

Un intervento pilota di consolidamento di gallerie in gesso allagate: l'esperienza di Santa Brigida (BG)

S. Bianchi*, G.M. Orlandi*, L. Rudelli**, M. Spada*

* *Studio associato di geologia Spada*

** *Studio di ingegneria Rudelli*

Sommario

Il capitolo si propone di illustrare gli studi, le analisi, le scelte progettuali e le modalità operative di cantiere attuate per la realizzazione di un intervento pilota di consolidamento di gallerie di gesso allagate nel Nord Italia, in Comune di Santa Brigida (BG).

L'attività estrattiva in sotterraneo, con la tecnica "camere e pilastri", si è conclusa da quasi 40 anni e due dei quattro livelli oggetto di escavazione presso la ex cava Carale sono attualmente allagati dall'acqua proveniente dalle rocce carbonatiche, in contatto con il giacimento evaporitico stesso.

L'azione di degrado e dissoluzione attuata dall'acqua sui gessi e sulle anidriti è in atto ed in continua accelerazione: ciò comporta un progressivo peggioramento delle condizioni di stabilità delle gallerie.

Lo scenario critico potenziale è quello di un futuro collasso dei pilastri, con conseguente spinta dell'acqua in pressione verso il sottostante abitato e relative conseguenze catastrofiche.

La scelta progettuale di intervento è stata quella di operare un riempimento delle cavità. Si tratta di una tecnica nota ed attuata da tempo per il consolidamento di miniere abbandonate. Nel caso specifico, per la delicatezza della situazione geologica ed idrogeologica e per il forte stato di degrado delle gallerie, tale di impedire un accesso diretto, è stata messa a punto una tecnica innovativa di consolidamento con iniezione di miscele cementizie fluide dall'esterno, in grado di sostituire l'acqua, per rallentare il degrado, e di consolidare nel tempo per sostenere le cavità stesse. Tale scelta ha comportato la progettazione di una miscela specifica, con caratteristiche tecniche molto precise ed entro stretti vincoli economici, nonché la messa a punto di un'impiantistica e di una metodologia di cantiere totalmente nuova per realizzare l'intervento.

Gli autori descrivono inizialmente il contesto geologico ed idrogeologico e lo stato attuale di degrado e di rischio, per arrivare, in fine, a dettagliare le scelte, le tecniche operative di cantiere ed i controlli attuati al fine di validare i lavori eseguiti.

Abstract

This chapter describes studies, analyses, plans and worksite operations of a pilot project to secure abandoned flooded gypsum and anhydrite mine in Northern Italy, in the town of Santa Brigida (BG).

Underground excavations, with the room and pillar system, were stopped about 40 years ago and two out of four levels in the Carale mine are currently flooded, the water seeping through the dolomitic rocks in contact with the evaporitic deposit.

The water erosion of gypsum and anhydrite is accelerating, affecting the tunnels' stability. The worst case scenario is the collapse of the pillars, which would push pressurized water towards residential areas, with catastrophic consequences.

The basic plan was to fill the flooded chambers, a known technique to secure abandoned mines.

However, the delicate geological and hydrological situation and the degraded condition of the tunnels, which did not allow direct access, required the implementation of an innovative approach. The technique consists of injecting a fluid cement mixture from the outside, to replace water, slow the degradation and provide structural support for the cavity. This required the design of a special mixture with precise technical characteristics, within tight budgetary constraints, and the establishment of a completely new plant and worksite operations to bring the project to completion. The authors describe the geological and hydrological context, the initial state of degradation of the levels of the mine and their risk assessment, followed by details on the strategy, operational decisions and quality control measures.

1. Introduzione

Nell'ultimo secolo in Italia ed in Europa vi è stata una progressiva chiusura delle attività minerarie esistenti, fenomeno legato principalmente a fattori di tipo economico come la convenienza ad importare materia prima a basso costo da paesi in via di sviluppo o la possibilità di recuperare materiali di scarto.

Le aree minerarie, nella maggior parte dei casi, sono state abbandonate senza alcun intervento di consolidamento e/o di messa in sicurezza e sono diventate, nel tempo, una potenziale fonte di rischio idrogeologico.

Le situazioni più critiche sono quelle in cui durante i lavori le miniere venivano tenute asciutte con il pompaggio delle acque in afflusso: dopo la dismissione tali acque sono state lasciate affluire liberamente nelle cavità stesse allagandole e dando il via ad una serie di fenomeni di degrado e dilavamento di vario genere.

Molti sono i casi noti e ben descritti nella letteratura scientifica, dalle miniere della Lorena (Francia) dove l'azione di colonie batteriche ha attaccato la siderite che cementava la roccia producendo crolli nei pilastri e gravi effetti in superficie con collasso di abitazioni e morti, fino ai fenomeni di dissoluzione chimico-fisica da parte delle acque su rocce evaporitiche, con collassi e crolli analoghi a quanto sopra indicato.

In tutti questi casi è fondamentale uno studio accurato dei fenomeni in atto sotto tutti i punti di vista (geologico, idrogeologico, geomeccanico, geochimico, ecc.) al fine di predisporre una corretta progettazione delle opere di consolidamento e di messa in sicurezza dei siti.

Si descrive qui, in maniera dettagliata, l'intervento pilota di consolidamento delle gallerie di gesso allagate in Santa Brigida (Val Brembana – Nord Italia), con particolare riferimento agli studi preliminari ed alle metodologie di intervento utilizzate.

La ex cava Carale è stata oggetto di attività estrattiva in sotterraneo, con la tecnica "camere e pilastri", per l'estrazione inizialmente di gesso e successivamente anche di anidride: l'estrazione si è conclusa da quasi 40 anni e due dei quattro livelli (i più profondi) oggetto di escavazione sono attualmente allagati.

L'azione di degrado e dissoluzione attuata dall'acqua sui gessi e sulle anidriti è in atto ed in continua accelerazione: ciò comporta un progressivo peggioramento delle condizioni di stabilità delle gallerie.

Le fasi iniziali del lavoro hanno previsto una serie di indagini e verifiche geologiche ed idrogeologiche.

Successivamente si è proceduto ad una intensa campagna sperimentale di laboratorio sulle caratteristiche del gesso e dell'anidrite, con particolare riferimento ai fenomeni di degrado: questa fase ha avuto lo scopo ultimo di mettere a punto un modello per stimare i tempi di collasso delle gallerie (Castellanza et al., 2008; Gerolymatou e Nova, 2008).

Al termine di tutte queste analisi è stata definita l'idea progettuale per il consolidamento: la scelta è stata quella di operare un riempimento delle cavità con iniezione di miscele cementizie fluide dall'esterno, in grado di sostituire l'acqua, per rallentare il degrado, e di consolidare nel tempo per sostenere le cavità stesse.

Tale scelta, che non presentava alternative di sorta, è stata operata sulla base degli elementi disponibili, tra cui: impossibilità di accedere direttamente ai livelli allagati, impossibilità di intercettare e/o drenare le acque in afflusso nelle gallerie e particolare delicatezza e complessità del quadro geologico e del regime di circolazione delle acque sotterranee.

L'intervento di consolidamento prospettato si presentava unico nel suo genere: in letteratura l'unico caso comparabile, di cui siamo venuti a conoscenza solo successivamente, anche se differente sia per il contesto geologico che per alcuni aspetti operativi, era quello del riempimento di alcune miniere di lignite in Giappone (Sakamoto et al. 2005).

È stato quindi necessario procedere alla progettazione di una miscela specifica, con caratteristiche tecniche molto precise ed entro stretti vincoli economici, nonché alla messa a punto di un'impiantistica e di una metodologia di cantiere totalmente nuova per realizzare l'intervento.

La messa a punto della miscela è stata curata dal Politecnico di Milano – Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica con un'ampia campagna di prove di laboratorio, di cui si relaziona al Capitolo 3.2 di questo volume.

Il passo finale è stato quello di trasporre le esperienze di laboratorio alla scala del cantiere, realizzando un'impiantistica che fosse in grado di riprodurre una miscela con le stesse caratteristiche di quelle studiate e che consentisse una gestione operativa ed economica corretta del cantiere.

Dovevano inoltre essere attuate tutta una serie di controlli e di monitoraggi, sia sulla qualità delle miscele, che sui fattori ambientali, per verificare e validare le opere in atto.

Proprio queste fasi operative hanno rappresentato per gli Autori, quali Progettisti e

Direttori Lavori delle opere, la sfida di maggiore complessità ed è su questi aspetti che si concentra principalmente il presente capitolo.

2. Le miniere di gesso abbandonate ed allagate di Santa Brigida: il caso della “ex Cava Carale”

2.1. Quadro generale e problematiche in essere

Il territorio di Santa Brigida è stato interessato, a partire dagli ultimi anni del 1800 fino agli anni '70, da una intensa attività estrattiva, inizialmente di gesso e successivamente anche di anidrite.

L'attività si è concentrata in tre poli estrattivi, localizzati nelle immediate vicinanze del centro abitato: Bolferino-Grassello, Cornello e Carale.

L'escavazione avveniva inizialmente all'aperto e poi passava in galleria; la tecnica adottata per l'escavazione in sotterraneo era del tipo camere e pilastri.

