

Le gallerie Dolonne stanno entrando in esercizio portando la piena funzionalità dell'infrastruttura autostradale che attraversa la Valle d'Aosta e la connette al resto del sistema viario nazionale

L'ASSISTENZA TECNICA IN CORSO D'OPERA DURANTE LO SCAVO DELLE GALLERIE DOLONNE

Pietro Lunardi*
Antonio Voza**

Le gallerie Dolonne, i cui lavori di scavo sono stati ultimati nel Dicembre 2005, stanno per entrare in esercizio portando a compimento, assieme al viadotto Jallà e al viadotto Colombo - quarant'anni dopo l'apertura del traforo del Monte Bianco -, la piena funzionalità dell'infrastruttura autostradale che, partendo dal varco franco-italiano del Bianco, attraversa tutta la Valle d'Aosta e la connette al resto del sistema viario nazionale.

Introduzione

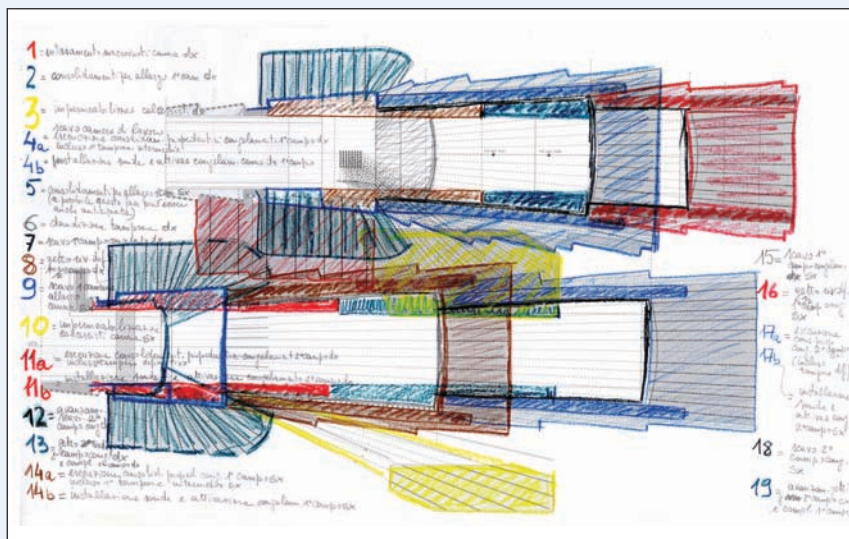
Il traforo del Monte Bianco e le gallerie Dolonne, gallerie contrapposte e distanti in linea d'aria poco più di 1 km, scavate in condizioni geologiche diverse e con differenti tecnologie, mezzi e risorse, rappresentano due opere funzionali allo stesso sistema, quindi indirizzate a garantire i medesimi requisiti di fruibilità all'utenza.

La conclusione dei lavori e la messa in esercizio di quest'ultimo tratto, ancora mancante, di viabilità autostradale, costituiscono l'occasione per analizzare lo sviluppo dei sistemi di verifica della progettazione in corso d'opera e, altresì, l'efficacia dei metodi di controllo dei processi costruttivi e delle strutture che tali requisiti di sicurezza e di fruibilità devono garantire nel corso del tempo.

L'assistenza tecnica in corso d'opera durante la costruzione delle gallerie

Oggetto della presente memoria è la descrizione dell'attività di assistenza tecnica in corso d'opera svolta dal Progettista che, nella realizzazione di quest'opera, ha finito per avere una funzione determinante in relazione alle condizioni geomeccaniche e geotecniche effettivamente riscontrate in fase di scavo.

Tale funzione, originariamente prevista per la raccolta e l'analisi dei dati derivanti dal piano di monitoraggio connesso al progetto, si è in seguito articolata al fine di fornire soluzioni tecniche alternative per il superamento di condizioni operative oggettivamente difficili da af-



La schematizzazione preliminare delle fasi esecutive degli interventi nella tratta soggetta a congelamento

frontare con i mezzi e le risorse tradizionalmente impiegati nella pratica del tunnelling. I sistemi di monitoraggio impiegati durante lo scavo delle due canne con l'obiettivo di controllare l'evoluzione dei fenomeni indotti dalla penetrazione degli scavi all'interno dell'ammasso roccioso erano stati così ipotizzati nella stesura del progetto esecutivo:

- ◆ controllo delle deformazioni delle superfici dei versanti interessati dagli scavi degli imbocchi;
- ◆ controllo delle deformazioni dell'ammasso a causa dello scavo delle gallerie;
- ◆ controllo delle deformazioni e/o stato tensionale dei rivestimenti di prima fase e/o definitivi;
- ◆ controllo delle variazioni del livello piezometrico delle falde acquifere indotte dallo scavo delle gallerie.

Particolari circostanze di carattere geomeccanico e idrogeologico hanno poi reso necessario, in situazioni specifiche, la messa in opera di tecnologie di consolidamento del terreno non convenzionali e la realizzazione degli scavi secondo articolazioni del progetto originariamente non previste.



In questi casi, non solo il piano di monitoraggio è stato ulteriormente definito al fine di incrementare il livello di verifica delle ipotesi progettuali, ma sono anche state condotte nuove e più dettagliate indagini conoscitive di base per migliorare il quadro delle conoscenze.

Il progetto di monitoraggio dei lavori in corso d'opera, parte integrante del progetto della galleria, prevedeva la messa in opera di una serie di stazioni per il monitoraggio tenso-deformativo della cavità e delle opere di rivestimento di prima e di seconda fase disposte a interdistanze stabilite in funzione delle formazioni e delle condizioni geomeccaniche attese.

La geologia attesa e la geologia effettivamente riscontrata in fase di scavo

Le gallerie sono state scavate simultaneamente anche su sei fronti a partire dai quattro imbocchi, di cui i due più settentrionali (lato Monte Bianco) situati nella zona di Entreves all'inizio della Val Veny, nella zona di confluenza dei due rami della Dora Baltea, Dora di Ferret e Dora di Veny, mentre quelli meridionali (lato Aosta) si trovano nell'area dell'abitato di Dolonne, poco oltre il punto di confluenza del Torrente Dolonne nella Dora Baltea.

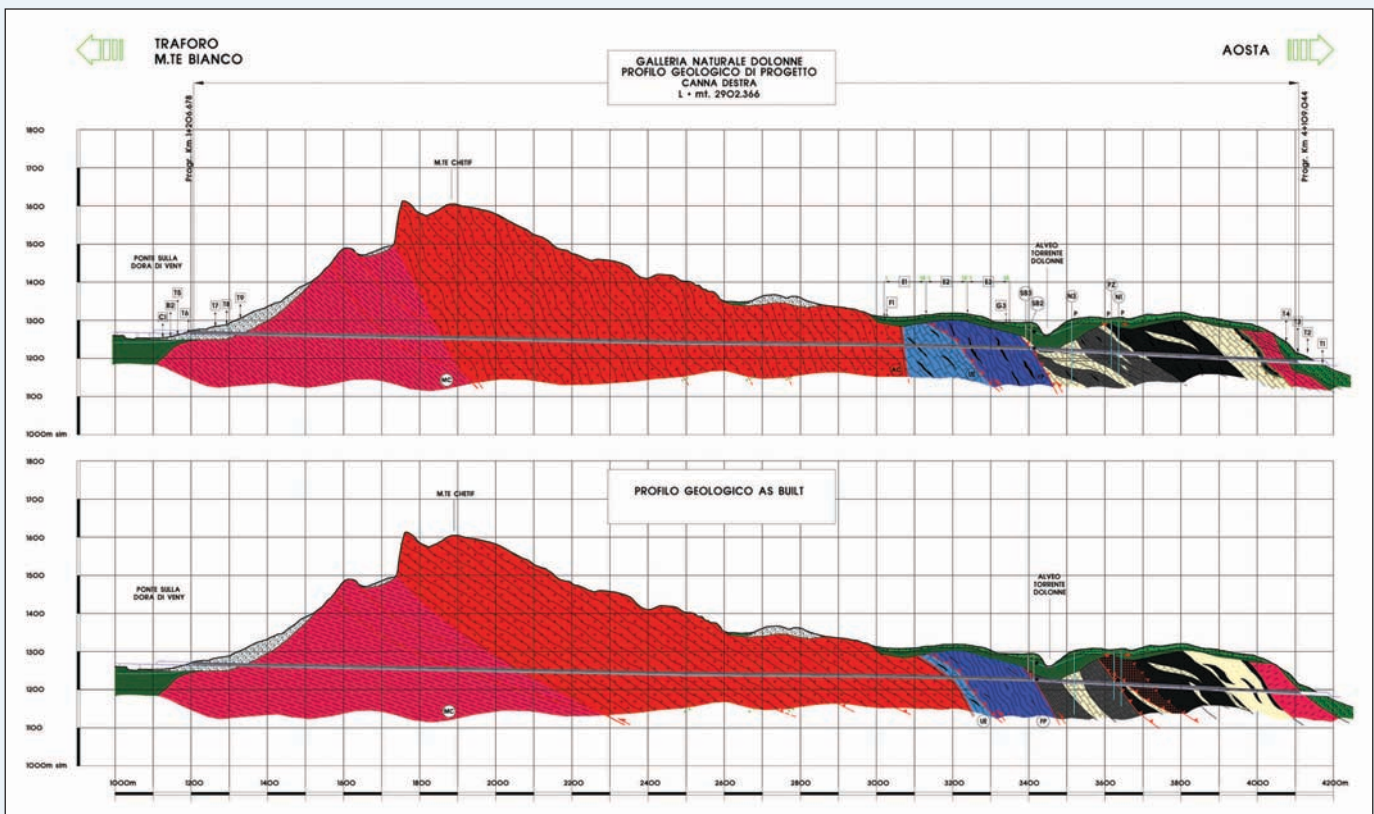
Dal punto di vista geologico-strutturale, sono presenti unità riferibili a tre sistemi principali di falde di ricoprimento, di importanza ed estensione regionale. Partendo da Sud (imbocco lato Aosta) si sono incontrati:

