

Politecnico di Milano
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Piazza Leonardo da Vinci,32
20133 Milano

Nota:
“Problemi di stabilità in miniere abbandonate”.
(Luglio 2005)



Relatore:
Prof. Ing. Roberto Nova
Dott. Ing. Riccardo Castellanza

Introduzione

La presente nota intende mostrare i problemi connessi alla stabilità delle miniere abbandonate. Dapprima si riporta il caso delle miniere della Lorena in Francia dove il crollo di parecchi pilastri per effetto della degradazione chimica della minette (roccia tenera ad alto contenuto di ferro) costituente i pilastri ha causato notevoli danni di subsidenza superficiale; in secondo luogo si accenna il problema della miniera abbandonata di gesso/anidrite in località Cava Carale di Santa Brigida attualmente interessata da fenomeni degradativi oggetto del presente studio.

1.1. Miniere della Lorena

La Lorena è una delle più importanti regioni minerarie della Francia: da più di un secolo, nei suoi ricchi giacimenti vengono estratte risorse come sale, carbone e ferro. Lo sfruttamento industriale di tali risorse minerali ha segnato profondamente l'economia, la sociologia e il paesaggio di questa regione.

La formazione ferrifera lorena, d'origine sedimentaria e risalente al Giurassico Medio, occupa una superficie di 115000 ettari: si estende per 100 km in lunghezza, dal Lussemburgo a nord fino a Nancy al sud, e per 50 km circa in larghezza. Ha una potenza massima di 60 metri, e le miniere più profonde sono state realizzate a 250 metri di distanza dalla superficie terrestre. Il minerale di ferro (la "minette") si presenta in strati sub-orizzontali spessi qualche metro e separati da intercalazioni marnose, come mostrato in Fig. 1a prima delle estrazioni, i bacini della Lorena ne contenevano ben 5 miliardi di tonnellate, tanto da rappresentare la quasi totalità della riserva nazionale francese.

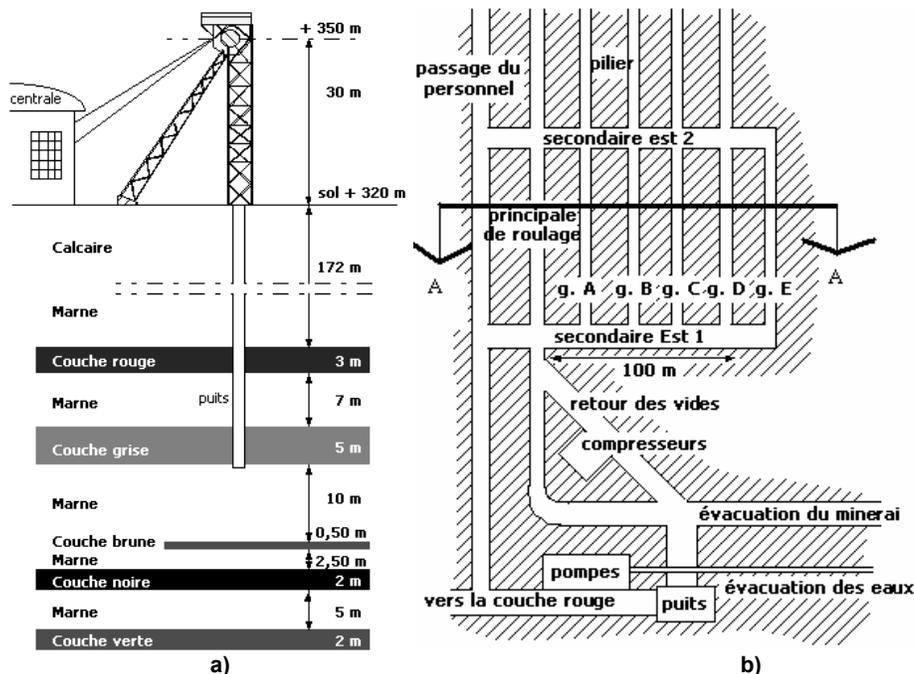


Fig. 1: a) schematizzazione della stratigrafia della formazione ferrifera lorena, b) schematizzazione di un sistema "camere e pilastri" (da Carboni (2002))

1.1.1. Storia delle estrazioni

Se si eccettuano i primi tentativi, risalenti all'Alto Medioevo e condotti con mezzi del tutto rudimentali, lo sfruttamento industriale del giacimento ferrifero lorena ha avuto inizio

solo dopo l'invenzione della procedura Thomas Gilchrist, avvenuta nel 1877; questa ha infatti permesso di defosforare la minette lorena, che in profondità è troppo ricca di fosforo per consentire la produzione di acciaio di buona qualità. Da quel momento in poi le estrazioni sono continuate incessantemente, toccando il picco produttivo annuale (63 milioni di tonnellate) nel 1960; la produzione è in seguito calata a causa della concorrenza dei minerali importati (più ricchi) e dell'evoluzione della siderurgia. L'ultima miniera di ferro, la *Terre Rouges* della società lussemburghese ARBED, ha cessato le attività nel 1997.

Generalmente le estrazioni sono state condotte con il metodo "camere e pilastri": le miniere sono costituite da camere scavate nel sottosuolo e separate tra loro da pilastri naturali (in Fig. 1b). Le camere hanno lunghezza elevata e una larghezza che è compresa tra 4 e 7 metri; i pilastri hanno forme variabili (possono essere quadrati, rettangolari o trapezoidali) e una larghezza che va da un minimo di 10 metri ad un massimo di 25 metri (eccezionalmente si hanno pilastri larghi 5 metri, ma solo in gallerie superficiali). Lo spessore di minerale sfruttato, che corrisponde all'altezza delle camere e dei pilastri, è compreso tra 3 e 7 metri (eccezionalmente 8 metri). La peculiarità di questo metodo di estrazione è il fatto che le cavità sotterranee rimangono anche dopo la cessazione delle attività minerarie: viene lasciata una quantità di pilastri sufficiente a garantire (almeno in linea teorica) la stabilità delle miniere; la percentuale di pilastri lasciati in piedi varia tra il 30 e l'80 %.