I livelli erano fino a 5 e raggiungevano profondità di oltre 40-50 m dal p.c.

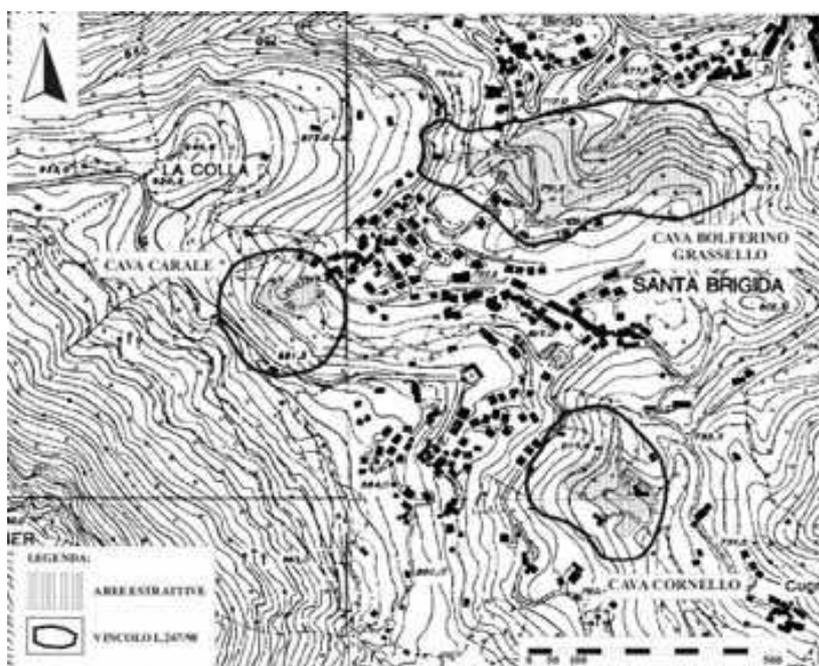


Fig. 1: Ubicazione delle aree estrattive abbandonate in Comune di Santa Brigida e perimetrazione delle fasce di rischio idrogeologico ai sensi della L. 267/98.

Fig. 1: Location of the abandoned mines in Santa Brigida and delimitation of the zones subject of hydrogeological risk, according to L. 267/98.

Le gallerie avevano notevoli dimensioni (indicativamente 6 m x 6 m) ed erano sostenute da pilastri di dimensioni analoghe, per poter permettere la circolazione dei mezzi d'opera in fase di estrazione del materiale.

L'attività, in fase esecutiva, ha creato centinaia di migliaia di metri cubi di vuoti estrattivi.

Attualmente tutte e tre le zone sono perimetrare come aree a grave rischio idrogeologico ai sensi della L. 267/98 (legge "Sarno") per un totale di 25 ettari di territorio vincolati.

Data la particolare natura geologica del territorio comunale, con presenza di gessi ed anidriti nel sottosuolo e potenti depositi argillosi di alterazione in superficie, è facile immaginare come tali estrazioni abbiano provocato sia una notevole serie di vuoti sotterranei nei pressi del centro abitato che una rilevante alterazione del regime idrogeologico.

In alcune situazioni l'attività estrattiva in sottosuolo ha rotto la zona di contatto impermeabile tra le rocce carbonatiche ed il giacimento evaporitico: le acque che uscivano a giorno con sorgenti o che avevano altri punti di recapito, sono state drenate all'interno del giacimento stesso. Questa situazione ha accelerato i fenomeni di alterazione e dissoluzione, in precedenza limitati.

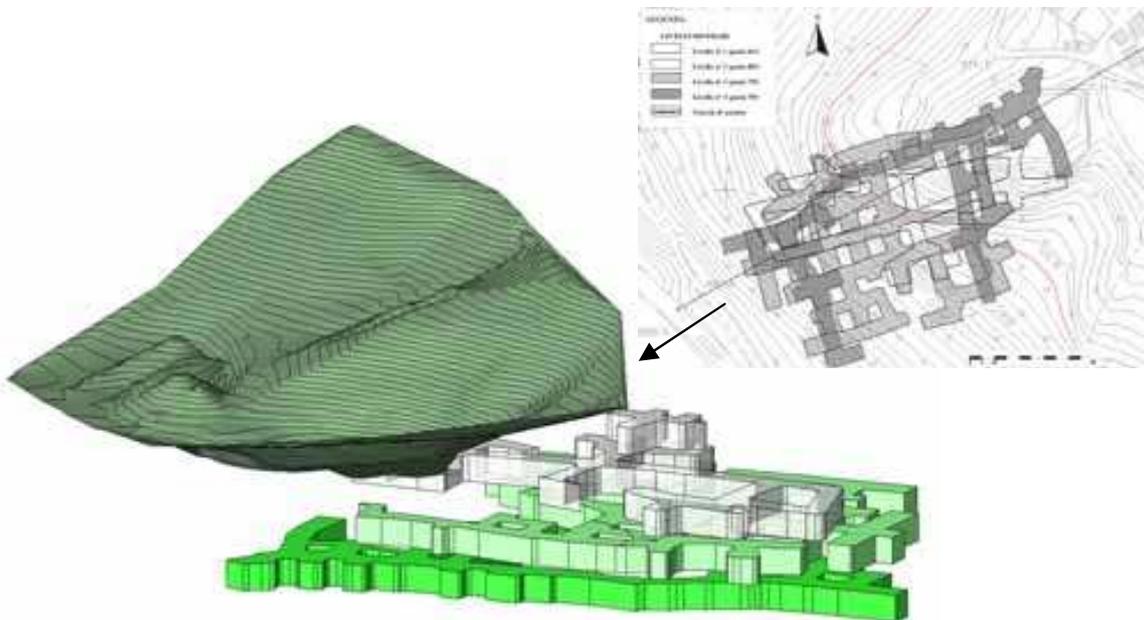


Fig. 2: Planimetria e vista prospettica 3D Cava Carale. La vista 3D evidenzia in grigio i livelli 3-4 completamente allagati.

Fig. 2: Planimetry and 3D rendering of Cava Carale. The 3D rendering shows in dark grey levels 3 - 4 completely flooded.

La situazione a maggior rischio è quella della ex Cava Carale, per la presenza dell'abitato omonimo immediatamente a valle e della strada provinciale ubicata a monte. In questo cantiere l'estrazione è avvenuta su quattro livelli, di cui tre al di sotto della superficie di falda, per cui l'acqua veniva pompata fuori durante i lavori. Il cantiere è stato chiuso nel 1972 e la situazione si è aggravata nel tempo, dato che due livelli sono ancora completamente allagati, ed il volume di vuoti, riempiti dall'acqua, è dell'ordine di 60.000-70.000 m³.

Il versante soprastante presenta fenomeni di sprofondamento, oltre una serie di frane per il rilascio tensionale dei terreni di copertura.

L'aspetto più preoccupante è che l'acqua continua a circolare nel sottosuolo, con i conseguenti fenomeni di degrado delle rocce evaporitiche, con un peggioramento ed un aggravamento dei rischi nel tempo.

2.2. Contesto geologico ed idrogeologico

Il territorio di Santa Brigida, nella zona della cava Carale, ha una natura geologica ed una struttura idrogeologica estremamente delicata: il sottosuolo è costituito da un giacimento evaporitico composto da gessi ed anidriti, in contatto tettonico con rocce carbonatiche.

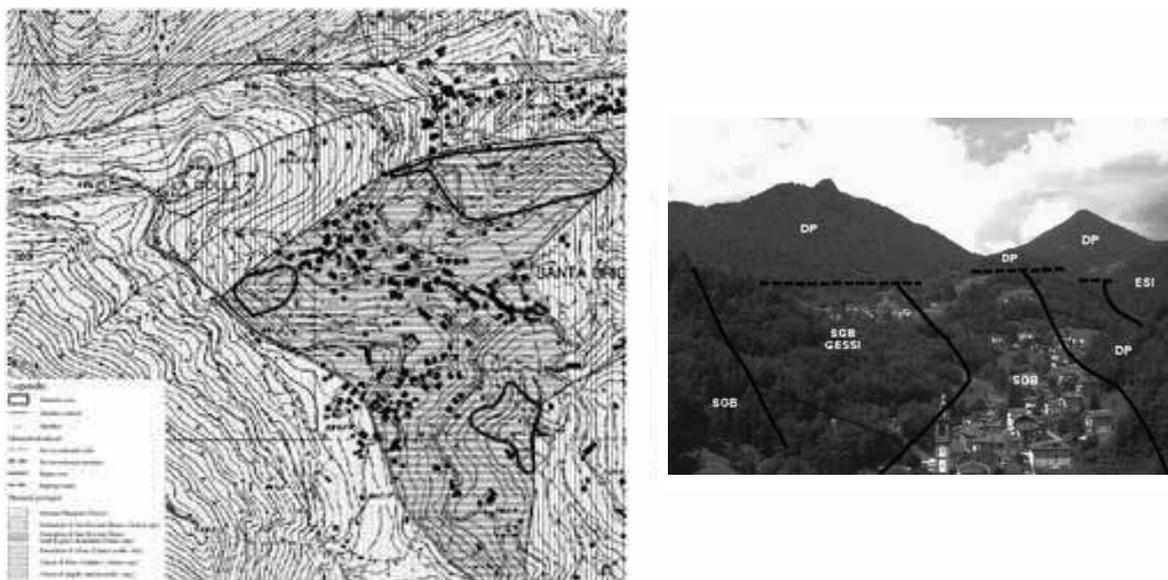


Fig. 3: Carta geologica schematica dell'intorno della ex Cava Carale e vista panoramica, presa da est verso ovest, con indicazione dei principali contatti geologici.

