

## INDICE DELLE MEMORIE

1. STUDIO GEOLOGICO PER L'ESECUZIONE DI GALLERIE  
Dott. B. Pigorini
2. L'INDAGINE GEOGNOSTICA NELLA PROGETTAZIONE DELLE  
OPERE INGEGNERISTICHE IN SOTTERRANEO  
Dott. L. Broili
3. SCAVO IN SOTTERRANEO: STATO DELL'ARTE E NUOVI ORIEN-  
TAMENTI  
Prof. N. Innaurato e Prof. S. Pelizza
4. LO SCAVO DELLE GALLERIE MEDIANTE CUNICOLO PILOTA  
Prof. L. Lunardi
5. INTERVENTI SPECIALI ATTI A GARANTIRE LA STABILITÀ DEL  
CAVO IN CONDIZIONI DIFFICILI  
Ing. A. Balossi Restelli
6. PROVE IN LABORATORIO. LO STATO DELL'ARTE. NUOVI SVI-  
LUPPI APPLICATIVI  
Ing. A. Zaninetti
7. PROVE IN SITO. LO STATO DELL'ARTE. NUOVI SVILUPPI APPLI-  
CATIVI  
Ing. A. Frassoni e Ing. P.P. Rossi
8. IL RUOLO DEI METODI GEOFISICI DURANTE LA PROGETTAZIO-  
NE, L'ESECUZIONE E L'ESERCIZIO  
Prof. E. Carabelli
9. CONTROLLI E MISURE IN CORSO D'OPERA  
Ing. I. Vielmo
10. CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA: VALUTAZIONE DEI PARA-  
METRI DI PROGETTO  
Prof. G. Barla, Dott. F. Forlati, Ing. C. Scavia e Ing. L. Vai
11. STATO DI SFORZO E DEFORMAZIONE INTORNO AD UNA GAL-  
LERIA  
Prof. A. Lembo Fazio e Prof. R. Ribacchi
12. METODI DI ANALISI E CALCOLO DELLE STRUTTURE DI SOSTE-  
GNO E RIVESTIMENTO  
Ing. M. Borsetto
13. METODI NUMERICI E METODO DEGLI ELEMENTI FINITI NEL  
CALCOLO DI GALLERIE  
Prof. G. Barla e Ing. P. Jarre
14. ANALISI DI GALLERIE IN CONDIZIONI SISMICHE  
Ing. S. Valente
15. LES TECHNIQUES RECENTES DE CONSTRUCTION DES TUNNELS:  
DESCRIPTION ET COMPORTEMENT COMPARE AUX TECHNIQUES  
TRADITIONNELLES  
Ing. A. Guilloux
16. LA GALLERIA DI QUART  
Ing. R. Paolina, Ing. R. Favro, Ing. I. Fornero, Prof. M. Fanelli,  
Ing. G. Giuseppetti e Ing. G. Mazzà
17. BRITISH CANAL TUNNELS. SOME RECENT REPAIRS  
Dr. L. Richards



5

POLITECNICO DI TORINO  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale

**PRIMO CICLO DI CONFERENZE  
DI MECCANICA E INGEGNERIA  
DELLE ROCCE**

**Recenti sviluppi  
e nuovi orientamenti  
nel campo delle gallerie**

TORINO  
25 - 28 Novembre  
1986

## INTERVENTI SPECIALI ATTI A GARANTIRE LA STABILITÀ DEL CAVO IN CONDIZIONI DIFFICILI

ACHILLE BALOSSI RESTELLI  
Studio Ingegneria Civile - Milano

Viene fatta una panoramica sugli interventi specialistici di sostegno normalmente applicati nelle 3 condizioni seguenti: cavi da eseguirsi in situazioni difficili note a priori, cavi che in corso di esecuzione si sono rivelati instabili ed infine opere sotterranee obsolete da rigenerare. I trattamenti, così suddivisi, vengono esposti in modo schematico ed illustrati con disegni. Sovente le situazioni complesse vengono superate combinando in vari modi gli interventi qui riportati. Viene posto l'accento sull'importanza di eseguire sempre un'indagine accurata per interpretare i fenomeni di instabilità ed essere così in grado di fare le scelte più idonee. Vengono nella seconda parte illustrate le difficili situazioni in cui sono venute a trovarsi tre opere di notevole importanza ed esposti gli interventi impiegati per il loro ripristino.

### 1. Introduzione

Nell'affrontare il tema propositomi mi rendo conto con un certo timore della vastità dell'argomento e della difficoltà di esporre in modo organico i numerosi problemi coinvolti ed i mezzi più idonei offerti dalla tecnologia odierna per risolverli.

Cercherò di schematizzare il più possibile nella prima parte generale; in seguito riferirò in modo abbastanza dettagliato su qualche esperienza significativa ed a me nota per averne seguito lo svolgimento in prima persona.

Questa premessa credo sia indispensabile per spiegare come non mi sia possibile svolgere lo argomento in modo completo ed esauriente: ma il tempo a disposizione è quello che è e poco spazio rimane per documentarsi adeguatamente su problemi probabilmente anche più difficili ed importanti di quelli da me presi in considerazione.

Nella parte terminale della relazione generale farò tuttavia cenno ad alcune recentissime tecnologie già applicate o in fase di messa a punto, in modo da colmare per quanto possibile le inevitabili lacune della trattazione precedente.

Nella esposizione intendo procedere affrontando separatamente le 3 categorie seguenti:

A - trattamenti preventivi, da eseguirsi prima dello svolgimento delle operazioni di scavo

B - trattamenti di riassetto, da eseguirsi nel corso dello scavo a seguito di rilasci imprevisti

C - trattamenti di ripristino conservativo, nel caso di opere già in esercizio da tempi più o meno recenti.

Ovviamente esistono strette interconnessioni tra le tre categorie ed i trattamenti impiegati per risolvere i problemi sono spesso simili se non identici, generalmente tuttavia combinati tra loro in modo differenziato.

### 2. Studio del fenomeno. Indagini e controlli

Quando si deve affrontare un problema derivante da una situazione complicata al contorno del cavo è sempre opportuno, vivamente consigliabile, chiarire subito in modo preciso il fenomeno in atto, che potrebbe generare dissesti allo scavo futuro (categoria A), o che già si è manifestato causando l'instabilità del fronte o dissesti nei rivestimenti (categorie B e C).

E' naturale, assolutamente comprensibile, che la reazione degli interessati all'opera quando questi eventi negativi si manifestano sia quella di "venirne fuori" al più presto.

Tuttavia il "pronto intervento" non è sempre possibile; un errore di interpretazione può dare luogo addirittura ad un ulteriore aggravio di spesa e di tempo.

Ho constatato invece che la spesa affrontata per l'indagine corretta del fenomeno, pur sembrando qualche volta in un primo momento ecc-

siva ed inadeguata, apporta sempre dei vantaggi notevoli nell'economia generale del cantiere e nel lungo termine.

Le ragioni di questo fatto sono essenzialmente due:

- l'ingegnere preposto alla progettazione degli interventi specializzati correttivi è in grado di essere molto più preciso nel dimensionamento dei quantitativi perchè gli è meglio noto il fattore di sicurezza con cui opera

- il progetto è più adeguato all'entità reale del fenomeno e quindi viene minimizzato il rischio di dovere reintervenire con trattamenti integrativi.

Sì, perchè sempre quando succedono questi fatti la spesa che il committente dell'opera deve sopportare è imprevedibile e quindi si è per forza costretti a contenere i trattamenti entro limiti spesso volte inadeguati.

Questa "minimizzazione" è possibile invece con minore rischio di errore se l'indagine è adeguata.

La tecnologia oggi ha fatto notevoli passi avanti in questo senso ed offre svariati sistemi di controllo semplici e di rapida messa in opera da parte degli specialisti del settore. Mi riferisco soprattutto alle metodologie in grado di misurare sforzi e deformazioni nell'ambito del masso di terreno o nelle strutture di rivestimento: i dati deducibili, se estesi per un periodo di tempo sufficiente, consentono quasi sempre la comprensione di quanto sta accadendo.

Tutto questo naturalmente presuppone la conoscenza precisa della natura e composizione del masso di terreno che circonda il cavo; a questo proposito nulla ancora ha potuto sostituire l'apporto fondamentale fornito da accurati sondaggi geognostici tradizionali, accompagnati dallo studio in laboratorio dei campioni estratti ed in situ della situazione idrologica (falda freatica, eventuali falde in movimento, grado di artesianismo) o situazioni particolari come ad esempio presenza di gas.

Sarebbe inoltre auspicabile che tutte queste informazioni di dettaglio puntualizzassero lo evento temuto od occorso nel contesto di uno studio geologico d'insieme che prenda in considerazione una porzione di terreno molto ampia: ad esempio tutto il rilievo interessato dalla galleria oggetto dello studio. Riporto qui di seguito in modo schematico alcune situazioni difficili la cui soluzione è legata all'apporto determinante fornito da indagini particolari (in aggiunta a quelle tradizionali).

#### Galleria Corta di Coimo (Domodossola)

Metodologia: estensimetri a lunga base  
Scopo dell'indagine: stabilire l'estensione della zolla rocciosa instabile

#### Pozzo di Abbadia Lariana (Lecco)

Metodologia: inclinometri  
Scopo dell'indagine: seguire le deformazioni del detrito di falda ed ammasso calcareo sottostante

#### Galleria di Capo Calavà (Sicilia)

Metodologia: prove sismiche  
Scopo dell'indagine: verificare la tenuta al gas (durante le volate) dell'anello trattato con resine elastiche

#### Pozzi Chiusaforte (Carnia-Tarvisio)

Metodologia: micromulinello  
Scopo dell'indagine: verificare le correnti su balvee e le falde artesiane

#### Galleria di Loreto (canale Regina Elena)

Metodologia: microsismica  
Scopo dell'indagine: stabilire il grado di alterazione del cls. di rivestimento ed i moduli elastici dinamici

#### Galleria S. Pedrino (Varese)

Metodologia: martinetti piatti. Misure di convergenza. Strumentazione micropali  
Scopo dell'indagine: misurare gli sforzi reali nel rivestimento. Stabilire l'entità del fenomeno. Seguire in corso d'opera la funzionalità dello arco di ricompressione.

#### Gallerie sifone Canale Cavour (Novara)

Metodologia: comparatori micrometrici registratori  
Scopo dell'indagine: controllare in modo continuo i movimenti delle fessure alle imposte degli archi

#### Galleria Agri-Sauro (Potenza)

Metodologia: martinetti piatti. Misure di convergenza. Door-stoppers.  
Scopo dell'indagine: verificare sollecitazioni concie rivestimento. Controllare variazioni di sforzi virole metalliche e controcentine

#### Diga Alto Esaro - Cunicoli di ispezione

Metodologia: fori deformometrici  
Scopo dell'indagine: misurare tensioni residue della roccia

#### Galleria Spartiacque (Carnia-Tarvisio)

Metodologia: estensimetri a lunga base. Misure di convergenza  
Scopo dell'indagine: verificare l'estensione della zona di distensione e deformazioni in atto

#### Galleria Cintioni (FF.SS. S. Vito Chietino)

Metodologia: inclinometri. Misure di convergenza. Prove su blocchi d'argilla  
Scopo dell'indagine: verificare superficie di scorrimento paleofrana. Controllare deformazioni del rivestimento

#### Metropolitana Milanese (Linea 3 - Lotto 2B)

Metodologia: prove di carico su piastra. Prove dilatometriche. Inclinometri tipo Trivec. Deformometri multi-base. Convergenze  
Scopo dell'indagine: determinare il modulo di deformabilità del terreno naturale e del terreno consolidato. Verificare comportamento struttura scatolare di paratie tirantate e con puntoni e dell'arco di consolidamento adiacente.

In alcuni dei casi sopra citati i controlli sono stati prolungati nel tempo anche ad opera finita.

Così ad esempio per la galleria di S. Pedrino si è potuto constatare, tramite la strumentazione di alcuni micropali, che lo stato tensionale di ricompressione conferito all'arco di terreno attorno al rivestimento mediante iniezioni si è mantenuto pressochè integro a quasi due anni dal termine delle lavorazioni: i micropali infatti risultano ancora oggi tensionati nella loro parte centrale secondo valori attorno agli 80 KN (dopo avere raggiunto valori di picco di 150 KN circa nel corso delle iniezioni).

Tale valore risulta in buon accordo con i risultati dei calcoli eseguiti per una pressione residua conferita all'arco consolidato di 0,2 M Pa.

In conclusione posso dire che per tutti i casi a me noti l'indagine conoscitiva approfondita ed i controlli eseguiti in corso d'opera hanno sempre apportato dei vantaggi non trascurabili all'economia globale dell'opera (costi e tempi), e questo senza contare l'aspetto di maggiore sicurezza e tranquillità conferito ai progettisti ed agli operatori sul cantiere.

### 3. Trattamenti preventivi (categoria A)

In questo paragrafo esamineremo alcuni casi tipici di interventi di rinforzo eseguiti prima dell'esecuzione dello scavo: questo naturalmente presuppone che la difficoltà da superare sia stata evidenziata a priori tramite indagini.

Gli interventi possono essere puntuali o sistematici a seconda dell'ampiezza della zona difficile da superare. Ad esempio tra i primi possiamo ricordare i consolidamenti per il sostentamento degli imbocchi di galleria, oppure il superamento di zone di faglia riempite

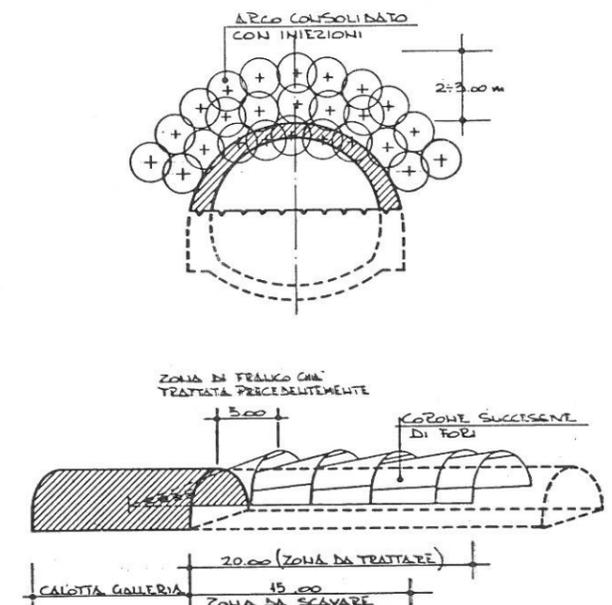
di materiali di frizione più o meno carichi di acqua; mentre tra i trattamenti sistematici possono rientrare i sostentamenti degli scavi con bullonature radiali al fronte in rocce deboli e degradate (metodo austriaco), oppure la costituzione degli archi di scarico mediante iniezioni in terreni incoerenti.

Come già accennato più sopra, senza alcuna pretesa di essere completo ed esauriente nel riferire sullo stato dell'arte attuale, schematizzo qui appresso i trattamenti preventivi più comunemente utilizzati ed accenno alla fine ad alcune proposte d'applicazione assai recenti.

#### A1) Iniezioni ad avanzamento

A partire dal fronte, generalmente protetto da un muro "tampone" o da uno strato di spritzbeton (con rete elettrosaldata), vengono eseguite delle iniezioni di miscele consolidanti allo scopo di costituire un arco di scarico oltre l'estradosso del futuro scavo, capace di incamerare con sicurezza gli sforzi mobilitati dall'apertura del cavo. Sono generalmente trattamenti a geometria conica e per tale motivo la lunghezza del tratto di galleria protetto non può superare certi limiti compresi tra i 12 m ed i 15 m.

Le iniezioni in pressione delle miscele (idonee al tipo di terreno) vengono eseguite tramite tubi a valvole nei terreni incoerenti o semi-coerenti, attraverso semplici fori negli ammassi rocciosi.



A1-Schema tipo adottato per il sostegno della galleria Serra dell'Ospedale - Autostrada Salerno-Reggio Calabria

Questi tipi di intervento in casi particolari possono essere semplificati secondo una geometria cilindrica (agli imbocchi delle gallerie, oppure a partire da camerone di allargo).

A2) Iniezioni da cunicolo di avanzamento

Le iniezioni di miscele consolidanti per la creazione dell'arco resistente attorno alla galleria, in tutto simile a quello sopra citato, vengono qui eseguite secondo raggere a partire dalla piccola galleria "pilota" già realizzata nella zona centrale del futuro scavo di allargo.

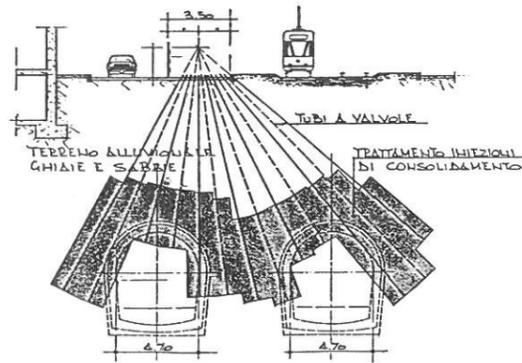
Nei terreni incoerenti o comunque instabili anche il cunicolo di preavanzamento necessita di un trattamento preventivo, a meno che non venga realizzato con scudo.

Questo sistema, come è noto, viene largamente utilizzato quando si debbano scavare gallerie in terreni alluvionali e sussista la necessità di agire a "foro cieco", sia per la grande profondità che rende inopportuno un trattamento dall'alto, sia per non coinvolgere le opere sovrastanti esistenti (fabbricati, fognature e servizi particolari, viabilità).

La tecnica del cunicolo pilota eseguito con scudo meccanico sta sempre più entrando nella metodologia normale per scavo di gallerie in terreni rocciosi.

Questo sistema offre numerosi vantaggi: primo fra tutti quello di potere indagare in modo preciso i vari tipi di formazioni presenti lungo l'asse ed evidenziarne la consistenza e così essere in grado di predisporre gli opportuni trattamenti per superare in sicurezza i punti più delicati.

casi i costi si riducono perchè si possono utilizzare sonde di grande produzione ed il lavoro di scavo risulta completamente svincolato dalle operazioni specialistiche di consolidamento.



