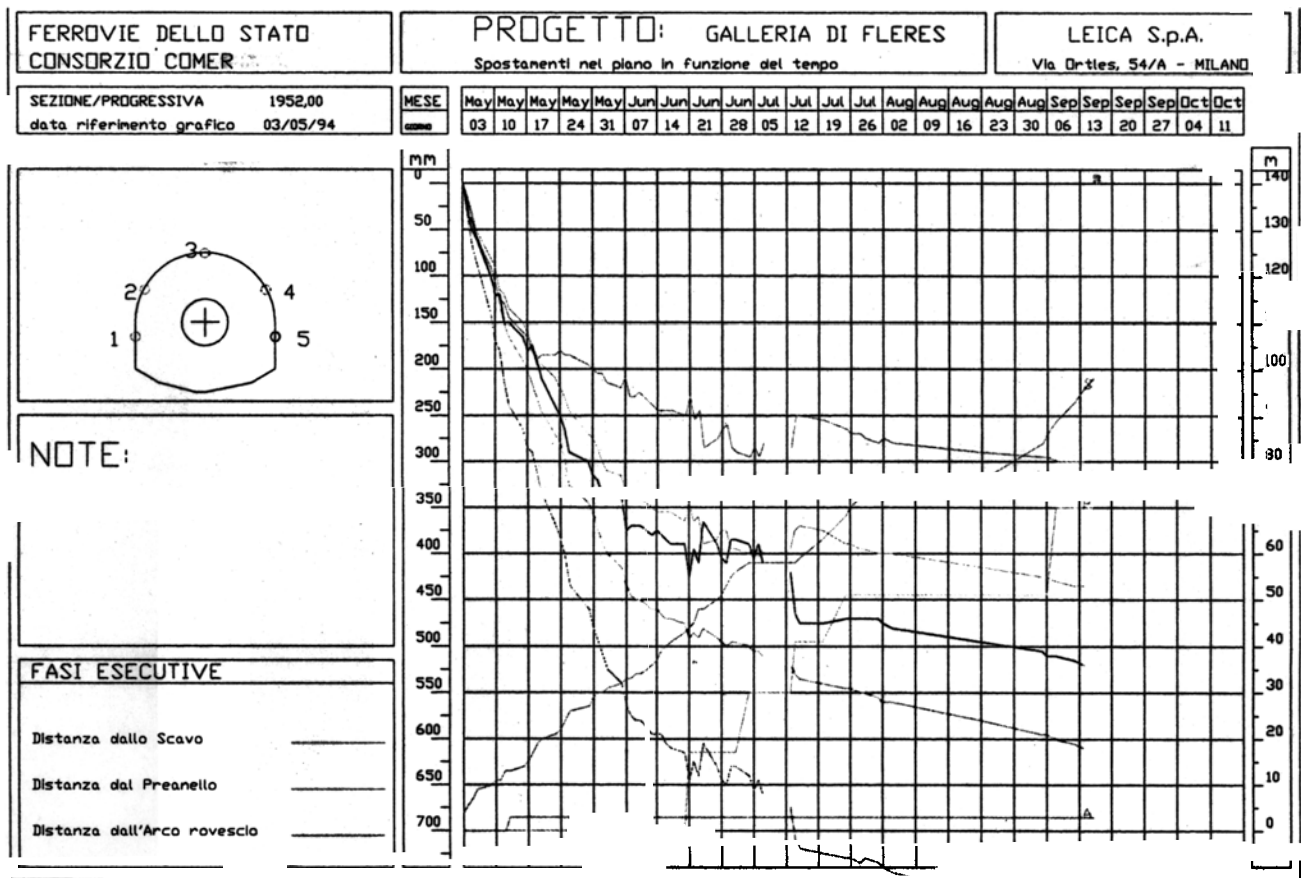


Fig. 12 - Diagramma delle convergenze in funzione del tempo.

posizioni assolute delle basi di misura rispetto ad un sistema di riferimento tridimensionale costituito da capisaldi siti in galleria. Le coordinate spaziali delle basi sono definibili con precisione superiore al millimetro.