- ◆ il sistema Pennidico costituito dalle unità più basse (più vecchie) della successione, comprendente un complesso di scaglie basali, con elementi di età Paleozoica Superiore e Triassico-Giurassica costituiti da calcari, dolomie, gessi e carniole, e potenti successioni di flysch cretaceo formato da sequenze calcareo-arenaceo scistose. In particolare, si sono incontrate in ordine le seguenti formazioni rocciose: "carniole talora associate a gessi", "dolomie e calcari dolomitici metamorfosati" con caratteristiche geomeccaniche medio-

buone, "scisti neri grafitici" caratterizzati da qualità geomeccaniche medio-buone fino alla fascia molto alterata caratterizzata invece da qualità geomeccaniche pessime e "calcescisti con livelli filladici" dotati di una buona resistenza alla compressione ma molto fratturati e con presenza di falda acquifera;

- ◆ il sistema Elvetico-Ultraelvetico: affiora a Nord del Torrente Dolonne e, nell'area in esame, è costituito da una sequenza di argilliti nere, calcari spatici, calcari arenacei, calcari selciferi e calcescisti argillosi del Lias Inferiore (Malm). Questa unità è divisa in due dal Cuneo del Monte Chetif (che costituisce un'unità a se stante); di seguito, saranno indicate rispettivamente l'Unità Elvetica-Ultraelvetica meridionale (a Sud del Monte Chetif e costituita dalla formazione rocciosa denominata "scisti micacei e argilloscisti a Sud del Monte Chetif" dotati di parametri geomeccanici medio-bassi) e unità Elvetica-Ultraelvetica settentrionale (a Nord del Monte Chetif, composta dalla formazione "scisti e argilloscisti ardesiaci a Nord del Monte Chetif", con caratteristiche geomeccaniche variabili da medio buone a scarse secondo la presenza o meno della componente arenacea più resistente);
- ◆ Cuneo del Monte Chetif: formato dalla formazione "graniti e porfiroidi", derivanti dal metamorfismo alpino di rocce riolitiche, micrograniti e granofiri di età Permiana, con ottime qualità geomeccaniche (roccia autoportante). A Sud del Monte Chetif è presente anche una copertura trasgressiva calcareo arenacea di età Liassica ("calcari microcristallini metamorfosati"), però in facies diversa rispetto al Lias della confinante Unità Elvetica-Ultraelvetica a Sud del Monte Chetif. Tali calcari si presentano fratturati con giunti aperti e alterati, perciò con un grado di stabilità basso.

Tutte queste formazioni rocciose sono fortemente caratterizzate dallo stile deformativo della tettonica da sovrascorrimento tipica di tutto l'Arco Alpino. I principali sovrascorrimenti presenti sono il fronte Pennidico,



Il confronto tra i profili geomeccanici di previsione ed as built



il fronte Ultraelvetico e il fronte del Monte Chetif (che separano i tre omonimi sistemi principali sopra descritti), ai quali sono associati piani di taglio minori che separano le unità strutturali principali in unità minori, complicando ulteriormente l'assetto strutturale dell'area.

Il più importante è sicuramente il fronte Pennidico; che separa il Dominio delle Pennidi al tetto, dal sistema Elvetico-Ultraelvetico al letto. Si tratta di un elemento tettonico di importanza regionale (la sua presenza è rilevabile lungo buona parte dell'intero Arco Alpino), al quale sono riconducibili circa gran parte delle deformazioni presenti nell'area in esame. A quest'elemento sono associate importanti fasce cataclastiche di spessore variabile, perfettamente compatibili con l'importanza del sovrascorrimento.

La formazione che più ha subito le deformazioni indotte da questo sovrascorrimento è indubbiamente quella degli scisti neri grafitici, che, a causa della loro minor resistenza rispetto alle formazioni circostanti, hanno costituito la superficie di scollamento preferenziale. Infatti, a contatto con i calcescisti è stata rilevata una spessa fascia molto alterata e degradata, talora completamente argillificata, che durante le operazioni di scavo ha determinato problemi di instabilità tanto seri da dover richiedere eccezionali interventi di preconsolidamento; al contrario nelle formazioni direttamente coinvolte dal fronte Pennidico, ovvero i "calcescisti" per l'unità Pennidica, e gli "scisti e argilloscisti a Sud del Monte Chetif" per l'unità Elvetica meridionale, in virtù del comportamento più rigido dei materiali, il sovrascorrimento ha indotto un'intensa fratturazione, soprattutto nei calcescisti, senza degradarne eccessivamente le caratteristiche geomeccaniche, favorendo però la formazione di un importante acquifero, descritto in dettaglio più avanti.

Il confronto grafico tra il profilo geologico di previsione e il profilo effettivamente osservato in fase di scavo riferiti alla canna destra - sotto riportato - mette in evidenza come la previsione progettuale sia stata sostanzialmente rispettata lungo il tracciato, fatta eccezione per la posizione del contatto del fronte Chetif e del fronte Ultraelvetico e della fascia alterata degli scisti neri grafitici con le relative manifestazioni deformative osservate.

L'acquifero di Dolonne, le soluzioni progettuali per l'attraversamento, i metodi di verifica

Il tema che ha richiesto la maggiore attenzione progettuale, sia in fase di redazione del progetto sia in fase costruttiva, è stato tuttavia quello relativo all'attraversamento della tratta costituita da un complesso sistema multifalda, le cui geometrie sono articolate e non sempre ben ricostruibili.

Le falde hanno chimismo, acquiferi e livelli piezometrici differenti e distinti, senza però escludere locali mescolamenti. Dai dati rilevati in fase di progetto, confermati poi in fase esecutiva, sono state individuate tre falde. Di seguito si fornisce una descrizione sintetica delle caratteristiche chimico-fisiche delle falde e delle geometrie degli acquiferi, in riferimento al profilo geologico di dettaglio.

1. falda freatica superficiale (detta anche del "Torrente Dolonne"): si trova all'interno delle coperture quaternarie superficiali, sia moreniche sia di sub alveo del Torrente Dolonne. Costituisce una falda poco potente, drenata dal torrente stesso;
2. falda "Vittoria": presenta caratteristiche di acquifero profondo, costituito da acqua di risalita idrotermale calda (temperatura compresa tra 11°C e 15°C), ricca di sali (conducibilità elettrica nominale a 25°C mediamente compresa tra 3.000 e 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mediamente acida (pH compreso tra 5 e 6). Si può definire come acqua solfato-bicarbonato-calcica, con un livello piezometrico medio, nelle vicinanze del tracciato della galleria, che raggiunge quota 1.209 m s.l.m. (pochi metri sopra la chiave di calotta della galleria). La geometria del suo acquifero è molto incerta e difficilmente individuabile a causa del suo circuito profondo. Nei pressi della galleria, si ritiene sia ospitata all'interno di un cuneo di calcescisti "immerso" pochi metri sotto al piano stradale negli "scisti neri grafitici" che, grazie alla loro bassissima permeabilità, confinano con la sottostante falda Vittoria;
3. falda "Youla": è costituita da acqua solfato-calcica fredda (temperatura compresa tra 5°C e 8°C), mediamente salina (conducibilità elettrica nominale a 25°C mediamente compresa tra 2.000 e 2.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e debolmente acida (pH compreso tra 5,5 e 6,5). Costituisce un acquifero in pressione all'interno della formazione dei calcescisti, confinati verso l'alto dalla porzione basale a granulometria fine (quindi poco permeabile) dei depositi morenici e lateralmente dalla fascia argillificata degli scisti neri grafitici, con un livello piezometrico medio che raggiunge quota 1.259 m s.l.m..