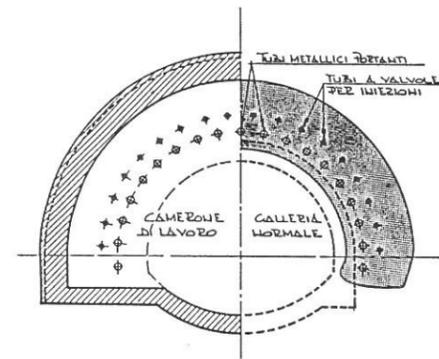
A3 - Trattamento di consolidamento dall'alto in presenza di fabbricati e traffico cittadino (M.M. 3 - Lotto 6)

Naturalmente perchè il trattamento risulti veramente economico la profondità della galleria non deve essere eccessiva (25-30 m); altrimenti devono essere assunti certi provvedimenti ed eseguiti alcuni controlli (deviazione del foro rispetto all'andamento teorico di progetto) per garantire la buona riuscita del trattamento.

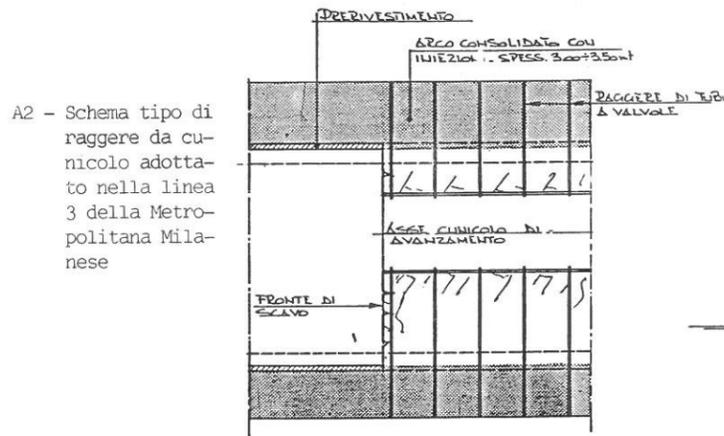
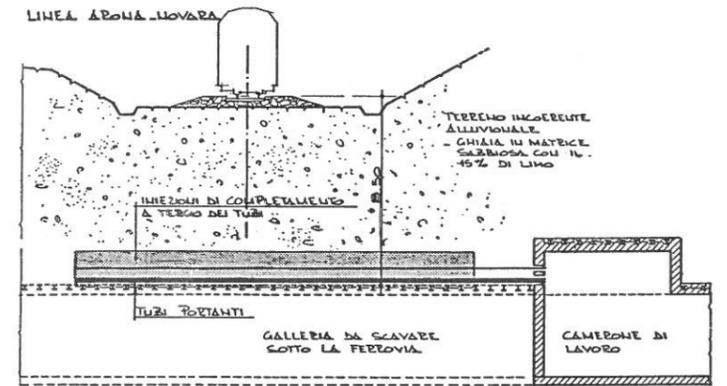
Come vedremo più oltre vi sono casi in cui, non potendo fare diversamente, è stato necessario affrontare oneri di questo tipo.

to grado di fratturazione minuta), oppure quando i carichi gravanti sullo scavo sono forti e non vi è spazio sufficiente per costituire un arco di scarico consolidato con iniezioni.

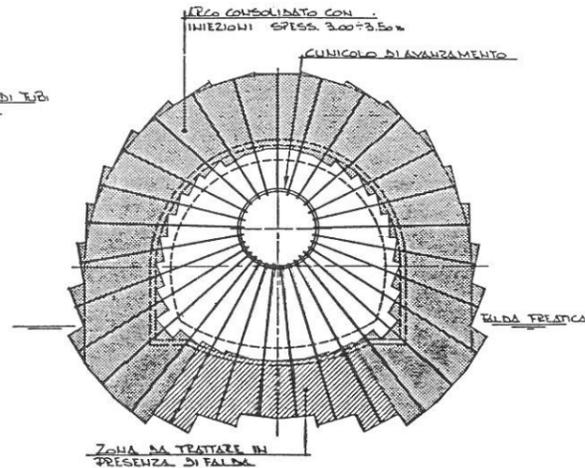
La portanza del terreno sovrastante alla sezione di scavo viene affidata a tubi metallici disposti immediatamente oltre la superficie di scavo ad interasse di 0,50 m all'incirca tra loro: questi tubi, mano mano che lo scavo procede, vengono chiamati a lavorare come travi continue appoggiate sui molti appoggi costituiti dalle centine. Anche in questo caso, a causa della geometria conica (salvo rare eccezioni, come il caso sotto schematizzato), il tratto di galleria protetto oltre il fronte non può superare i 12-15 m di lunghezza.



A4 - Nuova galleria di Cavagliano - Associazione Irrigazione Est Sesia - Novara - Caso di "parapioggia" cilindrico



A2 - Schema tipo di raggere da cunicolo adottato nella linea 3 della Metropolitana Milanese



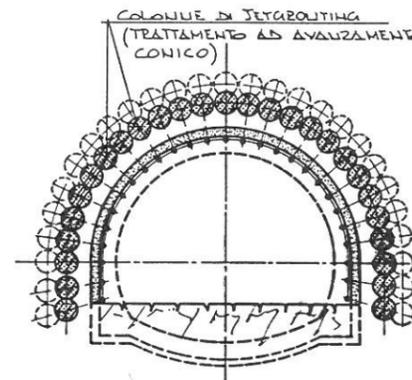
A3) Iniezioni dall'alto

Gli archi di consolidamento per il sostegno dello scavo di gallerie, in condizioni particolarmente favorevoli, possono essere realizzati anche a partire dal piano campagna. In questi

Questo sistema viene applicato quando il terreno non si presta ad essere iniettato (alluvioni molto chiuse, formazioni limose e argillose, materiali milonitici di frizione, rocce con al-

A5) Jetgrouting

Questa metodologia è certamente a tutti nota ed è stata ampiamente descritta in varie memorie al recente congresso di Firenze (giugno 1986).



A5 - Schema tipo di protezione di galleria con jetgrouting

Nel caso del sostentamento di scavi di gallerie il sistema mi sembra possa ritrovare il suo giusto inserimento in situazioni che precedentemente venivano risolte difficoltosamente (con tempi lunghi ed alti costi) con iniezioni ad avanzamento -A1- oppure con infilaggi metallici -A4-.

Infatti quando il terreno è al limite della iniettabilità o al di sotto di questo limite, la costituzione di un arco di scarico mediante iniezioni coinvolge tempi lunghi ed impiego di miscele costose, oppure infilaggi metallici molto lenti da eseguire, mentre il jetgrouting con l'utilizzo di sola miscela cementizia iniettata ad altissima pressione consente interventi molto più rapidi a pari sicurezza.

Bisogna solamente fare molta attenzione nel caso in cui vi siano carichi molto forti e concentrati, soprattutto riguardo ai cedimenti, perchè l'effetto "arco" è limitato e le colonne non sono armate.

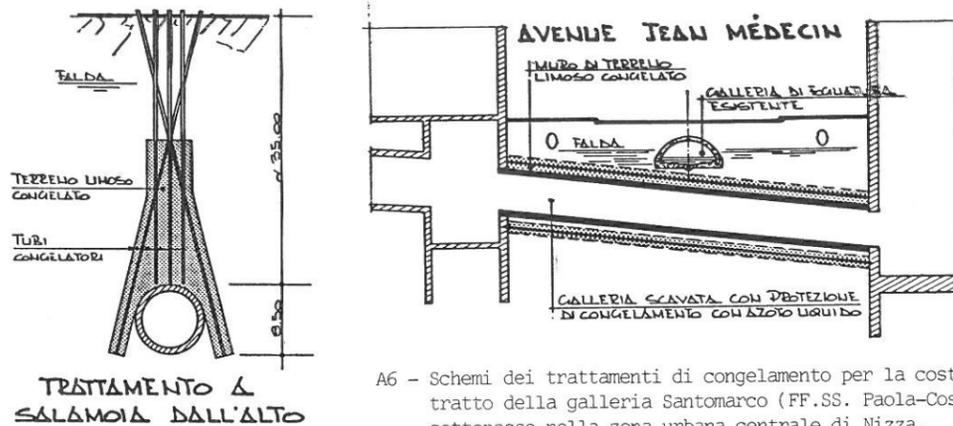
A6) Congelamento

Si ricorre al congelamento del terreno (con azoto liquido o salamoia) quando si debbano affrontare situazioni di terreni particolarmente difficili: terreni immersi in falda, generalmente molto fini tipo sabbie limose, limi argillosi, argille tenere, torbe, oppure formazioni rocciose con frequenti fessure riempite con materiale fino, formazioni complesse con alternanze frequenti di rocce degradate e detriti di falda o di frana.

Penso che la metodologia sia ormai a tutti nota, quindi mi limito a riportare qui di seguito due schemi di intervento che appartengono alla categoria A.

A7) Arco tirantato in rocce instabili

Il cosiddetto metodo austriaco è il sistema più idoneo per il sostentamento degli ammassi rocciosi instabili attorno al cavo da costitui-



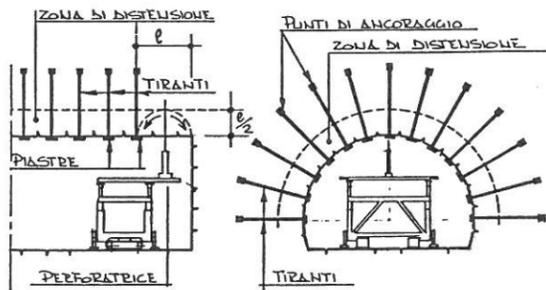
A6 - Schemi dei trattamenti di congelamento per la costruzione di un tratto della galleria Santomarco (FF.SS. Paola-Cosenza) e di un sottopasso nella zona urbana centrale di Nizza.

re. Questa metodologia è andata sempre più diffondendosi e perfezionandosi grazie ai progressi tecnologici connessi con la messa in opera di bullonature metalliche.

Infatti oggi non è più un grosso problema sistemare in aderenza al fronte di scavo raggere di barre metalliche che siano in grado di lavorare quasi istantaneamente, riducendo così al minimo proprio sul nascere gli effetti della compressione dovuta allo scavo.

Le barre, rese "attive" dalla pretensione imposta, coinvolgono tutto l'arco di roccia da loro interessato ed innescano una azione di "mutuo soccorso" fra i vari diedri di roccia, limitando ad entità trascurabile l'ampiezza della zona di distensione e prevenendo rilasci importanti.

Qualche volta in situazioni più favorevoli le barre non vengono pretensionate e perciò diventano "attive" solo quando si manifestano le prime deformazioni.



A7 - Schema applicativo del metodo austriaco

Naturalmente è necessario agire immediatamente dopo lo sfondo del fronte di avanzamento inserendo le barre ed utilizzando uno dei tanti sistemi messi a punto per la costituzione di un "ammarro" rapido (resine-espansori meccanici).

A8) Drenaggi

E' sempre di grande aiuto per garantire il normale procedere dello scavo avere sotto controllo il deflusso delle acque che interessano la zona del fronte e della parte non ancora rivestita della galleria.

Ciò diviene indispensabile in alcuni casi particolari quando ad esempio il masso di terreno all'intorno del cavo è costituito da terreno semicoerente a basso coefficiente di permeabilità e sono in gioco pressioni idrauliche di una certa entità, oppure quando in terreni dello stesso genere la galleria deve attraversare in modo parietale zone che proprio a causa dell'acqua si trovano in situazione d'equilibrio globale limite.

La regolazione e la captazione delle acque e conseguente abbattimento delle pressioni al contorno avviene tramite l'inserimento nel terreno di tubi drenanti.

Si tratta sempre di una operazione molto complessa perchè si incontrano difficoltà notevoli nel corso della messa in opera (perforazione, idonea cementazione della zona non filtrante, protezione del filtro, ecc); inoltre è necessario che il tipo di filtro e la dimensione delle finestrate siano congruenti con la granulometria del terreno da drenare, per evitare il rischio di una scarsa resa o addirittura di un funzionamento di breve durata.

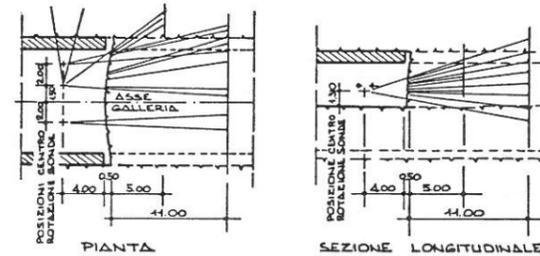
Per quanto è a mia conoscenza mancano studi approfonditi concernenti la scelta del tipo di dreno in funzione del terreno e quindi questa tecnica è patibile di notevoli miglioramenti che non si possono acquisire se non attraverso costose sperimentazioni comparative.

I sistemi drenanti vengono normalmente appli-

cati come integrazione degli interventi precedentemente descritti; esistono tuttavia casi in cui il drenaggio ha costituito l'elemento prioritario per garantire al fronte la necessaria stabilità (vedi ad esempio la galleria di Vallata dell'autostrada Napoli-Bari).

E' probabile che tra non molto in una galleria sottoposta a notevoli carichi idraulici venga applicato a titolo sperimentale un sistema di protezione dell'avanzamento con tubi drenanti disposti conicamente tutt'attorno alla tratta da scavare.

In questo paragrafo ho parlato naturalmente di drenaggi "passivi", tralasciando tutta la problematica dei pozzi drenanti, well-point e relativo abbassamento di falda.



A8 - Galleria Scampitella - Vallata - Autostrada Napoli-Bari. Tratta scavata sotto la protezione di tubi drenanti.

A9) Nuovi sistemi. La "prevoute"

La "prevoute" o "predecoupage" è una metodologia messa a punto recentemente in Francia, dove è già stata applicata con successo in alcune gallerie e che da qualche mese viene utilizzata anche in Italia (galleria delle FF.SS. sulla Sibari-Cosenza a Roggiano).

Come forse già molti sapranno, il sistema consiste nel realizzare un pretaglio in corrispondenza della linea estradossale di scavo della galleria con una macchina speciale dotata di tagliante a sbalzo capace di creare nel terreno dei vani di 15 cm di spessore, di ampiezza di 1,00 m circa e profondità dai 2,00 ai 4,00 m a seconda del tipo di terreno.

Questi spazi oltre il fronte vengono immediatamente riempiti con spritz-beton e, collegati fra loro, costituiscono una sorta di volta continua resistente predisposta oltre la linea del futuro scavo.

La lunghezza delle tratte così protette dipende dalla capacità della fessura di autosostenersi per il periodo di tempo intercorrente fra il taglio e l'immissione del calcestruzzo proiettato.

Nelle esperienze eseguite fin'ora in Francia

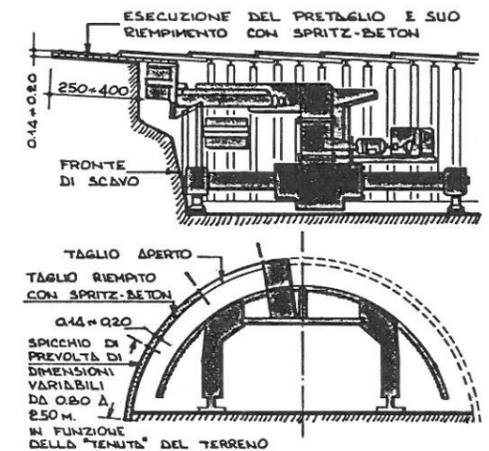
si sono ottenuti avanzamenti dell'ordine di 3 tratte giornaliere per un totale di circa 9-10 m di galleria al giorno.

Generalmente, dato l'esiguo spessore del calcestruzzo resistente, la stabilità del sistema di sostegno dello scavo è garantita dalla messa in opera sistematica di normali centine metalliche.

Il sistema della prevoute mi sembra rivestire grande interesse.

Certamente bisogna fare molta attenzione e progettare in modo corretto questo tipo di intervento: è necessario ad esempio tenere presente che questa struttura, a causa della sua rigidità nei confronti del terreno retrostante, tende a prendere su di sé tutti i carichi dovuti all'impedita distensione del masso attorno al cavo.

Di qui nasce la necessità di un attento esame degli sforzi che si concentrano in corrispondenza dei due piedritti: si è accennato a questo proposito alla costruzione di archi rovesci provvisori, oppure all'estensione della prevoute fino alle zone basse dei piedritti, oppure al rafforzamento al piede con altri sistemi (murette in c.a., colonne di jetgrouting, tubifix, iniezioni armate).



A9 - Esecuzione del "pretaglio" e riempimento della scanalatura ottenuta con spritz-beton

A10) Nuovi sistemi. I cunicoli portanti accostati

Quando si debbano affrontare scavi di grande dimensione in terreni difficili, privi di autosostentamento, (terreni incoerenti a pezzatura fine, molto "chiusi", terreni sabbiosi-limosi, argille tenere) è possibile diventi interessante la costituzione di un anello resistente oltre l'estradosso di scavo mediante una serie di cunicoli accostati fra loro e riempiti di calcestruzzo.

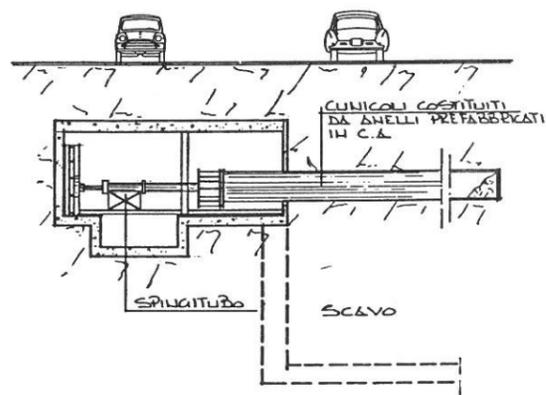
In questo caso non sussistono più i problemi

sopra riferiti a proposito della prevoute perchè le dimensioni dell'anello portante (che può essere anche opportunamente armato) sono tali da sopportare completamente i carichi ed impedire (o ridurre ad entità trascurabili) i movimenti di convergenza dovuti alla creazione della cavità interna.

