

LE INDAGINI E IL MONITORAGGIO DI FENOMENI DI SUBSIDENZA E SPROFONDAMENTO NELL'AREA MINERARIA DI GAVORRANO (GR – TOSCANA)

GARZONIO CARLO ALBERTO*, **BARSUGLIA FILIPPO***, **IOTTI ALBERTO****

*DIRES-LAM Laboratorio Materiali Lapidei - Geologia Applicata all'Ambiente e al Paesaggio

**Collaboratore esterno DIRES-LAM

INTRODUZIONE

Nell'ambito degli interventi di messa in sicurezza, ripristino ambientale, e valorizzazione dell'area mineraria, attraverso la realizzazione del progetto di un parco minerario e naturalistico, sono in corso indagini per valutare l'occorrenza di fenomeni gravitativi sia di tipo subsidenza, caratterizzati da grandi dimensioni e lenta evoluzione, che di tipo sprofondamento, di limitate dimensioni, ma improvvisi e rapidi.

I fenomeni di subsidenza o di collasso per sprofondamento (sinkhole) possono costituire una notevole conseguenza negativa dell'estrazione di grandi quantità di minerale, specie in zone ove la coltivazione in sotterraneo avviene a media e piccola profondità. La subsidenza inoltre può infatti causare la variazione dello stato di sforzo nel versante sovrastante, inducendo aree di prevalente trazione ed altre di compressione. Inoltre le variazioni topografiche conseguenti alla subsidenza possono spesso facilitare l'azione della gravità sui pendii coinvolti. Questa in particolare amplifica quei fenomeni di instabilità in ambienti geologici fortemente tettonizzati ed ove è presente una morfogenesi carsica (con presenza di doline, scarpate e balze, fratture aperte, ecc). Nella letteratura tecnica riguardante i fenomeni di subsidenza, infatti, si trovano relativamente pochi riferimenti sugli effetti di tali processi sulla stabilità dei versanti. La presente nota descrive in particolare il grande fenomeno di subsidenza del monte Calvo (fig.1) ed un fenomeno di collasso-sprofondamento occorso in corrispondenza di un vano pozzo (fig.2), rappresentativo di numerose situazioni presenti nell'area mineraria di Gavorrano.

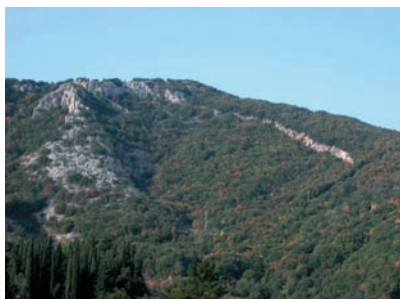


Fig. 1 - Panoramica dell'area di subsidenza del Mt Calvo



Fig. 2 - Panoramica dell'area mineraria di Ravi (parco) e del collasso.

Il fenomeno di subsidenza insiste nel rilievo soprastante l'abitato di Gavorrano e l'antica frazione di Ravi, in un complesso minerario che è stato il più grande d'Europa per l'estrazione di pirite, chiuso completamente nel 1982. La miniera attualmente è ancora in parte in stato di manutenzione nelle sue infrastrutture principali (gallerie di servizio, i due

pozzi più importanti, etc.) in relazione alle operazioni di interruzione controllata dell'eduazione e del conseguente allagamento di gran parte delle gallerie e dei vuoti di coltivazione in condizioni di sicurezza. Negli ultimi anni sono stati effettuati numerosi studi multidisciplinari con l'intendimento di progettare e realizzare un parco minerario e naturalistico, per alcuni lotti già attuato, ed il recupero ed il riuso in tale ambito delle acque termali (Garzonio & Affuso, 2004). In questo contesto, anche con la recente istituzione del Parco nazionale archeominerario delle colline metallifere, vi è la possibilità oltre che di un rilancio economico attraverso il turismo, di rispondere al problema della tutela e della messa in sicurezza con nuove opportunità di lavoro e di ricerca. In questo contesto si colloca anche l'ipotesi del parco delle rocce, che interessa anche il fenomeno della subsidenza come laboratorio, come paesaggio particolarmente suggestivo, e non solo come problema inducente situazioni di pericolosità. In tal senso, ma soprattutto per l'individuazione delle condizioni di maggior rischio di sprofondamento rapido, risulta di particolare importanza la documentazione di archivio, così come la testimonianza dei minatori, relativa ad eventi di crollo e sprofondamenti in sotterraneo, a piccola e media profondità, avvenuti in passato o alla individuazione della posizione, soprattutto di pozzi gallerie e fornelli, notevolmente diffusi specie nelle prime fasi di coltivazione. Nella presente nota oltre alla descrizione dei fenomeni, sono riportati i risultati di un'applicazione speditiva, che semplifica quella numerica a tre dimensioni descritta in Crosta et alii (2001) con lo scopo di verificare la possibilità di individuare tramite modellazione la relazione tra sistemi di fratture superficiali e collassi in profondità. Le simulazioni hanno come scopo l'individuazione della posizione delle geometrie dei processi in atto e le possibili evoluzioni, sulla base dei valori reali degli spostamenti. Per quanto riguarda i fenomeni di rapido sprofondamento connessi a pozzi, gallerie e fornelli abbandonati, riempiti, etc., l'evento occorso a Ravi ha reso necessaria una campagna basata su più metodi di prospezione geofisica, della quale si descrivono i principali risultati, dove l'analisi è volta a contribuire alla messa a punto di un procedimento di monitoraggio su tutta l'area mineraria.