La soluzione alternativa consiste nell'abbattere tutti i pilastri con degli esplosivi, causando dei cedimenti che si propagano sino in superficie; la situazione tende a stabilizzarsi in un tempo relativamente breve: nell'arco di 5 anni il materiale si è compattato e non si registrano più spostamenti sostanziali (Homand et al (2001)). In pratica, questo secondo metodo si propone di eliminare le camere sotterranee mediante un collasso superficiale "controllato". La sua applicazione è stata però limitata alle zone in cui non fossero presenti in superficie edifici, strade e/o infrastrutture, poiché i cedimenti provocati avrebbero potuto lesionarli.

1.1.2. Instabilità superficiali

Recentemente, fenomeni di instabilità superficiale hanno interessato alcune zone della Lorena situate sopra miniere di ferro abbandonate, tra cui i comuni di Auboué, Moutiers e Roncourt, danneggiando in modo anche molto significativo le strutture presenti (Fig. 2).



Fig. 2: : danni alle strutture nei pressi di Auboué (a) e Moutiers (b) (da Carboni (2002))

Tale instabilità si è manifestata con un affossamento del terreno (Fig. 3): una conca con un diametro variabile tra qualche decina e qualche centinaia di metri, e una profondità dell'ordine di un metro. Ai bordi, inclinati di circa 20° rispetto all'orizzontale, si sviluppano le zone di massima tensione, con conseguente apertura di fessure di trazione, mentre al centro si ha la massima sollecitazione di compressione, accompagnata da piccoli dossi. Il cedimento si è prodotto in un lasso di tempo variabile da qualche giorno a qualche mese a seconda del contesto minerario e geologico.

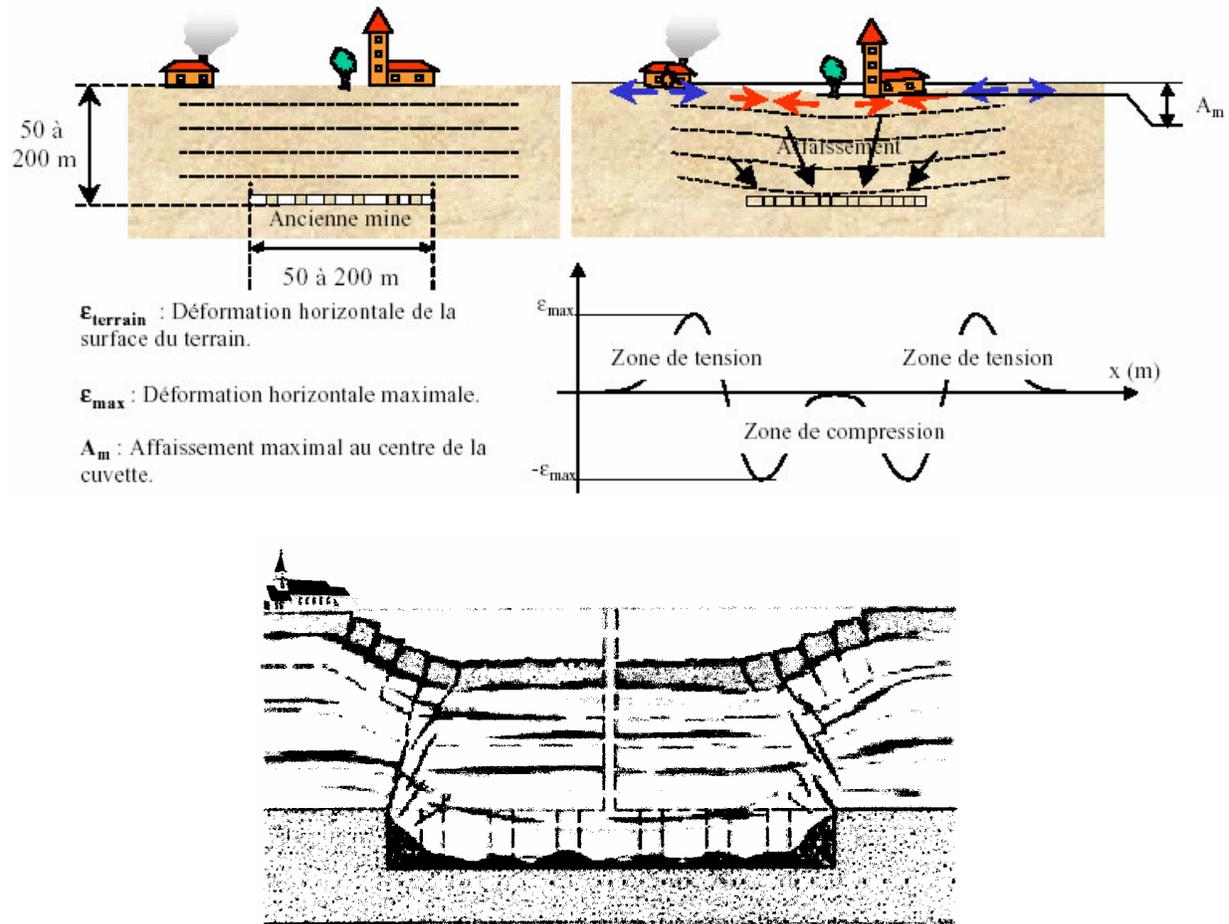


Fig. 3: schematizzazione dell'affossamento e andamento degli sforzi (da Deck et al. (2001))