In un certo senso si costruisce prima di scavare quello che normalmente è definito "rivestimento definitivo".

Tuttavia dato l'alto costo di questo tipo di intervento, ritengo che il suo impiego venga limitato a casi molto delicati, quando si debba ricavare come detto sopra un cavo di dimensioni notevoli e si vogliono limitare le deformazioni ed i cedimenti in superficie ad entità molto piccole.

Riporto qui di seguito un esempio del sistema adottato recentemente ad Anversa. Un sistema simile, ma con 24 cunicoli coassiali formanti una corona, è stato impiegato negli U.S.A. per la costituzione del rivestimento preventivo della grande galleria Monte Baker a Seattle.



A10 - Rivestimenti definitivi di cavi sotterranei realizzati con cunicoli adiacenti portanti.

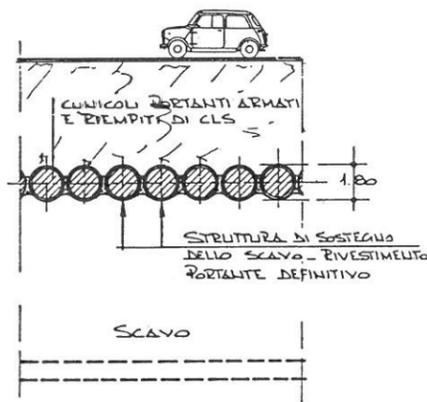
ni che il rilascio ha lasciato indenni; spesso la soluzione si trova combinando le due operazioni sopra accennate.

Analogamente a quanto fatto per la categoria A riporterò qui appresso in modo schematico le varie metodologie utilizzate, quelle identiche agli interventi preventivi già esaminati saranno semplicemente richiamate secondo la numerazione prima riportata.

B1) Iniezioni di intasamento e ricompressione

Rappresentano premessa indispensabile di qualsiasi successivo intervento di sostentamento. Al termine del fenomeno di rilascio del cavo in costruzione, nella maggiorparte dei casi, si stabilisce in corrispondenza della superficie esterna della zona collassata un nuovo assetto di distribuzioni di sforzi d'azione e reazione al limite dell'equilibrio.

In queste condizioni basta poco (asportazio-



4. Trattamenti di riassetto in corso di scavo (categoria B)

Sono sempre interventi molto difficili perchè, contrariamente a quanto avviene nei casi precedentemente esaminati, qui si devono affrontare situazioni "dopo crollo" dove si ha a che fare con terreni collassati e rimescolati in modo confuso: bisogna ricostituire l'equilibrio che è venuto a mancare per qualche motivo e poi fornire al nuovo equilibrio raggiunto nell'ambito dell'ammasso in questione quell'ulteriore coefficiente di sicurezza che avrebbe impedito il verificarsi dell'evento.

Naturalmente non si può fare alcun affidamento su forze residue del terreno nello stretto intorno della galleria ed è necessario ricostruire integralmente, con l'utilizzo di materiali idonei, gli archi portanti, oppure chiamare in causa strati di terreno più lontani

di materiale, tentativi di ridurre l'unghia del materiale franato) per reinnescare il fenomeno peggiorando una situazione già critica.

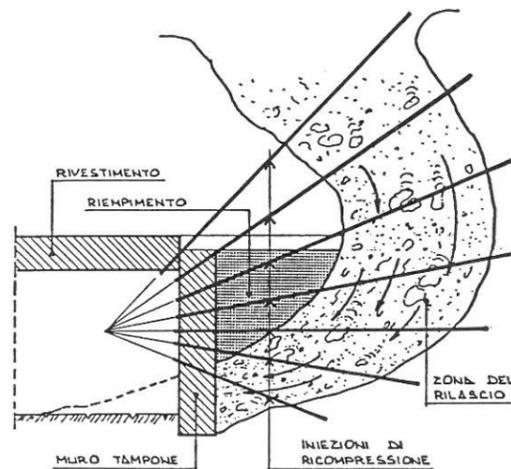
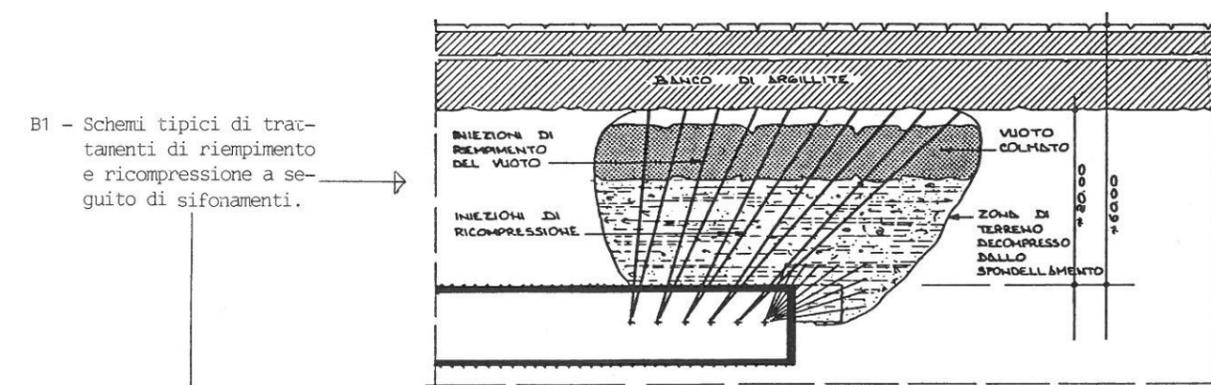
E' necessario dunque costruire un diaframma di contenimento (muro tampone in cls, rivestimento con spritz-beton armato con rete) turbando il meno possibile la massa di terreno smosso e trovando invece contrasto in zone sicure, come ad esempio il rivestimento della galleria già in opera in zona retrostante.

Il vano tra il setto così costruito ed il materiale franato deve essere riempito con cura; se possibile, tenuto conto del fatto che la zona deve poi essere riscavata, il riempimento conviene venga eseguito con materiale inerte per la sua gran parte e completato al contorno con iniezioni cementizie: altrimenti bisogna riempire con calcestruzzo pompato o semplicemente con malte a basso tenore di cemento. Dovranno poi seguire le iniezioni di ricompres-

sione con miscele sempre cementizie, generalmente pompate tramite tubi a valvola.

Quando si viene a formare un vuoto al di sopra del materiale decompresso in zona lontana dalla galleria, perchè uno strato superiore non viene trascinato dall'azione di sfornellamento, è necessario riempire la cavità o dal basso o dalla sommità del rilievo (se l'accesso è possibile).

B1 - Schemi tipici di trattamenti di riempimento e ricompressione a seguito di sifonamenti.



B2) Iniezioni ad avanzamento

Se il materiale franato ha una granulometria tale da consentire la penetrazione di miscele consolidanti (cementizie o chimiche) è possibile costituire un arco di scarico identicamente a quanto descritto nel precedente paragrafo A1).

In circostanze così precarie è sconsigliabile intervenire con cunicoli di preavanzamento perchè malgrado le piccole dimensioni si dovrebbe comunque ricorrere a costose opere di protezione.

B3) Iniezioni dall'alto

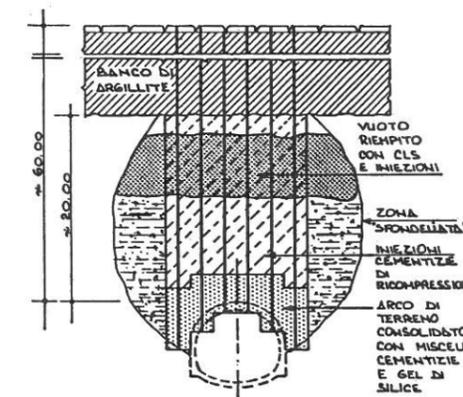
Anche in questo caso, se la granulometria del

terreno lo consente, è possibile eseguire il trattamento di consolidamento tramite perforazioni ed iniezioni eseguite dall'alto che vadano ad interessare la zona franata ed un raggio intorno, identicamente a quanto descritto in A3.

Naturalmente le iniezioni di riempimento e ricompressione devono essere completate prima dell'inizio di quelle di consolidamento, come è il-

lustrato nelle figure B1 e B3.

Nel caso sotto raffigurato della galleria Cisterna, sono state utilizzate miscele cementizie e gel di silice in quanto il diametro efficace del materiale franato risultava compreso tra 0,5 mm e 0,02 mm, considerati limitati entro i quali questo trattamento misto è necessario per conferire al terreno un buon grado di coesione.

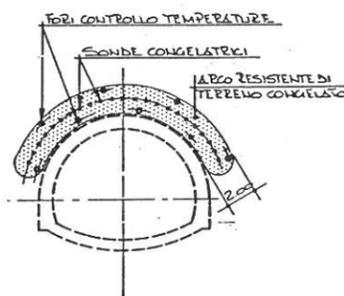


B3 - Galleria Cisterna (FF.SS. Battipaglia-Reggio Calabria - variante presso Rossarno).  
Trattamento di intasamento e consolidamento eseguito dall'alto.

#### B4) Infilaggi meccanici ("parapioggia")

Questo sistema, già illustrato in A4), è largamente impiegato per superare zone di galleria dissestate.

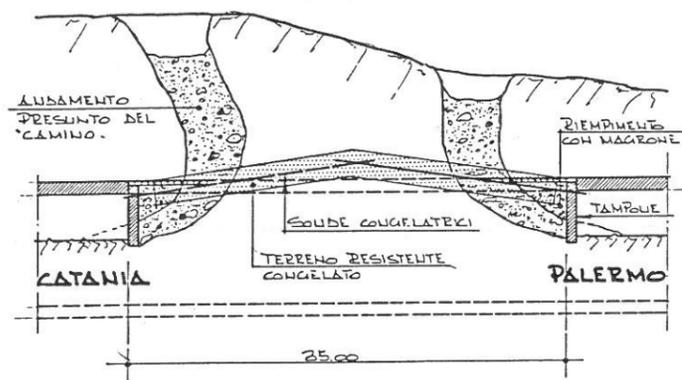
Più oltre (par. 7.2.) riporto nei dettagli un intervento di questo tipo eseguito per il riassetto della galleria Corta di Coimo (Domo-dossola).



Per contro il costo di mantenimento è minore per la salamoia rispetto all'azoto.

Normalmente la salamoia viene impiegata per lavori di ampie dimensioni e dove non occorrono alte resistenze del terreno congelato.

Riportiamo qui di seguito lo schema di un intervento a salamoia impiegato per superare il rilascio occorso nella galleria S. Giovanni dell'autostrada Messina-Palermo.



#### B5) Jetgrouting

Questo sistema, descritto in A5) per gli interventi di sostegno preventivi, può essere utilizzato anche in terreni sconvolti da azioni di sfornellamento.

Ritengo tuttavia vada posta molta attenzione in conseguenza del fatto che l'inerzia dell'eventuale arco costituito da una sola fila di colonne è piuttosto limitata ed inoltre la continuità longitudinale del consolidamento ottenuto non può essere garantita da armature.

Lo spessore dell'arco potrebbe essere maggiorato con una seconda corona di colonne: ne deriverebbe una migliore distribuzione dei carichi e quindi maggiore sicurezza.

#### B6) Congelamento

Rappresenta senza dubbio alcuno la soluzione più certa e sicura per superare le situazioni più critiche.

Come è noto la diffusione di frigorie a partire dai tubi congelatori è quasi indipendente dalla composizione granulometrica del terreno.

Quindi gli archi di scarico si formano con buona omogeneità anche nell'ambito di terreni di diversa natura rimescolati confusamente dall'incidente occorso.

Il terreno da congelare deve sempre essere preventivamente raddensato mediante iniezioni cementizie.

Per quanto concerne la scelta tra le due metodologie a disposizione per congelare il terreno bisogna tenere conto delle caratteristiche peculiari di ciascuna di esse: con la salamoia occorrono tempi più lunghi e si raggiungono resistenze minori, con l'azoto liquido il muro congelato viene costituito rapidamente ed assume resistenze molto alte.

B6 - Galleria S. Giovanni di collegamento tra le autostrade Messina-Catania e Messina-Palermo

Più oltre descriveremo invece nel dettaglio un recente intervento per il ricupero dello scudo nella galleria Agri Sauro.

#### B7) Arco di ricompressione mediante tirantature

Si tratta di un intervento che ha qualcosa in comune con l'"arco tirantato" del paragrafo A7) in quanto, mediante elementi metallici radiali, si chiama a collaborare per assicurare la stabilità del cavo un arco di terreno di spessore adeguato oltre l'estradosso.

In questo caso tuttavia le condizioni di intervento sono peggiori perchè il rivestimento o il prerivestimento della galleria, parzialmente costruita (in genere la zona calotta), non è stato in grado di incassare gli sforzi dovuti alla decompressione e si è lesionato gravemente.

Le notevoli deformazioni conseguenti hanno provocato la formazione di una zona distesa di ampio spessore. Si deve allora intervenire in una situazione di equilibrio al limite della stabilità, qualche volta al di sotto di questo limite essendo ancora in atto le deformazioni.

E' indispensabile attuare questi interventi con grande garbo, sotto il continuo controllo delle variazioni degli sforzi e delle convergenze della zona già scavata.

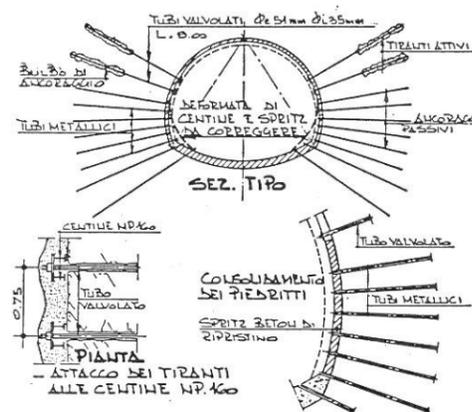
Lo schema statico del sistema è abbastanza semplice: è necessario trasmettere ad un arco di terreno di adeguato spessore, sia nell'immediato intorno dello scavo, sia a qualche metro di distanza da esso, delle forze di compressione che ne aumentino le caratteristiche di portanza.

Ciò viene normalmente ottenuto mediante la realizzazione di tirantature disposte secondo

raggere interessate fra loro da 1,50 a 3,00 m a seconda del tipo di terreno.

I tiranti (siano essi costituiti da micropali, oppure da barre piene tipo Diwidag, più raramente da trefoli) devono essere ancorati saldamente al di là della zona di distensione.

Le forze "attive" di compressione dell'arco possono essere trasmesse al terreno tensionando direttamente i tiranti sulle testate dotate di bulloni di serraggio e di piastre appoggiate sulle centine della calotta o su apposite traviature di distribuzione dei carichi; oppure possono essere generate mediante iniezioni in pressione attraverso le valvole dei micropali secondo il cosiddetto sistema del "bulbo e controbulbo" (sistema descritto in dettaglio in seguito - paragrafo C2, perchè abitualmente adottato in situazioni di riassetto di gallerie esistenti).



B7 - Galleria Spartiacque (Autostrada Carnia-Tarvisio). Schema degli interventi di tirantature attive ed ancoraggi passivi per rifacimento piedritti deformati

#### B8) Drenaggi

Nell'ambito di questa categoria d'interventi, i fori drenanti non sono quasi mai in grado di risolvere da soli la difficile situazione, perchè i terreni hanno bisogno di acquisire autoportanza mediante consolidamenti idonei oppure devono essere sostenuti meccanicamente.

In presenza di falda i drenaggi sono d'altra parte determinanti per la stabilità del nuovo cavo sia perchè riducono il carico idraulico, sia perchè con la regolazione delle acque eliminano qualsiasi pericolo di ulteriore azione di sifonamento.

I problemi sono quelli stessi già dibattuti nel paragrafo A8.

I drenaggi sono realizzati quasi sempre a completamento degli interventi di consolidamento della zona franata, ad eccezione di quelli di congelamento.

#### 5. Trattamenti di ripristino conservativo

Includo in questa categoria tutte quelle gallerie già completamente finite (più o meno vecchie) che per motivi vari si sono venute a trovare in una situazione di instabilità tale da dovere ricorrere ad importanti opere di rafforzamento per garantire il loro esercizio sicuro.

Molteplici sono le cause che provocano i dissesti delle gallerie. Tra queste le principali sono:

- normale obsolescenza dei rivestimenti
- difetti di costruzione che nel lungo tempo innescano fenomeni evolutivi al contorno: ad esempio imbottimenti a tergo del rivestimento difettosi o assenti e conseguente distribuzione non omogenea dei carichi che sollecitano l'opera
- mutamenti importanti delle condizioni al contorno.

Le conseguenze sull'opera sono formazione di lesioni più o meno diffuse nel corpo del rivestimento, deformazioni spesso di grande entità e, nella maggior parte dei casi, in presenza di acqua fenomeni evolutivi di decompressione dovuti al trascinarsi all'interno della galleria di particelle fini di terreno.

Gli interventi di ripristino sono sempre delicatissimi in quanto si deve operare, specialmente all'inizio, in condizioni di precaria stabilità.

Ricordo ancora una volta l'importanza di stabilire immediatamente un'indagine approfondita per potere intervenire con i trattamenti più idonei e la messa in opera di apparecchiature capaci di seguire l'evoluzione di sforzi e deformazioni.

Analogamente a quanto fatto per le precedenti categorie passo qui di seguito ad una schematica rassegna dei principali interventi di ripristino che si possono attuare; devo tuttavia sottolineare che si tratta di una schematizzazione abbastanza "forzata" in quanto, trattandosi generalmente di situazioni complesse, è sovente necessario adottare in una stessa galleria combinazioni differenti degli interventi sotto riferiti.

#### C1) Iniezioni al contorno

Possono assumere funzioni differenti a seconda dello stato di decompressione del terreno e della sua composizione granulometrica.

Importantissime sono le iniezioni di imbottimento da eseguirsi immediatamente a tergo del rivestimento: queste coprono il ruolo determinante di ottenere un primo riequilibrio dei carichi, arrestando nel contempo eventuali importanti venute d'acqua.

Forniscono in definitiva un primo grado di sicurezza che consente di operare nelle zone più all'esterno con maggiore tranquillità.

