

L'ATTRAVERSAMENTO DI UNA FAGLIA REGIONALE CON CARSISMO E VENUTE IDRICHE DURANTE LO SCAVO DEL BY-PASS DI SPRIANA (SO)

P. LUNARDI¹, P. FROLDI², M. SANNAZZARI³, G. SALONIA⁴

¹ Progettista By-pass

² Rocksoil S.p.A., Responsabile Servizio Geologico-Geomeccanico

³ Impregilo S.p.A., Direttore Tecnico

⁴ Impregilo S.p.A., Direttore di Cantiere

Sommario

Per porre in sicurezza la città di Sondrio è in corso di realizzazione un sistema di opere idrauliche atte a prosciugare l'eventuale lago che si formerebbe in seguito alla caduta della frana di Spriana (SO). Durante la costruzione del primo by-pass, avvenuta mediante una fresa da roccia TBM, si è verificato un dissesto idrogeologico in corrispondenza dell'attraversamento di una importante faglia in calcari con venute idriche. L'attraversamento della faglia ha reso necessario uno studio idrogeologico e geotecnico che ha evidenziato la necessità di proseguire, nella fascia cataclastica, con scavo in tradizionale, previo trattamento del terreno con iniezioni poliuretaniche di impermeabilizzazione e cementizie di consolidamento.

1. INTRODUZIONE

La presenza della frana di Spriana sul Torrente Mallero in Valmalenco (SO) ha reso necessaria la programmazione di opere idrauliche per la messa in sicurezza di Sondrio nell'eventualità di caduta della frana.

Tra le opere idrauliche previste nel Progetto Esecutivo è in corso di realizzazione il by-pass che si sviluppa tra l'opera di presa di Scilironi sul T. Mallero e la restituzione delle acque captate nella Forra delle Cassandre (Fig. 1). Esso risulta lungo ≈ 3200

m, si sviluppa completamente in destra orografica del T. Mallero, e presenta sezione circolare di 4 m di diametro. La sua realizzazione è avvenuta quasi completamente con l'utilizzo di una fresa da roccia tipo TBM.

Durante lo scavo della galleria proceduto in pendenza da Sud, valle (Forra delle Cassandre) verso Nord, monte (Scilironi), in corrispondenza del Torrente Valdona, tributario destro del T. Mallero, si è verificato un dissesto idrogeologico causato dall'interessamento di una potente fascia cataclastica a carattere regionale con conseguenti venute idriche in galleria.

Il dissesto ha comportato:

- 1) l'impossibilità di proseguire con la fresa TBM;
- 2) la diminuzione della portata di alcune sorgenti captate e utilizzate dall'acquedotto di Sondrio;
- 3) la necessità di eseguire interventi di impermeabilizzazione e consolidamento per l'attraversamento della fascia cataclastica.

Il presente articolo relaziona su studi, indagini, progetto e realizzazione dell'attraversamento.

2. QUADRO GEOLOGICO

Il by-pass di Spriana si sviluppa in un settore geologico di grande importanza regionale.

Il tracciato interessa la prima fascia geologica a monte della Valtellina la quale risulta incisa sulla li-

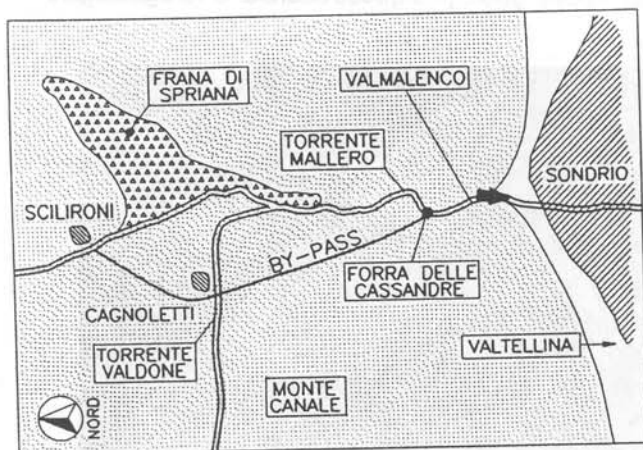


Fig. 1 - Inquadramento geografico del by-pass di Spriana

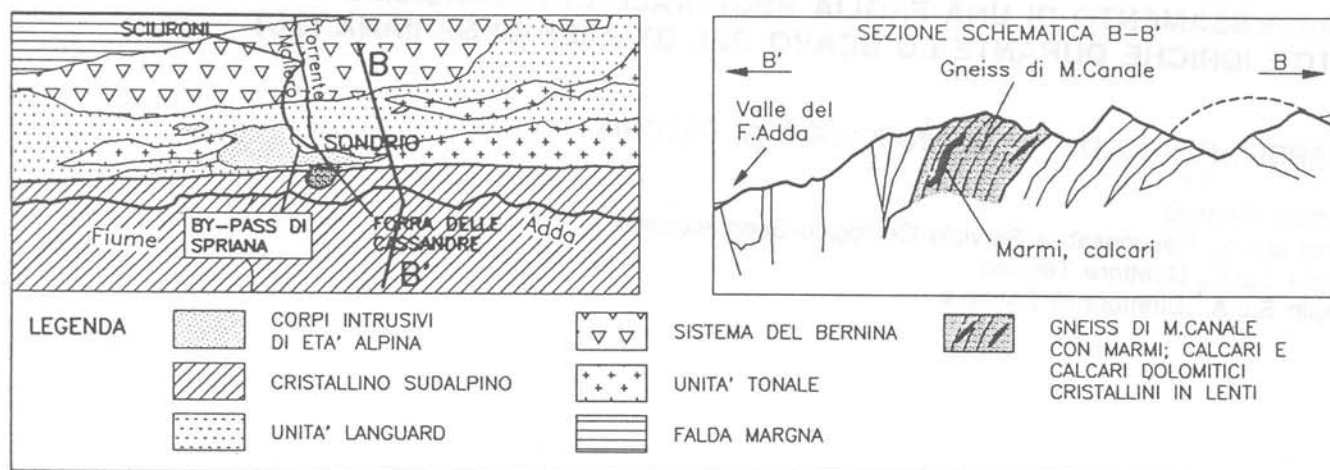


Fig. 2 - Inquadramento tettonico (da G. Bonsignore - C.E. Bravi - E. Nangeroni - U. Ragni)

nea tettonica del Tonale, grandioso lineamento di sutura che divide le Alpi Meridionali a Sud dal Dominio Austroalpino a Nord.

