

SESSIONE 5
CASI DI STUDIO:
SPROFONDAMENTI
NELL'AMBIENTE ANTROPIZZATO

SPROFONDAMENTI CONNESSI A CAVITÀ ANTROPICHE NELLA REGIONE PUGLIA

*di Barnaba F.¹, Caggiano T.², Castorani A.², Delle Rose M.¹, Di Santo A.R.²,
Dragone V.¹, Fiore A.², Limoni P.P.¹, Parise M.¹ & Santaloia F.¹*

ABSTRACT

Development of sinkholes in urban and rural area of Apulia (S Italy) is certainly one of the main hazards in the region. Related both to natural and anthropogenic cavities, sinkholes pose serious problems as regards safeguard of the territory, and have recently been the object of interest by mass media and population. For instance, the sinkholes at Marina di Lesina, the Alliste sinkhole in February 2004, the sinkhole of Via Firenze at Gallipoli on March 29, 2007, the several sinkholes in the Altamura municipality.

The present work illustrates the research activities carried out by the Basin Authority of Apulia and the Institute of Research for the Hydrogeological Protection (IRPI) of CNR, aimed at predisposing an updated list of the Municipalities of Apulia Region interested by anthropogenic cavities, and at performing detailed studies about development of the underground cavities, and the likely failures induced. The present work, therefore, does not take into consideration sinkholes directly linked to presence of natural caves.

An accurate inventory of the anthropogenic cavities in the region has been created, starting from the list by the local caving federation (FSP). The 564 man-made cavities have been analyzed, while detailed historical, archival and bibliographical researches, in turn integrated by interviews with the responsables of the Technical Offices, were carried out. A survey form has been created to collect and analyze the information on the inventoried cavities; in such form, particular focus was given to those information useful to preliminarily evaluate the susceptibility to failures of the examined sites, also in relation to presence of elements at risk above the cavities, or in their immediate proximity. The first phase of work allowed to obtain a regional framework of knowledge that was useful to select ten municipalities where to perform analysis at a greater detail. These consisted of detailed geological and morphological descriptions, analysis of typology and distribution of the artificial cavities, evaluation of the overall stability in the areas affected by their presence, and description of the engineering works realized in the past, where present. In addition, three specific sites have been individuated to carry out further topographic surveys, and geological-structural analysis as well.

All this work allowed to identify those areas in the regional territory that are mostly threatened by likely development of sinkholes related to anthropogenic cavities; further information on about three hundred other cavities have been then found, in many cases being related to systems of cavities rather than to single caves. This also stresses the very high

1 CNR-IRPI, Bari

2 Autorità di Bacino della Puglia

number of man-made cavities in the region (estimated on the order of some thousands), and the need to continue studying sinkholes related to anthropogenic cavities, in order to contribute to mitigation of the related risk.

RIASSUNTO

L'apertura di sprofondamenti o voragini in aree urbane e rurali della Puglia è certamente uno dei pericoli naturali che maggiormente colpiscono il territorio regionale. Connessi sia a cavità carsiche di origine naturale, che a cavità artificiali scavate dall'uomo in epoche e per finalità diverse, gli sprofondamenti pongono seri problemi di salvaguardia del territorio, e recentemente sono stati più volte all'attenzione dell'opinione pubblica. Basti ricordare, in tal senso, gli eventi degli ultimi anni a Marina di Lesina, il sinkhole di Alliste nel febbraio 2004, lo sprofondamento di Via Firenze a Gallipoli il 29 marzo 2007, le voragini nel territorio di Altamura. Il presente contributo illustra le attività di ricerca svolte nell'ambito di una Convenzione tra l'Autorità di Bacino della Puglia e l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) del CNR, finalizzata alla predisposizione dell'elenco aggiornato dei Comuni della Regione Puglia, interessati da cavità antropiche, nonché ai relativi approfondimenti sullo sviluppo delle cavità e su eventuali fenomeni di dissesto ad esse connessi. Sono pertanto esclusi da questa nota gli sprofondamenti direttamente o indirettamente legati a presenza di cavità naturali.

E' stato eseguito un accurato censimento delle cavità antropiche sul territorio regionale, a partire dall'elenco a cura della Federazione Speleologica Pugliese. Il censimento di tali cavità (in numero di 564) è proceduto di pari passo ad altre fasi della ricerca, consistenti in approfondimenti di carattere storico, bibliografico e cronachistico mediante l'analisi di letteratura specifica sulle cavità artificiali, integrati a loro volta da contatti con i competenti Uffici Tecnici Comunali. Una apposita scheda di censimento è stata implementata allo scopo di raccogliere, catalogare e analizzare le notizie relative alle cavità artificiali da censire; in tale scheda, di particolare rilevanza sono le informazioni tese a fornire i primi elementi relativi alla valutazione della suscettibilità a dissesto del sito in esame, anche in relazione all'esistenza o meno nelle immediate vicinanze di strutture antropiche ed altri elementi a rischio. Nel corso delle attività connesse alla fase iniziale di lavoro si è andato delineando un quadro conoscitivo che ha consentito di operare la selezione dei territori comunali sui quali procedere con maggiori approfondimenti. Dieci comuni sono stati pertanto oggetto di studi di maggiore dettaglio, consistenti nella descrizione delle caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio, della tipologia e distribuzione delle cavità artificiali, e nell'analisi del quadro complessivo di stabilità, anche a seguito, laddove esistenti, di interventi di risanamento realizzati in passato. Inoltre, tre siti specifici sono stati poi individuati per l'esecuzione di indagini geologico-strutturali e topografiche dirette. Le attività svolte hanno consentito di pervenire ad un quadro conoscitivo che, seppur non esaustivo, delinea le zone del territorio regionale a maggior rischio di sprofondamenti connessi a cavità antropiche; sono state inoltre raccolte numerose segnalazioni (circa 300) su ulteriori cavità rinvenute nel corso delle ricerche. Va precisato, a tale proposito, che molte di queste si riferiscono non a cavità singole bensì a complessi o sistemi, in qualche caso consistenti anche di alcune decine di cavità, il che ben evidenzia l'enorme numero di strutture antropiche ipogee presenti in regione, e la necessità di ulteriori approfondimenti degli studi ad esse relativi, al fine della valutazione della suscettibilità a fenomeni di *sinkholes* del territorio regionale.

1. DISSESTI CONNESSI A CAVITÀ ARTIFICIALI IN ITALIA

In Italia i dissesti provocati da fenomeni di sprofondamento connessi a presenza di cavità sotterranee (sia naturali che antropiche) sono frequenti ed hanno spesso determinato ingenti danni materiali e, in qualche caso, anche la perdita di vite umane. Ciò nonostante, ad essi è sempre stata data scarsa attenzione, sia da parte della ricerca scientifica che delle amministrazioni locali e statali.

Nel 2001, a seguito di alcuni eclatanti casi di *sinkhole* verificatisi nella seconda metà degli anni '90 (sprofondamento della Piana di Camaiole, 15 ottobre 1995; D'AMATO AVANZI *et alii*, 2002; BUCHIGNANI *et alii*, 2004; sprofondamento del 29 gennaio 1999 in località Bottegone, prov. di Grosseto; BERTI *et alii*, 2002; DEL GRECO *et alii*, 2004), in verità non connessi a cavità artificiali, fu avviata dal Dipartimento della Protezione Civile una specifica attività, mediante un progetto denominato "Rischio Cavità", che intendeva svolgere ricerche ed approfondimenti in materia sull'intero territorio nazionale (CORAZZA, 2004). Successivamente, lo stesso Dipartimento della Protezione Civile, nell'ambito della Convenzione triennale 2003-05 con il Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, finanziò un progetto biennale di ricerca denominato "Progetto *Sinkholes*" che però, dopo poco, venne purtroppo abbandonato per mancanza di fondi.

L'analisi preliminare del quadro conoscitivo emerso nel corso del progetto della Protezione Civile evidenziava come i fenomeni dovuti a cavità antropiche fossero nettamente prevalenti rispetto a quelli dovuti a cavità di origine naturale (794 casi contro 215 nell'intero territorio nazionale). CORAZZA (2004) sottolineava inoltre come, in relazione alle cavità antropiche, esistessero oggettive difficoltà di accessibilità e studio delle situazioni, il che determina la necessità della definizione di criteri tecnico-scientifici *ad hoc* per l'analisi del problema, a partire dalla individuazione delle cavità, la valutazione della effettiva pericolosità, sino alla scelta degli interventi da realizzare, tanto nella fase di emergenza che in quella di prevenzione a medio-lungo termine.

Sulla base dei dati raccolti dal Dipartimento della Protezione Civile, la Puglia risulta tra le regioni maggiormente interessate dai fenomeni di sprofondamento, con 92 casi di dissesto, 58 dei quali imputabili a cavità antropiche e 34 a cavità di origine naturale. Questi numeri (e il dettaglio per ciascuna provincia, riportato in Tabella 1), evidenziano chiaramente che solo una parte estremamente limitata degli eventi effettivamente occorsi sono pervenuti sotto forma di notizie o documentazione al Dipartimento della Protezione Civile.

Tabella 1 - Distribuzione provinciale degli eventi di sprofondamento connessi a cavità naturali ed antropiche in Puglia [dati: Dipartimento Protezione Civile; Corazza, 2004].

provincia	cavità antropiche	cavità naturali	totale
BARI	24	10	34
BRINDISI	1	3	4
FOGGIA	17	8	25
LECCE	14	11	25
TARANTO	2	2	4
Totale	58	34	92

Di recente, a seguito di alcuni eventi di *sinkhole* avvenuti nel territorio regionale, l'attenzione si è particolarmente soffermata su tali fenomenologie, che sono state oggetto di varie iniziative, a carattere amministrativo, di gestione del territorio e scientifico. La competente Autorità di Bacino (AdB Puglia) ha emesso in data 25 luglio 2006 un "Atto di indirizzo per la messa in sicurezza dei territori a rischio cavità sotterranee", nel quale venivano elencate le procedure da seguire per interventi in aree a pericolosità geomorfologica conseguente alla presenza di cavità sotterranee, indicando al contempo anche le analisi da eseguire per la completa caratterizzazione geologica e geotecnica dei siti (FIORE, 2006; FIORE & LANZINI, 2007; CAGGIANO *et alii*, 2007, 2008a, b). Lo stesso Atto di indirizzo presentava un elenco preliminare dei 38 Comuni esposti al pericolo sprofondamento da cavità sotterranea nella Regione Puglia, in aggiunta ad altri che amministrativamente rientrano nelle confinanti regioni Campania e Basilicata, ma che ricadono nelle aree di competenza territoriale della AdB Puglia. Successivamente, a inizio del 2009, l'Autorità di Bacino della Puglia ha avviato uno specifico progetto, a cura del CNR-IRPI, che viene riassunto nel presente lavoro.

Le tipologie di cavità artificiali presenti in Italia sono moltissime: alcune di esse risultano estremamente diffuse, altre sono rare, o tipiche di zone circoscritte del territorio nazionale. Inoltre, alcune tipologie sono indicate con la stessa denominazione in tutta Italia, mentre altre hanno nomi che variano da regione a regione, talvolta anche in funzione dei vari dialetti regionali e/o locali. Da molti anni la Commissione Nazionale Cavità Artificiali della Società Speleologica Italiana si occupa della analisi, catalogazione e gestione dei dati relativi alle varie tipologie di cavità artificiali esistenti sul territorio italiano. Il lavoro svolto dalla Commissione ha consentito di stilare il primo Catasto delle Cavità Artificiali Nazionale, che consta di Catasti Regionali, ciascuno curato dalla Federazione Speleologica di competenza. Al fine di uniformare la raccolta dei dati, e creare quindi un'unica banca dati omogenea, da tempo è stata redatta un'apposita scheda catastale, che comprende tutte le voci utili alla completa identificazione e caratterizzazione della cavità, a cominciare dalla tipologia della cavità, per la quale è stata stabilita una codifica standard comprendente tutte le tipologie di una certa diffusione, che sono state raggruppate per analogie di struttura, in modo da evitare un ridondante numero di casistiche: A) Opere idrauliche; B) Opere insediative civili; C) Opere di culto; D) Opere militari; E) Opere estrattive; F) Vie di transito per usi civili; G) Altre opere non classificate.



Fig. 1 – Esempi di ambienti della civiltà rupestre e ipogei culturali.