Si utilizzano generalmente miscele cementizie, stabilizzate con bentonite, che vengono iniettate

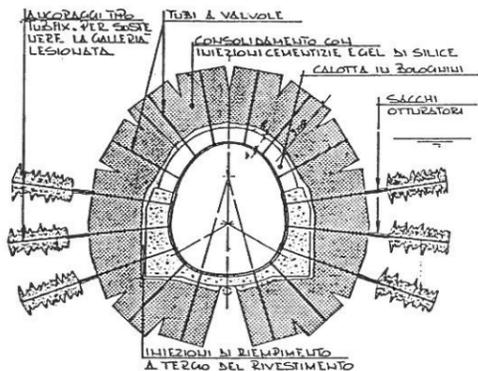
te sia attraverso appositi fori, sia attraverso le prime valvole dei tubi che serviranno poi per la creazione dell'arco di scarico.

Si tratta sempre di una operazione molto difficile in quanto la diffusione della miscela può essere su ampie superfici e quindi ne possono derivare spinte notevoli su un rivestimento che si trova in precarie condizioni di equilibrio.

Bisogna quindi iniettare piccoli quantitativi in molte riprese. Qualche volta anche queste cautele non sono sufficienti per la sicurezza ed allora è necessario ancorare preventivamente il rivestimento, così come è stato fatto in un tratto molto disastrato della galleria Motto d'Oneggio (canale Regina Elena - vedere schizzo sottostante).

Se il terreno nel quale è immersa la galleria disastrata è costituito da formazioni incoerenti (sabbiose-ghiaiose con lievi percentuali di limi) attraverso iniezioni di consolidamento può essere costituito un arco di scarico nell'ambito del quale vengono deviati in gran parte gli sforzi che precedentemente gravavano sul solo rivestimento.

Le tecnologie per realizzare questo intervento sono varie; la più normale è quella sotto illustrata che consiste nella realizzazione di raggi successive di fori di iniezione.



C1 - Galleria Motto d'Oneggio - Canale Regina Elena Associaz. Irrigaz. Est Sesia. - Trattamento di ripristino della galleria lesionata.

#### C2) Arco di ricompressione - Bulbi e contro-bulbi

Se i terreni sono molto fini, con abbondante presenza di frazione limosa o argillosa, o addirittura se si tratta di bancate d'argilla alternate a straterelli sabbiosi, l'arco di scarico può essere costituito tramite micropali metallici valvolati (o sistemi similari tipo tubi con sacchi otturatori) disposti secondo raggi successive.

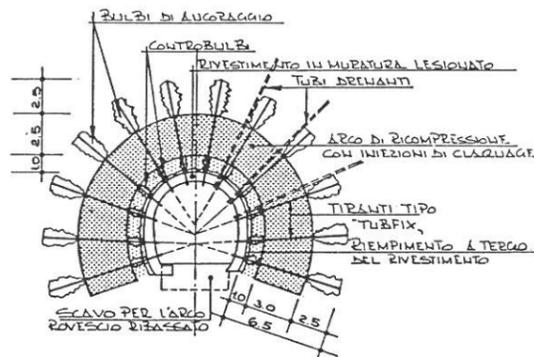
La sequenza delle fasi operative risulta la seguente:

- perforazione e posa del micropalo fino a superare di 3-4 m la zona di distensione
- realizzazione del bulbo di ancoraggio lungo la tratta terminale, in terreno stabile, con iniezioni in pressione
- fissaggio sulla testa del micropalo di una piastra metallica e leggero tensionamento del micropalo contro il rivestimento
- raggiunta così una situazione di prima sicurezza, iniezioni senza pressione per l'imbottimento a tergo del rivestimento
- creazione, nei primi 2-3 m, dei controbulbi con iniezioni in pressione di piccoli quantitativi di miscela
- formazione dell'arco di ricompressione nella zona centrale dei micropali, mediante iniezioni di "claquage" con miscele cementizie inviate in pressione secondo passate successive (minimo 2 passate).

Il tasso di ricompressione fornito all'arco può essere controllato mediante gli sforzi di trazione cui vengono sottoposti i micropali nella loro parte centrale.

Così ad esempio nell'ambito dei lavori di riassetto della galleria S. Pedrino di Varese (Ferrovie Nord Milano) alcuni micropali strumentati hanno denunciato a più di un anno dal termine del trattamento una trazione residua di 80 KN; tale trazione corrisponde ad una precompressione media nel corpo dell'arco pari a 0,2 MPa, come è stato controllato tramite un calcolo su modello ad elementi finiti.

Queste trazioni nel corso delle iniezioni avevano raggiunto valori di picco di 120-150 KN corrispondenti a pressioni uniformemente distribuite nell'arco di oltre 0,3 MPa.



C2 - Galleria S. Pedrino (Varese - Ferrovie Nord - Milano). Arco di ricompressione per la ricostituzione dell'arco in muratura lesionata

#### C3) Tirantature

Nel caso di gallerie dissestate in terreni rocciosi (rocce molto fratturate) o in presenza di alternanze di stratificazioni di rocce molto tenere e più compatte, gli archi di scarico possono essere ottenuti mediante tirantature

realizzate con barre piene, oppure con tubi, più raramente con trefoli in acciaio.

E' sempre consigliabile fornire un tasso di pretensione ai tiranti perchè la situazione di equilibrio limite normalmente non consente ulteriori deformazioni: tiranti "passivi" entrerebbero in azione solamente dopo ulteriori cedimenti locali, oppure estesi a tutta la zona dell'arco.

Naturalmente l'ancoraggio delle tirantature deve essere realizzato (con sistemi meccanici o con iniezioni) al di là della zona plastica di distensione.

#### C4) Drenaggi

L'importanza della regolazione delle acque è sempre notevole. Quasi sempre i dissesti sono causati proprio dalle percolazioni che investono il rivestimento in modo casuale e variabile nel tempo.

Raramente tuttavia è possibile risolvere il problema con il semplice impiego di tubi drenanti: questi devono essere messi in opera e mantenuti attivi per assicurare l'esercizio sicuro dell'opera nei tempi lunghi.

#### C5) Altri sistemi di intervento

Le metodologie sopra descritte sono le più comunemente utilizzate per sistemare le gallerie dissestate.

Come già accennato in questo campo i problemi che si devono affrontare sono svariati ed anche altri sistemi possono essere impiegati adeguatamente per superare i punti critici.

Così ad esempio se un rivestimento in muratura non fosse eccessivamente lesionato si potrebbe intervenire rinforzandolo direttamente con l'inserimento di barre metalliche (sifone Canale Cavour), oppure al contrario, in caso di forte degrado, il rivestimento potrebbe essere abbattuto e rifatto: naturalmente questa delicata operazione deve essere eseguita sotto la protezione di infilaggi o di iniezioni o di congelamento (galleria Agri-Sauro).

Potrebbe anche essere preso in considerazione il jetgrouting, facendo molta attenzione all'influenza delle alte pressioni sull'integrità dell'opera.

#### 6. Conclusioni della parte generale

Nel corso della stesura di questa panoramica sugli "interventi speciali atti a garantire la stabilità del cavo in condizioni difficili" mi sono domandato spesso se fosse lecita una schematizzazione piuttosto rigida in un campo operativo così ampio, dove ogni caso fa storia a sé e dove è sempre faticoso ritrovare la soluzione più idonea che spesso si raggiunge strada facendo.

Ho comunque proseguito cercando almeno di riunire alcuni problemi non uguali, ma aventi matrici comuni negli interventi protettivi da

attuare.

La progettazione non è facile e non semplice è prevedere in modo preciso quanto veramente occorra fare; bisogna sovente operare secondo "fasi" successive "aperte" apportando le variazioni che mano mano appaiono necessarie in base alle reazioni del terreno.

Senza dubbio accurate indagini preliminari conoscitive del fenomeno in atto e controlli continui dei risultati conseguiti forniscono un notevole contributo ad una progettazione più precisa ed al contenimento degli interventi entro i limiti indispensabili per garantire la sicurezza.

#### 7. Descrizione di alcuni interventi eseguiti

Riferisco qui di seguito su alcuni interventi eseguiti in epoca recente, cercando di porre lo accento sulle motivazioni che hanno determinato le scelte, sull'andamento dei lavori (senza scendere nei dettagli esecutivi), e sui risultati conseguiti.

##### 7.1. Sifone del Canale Cavour sotto il Sesia Associazione Irrigazione Est Sesia-Novara (Coutenza Canali Cavour)

Impresa lavori specialistici: RODIO S.p.A.

Si tratta dell'importante opera che consente al Canale Cavour di sottopassare il letto del fiume Sesia, nei pressi di Greggio, circa 200 m a valle del ponte dell'autostrada Milano-Torino.

Quest'opera, come mostrato sulla figura n. 1, è costituita da 5 gallerie gemellate (tombe del sifone) costruite in muratura di mattoni aventi piedritti comuni.

Le arcate in mattoni hanno uno spessore di 52 cm.

I cinque fornici (sezione ellittica con larghezza ed altezza massime rispettivamente di 5 m e di 2,30 m) sono compresi tra due piedritti di maggiore spessore posti l'uno a monte e l'altro a valle del sifone e sono uniti, nella parte sovrastante gli archi in mattoni, da una cappa piana di materiale misto cementato con calce e pozzolana che riempie le zone tra le arcate.

Questa sorta di soletta prima dell'inizio dei lavori di riassetto era ancora parzialmente rivestita dagli originali tavoloni di legno fissati tra loro ed alla sottostante muratura con zanche metalliche: l'accuratissima opera in legname di rovere ha funzionato come protezione delle murature sottostanti nei confronti dell'azione abrasiva esercitata dal materiale alluvionale del letto del fiume.

La fondazione era costituita da un plateone di spessore 1 m di materiale cementato da pozzolana ed irrigidito da 3 speroni longitudinali, dei quali due sottostanti i piedritti di

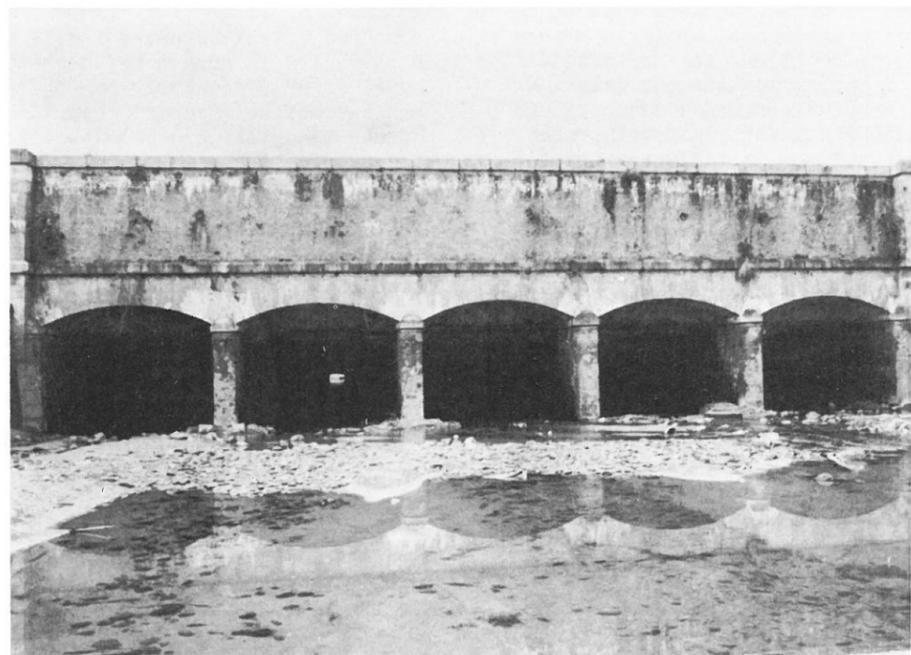


Fig. n. 1

monte e di valle ed il terzo nella mezzaria del l'opera.

Sui vecchi disegni vi è traccia di passoni di fondazione in legname utilizzati nella costruzione di questi speroni.

Il sifone è stato costruito negli anni 1863/1864: il manufatto, dopo circa 120 anni dalla sua costruzione, desta meraviglia per la perfezione esecutiva e per l'ottima condizione di conservazione dei materiali impiegati.

Un'opera simile è ormai da considerarsi irripetibile per l'impossibilità di reperire ai giorni nostri mano d'opera altrettanto abile nel realizzare volte in cotto dalla curvatura così perfetta o di lavorare con tanta precisione la pietra nelle forme richieste.

Anche il tavolato in legname, che costituisce la copertura superiore del sifone, risulta una vera opera d'arte sia per la cura con cui è stato realizzato, creando incastri tra una tavola e l'altra e chiodature con ferri forgiati a mano, sia per la scelta del materiale (rovere) che ha dimostrato una durata impensabile.

Il sifone, all'epoca della sua costruzione, è stato impostato al di sotto del fondo del fiume, in modo che lo stesso materiale ghiaioso trasportato dal fiume costituisse un ulteriore elemento di protezione del manufatto.

Nel corso della costruzione le difficoltà da superare sono certamente state notevoli a causa della presenza continuativa della falda freatica originata dal fiume, che allora scorreva in un'ansa naturale posta sulla sinistra orografica dell'attuale percorso.

Malgrado le condizioni di lavoro assai severe l'opera è risultata solidissima, come è possibile ancora constatare osservando la precisione con la quale sono stati predisposti i vari corsi di mattoni che costituiscono le calotte molto ribassate delle arcate: alcuni sondaggi praticati nelle murature hanno evidenziato l'ottima consistenza e conservazione delle malte leganti utilizzate.

Il manufatto dunque ha bene resistito per 120 anni in una situazione idraulica che per un lungo periodo di tempo è rimasta identica alle condizioni di progetto, ma che negli ultimi decenni è divenuta sempre più gravosa per effetto dell'abbassamento del letto del Sesia.

Questo abbassamento, appunto, originato dai disordinati prelievi di ghiaia e sabbia lungo il greto del fiume, ha provocato l'asportazione totale della copertura di materiale alluvionale (un paio di metri) che si era accumulato al di sopra del manufatto e che funzionava da "smorzatore" della corrente.

In tempi più recenti l'ulteriore infossamento del letto del fiume (stimato di oltre 1,5 m in totale) ha originato:

- a monte un vero e proprio scalzamento della soglia del sifone, di 1 m medio di altezza
- a valle una identica situazione con conseguenti fenomeni di erosione, lungo tutto il piedritto di valle del sifone nel corso delle piene del fiume, lungo un tratto concentrato di 100 m di lunghezza in regime normale verso sponda sinistra.

Il salto a valle eradi circa 1,5 m (fig. n. 2).

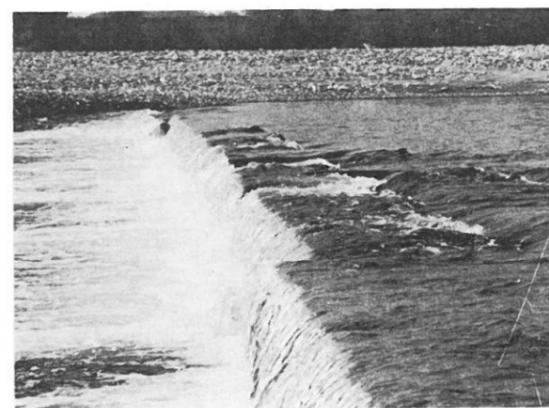


Fig. n. 2

In definitiva tutta l'opera veniva chiamata a lavorare come una vera e propria traversa fluviale, investita direttamente in sommità dalla corrente del fiume: soprattutto durante le piene le murature erano sottoposte a notevolissimi sforzi.

Le condizioni di esercizio dell'opera erano dunque mutate in modo radicale rispetto a quanto previsto in sede di progettazione e divenivano veramente critiche mettendo in serio pericolo la stabilità delle gallerie del sifone; l'opera di ripristino appariva indilazionabile vista anche la tendenza evolutiva del fenomeno di scalzamento e del conseguente degrado.

Nel corso dei primi sopralluoghi effettuati, in epoca di poco successiva alla consegna del manufatto da parte del Demanio alla Coutenza Canali Cavour, si potevano notare alcuni sintomi dei dissesti in atto nella struttura e precisamente (come mostrato nella figura n. 3):

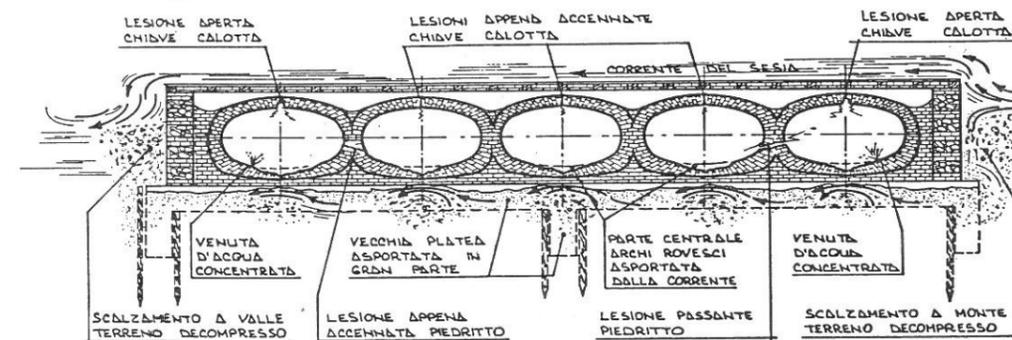


Fig. n. 3 - Sifone del canale Cavour sotto il Sesia. Situazione schematica dell'opera prima dell'intervento di risanamento.