Le misure sono correlate alla distanza della stazione di misura dal fronte di scavo e dalle progressive di esecuzione di ogni singola fase lavorativa. In questo modo, gli effetti di ogni singola lavorazione si possono verificare su un apposito crono-diagramma che viene elaborato settimanalmente.

Poichè le stazioni di controllo vengono installate a 5+6 m dal fronte, essendo impossibile farlo prima a causa dei grossi problemi di convergenza già citati, l'evoluzione dei fenomeni deformativi precedente alla messa in opera di ciascuna stazione viene determinata attraverso il rilievo del profilo di scavo mediante scanner ottico (Profiler). Il primo rilievo avviene all'atto dell'installazione dei supporti delle mire ottiche; i successivi si svolgono con cadenza da settimanale a mensile, a seconda della distanza dal fronte di ogni stazione precedentemente definita.

Il controllo delle sollecitazioni nel rivestimento viene effettuato previa installazione, in corrispondenza dei con-

ci di getto, di 16 estensimetri a corda vibrante e 7 celle di pressione (fig. 11).

5.2.2. Acquisizione e restituzione delle misure

Tutti i dati, rilevati in tempo reale, vengono registrati su supporto magnetico e trasmessi via modem al Centro Elaborazione Dati della società di progettazione, Rocksoil S.p.A. di Milano. Qui, tramite appositi programmi per elaboratore, essi vengono elaborati, visualizzati graficamente ed interpretati. In questo modo si ha, in tempo reale, un quadro costantemente aggiornato della situazione tenso-deformativa della galleria.

In particolare si realizza la graficizzazione e la stampa dei diagrammi:

- delle convergenze in funzione del tempo (fig. 12);
- delle convergenze in funzione della distanza dal fronte (fig. 13: la distanza dal fronte alla quale inizia la misura è di 60 m perchè la stazione di misura rappresentata è stata reinstallata dopo la riprofilatura resasi necessaria a seguito delle ingenti deformazioni prodottesi);