La soluzione progettuale ricercata ha avuto l'obiettivo di contemperare la gestione in sicurezza di scavi sotto forti battenti idraulici in un ammasso molto fratturato, con il mantenimento dell'equilibrio idrogeologico nel lungo periodo.

Prevedendo lo scavo della tratta interessata dagli acquiferi dagli imbocchi lato Aosta delle gallerie, il progetto originario contemplava la realizzazione di un cunicolo drenante scavato in avanzamento a monte del tracciato principale che permettesse di alleggerire le pressioni idrostatiche al contorno della galleria, restituendo - mediante idoneo sistema di pompaggio - la quota parte di acque di falda utilizzabili a fini industriali per l'imbottigliamento.



Legenda della Figura precedente



Il fronte della canna di monte lato Monte Bianco alla prog. 3+546 il 13 Giugno 2005 in assenza di drenaggi



Il contatto roccia-detrito individuato nel carotaggio I

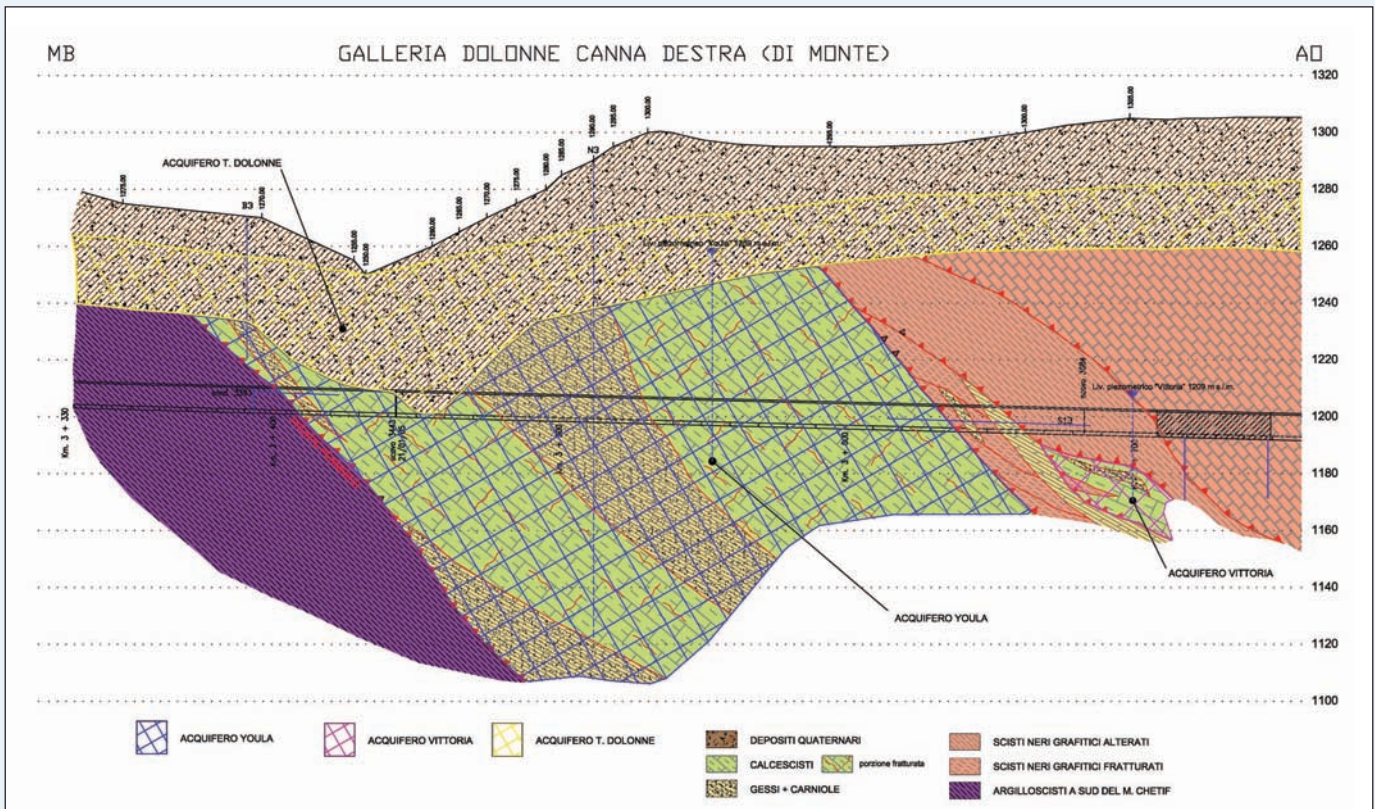


Il fronte della canna di monte lato Monte Bianco alla prog. 3+546 il 20 Luglio 2005 una volta eseguiti i drenaggi

Gli eventi occorsi sul fronte in scavo in canna di monte lato Aosta nell'estate del 2003 e le conseguenti ricadute sui programmi di produzione del cantiere hanno fatto sì che l'incontro fra gli scavi provenienti dai fronti da Nord e da Sud finisse per avvenire proprio sul limitare meridionale delle formazioni permeabili dell'acquifero e che, pertanto, la parte competente all'alveo del Torrente Dolonne fosse scavata da Nord.

Lo scavo è avvenuto mediante impiego di una serie di stazioni drenanti ubicate sul paramento di monte della canna di monte, attrezzate con dreni Sidrex lunghi 80 m drenanti per 40.

L'esecuzione di un nuovo sondaggio da piano campagna ha permesso di individuare, nel Giugno del 2004, con sufficiente precisione la posizione del contatto tra le formazioni dei calcescisti e il detrito di subalveo del Torrente Dolonne, così da determinare con maggiore accuratezza le fasi di avanzamento dei due fronti in scavo provenienti da Nord. Il transito opportunamente ritardato degli scavi del fronte della canna di valle rispetto a quella di monte ha fatto sì che non si verificassero altre perturbazioni nel livello piezometrico misurato nel detrito del torrente per causa all'effetto drenante degli scavi della canna di monte.



Il profilo geologico di dettaglio della zona dell'acquifero



La venuta fangosa nella canna di monte lato Aosta il 12 Giugno 2003



La venuta fangosa nella canna di monte lato Aosta il 13 Giugno 2003



La venuta fangosa nella canna di monte lato Aosta il 16 Giugno 2003



La venuta fangosa nella canna di monte lato Aosta, dopo una serie di inutili tentativi di contenimento, riprende il 30 Settembre 2003

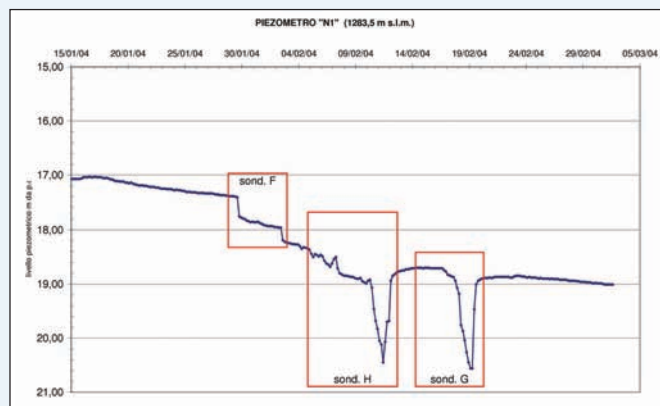
Tuttavia, la maggior parte dell'impegno del riesame della progettazione in corso d'opera è stato richiesto dall'inaspettata sequenza di fenomeni deformativi occorsi a partire dai primi mesi del 2003 e culminati nell'estate dello stesso anno allorché in corrispondenza della formazione degli scisti neri grafitici l'avanzamento in canna di monte dall'imbocco lato Aosta fu interrotto dal verificarsi di una copiosa colata di materiale fangoso associato a un lineamento di origine tettonica presente nella zona al contatto con la fascia permeabile dei gessi e delle carniole.