- lesioni abbastanza pronunciate nella zona di chiave delle due arcate più esterne (di monte e di valle) lungo tutti i 260 m di lunghezza del sifone (vedere figura n. 4)
- fessure molto aperte "passanti" attraverso i

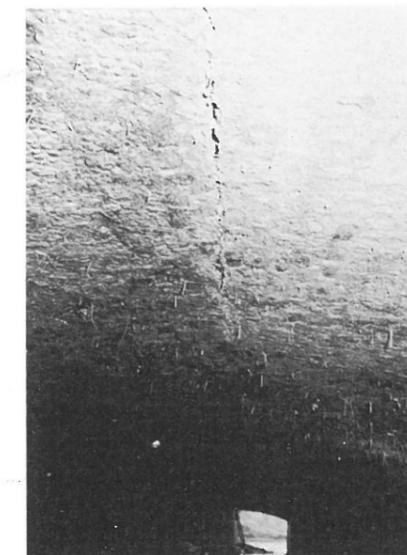


Fig. n. 4

piedritti tra la galleria di monte e la sua vicina e tra la galleria di valle e la sua vicina; questo soprattutto lungo i 100 m terminali del sifone, lato Novara (praticamente al di sotto dell'alveo del Sesia in situazione di deflusso normale) (vedere figura n. 5)

- sempre in questa zona, venute d'acqua in pressione concentrate in alcuni buchi nella zona dell'arco rovescio e del piedritto nelle due gallerie estreme di monte e di valle.

E' iniziata allora la fase di indagine preventiva che è consistita in:

- sondaggi nel terreno sia nella zona di monte che in quella di valle del sifone, in modo da

stabilire la composizione granulometrica e la permeabilità delle formazioni alluvionali e lo stato di decompressione

- sondaggi attraverso le murature e terreno sottostante i piedritti e gli archi rovesci

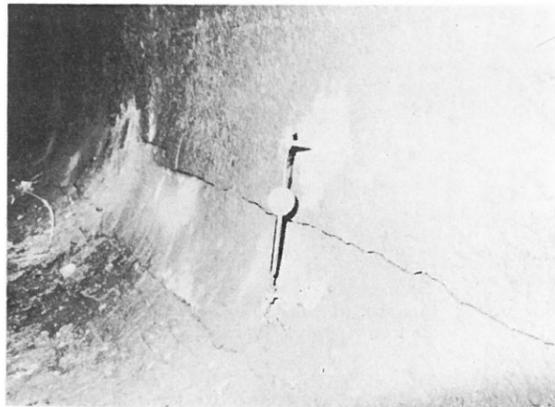


Fig. n. 5

- posa di apparecchiature per il controllo dei movimenti.

Si è cercato di individuare le cause che hanno provocato i dissesti delle strutture murarie anche osservando nel dettaglio i seguenti punti:

- forma delle lesioni e loro andamento
- flusso della corrente del fiume in sponda sinistra in corrispondenza dell'impatto contro il manufatto ed alla soglia a valle dove si è formata un'erosione, come già detto, profonda 1,5 m circa
- gli eventi occorsi nell'ambito della sovrastruttura in legname del sifone, questo sia in destra dove il fiume scorreva qualche anno prima (e scorre ancora oggi in regime di piena), sia in sinistra dove la corrente è concentrata normalmente (vedere fig. n. 6).



Fig. n. 6

Gli studi basati sulle osservazioni nell'arco di un anno (a cavallo di una annata d'esercizio del canale) e sui dati forniti dalla in-

dagine, hanno confermato il notevole turbamento occorso nell'equilibrio statico del manufatto ed hanno sinteticamente portato alle seguenti conclusioni:

- i fenomeni di scalzamento, evidentissimi sia a monte che a valle, avevano provocato delle lievi rotazioni dei due piedritti d'estremità (non più contrastati dal terreno in modo adeguato) verso la parte centrale del sifone, da cui la formazione delle lesioni in chiave degli archi (di trazione all'intradosso) e le rotture dei piedritti per effetto misto di compressione e di taglio (si erano notati anche lievi scorrimenti trasversali) (vedere figura n. 7)

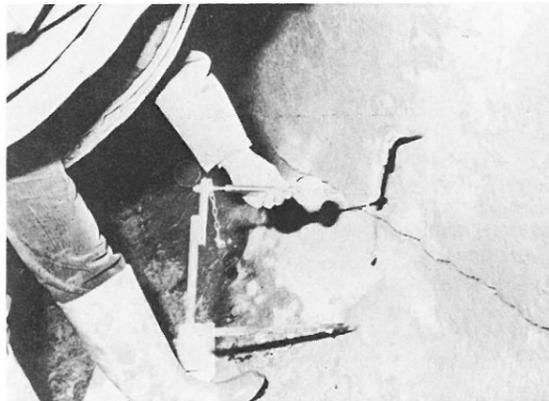


Fig. n. 7

- la corrente subalvea del fiume, favorita anche dalla decompressione del terreno, ha eroso profondamente il plateone di fondazione (riducendone lo spessore mediamente a soli 20 cm) ed ha avuto modo di sollecitare in modo sensibile la zona di appoggio dei piedritti, anche di quelli più centrali; le frazioni più fini del terreno sono state asportate non solo a monte ed a valle, ma anche in alcune parti al di sotto degli appoggi, soprattutto là dove si sono riscontrate venute di acqua all'interno delle gallerie (in fase di asciutta del sifone). In alcuni punti gli archi rovesci risultavano erosi anche nella parte intradosale, come mostrano le figure nn. 3 e 10.

In queste condizioni appariva sempre più urgente un intervento di stabilizzazione di tutta l'opera.

Descrivo qui di seguito succintamente le varie operazioni che si sono susseguite a partire dall'ottobre 1983 fino alla fine di novembre 1985: da notare che i lavori all'interno del sifone hanno potuto avere luogo solamente nel corso di 3 asciutte della durata di 1,5 mesi ognuna.

#### 7.1.1. L'intervento di ripristino attuato

La scelta del sistema da adottare non è stata semplice in quanto le risorse di stabilità della struttura si erano negli ultimi anni notevolmente affievolite e quindi, come spesso accade in casi del genere, si aveva timore che le turbative apportate dalle lavorazioni al normale regime del sifone potessero aggravare la situazione, almeno in un primo periodo.

Si è subito pensato alla realizzazione di una sorta di portale scatolare in c.a., mediante la costruzione di due paratie lungo l'unghia di monte e di valle collegate in testa da un solettone in c.a.; struttura che racchiudesse tutto il sifone e risultasse nel contempo indipendente da esso.

Il primo progetto studiato nei dettagli secondo questo orientamento, ha dovuto essere abbandonato per svariate ragioni (tecniche ed economiche), tra le quali le principali sono:

- difficoltà di esecuzione di paratie in acque fluenti (subalvee del Sesia) proprio nelle zone di maggiore decompressione del terreno in prossimità delle fondazioni dei piedritti del sifone
- rischio che la deformazione elastica della testa della paratia (paratia incastrata alla base, data l'impossibilità di creare tiranti permanenti nel letto del fiume) fosse origine di trasmissione di carichi al corpo del sifone. La "non trasmissione" di carichi imponeva di considerare uno sbalzo libero verso valle d'altezza 6 m, il che avrebbe comportato la costruzione di una paratia profonda 21 m circa
- i calcoli avevano poi evidenziato che il solettone di copertura in c.a., a causa della grande luce (32 m) e dell'impossibilità di trovare appoggio sulla vecchia struttura, avrebbe dovuto avere uno spessore notevole, tale da esaltare ancora maggiormente l'attuale sporgenza dell'opera

- il tutto non avrebbe poi risanato le murature bisognose di un certo consolidamento.

Questa serie di ragionamenti ha fatto optare per una soluzione più semplice e flessibile, certamente meno costosa, che aveva il pregio di poter essere affrontata in fasi successive e di fornire immediatamente la ricostituzione necessaria per la sicurezza delle strutture.

Veniva coinvolta più direttamente la vecchia opera che in fondo con un certo aiuto avrebbe ancora potuto riacquisire piena efficienza.

L'intervento proposto si è basato principalmente su iniezioni da eseguirsi nell'intorno dei piedritti di monte e di valle, fino a raggiungere limitate profondità al di sotto della opera, oltre a cuciture nelle murature e consolidamenti sotto gli appoggi del sifone.

Si è ritenuto infatti che bastasse un apporto migliorativo relativamente modesto per ridare al terreno le caratteristiche originarie e renderle stabili nel tempo, allo scopo di ricostituire la situazione di sicurezza che l'opera certamente aveva nel periodo immediatamente seguente alla sua costruzione.

Gli interventi sono illustrati nella figura n. 8.

Li descrivo qui brevemente nel loro ordine cronologico d'esecuzione.

#### Le barre di cucitura

E' stato ritenuto necessario, come prima operazione, fornire subito un certo grado di sicurezza agli archi mediante l'applicazione di barre metalliche di cucitura disposte in modo tale da assorbire gli sforzi di trazione che si sono sviluppati nella zona intradosale degli archi delle gallerie di monte e di valle.

Come mostrato sull'allegato disegno, a partire dall'interno delle "canne" adiacenti sono state eseguite delle perforazioni suborizzontali del diametro di 65 mm (vedere figura n. 9).

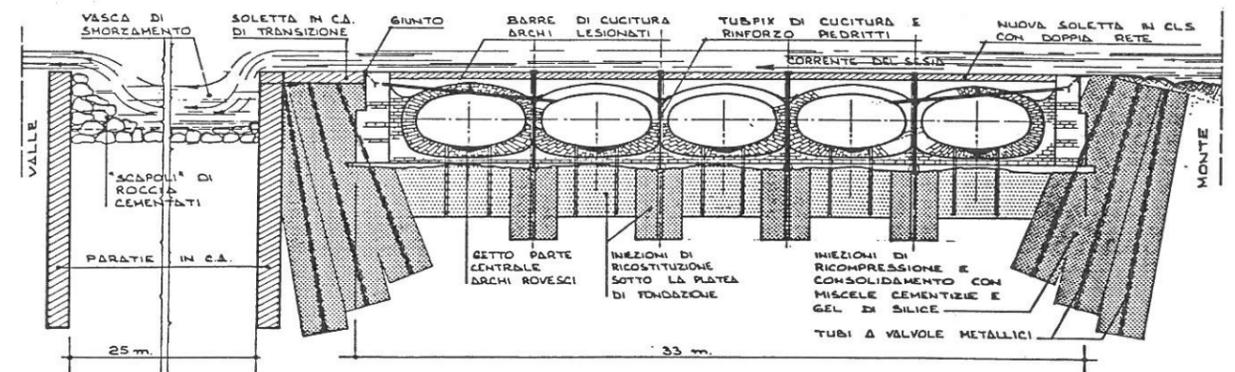


Fig. n. 8 - Sifone del canale Cavour sotto il Sesia - Schema dei trattamenti di ripristino dell'opera

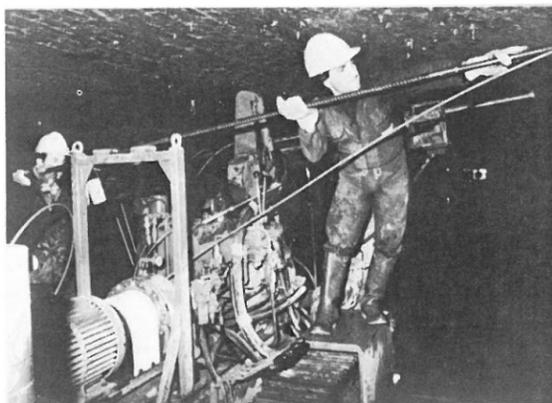


Fig. n. 9

Le murature hanno subito minime sollecitazioni perchè sono state utilizzate sonde a rotazione con l'uso di corone a diamanti.

Nei fori sono state introdotte barre  $\varnothing$  26 mm ad aderenza migliorata seguite da iniezioni di intasamento dello spazio anulare tra la barra e la parete del foro.

La miscela impiegata aveva la seguente composizione

acqua	50 Kg
cemento	100 Kg
additivo antiritiro	secondo prescrizioni

L'interasse delle barre è stato tenuto pari a 1,50 m.

#### Le iniezioni di ricompressione del terreno

Le iniezioni hanno svolto il duplice ruolo di ricomprimere il terreno rilassato per effetto dell'erosione e di conferire ad esso un buon grado di consolidamento, fissando anche le frazioni più fini sabbiose.

Sono state eseguite, sia a monte che a valle, a partire da un rilevato temporaneo di 6 m di larghezza ed altezza 2 m circa al di sopra della soletta superiore del sifone.

Si è operato per tratte successive allo scopo di incorrere in danni sempre modesti in caso di piene impreviste.

I fori di iniezione sono stati disposti a quinconce su 3 file, così come mostrato sul disegno, ed interassati di 2,20 m.

Essi sono stati tutti equipaggiati con tubi a valvole metallici da 1"½ con valvole distanziate di 33 cm (3 valvole al metro) l'una dall'altra.

Data la delicatezza delle iniezioni era infatti necessario avere a disposizione valvole molto ravvicinate per potere intervenire in fasi successive con piccoli quantitativi di miscela.

I lavori di iniezione sono stati regolati da una precisa programmazione in funzione dell'an-

damento abituale della corrente del Sesia.

#### Le miscele di iniezione. Tipi, quantitativi e pressioni

In funzione della granulometria e del grado di densità del terreno, per raggiungere lo scopo voluto, sono stati utilizzati differenti tipi di miscele.

Come si può notare (figura n. 8) attraverso le due file di fori più esterne (a monte ed a valle) sono state iniettate per prime miscele a base di cemento in modo da costituire una sorta di barriera e ridurre così le fughe, in zone non interessanti, delle iniezioni successive.

In seguito sono state iniettate nell'ordine le file più interne e le file centrali, con miscele stabili a base di cemento e bentonite, seguite da gel di silice per penetrare le frazioni sabbiose.

Per le miscele cementizie sono stati utilizzati differenti rapporti acqua/cemento a seconda delle necessità.

Si è dovuto procedere con grande cautela sia per non disperdere i materiali iniettati sia per non sollecitare le strutture murarie in precarie condizioni di stabilità.

Si è sempre adottato il sistema di iniezione a "volume controllato", introducendo piccoli quantitativi di miscela per valvola in fasi successive senza mai superare la pressione di rifiuto (5 bar per le file a ridosso delle murature, 10 bar per le altre).

Per quanto concerne i quantitativi di miscela, detto  $V_t$  il volume di terreno da interessare,  $V_c$  il volume di miscela cementizia e  $V_g$  il volume di gel di silice, il grado di consolidamento voluto (in 3 fasi successive) è stato ottenuto iniettando un volume complessivo pari a

$$\begin{aligned} V_c &= 0,14 V_t \\ V_g &= 0,10 V_t \end{aligned}$$

Le operazioni si sono svolte con buona regolarità: solamente una piena improvvisa del Sesia ha distrutto una serie di tubi a valvole lungo una tratta a valle di una ventina di metri in sponda sinistra.

Molti fori hanno dovuto qui essere rifatti in quanto le iniezioni di gel di silice non erano state ancora eseguite e quelle cementizie in modo parziale.

Si sono notate frequenti comunicazioni attraverso le murature specie nella zona bassa dei piedritti e attraverso i due archi rovesci; "cianfrinature" adeguate hanno assicurato il risanamento di queste murature nelle zone di maggiore debolezza.

Anche le venute d'acqua si sono praticamente tutte acciecate.

Nel corso delle operazioni i deformometri installati non hanno mai denunciato movimenti sensibili.

#### Ricostituzione degli archi rovesci

Nella loro zona più centrale gli archi rovesci apparivano molto deteriorati: i mattoni erano stati parzialmente erosi nella loro parte superiore a contatto con lo scorrimento delle acque del sifone, come mostra la figura n. 10.



Fig. n. 10

È stata eseguita una accurata pulizia con aria ed acqua in pressione e successivamente è seguito un getto in calcestruzzo che ha riempito tutta la parte mancante al centro ed ha ricostituito la cementazione fra i mattoni anche nelle due zone più laterali degli archi rovesci.

#### Cucitura dei piedritti intermedi e consolidamento sotto il sifone

Si tratta forse dell'operazione più delicata che ha comportato un controllo continuativo dei sollevamenti della struttura, come verrà meglio specificato più oltre.

Come mostrato sul disegno questo lavoro, avente come scopo la ricostituzione di un buon appoggio di tutta l'opera ed il rinforzo delle murature dei piedritti, ha comportato i seguenti interventi:

- perforazioni, verticali a partire dalla soletta superiore lungo le 4 linee centrali dei piedritti, a rotazione, con diametro  $\varnothing$  101 mm e lunghezza di 7,30 m tale da raggiungere una profondità di 3 m circa sotto l'attuale basamento deteriorato.
- Interasse di fori 1,50 m (intervallati alle barre di cucitura suborizzontali già in opera)
- inserimento di micropali tubolari (diametro esterno  $\varnothing$  60,5 mm e spessore 6 mm) equipaggiati con valvole di iniezione ogni 50 cm lungo i 3 m inferiori e di 2 valvole nel metro sovrastante, delle quali quella più bassa avvolta da un sacco otturatore di juta (vedere figura n. 11)
- espansione del sacco otturatore e pulizia ac-



Fig. n. 11

curata dello spazio anulare tra tubo metallico e muratura al di sopra del sacco stesso

- iniezione con miscela speciale (c/a = 2) additivata con antiritiro, tramite la valvola più alta, dello spazio all'esterno del tubo in modo da creare un "ammarro" sicuro ed omogeneo tra le pareti del tubo di cucitura e la muratura.

Si è osservato, nel corso di queste iniezioni, una certa diffusione della miscela nel corpo stesso delle murature e si è così aggiunto un benefico effetto ricostitutivo dei corsi di mattoni più ammalorati.

Nelle zone, già segnalate, di fessure passanti la miscela ha dovuto essere contenuta con sigillature realizzate con malte a rapida presa

- esecuzione della guaina attorno ai tubi lungo i 3 m sottostanti il manufatto
- iniezioni con miscela cementizia prima (11% del volume di terreno), di gel di silice poi (9% del volume di terreno), ognuna in due passate successive con un limite di pressione di 5 bar
- infine sono state eseguite delle iniezioni di sole miscele cementizie (12% del  $V_t$ ) al di sotto degli archi rovesci tramite due file (per arcata) di fori interassati di 2 m equipaggiati con tubi a valvola in plastica. Spessore medio trattato pari a 2,00 m circa.

#### Controlli dei sollevamenti

Tutte le fasi di questa operazione sono state condotte con estrema cautela e seguite con sistematiche livellazioni di precisione. I controlli sono stati così organizzati:

- individuazione planimetrica di 11 aree di lavoro sull'estradosso del sifone
- posa dei punti di controllo su ogni area
- realizzazione di 3 caposaldi topografici di riferimento.