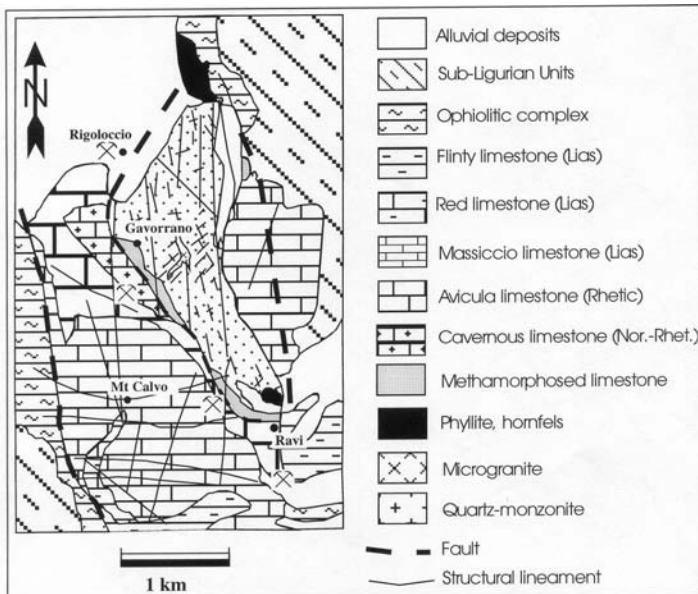


Fig. 3: Carta Geologica dell'area mineraria del monte Calvo.

1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'area mineraria di Gavorrano è situata nell'ampia regione delle colline metallifere, nella Toscana meridionale, a pochi chilometri dal mar Tirreno (golfo di Follonica). Il paesaggio è caratterizzato soprattutto dal contrasto morfologico tra le pianure alluvionali (fiumi Pecora e Bruna) ed i ripidi pendii dei rilievi collinari, fra i quali spicca la dorsale del monte Calvo (m. 450 slm). Sugli opposti versanti del monte Calvo si trovano gli abitati di Gavorrano (centro storico) e di Ravi, fra loro collegati dal complesso sistema sotterraneo della miniera di pirite. Qui la serie geologica toscana affiora interamente (fig. 3) insieme anche all'importante intrusione quarzomonzonitica del Pliocene (4,9 My), la quale è orientata NNO-SSE (Bertini et alii, 1969).

Si osservano anche limitati affioramenti del complesso metamorfico del permiano (filladi e scisti del Verrucano) stratigraficamente posto alla base della serie Toscana, a Nord di Gavorrano ed anche presso Ravi. I calcari del Cavernoso si presentano brecciati e carsificati, parzialmente metamorfosati al contatto con l'intrusione, e sormontati dalla formazione dei Calcari e delle marne ad Avicula e dalla formazione del Calcare Massiccio (Lias). Queste unità sono quelle più importanti interessate dallo studio, mentre la parte superiore della serie toscana (Rosso Ammonitici, Calcare selcifero, Marne a posidonia, Scaglia, Macigno) affiorano più a sud. Infine i flysch eocenici riguardano solo marginalmente i lavori minerari nella parte più a nord. L'intrusione quarzomonzonitica è caratterizzata anche dalla presenza di alcuni dicchi microgranitici, orientati N-S, NO-SE e NO-SE, è talora marcatamente alterata ed è delimitata al contatto con i carbonati e con le faglie da spesse fasce di materiale sciolto denominato localmente "renone". Al contrario non si osservano livelli di alterazione lungo le principali gallerie di servizio della miniera, specie ad una certa distanza dalle mineralizzazioni. I giacimenti di pirite sono stati comunemente coltivati in lenti o corpi di forma irregolare posti al contatto tra l'intrusione ed il Calcare Cavernoso a talora lungo le faglie principali (Arisi Rota et alii, 1971). La circolazione carsica è molto comune in questi calcari e molte forme di origine carsica sono riconoscibili in superficie (in particolare nel calcare massiccio). Tali processi hanno giocato un importante ruolo sulle proprietà degli ammassi rocciosi ed anche nella concentrazione dei corpi mineralizzati. Inoltre le reazioni chimiche causate dall'abbassamento del pH nelle acque di circolazione e la conseguente dissoluzione dei solfati di ferro potrebbero essere stati all'origine della maggior parte dei vuoti all'interno dell'ammasso roccioso. Questo fatto è particolarmente importante data la posizione dei corpi di pirite proprio al contatto tra la quarzomonzonite e le formazioni carbonatiche così come per la presenza di vene e concrezioni all'interno dei calcari. L'assetto geomorfologico (fig. 4) dell'area è caratterizzato da tre elementi fondamentali: il carsismo, la subsidenza e l'attività mineraria. Su tutta l'area sommitale del Monte Calvo-Calvino sono ben evidenti karren e le doline. Queste ultime hanno una forma a scodella con un diametro di 20-30 m. La subsidenza contribuisce in modo primario alla morfologia, soprattutto sul versante orientale del Monte Calvo, caratterizzato da una grande area circolare ribassata dalla presenza di numerose scarpate sub-verticali, alla cui base si rinvengono depositi di crollo. Scarpate, balze residuali, grandi ammassi e depositi detritici si rilevano in altri tratti dei versanti Monte Calvo, lontani dalle aree di miniera. Si rilevano inoltre sistemi o la presenza di fessure e fratture, quando i calcari (massiccio, cavernoso o "cristallino") non sono ricoperti da coltri detritiche in molti punti tra i versanti soprastanti Gavorrano e Ravi, alcuni dei quali probabilmente connessi anche con strutture sotterranee.