La causa è da ricercarsi nel crollo dei pilastri delle miniere sottostanti, dovuto a sua volta al *weathering* della minette che li costituisce (Grcic et al. (2001)). Gli agenti di alterazione sono stati fondamentalmente due: l'atmosfera umida e batterica presente nelle camere (che nelle miniere più antiche ha potuto esercitare la sua azione per circa 100 anni) e le acque sotterranee che le hanno invase una volta terminate le attività minerarie. Durante lo sfruttamento dei giacimenti, infatti, le acque di falda erano aspirate costantemente mediante pompe di drenaggio, in modo da consentire il regolare svolgimento dei lavori; una volta cessate le estrazioni, i pompaggi sono stati interrotti, e le acque sono risalite percolando attraverso la roccia e le fratture causate dai lavori stessi. Acqua e atmosfera delle miniere hanno favorito il verificarsi di reazioni chimiche che hanno progressivamente degradato le proprietà meccaniche del minerale di ferro: alcuni pilastri non sono più stati in grado di sopportare gli sforzi cui erano sottoposti e sono crollati, causando dei cedimenti che si sono propagati sino in superficie dando luogo alle

manifestazioni sopra descritte. Probabilmente ha giocato un certo peso anche il fatto che, nell'applicare il metodo camere e pilastri, la quantità di pilastri lasciati a supporto del materiale che sovrasta le miniere sia stata stabilita senza criteri opportuni: sfortunatamente, la percentuale da non abbattere è stata scelta più per esperienza che mediante analisi di stabilità a lungo termine (Elshayeb et al. (2001)). A tal proposito, è interessante sottolineare il fatto che gli affossamenti in questione sono del tutto simili a quelli indotti volontariamente mediante l'abbattimento della totalità dei pilastri.

In seguito a questi avvenimenti, accaduti tra il 1997 e il 1998, l'INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques), il BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) e l'INPL (Institut National Polytechnique de Lorraine) hanno creato nel 1999 il progetto GISOS (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'impact et la sécurité des Ouvrages Souterrains). Il suo obiettivo è rispondere agli interrogativi scientifici che sono sorti, mediante uno studio riguardante gli effetti dei lavori sotterranei che si muove in tre direzioni principali:

1. comportamento dei terreni e impatto in superficie
2. impatto sulle acque
3. gestione dei rischi

Uno delle prime ricerche del GISOS ha riguardato il fenomeno di alterazione dei pilastri (Grcic et al. (2001)); i suoi risultati vengono brevemente presentati nel prossimo paragrafo.

1.1.3. La degradazione dei pilastri

La minette (Fig. 4a) è originariamente costituita da grani ovoidali (ooliti) di goethite, legati tra loro da un cemento composto da calcite, siderite e clorite, presenti in varie proporzioni. Le osservazioni condotte su provini di roccia sana, prelevati in zone prive di lavori minerari, hanno mostrato che il materiale non è alterato: le ooliti sono intatte, ci sono pochissime microfratture (sebbene la porosità sia elevata: in media è del 35 %) e il cemento inter-oolitico si presenta abbondante e molto ben cristallizzato (Grcic et al. (2001)). Si è inoltre potuta verificare una tendenza evolutiva naturale della minette, corrispondente alla neo-cristallizzazione di clorite ferrifera nei vuoti del cemento; tale clorite ha una composizione molto simile a quella della clorite diagenetica presente nel cemento stesso.

Campioni prelevati in zone minerarie mostrano invece gli effetti dell'alterazione chimico-fisica, causata dall'esposizione prolungata all'atmosfera umida e batterica delle miniere (che ha favorito lo sviluppo di reazioni di ossidazione), dall'uso di esplosivi nelle operazioni sotterranee (che ha portato alla fratturazione e alla microfratturazione dei pilastri) e dalla presenza di acqua (il cui dilavamento ha accelerato le reazioni chimiche). Ciò che si osserva è la presenza di cavità e microcavità nel cemento inter-oolitico (Fig. 4b), in numero e ampiezza crescenti all'aumentare del tempo di esposizione e della vicinanza alle camere sotterranee: più la miniera è vecchia e i campioni sono vicini al bordo dei pilastri, più il livello di alterazione raggiunto è elevato. I vuoti si sono riempiti di clorite di nuova cristallizzazione, la quale presenta una composizione diversa da quella della clorite diagenetica (il contenuto di silice è inferiore) e una maggiore tendenza ad espandersi. L'ultimo stadio dell'alterazione vede la scomparsa quasi totale della siderite e della clorite che costituiscono il cemento inter-oolitico: il materiale perde coesione, le ooliti entrano direttamente in contatto tra loro e, nei campioni più superficiali, sono ricoperte da ossido di ferro (probabilmente ematite). In alcuni casi, la concentrazione di sforzi che ne consegue provoca la frantumazione delle ooliti stesse; più in generale, la rottura dei legami diagenetici causa un indebolimento del tessuto intra-oolitico, che tende a sfaldarsi.

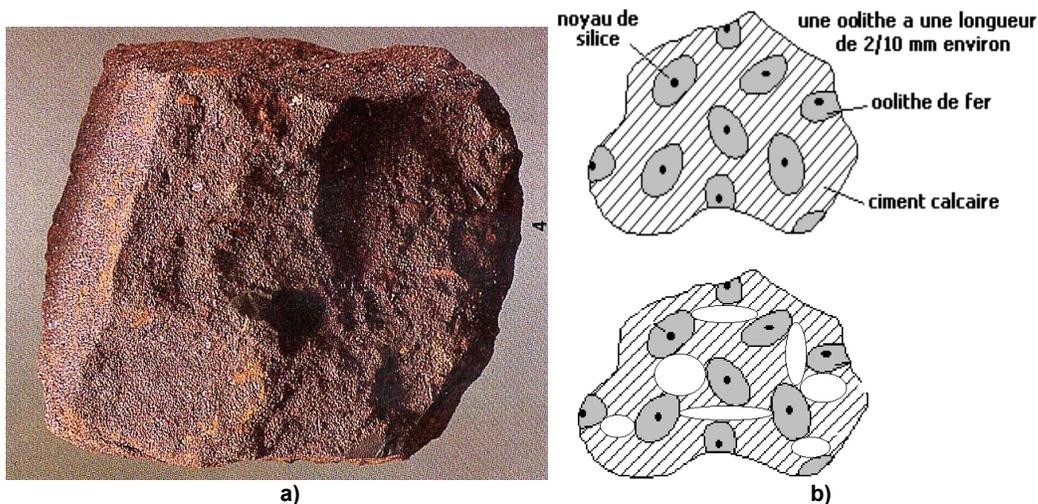


Fig. 4: a) Campione di minette lorena b) Schematizzazione del processo di degradazione (da Carboni (2002))