I punti di controllo (vedere figura n. 12) erano costituiti da tubi di acciaio resi solidi al manufatto con una preventiva cementazione e provvisti sulla sommità di una barretta di invar graduata.

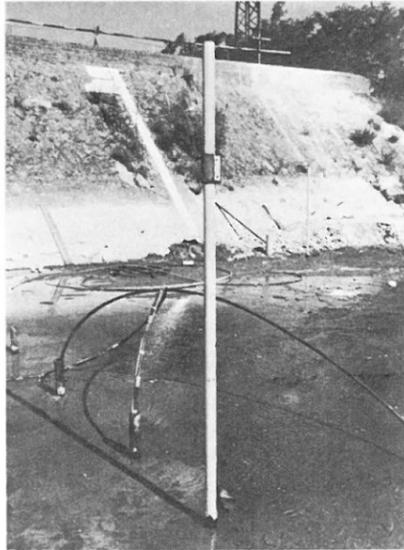


Fig. n. 12

Ogni area era provvista di 16 di tali punti di controllo, disposti in corrispondenza dei piedritti.

I caposaldi, realizzati in cls a valle del sifone, costituivano anche le stazioni topografiche per il livello di precisione.

Le letture venivano effettuate, durante le iniezioni, ad intervalli orari e confrontate con il primo rilevamento effettuato, ovviamente prima dell'inizio delle lavorazioni.

Il tutto avveniva sul posto, con l'ausilio di un calcolatore tascabile, nel quale venivano inseriti i dati rilevati.

Con una veloce elaborazione si ottenevano quindi i risultati della livellazione.

I sollevamenti sono stati tutti contenuti entro il limite massimo imposto di 2 mm.

#### Opere di seconda fase

Comprendono tutte le lavorazioni per la sistemazione idraulica a valle del sifone, la costruzione cioè della vasca di "smorzamento".

Nell'ordine sono state realizzate:

- una paratia in c.a. a 4 m di distanza dal

piedritto di valle, di spessore 1 m e profondità 12 m

- una soletta orizzontale di transizione in c.a. tra la paratia e la sommità di valle del sifone. In questo punto è stato realizzato un giunto per isolare staticamente le due strutture

- una paratia in c.a. terminale a valle (a 25 m di distanza dalla precedente) di 0,80 m di spessore e di 10,50 m di profondità

- vasca di calma tra le due paratie di lunghezza 25 m e profondità di 1,30 m oltre ad 1 m di salto d'acqua. Sul fondo di tutta la vasca sono stati distribuiti in modo continuo dei grossi blocchi di pietra (scapoli di roccia di 20 q.li mediamente) cementati con calcestruzzo pompato (vedere figura n. 13).



Fig. n. 13

#### Rifacimento della soletta di copertura

Nel frattempo, ad eccezione di una zona in sponda destra dove l'operazione era già stata eseguita tempo addietro, è stata rifatta in calcestruzzo armato con due strati di rete elettrosaldata, tutta la soletta di copertura per uno spessore di 20 cm: questa ha preso dunque il posto della struttura in legname che, come già detto, per oltre un secolo ha protetto la parte superiore del sifone.

Il getto, nella sua parte superficiale, è stato trattato con materiali speciali anti-abrasione.

#### 7.1.2. Considerazioni conclusive

Ho voluto qui riportare questo intervento perché, pur al di fuori degli schemi tradizionali delle gallerie in situazioni difficili, mi sembra possa interessare in quanto la soluzione scelta (nei confronti di altre possibili) ha cercato di sfruttare al massimo le forze residue di

un'opera costruita meravigliosamente 120 anni fa, che è andata in crisi solamente a causa delle mutate condizioni al contorno.

#### 7.2. Galleria Corta di Coimo

Società Subalpina di Imprese Ferroviarie s.r.l. - Domodossola

Impresa lavori specialistici: RODIO S.p.A.

È una vecchia galleria monobinario, di 46 m circa di lunghezza, situata al Km 13+674 della linea che da Domodossola risale verso S. Maria Maggiore, lungo le scoscese pendici di sponda sinistra della valle del Melezze Occidentale, detta Val Vigizzo.

Si tratta di una piccola opera che ha tuttavia comportato grossi problemi di stabilità e che è stata fonte di preoccupazioni fin dal 1950, anno in cui sono stati eseguiti alcuni lavori di rinforzo del rivestimento.

In tempi recenti, specialmente a seguito dell'alluvione dell'agosto 1978, il rivestimento in bolognini di pietrame è andato sempre più deteriorandosi e le forti spinte cui è stato sottoposto hanno provocato lesioni molto diffuse ed aperte, soprattutto lungo 30 m lato imbocco Domodossola, e deformazioni di oltre 5 cm verso l'interno del paramento, riducendo la sagoma della calotta al minimo indispensabile per il transito dei convogli.

Alcune misurazioni a cavallo delle fessure denunciavano situazioni di instabilità ancora in atto al momento della progettazione relativa all'intervento di consolidamento definitivo.

Come mostra la figura n. 14 la galleria at-

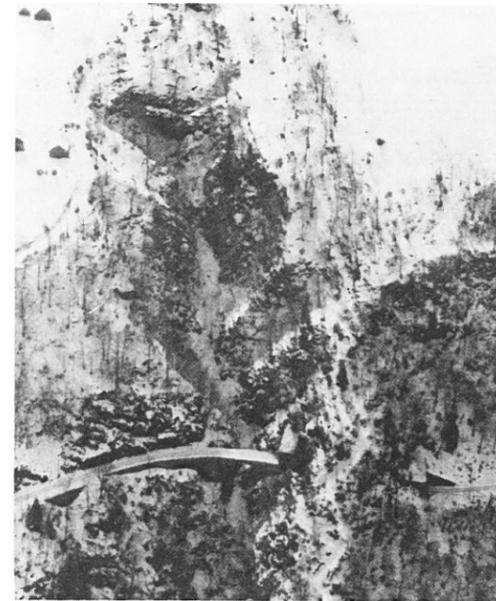


Fig. n. 14

traversa uno sperone di displuvio composto da roccia fortemente degradata (fratturata in grande) e da materiale da semicoerente a incoerente, derivante quest'ultimo in parte dalla roccia stessa in estremo grado di fratturazione, in parte da depositi colluviali e di piccole frane che hanno interessato il declivio in forte pendenza.

La "parietalità" della galleria poneva in collegamento diretto la stabilità dell'opera con quella di tutto il masso di terreno circostante.

Dall'osservazione della situazione globale, con l'aiuto anche dei risultati dei sondaggi effettuati, si è ritenuto di dovere attribuire la causa dei dissesti della galleria a movimenti molto superficiali, piuttosto che ad una instabilità di grandi masse di terreno aventi superfici di slittamento profonde, ben oltre il piano di appoggio dell'opera.

In relazione a quest'ultima osservazione si è proceduto all'esecuzione di operazioni limitate allo stretto intorno della galleria aventi lo scopo di:

- potere ricostruire in sicurezza tutto il rivestimento, sostituendo l'attuale muratura con anelli in cemento armato (calotta, piedritti ed arco rovescio)
- evitare, mediante idonee opere di drenaggio, che le acque di percolazione attraverso il terreno potessero reinnescare quei movimenti superficiali che probabilmente sono stati la causa principale dei dissesti della galleria
- controllare nel tempo la stabilità del masso di terreno, mediante l'installazione di estensimetri a lunga base.

#### 7.2.1. L'intervento di ripristino attuato

È schematicamente riportato nelle figure nn. 15, 16, 17 e 18.

##### - Controcimentatura preventiva

Allo scopo di potere effettuare i trattamenti oltre l'estradosso del vecchio rivestimento senza provocare ulteriori danni è stato necessario porre in opera, come prima operazione, centine provvisorie di sostegno ad interasse di 0,90 m, per un tratto di galleria di 30 m di lunghezza a partire dall'imbocco lato Domodossola.

Le centine erano costituite da NP 160, dotate di puntone al piede.

Si è dovuto porre cura particolare per colmare le discontinuità tra centine e rivestimento nelle zone di maggiore deformazione; sovente è stato necessario predisporre corsi di mattoni legati con malta cementizia.

##### - Trattamento di sostegno con tubi "parapioggia"

Per quanto concerne i tratti a partire dai 2 imbocchi (vedere figura n. 16), a causa della

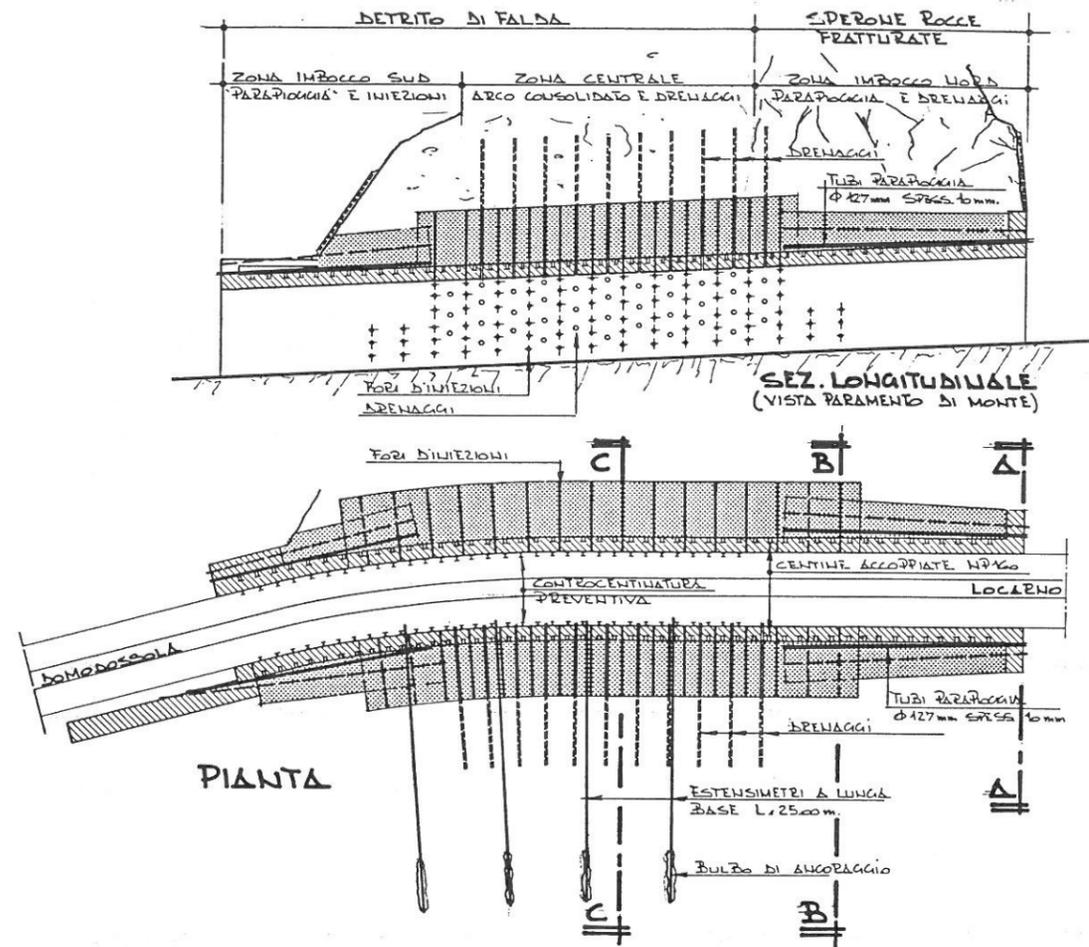


Fig. n. 15

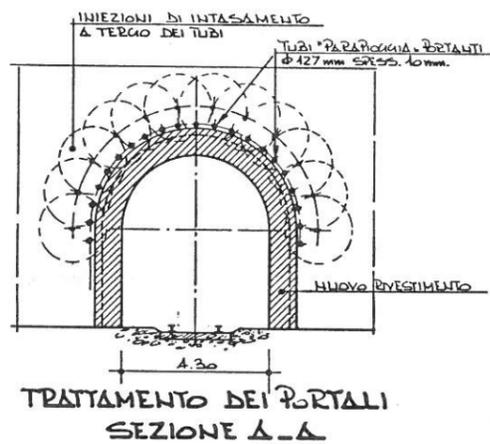


Fig. n. 16

scarsa copertura e quindi della impossibilità di costituire un arco di terreno consolidato con iniezioni, è stato necessario procedere ad un intervento di sostegno dello scavo mediante elementi tubolari metallici resistenti messi in opera preventivamente oltre l'estradosso delle future centine.

Questo sempre allo scopo della sostituzione totale del vecchio rivestimento con un nuovo arco in c.a.

I tubi metallici a grande diametro hanno costituito, assieme alle centine, una sorta di protezione meccanica nei confronti dello scavo di demolizione che avanzava, nel senso di prevenire il verificarsi di decompressioni sensibili del terreno circostante, oltre che evidentemente impedire il ripetersi di qualsiasi rilassamento.

La figura n. 19 mostra il portale lato Domodossola dopo l'inserimento dei tubi di sostegno.

Per il dimensionamento di questi elementi por-

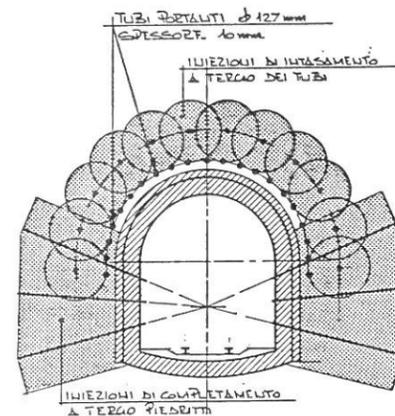


Fig.n.17

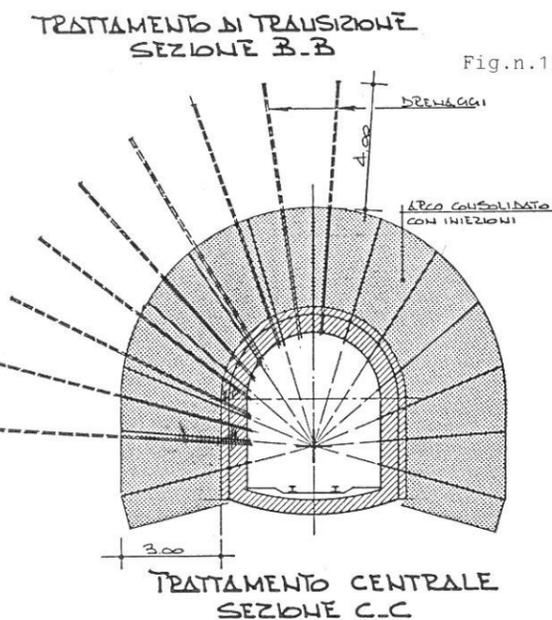


Fig.n.18

tanti si è supposto che il carico che si trasmetteva all'estradosso dello scavo venisse sopportato con buon margine di sicurezza da un sistema composto da

- tubi a grande inerzia ( $\varnothing$  127 mm - spessore 10 mm) disposti immediatamente al di sopra delle centine
- centine metalliche NP 160 accoppiate poste in opera ad interasse di 0,90 m, mano a mano che la demolizione procedeva
- strato di spritz-beton armato con rete elettrosaldata, disposto a tergo delle centine (spessore 12 cm minimo)
- iniezioni cementizie eseguite attraverso tubi a valvola metallici suborizzontali che sono stati introdotti al di sopra dei tubi a grande diametro.

Le iniezioni hanno impedito alle particelle più fini del terreno granulare della coltre su-

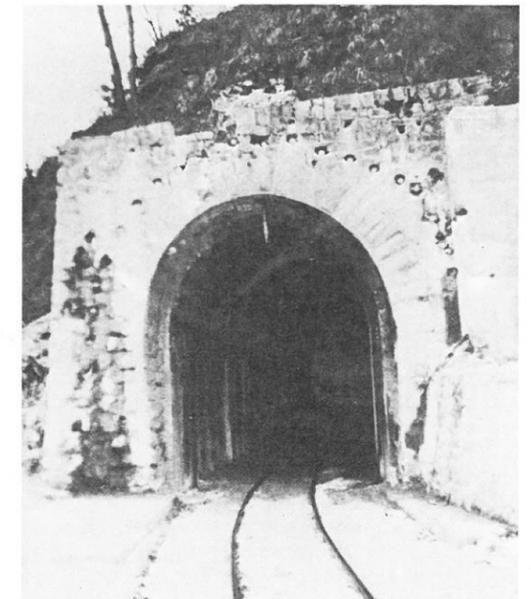


Fig. n. 19

perficiale di "fluire" attraverso gli interspazi tra tubi ed hanno riempito le fessure più grandi della roccia per il tratto lato Locarno: hanno in definitiva costituito una sorta di arco di trasmissione degli sforzi ("ponte") tra due tubi contigui.

Lo schizzo qui riportato in figura n. 20 mostra la situazione teorica che sta alla base del calcolo eseguito per il dimensionamento dei tubi: col procedere della demolizione del vecchio rivestimento gli elementi portanti vengono a lavorare come travi longitudinali continue sui molti appoggi costituiti dalle centine metalliche.

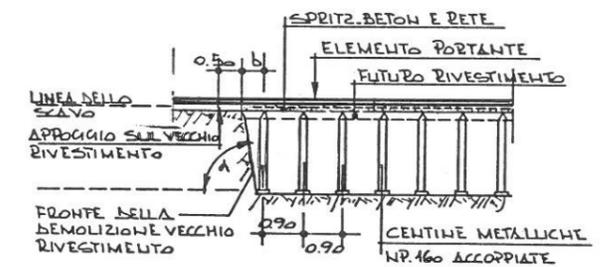


Fig. n. 20

#### - Arco di terreno consolidato

La zona centrale della galleria è stata sostenuta da un arco di terreno consolidato mediante iniezioni di miscele cementizie e gel di silice (vedere figura n. 18).

Come denunciato dai sondaggi la galleria in questa zona è circondata da terreni incoerenti; solamente a 6 m circa oltre il rivestimento si inizia ad incontrare la formazione rocciosa in stato di forte degrado.