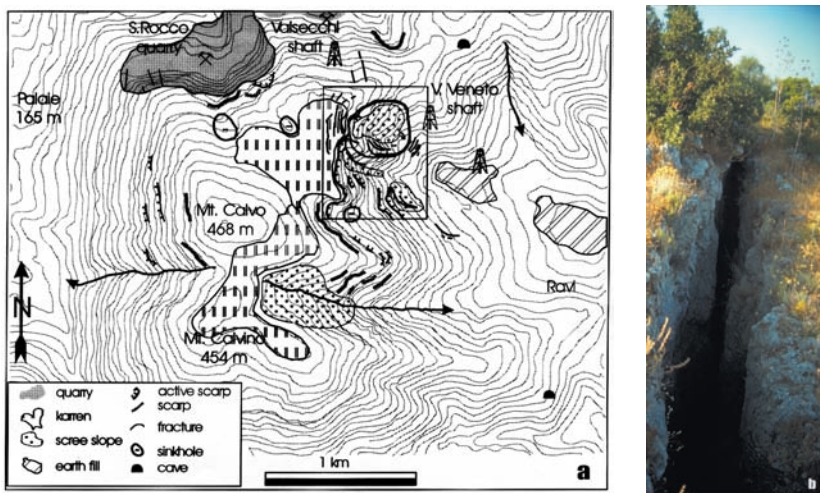


Fig. 4: (a)Carta Geomorfologica dell'area del Monte Calvo. (b)Particolare della fessura sommitale. L'attività mineraria

I giacimenti di pirite sono principalmente distribuiti in una serie di lenti di differente forma, dimensione e posizione rispetto all'intrusione ed alle rocce sedimentarie. Differenti lenti sono state identificate con nomi differenti, ricordiamo le più importanti: massa Praga, massa Unione, Montecatini, Boccheggiano, con un'immersione di 50° verso ovest, Monte Calvo, Quercetana, Vignaccio, con un'immersione media di 60° Est, etc. Tutte sono allungate in direzione NS o N-NO, S-SE. Nel 1898 inizia lo sfruttamento industriale dell'area mineraria in prossimità di Gavorrano, sotto il Monte Calvo, mentre nel 1908 iniziarono i lavori anche presso Ravi. In quell'anno la produzione era già di 24.000 t/anno. Nel 1914 fu scoperta la massa Boccheggiano, la più grande di tutto il giacimento. I principali livelli di lavoro sono in questo periodo il +200 e +230 nella massa Boccheggiano (in direzione Mt. Calvo). Mentre da Ravi la massa Vignaccio, alla quota di +175. Nel 1930 si raggiunge un'estrazione di 300.000 t. Nel 1941 lo sviluppo dei lavori si arrestò a causa della II guerra mondiale, per carenza di energia e mano d'opera, con il conseguente allagamento di molte gallerie. Nel 1945 iniziano i lavori di ripristino delle gallerie, in parte franate e dei pozzi allagati ed inizia un nuovo periodo di forte sviluppo. Nel 1947 nella miniera di Gavorrano la discenderia raggiunge il livello 110 m (prima della guerra +80) e viene preparata la lente del Calvo, che insieme a quella di Vignaccio e di quella di Boccheggiano rappresentano le coltivazioni inducenti i fenomeni di cedimento. Nel 1951 la Massa Boccheggiano è esaurita fino al livello 0 m s.l.m., per cui si spingono le ricerche verso livelli inferiori (discenderia a 140 nel 1952, pozzo Roma a 160m) nel 1954. Viene realizzata una galleria che collegava tutte le miniere a 110 (anche con la nuova miniera di Valmaggiora posta più a sud di Ravi, e successivamente, quando la Montecatini acquisì tutte le miniere, anche quella di Ravi, fu realizzata un nuovo sistema con l'introduzione di tecniche e meccanizzazioni moderne a 200.

Questa situazione comportò l'abbandono di gallerie in aree di più antica coltivazione (livelli +75, 0, -10m), dove le ripiene erano più instabili, senza più controllo delle acque che venivano raccolte solo a quote inferiori (-200). Dal 1971 al 1979 le coltivazioni interessano i livelli da 163 a 220. Nel 1981 in conseguenza del verificarsi di alcune grosse frane, della diminuzione del prezzo della pirite, dell'esaurimento dei livelli più produttivi, la miniera chiude. Fin dai primi anni di attività l'estrazione della pirite avveniva tramite tagli verticali e fette: i tagli erano montanti nel caso di materiale compatto, discendente per pirite friabile o rotta da tagli precedenti. Il materiale veniva completamente asportato e al

suo posto erano introdotti i materiali di ripiena. Prima fascine in legno, poi poltiglie acquose, infine una ripiena idraulica con pezzame in granito alterato. Anche il metodo e la quantità del riempimento variano con l'anno di messa in posto. Solo nella seconda metà degli anni sessanta fu introdotta la ripiena cementata. A partire dal 1947 la coltivazione dell'ammasso di pirite viene effettuata a fette orizzontali discendenti abbattute con trincee e tagli a lunga fronte. Dalla ricerca di archivio e da testimonianze sono pertanto definibili le masse instabili e le gallerie che più probabilmente hanno indotto i fenomeni di subsidenza rilevati in superficie e che sono state poi considerate per le analisi numeriche. Fra l'altro pur ricca di notizie su frane e dissesti, allagamenti etc. in gallerie, non sono riportati gli eventi relativi alla subsidenza, che dall'analisi delle foto aeree, sembra essere accaduta alla fine degli anni '60, con movimenti marcati fino ai primi anni '80.



Fig. 5: Galleria (-20) collassata(a sinistra), crollo in galleria (a destra).

Per quanto riguarda il crollo del pozzo Vignaccio a Ravi, particolarmente utile è stata la documentazione relativa alla storia della miniera di Ravi Marchi, che ha visto nel tempo la realizzazione di molti pozzi, poi abbandonati, e di gallerie quando la miniera fu inglobata in quella di Gavorrano-Valmaggione.