Le opere insediative civili costituiscono una delle categorie maggiormente presenti in Italia, specialmente nelle regioni dell'Italia meridionale dove si sviluppa la cosiddetta “civiltà rupestre” (FONSECA, 1970, 1980; FONSECA *et alii*, 1979). Interi insediamenti, con abitazioni di varia tipologia e funzionalità, caratterizzano ad esempio ampi territori a cavallo tra Basilicata e Puglia nelle aree di affioramento delle calcareniti plio-pleistoceniche (LAUREANO, 1993, 1995; COTECCHIA & GRASSI, 1997), ma sono diffusi anche in altre regioni d'Italia meridionale. In connessione alla civiltà rupestre, e in particolare alla frequentazione di cavità artificiali da parte di monaci basiliani, la Puglia presenta numerosissime cavità artificiali con funzione di luoghi di culto (DI BENEDETTO *et alii*, 1990). Il panorama delle cripte e chiese ipogee apulo-lucane (FONSECA, 1980, 1991; FALLA CASTELFRANCHI, 1991; DELL'AGUILA & MESSINA, 1998) è noto agli studiosi di tutto il mondo, sia per la ricchezza nel numero di siti che per la bellezza degli affreschi che ne adornavano le pareti (Fig. 1). Un patrimonio che purtroppo, privo della necessaria sorveglianza ai fini della salvaguardia, è andato in gran parte via via perduto, a causa delle asportazioni degli affreschi dalle pareti. Solo una piccola parte di tali gioielli è ancora salva, e parzialmente fruibile ai visitatori.

Analogamente, in aree quali Campania, Lazio e Toscana, altri insediamenti erano scavati nei depositi vulcanici tufacei, ad arricchire ulteriormente il panorama nazionale (DEL PRETE & PARISE, 2007). Alle vere e proprie abitazioni si aggiungono poi una serie di altre opere, che comprendono ricoveri per animali, silos per la conservazione di derrate alimentari, frantoi ipogei, colombaie, ecc. Insomma, una notevole varietà di opere, che da decenni sono oggetto di studio da parte di storici ed archeologi, ma che di frequente versano in condizioni di notevole degrado, spesso a causa della facilità di accesso.

2. ANALISI PRELIMINARE DELLE 564 CAVITÀ

L'attività oggetto della convenzione tra AdB Puglia e CNR-IRPI è consistita in tre fasi successive di sviluppo della ricerca: la fase I, a carattere regionale, ha riguardato la raccolta ed analisi critica di materiale e dati sulle cavità note in regione; sulla base di tale documentazione, si è proceduto alla fase II, nella quale sono stati selezionati 10 comuni sui quali svolgere attività a maggiore dettaglio; infine, la fase III è consistita in rilievi topografici e geologico-strutturali originali su tre siti campione. Le attività hanno quindi preso avvio dall'analisi delle 564 cavità artificiali che a gennaio 2009 costituivano il Catasto Regionale, curato dalla FSP. Tali ipogei sono una minima parte delle effettive cavità di

origine artificiale presenti nella Regione Puglia. Come già precedentemente richiamato, le caratteristiche geologiche del territorio pugliese, congiuntamente alle vicende storiche, religiose e culturali che lo hanno interessato, sono alla base dell'elevatissimo numero di cavità artificiali, che può essere stimato almeno in qualche migliaio di grotte.

Una prima analisi delle 564 cavità mostra una ripartizione non omogenea nelle varie province (Fig. 2): la provincia di Taranto è di gran lunga quella con il maggior numero (309 cavità artificiali), seguita a distanza dalle province di Lecce (133) e Bari (112). Brindisi e Foggia sono poco rappresentate, con numeri pari, rispettivamente, a 7 e 3 cavità. Nessuna cavità risulta segnalata nell'elenco FSP per la sesta provincia pugliese, quella di Barletta-Andria-Trani. Sebbene la provincia di Taranto, per la presenza delle numerose gravine che ne caratterizzano il territorio e che hanno costituito l'ideale scenario per lo sviluppo della civiltà rupestre in epoca medioevale, sia indubbiamente il settore apulo a maggiore presenza di cavità, i numeri che riguardano le province di Brindisi e Foggia appaiono decisamente non veritieri. Anche in tali ambiti territoriali, infatti, è nota la presenza di numerose cavità artificiali (ben superiori ai numeri su riportati), sia in relazione alla civiltà rupestre che ad attività antropiche di vario tipo.

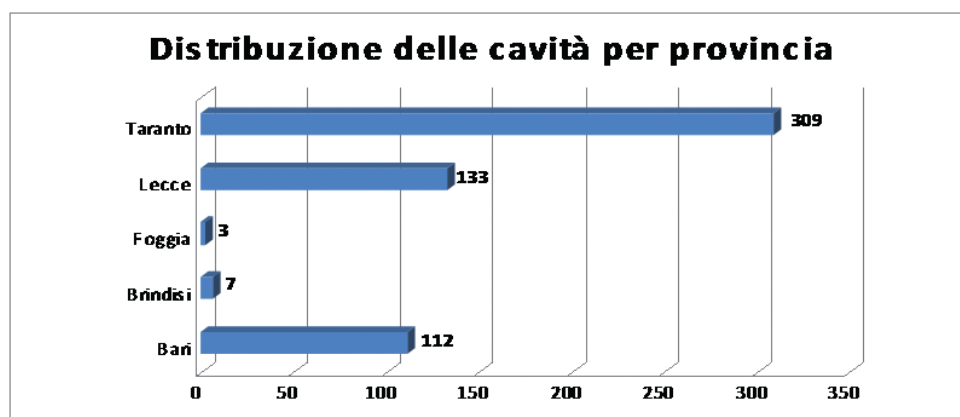


Fig. 2 - Distribuzione provinciale delle 564 cavità dell'elenco di cavità artificiali a cura della Federazione Speleologica Pugliese.

Passando all'analisi a livello provinciale, si nota come la provincia per la quale le cavità artificiali sono presenti nel più alto numero di comuni (28) sia quella di Lecce, seguita da Taranto (20 comuni), Bari (10), e, infine, da Brindisi e Foggia (2 comuni ciascuno). Tra i singoli comuni, quello con il più elevato numero di cavità è Grottaglie, in provincia di Taranto (149). A seguire, ma molto distanziati, Gravina di Puglia (58), Alessano (35), Mottola (34), Massafra e Presicce (22), Castrignano del Capo (18), sino ad arrivare ai numerosi comuni che compaiono con un'unica cavità.

Per quanto attiene la tipologia delle cavità (Fig. 3), così come riportata nell'elenco FSP, la metà (49%) rientra nella categoria delle opere insediative civili (categoria B), seguita da un 36% delle opere di culto, 12% delle opere idrauliche, sino a percentuali non superiori al 2% per le altre categorie. Nel dettaglio, la sotto-categoria maggiormente rappresen-

tata, con 187 cavità, è quella dei luoghi di culto [C.1]; a seguire, gli insediamenti stabili abitativi [B.1, n. 149 cavità] e gli opifici [B.3, n. 95 cavità]. A maggiore distanza, le cisterne [A.4, n. 30 cavità], i ricoveri temporanei [B.2, n. 18 cavità], e via via tutte le altre.

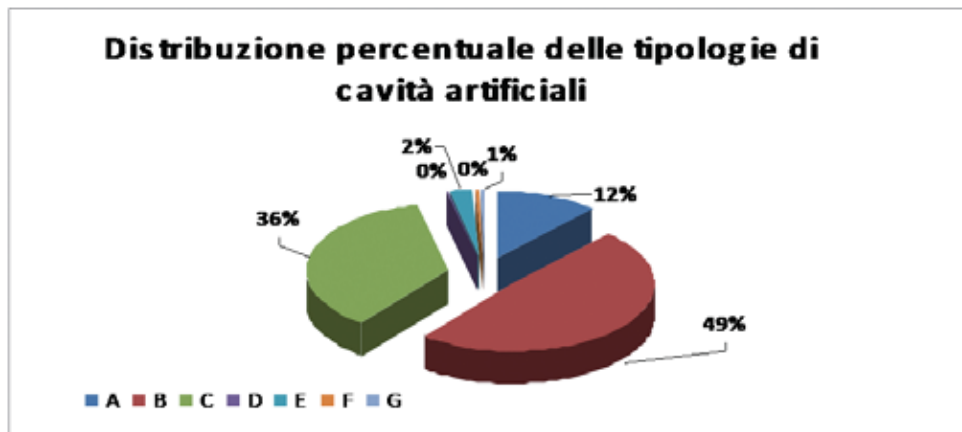


Fig. 3 – Tipologia delle 564 cavità dell'elenco di cavità artificiali a cura della Federazione Speleologica Pugliese. Per la spiegazione delle lettere vedi testo.

Ai fini della verifica delle 564 cavità artificiali riportate nell'elenco FSP, nonché della individuazione di ulteriori cavità sul territorio pugliese, sono state condotte ricerche bibliografiche mediante l'analisi di letteratura specifica sulle cavità artificiali (speleologica, archeologica, storica, geologica, ecc.). In tal senso, in riferimento alle opere di tipo idraulico, di grande utilità è stato il lavoro svolto dalla Commissione Cavità Artificiali SSI nell'ambito del progetto "La Carta degli Antichi Acquedotti Sotterranei". I primi contributi sinora pubblicati nell'ambito di tale progetto, infatti, includono la bibliografia specifica relativa alle singole opere idrauliche dislocate nei vari territori regionali (PARISE, 2007, 2009; PARISE *et alii*, 2009).

Sono state inoltre condotte ricerche bibliografiche e cronachistiche in numerose biblioteche, sia nella regione Puglia che in altre zone del territorio nazionale. La ricerca bibliografica ha consentito la raccolta di una grande quantità di dati, mediante la consultazione di moltissimi volumi e articoli specialistici sulle cavità artificiali.

Gli Uffici Tecnici dei 62 comuni interessati dalla presenza sul proprio territorio di competenza delle cavità comprese nell'elenco FSP sono stati contattati al fine di raccogliere informazioni su tali ipogei, nonché su altre cavità eventualmente a conoscenza del Comune. A seguito di tale contatto, sono stati eseguiti numerosi sopralluoghi, e raccolta specifica documentazione che è andata ad integrare quella derivante dalle altre fonti. Questa fase di lavoro, sebbene notevolmente dispendiosa in termini di tempo, è risultata quanto mai utile a delineare un quadro generale della situazione regionale, e per poter raccogliere gli elementi necessari alla selezione dei 10 comuni da approfondire (vedi fase II di lavoro). Va altresì segnalato che in molti casi si sono ottenute soltanto informazioni generiche, non supportate da documentazione o da atti amministrativi. Appare evidente la generale carenza di conoscenza degli Uffici Tecnici dei Comuni della Regione Puglia in

merito alla presenza di cavità artificiali sui territori di competenza, a conferma, purtroppo, di quanto già verificato dal CNR-IRPI e da altri Enti di Ricerca anche nel corso di ricerche relative a eventi di dissesto idrogeologico in altri territori dell'Italia meridionale (CALCATERRA & PARISE, 2001).

In particolare, appare alquanto sorprendente come un paese come l'Italia, continuamente soggetto ad eventi di dissesto di varia natura (frane, sprofondamenti, alluvioni, ecc.) non conservi memoria, a livello delle amministrazioni locali, degli episodi avvenuti, anche in relazione ad eventi di pochi anni fa. La mancanza di memoria storica è il primo elemento che concorre all'aumento della vulnerabilità dell'ambiente antropizzato, e del rischio conseguente in occasione di futuri eventi (VARNES, 1984; EINSTEIN, 1988; FELL, 1994).

Le varie attività di lavoro hanno consentito la raccolta di numerose segnalazioni di cavità ipogee, che si sono aggiunte a quelle contenute nell'elenco FSP, e che sono derivate da: informazioni dagli Uffici Tecnici dei Comuni; rilievi CNR-IRPI; analisi della letteratura, sulla base delle ricerche bibliografiche espletate. Nel complesso, sono state raccolte ulteriori 297 segnalazioni, ma va precisato che molte di esse si riferiscono a complessi di cavità (in qualche caso, anche alcune decine). Ancora una volta, questo dato indica l'enorme diffusione delle cavità ipogee di origine antropica in Puglia e la necessità di proseguire gli studi avviati con il presente lavoro. In particolare, ciò risulta indispensabile per alcune tipologie di cavità individuate: innanzitutto, le cave sotterranee, che sembrano rappresentare il tipo di cavità antropica che pone i problemi di maggiore rischio per l'antropizzato, a causa della loro estensione e della vicinanza agli abitati urbani, se non addirittura dell'ubicazione delle cave ipogee al di sotto degli stessi. La distribuzione provinciale delle altre cavità individuate (Fig. 4), in aggiunta a quelle contenute nell'elenco FSP, mostra una prevalenza della provincia di Lecce con 154 segnalazioni, seguita da quelle di Taranto, Brindisi e Bari con, rispettivamente, 63, 38 e 36 casi, e dalla provincia di Foggia con 5 segnalazioni. Infine, una sola segnalazione, ma di grande importanza, riguarda la provincia di Barletta-Andria-Trani: si tratta infatti delle cave ipogee di Canosa di Puglia, presenti in ampi settori del territorio canosino e da tempo oggetto di interventi di sistemazione, a causa di numerosi casi di dissesto verificatisi anni addietro (SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA, 1989).