In particolare il by-pass interessa le propaggini meridionali del Dominio Austroalpino costituito da diverse falde di ricoprimento sovrascorse le une sulle altre con la formazione di fasce cataclastiche di notevole importanza; localmente la galleria ha interessato (Fig. 2), le seguenti unità tettoniche (Bonsignore et al., 1970), rappresentate dalle corrispondenti formazioni (da Sud a Nord):

- Unità di Languard-Tonale:
Formazioni degli scisti della P.ta di Pietra Rossa;
- Masse intrusive di età Alpina:
Ortogneiss granitici di M. Rolla;
- Sistema del Bernina:
Ortogneiss di M. Canale ed inglobate scaglie tettoniche di calcari, marmi e calcari dolomitici in lenti.

3. DISSESTO IDROGEOLOGICO ALLA PROGR. 1895 m

3.1 Generalità

Lo scavo del by-pass idraulico, condotto in pendenza dalla Forra delle Cassandre, è proseguito con regolarità negli "Ortogneiss granitici di M. Rolla" e negli "Ortogneiss di M. Canale" fino alla progr. 1862 m corrispondente al contatto con una scaglia tettonica di calcari dolomitici. Da tale progressiva si sono manifestate numerose venute idriche, culminate alla progr. 1888 con una importante venuta d'acqua proveniente da un condotto carsico presente sul fronte di scavo (Foto 1). Contemporaneamente a tale evento è stata rilevata una diminuzione della portata delle sorgenti principali del T. Valdone, da cui si approvvigiona l'acquedotto di Sondrio.

Dopo l'esecuzione di alcuni rilievi ed indagini le operazioni di scavo sono proseguite con qualche difficoltà sino alla progressiva 1895, dove si è verificata l'instabilità del fronte che ha impedito ulteriori avanzamenti della fresa e che ha reso necessarie indagini e studi integrativi.

3.2 Indagini geognostiche

In occasione sia dell'ingente venuta idrica alla progr. 1888 sia dell'instabilità del fronte alla progr. 1895, sono stati eseguiti studi ed indagini mirate all'approfondimento delle condizioni idrogeologico-meccaniche della lente calcarea del Valdone, al fine di prevedere il ripristino del regime idrogeologico locale e di predisporre interventi idonei al superamento della zona dissestata.

La prima serie di indagini tesa a stabilire le condizioni di avanzamento, eseguita con il fronte di scavo alla progr. 1888, è consistita in:

- 1) rilievo geologico-geostrutturale di superficie nell'incisione del T. Valdone (Fig. 3);
- 2) rilievo geologico-geostrutturale e idrogeologico