Il fenomeno, ovviamente inaspettato se non altro per la sua impressionante dimensione e tale da far temere anche per la stabilità del setto tra le due canne, è stato oltretutto connotato da aspetti tra loro contrastanti che lo hanno reso di ancor più complessa interpretazione. Il materiale rifluito in galleria, debitamente analizzato, ha fatto osservare una composizione derivata da due elementi prevalenti:

- ◆ acque caratterizzate dal chimismo e dalle temperature tipiche del circuito Vittoria;
- ◆ la presenza di un materiale disciolto di chiara matrice grafitica e quindi associabile all'erosione delle limitrofe porzioni degli scisti neri.

La presenza di due elementi ampiamente osservati e documentati durante l'azione di monitoraggio dei fronti di scavo quali la sostanziale stabilità del fronte anche nel momento di maggiore criticità delle condizioni in galleria e la sua impermeabilità documentata anche dalle scarsissime rese in termini di assorbimento attraverso le valvole dei trattamenti di consolidamento fin lì impiegati, unitamente alla presenza del circuito acquifero Vittoria dalla geometria difficilmente ricostruibile, hanno reso molto incerta l'interpretazione del fenomeno avvenuto e, conseguentemente, difficile l'orientamento sul criterio progettuale da seguire per consentire la prosecuzione degli scavi e il completamento dei lavori nella tratta. Di tale difficile compito è stato peraltro investito un Comitato Scientifico di studio appositamente convocato da RAV, presieduto dal Prof. Marc Panet dell'Ecole Polytechnique di Parigi, che ha determinato innanzitutto l'esecuzione di una campagna di indagini integrative avente lo scopo di individuare l'assetto idrogeologico di dettaglio della tratta in esame. Sono stati eseguiti otto nuovi sondaggi sia dalle gallerie sia dal piano di campagna: ad essi è stata associata l'esecuzione di nuove prove geotecniche classiche di laboratorio nonché l'esecuzione di misure di parametrizzazione chimica, di pompaggio, di permeabilità e di portata mediante micromulinello in foro.

Nell'area in esame è presente inoltre un sistema di monitoraggio della falda, con acquisitori piezometrici automatici, che registrano e memorizzano, ogni quattro ore, il livello della falda misurata.

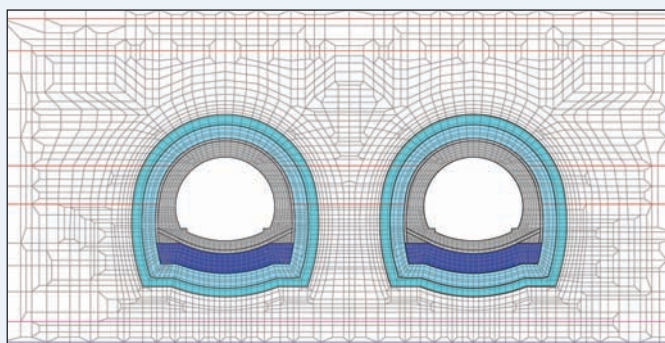


L'andamento grafico della falda nel piezometro N1 in occasione delle prove di pompaggio

Tale sistema è stato ulteriormente potenziato nel corso della campagna di indagine integrativa predisposta dal Comitato scientifico. Si riporta, ad esempio, un grafico relativo al piezometro "N1", intercettante l'acquifero ospitante la "falda Youla", dove è ben evidente l'effetto delle prove d'emungimento eseguite nei sondaggi superficiali "E" e "A". Queste prove hanno fornito ulteriori informazioni per la definizione delle geometrie degli acquiferi in profondità.

Contestualmente, indirizzata la progettazione degli interventi verso drastiche misure di contenimento dei detensionamenti dovuti alla circolazione idrica e all'incremento della sicurezza delle lavorazioni, il Progettista, confortato nella sua scelta anche dal Comitato Scientifico, ha programmato l'esecuzione di una serie di test di laboratorio finalizzati alla verifica della fattibilità di un trattamento mediante congelamento dell'ammasso dei circa 60 m che, in ambedue le canne, presentavano le caratteristiche di rischio più elevato.

Le prove geotecniche propedeutiche al congelamento su 44 campioni carotati nel corso dei sondaggi sono state eseguite in Austria presso i laboratori CDM, sottoponendo i campioni a cicli di congelamento fino a -20°C e successivo scongelamento. Verificata la buona risposta in termini di incremento delle proprietà geotecniche del materiale congelato, è stata predisposta una nuova analisi agli elementi finiti del comportamento tenso-deformativo dell'ammasso allo scavo mediante il codice di calcolo ADINA, imponendo una nuova geometria di lavoro basata sull'ipotesi di circondare la sagoma di scavo mediante le sonde congelatrici, consolidarne il tampone di fondo e scavare e rivestire la galleria sotto congelamento realizzato mediante immissione di azoto liquido.



La mesh di calcolo del programma a elementi finiti

Il congelamento della tratta critica dell'acquifero di Dolonne

L'esecuzione del congelamento vero e proprio della porzione d'ammasso da scavare, avvenuto con il flussaggio di azoto liquido, è stata preceduta dalla realizzazione di alcune opere propedeutiche finalizzate alla creazione di una superficie cilindrica migliorativa delle caratteristiche geomeccaniche (resistenza, porosità, conducibilità idraulica, ecc.) dell'ammasso all'esterno della porzione congelata.

Prima della messa in opera delle sonde congelatrici sono state eseguite misure di deviazione dei fori, al fine di conoscere con la maggior accuratezza possibile lo scostamento fra la posizione teorica dei fori indicata nel progetto e quella realmente assunta durante la perforazione.

Per garantire la quantità di azoto sufficiente al congelamento del volume di terreno si è provveduto a realizzare un adeguato sistema di stoccaggio del gas. L'azoto è stato immagazzinato in tre contenitori criogenici (silos), posizionati all'esterno della galleria nell'area tra i due imbocchi lato Aosta.



I silos per lo stoccaggio dell'azoto liquido nel piazzale di imbocco lato Aosta



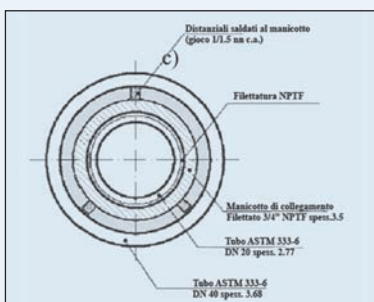
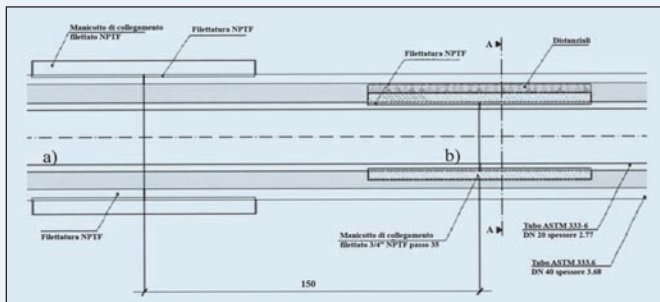
Le valvole di regolazione dell'alimentazione in galleria

I tre serbatoi criogenici installati per lo stoccaggio dell'azoto liquido avevano la capacità complessiva di 130.000 l. Tutti e tre i serbatoi erano dotati di un dispositivo di regolazione automatica della