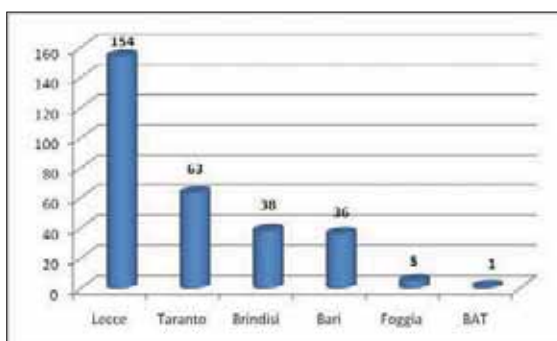


Fig. 4 - Distribuzione provinciale delle ulteriori cavità artificiali individuate nel corso della fase I, in aggiunta a quelle dell'elenco FSP.

Al fine di raccogliere, catalogare e analizzare le notizie relative alle 564 cavità artificiali da censire, è stata approntata ed implementata una specifica scheda, che fosse di facile consultazione ma allo stesso tempo contenesse al suo interno tutte le notizie di interesse, e, in particolare, gli elementi utili ai fini della valutazione della stabilità delle cavità artificiali in esame. Un esempio della scheda di censimento è riportato in figura 5.

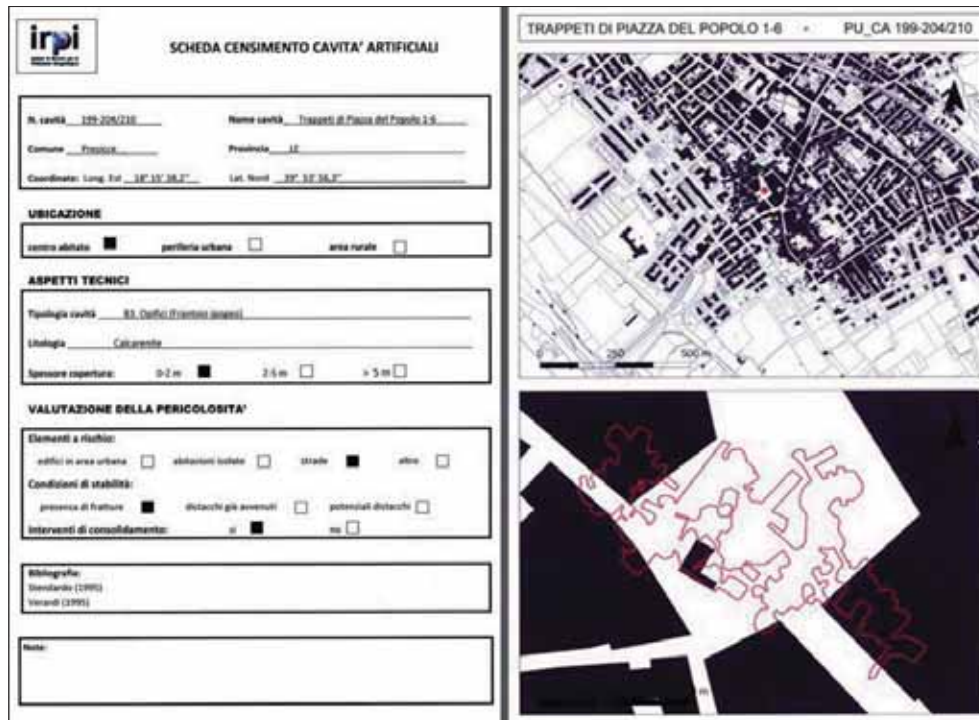


Fig. 5 - Esempio di scheda di censimento elaborata dal CNR-IRPI.

Il primo quadro della scheda contiene il numero della cavità e la sua denominazione, in aggiunta alla provincia ed al comune in cui essa ricade, ed alle coordinate geografiche. Segue poi il quadro denominato "Ubicazione", all'interno del quale si forniscono informazioni sul posizionamento della cavità rispetto all'antropizzato, distinguendo tre possibilità, relative a: posizione i) nel centro abitato, ii) in periferia di un abitato, e iii) in zona rurale. Il quadro "Aspetti tecnici" comprende informazioni sulla tipologia della cavità, distinta secondo le categorie e sottocategorie stabilite dalla Commissione Cavità Artificiali della SSI. Viene inoltre indicata la litologia in cui è stata scavata la cavità, e si forniscono informazioni sullo spessore della copertura al di sopra della volta, suddiviso in tre classi: spessore da 0 a 2 metri, da 2 a 5 m, e maggiore di 5 metri. Il quadro "Stabilità" della scheda comprende una serie di informazioni tese a fornire i primi elementi relativi alla valutazione della suscettibilità a dissesto del sito in esame. Vanno quindi indicati gli elementi a rischio eventualmente presenti (distinti in edifici in area urbana, abitazioni isolate, strade, o altro), si forniscono indicazioni sulle condizioni reali di instabilità, in base alla osservazione o meno di fratture, di distacchi già avvenuti (blocchi

crollati, zone sorgenti di distacchi, ecc.), o di potenziali futuri distacchi, e, infine, vengono indicati eventuali lavori di consolidamento riconoscibili all'interno della cavità.

Gli ultimi quadri della scheda riguardano la bibliografia (dove saranno elencati i lavori che hanno trattato la cavità artificiale in esame, o le fonti inedite dalle quali sono state tratte notizie in merito) e un campo di note, da utilizzare per fornire ulteriori indicazioni, in aggiunta a quelle sintetiche previste dai campi della scheda.

Ciascuna scheda è integrata da uno stralcio cartografico che riporta la proiezione in superficie dello sviluppo planimetrico della cavità artificiale, in modo tale da localizzarla univocamente all'interno del comune di appartenenza.

Il censimento ha consentito la raccolta di un gran numero di informazioni, aggiornando allo stesso tempo l'elenco FSP, dato che numerose cavità risultano essere state distrutte, o erano mal posizionate, o addirittura inesistenti. Nel complesso, i lavori di raccolta dati e compilazione delle schede sono confluiti in un nutrito database, dal quale possono essere tratte le varie informazioni, e che può essere in futuro aggiornato con l'aggiunta di ulteriori schede relative ad altre cavità artificiali.

Nel corso delle attività connesse alla I fase di lavoro si è andato quindi delineando un notevole quadro conoscitivo a livello regionale, sufficiente alla selezione dei 10 comuni sui quali procedere con maggiori approfondimenti (fase II). I criteri utilizzati per la selezione di tali comuni sono stati alquanto differenziati, ma tutti finalizzati a fornire un dettaglio maggiore su situazioni che potessero comportare problemi per la salvaguardia della pubblica e privata incolumità.

In particolare, i principali criteri di scelta sono stati:

- occorrenza di recenti fenomeni di sprofondamento;
- situazioni di acclarato pericolo per la pubblica e privata incolumità;
- presenza di una significativa quantità di cavità artificiali nell'ambito comunale, a prescindere dalla loro tipologia;
- disponibilità di dati e informazioni utili, provenienti da varie fonti.

In ultima istanza, si è inoltre cercato di operare una selezione anche tenendo conto della distribuzione geografica dei comuni individuati. Le scelte sono pertanto ricadute su 4 comuni della provincia di Bari, 3 della provincia di Taranto e 3 della provincia di Lecce.

Nell'ambito della provincia di Bari, i comuni selezionati sono stati: Altamura, Canosa di Puglia, Gravina in Puglia e Polignano a Mare. Ad Altamura negli ultimi anni sono stati registrati ripetuti episodi di sprofondamento, che hanno richiesto l'intervento immediato delle Autorità competenti al fine di risolvere le situazioni di emergenza ad essi connessi (BERARDI *et alii*, 2009a, b; BUZZANCA *et alii*, 2009). A seguito di tali eventi, è stato istituito un Nucleo di Coordinamento Tecnico che, dal mese di luglio 2008, segue periodicamente l'evolversi della situazione ed ha come compito primario la validazione degli studi ed indagini finalizzate al raggiungimento di una conoscenza di dettaglio delle cavità presenti nel territorio comunale.

Canosa di Puglia è uno dei centri urbani più noti in regione per la storica presenza di cavità sotterranee al di sotto del nucleo urbano, che in passato hanno provocato notevoli danni (SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA, 1989; CHERUBINI *et alii*, 1993), e che già da anni sono oggetto di dettagliati censimenti e di notevoli interventi di risanamento.

Analogamente, il centro urbano di Gravina in Puglia presenta un elevatissimo numero di cavità artificiali (NARDONE, 1923; PARISI, 2006), alle quali si aggiungono i numerosi insediamenti rupestri della zona prossima al centro abitato e delle aree rurali (Fig. 6).



Fig. 6 – Cavità artificiali sui fianchi del Torrente Gravina, al margine occidentale del centro abitato di Gravina in Puglia. Il ponte-canale visibile a destra nella foto è la parte terminale dell'acquedotto "Sant'Angelo - Fontane della Stella" (Bixio et alii, 2007).

Polignano a Mare è una delle situazioni del territorio pugliese in cui con maggiore evidenza si sommano gli effetti connessi alla concomitante presenza di cavità naturali ed artificiali nel sottosuolo (GRECO *et alii*, 1991; FAVALE, 1994). Data la elevata vocazione turistica della cittadina, e la prossimità di gran parte delle cavità alla falesia costiera, le problematiche di instabilità risultano ancor più degne di approfondimento.

Nell'ambito della provincia di Taranto, i comuni selezionati sono stati: Grottaglie, Laterza e Massafra. L'abitato di Grottaglie, oltre ad essere, tra i comuni presenti nell'elenco FSP, quello con il maggior numero di cavità, è caratterizzato da notevole diffusione di ambienti ipogei (SANNICOLA, 1997; DE MARCO *et alii*, 2004; MARANÒ, 2006), che ad esempio costituiscono nel complesso il noto Quartiere delle Ceramiche, una delle maggiori attrattive della cittadina. In tale quartiere la quasi totalità delle botteghe artigianali dedite alla produzione e vendita di ceramiche si svolge, almeno in parte, negli ambienti ipogei modificati e/o scavati dall'uomo nel corso dei secoli.

Laterza, al pari di Gravina in Puglia, è un centro abitato nel quale si riscontra un'elevata frequenza di cavità artificiali al di sotto del centro storico, specialmente a carattere sacro (DELL'AQUILA, 1989). La grande varietà tipologica delle stesse, congiuntamente alla disponibilità di studi specifici svolti in passato da tecnici per conto dell'Amministrazione Comunale (CASAVOLA & TRACUZZI, 1989; CASAVOLA, 2006, ne hanno suggerito l'inclusione tra i 10 comuni oggetto della II fase di analisi.

Massafra è un centro di grande importanza per le cavità artificiali. La cittadina è attraversata in senso longitudinale da varie gravine (Fig. 7), ed è stata costruita e sviluppata nelle

varie fasi storiche adattandosi alla morfologia dei luoghi (PECORELLA *et alii*, 2004). Essa si presta pertanto alla descrizione del rapporto instauratosi tra l'uomo e l'ambiente, a partire dal vivere in grotta, attraverso i vari utilizzi delle diverse tipologie di ambienti ipogei presenti. Tra questi, vanno ricordati anche i luoghi di culto, che rendono Massafra uno dei centri di maggiore rilevanza in Italia meridionale per la presenza di chiese rupestri.



Fig. 7 - Cavità artificiali a Massafra: a sinistra, una tipica "vicinanza", a destra il complesso rupestre di Santa Marina.