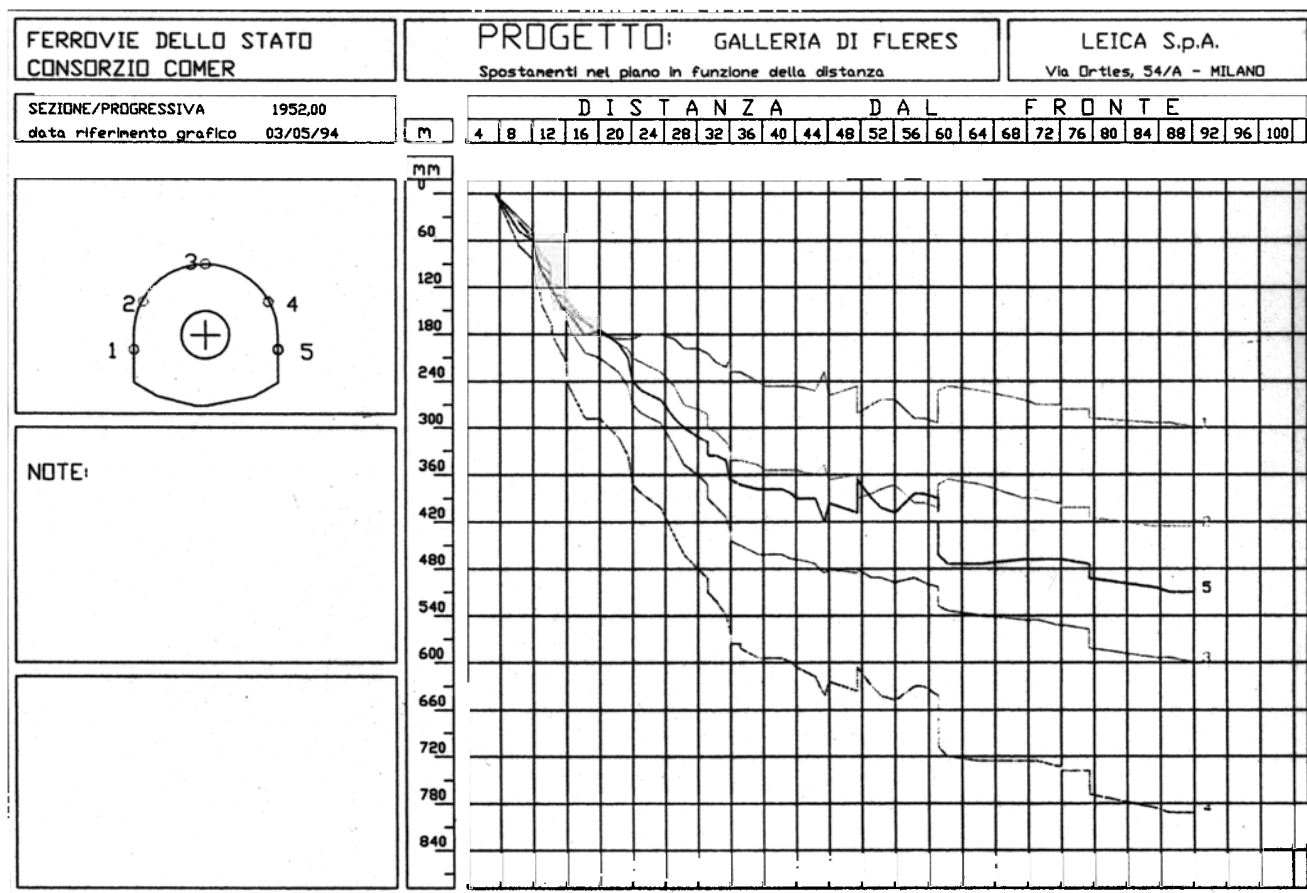


Fig. 13 - Diagramma delle convergenze in funzione della distanza dal fronte.

- di rappresentazione vettoriale degli spostamenti dei punti della sezione trasversale della galleria (fig. 14);
- della velocità di convergenza in funzione del tempo (fig. 15)

5.2.3. Analisi delle misure

Con cadenza settimanale, sulla base di calcoli effettuati con il metodo delle linee caratteristiche, viene redatto un rapporto di analisi interpretativa dei dati, contenente indicazioni sulle fasi successive di esecuzione dei lavori.

6. Conclusioni

La realizzazione della galleria "Fleres" della nuova

linea ferroviaria Verona-Brennero ha trovato nell'attraversamento del contatto tettonico tra l'"Unità Austroalpina" e l'"Unità Pennidica" un ostacolo imprevedibile difficile da superare. Infatti, le informazioni ottenute dal cunicolo pilota sin dove si era potuto eseguire e quelle ottenute dai rilievi di superficie e dalla bibliografia rendevano noto che, durante l'avanzamento della galleria, si sarebbe dovuto attraversare il suddetto contatto tettonico, ma facevano presumere che questo sarebbe avvenuto previo passaggio entro una fascia di transizione ("Zona di Matri") e non in maniera pressochè diretta, con le conseguenze assai negative che si sono verificate.

Quindi, giunti con il fronte nella zona di faglia senza l'effetto smorzante della "Zona di Matri", ci si ritrovò quasi improvvisamente entro materiali estremamente