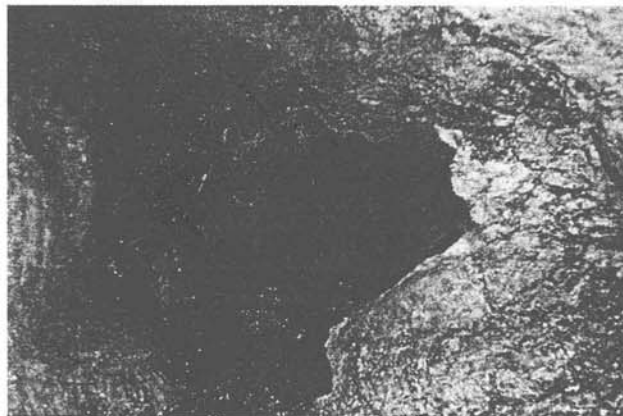


Foto 1 - Cavità carsica alla progr. 1888 m

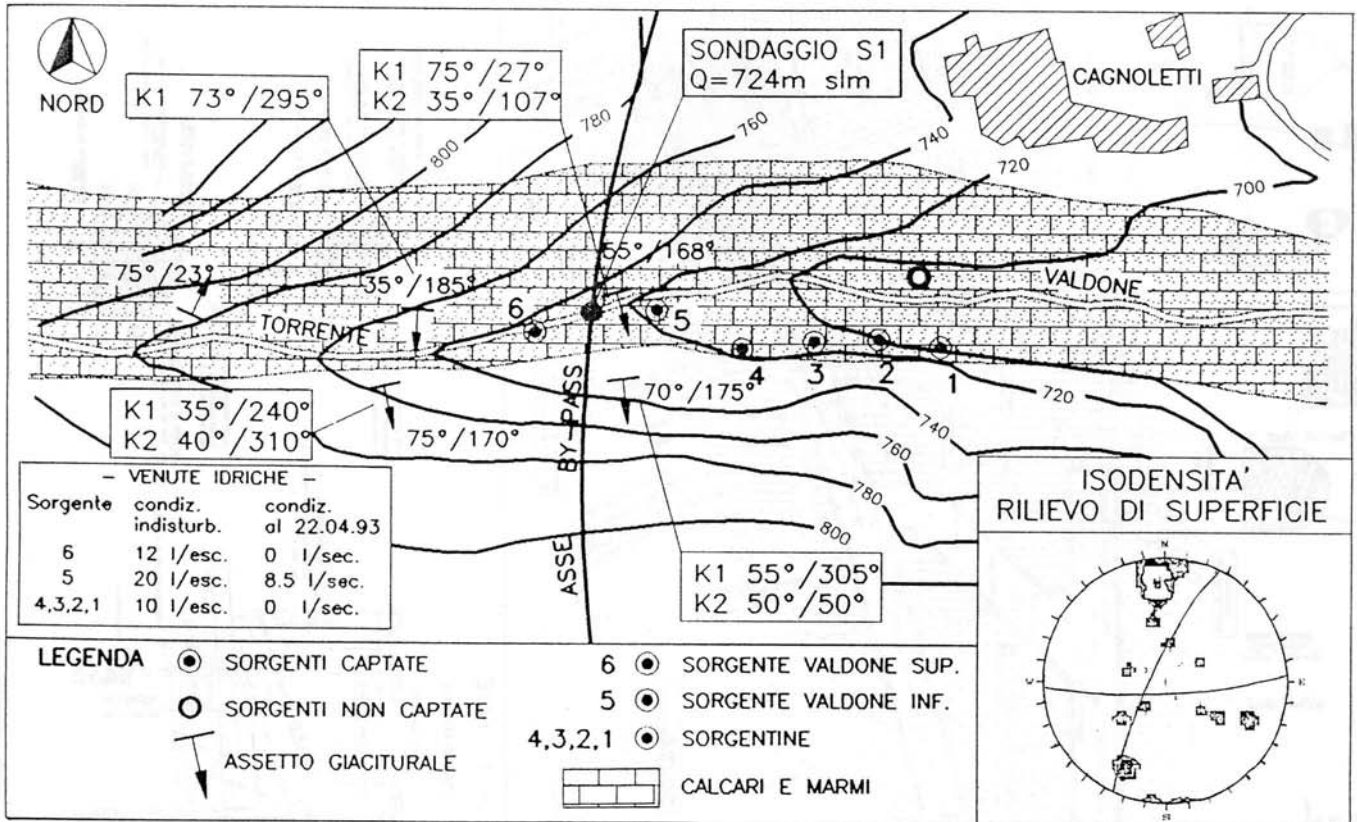


Fig. 3 - Rilievo geoidrografico di superficie del Valdone

in galleria tra le progr. 1500 e 1888;

3) sondaggio a distruzione di nucleo eseguito in avanzamento sul fronte alla progr. 1888 per una profondità di 17 m in asse tracciato con ripresa televisiva in foro.

Le risultanze di tali indagini vengono così sintetizzate:

a) i rilievi eseguiti nell'incisione del T.Valdone e nel by-pass (Fig. 4) hanno consentito una prima ricostruzione dell'assetto geologico-strutturale della lente calcarea, evidenziando analogie geostutturali fra i dati di superficie e quelli in galleria; in particolare è emerso che i calcari presentano un assetto subverticale con strati disposti ortogonalmente al by-pass e subparallelamente al T.Valdone, il quale risulta completamente inciso all'interno degli stessi. Lo spessore apparente della lente calcarea venne stimato, sulla base dell'affioramento di superficie, in ≈ 70 m.

b) le condizioni idrogeologiche, stimate attraverso il censimento delle venute idriche (n° 28) in galleria, evidenziarono una prima zona ad elevata permeabilità tra le progr. 1650-1750, al contatto tettonico fra gli "Ortogneiss granitici di M.Rolla" e gli "Ortogneiss di M. Canale", con portate variabili da 0.5 l/min a 25 l/min, portata complessiva di 164 l/min e portata media per venuta di ≈ 6 l/min; la seconda zona, rilevata all'interno dei calcari, tra le progr. 1860 e 1888,

presentava numerose venute idriche (7) importanti, con portate comprese tra 4 l/min e 40 l/min ed un massimo di 4200 l/min (70 l/sec) nella venuta idrica a progr. 1888; la portata complessiva in questa tratta, ad esclusione dell'emergenza alla 1888, risultava di 97 l/min per una portata media di ≈ 16 l/min. Le emergenze principali derivano, negli gneiss, da fessure in piani di discontinuità di origine tettonica generalmente piuttosto serrati e, nei calcari, da superfici di stratificazione; queste si presentano spesso beanti, con talora veli di incrostazioni di calcite di deposizione secondaria e, più raramente, con riempiimenti cataclastici o argillosi. In particolare la cavità carsica alla progr. 1888 risultava alla base della semi-circonferenza sinistra del cavo; l'apertura di forma pseudo-circolare di $\approx 50-60$ cm di diametro era parzialmente riempita da argilla plastica mentre si poteva osservare un piano di strato da cui sgorgava l'escaturigine. La cavità risultava in corrispondenza di una fascia, trasversale al cavo, di calcare cataclasato e ossidato con limi argillosi di deposizione secondaria sulla parte destra dell'anello.

c) il sondaggio indicò la possibilità di avanzamento della fresa sino alla progr. 1895, da cui iniziava una zona di faglia che determinò il franamento del foro.