Nell'ambito della provincia di Lecce, i comuni selezionati sono stati: Cutrofiano, Presicce e Gallipoli. Cutrofiano è tra i centri estrattivi di maggiore importanza della Regione Puglia, ed ha in particolare una lunga storia di cave in sotterraneo (TONI & QUARTULLI, 1986; TONI, 1990; MAINARDI, 1999). Queste interessano in particolare il settore a sud del centro abitato. L'occorrenza ripetuta di numerosi eventi di sprofondamento avvenuti in passato (il più recente dei quali risale al luglio 2008) evidenzia l'importanza di un'analisi di approfondimento del territorio comunale di Cutrofiano.

Il comune di Presicce è famoso come il "comune dei frantoi ipogei" (STENDARDO, 1995). Esso è infatti un abitato storicamente noto per l'utilizzo di ambienti sotterranei come opifici per la produzione di olio. La presenza di tali cavità artificiali all'interno dell'area urbana ha posto in passato seri problemi alla stabilità del territorio, costringendo l'Amministrazione Comunale ad intervenire con una serie di opere di risanamento e ristrutturazione (DI BARTOLOMEO, 1995; DI BARTOLOMEO & CAZZATO, 2002; Fig. 8).



Fig. 8 - Due immagini di frantoi ipogei a Presicce.

A Gallipoli, l'evento di sprofondamento della cava sotterranea sita in via Firenze, il 29 marzo 2007 (DE DONATIS, 2006/07; DELLE ROSE, 2006/07), ha evidenziato le notevoli situazioni di pericolosità del territorio comunale. Queste sono inoltre ancora aumentate dallo stato di degrado dei siti e dall'incuria in essi osservata, nei giorni immediatamente susseguenti l'evento del marzo 2007, ma già segnalata in precedenza in più occasioni.

2.1 III fase

A seguito delle attività di approfondimento della II fase, che hanno riguardato i comuni precedentemente citati, sono stati selezionati tre siti sui quali svolgere gli studi di dettaglio, consistenti in rilievi topografici originali volti alla completa definizione degli ambienti ipogei, e in analisi geologico-strutturali finalizzate alla valutazione preliminare della stabilità. La selezione è stata operata sulla base dei criteri già utilizzati per la fase II, ed ha riguardato tre tipologie diverse di cavità sotterranee. Il primo caso di studio è stato la cava sotterranea di Via Firenze a Gallipoli, direttamente interessata dallo sprofondamento del 29 marzo 2007. La mancanza, a distanza di oltre due anni dall'evento, di una precisa cartografia che mostrasse l'esatto andamento spaziale degli ambienti ipogei, e la loro distribuzione al di sotto dell'edificato, rendeva infatti assolutamente prioritaria l'esecuzione di specifici rilievi al sito.



Fig. 9 - Planimetria della cava sotterranea di via Firenze a Gallipoli.

La situazione risulta infatti particolarmente preoccupante, date le condizioni di gran parte dei pilastri della cava sotterranea, interessati da distacchi, fratture beanti, e notevole alterazione del materiale calcarenitico (Fig. 10), specialmente nella sala di maggiori dimensioni, tra l'altro non interessata da alcun intervento di consolidamento nelle fasi immediatamente successive lo sprofondamento. L'attento rilievo delle fratture presenti nel sotto-suolo, nonché dei distacchi già avvenuti ed incipienti, sono stati alla base dell'impostazione di un sistema di monitoraggio, consistente in distanziometri laser, abbinati a fessurimetri, per la valutazione di movimenti nei siti considerati a maggiore pericolosità (Fig. 10). Il sistema di monitoraggio è completato da una serie di sensori per la misura di temperatura ed umidità relativa, al fine di caratterizzare il microclima degli ambienti ipogei, e valutarne gli effetti eventuali sul degrado delle proprietà fisico-meccaniche della calcarenite. Va segnalato che la cava di via Firenze non è un caso isolato a Gallipoli, dove sono presenti numerosi altri ambienti ipogei, anche al di sotto del centro abitato; già in passato si erano avute segnalazioni della pericolosità connessa a tali cave (FIORITO & ONORATO, 2004), ma nessun provvedimento era stato preso prima dell'evento del Marzo 2007.



Fig. 10 - Cava di via Firenze a Gallipoli: evidenze di instabilità su pilastri, crolli lungo una parete, vista generale di una delle sale di maggiori dimensioni.

Il secondo sito prescelto per la fase III è stato un frantoio ipogeo sito nel comune di Grottaglie, che era stato interessato nel 1995 da crollo di una parte della volta. Da allora puntellato (Fig. 11), e non soggetto ad altri interventi di risanamento, il frantoio è stato oggetto di rilievi topografici e geologico-strutturali, anche al fine di valutarne le attuali condizioni statiche. I frantoi sono tra la tipologia più diffusa in alcune zone del territorio pugliese (REGIONE PUGLIA, 1993; MONTE, 1995), a causa della notevole diffusione della cultura di produzione olearia, che veniva quasi sempre svolta in ambienti ipogei, anche di notevoli dimensioni.

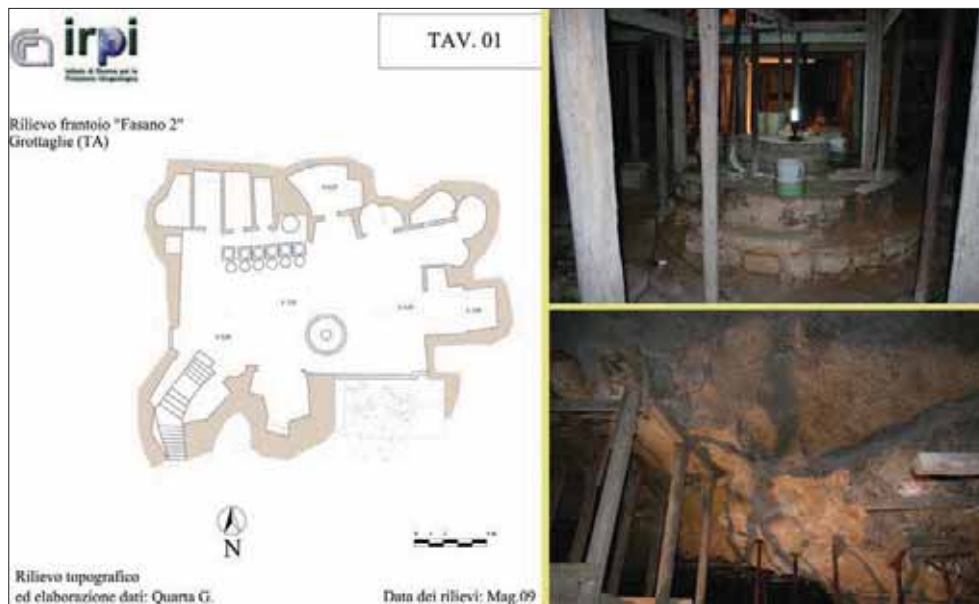


Fig. 11 - Rilievo ed interni del frantoio di Grottaglie.

Infine, la terza cavità è stata individuata nel comune di Gravina in Puglia, uno dei comuni maggiormente interessato da presenza di ambienti ipogei nel centro storico. In questo caso, la cavità rilevata non aveva alcuna storia di dissesti, né presentava elementi di pericolo, ma è stata presa in esame al fine di caratterizzare una delle più ricorrenti tipologie di cavità a Gravina in Puglia, costituita da ambienti ipogei su più livelli, con annessa una ampia cisterna sotterranea.

3. CONCLUSIONI

Le attività di ricerca sulle cavità artificiali svolte da CNR-IRPI e AdB Puglia hanno evidenziato come l'argomento *sinkhole* sia decisamente di interesse per il territorio regionale, non solo in riferimento agli sprofondamenti di origine naturale (PARISE, 2008b). L'analisi dei dati ricavati dal censimento mostra una situazione che presenta numerosi casi di pericolo, connesso ad eventi di instabilità già avvenuti o incipienti, che potrebbero mettere a rischio infrastrutture viarie, sottoservizi, ed abitazioni. I casi più preoccupanti sono stati osservati in relazione alla tipologia di cave sotterranee, che già in passato avevano

causato in più settori della Puglia lo sviluppo di *sinkhole*, talora anche con il diretto coinvolgimento dell'ambiente antropizzato (BRUNO & CHERUBINI, 2005; PARISE *et alii*, 2008; PARISE & DELLE ROSE, 2009; DE PASCALIS *et alii*, 2010). Anche di recente, gli eventi di *sinkhole* che hanno prodotto maggiori danni sono da ricondurre a questa categoria di cavità artificiali (Fig. 12).

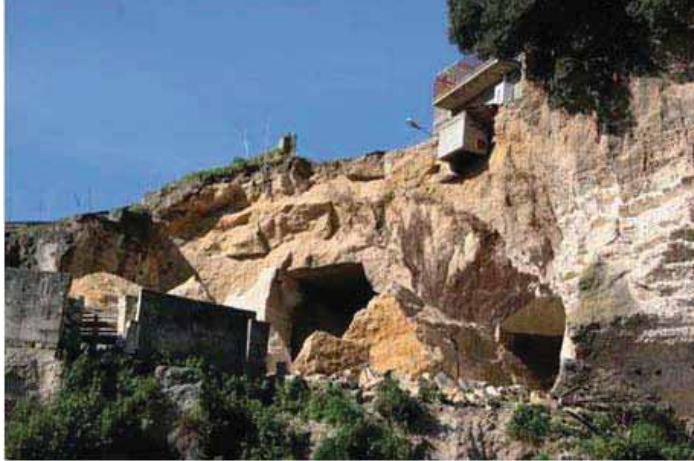


Fig. 12 - Lo sprofondamento di via Pescarella a Ginosa, avvenuto nel febbraio 2009 al di sopra di una estesa cava sotterranea.

Una situazione di notevole complessità quale quella pugliese, regione nella quale sono presenti almeno alcune migliaia di cavità artificiali, necessita chiaramente di proseguire sulla strada intrapresa dalle attività descritte nel presente lavoro. E' soltanto mediante la maggiore conoscenza del territorio, il censimento di tutte le cavità esistenti, e la valutazione delle situazioni di pericolosità che si potrà pervenire ad una reale mitigazione del rischio da *sinkhole* nella regione Puglia. Tra le attività che andrebbero perseguite, le priorità a nostro avviso sono la conoscenza dell'andamento nel sottosuolo delle cavità artificiali, l'analisi dei meccanismi di degrado delle proprietà fisico-meccaniche dei materiali (AVERSA & EVANGELISTA, 1998; ZUPAN HAJNA, 2003; ANDRIANI, 2006) e la comprensione dei meccanismi di instabilità nel sottosuolo (WALTHAM & LU, 2007; PARISE, 2008a), nonché la relativa propagazione verso la superficie (LOLLINO & PARISE, 2010), sino all'occorrenza di veri e propri sprofondamenti. Il raggiungimento di tali obiettivi consentirà realmente di muovere i primi passi in direzione della prevenzione del rischio, anziché, come attualmente accade, intervenire soltanto successivamente all'occorrenza di eventi che in qualche caso possono anche risultare a carattere catastrofico, sia per i danni prodotti che per eventuali vittime.

BIBLIOGRAFIA

ANDRIANI G.F. (2006) - *Considerazioni sugli effetti del weathering in rocce calcarenitiche utilizzate per manufatti di interesse storico e architettonico*. Atti Convegno "Le risorse lapidee dall'antichità ad oggi in area Mediterranea", Canosa di Puglia, 25 - 27 settembre 2006, GEAM, 233-238.