2. IL FENOMENO GRAVITATIVO

Il fenomeno di subsidenza interessa interamente il versante sud-orientale del Monte Calvo che sulla base dei rilievi effettuati può essere suddiviso in due settori. Nell'ampia zona di cresta si hanno prevalentemente fratture subverticali con direzione N-S, NE-SW (fig. 6a) come si può osservare dagli stereogrammi con le curve di densità dei piani principali rilevati sopra la scarpata (figg. 6b,c,d). Dal piano sommitale, dove è ubicata la dolina ed un piano carsificato, andando verso est, e cioè verso il versante di Ravi, si incontrano prima fratture rettilinee, poco evidenti, con aperture non superiori ai 10-15cm e con estensione limitata; facendosi più vicini alla scarpata le fratture diventano più importanti. Aumenta il valore dell'apertura, che spesso supera i 150 cm (fig. 4), e la continuità laterale diventa notevole (centinaia di metri). La direzione principale N-S rimane immutata, ma vicino alla cresta l'andamento delle fratture diventa più irregolare. La profondità di queste fratture varia da 1 metro fino a 20-30 m e probabilmente raggiungono anche i 60 m. (com'è stato documentato da rilievi speleologici effettuati). La forma del profilo è generalmente a "V", si riconoscono solo pochi casi di profili a "U". In questo settore la spaziatura tra le discontinuità maggiori varia da 10 a 20m. Sempre verso est si osserva anche un aumento del rigetto tra i due blocchi separati dalla frattura: nelle prime fratture il rigetto è nullo, poi si osservano gradini di 20 cm, fino al limite della scarpata dove il rigetto arriva a superare il metro (1-1,5). Questa variazione non è comunque regolare. L'area circolare depressa ha un diametro di circa 450 m e a

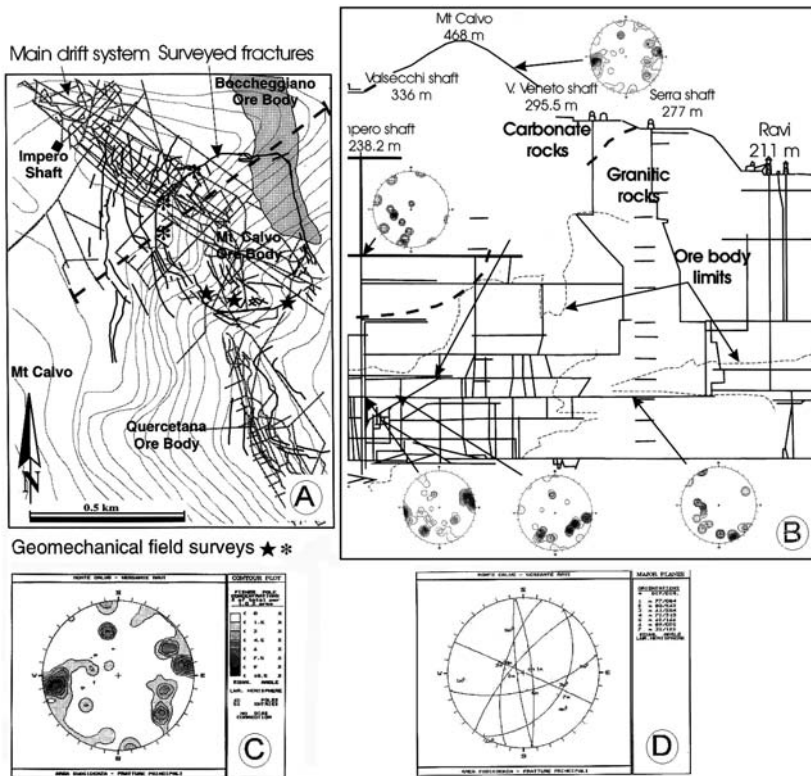


Fig. 6: A) planimetria del fianco SE del Monte Calvo con il sistema delle maggiori fratture. B) Sezione della miniera con i principali stereodiagrammi dei poli delle discontinuità. C) e D): Stereogrammi delle principali discontinuità Mt. Calvo versante Ravi

monte è chiaramente delimitata da due grandi fratture che costituiscono una scarpata con altezza variabile tra i 3 e i 20 metri (fig.1). La frattura che costituisce il limite a NNE è lunga circa 550 m, ha apertura superiore a 3 m (fino a 6 m) ed ha una profondità variabile tra 20 e 30 m.; la seconda frattura, che limita la subsidenza a SSE, raggiunge una profondità massima di 12 m e aperture variabili tra 0.5 e 6 m. Altre fratture sono presenti al piede del versante; queste hanno concavità verso l'alto e presentano valori di apertura, profondità raggiunta e continuità in genere inferiori a quelle precedentemente descritte, anche se si rilevano alcune fratture molto profonde (20m) con apertura superiore al metro. L'apertura delle fratture minori è variabile tra 15 e 30 cm, la profondità non supera il metro, mentre la continuità arriva fino alla decina di metri. In generale le superfici delle fratture presentano sia gradini che superfici lisce, talvolta striate. Gli affioramenti presenti in questo settore del pendio depresso sono caratterizzati da un alto grado di fratturazione, che testimonia l'elevato stato di sforzo cui è stato sottoposto l'ammasso roccioso. Il generale stato d'instabilità del pendio è pure sottolineato dalla diffusa presenza di detriti, sia ai piedi delle scarpate principali, che alla base del versante, qui è presente materiale brecciato cementato, probabilmente risultato della deposizione di cementi carbonatici sui detriti precedentemente citati (stratified slope debris). La cumulata delle aperture, ottenuta sommando tutti i valori di apertura, misurati, da monte verso valle, è in genere superiore a 20 m. In conclusione si può stimare attraverso la distribuzione e l'apertura delle fratture maggiori uno spostamento totale di 30-40 m verso il basso e in funzione dell'altezza della scarpata principale, uno spostamento verticale di almeno 15-20 m.