La seconda serie di indagini geognostiche, anch'essa mirata all'individuazione delle condizioni d'avanzamento ed eseguita dopo il raggiungimento

Fig. 4 - Attraversamento della faglia

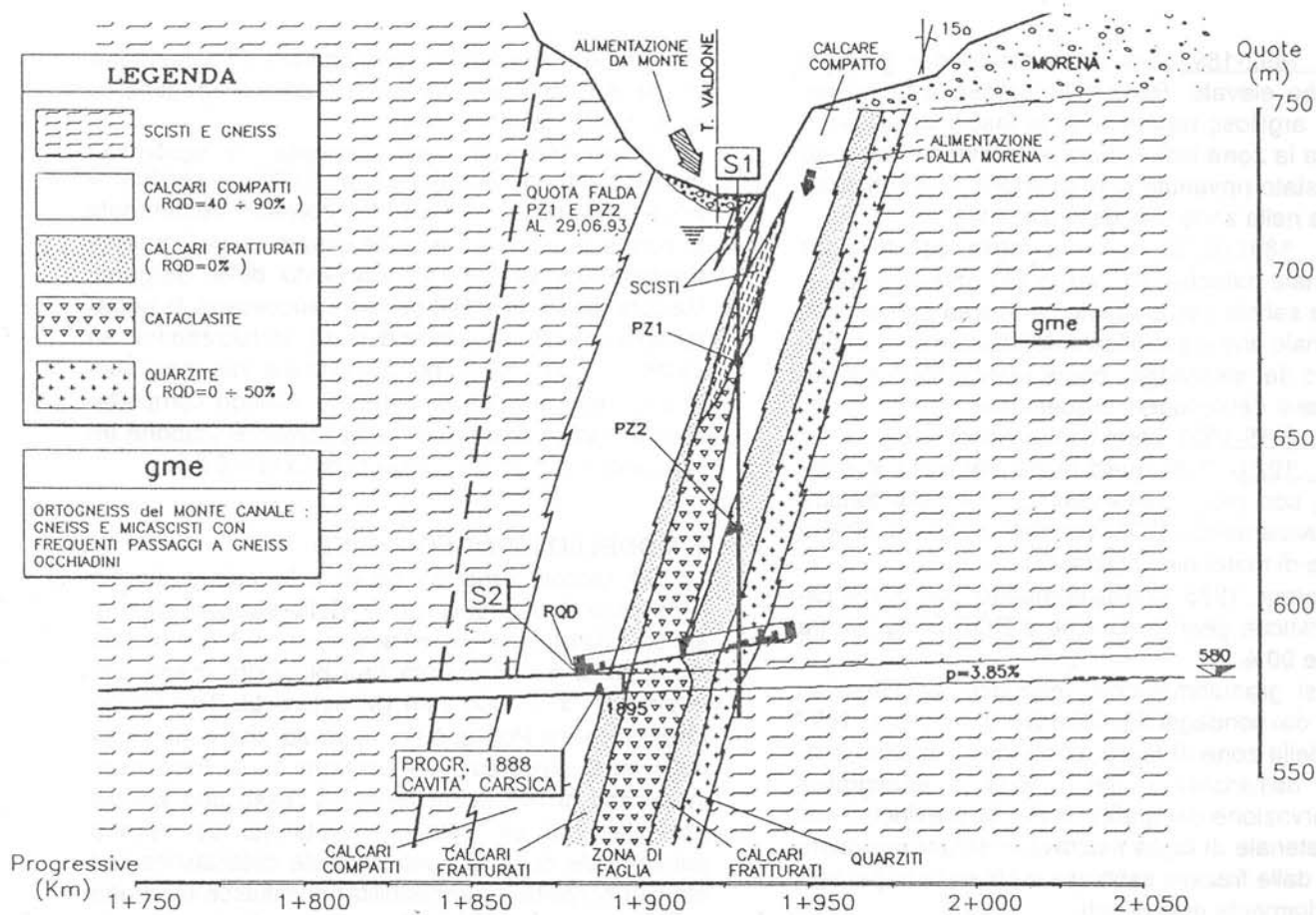


Fig. 5 - Profilo geologico dell'attraversamento della faglia

della progr. 1895, era costituita da:

- 1) n. 1 sondaggio suborizzontale a distruzione di nucleo, lanciato dal fronte alla progr. 1895 per 18 m in avanzamento;
- 2) n. 1 sondaggio verticale a carotaggio continuo (S1) eseguito in alveo del T. Valdome (Q. 724 m s.l.m.) sulla verticale del by-pass per una profondità di 155 m, con posa di n. 2 piezometri tipo Casagrande alla profondità di 50 m e di 100 m dal p.c.;
- 3) n. 3 sondaggi suborizzontali (S2, S3, S4) a carotaggio continuo eseguiti nel by-pass dalla progr. 1882.5 in avanzamento per profondità rispettivamente pari a 66.5 m, 55.5 m e 51.10 m;
- 4) censimento dettagliato delle manifestazioni idriche di superficie.

Dalle indagini suddette emerse quanto segue:

- a) il sondaggio suborizzontale a distruzione di nucleo, rilevando per i primi 14 m materiale cataclastico, argilla plastica e venuta d'acqua dal foro, evidenziò la necessità di ricorrere ai sondaggi a carotaggio continuo;
- b) il sondaggio S1 ha attraversato pressoché completamente la lente calcarea sulla verticale del Valdome e ha consentito il monitoraggio del livello di falda sulla verticale della galleria attraverso i 2 pie-

zometri installati nel foro;

c) i 3 sondaggi a carotaggio continuo S2, S3, S4 permisero un'accurata ricostruzione della situazione litostratigrafica e strutturale della lente calcarea rivelatasi, a quota galleria, di spessore pari a ≈ 50 m (Fig. 5 e Foto 2); tale situazione risultava così riassumibile:

progr. 1882.5-1892: calcare compatto con buone caratteristiche geostrutturali e RQD compreso tra 40% e 90%;