- AVERSA S. & EVANGELISTA A. (1998) – *The mechanical behaviour of a pyroclastic rock: yield strength and “destruction” effect*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **31** (1), 25-42.
- BERARDI C., CAGGIANO T. & FIORE A. (2009a) *Pericolosità geomorfologica da sprofondamenti. L’attività estrattiva storica in sotterraneo: il caso di Altamura (BA)*. 3° Congresso Nazionale AIGA, San Giovanni Valdarno (AR), 25-27 febbraio 2009.
- BERARDI C., BUONAMASSA G., DENORA A., FIORE A., LORUSSO G., PEPE P., WALSH N. & ZACCARIA V. (2009b) *Attività di censimento per la pianificazione nelle aree interessate da cavità antropiche. Il Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS) di Altamura (BA). Un modello lito-tecnico e di comportamento previsionale*. 2° Workshop Int. “Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato”, Roma 3-4 dicembre 2009.
- BERTI G., CANUTI P., CASAGLI N., PRANZINI G. & MICHELI L. (2002) – *Risultati preliminari delle indagini sullo sprofondamento in loc. Bottegone (Grosseto)*. In: *Le voragini catastrofiche. Un nuovo problema per la Toscana*. Ed. Regione Toscana, 242-256.
- BIXIO R., PARISE M., SAJ S. & TRAVERSO M. (2007) – *L’acquedotto sotterraneo di Gravina in Puglia “Sant’Angelo-Fontane della Stella”*. *Opera Ipogea*, **1**, 105-112.
- BRUNO G. & CHERUBINI C. (2005) – *Subsidence induced by the instability of weak rock underground quarries in Apulia*. *Giornale di Geologia Applicata*, **1**, 33-39.
- BUCHIGNANI V., LOMBARDI S., RIZZO S. & TORO B. (2004) – *Il sinkhole di Camaiole*. Atti 1° Seminario “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio”, Roma, 20-21 Maggio 2004, 139-157.
- BUZZANCA L., CAGGIANO T., CASTORANI A., FIORE A., DENORA D., DI SANTO A.R., PALERMO M.T. & PELLEGRINO R. (2009) *Sistemi di monitoraggio e caratterizzazione di aree a pericolosità geomorfologica molto elevata per la presenza di cavità antropiche in aree urbanizzate dell’Avampese apulo: i casi di Altamura (BA) e Gallipoli (LE)*. *Geoitalia 2009*, VII Forum Italiano di Scienze della Terra, Rimini 9-11 settembre 2009.
- CAGGIANO T., DI SANTO A.R., FIORE A. & PALUMBO N. (2007) *Attività dell’Autorità di Bacino della Puglia per l’individuazione, il censimento e la pianificazione degli interventi per la messa in sicurezza dei territori a rischio sprofondamento per la presenza di cavità sotterranee*. *Geologi & Territorio*, **4-2006/1-2007**, 32-34.
- CAGGIANO T., FIORE A. & PALERMO M.T. (2008a) *Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione ed all’attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto connesso alla presenza di cavità antropiche nei pressi di via Firenze nell’abitato del Comune di Gallipoli (LE)*. *Fondi Por-Puglia 2000-2006*.
- CAGGIANO T., FIORE A. & PELLEGRINO R. (2008b) *Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione ed all’attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto connesso alla presenza di cavità antropiche in località “Fornaci-Chiancone” nell’abitato del Comune di Altamura (BA)*. *Fondi Por-Puglia 2000-2006*.
- CALCATERRA D. & PARISE M. (2001) – *The contribution of historical information in the assessment of the landslide hazard*. In: GLADE T., ALBINI P. & FRANCES F. (a cura di), *The use of historical data in natural hazard assessment*. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Kluwer Academic Publishers, **17**, 201-217.
- CASAVOLA E. (2006) – *Le cavità artificiali del centro antico di Laterza. Indagine geotecnica*. *Cultura Ipogea*, p. 31-40.

- CASAVOLA E. & TRACUZZI S. (1989) – *Indagine geologico geotecnica sul centro storico. All. B. Aggiornamento condizioni statiche fabbricati del centro storico e interventi immediati da eseguire*. L.R. n. 38/1985, Comune di Laterza.
- CHERUBINI C., GERMINARIO S., PAGLIARULO R. & RAMUNNI F.F. (1993) – *Caratterizzazione geomeccanica delle calcareniti di Canosa in relazione alla stabilità degli ipogei*. Atti I Conv. Naz. “Le pietre da costruzione in Puglia: il Tufo Calcareao e la Pietra Leccese”, Bari, 221-230.
- CORAZZA A. (2004) – *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile*. Atti 1° Seminario “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio”, Roma, 20-21 Maggio 2004, 319-330.
- COTECCHIA V. & GRASSI D. (1997) – *Incidenze geologico-ambientali sull’ubicazione e lo stato di degrado degli insediamenti rupestri medioevali della Puglia e della Basilicata*. Geol. Appl. Idrogeol., **32**, 1-10.
- D’AMATO AVANZI G., PUCCINELLI A. & VERANI M. (2002) – *La geologia della Piana di Camaiore in relazione al fenomeno di sprofondamento del 15 ottobre 1995*. In: *Le voragini catastrofiche. Un nuovo problema per la Toscana*. Edizioni Regione Toscana, 154-175.
- DE DONATIS M. (2006/2007) – *La voragine di Gallipoli: primi risultati delle prospezioni geofisiche (GPR) eseguite nell’area*. Geologi e Territorio, **4/2006-1/2007**, 21-24.
- DEL GRECO O., GARBARINO E., OGGERI C. & PIOLI F. (2004) – *Esame del fenomeno di subsidenza del Bottegone (Grosseto)*. Atti 1° Seminario “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio”, Roma, 20-21 Maggio 2004, 347-360.
- DELL’AQUILA C. (1989) – *Laterza sacra*. Manduria.
- DELL’AQUILA F. & MESSINA A. (1998) – *Le chiese rupestri di Puglia e Basilicata*. Mario Adda editore, Bari, 277 pp.
- DELLE ROSE M. (2006/2007) – *La voragine di Gallipoli e le attività di Protezione Civile dell’IRPI-CNR*. Geologi e Territorio, **4/2006-1/2007**, 3-12.
- DEL PRETE S. & PARISE M. (2007) – *L’influenza dei fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione di cavità artificiali*. Opera Ipogea, **2**, 3-16.
- DE MARCO M., FUCCIO M. & SANNICOLA G.C. (2004) – *Archeologia industriale: i frantoi ipogei nel territorio di Grottaglie (Taranto, Puglia)*. Grotte e Dintorni, **8**, 25-44.
- DE PASCALIS A., DE PASCALIS F. & PARISE M. (2010) – *Genesi ed evoluzione di un sinkhole connesso a cavità antropiche sotterranee nel distretto estrattivo di Cutrofiano (prov. Lecce, Puglia)*. Presente volume.
- DI BARTOLOMEO S. (1995) – *Osservazioni tecniche sul consolidamento degli ipogei di Piazza del Popolo*. In: STENDARDO A. (a cura di), *Presicce sotterranea*. Congedo Ed., Galatina, 117-128.
- DI BARTOLOMEO S. & CAZZATO C. (2002) – *Progetto di completamento per il consolidamento statico degli ipogei di Piazza del popolo e zone limitrofe*. Comune di Presicce.
- DI BENEDETTO D., GRECO A. & DEL VECCHIO F. (1990) – *Guida bibliografica di cripte ipogei e insediamenti rupestri della Puglia*. Levante ed., Bari.
- EINSTEIN H.H. (1988) – *Special lecture: landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. Landslides, Lausanne (Switzerland), **2**, 1075-1090.
- FALLA CASTELFRANCHI M. (1991) – *Pittura monumentale bizantina in Puglia*. Milano.
- FAVALE F. (1994) – *Le grotte di Polignano*. Federazione Speleologica Pugliese, 250 pp.

- FELL R. (1994) – *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Canad. Geotechn. Journal, **31** (2), 261-272.
- FIGLIANO A. (2006) *Pericolosità geologica connessa alla presenza di cavità sotterranee. Atto di indirizzo dell'Autorità di Bacino della Puglia*. Geologi & Territorio, **1-2-3**, 3-11.
- FIGLIANO A. & LANZINI M. (2007) *Problematiche di valutazione del rischio di crollo di cavità sotterranee*. Geologi & Territorio, **4-2006/1-2007**, 35-45.
- FIORITO F. & ONORATO R. (2004) – *Le cave ipogee di Colle S. Lazzaro – Gallipoli. Primi studi*. Atti Spelaion 2004, Lecce, 10-12 dicembre 2004, 125-136.
- FONSECA C.D. (1970) – *Civiltà rupestre in terra ionica*. Ed. Bestetti, Roma.
- FONSECA C.D. (1980) – *La civiltà rupestre in Puglia*. In: AA.VV., *La Puglia tra Bisanzio e l'Occidente*, 36-116. Milano.
- FONSECA C.D. (1991) – *Le grotte della civiltà rupestre*. Itinerari Speleologici, **5**, 13-25.
- FONSECA C.D., BRUNO A.R., INGROSSO V. & MAROTTA A. (1979) – *Gli insediamenti rupestri medioevali nel Basso Salento*. Congedo Ed., Galatina, 351 pp.
- GRECO A., DEL VECCHIO F., FAVALE F. & RIZZI I. (1991) – *Nota preliminare sul rilievo di cavità nel sottosuolo del borgo antico di Polignano a Mare (Bari)*. Itinerari Speleologici, ser. II, **5**, 147-153.
- LAUREANO P. (1993) – *Giardini di pietra*. Bollati Boringhieri, Torino, 199 pp.
- LAUREANO P. (1995) – *La piramide rovesciata*. Bollati Boringhieri, Torino, 310 pp.
- LOLLINO P. & PARISE M. (2010) – *Analisi numerica di processi di instabilità in cavità sotterranee e relativi effetti in superficie*. Presente volume.
- MAINARDI M. (1999) – *Cave e cavamonti*. FENEAL-UIL Lecce, Edizioni Del Grifo, 135 pp.
- MARANÒ P. (2006) – *Il problema acqua a Grottaglie: sistemi di raccolta dell'acqua piovana*. Tesi di Laurea, Univ. Studi di Firenze, Fac. Architettura, Dip. Restauro e Conservazione dei Beni Architettonici, relatore Arch. L. Marino, a.a. 2005-06, 268 pp.
- MONTE A. (1995) – *Frantoi ipogei del Salento*. Edizioni del Grifo.
- NARDONE D. (1923) – *Notizie storiche sulla città di Gravina*. Adda Editore, Fondazione Ettore Pomarici Santomasì, V edizione (2007), 387 pp.
- PARISE M. (2007) – *Il Progetto "La Carta degli Antichi Acquedotti Italiani"*. Opera Ipogea, **1**, 3-16.
- PARISE M. (2008a) – *Rock failures in karst*. In: CHENG Z., ZHANG J., LI Z., WU F. & HO K. (a cura di), *Landslides and Engineered Slopes*. Proc. 10th International Symposium on Landslides, Xi'an (China), June 30 – July 4, 2008, **1**, 275-280.
- PARISE M. (2008b) – *I sinkholes in Puglia*. Mem. Descrittive Carta Geol. d'Italia, **85**, 309-334.
- PARISE M. (2009) – *Distribution and characteristics of ancient underground aqueducts in Italy*. IWA Specialty Conference, 2nd Int. Symp. "Water and wastewater technologies in ancient civilizations", Bari, 28-30 May 2009.
- PARISE M. & DELLE ROSE M. (2009) – *Sinkhole development induced by underground quarrying, and the related hazard*. Geophysical Research Abstracts, **11**, 214.
- PARISE M., DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., DONNO G. & INGUSCIO S. (2008) – *Cavità sotterranee a fini estrattivi, e loro connessione con fenomeni di sprofondamento e subsidenza in agro di Cutrofiano (Lecce)*. Atti "Spelaion 2008", Borgo San Celano (FG), 55-69.
- PARISE M., BIXIO R., BURRI E., CALOI V., DEL PRETE S., GALEAZZI C., GERMANI C., GUGLIA P., MENE-
GHINI M., & SAMMARCO M. (2009) – *The map of ancient underground aqueducts: a*

- nation-wide project by the Italian Speleological Society. Proc. Int. Congr. Speleology, Kerrville (Texas, USA), 19-26 July 2009, 3, 2027-2032.*
- PARISI M. (2006) - *Gravina sotterranea*. Tipolitografia D&B Stampagrafica Bongo, Gravina in Puglia, pp. 126.
- PECORELLA G., FEDERICO A., PARISE M., BUZZACCHINO A. & LOLLINO P. (2004) - *Condizioni di stabilità di complessi rupestri nella Gravina Madonna della Scala a Massafra (Taranto, Puglia)*. *Grotte e dintorni*, **8**, 3-24.
- REGIONE PUGLIA (1993) - *Trappeti a grotta di Presicce, Acquarica, Ugento, Felline, Alliste, Racale, Melissano*. Assessorato P.I. e Cultura, C.R.S.E.C. LE/45, Ugento, Grafo 7 editrice.
- SANNICOLA G. (1997) - *Li Tagghiati e li Zuccaturi. Le cave ed i cavatori (Archeologia industriale a Grottaglie)*. Lu Lampiune, **2**, 103-107.
- SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.P.A. (1989) - *Interventi urgenti a salvaguardia della pubblica e privata incolumità. Rilevamento cavità sotterranee della città, studi e indagini geognostiche del territorio. Relazione generale*. Comune di Canosa di Puglia, 170 pp.
- STENDARDO A. (a cura di) (1995) - *Presicce sotterranea*. Congedo Editore, Galatina, 153 pp.
- TONI L. (1990) - *Le cave in sotterraneo di Cutrofiano*. Edizioni Del Grifo, 125 pp.
- TONI L. & QUARTULLI S. (1986) - *Coltivazione di calcareniti in sotterraneo nel comune di Cutrofiano (Lecce)*. Quarry and Construction, febbraio 1986, 23-26.
- VARNES D.J. (1984) - *Landslide hazard zonation - a review of principles and practice*. UNESCO, Paris, 63 pp.
- WALTHAM T. & LU Z. (2007) - *Natural and anthropogenic rock collapse over open caves*. In: PARISE M. & GUNN J. (a cura di), *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: recognition, analysis, and mitigation*. Geological Society of London, special publication, **279**, 13-21.
- ZUPAN HAJNA N. (2003) - *Incomplete solution: weathering of cave walls and the production, transport and deposition of carbonate fines*. Carsologica, Postojna-Ljubljana, 167 pp.