3. Analisi delle deformazioni

Al fine di ricostruire i processi di deformazione del versante e di subsidenza mineraria sono state eseguite simulazioni numeriche con l'utilizzo del codice UDEC (Universal Distinct Element Code, ITASCA, 1993). In precedenza (Crosta et alii, 2001) è stato applicato il codice 3DEC, tridimensionale (Crosta et alii, 2001), che ha permesso di simulare in maniera piuttosto precisa l'andamento delle deformazioni, ma che per mancanza di dati di discontinuità e del reale andamento dei vuoti, delle caratteristiche puntuali delle ripiene e delle gallerie di servizio, dei forneli, etc. ha dato dei risultati errati dei valori degli spostamenti verticali e soprattutto di quelli orizzontali. Tale situazione è in parte anche imputabile alla complessità dei fenomeni, con una subsidenza che coinvolge il ripiano sommitale sub-pianeggiante ma interessa, in particolare, un pendio con spostamenti orizzontali anche notevoli. Per tale ragione e per la finalità del presente lavoro, che è quella della messa a punto di metodologie speditive per la definizione della rete di monitoraggio di aree a maggior rischio di subsidenza o sprofondamento, è stato applicato un codice di calcolo più semplificato bidimensionale (UDEC), sia attraverso una modellazione dei blocchi lapidei dove le formazioni carbonatiche sono costituite da blocchi rigidi isolati da famiglie di fratture (vedi figg.5b,c,d), sia considerando l'ammasso più fessurato con alte frequenze delle discontinuità, dei vuoti carsificati o di coltivazione, etc., utilizzando una modellazione dell'unità carbonatiche continue, per alta densità di fratturazione (ubiquitous joint model). Sono state pertanto analizzate le interazioni tra i vari fattori naturali quali la geometria del pendio, le famiglie di discontinuità, le caratteristiche dei materiali e i fattori antropici quali le operazioni di scavo della miniera. Le formazioni carbonatiche non sono state tra loro distinte nel modello geologico, in quanto tutte coinvolte dagli stessi sistemi di fratturazione e di frequenza e persistenza, dove gli effetti corrosivi aumentano verso l'alto, e lo spessore maggiore è costituito dalla formazione del Calcare Massiccio. Tale gruppo rappresenta i materiali con caratteristiche meccaniche meno resistenti e più deformabili ($\gamma = 25\text{KN/m}^3$, $K = 11\text{Gpa}$, $G = 5\text{Gpa}$, $\varphi = 35^\circ$, $\sigma_t = 40\text{ Mpa}$, $c = 30\text{ Mpa}$) rispetto alle rocce intrusive, considerate più rigide e compatte ($\gamma = 27\text{KN/m}^3$, $K = 44\text{ Gpa}$, $G = 28\text{Gpa}$, $\varphi = 43^\circ$, $\sigma_t = 40\text{ Mpa}$, $c = 80\text{ Mpa}$). L'effetto della coltivazione e dei riempimenti minerari è stato simulato in 6 fasi di escavazione (in relazione ai volumi considerati in base alla ricostruzione degli archivi minerari), dove ogni nuova fase è iniziata dopo che nel materiale di ripiena ($\gamma = 15\text{KN/m}^3$, $K = 10\text{Gpa}$, $G = 5\text{Gpa}$, $\varphi = 30^\circ$, $\sigma_t = 0,1\text{ Mpa}$, $c = 0,2\text{ Mpa}$) gli stress hanno raggiunto una condizione di equilibrio. Il materiale di ripiena è stato considerato con proprietà scarse, in quanto durante le attività di coltivazione più superficiali i materiali utilizzati variavano dalle fascine in legno, a materiali argillosi, pietrame sciolto e successivamente con cemento; talora è ipotizzabile la non completa presenza della ripiena nei vuoti coltivati. La faglia di Gavorrano ed i contatti tra la pirite e le rocce incassanti, siano calcari o graniti, è stata modellata tenendo in considerazione la presenza di un livello di alterazione del granito (renone) con caratteristiche piuttosto scarse e paragonabili a quelle della pirite che nei giacimenti prevale in facies microcristallina sciolta ($\gamma = 26\text{KN/m}^3$, $K = 2\text{Gpa}$, $G = 0,9\text{Gpa}$, $j = 33^\circ$, $\sigma_t = 5\text{ Mpa}$, $c = 3\text{ Mpa}$). I risultati delle simulazioni numeriche, riportate in modo schematico nei diagrammi delle sezioni bidimensionali (fig.7), per i modelli considerati, evidenziano una buona corrispondenza tra i risultati ottenuti ed i valori rilevati in campagna, con spostamenti verticali di circa 12 m, e con una distribuzione dei movimenti lungo i blocchi che generano la massima subsidenza subito sopra il piede del pendio, in corrispondenza dell'asse che collega la porzione inferiore del versante con i giacimenti coltivati. La massima profondità raggiunta dai fenomeni modellati è di 180m dal piano campagna. Un altro massimo secondario di subsidenza è posizionato in cresta del monte, in prossimità del settore di versante più inclinato, dove si rileva anche il massimo spostamento orizzontale e totale di 25 m. (Fig.7b).

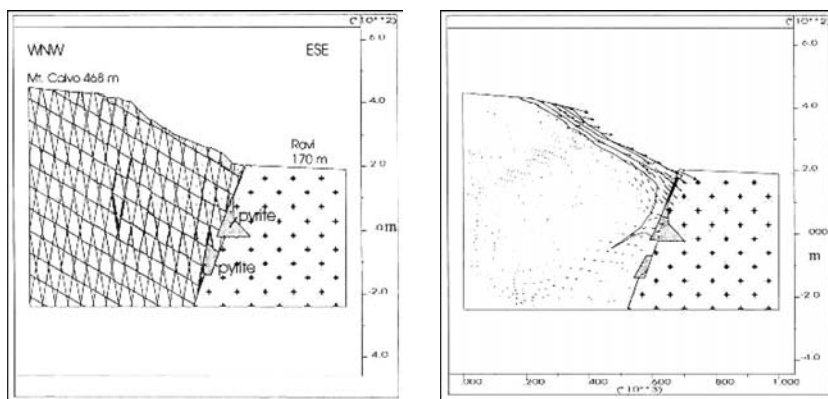


Fig. 7: (a) Sezione principale del modello a blocchi. (b) Grafico dei vettori di spostamento orizzontale del modello continuo.