Fig. 3: Geological sketch map of the surroundings of Cava Carale and panoramic view, from east to west, showing the main geological structures.

I gessi e le anidriti appartengono alla “Formazione di San Giovanni Bianco” (Carnico Superiore).

Si tratta di una formazione caratterizzata da una notevole eterogeneità litologica: il membro inferiore è prevalentemente terrigeno (siltiti ed arenarie) mentre quello superiore è carbonatico-pelitico-evaporitico (dolomie, carniole, gessi ed anidriti).

La Formazione di San Giovanni Bianco si è deposta in un ambiente da costiero a marino transizionale, a sedimentazione mista carbonatico terrigena, al cui margine sud arrivavano i sedimenti di un apparato fluviale.

Tale ambiente passa, superiormente, ad ambienti di sabka, con sedimentazione mista e deposizione delle evaporiti.

I gessi generalmente non affiorano direttamente, perché sono ricoperti da potenti depositi limoso-argillosi-sabbiosi di alterazione: sono osservabili molti affioramenti nei pressi delle aree di cava, dove l’attività estrattiva li ha messi a giorno.

La struttura dei giacimenti, come emerge dai rilievi e dai dati dei sondaggi disponibili, è classica: le porzioni esterne sono costituite da gesso, mentre le porzioni interne sono di anidrite.

La giacitura della roccia, nella zona della cava Carale, è mediamente sub verticale, con direzione nord-est sud-ovest.

Le evaporiti sono ricoperte da depositi più potenti, anche oltre 20 metri nelle zone in cui sono soggette ad alterazione per lo scorrimento delle acque: gli stessi hanno natura limoso-sabbiosa-argillosa, con frequente presenza di trovanti di varia natura: frammenti di gesso, dolomie vacuolari, carniole e breccie calcaree.

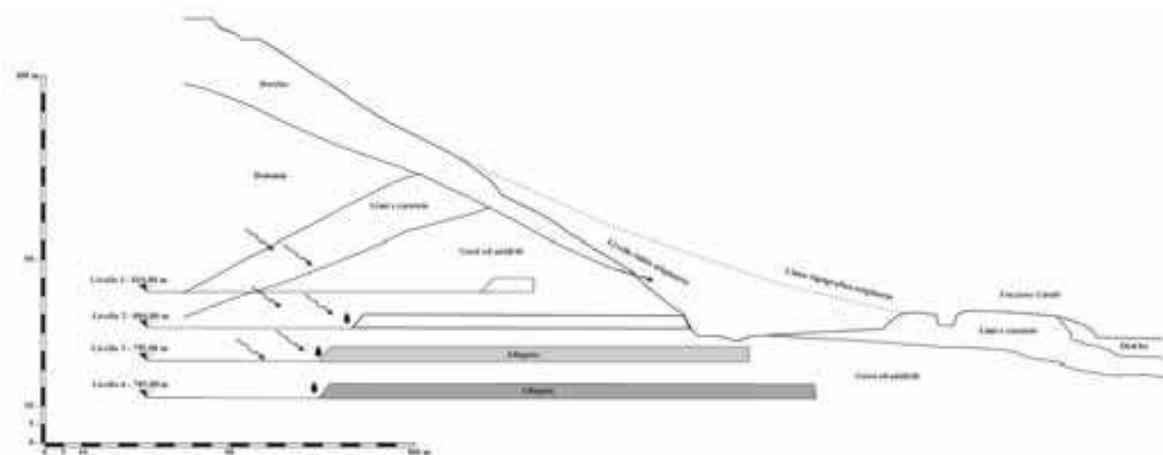


Fig. 4: Sezione geologica schematica SW-NE attraverso la ex Cava Carale con indicazione dei livelli minerari allagati.

Fig. 4 : SW-NE geological profile of Cava Carale, showing the flooded levels.

Al di sopra della Formazione di San Giovanni Bianco affiora, per contatto tettonico sia verso nord che verso ovest, la formazione della Dolomia Principale .

Si tratta di dolomie da grigio chiare a grigio scure, in banchi da metrici a decametrici, con stratificazione amalgamata, con dispersi livelli stromatolitici, accumuli di alghe e fossili; localmente si ritrovano anche breccie tettono-sedimentarie.

La cava Carale si colloca in una posizione molto particolare dal punto di vista idrogeologico: la stessa è posizionata nelle vicinanze del contatto tettonico ed è ubicata nei pressi della falda di base del massiccio del monte Disner.

La posizione non è per nulla casuale ma è stata scelta ai tempi dell'escavazione: nei primi anni in cui la cava era attiva il materiale commerciale era il gesso, mentre l'anidrite rappresentava lo scarto e solo successivamente è stata utilizzata a livello industriale.

Nello specifico la dolomia del Monte Disner costituisce la zona di alimentazione della falda di base, falda che si accumulava al contatto con le rocce evaporitiche che costituivano l'acquifero del sistema.

Si tratta di una falda di notevolissime potenzialità che prima dell'attività estrattiva alimentava alcune sorgenti continue nella zona, a monte del piazzale di cava.

Con l'attività estrattiva il livello di contatto è stato in parte rotto e/o alterato ed ha facilitato il drenaggio dell'acqua, acqua che circola nelle gallerie.

3. Ipotesi di intervento di consolidamento

3.1. Sintesi delle problematiche esistenti

L'attività estrattiva in sotterraneo nella zona della ex Cava Carale, nel contesto geologico ed idrogeologico descritto, ed il suo successivo abbandono senza alcun intervento di salvaguardia ambientale ha generato una situazione di grave rischio idrogeologico, i cui principali elementi sono:

- Fenomeni di dissesto, franamenti e sprofondamenti sul versante;
- Presenza di una serie di vuoti sotterranei nei pressi del centro abitato di Monticello-Carale;
- Alterazione del regime idrogeologico sotterraneo.

Proprio questo ultimo aspetto è quello di maggiore attenzione per le possibili conseguenze future. Il livello di contatto tra dolomie e gessi è stato rotto e/o fortemente ridotto, consentendo il continuo passaggio dell'acqua nei gessi. Il fenomeno è in accentuazione con il tempo. L'azione dell'acqua nelle gallerie accelera i fenomeni di degrado, di dissoluzione e di crollo, con particolare riferimento ai pilastri di gesso ed anidrite.

Lo scenario critico potenziale è quello di un collasso progressivo dei pilastri delle gallerie, con conseguente spinta in pressione dell'acqua verso l'abitato a valle, con potenziali conseguenze catastrofiche.

3.2. Elaborazione dell'ipotesi di intervento

L'idea progettuale doveva considerare, oltre alle problematiche ed agli aspetti precedentemente descritti, anche una serie di vincoli a carattere tecnico-operativo, quali:

- impossibilità tecnica di accedere nei livelli inferiori allagati per un'analisi dettagliata delle condizioni;
- impossibilità di operare sui livelli predetti per lo stato dei luoghi;
- impossibilità, allo stato attuale, di drenare dal basso le acque presenti nelle gallerie allagate;
- impossibilità reale di intercettare le acque in afflusso da monte (per es. con dreni suborizzontali) per l'elevatissima fatturazione della dolomia e l'imprevedibilità della circolazione carsica.

Il concetto finale elaborato dell'intervento di consolidamento è semplice: operare il riempimento delle gallerie dalla superficie, con l'iniezione di miscele fluide in grado di sostituire l'acqua, rallentare i fenomeni di degrado e consolidare nel tempo per fornire un sostegno alle cavità in caso di crollo.

Se l'idea concettuale è semplice e fa riferimento alla consolidata esperienza di ritombamento dei vuoti estrattivi, la specificità del contesto e le necessità operative rendono l'intervento unico nel suo genere.

Il problema principale che si è posto è stato chiaramente quello della scelta della miscela da iniettare, miscela che doveva essere:

- iniettabile dalla superficie attraverso fori a piccolo diametro;
- fluida per muoversi il più possibile nelle cavità;
- omogenea e compatta a sufficienza per poter sostituire l'acqua;
- in grado di consolidare nel tempo, per poter sostenere le volte e ridurre i cedimenti del suolo in caso di crollo;
- a basso costo per consentire la gestione economica delle opere, visti i rilevanti volumi di vuoti da ritombare.

Tra i materiali di normale utilizzo non esisteva nulla in grado di soddisfare tutti i requisiti, per cui è stato necessario progettare una miscela appositamente per il presente intervento.

A tale scopo sono state attivate alcune convenzioni di studio con il Politecnico di Milano e precisamente:

1 - Dipartimento di Ingegneria Strutturale.