Il processo di alterazione appena descritto serve a spiegare i collassi dei pilastri. Lo stato di sforzo cui sono soggetti, infatti, varia tra 1 e 3 MPa, ossia solo il 5÷15 % del massimo sforzo di compressione assiale che la minette può sopportare prima di subire lo snervamento; il materiale dei pilastri, in sostanza, si trova in condizioni elastiche. Di conseguenza, solo tenendo conto dell'alterazione del cemento e dei suoi effetti sulle proprietà meccaniche del minerale di ferro è possibile spiegare tale fenomeno: la diminuzione della coesione inter-oolitica riduce il dominio elastico del materiale, facendo sì che i processi plastici inizino per stati di sforzo più bassi rispetto a quelli necessari per snervare la roccia sana.

Un'indicazione dell'evoluzione del processo degradativo è riportata in Fig. 5 in cui si mostra l'andamento della percentuale di siderite contenuta nel cemento inter-oolitico della minette all'aumentare del tempo di esposizione all'atmosfera mineraria; esso è stato ottenuto analizzando campioni prelevati a due differenti distanze dalle camere (15 e 80 centimetri) dai pilastri di miniere aperte da 30, 60 e 90 anni.

La diminuzione del contenuto di siderite di cui sopra rappresenta l'evidenza sperimentale del *weathering* della minette, poiché rende conto del deterioramento del cemento che lega tra loro le oolite ferrose; di conseguenza, la percentuale di siderite può essere messa in relazione diretta con il livello di alterazione del materiale.

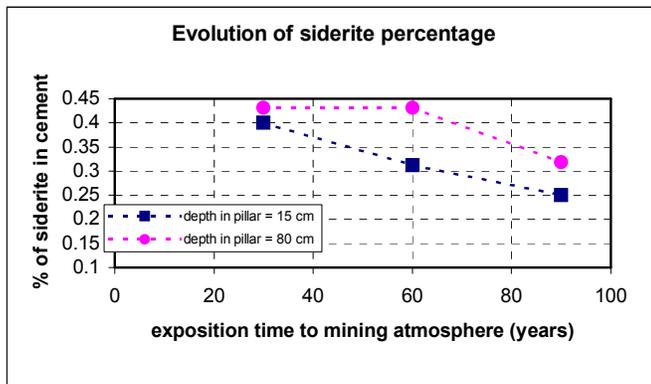


Fig. 5: evoluzione della percentuale di siderite nella minette all'aumentare del tempo di esposizione all'atmosfera mineraria

1.1.4. Simulazione del processo di degradazione

A titolo esemplificativo si riportano nel seguito alcuni risultati di simulazioni della progressiva degradazione dei pilastri effettuate recentemente (200-2005) al Politecnico di Milano dal prof. Nova, l'ing. Castellanza ed il prof. Calvetti, utilizzando sia con il metodo degli elementi finiti sia il metodo degli elementi distinti. Esaurienti spiegazioni dei modelli teorici e dei codici numerici utilizzati per le analisi mostrate sono reperibili nei riferimenti bibliografici segnalati.

Metodo degli elementi finiti

Una prima serie di analisi numeriche è stata svolta utilizzando un modello costitutivo elastoplastico (Nova et al 2003) capace di descrivere adeguatamente gli effetti della degradazione chimica e meccanica sul comportamento meccanico di rocce tenere e/o sabbie cementate. Come mostrato in Fig. 6 in questo caso il terreno (insieme di grani eventualmente cementati) viene considerato come un solido continuo caratterizzato da un dominio elastico e da una superficie di rottura. Il dominio elastico avrà dimensioni maggiori al crescere della resistenza dei legami intergranulari e viceversa si ridurrà qualora i legami intergranulari siano interessati da fenomeni degradativi; si può così tener conto degli effetti più significativi della degradazione chimica sul comportamento meccanico.

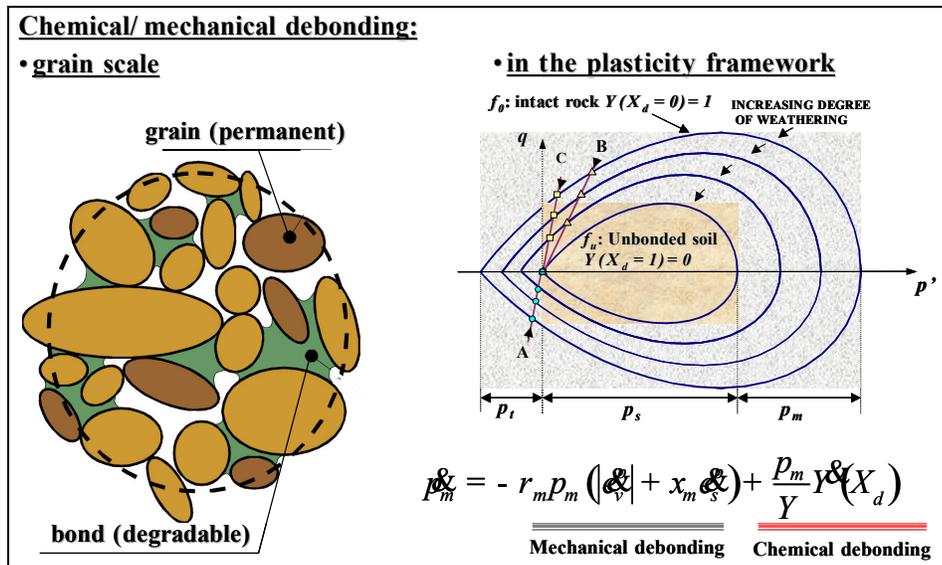


Fig. 6: Modello costitutivo elastoplastico per descrivere la degradazione chimica e meccanica di geomateriali cementati (Nova et al 2003)

Implementando (Castellanza 2002) tale modello in un codice di calcolo agli elementi finiti (codice GeHoMadrid, Fernandez et. al 1999) è stato possibile effettuare analisi numeriche di problemi ingegneristici quali ad esempio la degradazione dei pilastri delle miniere della Lorena.