La distribuzione irregolare degli spostamenti, conferma l'andamento morfologico di più blocchi con movimenti differenziali che genera una zona di spessore variabile con profondità che aumenta rapidamente sotto l'orlo del ripiano sommitale (circa 70m dal piano di campagna), fino alle coltivazioni (180m) con un valore minimo nel centro del versante (50m). Gli spostamenti totali nella simulazione numerica prolungata raggiungono la stabilità intorno a 50 m (valore reputato forse eccessivo rispetto alle osservazioni di superficie).

4. LO SPROFONDAMENTO DI RAVI

Durante la fase preliminare di realizzazione di un intervento di restauro di parte della miniera di Ravi, è occorso uno sprofondamento improvviso, secondo testimonianze in pochi secondi, e con limitate riprese di movimento nei minuti successivi, nel piazzale minerario, posto alla quota di 210 m.s.l.m.. Tale sprofondamento è coinciso grossomodo con un antico pozzo di estrazione, smantellato e con il vano riempito da molti anni (1957), prima della cessazione delle attività di questa miniera. Il pozzo fu chiuso con una soletta di piccolo spessore e senza adeguati sistemi di sostegno del riempimento e l'area del foro, ha fra l'altro coinciso, per parecchio tempo, con la pavimentazione di un piccolo manufatto adibito ad officina. Il crollo ha provocato un primo sprofondamento di circa 25 m. Il pozzo risulta essere collegato alla serie di gallerie di comunicazione della miniera in direzione del monte Calvo e verso Ravi-Valmaggione. Infatti, anche nella zona verso la strada della Serra (in direzione di Gavorrano) esistono fenomeni simili di sprofondamento (fornelli, pozzi, ecc.) non ancora analizzati attraverso sondaggi che, però, potrebbero portare a situazioni simili a quelli rilevati. Da qui l'ipotesi di un collegamento con le subsidenze occorse sul monte Calvo e che hanno dato alla luce alle grandi fessure sommitali. Per approfondire le indagini su potenziali fenomeni di collasso gravitativo in zone ove siano presenti pozzi e fornelli nelle aree minerarie, sono state sviluppate, nel complesso di Ravi Marchi, delle metodologie di prospezione geofisica quali: Georadar-GPR, Sismica Rifrazione e Tomografia elettrica.

5. Georadar – GPR (GROUND PENETRATING RADAR)

Il metodo Georadar-GPR (Ground Penetrating Radar) si basa sull'acquisizione di segnali elettromagnetici emessi da un apparecchio che è costituito da un'antenna emittente e ricevente onde ad una frequenza stabilita in base alla profondità d'investigazione. Più la frequenza di emissione è bassa più la profondità d'investigazione è importante e quindi minore è la capacità di risoluzione. A seconda del tempo di ritorno dell'onda, vengono calcolate le profondità delle varie anomalie. È stato scelto questo metodo per analizzare possibili situazioni di scavernamenti al di sotto di una soletta in cemento che è presente nel piazzale del Pozzo Vignaccio ed avere una precisa immagine dei primi quattro metri di profondità. Per questo tipo di indagini è stata scelta un'antenna da 100 MHz ed acquisizione digitale a 16 bit e 256 campionamenti per scansione su 200nsec. La profondità teorica di investigazione se il sottosuolo fosse stato omogeneo e isotropo sarebbe stata di 20m., in realtà è risultata all'incirca di 4m. La frequenza di scansione è stata posta a 49.5 Scans/sec. Dalle sezioni sono state evidenziate due tipi di anomalie: 1) discontinuità laterali; 2) localizzate. Le prime sono dovute alle variazioni delle caratteristiche dei materiali ad esempio i limiti di solette di cemento che sono evidenziate di solito attraverso variazioni di tipo di risposta; le seconde da muri, strutture metalliche interrati che sono evidenti per le deformazioni dei segnali riflessi. Dopo una prima analisi sono state evidenziate situazioni di anomalie nella zona prossima al crollo formatosi, dove si evidenziano condizioni di variabilità del materiale circostante e possibili cavità laterali prossime alla voragine stessa. Altri tipi di anomalie sono state registrate ai limiti del piazzale verso ovest che potrebbero essere correlate a strutture di fondazioni di un'antica teleferica.