Scopo: effettuare la caratterizzazione meccanica di gessi ed anidridi, con particolare attenzione ai fenomeni di alterazione e degrado, eseguire una stima dei tempi di collasso e fornire indicazioni sulle caratteristiche di rigidità e permeabilità della miscela da iniettare.

2 - Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica.

Scopo: mettere a punto la miscela, che rispettasse tutti i vincoli di cui sopra, da utilizzare per il riempimento delle gallerie.

Il riscontro finale dei lavori è stato duplice: da un lato la messa a punto di un modello concettuale per i rischi di degrado e per valutare l'effetto del riempimento e dell'altro la messa a punto di una miscela adeguata e di una procedura, di laboratorio, per la realizzazione della stessa (per maggiori dettagli sugli studi è possibile fare riferimento ai Capitoli 2.2, 3.1 e 3.2 del presente volume).

4. Intervento pilota di consolidamento della ex cava Carale

Il passo finale e forse più complesso è stato quello di trasporre le esperienze di laboratorio alla scala del cantiere, realizzando un'impiantistica che fosse in grado di riprodurre una miscela con le stesse caratteristiche di quelle studiate e che consentisse una gestione operativa ed economica corretta del cantiere.



Fig. 5: a) prove di iniettabilità in laboratorio b) test in scala in cantiere c) impianto definitivo di iniezione.

Fig. 5: a) laboratory injection tests b) small scale prototype c) final injection plant.

Le problematiche nel passaggio di scala del lavoro sono state moltissime e principalmente:

- scarsa conoscenza delle reali geometrie delle cavità da riempire e delle condizioni delle stesse;

- assenza di esperienze precedenti per interventi analoghi, in contesti geologici ed idrogeologici delicati e complessi;
- mancanza di un impianto di cantiere per la lavorazione e la realizzazione delle miscele in base alle caratteristiche analizzate in laboratorio.

Il lavoro si è sviluppato per gradi e passaggi successivi.

Sono stati eseguiti sempre dei controlli e delle verifiche in avanzamento, al fine di avere sempre la situazione monitorata ed apportare le modifiche migliorative necessarie.

Nello specifico la successione dei lavori è stata la seguente:

1. indagini e verifiche preliminari;
2. opere preparatorie;
3. predisposizione impianto di cantiere e relative verifiche;
4. fase operativa di iniezione delle miscele cementizie fluide;
5. controlli e monitoraggi durante i lavori;
6. verifiche finali e validazione.

4.1. Indagini e verifiche preliminari

Il problema principale che si è posto prima dell'inizio dei lavori è stato quello della definizione della reale geometria delle cavità in sottoterraneo, per poter programmare in maniera corretta il cantiere, con particolare riferimento alla distribuzione dei fori di iniezione.

I dati disponibili consistevano in una serie di mappe fornite dalla ditta che aveva eseguito i lavori di escavazione, ma si poneva la necessità di verificare tali mappe, per valutarne l'affidabilità.

Era molto importante valutare anche le condizioni generali delle cavità allagate e l'assetto idrogeologico attuale della zona.

A tale scopo è stato impostato un ampio programma di indagini e verifiche che ha compreso:

- monitoraggio topografico continuo della zona di intervento e di un suo significativo intorno;
- raccolta, verifica ed analisi di tutti i documenti disponibili;
- rilievi geologici ed idrogeologici dell'area e del suo intorno;
- esplorazioni dirette visive nel livello superficiale asciutto;
- realizzazione di sondaggi geognostici a campione;
- esplorazione con telecamera mobile ad immersione;
- prove con traccianti;

- campionamenti ed analisi chimiche della acque;
- pompaggi per asciugare parzialmente i livelli allagati e successiva ispezione diretta (nel limite di quanto possibile e delle condizioni di sicurezza dei luoghi);
- indagini geofisiche, con il metodo della tomografia elettrica di superficie;
- verifiche e triangolazioni topografiche di dettaglio.

Le diverse indagini hanno fornito risultati molto interessanti.

Le stesse hanno consentito di verificare la buona affidabilità delle mappe, in relazione alla distribuzione spaziale delle cavità ed hanno fornito indicazioni molto interessanti sullo stato di degrado delle gallerie e sulle condizioni idrogeologiche dell'intorno.

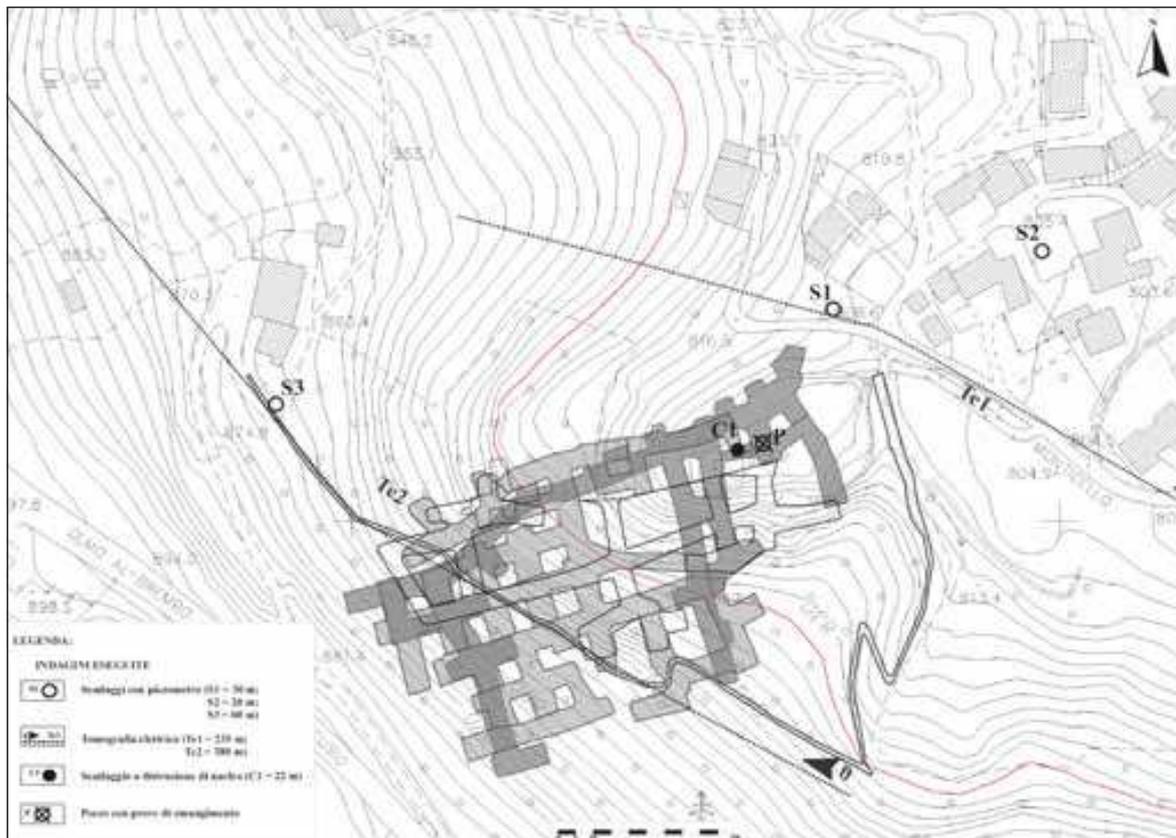


Fig. 6: Planimetria dei livelli minerari con ubicazione delle indagini e delle verifiche eseguite.

Fig. 6: Plan view of the mine levels, with the location of test sites.

I principali elementi emersi sono stati i seguenti:

- sul fondo delle cavità sono stati rinvenuti fino a 5 metri di fanghi derivanti dal degrado dei gessi e depositati successivamente alla dismissione delle gallerie;
- l'afflusso di acqua nelle gallerie è valutabile in 3-4 litri/sec. (in base allo scarico), ma in fase di pioggia intensa è stato stimato, sulla base dei pompaggi e della distribuzione degli abbassamenti nel tempo, un afflusso di acqua di oltre 250-300 litri/secondo;
- le acque che si infiltrano nelle gallerie dalle soprastanti rocce carbonatiche hanno in ingresso un modesto contenuto di solfati, mentre all'uscita sono al limite della saturazione.

Parametro	Acque in entrata nelle gallerie	Acque in uscita dalle gallerie
Residuo fisso a 180 ° (mg/l)	2600	2580
PH	6.65	6.92
Conducibilità elettrica (µS/cm)	1492	2050
Durezza totale (gradi francesi)	109	159
<i>Solfati (come SO4 – mg/l)</i>	<i>967</i>	<i>1590</i>

Tutte queste valutazioni confermano la progressiva evoluzione dei fenomeni dissolutivi, con un aumento degli afflussi nel tempo, legato al potenziamento delle vie di deflusso, ed il progressivo aggravamento delle condizioni di rischio.

L'altro aspetto emerso è quello della fondamentale importanza, durante i lavori, del controllo e del monitoraggio costante dell'assetto idrogeologico.

4.2. Realizzazione delle opere preparatorie

La fase successiva è stata la preparazione delle aree di cantiere e la realizzazione dei fori attraverso cui procedere all'iniezione delle miscele di consolidamento.