In Fig. 7 viene riportata la schematizzazione bidimensionale del problema in esame con le relative condizioni al contorno e condizioni iniziali. L'analisi si è svolta simulando la progressiva dissoluzione dei legami intergranulari della roccia tenera (minette) dei pilastri che può essere vista come una progressiva riduzione delle proprietà meccaniche (coesione) fino alla condizione di terreno sciolto.

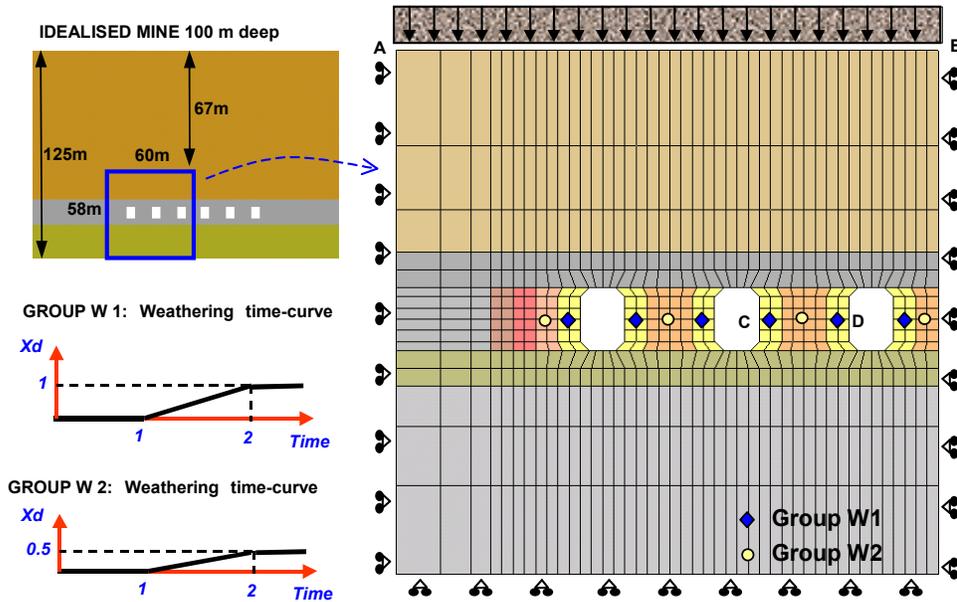


Fig. 7: Problema al contorno: FEM mesh, carichi e andamento della degradazione imposta (Castellanza et al. 2002)

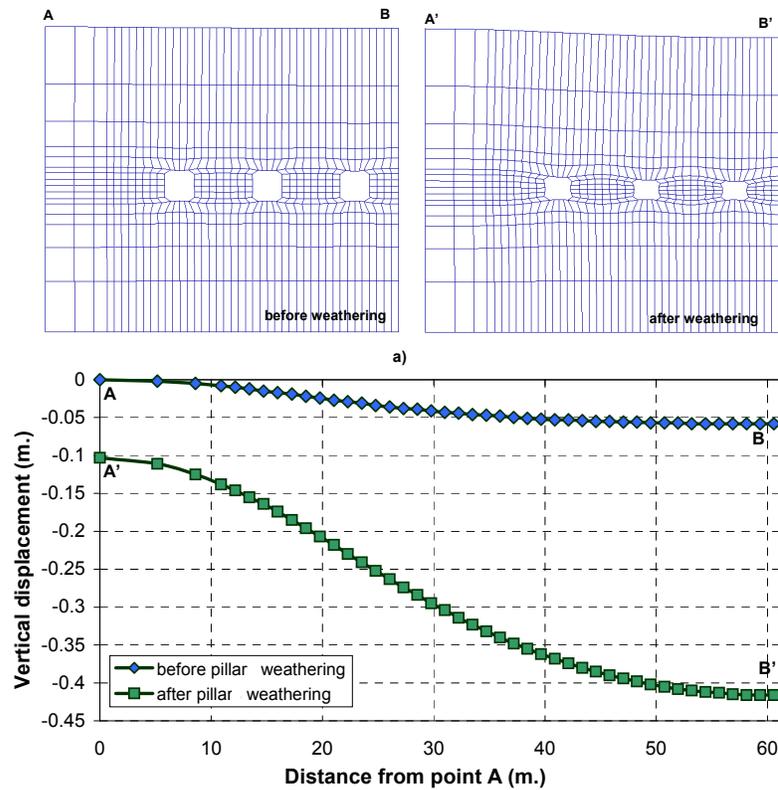


Fig. 8: Mesh deformata e cedimenti superficiali calcolati (Castellanza et al. 2002)

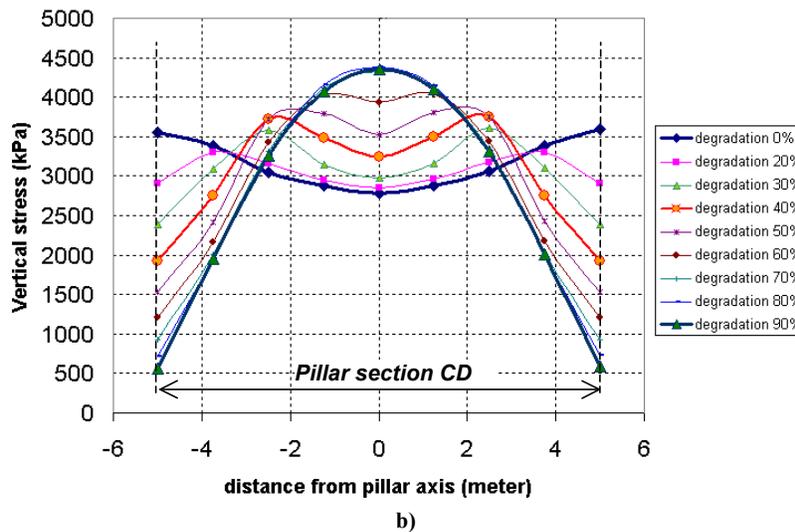
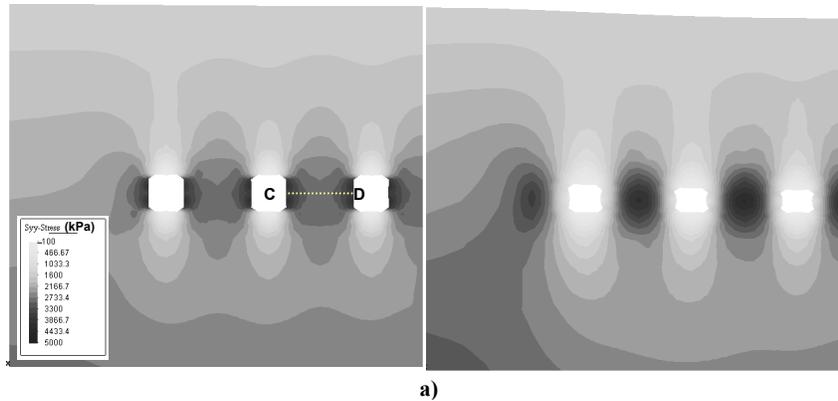