Si tratta di gneiss con accentuata scistosità: le zone penetrate dai sondaggi facevano probabilmente parte della formazione più superficiale che appariva assolutamente priva di omogeneità, molto fratturata a causa sia dei fenomeni gravitazionali (certamente a suo tempo ha influito la decompressione esercitata nel corso dello scavo della galleria), sia dallo scorrimento delle acque che attraverso la copertura del detrito di falda hanno avuto ampio campo di percolare disordinatamente in una roccia di così debole struttura.

Sono state eseguite delle prove granulometriche su campioni di terreno estratti nel corso dei sondaggi: le relative curve hanno dimostrato come il terreno potesse essere agevolmente consolidato mediante iniezioni di miscele a base di cemento e successivamente di gel di silice.

Infatti si presentavano curve molto "appiattite" in conseguenza alla regolare distribuzione percentuale di elementi di differente pezzatura, dalle ghiaie grossolane, alle sabbie, fino a particelle decisamente limose.

Il diametro efficace ( $d_{10}$ ) medio dei terreni in questione era compreso tra 0,06 mm e 0,02 mm; solamente per un campione più ghiaioso era pari a 2 mm.

In questa situazione non è stato possibile conferire al terreno un sufficiente grado di consolidamento con l'utilizzo di sole miscele a base di cemento: infatti il fenomeno di "presofiltrazione", dovuto alla presenza delle particelle fini del terreno, avrebbe ostacolato la diffusione omogenea del cemento all'intorno del foro di iniezione.

D'altra parte pressioni più alte avrebbero provocato la rottura del terreno e la fuga della miscela cementizia in zone non interessanti secondo vie preferenziali ("claquage" del terreno).

E' stata necessaria allora l'introduzione di una miscela consolidante più fluida in modo da penetrare attraverso le particelle più fini del terreno senza turbarne la disposizione naturale.

Come mostrano i disegni è stato così costituito attorno all'estradosso del vecchio rivestimento un arco di terreno consolidato che ha consentito il completo rifacimento per tratte del rivestimento stesso.

Lo spessore medio dell'arco consolidato è stato tenuto pari a 3 m.

Per la realizzazione delle iniezioni sono state eseguite delle raggere di perforazioni ad interasse di 1,80 m, costituite ognuna da 13 fori aventi una apertura massima di 2,00 m nella parte più esterna dell'arco trattato.

Sono stati impiegati tubi a valvole (3 valvole al ml) in plastica.

Le iniezioni hanno dovuto essere condotte con grande cautela, a piccole dosi ed a bassa pressione, allo scopo di non turbare lo stato naturale del terreno e di sollecitare il meno possibile il rivestimento dissestato.

E' stato impiegato il metodo di iniezione cosiddetto a "volume controllato" che consiste nell'iniettare (senza mai superare la pressione di rifiuto) attraverso una certa valvola, in varie fasi, un quantitativo di miscela predeterminato in funzione del volume di terreno di competenza della valvola stessa e della porosità specificatamente trattabile con un certo tipo di miscela.

Per quanto concerne i quantitativi di assorbimento, detto  $V_t$  il volume di terreno da trattare,  $V_c$  il volume di miscela cementizia e  $V_g$  il gel di silice, il trattamento si è bene concluso con

$$V_c = 0,20 V_t$$

(comprendendo anche il quantitativo necessario all'intasamento a tergo del vecchio rivestimento)

la previsione progettuale era leggermente inferiore, pari al 15%

$$V_g = 0,15 V_t$$

la previsione progettuale è stata rispettata nel caso del gel di silice.

E' stata sempre raggiunta (in seconda o in terza passata) la pressione di iniezione di 15 bar, come prescritto dalle specifiche progettuali.

Al termine del lavoro sono stati eseguiti 3 sondaggi di controllo (lunghi 4,20 m) che hanno evidenziato il buon grado di consolidamento ottenuto con la cementazione di tutte le grandi fessure della roccia e l'impregnazione delle frazioni fini con il gel di silice.

#### - Drenaggi

Come mostrato sulle figure nn. 15 e 18 tutta la zona a monte della galleria, per una fascia di terreno di 4,00 m di spessore oltre l'arco consolidato (dalla chiave calotta fino alla base del piedritto di monte) è stata interessata da un sistema di drenaggio.

Sono stati praticati dei fori di lunghezza 8,00 m all'incirca, disposti su semicorone alternate di 4 e 5 fori ognuna ad interasse di 1,80 m.

I fori sono stati equipaggiati con speciali tubi in plastica rigida (tipo S.B.F.K.) fine-

strati con intagli 0,5 mm per gli ultimi 4,00 m, ciechi per tutta la parte iniziale.

Lo spazio anulare all'esterno del tubo cieco è stato intasato con miscela cementizia.

Per salvaguardare i tubi nel corso delle demolizioni e dei getti è stato installato un manico di giunzione immediatamente oltre la superficie di scavo, in modo che prima dell'esecuzione dello spritz-beton è stato possibile avvitare lo spezzone definitivo di tubo più esterno.

In questo modo lo spezzone di tubo provvisorio ha potuto essere distrutto nel corso delle demolizioni senza che ne sia derivata la perdita del drenaggio.

I tubi drenanti sono poi stati collegati fra loro e l'acqua convogliata in una tubazione posta alla base del piedritto della galleria.

#### - Estensimetri a lunga base

Allo scopo di tenere sotto controllo i movimenti che la galleria potrebbe subire nel tempo per effetto di un eventuale dislocamento di porzioni più ampie di quanto ragionevolmente deducibile dalle indagini svolte, sono stati posti in opera 4 estensimetri a lunga base.

Come mostrato sui disegni, essi sono in grado di misurare gli spostamenti del rivestimento della galleria nei confronti di punti fissi posti circa a 25 m di distanza, nella zona di roccia a monte della galleria stessa.

Due estensimetri sono stati posati all'altezza del rene di calotta verso monte e due nella parte più bassa del piedritto sempre di monte, allo scopo anche di potere verificare eventuali rotazioni.

La distanza tra due apparecchiature successive è di circa 5,00 m.

Sono stati impiegati estensimetri dotati di astine invar forniti dalla S.I.S. Geotecnica.

La posa non ha comportato particolari problemi; anzi le perforazioni attraverso l'arco consolidato hanno evidenziato il buon grado di coesione conferito al terreno.

Le misurazioni vengono eseguite ancora oggi a distanza di 5 anni circa dall'installazione; non si sono registrati movimenti sensibili e questo sta a dimostrare come il fenomeno che ha causato il dissesto del rivestimento fosse dovuto a scorrimenti della coltre superficiale.

#### 7.2.2. Considerazioni conclusive

Una volta ultimati tutti i lavori specialistici di protezione è iniziato il lavoro di abbattimento del vecchio rivestimento per tratte successive di 0,90 m.

Centine (interasse 0,90 m) accoppiate, rete e spritz-beton (spessore 12 cm) hanno sostenuto lo scavo, protetto ovviamente o dai tubi o dal consolidamento preventivo, fino al getto definitivo dell'arco in c.a. per tratte di 3,60 m di lunghezza (4 centine).

Successivamente è stato costruito l'arco rovescio in c.a.

Ritengo che questo lavoro, descritto per sommi capi, malgrado la sua piccola entità, possa rivestire un buon interesse per i seguenti motivi:

- è stato possibile, tramite indagine preliminare accurata, salvare un'opera gravemente dissestata, senza adottare costose alternative di tracciato (era stata in un primo tempo prospettata una deviazione all'esterno su un nuovo viadotto)

- con la combinazione di differenti metodologie di rinforzo si sono potute superare le diverse situazioni imposte dalle formazioni complesse del terreno coinvolto

- infilaggi metallici per sostenere le banche di rocce fratturate

- iniezioni per consolidare i terreni detritici incoerenti di transizione

- sistema drenante per garantire nel tempo la stabilità conseguita

- l'integrità dell'opera nei tempi lunghi è inoltre tenuta sotto costante controllo per mezzo dei dati di misura forniti dagli estensimetri a lunga base

- tutti gli interventi sono stati eseguiti avendo mantenuto in esercizio la linea ferroviaria, compreso il rifacimento dell'arco in c.a. e l'arco rovescio.

#### 7.3. Galleria Agri Sauro (Potenza)

Impresa Del Favero S.p.A. - Trento

Impresa opere specialistiche: RODIO S.p.A.

Al termine di questa trattazione sugli interventi speciali attuati in gallerie che si vengono a trovare in situazioni difficili, non posso tralasciare un accenno a quanto si è recentemente fatto per raggiungere e ripristinare lo scudo della galleria Agri-Sauro che è stato travolto e sommerso da uno sfornellamento di enormi proporzioni (giugno 1984).

L'argomento sarà certamente ripreso in future trattazioni nelle quali le singole operazioni verranno descritte più dettagliatamente.

Quello che mi interessa ora è di segnalare il fatto accaduto e di esporre in modo succinto (a causa anche della mancanza di tempo) il difficile lavoro intrapreso per risolvere il problema che era stato posto.

La galleria Agri-Sauro fa parte del sistema idraulico di captazione e convogliamento nel bacino della diga del Sinni delle acque dei due fiumi Agri e Sauro.

Questa galleria di 6.700 m di lunghezza viene costruita con uno scudo completamente automatizzato, costituito da un cilindro metallico di 4 m di diametro e di 6,50 m di lunghezza (contenente tutti i motori, martinetti di spinta, nastri trasportatori, bracci per la posa dei con-

ci ecc.) e da una testa di rotazione con 4 sportelloni triangolari ad apertura regolabile per l'entrata del materiale scavato.

La spinta totale sviluppabile è di 1500 t.

Lo scudo, utilizzando come contrasto i conci in c.a. già in opera, avanza e predispone nella sua parte posteriore l'anello definitivo di rivestimento formato appunto da conci prefabbricati che vengono forzati contro il terreno con l'inserimento dell'elemento trapezoidale di chiave.

Gli anelli che si susseguono l'un l'altro hanno una lunghezza di 1,20 m ciascuno; i giunti sagomati sono protetti da speciali guarnizioni di gomma.

Attraverso 4 fori predisposti devono venire eseguite iniezioni di malta fluida per l'immediato riempimento dello spazio anulare che rimane a tergo degli anelli in c.a.

Il lavoro di costruzione della galleria è proceduto con regolarità fino a 2.000 m all'incirca; la formazione geologica chiamata di "A-liano", costituita da una sequenza di bancate di argille limose con inclinazione media di 25° - 30° sull'orizzontale, intercalate da livelli di sabbie molto fini di potenza non eccessiva (dal metro a qualche metro), fino a questo punto si presentava abbastanza asciutta e comunque i carichi d'acqua non procuravano eccessivi problemi.

Più oltre la presenza di una vera e propria falda ha iniziato ad ostacolare il regolare avanzamento dello scudo: si sono dovuti impiegare accorgimenti particolari per fare fronte ad una situazione sempre più difficile ed in un certo senso molto più critica di quanto era stato previsto nel corso degli studi preliminari.

Malgrado le attenzioni poste ed il rallentamento dell'avanzamento, nel giugno 1984 alcuni conci (che nel corso del recente scavo di ripristino sono stati definiti in una decina) posti immediatamente a tergo dello scudo non hanno resistito all'impetuosità di grande quantità di acqua in pressione e materiale fino limoso-sabbioso che si sono riversati in galleria.

Una piccola venuta d'acqua tra due conci non ha potuto essere controllata a causa della forte pressione incontrata in coincidenza di una faglia; il trasporto solido è iniziato quasi subito ed il cantiere ha avuto appena il tempo di ripiegare.

La galleria è stata riempita per una lunghezza di 600 m circa; il volume del materiale franato ha così raggiunto i 6.000 m<sup>3</sup> appross.

A questo punto si è stabilita una situazione di nuovo equilibrio limite; il materiale franato e gli attriti di questo lungo la parete interna della galleria contrastavano la spinta del carico d'acqua di falda, misurato in una settantina di metri sopra l'estradosso di scavo.

Fortunatamente il grosso fornello non si è ripercosso fino in superficie (150 m di coper-

tura sopra la galleria) perchè, come si è potuto constatare successivamente tramite sondaggi, una bancata di argilliti di 40 m di spessore situata nella zona più alta ha resistito, facendo "ponte" sul "vuoto" creatosi al di sotto di essa.

La figura n. 21 riporta schematicamente la situazione dopo il crollo.

Alcuni tentativi di riavvicinamento del fronte mediante asportazione del materiale franato, malgrado l'ausilio di un pozzo di pompaggio di acqua eseguito dall'alto con grande difficoltà, non hanno dato alcun risultato, anzi hanno provocato una ulteriore azione di sfornellamento, dimostrando in chiari termini tutta la gravità dell'evento occorso.

E' allora iniziata la progettazione delle radicali operazioni specialistiche che sono state attuate tra difficoltà di ogni tipo e si sono protratte per 15 mesi circa fino al raggiungimento dei conci crollati, alla loro ricostruzione ed alla liberazione dello scudo sommerso.

### 7.3.1. Le operazioni eseguite

Alcuni sondaggi eseguiti dall'alto (fortunatamente una strada passa proprio sopra la zona dell'incidente) hanno evidenziato la presenza del vuoto e la granulometria del materiale franato.

Sono stati installati 7 piezometri verticali per potere seguire le evoluzioni della falda freatica.

La scelta dell'intervento non è stata semplice per i seguenti motivi:

- complessità della situazione ed incognite dell'estensione del crollo
- presenza di un carico d'acqua importante sulla galleria (7 atmosfere circa)
- presenza del grande vuoto sovrastante il terreno collassato
- urgenza dell'Impresa Generale di liberare lo scudo
- necessità di operare limitando al massimo la spesa.

Si è dovuto allora operare in fasi successive allo scopo di non eseguire lavori inutili, limitando i quantitativi al minimo indispensabile.

Riporto qui di seguito le varie operazioni nel loro ordine cronologico di svolgimento con brevi commenti.

#### Riempimento del grande vuoto

E' stato eseguito con perforazioni a partire dall'alto.

Non è stato un lavoro semplice all'inizio, sia perchè le aste una volta raggiunto il vuoto non erano guidate e sovente si spezzavano, sia perchè non era possibile iniettare grandi quantità di miscela cementizia col rischio di turbare l'equilibrio di altri conci della galleria e di interessare zone lontane dall'incidente.

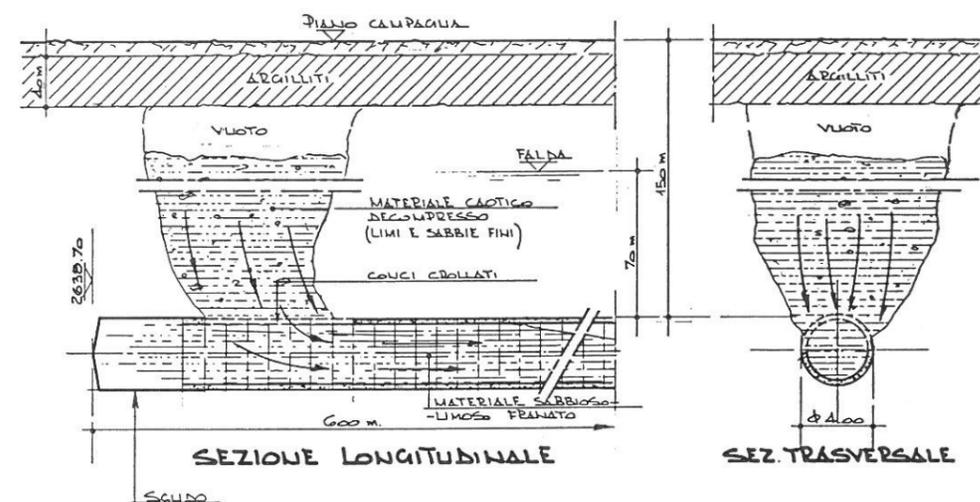


Fig. n. 21 - Agri Sauro - Situazione schematica dopo il sifonamento avvenuto alla progressiva 2630

#### Iniezioni di ricompressione e consolidamento attorno alla galleria (dall'alto e dall'interno)

Il disegno di figura n. 22 mostra in sezione ed in pianta il trattamento di iniezioni di ricompressione e consolidamento eseguito dall'alto, tramite fori molto lunghi, 150 m circa, equipaggiati con tubi a valvole metallici.

Le prove granulometriche avevano denunciato che la frazione sabbiosa più permeabile del terreno poteva essere penetrata da iniezioni chi-

miche.

Si sono allora iniettate nell'ordine: miscela a base di cemento (con rapporto c/a e carica di bentonite variabile in funzione delle differenti reazioni del terreno), gel di silice ed infine resine acriliche (Siprogel).

L'andamento dei fori ed il controllo della loro verticalità ha costituito grossi problemi: è stato necessario aggiungere fori integrativi a quelli inizialmente previsti per assicurare un interessamento di tutta la zona franata.

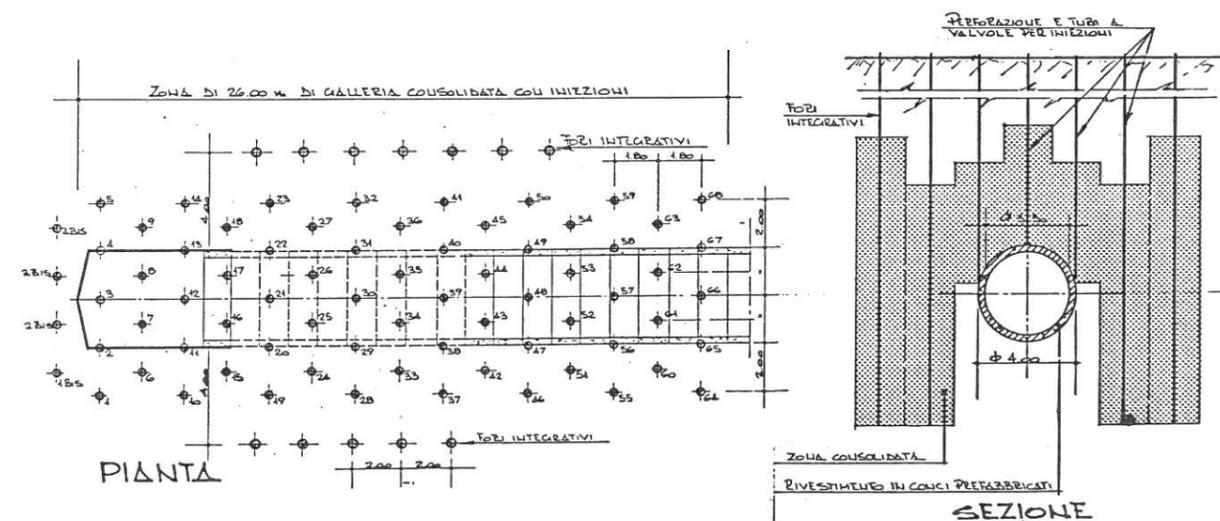


Fig. n. 22 - Agri Sauro - Iniezioni di ricompressione e consolidamento attorno alla galleria eseguite a partire dall'esterno

Al termine di queste difficili operazioni si è avuta l'impressione (tramite il controllo delle evoluzioni delle pressioni di iniezione) che il terreno avesse raggiunto un buon grado di consolidamento.