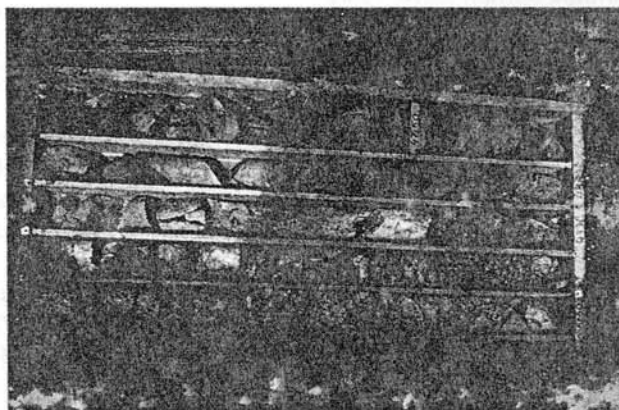


Foto 2 - Materiale cataclastico

progr. 1892-1897: calcare fratturato, con grado di disturbo elevato, RQD nulli, presenza di riempiimenti argillosi; rappresenta la fascia di transizione tra la zona indisturbata e l'accidente tettonico ed è stato rinvenuto con analoghe caratteristiche anche nella zona successiva alla faglia;

progr. 1897-1915: zona di faglia costituita da materiale cataclastico, per lo più ghiaietto spigoloso e sabbie ben classate; la scarsa presenza di materiale fine è giustificata dal dilavamento subito all'atto del carotaggio, come testimoniato dai valori bassi del recupero percentuale;

progr. 1915-1921: idem come al secondo p.to;

progr. 1921-1935: quarzite da fratturata a compatta, con progressiva diminuzione delle fratture in avanzamento, RQD variabili da 0% a 50% e tracce di materiale cataclastico;

oltre progr. 1935: gneiss compatto, con ottime caratteristiche geomeccaniche e RQD compresi tra 30% e 90%.

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi S1, S2 e S4, tra le progr. 1897 e 1915 della zona di faglia, confermano quanto scaturito dall'analisi dei logs stratigrafici; dall'osservazione dei grafici in Fig. 6 si evince infatti che il materiale di faglia risultava costituito prevalentemente dalle frazioni sabbiosa e ghiaiosa in percentuali mediamente equivalenti.

a) con il censimento delle manifestazioni idriche di superficie, in cui le principali sorgenti furono numerate da 1 a 6, si osservò che la maggior parte di esse risultava distribuita lungo l'alveo del T. Valdone tra le quote 730 m s.l.m. e 690 m s.l.m.. Le principali sorgenti sono denominate:

- Sorgente Valdone Superiore (n° 6), di portata media annuale 12 l/s;
- Sorgente Valdone Inferiore (n° 5), di portata media annuale 20 l/s;
- Sorgentine Valdone (n° 1, 2, 3, 4), di portata media annuale complessiva 10 l/s.

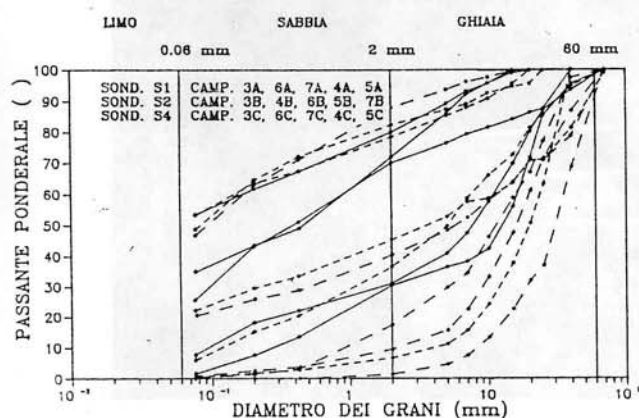


Fig. 6 - Curve granulometriche del materiale di faglia

Le prime due sorgenti sono captate ed alimentano la rete dell'acquedotto; il gruppo delle sorgentine risultava sotto osservazione.

Il giorno 15/04/93, corrispondente allo scavo nei marmi fratturati fino alla progr. 1888, si verificò al fronte una venuta di ~ 300 l/s; corrispondentemente fu notata la diminuzione delle portate nella Sorgente Valdone Inferiore e l'azzeramento della Sorgente Valdone Superiore. Nel periodo successivo la portata della venuta in galleria diminuì stabilizzandosi su valori di ~ 70 l/s per poi decrescere, nei mesi successivi, fino a valori di ~ 40 l/s; analogo comportamento è stato osservato nella sorgente Valdone Inferiore che si stabilizzò sulla portata di ~ 8.5 l/s.

4. MODELLO IDROGEOLOGICO

I dati raccolti durante i rilievi e le indagini hanno consentito di costruire un modello idrogeologico di sintesi. Relativamente all'acquifero, sul cui bacino imbrifero si è considerata una piovosità media annuale pari a ~ 1000 mm (Ministero LL.PP., Ufficio Idrografico del Po), si è riconosciuta una dominanza della lente calcarea nei confronti delle formazioni incassanti di natura metamorfica; esso può essere assimilato ad un sistema multistrato ad assetto subverticale dove la zona centrale cataclastica (ad elevata porosità e permeabilità) costituisce un dreno molto efficiente sia rispetto ai materiali calcarei via via meno fratturati sia rispetto alle formazioni incassanti (Fig.7).

L'alimentazione proviene da:

- l'infiltrazione diretta delle acque meteoriche nella lente calcarea del T. Valdone;
- il ruscellamento di superficie convergente nell'incisione del T. Valdone costituita dalla lente calcarea;
- la percolazione ipogea delle acque immagazzinate nei depositi morenici di Cagnoletti e Prati Fontani, verso il Valdone.

La filtrazione all'interno della lente calcarea avviene sostanzialmente in due sistemi:

- 1) reticolo di fratture e fessure di origine tettonica;
- 2) reticolo di cavità carsiche;

Il secondo sistema, la cui complessità risulta estremamente più elevata, si origina sulla dissoluzione e l'allargamento del reticolo fratturativo tettonico, creando successivamente cavità di vario tipo, camini, sifoni, grotte, ecc.