Fig. 9: Variazione degli sforzi verticali prima e dopo il collasso: a) in tutto il dominio (a sx prima della degradazione, a dx dopo la degradazione); b) sezione CD di un pilastro (Castellanza et al. 2002)

I risultati ottenuti in termini di cedimento superficiale (subsidenza) prima e dopo la degradazione dei pilastri sono riportati in Fig. 8, mentre la variazione degli sforzi verticali indotta dalla degradazione è riportata in Fig. 9. I risultati ottenuti mostrano che il modello utilizzato è capace di riprodurre in modo adeguato il fenomeno di degradazione dei pilastri. Più informazioni sperimentali sono disponibili più è possibile ottenere una corretta riproduzione quantitativa del fenomeno ed usare tale metodo per analisi previsionali.

Metodo degli elementi distinti

Nel caso del metodo degli elementi distinti si mantiene la natura discreta del terreno, e lo si considera come un insieme di particelle sferiche che interagiscono tra loro mediante forze di contatto ed eventualmente da legami intergranulari così come mostrato in Fig. 10. Introducendo opportune relazioni tra i parametri che governano la resistenza dei legami intergranulari e il processo degradativo è possibile simulare la transizione di una roccia tenera ad un terreno privo di coesione.

In Fig. 11 si mostra un'applicazione del metodo degli elementi distinti al problema in esame, sia nel caso in cui il processo di degradazione interessa solo i pilastri, sia per il caso in cui il processo di degradazione interessa tutto il materiale roccioso intorno ai pilastri.

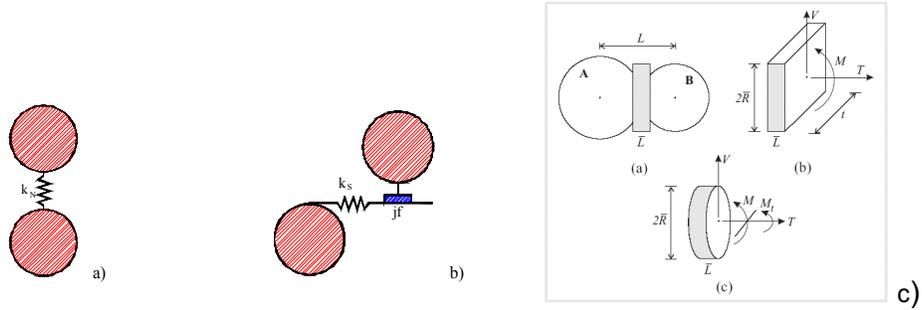


Fig. 10: Metodo degli elementi distinti: a) forze normali b) forze tangenziali c) legami intergranulari (Calvetti et al. 2004)

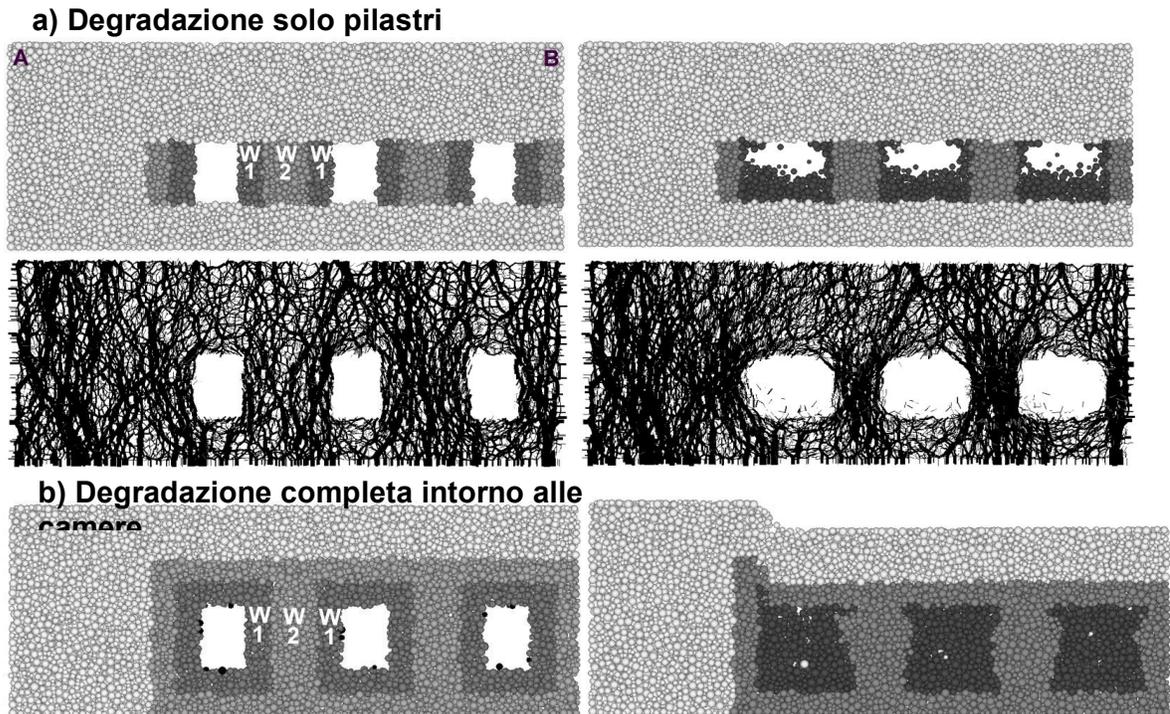


Fig. 11: Analisi con il metodo degli elementi discreti del collasso delle miniere in Lorena (Calvetti et al. 2004)