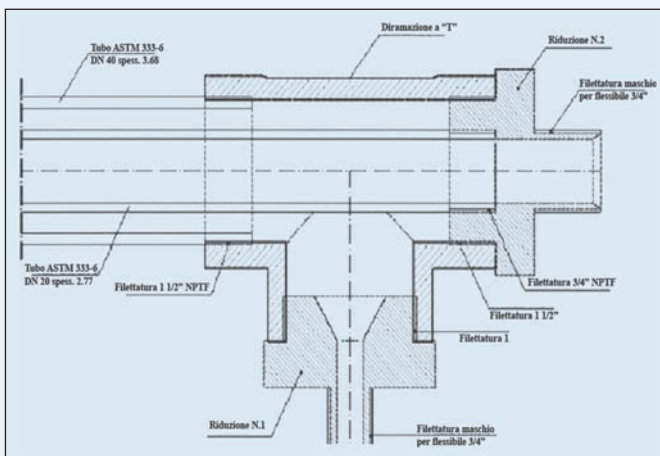
pressione interna che sfruttava la pressione creata dalla gassificazione dell'azoto stesso in modo da evitare ingenti variazioni di pressione dovuti sia alla variazione della quantità d'azoto (prelievi considerevoli durante il flussaggio e immissioni per il rifornimento di nuovo azoto che avvenivano durante il pompaggio stesso) sia ai cambiamenti di volume dovuti all'escursione termica fra giorno e notte. La linea di mandata dell'azoto liquido aveva uno sviluppo in lunghezza di circa 400 m; è stata realizzata con tubi in acciaio inox e isolata termicamente sin dalla partenza, nella zona di immagazzinamento. All'interno del by-pass, la linea di alimentazione è stata collegata a un sistema di controllo e di regolazione composto di tre valvole (skid) di regolazione. Queste ultime erano collegate alla rete d'aria compressa della galleria e avevano anche funzione di sicurezza, potendo infatti bloccare il flusso di azoto in caso di perdite di gas al fronte. Dallo skid la tubazione si suddivideva in tre linee di distribuzione sempre in acciaio inox, così da gestire in modo indipendente tre settori diversi del fronte (calotta, piedritti e arco rovescio), anche al fine di consentire un intervento separato con la regolazione di flusso di azoto liquido secondo le necessità. Queste tre linee erano a loro volta collegate alle sonde congelatrici (in numero di 49 per il primo campo congelato in canna destra e 86 per i restanti campi).

Il collegamento tra le sonde congelatrici e i collettori di estrazione è stato ottenuto tramite l'utilizzo di tre linee di estrazione parallele alla linea di alimentazione in un cunicolo interrato. A circa 20 m dal by-pass, le condotte di estrazione attraversavano (sempre in cunicolo) la galleria, per tornare in superficie in corrispondenza della muretta del paramento sinistro della via di monte andando a raccordarsi a un unico tubo in acciaio corrugato che permetteva la dispersione all'esterno dell'azoto gassificato e utilizzato per il congelamento.

Le sonde congelatrici sono state messe in opera mediante l'esecuzione di una serie di fori con 127 mm di diametro, profondi 35 m, rivestiti con un tubo di armatura in ferro valvolato del diametro di 88,9 mm. La cementazione del foro è stata eseguita con particolare attenzione in modo da arrivare al completo intasamento dell'intercapedine perforo-rivestimento, così da evitare la presenza di eventuali sacche d'aria che avrebbero potuto limitare le capacità criogeniche dell'azoto riducendo lo scambio termico tra l'ammasso roccioso e la sonda congelatrice. Una volta eseguita la cementazione del foro, sono state posate le canne congelatrici vere e proprie. Le sonde utilizzate erano costituite da due tubi in acciaio coassiali collegati tra loro da una testa speciale, anch'essa in acciaio. La testa, di particolare concezione, consente il passaggio dell'azoto liquido proveniente dalla linea di alimentazione all'interno del tubo di maggior diametro e il contemporaneo scarico del liquido - ormai gassificato - attraverso il tubo interno (circolazione diretta). Rende inoltre possibile l'inversione del flusso dell'azoto liquido in modo da inviare, con maggior potere refrigerante, il liquido direttamente a fondo foro (circolazione inversa). Per garantire un corretto scambio termico, l'intercapedine tra il tubo esterno della sonda congelatrice e il rivestimento è stato riempito con miscela cementizia a elevata conducibilità.



Lo scambio termico tra azoto e terreno su cui si è basato il sistema avviene pertanto durante il tragitto che il liquido compie dall'immissione all'altezza del fronte fino al termine della sonda attraverso la superficie esterna della tubazione di diametro maggiore.



Le sezioni dei tubi costituenti le sonde congelatrici installate: a) sezione longitudinale della canna congelatrice, b) sezione trasversale della canna congelatrice, c) sezione longitudinale della testa della sonda congelatrice

Lungo lo sviluppo della sonda, circa 35 m, il liquido criogenico vaporizza, sottraendo calore al terreno circostante che si abbassa di temperatura fino a congelarsi.

Al fine di monitorare l'evoluzione delle temperature dell'ammasso, per la misurazione delle temperature sono state utilizzate delle canne termometriche. Come nel caso precedente, le intercapedini tra il rame e le tubazioni protettive in ferro sono state riempite con miscela cementizia a elevata conducibilità termica. Al fine di fornire dati di temperatura il più possibile veritieri, un altro accorgimento è stato quello di riempire di alcool il tubo di rame contenente le termocoppie per migliorare la conducibilità termica ed evitare la presenza di porzioni di canna ghiacciate. Ogni canna termometrica conteneva otto termocoppie poste a 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26 e 30 m dal fronte.

Al fine di poter comprendere più chiaramente l'andamento delle temperature, l'analisi dell'intervento di congelamento deve essere condotta considerando due fasi distinte:

- ◆ congelamento: fase durante la quale è stato preso in considerazione il periodo nel quale vi è stato il flusso ininterrotto dell'azoto liquido (per motivi di sicurezza, in questo lasso di tempo è interdetto l'accesso alla galleria a tutto il personale se non munito di autorespiratore);
- ◆ mantenimento: fase durante la quale l'azoto è stato pompato solo per brevi periodi (durante i quali era interdetto l'accesso al Personale, come nella fase di congelamento) per ridurre il più possibile l'aumento della temperatura della roccia.

Il congelamento

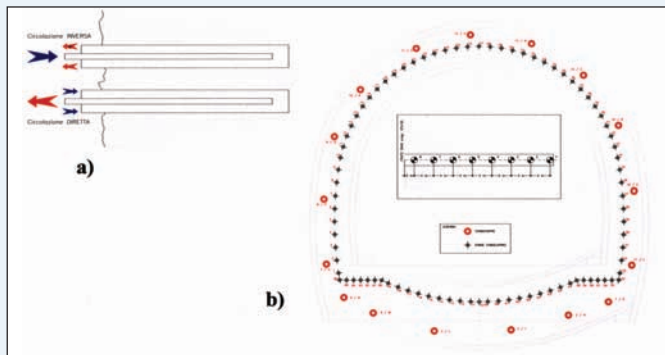
L'inizio della fase di congelamento vera e propria, quindi quella comprendente l'immissione di azoto liquido, è stato preceduto da un pompaggio preliminare di azoto già gassificato, quindi a una temperatura molto più alta al fine di testare il circuito e di scongiurare l'eventuale presenza di umidità all'interno delle tubazioni, potenziale fonte di problemi a contatto con l'azoto liquido. La fase di flusso dell'azoto liquido, fino al raggiungimento della temperatura di circa -196°C , ha avuto durate medie di circa otto/nove giorni in relazione ai campi di trattamento.

Durante la fase di immissione due volte al giorno sono state rilevate le temperature dell'ammasso in modo da monitorare l'andamento del fronte congelato.

Si è infatti ritenuto utile prendere, come riferimento, la distanza dal fronte di scavo della porzione di roccia con una temperatura sotto allo zero per valutare la quantità di ammasso congelato. La raccolta delle temperature è stata eseguita considerando i valori dei singoli punti di misura graficati raggruppandoli per linee di immissione.

Il mantenimento e lo scavo

Lo scavo della galleria è stato eseguito con sfondi di 1 m e la posa immediata di centine HEB 200 con passo di 1 m per i primi 15 m e HEB 240 con passo 0,75 m per i restanti 15 m di avanzamento; il passo più fitto della centinatura è stato previsto in corrispondenza delle zone che sarebbero rimaste più a lungo esposte senza il presidio dei rivestimenti definitivi, quelli che avrebbero costituito la camera di lavoro per il campo successivo. Durante la fase di scavo l'andamento delle temperature ha fatto registrare un aumento costante e, come prevedibile, più veloce nelle zone già scavate. Infatti si sono registrati aumenti maggiori della temperatura mano a mano che lo scavo procedeva lasciando scoperte le sonde congelatrici e facendo diminuire lo spessore di roccia congelata in prossimità delle termocoppie che venivano così a contatto con l'aria più calda immessa dalla ventilazione.