Poiché l'intervento aveva carattere sperimentale e non vi erano esperienze precedenti, con miscele analoghe e condizioni al contorno paragonabili, è stato necessario strutturare il cantiere come un "campo prove".

L'area doveva consentire sia il lavoro di iniezione vero e proprio che la realizzazione di una serie di controlli sulle miscele, sulla distribuzione nel tempo e sull'addensamento delle stesse, per consentire di ottimizzare sia i lavori in corso d'opera che le scelte operative per il futuro.

Per operare è stata scelta la zona del vecchio piazzale di cava, in cui era possibile avere spazi adeguati per il cantiere e soprattutto realizzare un congruo numero di fori, con costi e rischi contenuti.

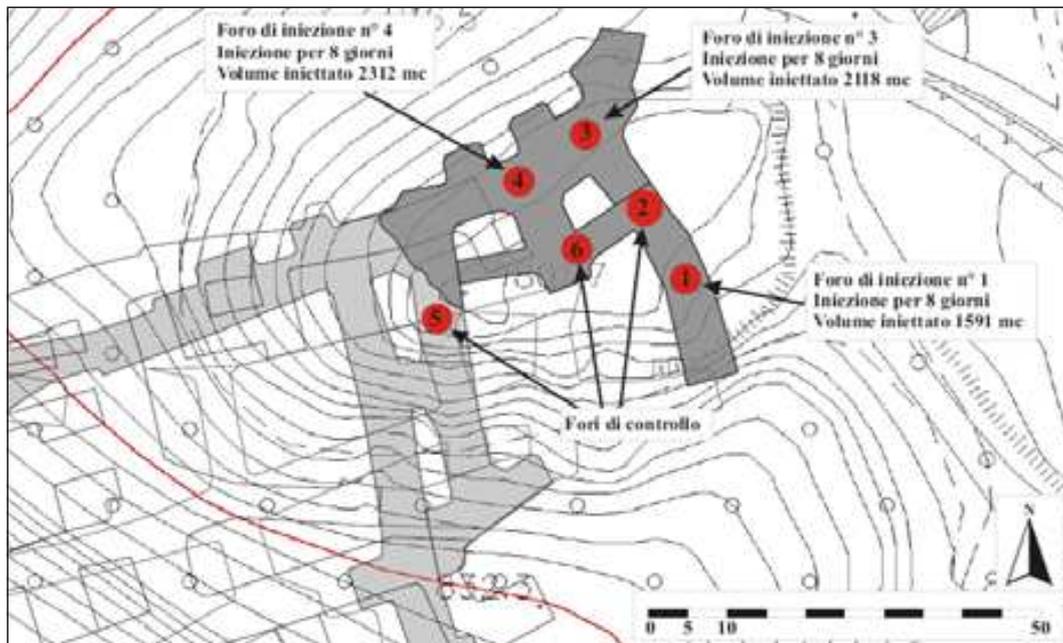


Fig. 7: Maglia di distribuzione dei fori di iniezione e di controllo

Fig. 7: Injection and test hole mesh.

Sono stati realizzati alcuni fori con una maglia sufficientemente regolare, con una distanza media di circa 10 metri: alcuni fori sono stati utilizzati per l'iniezione e gli altri per poter controllare il raggio di influenza dell'iniezione stessa e per poter eseguire verifiche empiriche sull'addensamento della miscela nel tempo.

La miniera è strutturata su 4 livelli sovrapposti, per cui si è deciso di iniziare le iniezioni dal livello inferiore, per non correre il rischio di caricare in modo anomalo i pilastri.

La profondità del 4 livello è circa tra i 18 ed i 25 metri dal p.c. nella zona del piazzale; tale profondità aumenta in modo progressivo spostandosi verso monte e giunge fino ad oltre 100 metri.

Da qui la scelta di operare, per questo primo lotto pilota, dato l'elevato grado di rischio dello stesso, nella zona più accessibile che permetteva di gestire il cantiere in modo ottimale e che consentiva, inoltre, di creare una barriera protettiva verso il sottostante abitato.

Le caratteristiche dei fori realizzati per le iniezioni sono le seguenti:

Insieme alla realizzazione dei fori di iniezione sono state eseguite le altre opere:

- reti di raccolta e smaltimento delle acque,
- dreni suborizzontali per intercettare le acque in afflusso da monte nella gallerie,
- piezometri e capisaldi topografici per i controlli durante i lavori.

Tipo di perforazione	A distruzione con martello a fondo foro
Diametro perforazione	260 mm
Profondità perforazioni	da 20.50 a 27 metri, in base alla profondità della platea, con attraversamento completo delle cavità
Diametro rivestimento	219 mm
Tubo di rivestimento	PEAD PN 10 saldati e calati in opera
Tubi di iniezione	Tubi in acciaio – diametro esterno 100 mm, con manicotti di giunzione diametro 150 mm

4.3. Impianto di cantiere e prove di validazione

La predisposizione dell'impianto di cantiere per la produzione e l'iniezione delle miscele di consolidamento è stata complessa, perché la miscela è stata definita e progettata appositamente per il presente intervento e quindi non esistevano procedure ed impianti preconfezionati per la lavorazione specifica.

Le prove di laboratorio avevano individuato le fasi e le procedure di lavorazione, ma il problema principale era di rapportarle alla scala del cantiere, al fine di garantire sia i risultati in termini tecnici (fluidità, omogeneità e caratteristiche meccaniche delle miscele) sia una corretta produttività dell'impianto per la sostenibilità economica dell'intervento.

Il costo di appalto delle miscele cementizie (compreso di materiali, lavorazioni ed iniezione) era di circa 30 €/m³ e per poter mantenere le analisi di costo era fondamentale poter garantire una produttività di almeno 200 m³/gg di iniezione.

Il materiale utilizzato per la formazione della miscela è stato il seguente:

- terreni limoso-argillosi di recupero da scavi locali (a costo zero),
- acqua solfata prelevata direttamente dalle gallerie (a costo zero),
- cemento Portland in un dosaggio di circa 150 kg/m³ di miscela.

Il tutto doveva essere lavorato in modo da essere mescolato e fluidificato per poter poi essere iniettato dalla superficie nei fori realizzati.

Al termine delle prove effettuate in cantiere è stata messa a punto l'impiantistica composta da:

1. griglia in testa per lo scarto dei ciottoli più grossi
2. vasca a doppio albero, di miscelazione e fluidificazione di acqua e terreno
3. griglia vibrante più fitta per lo scarto di ciottoli medio-fini

4. silos di alimentazione del cemento
5. vasca di miscelazione del cemento con l'impasto terreno/acqua
6. pompa (potenzialità 2 m³/minuto) con vasca (0.6 m³) per l'iniezione (in cantiere è stata utilizzata un'autobetoniera)

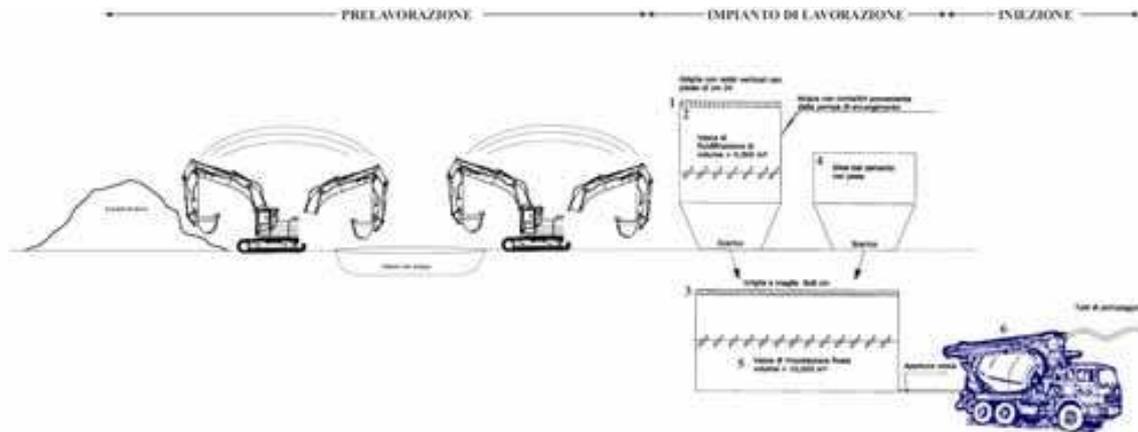


Fig. 8: Organizzazione del cantiere: prelavorazione, impianto di lavorazione e fase di iniezione.
Fig. 8 : Worksite structure: preparation, mixing plant and injection.

A seguito dell'assemblaggio definitivo dell'impianto sono state dedicate alcune giornate alle prove in cantiere, in cui è stata verificata l'omogeneità e la fluidità delle miscele ed è stata testata l'operatività dell'impianto stesso.

In quella occasione sono anche stati presi dei provini che sono stati portati in laboratorio per verificare la rispondenza delle caratteristiche meccaniche della miscela agli standard imposti dal progetto.

Le prove hanno dato risultati soddisfacenti ($R_c > 0.5$ MPa dopo 3 gg.) e l'impianto è stato validato per i lavori.