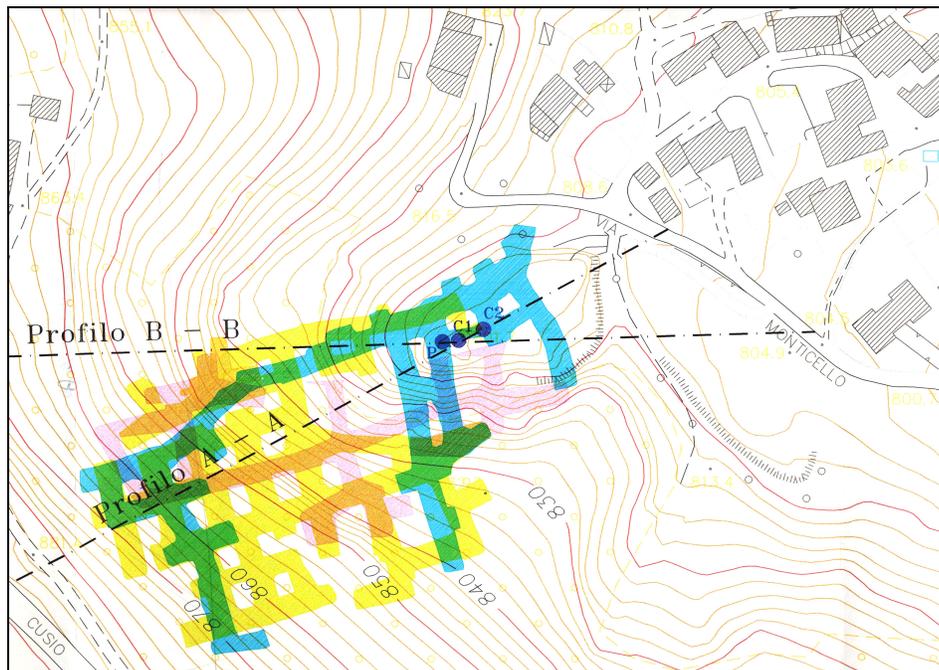
1.1.5. Miniera di Santa Brigida (Cava Carale)

La miniera abbandonata di gesso/anidrite in località Cava Carale in Santa Brigida (BG) presenta rispetto alle miniere della Lorena una situazione più critica da vari punti di vista. Come visibile in Fig 12;

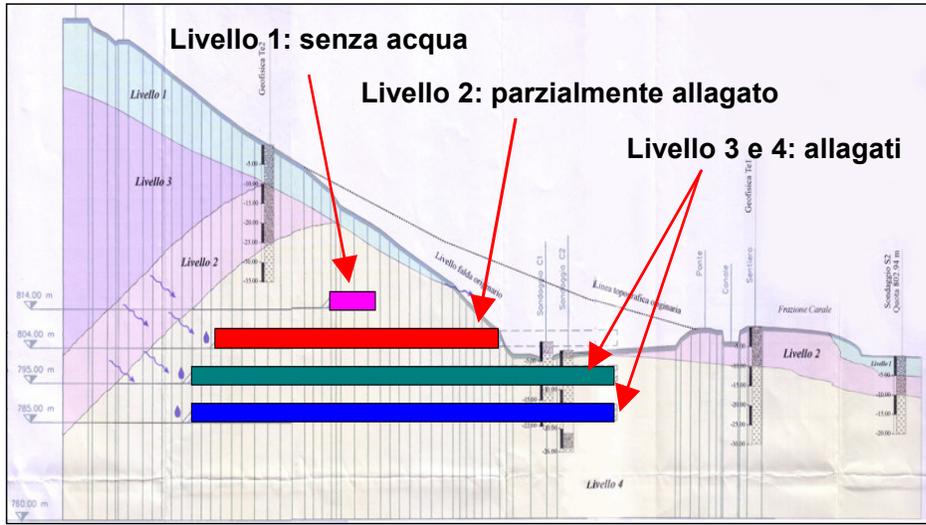
- il contesto è più complesso in quanto ci si trova su di un versante ed immediatamente a monte di un abitato,
- ben 2 livelli (piu' del 60% dei vuoti) si sono riempiti d'acqua (dell'ordine dei 50.000m^3) per infiltrazione dalla falda di monte; tale "bacino" interno di acqua potrebbe pertanto riversarsi in caso di crollo improvviso sulla valle sottostante
- le condizioni attuali della miniera, come visibile in Fig. 13, sono critiche anche nel livello 2 non allagato
- il gesso e l'anidrite che costituiscono la struttura della miniera stessa (in particolare i pilastri dei livelli inferiori) sono soggetti, immersi in acqua a rapidi processi di dissoluzione e degradazione (Fig. 14)

Tali condizioni pertanto impongono una adeguata opera di messa in sicurezza in tempi relativamente rapidi al fine di prevenire eventuali situazioni di collasso; tale operazione di messa in sicurezza richiede di affrontare un problema al contorno di natura sia chimica (dissoluzione gessi) sia meccanica (decadimento delle proprietà meccaniche e problemi di stabilità) che idraulica ("bacino" interno).