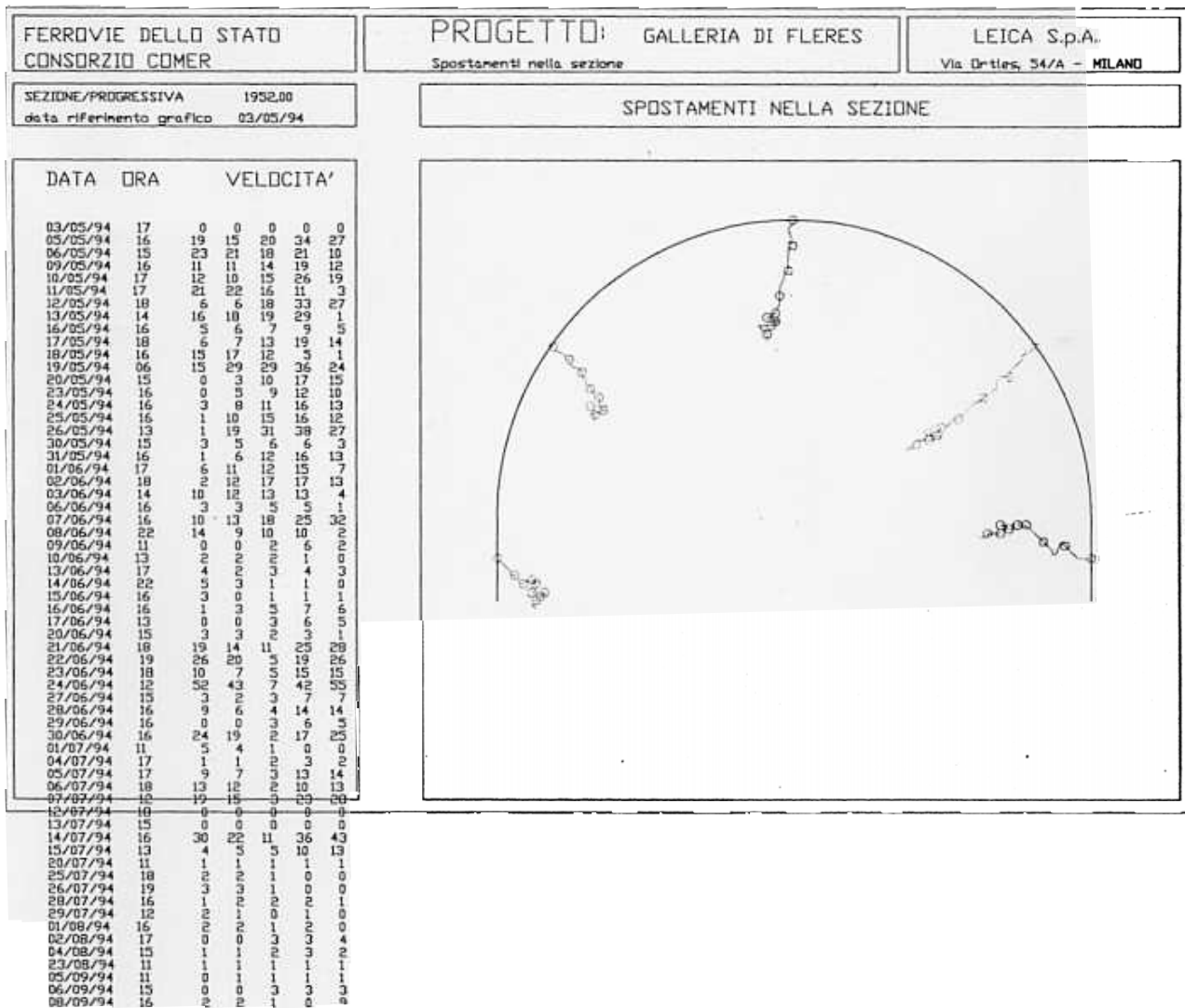


Fig. 14 - Rappresentazione vettoriale degli spostamenti dei punti della sezione trasversale della galleria.