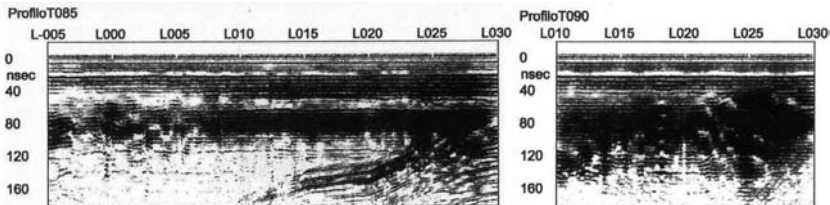


Fig. 8: Profili Georadar NNE-SSO della zona del collasso

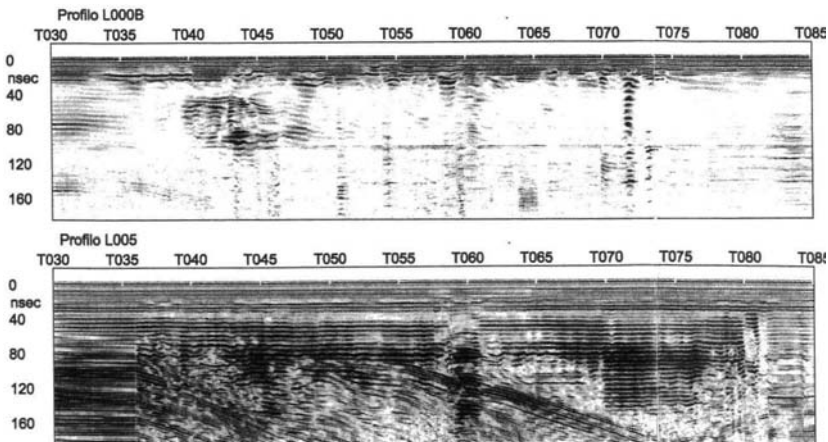


Fig. 9: Profili Georadar ONO-ESE della zona del collasso

6. PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

La sismica a rifrazione, a causa del suo potere di risoluzione importante, ci è sembrato il metodo meglio utilizzabile per valutare la consistenza del materiale presente sulle scarpate laterali del piazzale del pozzo e per avere un quadro completo del grado di fratturazione fino alla profondità di almeno 15 m. È stato utilizzato un sismografo digitale a 12 canali, con geofoni a 14 Hz. L'acquisizione è stata effettuata con campionamento ad intervallo di 200 μ sec e filtraggio con lowpass a 192 Hz al fine di ridurre il rumore sismico legato al traffico nelle strade circostanti.

L'interpretazione è stata divisa in due parti distinte: quella sui sismogrammi e quella sui grafici tempi-distanze ovvero sulle domocrone. Dai profili ottenuti c'è stata una netta differenza tra versante Sud-Ovest e Nord-Est della valle che in effetti sono caratterizzati da differenti litologie. Vi è stata attribuita un'interpretazione con modello a tre strati dove: il primo è caratterizzato da velocità oscillanti tra 300-700 m/s e risulta costituito da materiale detritico superficiale con spessore che varia da 1 metro a 6-7 metri nel tratto finale, cioè a valle della zona del pozzo crollato dove evidentemente vi sono delle strutture sotterranee che dopo il loro abbandono sono state riempite da materiale inerte; il secondo strato è caratterizzato da velocità superiori a 1000 m/s, solo nella parte più orientale si sono misurate velocità leggermente più basse dell'ordine di 800 m/s. Si è arrivati alla conclusione che questo strato potrebbe essere l'antico piano di campagna rialzato dalla quantità di detriti di riporto. Mentre le alte velocità riscontrate nella parte occidentale risultano derivare dalla roccia sottostante più superficiale; il terzo, infine, è il cosiddetto substrato sismico cioè lo strato massimo che è stato possibile riscontrare. È stato individuato a profondità variabili da 3-4 a 20m, nell'area del pozzo crollato.

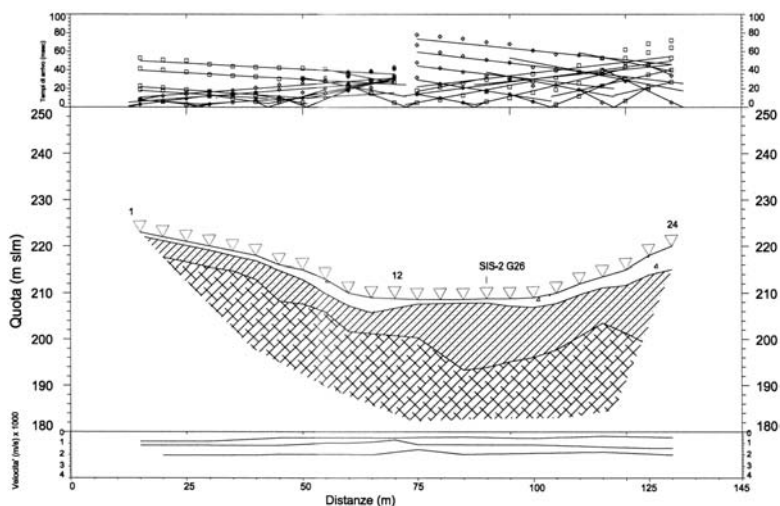


Fig. 10: Modello sismico interpretativo con rappresentazione delle domocrone.

7. PROSPEZIONE GEOELETRICA (POLO-DIPOLO)

Questa metodologia di indagine è mirata alla determinazione della resistività dei terreni nel sottosuolo. È quindi possibile attraverso programmi di inversione cartografare le zone di riempimento, naturale sulle linee di frattura e artificiale nelle aree coltivate e nelle depressioni carsiche, attraverso le differenti resistività, arrivando a profondità dell'ordine dei 15-20 m. In questo tipo di indagine sono stati elaborati i dati con il sistema

Res2div di M.Loke con il quale si sono ottenute varie sezioni tomografiche che illustrano le variazioni di resistività fino a 20 m di profondità. I valori più bassi di resistività sono stati rilevati vicino al pozzo crollato dove sono state registrate, al massimo, delle misure inferiori a $100\Omega.m$ mentre le misure registrate nella roccia compatta hanno potuto superare anche i $1000\Omega.m$. È interessante, tuttavia, la disposizione delle zone a bassa resistività che sono localizzate parallelamente alla direzione della valle.

Risulta particolarmente significativo il fatto che i tre metodi geofisici utilizzati nella zona di crollo hanno fornito una sovrapposizione di segnali anomali convergenti. Infatti, si nota un'elevata percentuale di anomalie nel GeoRadar, un evidente aumento di spessore dei terreni superficiali, una notevole diminuzione della velocità sismica dello strato intermedio e la presenza di zone conduttive localizzate in maniera parallela e allineate secondo le direzioni delle strutture principali della zona. Non sono state pertanto rilevate situazioni di potenziali crolli nelle aree interessate dagli interventi per la realizzazione del lotto di Parco minerario di Ravi Marchi.