IL CATASTO DELLE CAVE IN SOTTERRANEO, “CCS”, DI ALTAMURA (BA): ATTIVITÀ DI CENSIMENTO NELLE AREE INTERESSATE DA CAVITÀ ANTROPICHE

di Berardi C.¹, Buonamassa G.³, Denora A.⁴, Fiore A.², Lorusso G.³, Pepe P.³, Walsh N.⁵ & Zaccaria V.³

ABSTRACT

The North-East of the city of Altamura's, in the South of Italy (Apulia Region), has been interested in past years by underground excavation of “limestone” for buildings purposes. Actually the speleological survey has interested 12 Km of caves, below an area actually densely populated. The development of the galleries has not followed a rational logic cultivation and resulting an articulated net of caves for geometries and extension with some cave on different levels.

Starting from this information level and comparing geognostic investigation results the Authority of Basin of the Basilicata has delimited that area so that all urban activities have to be done respecting the rules of Plan for the Defense from the Hydrogeologic Risk [the area is 127 hectares wide and has been interested by numerous sinkholes]. Following some recent collapses, the speleologists started survey activities to get the most important layer to be implemented in the Geographic Information System supporting the Cavities Cadastral Office.

RIASSUNTO

La periferia nord-orientale dell'abitato di Altamura, in Provincia di Bari, è stata sede, in passato, di attività estrattiva in sottterraneo per la produzione di concii calcarenitici. Attualmente, a testimonianza dell'attività estrattiva, resta una rete di gallerie con sviluppo lineare noto di circa 12 Km, al di sotto di un'area oggi densamente antropizzata. Lo sviluppo delle gallerie non ha seguito una razionale logica di coltivazione, dando luogo ad una rete caveale estremamente articolata, sia per geometria che per estensione, con numerosi tratti in sovrapposizione.

Sulla scorta di tali evidenze, e sulla base di un'accurata interpretazione della stratigrafia dei luoghi, l'Autorità di Bacino (AdB) della Basilicata ha perimetrato e normato, nell'ambito del proprio Piano per la Difesa dal Rischio Idrogeologico, un'ampia area (127 ettari) soggetta a sprofondamenti diffusi. A seguito di alcuni recenti crolli è stato avviato il rilievo diretto delle gallerie ispezionabili, condotto da un esperto team di speleologi, e sono stati

1 Autorità di Bacino della Basilicata

2 Autorità di Bacino della Puglia

3 Comune di Altamura (BA)

4 CARS (Centro Altamurano Ricerche Speleologiche)

5 Dipartimento di Geologia e di Geofisica, Università degli Studi “Aldo Moro”, Bari

approntati idonei strumenti conoscitivi e di indagine al fine di pervenire ad una puntuale conoscenza dello stato dei luoghi ed alla redazione di un database, per il supporto all'attività tecnico-amministrativa, dinamicamente implementabile ed aggiornabile mediante l'utilizzo di tecniche GIS.

1. PREMESSA

L'attività estrattiva in sotterraneo è stata una pratica comune e diffusa in diverse aree della Puglia. In particolare il "tufo calcareo" (Calcareenite di Gravina) è stata una delle rocce maggiormente utilizzate nel campo dell'edilizia in quanto tenera, leggera e al tempo stesso sufficientemente resistente (ANDRIANI & WALSH 2002, 2003 e 2006). Le aree di cava, per anni abbandonate, sono state di frequente riscoperte in seguito a fenomeni di dissesto legati alle condizioni di precaria stabilità delle pareti e della volta delle gallerie, quale conseguenza del naturale degrado della roccia, dei fenomeni sismici e, soprattutto, dell'espansione urbanistica che ha intensamente modificato e, a tratti, stravolto la fisiografia dei luoghi. E' questo il caso di Altamura ove, per assurdo, negli ultimi 40 anni si è persa memoria dell'esistenza di un'articolata rete caveale sub-superficiale, nonostante le cave in sotterraneo abbiano rappresentato per secoli l'unica fonte della zona per l'approvvigionamento di materiale naturale da costruzione.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO DELL'AREA

Il territorio del Comune di Altamura, in provincia di Bari, si sviluppa a cavallo tra le pendici meridionali dell'Altopiano delle Murge e quelle settentrionali della Fossa bradana. Il territorio è attraversato dallo spartiacque che separa il bacino idrografico del Fiume Bradano da quello afferente a diverse incisioni murgiane che trovano sbocco nel Mare Adriatico. Tale spartiacque, orientato grosso modo in direzione NO-SE, rappresenta, fra l'altro, il limite fisico che separa il settore settentrionale del territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Puglia, da quello centro-meridionale di competenza dell'Autorità di Bacino della Basilicata. Il centro abitato di Altamura, che si sviluppa su un'altura posta a circa 485 m s.l.m., ricade all'interno dell'area di competenza dell'Autorità di Bacino della Basilicata. La successione stratigrafica locale è assai semplice ed è rappresentata da un substrato calcareo mesozoico, riconducibile alla Formazione del Calcere di Altamura del Cretaceo superiore, sul quale giacciono, in trasgressione e con discordanza angolare, alcune Formazioni del Pleistocene che si susseguono in continuità stratigrafica e sono rappresentate, dal basso verso l'alto, dalla Calcareenite di Gravina, dalle Argille subappennine e dalle Sabbie di Monte Marano. In più luoghi si rinvencono sottili coperture di depositi lacustri e fluvio-lacustri tardo pleistocenici ed olocenici (CIARANI *et al.*, 1988; TROPEANO 1994).

3. L'ATTIVITÀ ESTRATTIVA NEL TEMPO E LA PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA

La periferia nord-orientale dell'abitato di Altamura, che ricade nel bacino idrografico del Torrente Gravina, affluente del fiume Bradano, è stata sede di cave in sotterraneo per l'estrazione di conci calcarenitici. I livelli di calcarenite oggetto di coltivazione si trovano al di sotto di una copertura di argille grigie con spessore medio di circa m 10. Al termine

dell'attività estrattiva le gallerie sono state abbandonate e di esse si è persa traccia. Attualmente un dedalo di vuoti, il cui sviluppo è conosciuto solo in parte, insiste al di sotto di un'area oggi densamente antropizzata ed interferisce con le condizioni di stabilità dei terreni di fondazione degli edificati presenti in superficie.

A seguito del crollo del 7 maggio 2007, che ha interessato la sede stradale di Via Barcellona e, marginalmente, alcuni edifici adiacenti, è stato avviato il rilievo delle gallerie ispezionabili. Dai primi rilievi effettuati dagli speleologi, dall'analisi dello stato di conservazione dei setti, dei pilastri e delle volte e dall'osservazione dello sviluppo delle gallerie è risultato evidente che le originarie forme e geometrie dei tunnel non erano frutto di specifica progettazione, che potesse conferire loro una funzione statica, ma erano state via via definite dalle maestranze, unicamente in funzione della necessità di reperimento dei conci [CAGGIANO *et al.*, 2008].

L'attività estrattiva in sottoterraneo aveva origine da cave a fossa o da pozzi verticali, oggi colmati ed obliterati, la cui identificazione, nella maggior parte dei casi, è stata possibile esclusivamente attraverso l'osservazione multi temporale di fotografie aeree ed ortofoto [1947, 1954, 1973, 1987, 1990, 1996 e 2008] (Fig. 1). La coltivazione progrediva secondo corridoi principali, con geometrie variabili, dai quali si dipartivano rami laterali con direzione non sempre regolare. Il verso di avanzamento è tuttora testimoniato dalla presenza di un susseguirsi di gradini sulle pareti dei tunnel con allineamento delle alzate nella direzione di avanzamento stesso [BERARDI *et al.*, 2009].

Sulla scorta di tali evidenze, oltre che sulla base di un'accurata interpretazione della stratigrafia dei luoghi, l'Autorità di Bacino della Basilicata, territorialmente competente per il Comune di Altamura, ha perimetrato e normato, nell'ambito del proprio Piano per la Difesa dal Rischio Idrogeologico, un'ampia area (127 ettari) soggetta a sprofondamenti diffusi. Con la Delibera del Comitato Istituzionale n. 4/2008, è stata inoltre introdotta, nelle Norme di Attuazione, la "Direttiva per la gestione e la messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee" che, oltre a definire gli adempimenti tecnico amministrativi per l'attuazione degli interventi consentiti in aree ricadenti su cavità sotterranee di origine antropica o naturale, pone l'obbligo, per i Comuni sui cui territori sia stata accertata la presenza di reti caveali sotterranee, di realizzare un Catasto delle Cavità Sotterranee al fine di censire le cavità medesime e di valutarne lo stato di conservazione e l'interconnessione con il sistema insediativo [Autorità di Bacino della Basilicata, 2008].

In tal senso la Direttiva, definita nel Titolo VII delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per la Difesa del Rischio Idrogeologico dell'Autorità di Bacino della Basilicata, si propone di far fronte al rischio legato agli sprofondamenti nell'ottica della salvaguardia dell'incolumità pubblica. Tale intervento normativo è risultato particolarmente idoneo per la gestione del territorio del Comune di Altamura dove è stata riconosciuta una "rete caveale" sepolta al disotto di un'area di espansione urbanistica. L'AdB della Basilicata ha pertanto avviato una serie di approfondimenti e di verifiche tecniche per valutare le condizioni di rischio associate a tali fenomeni e avere un quadro aggiornato degli strumenti di pianificazione, al fine di valutare le attività di programmazione degli interventi su tali aree. La Direttiva ha integrato le Norme di Attuazione nell'aggiornamento 2008 del PAI con l'inserimento del TITOLO VII - *Direttiva per la gestione e messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee*, Art. 33 - *Aree interessate da cavità sotterranee*.

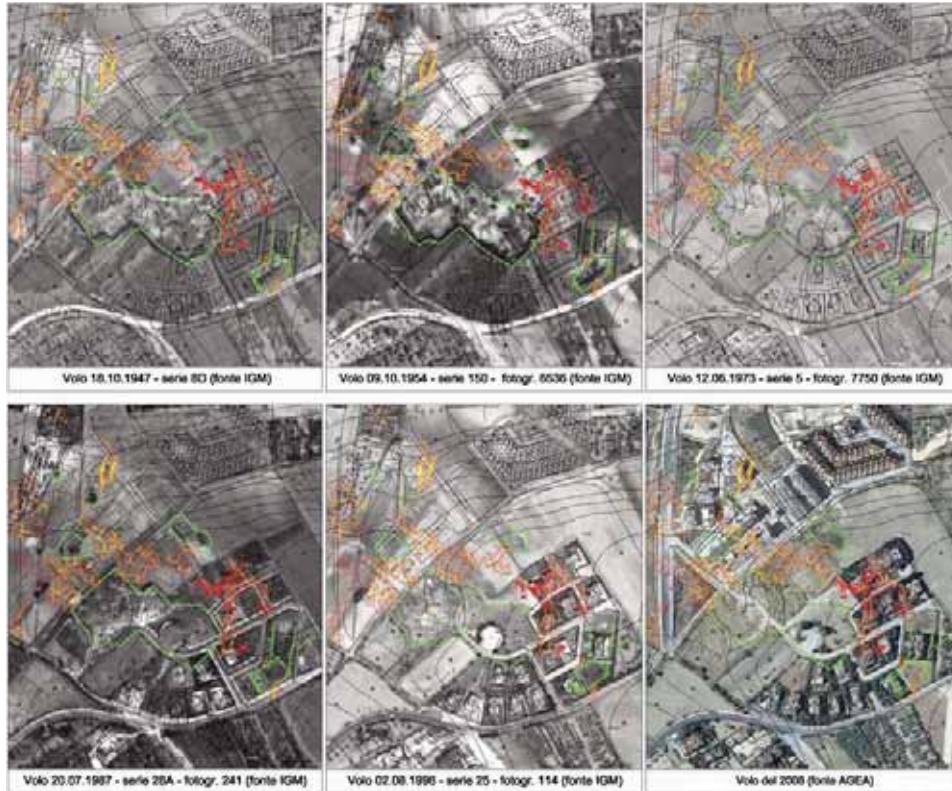


Fig. 1 - La poligonale del rilievo speleologico è stata sovrapposta alle foto aeree storiche disponibili all'IGM dalle quali è possibile identificare le cave a cielo aperto da quali è iniziata la coltivazione in sotterraneo e gli sprofondamenti visibili già prima dell'inizio dell'attività edilizia.