La complessità del sistema è evidente dal prosciugamento della sorgente Valdone Superiore ($Q = 722.8$ m s.l.m.) a fronte di un solo depauperamento della sorgente Valdone Inferiore ($Q = 715$ m s.l.m.), che sgorga anche quando i piezometri nel S1 ($Q = 724$ m s.l.m.) seguono livelli piezometrici attestati a quota 708 ÷ 710 m s.l.m. (agosto 94).

I dati idrogeologici essenziali estesi al biennio 93-

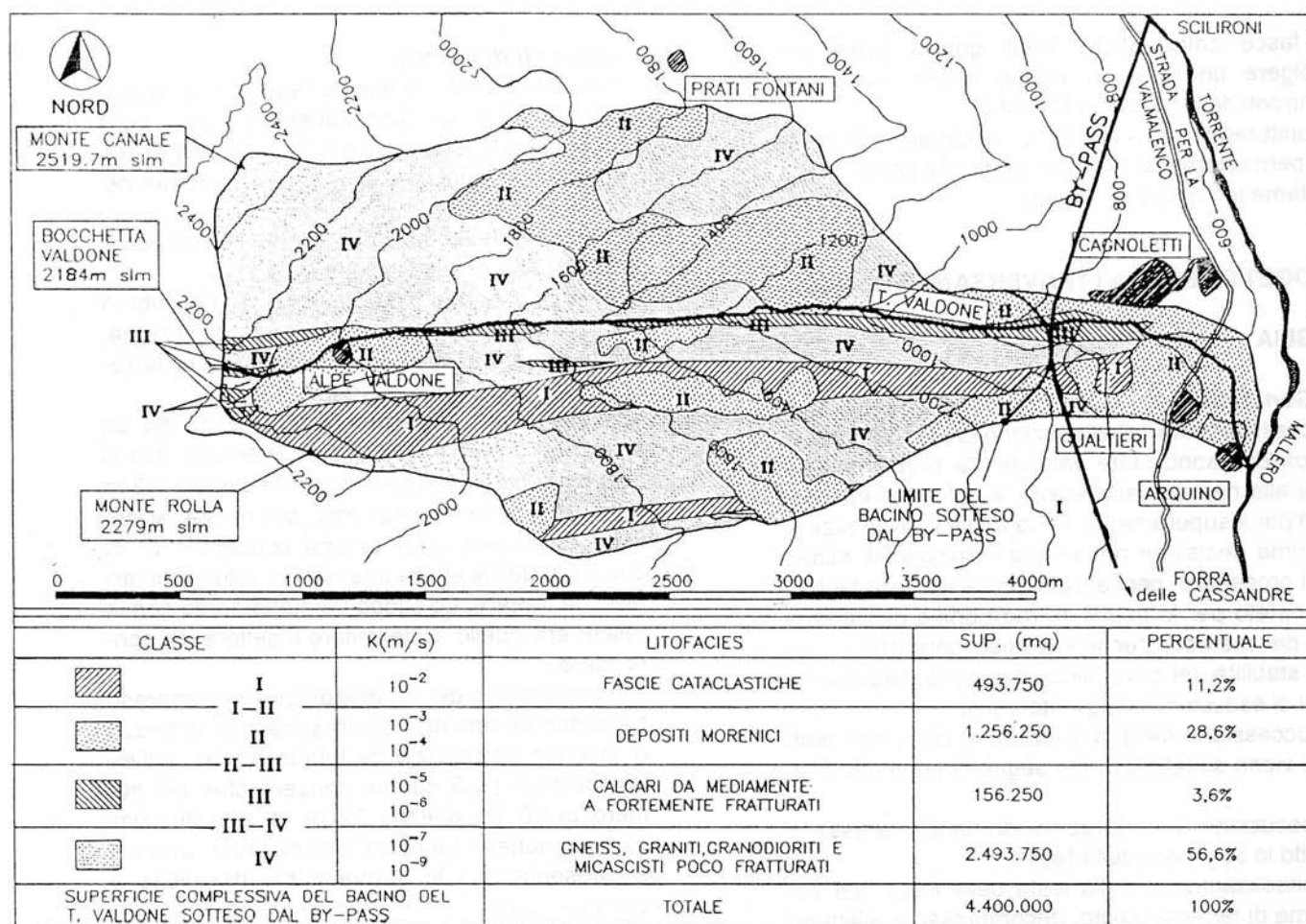


Fig. 7 - Bacino idrogeologico del T. Valdone

94 sono riassunti nella Fig. 8.

Dai grafici si osserva:

- la quota dei livelli piezometrici dei due strumenti (cfr. Fig. 5), è sempre simile;
- non si rilevano sensibili variazioni nei livelli piezometrici in corrispondenza delle maggiori precipitazioni;
- si rilevano sensibili variazioni nella portata della sorgente Valdone Inferiore in funzione sia delle piogge sia dello scioglimento crio-nivale primaverile.

Le osservazioni finora compiute permettono di esprimere le seguenti considerazioni di sintesi:

- il sistema acquifero, sul cui bacino imbrifero si è considerata una piovosità media annuale pari a ≈ 1000 mm (Ministero LL.PP. - Ufficio Idrografico del Po), è complicato nella presenza di un reticolo carsico;
- l'alimentazione della vena del Valdone è dovuta principalmente alle precipitazioni meteoriche autunnali e allo scioglimento crio-nivale dei ghiacci di M. Canale nella stagione primaverile;
- i depositi morenici di Prati Fontani e Cagnoletti e