4.4. Fase operativa di iniezione delle miscele cementizie fluide

La fase più complessa della miscelazione è stata quella di prelavorazione del materiale, cioè dei trattamenti a cui sottoporre i terreni prima di immetterli nella vasca di miscelazione e fluidificazione.

I terreni di scavo per la forte componente argillosa, tendono a creare dei grumi e dei blocchi compatti, che immessi nella vasca di fluidificazione non si omogeneizzano in modo corretto: la prelavorazione è quindi fondamentale per la corretta produzione di miscele cementizie fluide omogenee.

Questa fase è risultata molto legata alle caratteristiche dei materiali portati in cantiere ed alle condizioni meteorologiche, e conseguentemente sono state fatte varie prove durante i lavori, per ottimizzare l'intervento.

Inizialmente è stata sfruttata la parte superficiale dei materiali accumulati in cantiere, che era asciutta per le favorevoli condizioni meteorologiche estive e quindi facile da frantumare. Dopo i primi giorni di lavoro le mutate condizioni meteo e la maggiore umidità dei terreni all'interno dei cumuli hanno reso ingestibile questa metodologia.

Si è anche sperimentato l'utilizzo di una fresatrice, del tipo di quelle utilizzate per la stabilizzazione delle strade a calce, ma anche questa soluzione è risultata onerosa e poco efficace.

L'ultima scelta, che si è poi verificata essere la migliore, è stata quella di creare una grossa vasca in terra, in cui due escavatori mescolavano e lavoravano i terreni con acqua, in modo da creare una poltiglia ("tipo polenta") omogenea. Questa poltiglia veniva poi lavorata, senza problemi, nella vasca di miscelazione. Altro vantaggio era costituito dal fatto che la lavorazione in cantiere non risultava più dipendente dalle condizioni meteorologiche e dalla necessità di materiale asciutto, e conseguentemente questa soluzione consentiva di utilizzare i terreni limoso-argillosi nelle condizioni reali del momento.



Fig. 9: Metodologie di prelaborazione a) con fresa b) vasca in terra con doppio escavatore.

Fig. 9: Pre-injection preparations a) milling machine b) soil basin with two excavators.

Per quanto riguarda la fase di iniezione sono stati adottati una serie di accorgimenti per la riuscita del lavoro:

1. L'iniezione è avvenuta sempre dal fondo.
2. La testa della tubazione è stata tenuta immersa all'interno del materiale stesso, per evitare la separazione in acqua dei diversi componenti e per permettere al materiale di percorrere la massima distanza possibile.
3. La colonna di iniezione veniva fatta risalire lentamente solo quando la massa diventava troppo consistente e non era più in grado di ricevere altro materiale.

Il materiale è stato pompato senza alcuna pressione, con la sola spinta fornita dall'autobetoniera e con la pressione dell'altezza di caduta, e conseguentemente la mobilità era garantita dalla fluidità stessa della miscela.

Con questa scelta si sono evitati i rischi connessi a possibili deformazioni del terreno indotte dal pompaggio a pressione, come anche i rischi di rimescolamento della miscela con l'acqua.

L'iniezione è avvenuta solo su tre fori, che sono stati spinti fino al rigetto.

Le verifiche hanno mostrato che il materiale si è espanso nelle cavità estrattive per oltre 20 metri da ogni foro e nei fori intermedi tra quelli utilizzati per le iniezioni si è osservata una risalita delle miscele, elemento che indica un riempimento totale del volume dei vuoti nell'area.

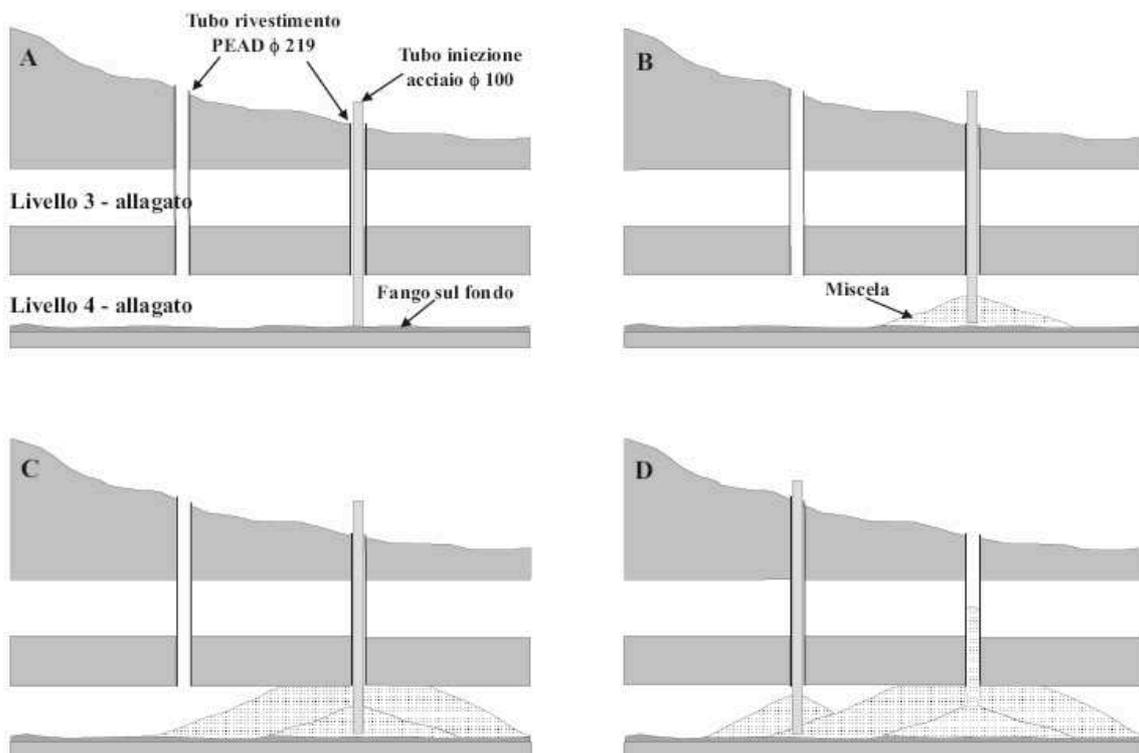


Fig. 10: Metodologie di iniezione delle miscele a) realizzazione dei fori, rivestimento ed inserimento tubazione di iniezione b) inizio dell'iniezione delle miscele cementizie c) completamento dell'iniezione, sempre con il tubo sul fondo, fino al rigetto del materiale d) spostamento del tubo ed inizio dell'iniezione dal secondo foro.

Fig. 10: Methods of mixture injection a) bore drilling, coating and insertion of injection tubes b) start of injection of the cement mixture c) completion of the injection, with the tube in up to the point of material overflow c) tube removal and injection from the next hole.

I principali dati sulla fase delle iniezioni sono riportati nella tabella seguente.

Volume da iniettare da progetto	5000 m ³
Volume totale iniettato	6021 m ³
Iniezione media giornaliera	250 m ³ /gg
Iniezione massima giornaliera	390 m ³ /gg
N° fori di iniezione utilizzati	3
Volume massimo iniettato in un foro	2312 m ³
Ore medie lavorative al giorno	10
Giorni totali di iniezione	24
Costo finale onnicomprensivo della miscela iniettata	30-35* €/m ³

* Il costo massimo di 35 €/m³ è relativo all'utilizzo della prelaborazione con la fresa, mentre con la soluzione finale della vasca in terra il costo è stato di circa 30 €/m³.

I valori sopra riportati hanno consentito una corretta operatività del cantiere ed una sostenibilità economica, tanto che i costi sono stati in linea con le previsioni di progetto.

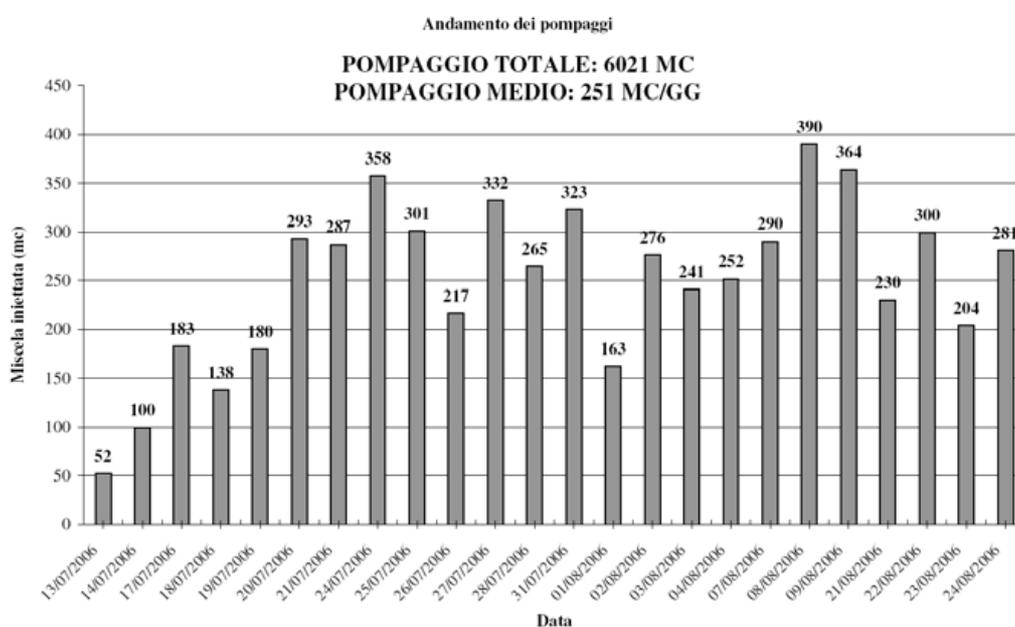


Fig. 11: Andamento delle iniezioni nel tempo.