4. IL CATASTO DELLE CAVITÀ SOTTERRANEE DI ALTAMURA

Il Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS), così come previsto dall'art. 33 comma 3 delle "Norme di Attuazione dell'AdB della Basilicata", è stato istituito nel Comune di Altamura presso il III Settore - Sviluppo e governo del territorio - Servizio Tutela del Patrimonio Rurale - Agricoltura - Catasto. Il CCS rappresenta uno strumento conoscitivo del sistema della rete caveale che si sviluppa nel sottosuolo del Comune di Altamura per una lunghezza, ad oggi nota, di circa 12 Km.

Il CCS è uno strumento dinamico ed in continua evoluzione in quanto:

- a) il livello conoscitivo attuale non può considerarsi definitivo;
- b) lo stato di stabilità delle cavità può cambiare nel tempo;
- c) molte cavità saranno soggette a interventi di messa in sicurezza e bonifica, per i quali è necessario procedere all'archiviazione di tutte le informazioni utili ai fini delle valutazioni sulle interferenze degli stessi con le aree limitrofe.

Ai fini della gestione delle informazioni alfanumeriche si utilizza come elemento cartografico di riferimento la particella catastale. A tal proposito va sottolineato che la cartografia catastale è stata opportunamente riproiettata dal Sistema Cassini Soldner al Sistema

The image shows two forms from the City of Altamura, Province of Bari. The left form is 'ALLEGATO 3 - VISURA CATASTO CAVITÀ SOTTERRANEE' and the right form is 'ALLEGATO 4 - SCHEDE CAVITÀ'. Both forms contain various data fields related to underground cavities, including identification, urbanistic, and geotechnical information.

Fig. 2 - a) Visura Catasto Cavità Sotterranee (Allegato 3). b) Scheda Cavità (Allegato 4).

UTM33 WGS84 e sovrapposta alla cartografia aerofotogrammetrica ed alle ortofoto più recenti disponibili. La scelta del Sistema di Riferimento UTM33 deriva dalla recente implementazione e pubblicazione del Sistema Informativo della Regione Puglia con cartografie uniformate al Sistema UTM33. Le classificazioni delle aree perimetrate sono state riportate sia su base catastale che su base aerofotogrammetrica.

La perimetrazione attuale del Piano Stralcio per la Difesa dal Rischio Idrogeologico (PAI) classifica un'estesa area come "Aree a rischio idrogeologico medio ed a pericolosità media (R2)" e gli edifici esistenti all'interno di tale area sono classificati come "Aree Soggette a Verifica" (ASV). Nell'ambito del 3° stralcio del CCS si è proceduto a suddividere l'areale R2 in 6 sottoclassi.

Sul sito istituzionale del Comune di Altamura sono stati pubblicati gli Atti del CCS in cui vengono definite le modalità di consegna degli elaborati per l'aggiornamento della banca dati geografica. Sono state, inoltre, pubblicate le basi cartografiche di riferimento (Aerofotogrammetrico, Catastale e Ortofoto georeferenziata) per consentire ai Tecnici di trasmettere gli elaborati secondo le specifiche degli Atti del CCS (formato dei files, elenco elaborati, sistemi di coordinate). Sono state predisposte infine due schede informative da elaborare a cura dei Tecnici (Visura Catasto Cavità Sotterranee e, in presenza di cavità, Scheda della Cavità - (Fig. 2a e Fig. 2b). Attualmente sul sito istituzionale del Comune di Altamura vengono pubblicati gli aggiornamenti del CCS (in formato .pdf) a seguito dei verbali delle riunioni del Nucleo di Coordinamento Tecnico (NCT), appositamente costituito presso il Comune, mentre la consultazione in ambiente GIS è disponibile presso l'Ufficio del CCS (Fig. 3 - Fig. 4).



Fig. 3 - III Stralcio del CCS dell'area compresa fra Via Parigi - Via Fornaci e Via La Carrera

5. METODI DI RILIEVO SPELEOLOGICO, RESTITUZIONE E ANALISI DEI DATI

Il CCS rappresenta sia uno strumento di supporto alle attività del NCT sia un primo strumento di scambio dei dati fra Amministrazione Comunale e Autorità di Bacino. La gestione del Catasto ha avuto inizio nell'aprile 2009 e pertanto le prime attività del Nucleo di Coordinamento Tecnico sono state avviate ancor prima della gestione informatizzata del catasto.

Le metodologie di rilievo speleologico sono state implementate negli ultimi due anni. inizialmente i rilievi venivano eseguiti con bussola e distanziometro laser, con registrazione delle misure su libretto di campagna; successivamente si è proceduto all'utilizzo di strumentazione specifica per i rilievi speleologici (Shetland Attack Pony), con registrazione dei dati su file. Tutti i punti della poligonale del rilievo sono stati etichettati nelle cavità anche per eventuali controlli ed elaborazioni future. Le metodologie del rilievo sono state implementate da tecnici esperti del CARS e della Società APOGEO (CARS & APOGEO, 2006-2009). L'elaborazione del rilievo è stata eseguita con gli applicativi Compass Cave and Mapping Software e Therion che consentono anche di esportare i dati in formato .shp e .dxf. (Figura 5). La poligonale del rilievo, i contorni delle cavità e la documentazione fotografica georeferenziata rappresentano i livelli informativi più importanti, anche nell'ottica delle valutazioni sulle evoluzioni del dissesto, soprattutto nel caso in cui quest'ultimo non si manifesti in superficie (Figura 6a - 6b) (Pentimone N., 2009). Negli atti del CCS sono state descritte le modalità di esecuzione del rilievo speleologico e, in particolare, è stato indicato il grado di precisione dei rilievi secondo le specifiche della British Cave Research Association (BCRA). In Gran Bretagna la BCRA ha sviluppato una classificazione dei rilievi topografici

SUB-CLASSIFICAZIONE DEL 3° STRALCIO DEL CCS



R2A

Aree in cui è stata accertata la presenza di cavità sotterranee e per le quali non è stato presentato progetto di bonifica o sono in attesa di parere ex art. 16 co. 4 delle NGA del PAJ Basilicata, sul progetto di bonifica e messa in sicurezza



R2B

Aree i cui proprietari hanno ottenuto il parere di compatibilità idrogeologica positivo dall'ADB Basilicata prima della "Direttiva per la gestione e messa in sicurezza delle aree interessate da cavità sotterranee" o prima della costituzione dell'NCT



R2C

Aree classificate come prive di cavità dall'NCT



R2D

Aree in cui è stata accertata la presenza di cavità e i cui richiedenti hanno richiesto e ottenuto parere positivo dall'ADB Basilicata al Progetto di Bonifica



R2E

Aree in cui non sono stati ancora avviati o completati approfonditi studi geologici o che sono in attesa di validazione degli studi da parte dell'NCT



R2F

Aree bonificate



Aree con presenza di cavità ispezionate o rilevate mediante sondaggi ma non rilevate topograficamente. Alcuni accessi non sono più utilizzabili per eventuali ulteriori ispezioni.



Poligonale rilievo speleologico (Centro Nazionale Ricerche Speleologiche)*

*tecniche topografiche/speleologiche a cura di Vincenzo Martimucci e Pietro Pepe
precisione delle poligonali Grado 5 secondo la classificazione del BCRA (British Cave Research Association)

posizione planimetrica con accuratezza $\pm 5/-5$ metri
posizione altimetrica con accuratezza $\pm 1/-1$ metri

Fig. 4 - Legenda del III stralcio del catasto delle Cavità.

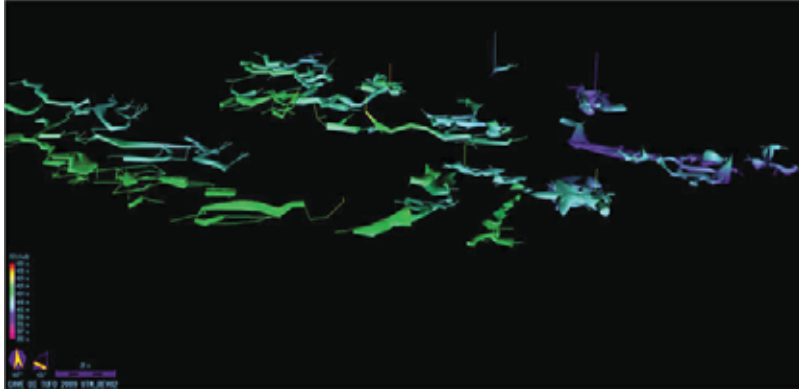


Fig. 5 - Vista 3D delle cavità in Therion



Fig. 6 - a-b. Evoluzione del dissesto in Via Barcellona

ipogei atta a definirne l'accuratezza del rilievo stesso in base agli strumenti utilizzati e alle metodologie seguite. Attualmente il Sistema Informativo Territoriale è stato implementato (Figura 7 e 8) con l'aggiunta dei seguenti livelli informativi:

- ubicazione di tutti gli accessi al sistema di cavità (ingressi sia da sprofondamenti che da pozzi verticali appositamente realizzati);
- foto georeferenziate delle cavità, collegate ai vertici della poligonale del rilievo speleologico;
- ubicazione delle indagini dirette ed indirette eseguite nell'areale R2 e ASV;
- sprofondamenti accertati;
- cavità singole o reti caveali rilevate;
- anomalie geofisiche;
- foto aeree storiche;
- informazioni sui progetti di bonifica e di consolidamento;

6. CONCLUSIONI

Per il territorio comunale di Altamura, con la Delibera del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino della Basilicata n. 4/2008, è stata introdotta, nelle Norme di Attuazione



Fig. 7 - Schermata di consultazione dati in ambiente ArcGis

del Piano Stralcio per la Difesa dal Rischio Idrogeologico, la *“Direttiva per la gestione e la messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee”*. Quest’ultima pone l’obbligo, per i Comuni sui cui territori sia stata accertata la presenza di reti caveali sotterranee, di realizzare un Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS) al fine di censire le cavità medesime e di valutarne lo stato di conservazione e l’interconnessione con il sistema insediativo. La stessa direttiva prevede la costituzione di un Nucleo di Coordinamento Tecnico (NCT), di cui gli Autori della presente memoria fanno parte, con il compito di supportare, tra l’altro, il Comune di Altamura nella redazione del CCS.

Il NCT, nella seduta del 01 aprile 2009, ha valutato positivamente la proposta di CCS predisposta dal Comune di Altamura (3° Settore - Sviluppo e Governo del Territorio), e ne ha, pertanto, proposto l’approvazione alla Giunta Comunale, avvenuta poi con la Deliberazione N. 24 del 09.04.2009.

In seguito all’istituzione del Catasto delle Cavità Sotterranee sono stati pubblicati gli “Atti del CCS” al fine di uniformare le modalità di acquisizione degli studi (anche nel rispetto delle Norme di Attuazione dell’AdB Basilicata). Per consentire un più rapido aggiornamento del Catasto delle Cavità ed assistere l’Amministrazione comunale nella gestione “urbanistica” del territorio, si è avviato il censimento riportando, in primis, le reti caveali note sulle singole particelle catastali. Sono state, quindi, rese note le basi cartografiche da utilizzare, la sub-classificazione da attribuire alle singole particelle catastali, già perimetrate dall’AdB Basilicata, e le modalità di trasmissione dei dati geognostici e degli interventi di bonifica. La base cartografica catastale è stata, quindi, assunta come riferimento,

Fig. 8 - Inserimento dati e consultazione delle Pratiche CCS

dopo aver trasposto la proiezione della stessa dal sistema Cassini Soldner al sistema WGS84 - UTM33. La sub-classificazione si è resa necessaria per assegnare gradualmente a tutte le particelle, e quindi a tutto il territorio, una caratterizzazione certa (con particolare riferimento alla accertata presenza o assenza di cavità e/o all'avenuta bonifica delle aree). Tale lavoro consentirà di informatizzare le conoscenze acquisite nel corso degli studi e, pertanto, di renderle accessibili ai tecnici competenti. Attualmente sul sito istituzionale www.comune.altamura.ba.it è stata creata una sezione "Catasto delle Cavità Sotterranee" all'interno della quale sono già consultabili i documenti del CCS, la poligonale del rilievo speleologico su base aerofotogrammetrica e catastale e la classificazione delle aree. Obiettivo finale sarà quello di restituire tutti i dati acquisiti nel tempo in ambiente ArcGIS e gestire le informazioni alfanumeriche con un database di Microsoft Access collegato al GIS. A supporto dell'Ufficio CCS e del NCT, è già stato implementato un sistema che consente di visualizzare le stratigrafie, le foto delle cavità, i dati urbanistici e la geologia dell'area in generale.