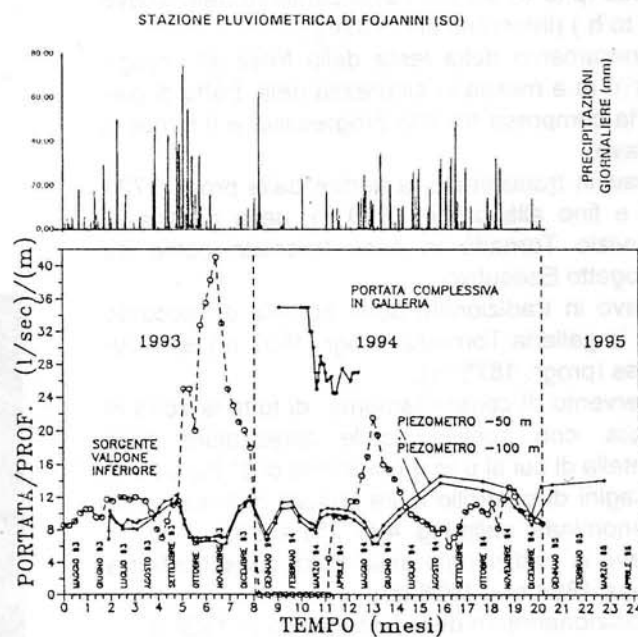


Fig. 8 - Misure idrogeologiche dell'attraversamento del Valdone

le fasce cataclastiche negli gneiss sembrano svolgere un ruolo di valano idrogeologico nei confronti della vena del Valdane.

Il monitoraggio e lo studio idrogeologico tuttora in corso permetteranno di approfondire le conoscenze sul sistema idrogeologico locale.

5. PROGETTO DELL'ATTRAVERSAMENTO DELLA FAGLIA

5.1 Generalità

Successivamente all'esecuzione della campagna geognostica sono state valutate le problematiche relative alla ripresa dello scavo e agli interventi necessari per il superamento della faglia in sicurezza.

La prima decisione riguardava il metodo di scavo con cui procedere per l'attraversamento della faglia.

Si è optato per lo scavo in tradizionale per la flessibilità del metodo, per le maggiori garanzie in termini di stabilità del cavo, sicurezza delle maestranze e tempi di esecuzione degli interventi.

La successione delle lavorazioni e degli interventi previsti viene sintetizzata nei seguenti punti (cfr. Fig. 4):

- a) esecuzione di perforazioni drenanti interessanti tutto lo spessore della faglia;
- b) consolidamento, dalla testa della fresa, del volume di terreno sciolto, decompresso e allentato presente davanti alla fresa; tale intervento risultava propedeutico sia per l'arretramento della fresa (p.to c) sia per l'avanzamento dello scavo (p.to h) (interventi di 1° Fase);
- c) arretramento della testa della fresa alla progr. 1876 m e messa in sicurezza della tratta di galleria compresa tra tale progressiva e il fronte di scavo;
- d) scavi in tradizionale, a partire dalla progr. 1781 m e fino alla progr. 1880 m, della galleria di servizio Tornadù in asse tracciato come da Progetto Esecutivo;
- e) scavo in tradizionale della bretella di raccordo tra la galleria Tornadù (progr. 1852 m) ed il bypass (progr. 1875 m);
- f) intervento di consolidamento di tutta la zona di faglia, con accesso delle attrezzature dalla bretella di cui al p.to e (interventi di 2° Fase);
- g) indagini di controllo della riuscita dell'intervento (denominate nella Fig. 4 di "2° Fase");
- h) scavo in tradizionale della tratta consolidata tra progr. 1894 m e 1926 m;
- i) riposizionamento della fresa a progr. 1926 m;
- l) ripresa dello scavo con fresa negli gneiss.

Nel seguito verranno descritti gli interventi di consolidamento previsti ai p.ti b ed f.

5.2 Interventi di 1° Fase

Gli interventi previsti in questa fase (Fig. 4) erano mirati a garantire le operazioni di arretramento della fresa in sicurezza, scongiurando l'eventualità di ulteriori collassi del materiale e richiamo di acqua nel cavo.

Essi sono rappresentati dalle seguenti lavorazioni elencate in ordine di successione esecutiva:

- 1) corona di drenaggi costituita da n. 10 tubi in PVC di lunghezza pari allo sviluppo della faglia, ciechi nei primi 25 m e microfissurati per la restante lunghezza;
- 2) consolidamento impermeabilizzante fino ad un spessore di ~ 3÷4 m esternamente al profilo di scavo per un'estensione longitudinale di ~ 12 m (8 m oltre il fronte), realizzato con resine silicatiche espanse su due corone concentriche di cui una esterna e una interna al volume di terreno da trattare. Lo scopo del trattamento con le resine era quello di delimitare il settore da consolidare;
- 3) consolidamento del volume di terreno compreso tra le due corone di iniezioni silicatiche a mezzo di iniezioni cementizie da tubi in acciaio valvolati, disposti su 3 corone concentriche, nel numero di 70 (lunghezza 22 m, di cui gli ultimi 12.5 m iniettati). Le miscele cementizie utilizzate presentavano le seguenti caratteristiche e composizione:
 - cemento tipo R425, a finezza di macinazione non inferiore a 500 cm²/g (Blaine);
 - rapporto cemento/acqua non superiore a 0.7 (700 Kg di cemento ogni 1000 litri di acqua);
 - additivo colloide (bentonite);
- 4) trattamento con resine silicatiche espanse del materiale collassato presente oltre la testa della fresa.

Gli interventi di prima fase, iniziati in data 24/08/93, si sono protratti sino al 15/01/94.