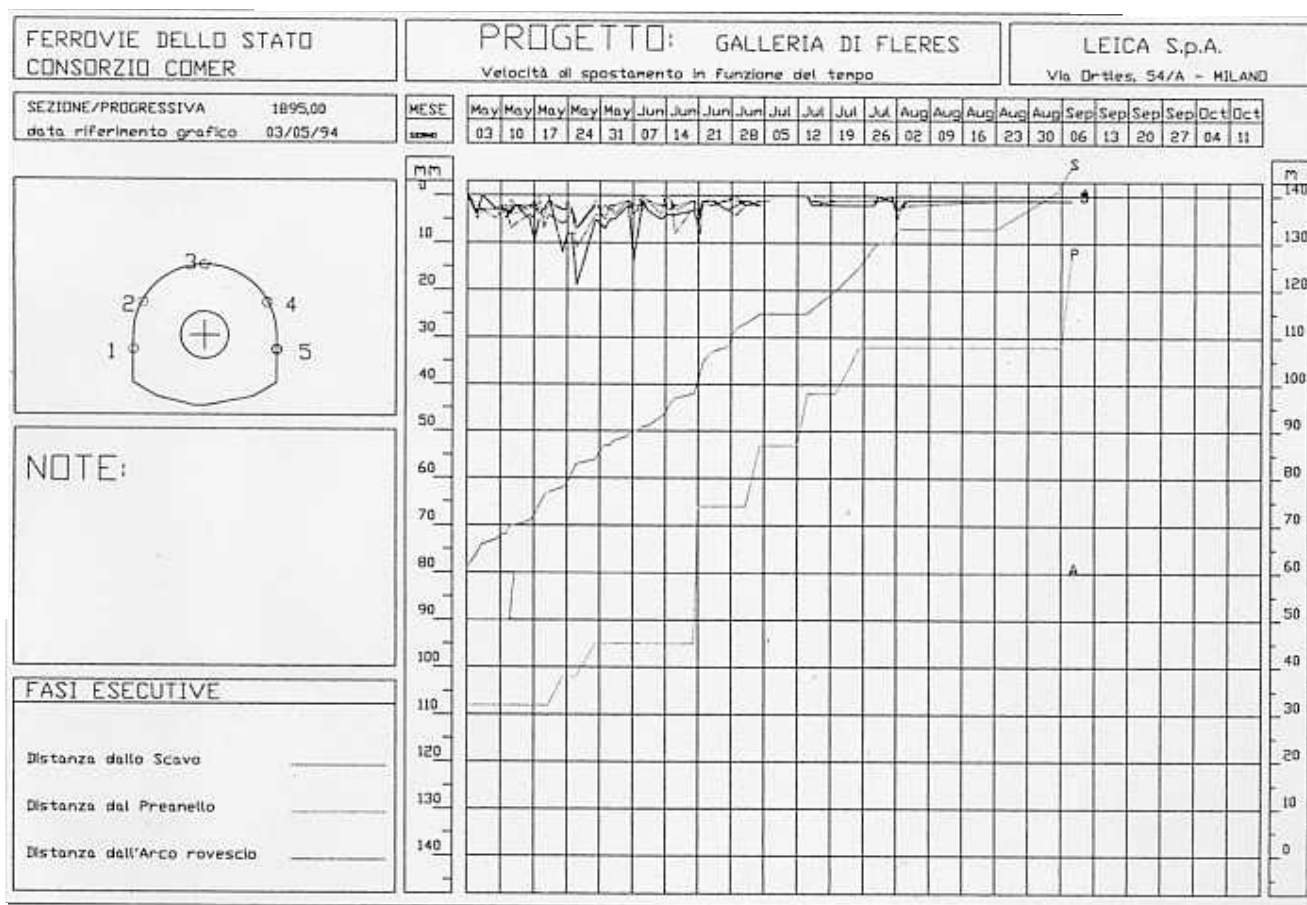


Fig. 15 - Diagramma della velocità di convergenza in funzione del tempo.

tettonizzati e cataclasizzati che, in seguito allo scavo e a fronte delle ingenti coazioni immagazzinate, producevano fenomeni deformativi di ordine metrico, con picchi di velocità anche di 8 cm/g, portando rapidamente al collasso le pur importanti opere di rivestimento già operate (circa 100 m di galleria furono riprofilati per ben due volte a seguito di convergenze complessive di quasi due metri!).