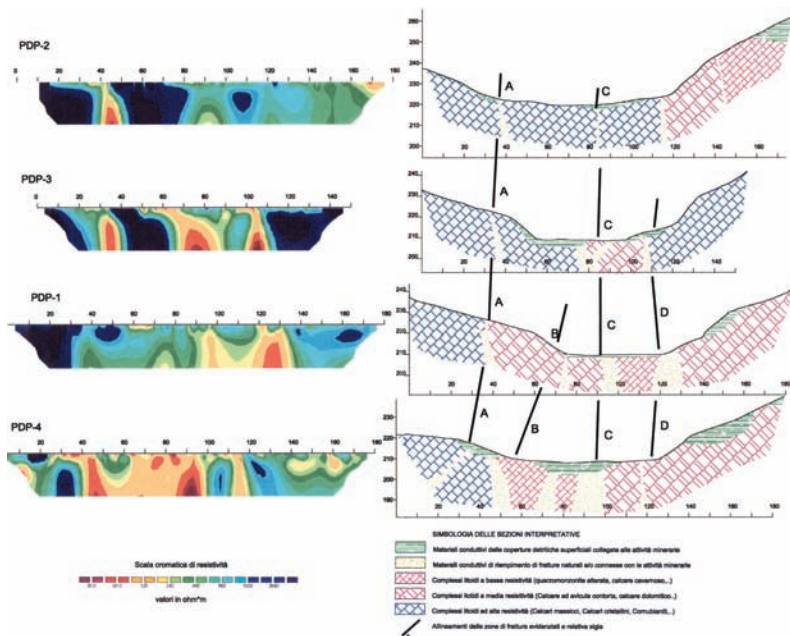


Fig. 11: Modello tomografico di M.Loke e modelli interpretativi.

CONCLUSIONI

L'area mineraria di Gavorrano è oggetto di numerosi interventi volti alla valorizzazione del territorio, ove la sua riconversione in parco minerario e naturalistico costituisce il volano di importanti iniziative di sviluppo basate sulla storia e l'identità dei luoghi, con anche la nascita di attività di tipo culturale e tecnico-scientifico. La realizzazione degli interventi è tuttavia subordinata alla messa in sicurezza ed al ripristino ambientale. Lo studio delle situazioni di dissesto presenti (subsidenza, sprofondamenti) ha quindi indicato, attraverso tecniche di indagine basate sulla ricostruzione storica (archivi, mappe minerarie), rilievi di superficie, la modellazione dei dati geomorfologici, geomeccanici, l'integrazione di prospezioni geofisiche, una metodologia che permetta l'individuazione delle zone a rischio da monitorare. Le indagini finora effettuate, da integrare in taluni casi con altre tecniche geofisiche, quali la microgravimetria, hanno pertanto "tarato"

quei parametri utili ad estendere le analisi su tutto il territorio minerario ed alla programmazione degli idonei interventi di monitoraggio (con strumenti in sito o sotterranei, metodi telerilevati, quali interferometri radar etc.) e di bonifica.

BIBLIOGRAFIA

- ARISI ROTA F., BRONDI A., DESSAU G., BRANZINI M., STEA B., VIGHI L. (1971). - I giacimenti minerari. In: *La Toscana Meridionale.*, Rend. Soc. It. Min. Petr., 27, 357-559.
- BERTINI M., CENTAMORE E., JACOBACCI A., NAPPI G. (1969). - Note illustrative della Carta Geologica d'Italia F127 Piombino. Servizio Geologico d'Italia, 66 p.
- BROWN E.T., FERGUSON G.A. (1979) - Progressive hangingwall caving at Gath's mine, Rhodesia. *Trans. Inst. Min. Met.*, 88, A92-105.
- CROSTA G., GARZONIO C.A., (1996). - Subsidence and slope deformation phenomena in the Gavorrano mining area (Tuscany, Italy). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 19:315-323. HOEK E., 1974. Progressive caving induced by mining and inclined orebody. *Trans. Inst. Min. Met.*, 83, 133-139.
- CROSTA G., GARZONIO C.A., MERLO P., AFFUSO A.M (2001) - Un esempio di subsidenza indotta dall'attività mineraria : il "Sinkhole" del Monte Calvo (Gavorrano, Toscana). *Atti Convegno Sinkhole, Regione Toscana*, 135-153.
- FORRESTER D.J., WHITTAKER B.N., (1976) - Effects of mining subsidence on colliery spoil heaps. I. Mining subsidence and geotechnical aspects of spoil heaps and their foundations. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abs.*, 13, 113-120.
- FORRESTER D.J., WHITTAKER B.N., (1976) - Effects of mining subsidence on colliery spoil heaps - II. Deformational behaviour of spoil heaps during undermining. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 13, 121-133.
- GARZONIO C.A., CENSINI G. (2000) - Indagine geologica per la messa in sicurezza dell'area mineraria di Ravi-Marchi. *Relazione professionale, Comune di Gavorrano.*
- GARZONIO C.A., AFFUSO A.M.G. (2004). - Hydrogeological problems for the rehabilitation and re-utilisation of the water resources of the mining area of Gavorrano (Italy). *Journal of Environmental Geology, special issue XXXII IAH & VI ALHSUD Congress, Springer-verlag.* 16pp.
- ITASCA, (1993). - UDEC: User Manual v.2. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- JONES D.B., SIDDLE H.J., REDDISH D.J., WHITTAKER B.N., 1991 - Landslides and undermining: slope stability interaction with mining subsidence behaviour. *Proc. 7th Int. Symp. ISRM, Aachen*, 893-898.
- MERLO P., (1998). - Problemi geologico tecnici in aree minerarie dimesse: recupero, stabilità e nuovi campi di interesse. *Università degli studi di Milano, Tesi di Laurea inedita.*
- SAMMARCO O., (1995). - Geometria ed idrogeologia di reti minerarie quali fattori che limitano o favoriscono il riutilizzo di miniere abbandonate. *L'industria mineraria*, 16,5:14-20.