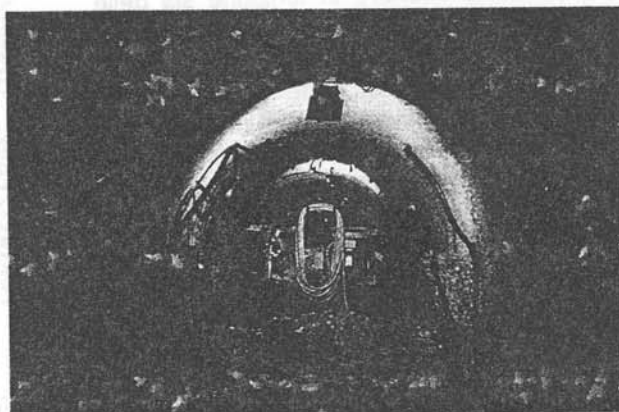


Foto 3 - Interventi di consolidamento

Iniezioni di resine silicatiche espanse

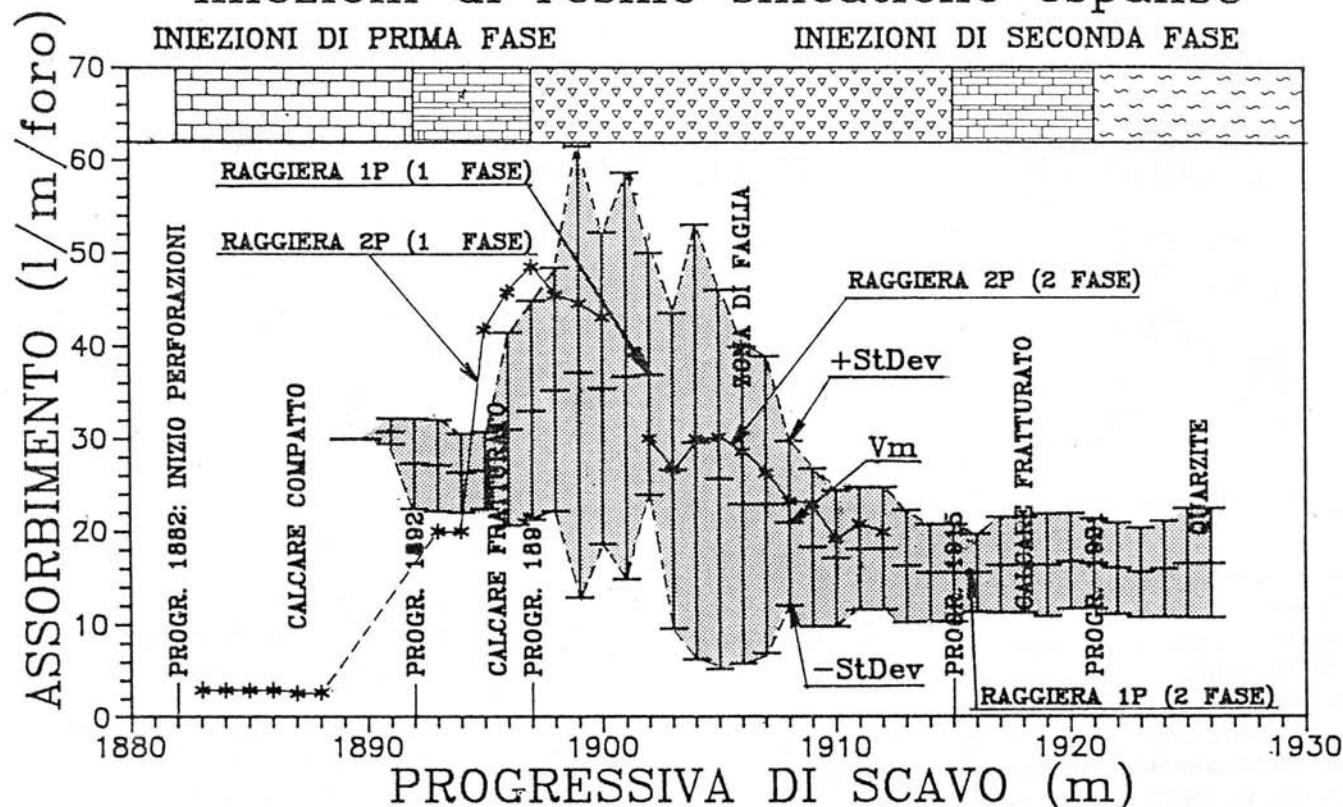


Fig 10 - Assorbimenti delle resine silicatiche espanse

La riuscita dell'intervento è stata verificata, prima della ripresa dello scavo, con una serie di indagini di controllo e con le osservazioni idrogeologiche in galleria.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Provveditorato Regionale alle Opere Pubbliche per la Lombardia e A.T.I. Impregilo S.p.A. - Cariboni Paride S.p.A. per la cortese disponibilità alla pubblicazione dei dati.

Bibliografia

- (1) Bonsignore, C., Bravi, C., E., Nangeroni, G., Ragni, U., (1970): Geologia del territorio della Provincia di Sondrio. Amministrazione Provinciale di Sondrio.

- (2) Ministero di Lavori Pubblici - Ufficio Idrografico del Po: Carta delle isoiete della precipitazione annua media del trentennio 1921-1950. Pubblicazione n. 24, Fascicolo XII b.
- (3) Boutitie, J., & Lunardi, P., (1975): Tunnel Autoroutier du Gran Sasso. - Traversée de la Faille de la Valle Fredda. - Travaux, Parigi.
- (4) Boutitie, J., & Lunardi, P., (1976): Franchissement d'un accident tectonique majeur par le tunnel du Gran Sasso. - 6° Congrès Européen de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations - Vienna.

Summary

For the safety of the city of Sondrio, a waterworks system is currently being created in order to drain the lake in case of a landslide at Spriana (Province of Sondrio). During construction of the first by-pass, carried out by a TBM rock cutter, there was hydrogeological instability when workers tried to cross a major limestone fault with waterways. The crossing of the fault required a hydrogeological study, which showed that work in the unstable area had to be continued with traditional digging after improvement of the soil with polyurethane waterproofing injections and cement reinforcements.