Fig. 11: Injection rate.

4.5. Controlli e monitoraggi durante i lavori

Durante i lavori sono stati attuati una serie di controlli, sul contesto geologico-idrogeologico e sulle miscele, come dettagliato nella tabella seguente.

In aggiunta a quanto sopra venivano costantemente eseguite delle prove di controllo sulla miscela per verificare la rispondenza ai limiti di capitolato.

I *parametri di accettazione* delle miscele previsti da capitolato erano i seguenti:

- tempo di svuotamento dell'imbutto ≤ 2 sec. (dati tecnici dell'imbutto utilizzato: capacità di 1.1 litri, diametro inferiore e superiore rispettivamente pari a 40 e 180 mm);
- resistenza a compressione, con prova standard, ripetuta su più provini cubici di lato 15 cm di miscela gettata:
 - > 0.3 MPa dopo 3 giorni
 - > 1.0 MPa dopo 28 giorni.

Tipologia controllo	Scopo	Risultato
<i>Contesto ambientale</i>		
Monitoraggio topografico	Controllo deformazioni del terreno	Nessuna anomalia
Controllo piezometrico	Verifica alterazioni assetto idrogeologico	Nessuna anomalia
<i>Interazione con acque in galleria</i>		
Quantitativi di acqua allo scarico	Controllo sostituzione dell'acqua con la miscela	Aumento dello scarico in proporzione all'iniezione di miscela
Torbidità delle acque allo scarico	Fenomeni di mescolamento miscela – acqua in galleria	Acqua sempre pulita
<i>Miscela</i>		
Mobilità miscele in foro	Verifica distribuzione nel tempo delle miscele	Mobilità massima superiore a 20 metri
Consolidamento miscele in foro	Indurimento delle miscele nel tempo all'interno delle galleria	Indurimento progressivo in linea con quanto verificato in laboratorio

4.6. Verifiche finali e validazione del lavoro

Tutte le verifiche in corso d'opera hanno fornito risultati soddisfacenti e spesso superiori alle previsioni di progetto.



Fig. 12: Ubicazione delle indagini di controllo eseguite al termine dei lavori.

Fig. 12: Location of quality control tests at the end of operations.

Considerato l'elevato grado di sperimentazione dell'intervento era fondamentale individuare delle verifiche da eseguire a fine lavori, sul materiale iniettato in galleria da oltre 2 mesi, per poter validare l'opera e trarre ulteriori elementi di valutazione e studio per il futuro.

I due elementi fondamentali da rispettare con l'intervento, come emersi dalle modellazioni eseguite, erano due:

- grado di riempimento totale delle aree iniettate
- rispetto dei parametri minimi di rigidezza e permeabilità della miscela in sito.

Il programma di controllo a fine lavoro ha compreso:

- a) indagini geofisiche per la distribuzione delle miscele.
- b) sondaggi a carotaggio con prelievo campioni;
- c) analisi e prove di laboratorio sui campioni di miscela prelevati;

- a) Le indagini geofisiche sono servite ad investigare su larga scala la zona interessata dalle iniezioni, con lo scopo di individuare il riempimento e la presenza di eventuali ampie porzioni di gallerie non riempite.

A tale scopo si è deciso di utilizzare la tomografia elettrica di superficie 3D, per una ricostruzione il più possibile accurata dei volumi presenti.

L'indagine ha evidenziato molto bene la struttura della zona, discriminando tra terreni di copertura, evaporiti e gallerie.

La distinzione tra materiale di riempimento e gallerie allagate è risultata complessa, per la somiglianza dei valori di resistività, ma l'entità media dei valori e la distribuzione omogenea hanno mostrato un riempimento ben distribuito.

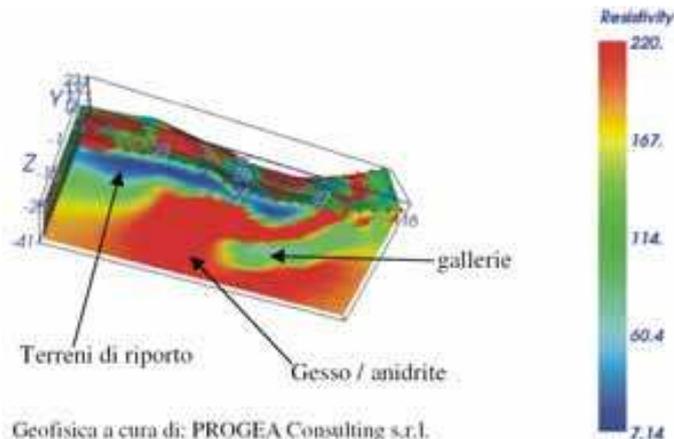


Fig. 13: Risultanze delle indagini geofisiche.

Fig. 13: Geophysical analysis results .

- b) I sondaggi a carotaggio hanno avuto un duplice, fondamentale, utilizzo:
- controllo diretto del grado di riempimento
 - campionamento delle miscele da inviare al laboratorio.
- I sondaggi sono stati disposti in posizioni alterne rispetto ai fori di iniezione ed hanno mostrato in tutti i casi un grado di riempimento totale. Il materiale campionato si presentava omogeneo e consolidato e per una valutazione analitica delle caratteristiche meccaniche è stato inviato al laboratorio geotecnico.

Le verifiche sopra descritte hanno confermato il riempimento totale della zona interessata dalla iniezioni e questo corrisponde in pieno alla condizione fondamentale dell'intervento.

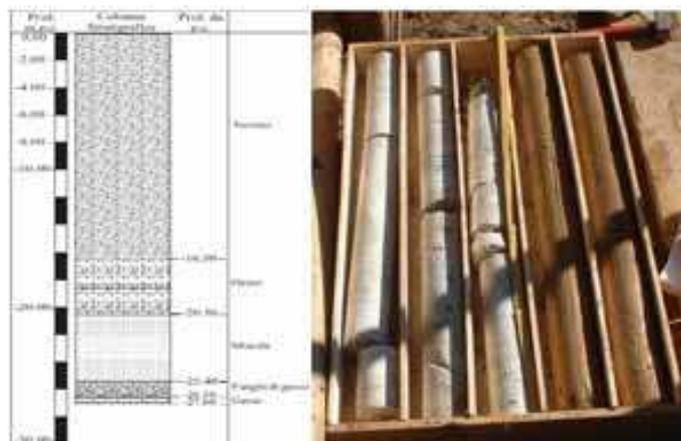


Fig. 14: Stratigrafia e documentazione fotografica del sondaggio di controllo S6.

Fig. 14: Stratigraphic column and photo of S6 well bore.

- c) Le analisi e le prove di laboratorio hanno fornito elementi sulla rigidità e la permeabilità della miscela, per poterne valutare gli effetti in maniera analitica con l'utilizzo del modello di Gerolymatou e Nova (2008).

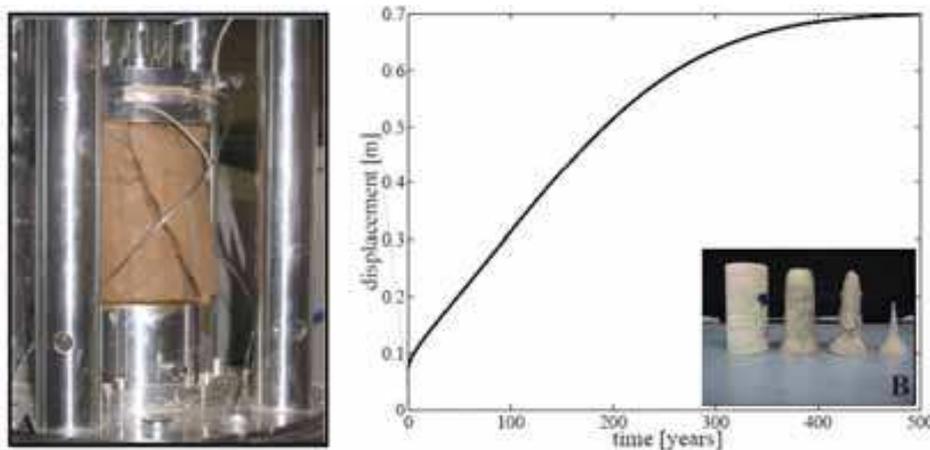


Fig. 15: a) prova di compressione monoassiale b) andamento dei cedimenti nel tempo, in caso di collasso, in presenza di riempimento con materiale saturo, con i parametri di permeabilità e rigidità ottenuti dalle prove, secondo il modello Gerolymatou e Nova (2008).

Fig. 15: a) uniaxial test b) maximum displacement as a function of time, in case of collapse, according to the Gerolymatou and Nova (2008) model, using the values of permeability and elastic modulus from the laboratory tests on the filling material.