La disposizione delle sonde congelatrici (in nero) e di quelle termometriche (in rosso) intorno alla galleria e lo schema di flusso di circolazione diretto e inverso dell'azoto nella sonda



Il fronte della canna di monte durante lo scavo sotto mantenimento

A differenza del primo campo congelato eseguito in canna di monte lato, nel caso della canna di valle è stato creato un anello chiuso al contorno del profilo di scavo, sono state installate 86 sonde congelatrici e le linee di misura della temperatura sono passate da dieci (canna di monte) a 17.

In seguito alle osservazioni effettuate durante il primo campo di congelamento della canna di monte, per il congelamento della canna di valle è stato deciso di diversificare il flusso dell'azoto nelle diverse zone del fronte.



Il fronte della canna di valle durante il congelamento, situazione del fronte prima dell'inizio dello scavo



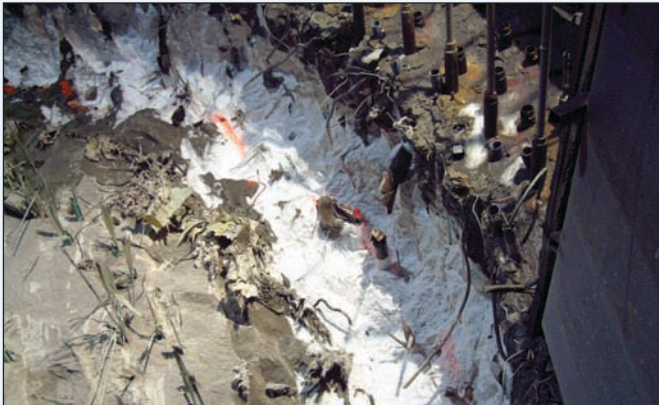
Il completamento degli interventi di consolidamento del tampone di fondo dal camerone di lavoro del primo campo congelato in canna di monte Aosta



Particolare della trincea realizzata per la messa in opera delle sonde congelatrici sotto l'arco rovescio



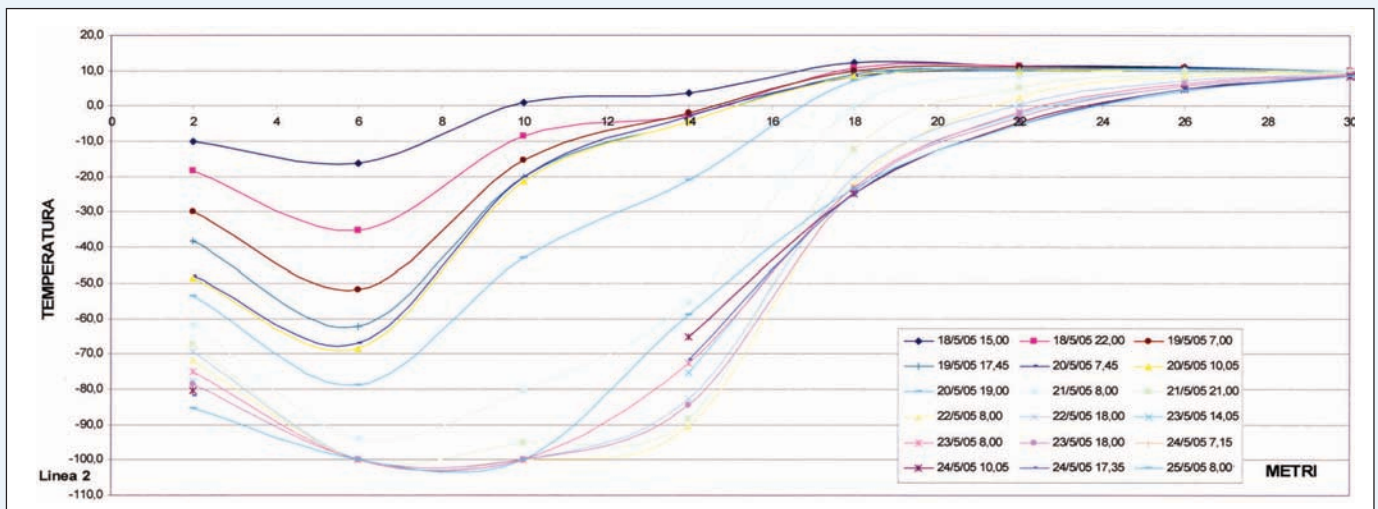
Il fronte della canna di monte durante il congelamento, situazione del fronte 24 ore circa prima dell'interruzione del flussaggio per consentire lo scavo



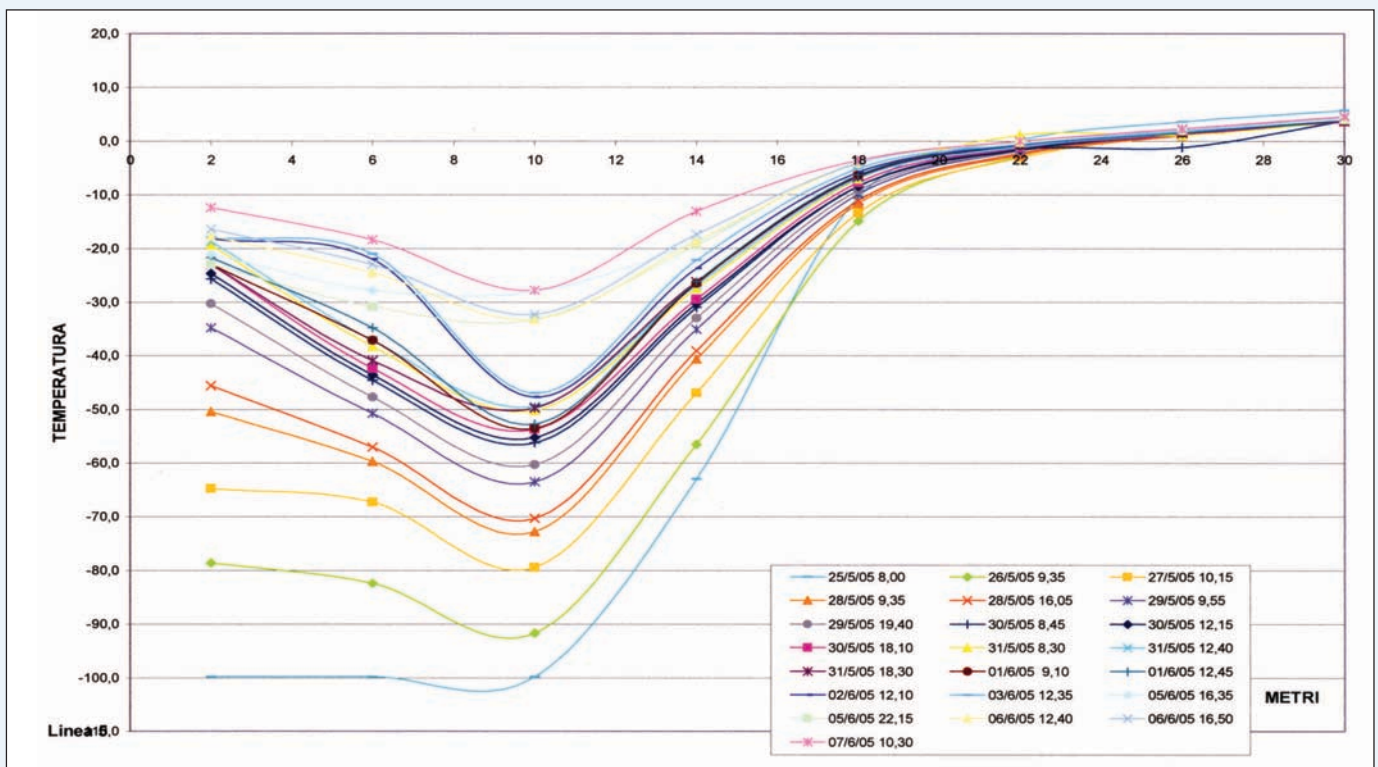
Un particolare dell'ammasso congelato in fase di scavo

Le sonde dalla 1 alla 6 (quelle situate sotto all'arco rovescio) sono state utilizzate con la circolazione inversa, in modo da far affluire a fondo foro il liquido alla minor temperatura possibile. In questo modo si è cercato di far raffreddare più rapidamente la parte prossima al tampone cementizio. I due grafici di seguito riportati illustrano l'andamento delle temperature misurate mediante la medesima sonda termometrica durante la fase di congelamento e durante quella di mantenimento.