Si è tentato allora di riprendere lo scavo all'interno della galleria che ha raggiunto il primo concio crollato (lo si è intravisto).

A questo punto tuttavia una venuta d'acqua con trasporto di materiale ha sospeso nuovamente lo scavo di pulizia ed ha imposto la costruzione di un nuovo muro tampone in posizione arretrata, ad una cinquantina di metri di distanza dall'incidente.

Si è allora deciso l'impiego del congelamento con azoto liquido, previa esecuzione di iniezioni all'interno della galleria direttamente nel materiale franato per potere costruire un muro tampone "avanzato" in una posizione immediatamente a ridosso del crollo, dal quale potere appunto spiccare il trattamento di congelamento.

Ciò ha potuto essere eseguito mediante tubi a valvola orizzontali ed iniezioni di miscele cementizie e gel di silice eseguite all'interno della galleria.

Il muro tampone avanzato è stato costruito a 10 m circa dal concio n. 2179 (primo concio crollato alla progressiva 2623).

#### Il congelamento ad avanzamento

Sulla figura n. 23 è riportato lo schema del trattamento conico di congelamento.

Come si può notare le 36 canne congelatrici di lunghezza 24 m, poste secondo una geometria

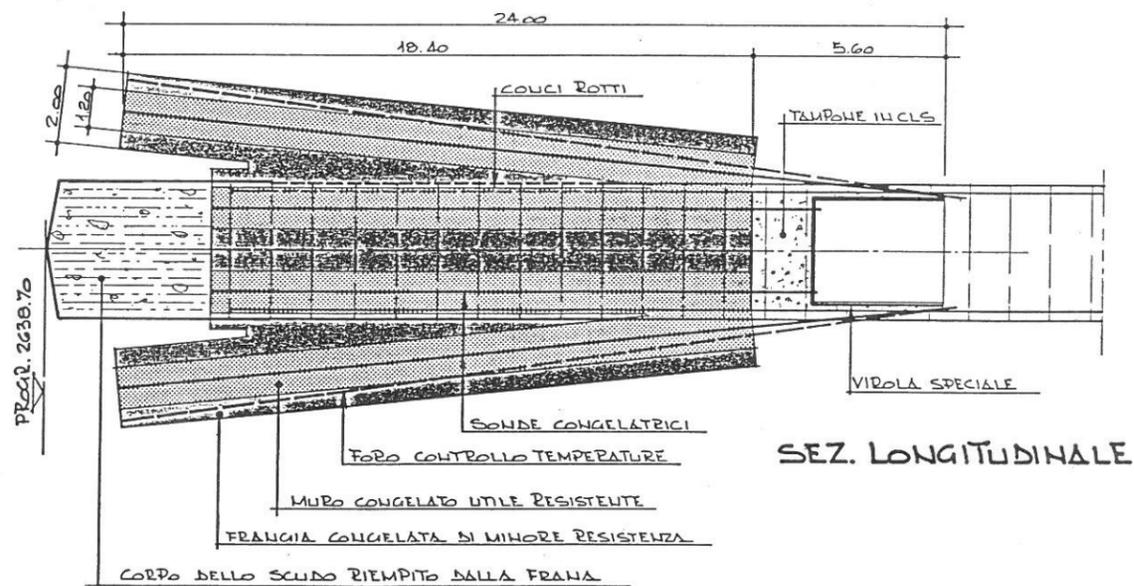


Fig. n. 23 - Agri Sauro - Schema del trattamento di congelamento con azoto liquido.

conica tutt'attorno al tratto disastroso ancora da scavare, hanno consentito la creazione di un muro di terreno congelato di 1,2 m di spessore (muro resistente con temperature ai bordi di almeno  $-5^{\circ}\text{C}$ ), mentre le 12 canne interne hanno costituito una sorta di tappo di terreno congelato all'interno della galleria nella zona di coda dello scudo, per prevenire eventuali venute d'acqua attraverso gli sportelloni della testa di rotazione.

Prima di porre in opera le canne congelatrici, nell'ambito della corona esterna sono state eseguite delle ulteriori iniezioni per assicurare la massima densità del terreno da congelare; precauzione questa molto importante per la regolare diffusione delle frigorifiche e la formazione di un muro congelato compatto.

Tutte le operazioni di perforazione sono state fonte di grossi problemi esecutivi perché hanno dovuto essere effettuate sotto battente di circa 70 m d'acqua: bisognava assolutamente impedire che le perforazioni originassero ulteriori fenomeni di asportazione di materiali fini e fossero causa di sifonamenti.

Il problema è stato superato con l'uso sistematico di "preventer": inoltre sono stati impiegati dei rivestimenti metallici "a perdere" nell'interno dei quali sono state introdotte le canne congelatrici da 2".

Le operazioni di congelamento si sono svolte con buona regolarità, secondo le previsioni.

L'azoto liquido veniva pompato dalla sommità della collina attraverso una speciale tubazione coibentata posta all'interno di un pozzo verticale espressamente eseguito: attraverso un se-

condo pozzo venivano fatti effluire all'esterno i gas di azoto.

Le figure nn. 24 e 25 mostrano rispettivamente l'insieme del sistema di congelamento ed un dettaglio di alcune testate di sonde congelatrici in fase di congelamento.

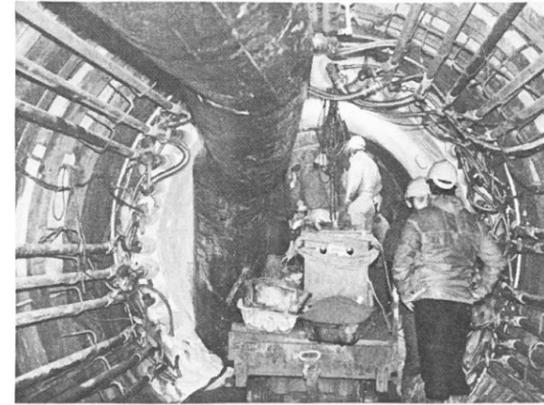


Fig. n. 24

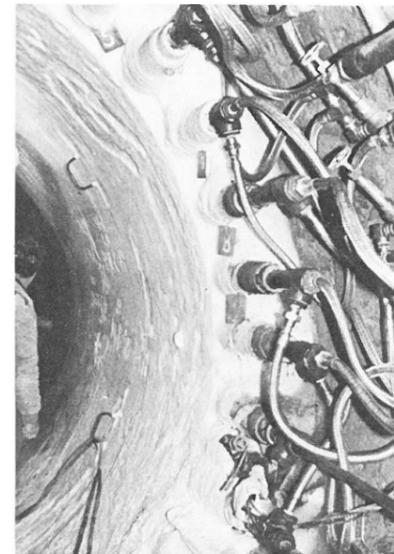


Fig. n. 25

La fase di formazione del muro ha comportato un consumo di circa 1200 l d'azoto liquido per ogni  $\text{m}^3$  di terreno congelato.

I mantenimenti, regolati dall'accurata registrazione delle temperature tramite numerose termocoppie inserite nel terreno, venivano eseguiti mediamente ogni 2 giorni nelle ore notturne, quando le operazioni di scavo venivano sospese.

Nel corso di ogni mantenimento venivano pompati dai 30.000 l ai 40.000 l di azoto liquido.

#### Gli scavi e posa delle virole metalliche

Una volta costituito il muro congelato sono iniziati gli scavi nella zona disastrosa della galleria.

Questi hanno potuto procedere con notevole regolarità e sicurezza, malgrado le difficoltà costituite soprattutto dalla presenza dei conci crollati da asportare e dalle condizioni ambientali (spazi limitatissimi e temperature ambiente molto basse).

Le figure nn. 26, 27 e 28 mostrano il fronte di scavo: si possono notare alcuni frammenti di concio crollato all'interno e venature delle iniezioni che hanno ricompresso ed impregnato il terreno franato.

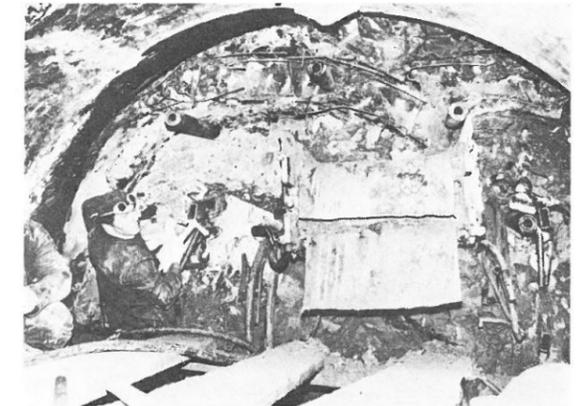


Fig. n. 26

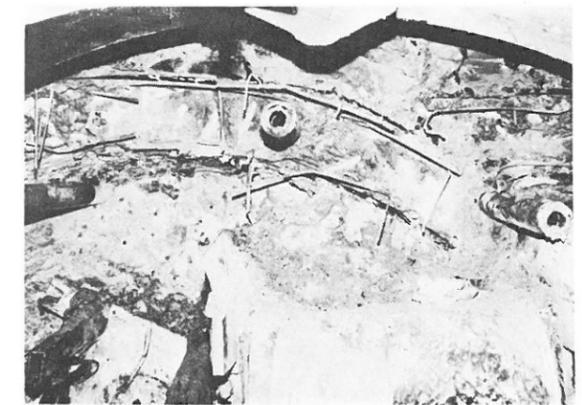


Fig. n. 27

Lo scavo è stato eseguito secondo tratte di 1,00 m che venivano rivestite con virole metalliche calcolate in modo da sostituire totalmente i conci in c.a. andati distrutti.

Le virole venivano trasportate all'interno, divise in due parti (semi-cilindri con snodo centrale, per questioni di ingombro); successivamente sistemate contro il terreno congelato ed a contatto con la virola precedente.



Fig. n. 28

Seguiva la fase di saldatura ed iniezione di malta a tergo, attraverso appositi fori, in modo da colmare tutti gli spazi tra i 3 elementi circolari metallici (profilati a T) d'irrigidimento e sostegno della lamiera della virola.

Si è così proceduto per 15 m, avendo incontrato 9 anelli collassati, fino al raggiungimento della coda dello scudo.

Lo scudo, pieno di materiale franato, è stato poi completamente liberato ed i macchinari smontati e revisionati.

#### Misure e controlli

Hanno assunto ruolo determinante in questo cantiere in quanto, in una situazione così critica, era indispensabile per la sicurezza conoscere in modo molto preciso l'entità degli sforzi in gioco.

Faccio qui solamente un breve accenno: l'argomento infatti sarà oggetto di ulteriori pubblicazioni.

Le misure eseguite tramite martinetti piatti inseriti nei conci prefabbricati hanno evidenziato la tendenza all'"ovalizzazione" degli anelli del rivestimento in prossimità dell'incidente: infatti sono state rilevate forti compressioni (al limite della resistenza) nelle zone intradossali laterali.

Questa tendenza è stata confermata dallo stato tensionale di trazione nell'ambito di chiave galleria alla luce dei risultati delle prove con door-stoppers.

Sono state eseguite, gestite dalla Geoanalysis di Torino, le seguenti misure e controlli sistematici:

- rilevamento sforzi nell'ambito del rivestimento della galleria, tramite celle di pressione (martinetti piatti) e prove con door-stoppers
- rilevamento deformazioni degli anelli, tramite misure di convergenza e misure con deformometro meccanico millesimale
- controlli delle variazioni della deformazio-

ni delle virole metalliche e delle controcentine (vedere figura n. 29) di rinforzo del rivestimento in prossimità dei conci rotti, tramite deformometri a corda vibrante saldati sul metallo e completi di termoresistenze.

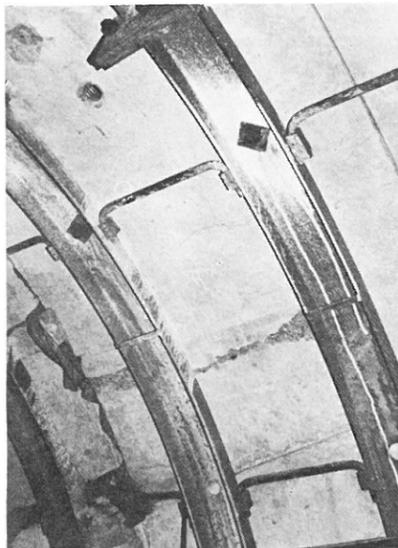


Fig. n. 29 - Controcenatura di rinforzo degli anelli lesionati

Tutti i dati rilevati sono risultati utilissimi per i seguenti motivi:

- prima delle operazioni si è potuto meglio calibrare l'intervento da attuare e stabilire con precisione la sequenza delle operazioni nel senso di fornire nel tempo un grado di sicurezza sempre maggiore
- nel corso del lavoro si è avuto modo di riscontrare sempre l'evoluzione degli sforzi e delle deformazioni e constatare la rispondenza di quanto previsto in sede progettuale. Si è allora operato con cognizione di causa in un clima di maggiore sicurezza
- nei tempi lunghi (ancora oggi) si sono potuti seguire gli effetti sulle strutture resistenti della galleria imposti dalle fasi di congelamento e decongelamento e quindi ora è possibile giudicare la stabilità nel tempo conferita all'opera dagli interventi attuati per superare questo tratto così difficile.

#### 8. Conclusioni

Nel rileggere questa memoria mi rendo sempre più conto che la vastità del tema trattato e la gamma notevole di interventi specialistici hanno imposto una trattazione abbastanza lunga, che peraltro risulta certamente non completa.

Spero comunque di non avere tralasciato gli

aspetti più importanti ed i casi più ricorrenti e spero anche che i 3 esempi di interventi descritti con maggiori dettagli abbiano evidenza:

- la necessità di capire bene i fenomeni in atto e le loro origini per orientare in modo corretto la scelta degli interventi e la loro progettazione
- l'utilità dei controlli in corso d'opera per apportare le modifiche più idonee imposte dalla reale situazione che mano a mano si viene a manifestare. I controlli hanno anche il pregio di conferire maggiore tranquillità a chi opera in situazioni così critiche
- l'importanza di conoscere a fondo le svariate tecnologie applicative perché generalmente proprio da una corretta integrazione di metodi differenti scaturisce la soluzione più conveniente.

Come accennato, in questo campo di attività la tecnica specialistica è sempre in evoluzione: già si possono intravedere interessanti futuri sviluppi di nuove metodologie.

#### Summary

This paper is concerned with "Special techniques to guarantee the stability of cavities under difficult conditions".

The subject matter is very wide: the author considers in outline the technical solutions generally adopted to solve this type of problem.

These techniques fall into three groups:

- preventative treatments, when the difficulties of the cavity are known beforehand
- treatments aiming at giving stability to already collapsed cavities
- specialized works for the restoration of old structures which have been deteriorated over the course of time.

All the works are described in outline and illustrated with sketches.

In the second part of the paper, the author explains, as more detailed examples, the consolidation and restoration of three important sites. They are:

- the syphon of Canale Cavour under the river Sesia (near Novara - Italy). Masonry work, built in 1863-64, damaged by the lowering of the Sesia river bed. Treatments: anchor bars sunk and cemented into the walls, consolidation grouting of the foundation soil with cement and chemical mixtures, diaphragm concrete walls for the construction of a damping pool on the river downstream the syphon
- the tunnel Corta di Coimo - along the railroad line Domodossola-Locarno (Italy-Switzerland). This tunnel was damaged by a sliding movement of the rocky soil around it. Treatments:
  - in the central part of the tunnel, provision of roof support to the arch by means of consolidating grouting with cement and chemical mixtures
  - in the area of both the northern and southern entrances, protection of the tunnel by means of metal tubes placed horizontally just outside the lining.
 These works have enabled the complete renewal of the lining of the tunnel with reinforced concrete. During the works the railway traffic was not interrupted
- water tunnel from Agri to Sauro (near Potenza - Italy). Tunnel under construction (using an automatic shield with a diameter of 4 m), 6700 m. long, lined with prefabricated sections. After 2630 meters of excavation had taken place, there was a large subsidence and approximately 6000 m<sup>3</sup> of silty-sandy soil (water under 7 atmosph. pressure) poured into the gallery. In the paper the author describes the consolidation works - injections with cement and chemical mixtures and freezing with liquid nitrogen which made it possible to reach the buried shield.

The author underlines the fact that, when such difficult situations have to be faced, great help can be offered to the designer and to the persons working on the site by a careful exploration of the phenomenon and by the adoption of equipment able to control the variation of stresses and strains on the damaged structure.

#### Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro porgo i miei più vivi ringraziamenti alla Società Subalpina di Imprese Ferroviarie s.r.l. di Domodossola (galleria di Coimo), all'Associazione Irrigazione Est Sesia di Novara (sifone Canale Cavour), all'impresa Del Favero S.p.A. di Trento (galleria Agri-Sauro), all'impresa Rodio S.p.A. di Casalmajocco, per la possibilità offertami di riferire sui loro lavori e per tutto il materiale gentilmente concesso.

Un grazie sentito infine alla Geoanalysis s.r.l. di Torino per la validissima collaborazione.