Essendo evidente che tali fenomeni erano incompatibili con gli interventi di contenimento e di rivestimento previsti sino a quel momento, si è riconsiderato il progetto alla luce delle nuove informazioni acquisite con il monitoraggio e lo studio approfondito dell'evoluzione degli stessi, optando per l'adozione di elementi strutturali di rivestimento che fossero subito in grado di assecondare e regimare le deformazioni della cavità e solo successivamente di fornire la pressione di contenimento necessaria a stabilizzare la galleria a lungo termine.

Si è così messa a punto la sezione tipo B5, che si caratterizza per l'adozione di centinaia di profilati d'acciaio con giunti scorrevoli "a deformazione controllata", tali da assicurare l'assorbimento delle convergenze del profilo di

scavo senza che risulti compromessa l'efficacia statica del rivestimento di 1^a fase.

L'adozione di tale sezione tipo, congiuntamente ad altri accorgimenti esecutivi quali: l'avanzamento a piena sezione con sovrascavo dimensionato per consentire convergenze radiali massime di circa 80 cm, l'esecuzione dei getti delle murette, dell'arco rovescio e del rivestimento definitivo ad una distanza dal fronte decisa con continuità in funzione della velocità di convergenza misurata, ecc., ha permesso di superare la zona di faglia senza ulteriori problemi, con produzioni medie di circa 20m/mese.

Concessionaria dei lavori: *Conorzio Comer S.p.A.:*

- Dott. Ing. Ettore DE FRANCESCHI (Direttore dei lavori fino al 1995);
- Dott. Ing. Luciano FOGOLARI (Direttore dei lavori dal 1995).

Impresa esecutrice: *Cariboni Paride S.p.A.:*

- Geom. Arnaldo GERONIMI (Direttore del cantiere);
- Dott. Geol. Alberto VELICOGNA (Responsabile direzione lavori del lotto).

Ufficio di Vigilanza FS:

- Dott. Ing. Alessandro MONTANARI;
 - DOTT. ING. GIUSEPPE Agostinelli.
- Progettazione: *Rocksoil S.p.A.*:
- Dott. Ing. Giovanna CASSANI.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. AGOSTINELLI, C. COMIN, S. PEDEMONTE, V. MAIR e A. VELICOGNA – *Aspetti geologici applicativi eseguiti allo scavo della galleria Fleres-Terme di Brennero*, Geologia tecnica e ambientale n. 3/95.

Sommaire

LE TUNNEL "FLERES" DE LA NOUVELLE LIGNE FERROVIAIRE VERONE-BRENNER: RESOLUTION DE QUELQUES PROBLEMATIQUES PARTICULIERES CONCERNANT LES PROJETS

L'article traite les aspects concernant le projet et la construction du tunnel "Fleres" de la nouvelle ligne ferroviaire Vérone-Brenner, actuellement en phase avancée de réalisation, avec un égard particulier aux problématiques de la traversée du contact tectonique entre l'"Unité Austroalpine" et l'"Unité Pennidique", qui ont imposé l'étude d'une variante de projet.

Summary

THE "FLERES" TUNNEL OF THE NEW VERONA-BRENNERO RAILWAY LINE: SOLUTION OF SOME PARTICULAR DESIGNING PROBLEMS

The article describes the designing and constructing aspects of the "Fleres" tunnel of the new Verona-Brennero railway line, at the moment in an advanced stage of construction, with particular attention given to the crossing problems of the tectonic contact between the "Austroalpine Unit" and the "Pennidica Unit", which have required the study of designing variations.

Zusammenfassung

DER "FLERES-TUNNEL" DER NEUEN STRECKE VERONA-BRENNER: LÖSUNG EINIGER BESONDERER PLANERISCHER PROBLEME

Der Artikel behandelt einige planerische und konstruktive Aspekte des Fleres-Tunnels auf der neuen Strecke Verona-Brenner, der sich derzeit in einer fortgeschrittenen Bauphase befindet. Es wird besonders auf die mit der Durchquerung der tektonischen Kontaktlinie zwischen "Austroalpiner Einheit" und "Pennidischer Einheit" verbundenen Probleme eingegangen, die eine Projektvariante erforderlich machten.