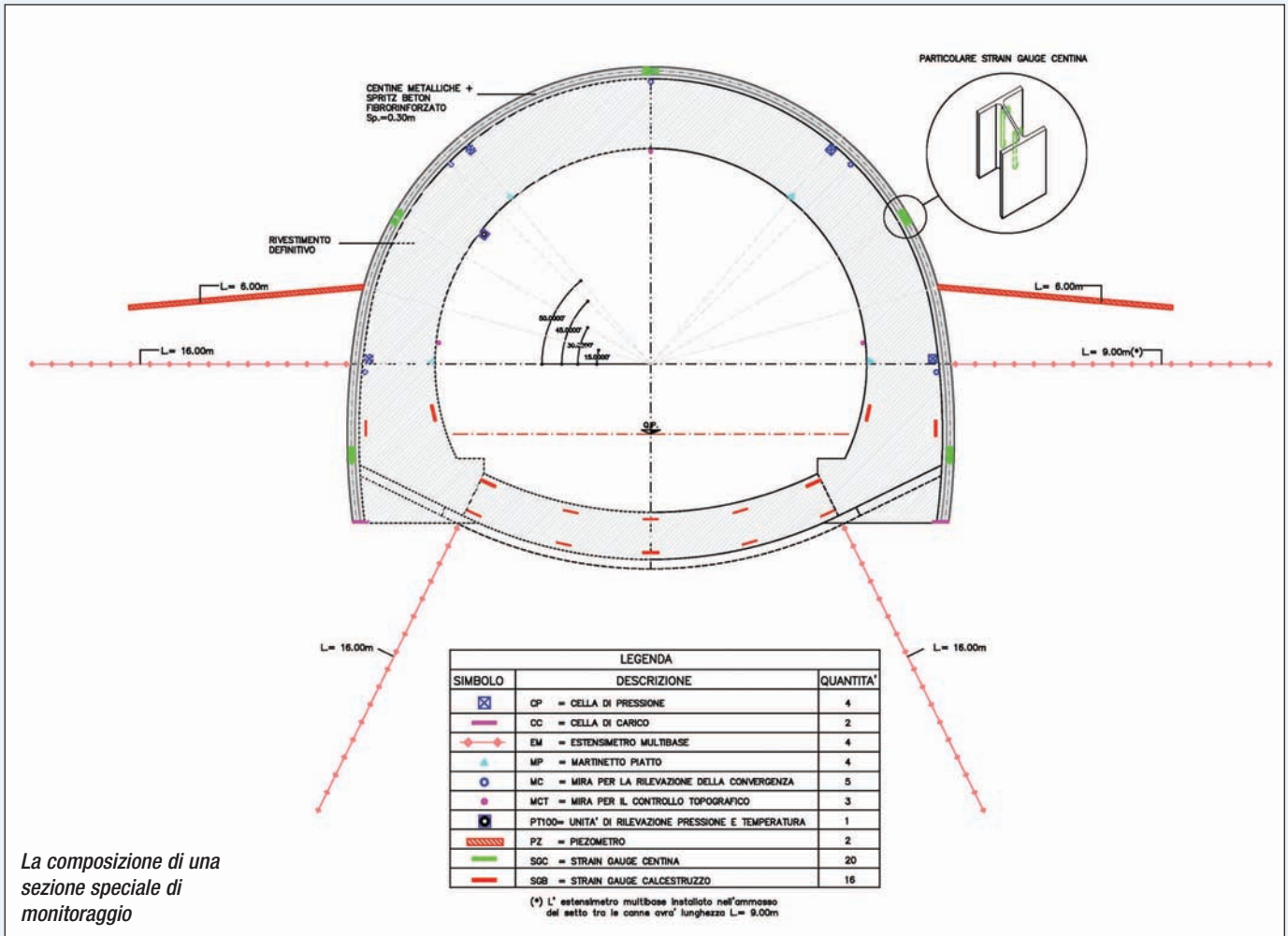
L'asse delle ascisse, sul quale è riportata la profondità delle termocoppie misurata a partire dal fronte, mostra come l'efficacia dell'azione congelante si sia sviluppata principalmente entro i primi 20 m. Tuttavia la deviazione delle perforazioni nel tratto terminale delle stesse, quindi la distanza reciproca tra sonde termometriche e sonde congelatrici, ha inciso in maniera non trascurabile sulla misura di temperatura rilevata, come osservato nei metri terminali di ciascun campo scavato.



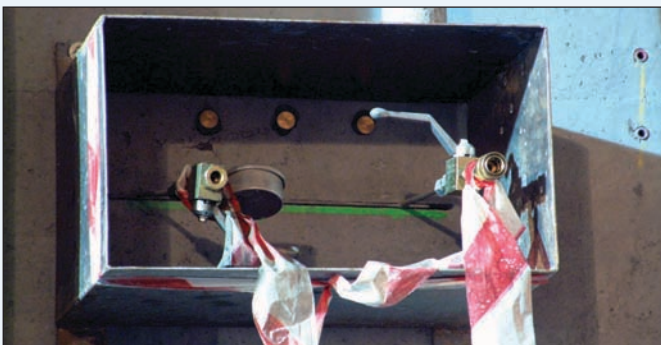
Il grafico dell'andamento delle temperature nella fase di congelamento



Il grafico dell'andamento delle temperature nella fase di scavo sotto mantenimento



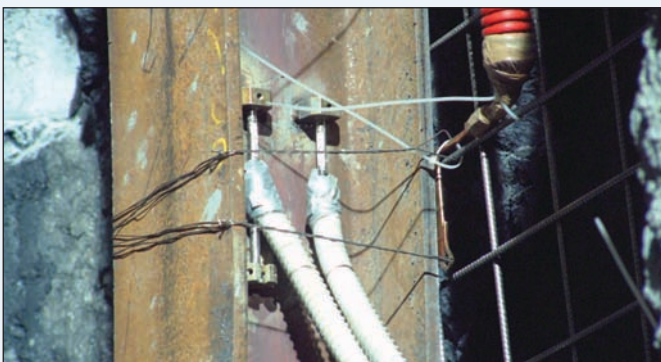
La composizione di una sezione speciale di monitoraggio



Le misure di martinetto piatto reiterabili sul rivestimento definitivo



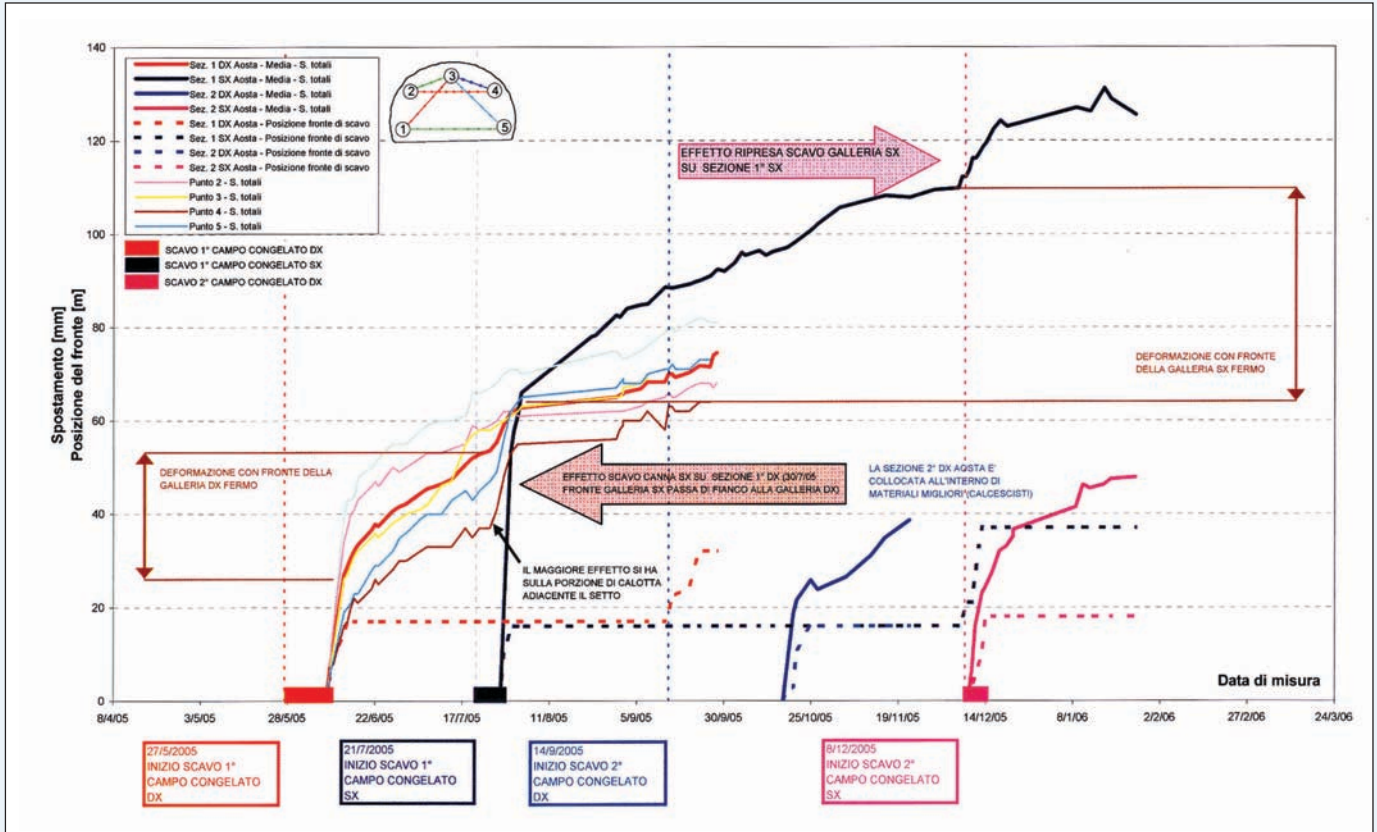
Lo strain gauge da annegare nel calcestruzzo