Dal momento che il tutto è innescato dal processo di degradazione chimica dei gessi e delle anidriti è fondamentale ottenere una approfondita conoscenza della sua evoluzione temporale in relazione alle condizioni di sito. In Fig. 14 si riportano dei risultati preliminari degli effetti del contatto con acqua dei gessi della miniera in oggetto e nel seguito il dettaglio della approfondita campagna sperimentale e dello studio teorico in fase di svolgimento presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano.



a)



b)

Fig. 12: Planimetria e sezione della miniera di gesso abbandonata di Santa Brigida in località cava Carale (Bg)



Fig. 13: Condizioni di degrado del livello 2 (Novembre 2004) della cava Carale di Santa Brigida (Bg)

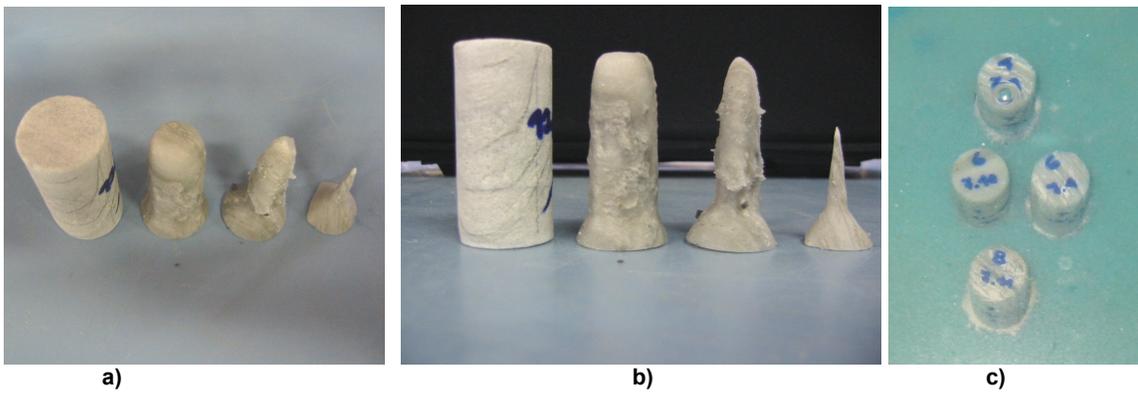


Fig. 14: Provini di gesso della cava Carale dopo immersione in acqua per successivi istanti di tempo: a),b) degradazione con acqua in moto (flusso); c) degradazione con acqua in quiete e senza ricambio.

“Caratterizzazione meccanica del gesso e delle anidriti provenienti dalle miniere del Comune di Santa Brigida(BG) con particolare riguardo a fenomeni degradativi”, in particolare:

a1) materiale intatto

-prove di compressione monoassiale con differente giacitura dei piani di deposizione

-prove di trazione diretta e brasiliana

-prove di creep a carico costante

a2) materiale soggetto a degradazione

-prove di degradazione in assenza di carico per la stima della velocità di penetrazione del fronte di dissoluzione

-prove di compressione monoassiale su provini degradati con immersione in differenti soluzioni acquose

-prove di trazione diretta e brasiliana

-prove di creep a differenti valori di carico assiale su provini in corso di degradazione

a3) Miscele cementizie

-eventuali ulteriori prove di compressione edometrica e/o monoassiale sulla miscela da iniettare nel campo prove.

“Analisi preliminare per la stima dei tempi di collasso di pilastri di gesso interessati da fenomeni degradativi”, in particolare:

-analisi della degradazione dei pilastri sulla base dell'evoluzione dei processi di dissoluzione del gesso in condizioni di aria umida satura

-analisi del collasso dei pilastri immersi in acqua in assenza di confinamento

-analisi del collasso dei pilastri immersi in acqua in presenza di confinamento di terreno sciolto

-analisi del collasso dei pilastri immersi in acqua in presenza di confinamento di terreno cementato a differenti gradi

-analisi numerica del collasso di pilastri immersi in acqua con o senza confinamento con adeguati modelli costitutivi che descrivano il softening chimico.

1.1.6. Bibliografia

Calvetti, F., Nova, R., & Castellanza, R. 2004. Modelling the subsidence induced by degradation of abandoned mines. In Continuous and discontinuous modelling of cohesive frictional materials: 137–148. Taylor & Francis Group.

Castellanza, R. 2002. Weathering effects on the mechanical behaviour of bonded geomaterials: an experimental, theoretical and numerical study. Phd thesis: Politecnico di Milano.

Castellanza R., Nova R., Tamagnini C. (2002), Mechanical effects of chemical degradation of bonded geomaterials in boundary value problems, *Revue Française de Génie Civil*, 6, 1169-1192, Hermès Science Publications, September 2002, Paris (France), ISBN 2-7462-0537-8.

Carboni, R., (2002), *Modellazione numerica di cedimenti indotti dalla degradazione di miniere abbandonate*, Degree Thesis, Milan University of Technology (Politecnico) (in Italian).

Deck, O., Al Heib, M., Homand, F. (2001), Etude des consequences des affaissements miniers sur le bati par la modélisation numérique, *Proc. XV^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2-5 Nancy, Septembre 2001*.

Grgic, D., Homand, F., Hoxha, D. (2001), Instabilités des mines de fer abandonnées de Lorraine: approche hydromécanique, *Proc. XV^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2-5 Nancy, Septembre 2001*.

Fernandez Merodo, J. A., Mira, P., Pastor, M. and Li, T. (1999), *GeHoMadrid User Manual*, Internal Report, CEDEX, Madrid.

Homand, F., Feuga, B., Kouniali, S., Josien, J.P. (2001), Les instabilités des mines de fer abandonnées de Lorraine, *Proc. XV^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2-5 Nancy, Septembre 2001*.

- Nova, R., Castellanza, R., & Tamagnini, C. 2003. A constitutive model for bonded geomaterials subject to mechanical and/or chemical degradation. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 27: 705–732.
- Nova, R. (1992), Mathematical modelling of natural and engineered geomaterials, *Europ. J. Mech. A Solids*, 11 (special issue), 135-154.
- Nova, R. (1997), On the modelling of the mechanical effects of diagenesis and weathering, *ISRM News Journal*, 4, n. 2, 15-20.