I campioni di miscela cementizie prelevati in sondaggio sono stati portati al laboratorio di Meccanica dei Geomateriali del Politecnico di Milano e sottoposti a prove di caratterizzazione, prove di compressione monoassiale e prove edometriche. Lo scopo era quello di determinare una serie di parametri geomeccanici quali: cedevolezza verticale (m_v), coefficiente di consolidazione verticale (C_v) e coefficiente di permeabilità.

Con i parametri geomeccanici acquisiti è stato possibile entrare nel modello previsionale e verificare l'influenza delle miscele sui rischi di collasso delle gallerie.

I riscontri di tale verifica sono i seguenti:

- il riempimento effettuato con la miscela rallenta e dilata notevolmente nel tempo il collasso dei pilastri;
- lo stesso non provoca alcun incremento di pressione neutra in eccesso nel momento del collasso (non si genera il colpo di ariete);
- il riempimento riduce il cedimento, in caso di collasso catastrofico, a circa 10 cm istantaneo e 70 cm in circa 500 anni, situazione sicuramente accettabile per l'assenza di edifici direttamente sopra le gallerie.

Conclusioni

In molte situazioni si sono verificati crolli di miniere abbandonate, con gravissime conseguenze per il territorio e per gli abitanti, per il degrado che subiscono, nel tempo i pilastri di sostegno, per svariati fattori.

Gli Autori hanno illustrato l'esperienza pilota di un intervento di consolidamento, a mezzo di riempimento, di gallerie di gesso dismesse ed allagate a Santa Brigida.

Il particolare contesto geologico, idrogeologico e le difficoltà operative, tecniche ed economiche hanno comportato la necessità di studiare un intervento di riempimento con iniezione della superficie di miscele cementizie fluide, in grado di sostituire l'acqua e consolidare nel tempo.

Tali miscele dovevano anche essere a basso costo, per consentire la sostenibilità economica dell'intervento stesso.

È stata studiata appositamente una miscela composta per la maggior parte da terreni limoso argillosi provenienti da scavi in zona e da acque solfate prelevate direttamente dalle gallerie e solo in minima parte (150 kg/m^3) da cemento.

Il passaggio successivo è stato quello di ricreare in cantiere la miscela, con le medesime caratteristiche, e con una metodologia di lavoro che permettesse la realizzazione di un intervento di consolidamento su larga scala.

Al termine dei lavori, a seguito di tutti i controlli effettuati, è stato possibile trarre una serie di considerazioni in merito all'intervento realizzato ed ai risultati ottenuti:

- il materiale è defluito nelle cavità in maniera corretta, perfino superiore alle previsioni di laboratorio, percorrendo tratti di oltre 20 metri;
- il grado di riempimento delle cavità nel tratto iniettato è risultato totale, condizione fondamentale per la buona riuscita del lavoro e per l'applicabilità dei modelli di riempimento e di consolidamento;
- tutti i controlli ed i monitoraggi durante ed al termine dei lavori non hanno messo in luce anomalie di sorta;
- i costi di intervento sono rimasti in linea con le previsioni progettuali (circa 35 €/m^3 per il materiale iniettato, comprensivo di tutti i costi), grazie alla funzionalità ed alla produttività del cantiere (mediamente pari a $250 \text{ m}^3/\text{gg}$, con picchi di quasi $400 \text{ m}^3/\text{gg}$);
- le quantità iniettate sono state superiori alle ipotesi iniziali (6000 m^3 , contro una stima di 5000 m^3);
- le caratteristiche geotecniche del materiale consolidato in sito sono accettabili e consentono di valutare una sensibile riduzione dei cedimenti ed una dilazione dei tempi di collasso.

Il lavoro, con tutte le incognite di un intervento pilota, ha dato riscontri estrema-

mente positivi, per cui si è dato corso alla progettazione ed alla realizzazione di un secondo lotto dei lavori, con la previsione di iniezione di quantitativi di miscela nettamente superiori (circa 14.000 m³).

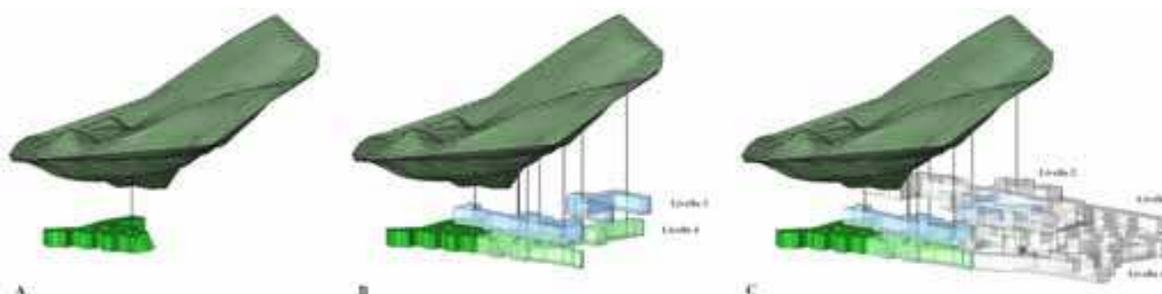


Fig. 16: Visualizzazione dei lavori eseguiti e di quelli in programma con il secondo lotto dei lavori a Santa Brigida a) porzione del livello 4 riempita con il primo lotto dei lavori b) porzioni dei livelli 3 e 4 cha saranno riempiti con il secondo lotto dei lavori c) vista complessiva della cava Carale con indicazione delle porzioni riempite.

Fig. 16: Worksite operation at the Carale mine a) part of the level 4 already filled b) parts of level 3 and 4 to be filled in the stage 2 c) panoramic view of Carale mine, with the filled parts at the end of stage 2.

In questo modo si ritiene di poter iniziare ad aumentare in modo interessante il grado di sicurezza della zona, anche se l'opera non è risolutiva del problema e resterà fondamentale il controllo ed il monitoraggio del territorio durante e dopo i lavori.

Gli interventi proseguiranno puntando ad ulteriori miglioramenti (maggiore automazione del cantiere, miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche delle miscele, ecc.) mantenendo e potenziando la proficua collaborazione tra Professionisti, Istituti Universitari ed Enti Pubblici.

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento è certamente per il Sindaco di Santa Brigida, il Sig. Giovanni Giuseppe Regazzoni: è Lui il vero motore ed il trascinatore di tutta l'iniziativa, dagli studi alle opere, nonché l'ideatore della soluzione di cantiere di prelaborazione con vasca in terra (la "polenta").

Un ulteriore ringraziamento va a tutti i Dirigenti ed ai Funzionari della Regione Lombardia (D.G. Territorio ed Urbanistica e STER di Bergamo) che a vario titolo sono stati coinvolti nell'iniziativa, e che l'hanno resa possibile con il loro sostegno sia economico che tecnico. Infine un ringraziamento ai compagni di lavoro di questa straordinaria esperienza: prof. Nova, prof. Bertolini, ing. Castellanza ed ing. Carsana, che ci hanno sempre supportato ed assistito, ben oltre i limiti degli incarichi conferiti, rendendola possibile (nonché per i gentili suggerimenti e per la revisione del presente capitolo).

Bibliografia

- AA.VV., (2000). Carta geologica della Provincia di Bergamo – cartografia e note illustrative. *Provincia di Bergamo*.
- CASTELLANZA R., GEROLYMATOU E., NOVA R., (2008). An analysis of chamber filling effects on remediation of flooded gypsum and anhydrite mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41 (3), 377-401.
- DOGNINI M., MELCANGI G., (2006). Sviluppo di miscele cementizie fluide con terreno per il riempimento di cave sotterranee. *Tesi di Laurea – Politecnico di Milano – Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica*.
- GARZANTI E., GNACCOLINI M., JADOUL F., (1995). Anatomy of a semiarid coastal system: the upper Carnian of Lombardy. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, , vol. n. 101, pp. 17-36.
- GEROLYMATOU E., NOVA R., (2008). An attempt to predict the failure time of abandoned mine pillars. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41 (3), 413-419.
- SAKAMOTO A., YAMADA N., SUGIURA K., KAWAMOTO T., (2005). An integrated cavity filling technique for abandoned room and pillars lignite mines in Tokai region. *Post-Mining 2005, November 16-17, Nancy, France*.
- SAKAMOTO A., YAMADA N., SUGIURA K., HAMADA T., (2005). Some examples of cavity filling along transportation routes above abandoned room and pillars lignite mines in Tokai region. *Post-Mining 2005, November 16-17, Nancy, France*.
- STUDIO ASSOCIATO DI GEOLOGIA SPADA, (2005). Sistemazione dissesto ex miniere (Cava Carale) nel Comune di Santa Brigida (L. 183/89) – documentazione tecnica ed elaborati grafici. *Progetto definitivo esecutivo del 1° lotto dei lavori del giugno 2005*.
- STUDIO ASSOCIATO DI GEOLOGIA SPADA, (2007). Sistemazione dissesto nell'area dell'ex miniere in Comune di Santa Brigida (L. 179/02 art. 16) – documentazione tecnica ed elaborati grafici. *Progetto definitivo esecutivo del 2° lotto dei lavori del giugno 2007*.