Gli strain gauges fissati sulle centine



La cella di pressione fissata all'estradosso della centina



L'interpretazione dei dati del monitoraggio delle misure di convergenza. Analisi delle sezioni speciali di monitoraggio



L'imbocco della canna di valle lato Aosta pochi giorni prima dell'entrata in esercizio della galleria



Il monitoraggio delle tratte congelate

L'attraversamento delle tratte critiche mediante la tecnologia del congelamento è stato accompagnato da un'intensa azione di monitoraggio degli elementi più rappresentativi dell'interazione ammasso-struttura, finalizzata alla verifica delle ipotesi progettuali assunte oltre che al controllo dell'efficacia dei metodi di consolidamento predisposti.

Le sezioni speciali di monitoraggio installate circa a metà dello sviluppo di ciascuna tratta erano costituite come schematicamente riportato nella Figura a pag. xx.

Il monitoraggio eseguito ha permesso di seguire in tempo reale l'evoluzione dei fenomeni deformativi, comprenderne le cause e verificare l'adeguatezza delle soluzioni progettuali adottate. Tali soluzioni, frutto dell'attenzione continuamente rivolta verso gli effetti che la realizzazione del progetto ha indotto sulle condizioni naturali in cui si è intervenuto, si sono mostrate in fine risolutive rispetto all'obiettivo del completamento dell'opera.

Conclusioni

La costruzione di una galleria è, per definizione, un'azione nella quale la teoria del progetto trova compimento tanto maggiore quanto più il modello geotecnico-geomeccanico sviluppato è aderente alla realtà delle condizioni naturali che si incontrano durante lo scavo. I fenomeni naturali osservati durante gli scavi della Dolonne, pur se genericamente pre-conizzabili nella fase di progettazione, non potevano a ragion veduta essere previsti nella dimensione in cui si sono manifestati.

Appare quindi evidente come, operando nell'ambito di un approccio quale l'ADECO-RS - per il quale la fase conoscitiva ha dignità speciale rispetto ai successivi stadi della progettazione - non sia possibile pensare al momento costruttivo semplicemente come a quello della messa in opera di un progetto definito, ma sia necessario rendere attiva, attraverso l'opera di soggetti intrinsecamente partecipi al progetto, la comprensione dei fenomeni naturali in risposta alle azioni artificiali e la finalizzazione di queste ultime rispetto agli obiettivi dell'opera (fase di verifica e messa a punto del progetto in corso d'opera). In altre parole, si ritiene indispensabile rendere attiva la progettazio-

ne fino all'ultimo giorno di lavoro mediante una forma di interazione tra Committenza e Impresa che solo una responsabile forma di assistenza tecnica in corso d'opera può svolgere anche a garanzia biunivoca dei rapporti con i soggetti citati.

Nel caso in oggetto, la costanza dell'impegno profuso nelle attività di monitoraggio e di assistenza tecnica in corso d'opera, favorita da relazioni con Committenza, Direzione Lavori e Impresa improntate sempre alla più leale e fattiva collaborazione, ha rappresentato un valore aggiunto al progetto e un modello di operatività concreto sulla cui possibilità di estensione ad altre opere occorrerebbe approfondire la riflessione in futuro. ■

Dati tecnici

Committente: RAV SpA di Roma

Direzione Lavori: SPEA Ingegneria Europea SpA di Milano

Progettazione esecutiva: SPEA Ingegneria Europea SpA di Milano

Consulenza alla progettazione esecutiva delle opere in sotterraneo: Rocksoil SpA di Milano

Progettazione degli interventi di congelamento: MaireEngineering di Torino

Monitoraggio in galleria: Rocksoil SpA di Milano

Assistenza tecnica in corso d'opera: Rocksoil SpA di Milano

Coordinamento per la sicurezza in corso d'opera: Ing. Sergio Ravet

* *Professore e Ingegnere*

** *Ingegnere e Responsabile di Commessa di Rocksoil SpA*

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare l'Ing. Giovanna Cassani, Direttore Tecnico di Rocksoil SpA, per l'imprescindibile azione di indirizzo e di coordinamento garantita durante tutto lo sviluppo e l'esecuzione del progetto. Ringraziano inoltre il Dott. Geol. Luca Bellardo e il Dott. Geol. Daniele Vair per la preziosa collaborazione prestata nella redazione dell'articolo.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. P. Antoine (1972) - Le domaine pennique externe entre Bourg Saint Maurice (Savoie) et la frontière italo-suisse (bilan des connaissances actuelles sur ce secteur de la zone des Brèche de Tarentaise). Géol. Appl., 48, 5-40.
- [2]. P. Baggio (1964) - Contributo alla conoscenza geologica del versante italiano del Monte Bianco. Atti 1st Ven. Sc. Lett. Art., 122,293-324.
- [3]. A. Balossi Restelli - Il congelamento del terreno può risolvere situazioni difficili di scavo sotto battente di falda. - Rivista italiana di geotecnica 3/95.
- [4]. A. Balossi Restelli - Il congelamento dei terreni quale ausilio nello scavo di gallerie in terreni difficili: situazione attuale e possibili sviluppi futuri, Supplemento al Bollettino dell'associazione mineraria Subalpina, A. XII, n° 1-2 - Quaderno n° 3 Giugno 1975.
- [5]. G. Cassani, L. Mancinelli - "The use of guide lines in tunnelling", Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress - Prague 2007 May, 5-10.
- [6]. G. Elter & P. Elter (1965) - Carta Geologica della regione del Piccolo San Bernardo (versante italiano). Mem. 1st Geol. Min. Univo Padova, 25, 53 pp.
- [7]. G. Elter (1960) - La zona pennidica dell'alta e media Valle D'Aosta e le unità limitrofe. Mem. 1st Geol. Min. Univo Padova, 22, 103 pp..
- [8]. P. Lunardi - Applications de la Mécanique des Roches aux Tunnels Autoroutiers. Exemple des tunnels du Fréjus (côté Italie) et du Gran Sasso - Conferenza all'I.T.B.T.P. - Parigi, 4 Ottobre 1979, Revue Française de Géotechnique n° 12 (1979).
- [9]. P. Lunardi - La galleria "Tartaiguille", ovvero l'applicazione dell'approccio ADECO-RS per la realizzazione di un tunnel "impossibile", Gallerie e grandi opere sotterranee, n° 58 anno 1999.
- [10]. P. Lunardi, A. Focaracci - Risk assessment in tunnel design - Atti del Congresso Internazionale su "Progress in Tunnelling after 2000", Milano, 10-13 Giugno 2001.
- [11]. P. Lunardi - "Progetto e costruzione di gallerie", Hoepli 2006.
- [12]. G.M. Zuppi (1984) - Sistemi idrici profondi, geotermali e freddi in Piemonte e Valle d'Aosta, Mem. Soc. eol. It., 29, 171-185.
- [13]. Servizio Geologico d'Italia (1959) - F. 28 "Aosta", Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000).
- [14]. Servizio Geologico d'Italia (1959) - F. 27 "Monte Bianco", Carta Geologica d'Italia (scala 1: 100.000).