L'esperienza maturata con la situazione di pericolosità geomorfologica che si è andata nel tempo a creare nella periferia dell'abitato di Altamura ha dimostrato come spesso le aree di cava, originariamente ubicate all'esterno dei centri abitati ma per convenienza prossime ad esse, siano state progressivamente inglobate, per effetto di una successiva e disattenta espansione urbanistica, nelle zone di occupazione degli stessi abitati. La presenza di cavità sotterranee determina condizioni di rischio effettivo per la popolazione e le infrastrutture quando, in seguito ad incrementi dello stato tensionale del sottosuolo, si originano repentini crolli, e/o voragini che determinano il danneggiamento dei manufatti.

Il censimento mediante la redazione del CCS, risulta essere un'efficace procedura propeudeutica alla corretta gestione delle aree a pericolosità da sprofondamento. Tale approccio, infatti, consente di avere un dettagliato quadro unitario di riferimento che prende in considerazione lo stato di conservazione delle cavità, il sistema insediativo sovrastante e le criticità dell'area. Attraverso tale procedura, gli interventi di bonifica e/o

consolidamento nonché l'utilizzo a fini urbanistici delle aree o la gestione delle emergenze possono essere valutati e condotti con maggior accuratezza, consentendo una proficua collaborazione tra diversi enti pubblici chiamati alla amministrare della problematica in esame.

RINGRAZIAMENTI

Rilievi speleologici e restituzione dati a cura di Vincenzo Martimucci e Nunzia Pentimone (CARS – Centro Altamurano Ricerche Speleologiche), Pietro Pepe e Giuditta Garziano (APOGEO)

BIBLIOGRAFIA

- ANDRIANI G.F. & WALSH N. (2002) - *Physical properties and textural parameters of calcarenitic rocks: qualitative and quantitative evaluations*. Eng. Geol., 67, 5-15.
- ANDRIANI G.F. & WALSH N. (2003) - *Fabric, porosity and water permeability of calcarenites from Apulia (SE Italy) used as building and ornamental stone*. Bull.Eng. Geol. Env., 62, 77-84.
- ANDRIANI G.F. & WALSH N. (2006) - *Thermal properties and their influence on strength and deformability of carbonate rocks*. Atti del Convegno "Le risorse lapidee dall'antichità ad oggi in area mediterranea" Canosa di Puglia 25-27 settembre.
- APOGEO s.c. a r.l., Altamura (BA) - *Indagini geognostiche eseguite in Via Barcellona e nelle aree limitrofe in seguito allo sprofondamento del 7 maggio 2007*. Ordinanza del Sindaco di Altamura (BA), n. 31 del 2007.
- AUTORITÀ DI BACINO DELLA BASILICATA (2008) - *Direttiva per la gestione e la messa in sicurezza di aree interessate da cavità sotterranee*. Piano Stralcio per la difesa dal rischio idrogeologico – Art. 33 delle Norme di Attuazione.
- BERARDI C., CAGGIANO T. & FIORE A. (2009) - *Pericolosità geomorfologica da sprofondamenti. L'attività estrattiva storica in sottterraneo: il caso di Altamura (BA)* 3° Congresso Nazionale AIGA - Centro di GeoTecnologie, Università degli Studi di Siena, San Giovanni Valdarno (AR).
- CAGGIANO T., FIORE A. & PELLEGRINO R. (2008) - *Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione ed all'attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto connesso alla presenza di cavità antropiche in località "Fornaci-Chiancone" nell'abitato del Comune di Altamura (BA)*. Progetto finanziato con fondi Por-Puglia 2000-2006, Misura 1.3, Area di Azione 4, Sub-Azione D.
- CARS Centro Altamurano Ricerche Speleologiche & Apogeo s.c. a r.l. (2006-2009) - *Ispezione e rilievo delle cavità accessibili nelle località "Grotta dei Tufi" e "Chiancone" e nei pressi di Via Barcellona*. Relazione tecnica.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note illustrative alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centromeridionale)*. Memorie della Società Geologica Italiana, 41, 449-460.
- PENTIMONE N. (2009) - *Rischio di crollo di cave in sottterraneo nel territorio di Altamura*. Tesi di laurea inedita, Università degli Studi di Bari (Rel. N. Walsh: G.F. Andriani).
- TROPEANO M. (1994) - *Caratteri deposizionali della Calcarenite di Gravina (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore) sul bordo orientale della Fossa Bradanica nell'area di Matera*. Guida all'escursioni del 77° Congresso della Società Geologica Italiana Bari. Quaderni della Biblioteca Provinciale di Matera, 15, 67-86.

INDIVIDUAZIONE DI MOVIMENTI PRECURSORI DI SPROFONDAMENTI NELL'AREA URBANA DI ROMA ATTRAVERSO L'UTILIZZO DELL'INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE

di Corazza A.

Università di Roma Tre, Dipartimento di scienze geologiche, Largo San Murialdo, 1 00146 Roma

ABSTRACT

In the city of Rome there are many man-made underground cavities with different age and function: quarries, catacombs, waterworks, sewers and archaeological hypogea. According to a census conducted in the city of Rome by the Department of Civil Protection (DPC), since 1915, approximately 100 sinkholes have been occurred. Causes for that are the collapse of underground quarries of building materials (volcanic deposits or gravel and sands).

Sinkholes often resulted in considerable damages to infrastructures as well as, in many cases, in casualties.

About forty sinkholes occurred between 1992 and today. For the same period radar images, acquired by different satellites (ERS1/ ERS2 and RADARSAT) are available.

On the Rome area, satellite radar data were processed with the Permanent Scatterers (PS) technique by TeleRilevamento Europa, spin-off company of the Politecnico di Milano University. Such activity was carried out within the "SAR.net Project", promoted by the DPC and the University of Florence - Department of Earth Sciences.

PS data provided by the DPC allowed to carry out back analysis of anthropogenic sinkholes occurred in Rome aiming to identify possible collapse precursors.

Analysis of PS ERS 1/2 data (period 1992-2000) doesn't show any movement in areas where sinkholes have taken place.

The back-analysis was carried out in detail for the sinkhole occurred at Via Galatea in January 2008, based on PS RADARSAT. For this case, results of the previous investigation were provided by the Office of Civil Protection of the Municipality of Rome as well.

Analysis of PS RADARSAT data (period 2003-2007) identified significant movements in the area of Via Galatea in the months preceding the sinkhole.

The study shows how the use of PS technique applied to RADARSAT images could provide useful precursor for sinkholes in urban areas.

1. PREMESSA

Nella città di Roma sono presenti numerosissime cavità sotterranee di origine antropica con diversa età e funzione: cave, catacombe, cunicoli idraulici, acquedotti, fognature e sotterranei di interesse archeologico. La stragrande maggioranza delle cavità è costituita da cave in sottterraneo di materiali da costruzione, principalmente depositi vulcanici litoidi

o pozzolanacei e subordinatamente ghiaie e/o sabbie (VENTRIGLIA, 1971, 2002; FUNICIELLO, 1995; FUNICIELLO *et al.*, 2008)

In base a un censimento effettuato dal Dipartimento della protezione civile (DPC) nella città di Roma, tra il 1915 e oggi, si sono verificati circa 100 casi di dissesto dovuti tutti a cave sotterranee di materiali da costruzione; alcuni dei dissesti oltre che danni materiali hanno causato anche vittime (CORAZZA, 2004).

Circa quaranta dei casi di dissesto censiti sono avvenuti tra il 1992 e oggi, periodo per il quale si dispone di immagini radar acquisite dalle piattaforme satellitari ERS1, ERS2, ENVISAT e RADARSAT sulle quali sono montati dispositivi di telerilevamento attivo costituiti da sistemi SAR (Radar ad Apertura Sintetica).

Per la zona di Roma, nell'ambito di una convenzione tra il DPC e il Dipartimento Scienze della Terra dell'Università di Firenze ("Progetto SAR.net"), i dati radar satellitari relativi al periodo 1992-2007 sono stati elaborati con la tecnica dei *Permanent Scatterers* dalla società di *spin-off* del Politecnico di Milano - TeleRilevamento Europa

La messa a disposizione da parte del DPC per le attività di dottorato di ricerca dello scrivente dei dati PS per l'area romana ha permesso di effettuare analisi a ritroso sui dissesti legati a cavità sotterranee avvenuti a Roma tra il 1992 e il 2008 con lo scopo di individuare l'esistenza di eventuali "precursori di evento". Tale analisi è stata effettuata nel dettaglio per il sinkhole verificatosi a Via Galatea nel gennaio 2008 per il quale l'Ufficio di protezione civile del Comune di Roma ha reso disponibili i risultati delle indagini commissionate per lo studio del fenomeno.

2. SINKHOLES NELLA CITTÀ DI ROMA

L'area romana è frequentemente attraversata da gallerie prodotte da attività di coltivazione di pozzolane, di orizzonti tufacei litoidi e, subordinatamente, di ghiaie e di sabbie; inoltre sono diffuse gallerie relative a cunicoli drenanti e catacombe, legati alla bimillenaria storia di Roma. Molto spesso si verificano voragini e frane in corrispondenza di dette cavità, le quali determinano nel contempo una condizione di rischio per la cittadinanza e problemi legati alla interruzione delle strade e delle reti di sottoservizi (fognature, reti idriche, elettriche, telefoniche, etc.) nonché alla stabilità degli edifici sovrastanti.

Le aree interessate dalla presenza di tali cavità sono prevalentemente quella orientale, settentrionale e meridionale della città, ove si sviluppano i depositi piroclastici pozzolanacei di età pleistocenica del Distretto Vulcanico dei Colli Albani, anche se non mancano segnalazioni, sia in destra che in sinistra idrografica, in corrispondenza delle vulcaniti del Distretto Vulcanico dei Monti Sabatini. Le cave relative a coltivazioni di depositi di ghiaie e sabbie, meno frequenti, sono invece riferibili alle Formazioni sedimentarie pleistoceniche di Ponte Galeria e di Santa Cecilia, diffuse per esempio lungo la Via Magliana ed in alcuni settori nordoccidentali di Roma, lungo il versante destro della valle tiberina.

Nel tempo si è persa la memoria dell'esistenza e della precisa ubicazione di tali cavità e, soprattutto durante l'intensa espansione edilizia degli anni Cinquanta-Settanta, si è costruito un tessuto continuo di strutture urbane al di sopra di tali gallerie, non sempre con le opportune tipologie di fondazione: sovente infatti si riscontrano edifici costruiti con fondazioni dirette al di sopra di reti ipogee a piccola profondità ed in condizione di potenziale pericolo. Altre interazioni negative si realizzano fra le gallerie e le reti idriche e fognarie, spesso fatiscenti e con frequenti perdite di liquami.

Ad oggi la situazione è tale che frequentemente dissesti, voragini, cedimenti e lesioni ad edifici provocano danni economici e rischi per la popolazione residente. I casi di dissesto censiti a Roma tra il 1915 e il 2002 sono 96 (Fig. 2 e tabella 1).



Fig. 1 - Localizzazione dei sinkholes antropogenici nella città di Roma.

Tabella 1 - Casi di sinkholes censiti nella città di Roma suddivisi per Municipio.

Municipio		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XV	XVI	XX
sinkholes	n.	8	6	2	1	5	22	14	1	19	4	5	1	2	3	2
	%	8,3	7,3	2,1	1,0	5,2	23,0	14,6	1,0	19,8	4,2	5,2	1,0	2,1	3,1	2,1

Dall'esame della tabella 1 si può notare come i dissesti interessino quasi tutta la città e come solo i Municipi 13, 14 (oggi facente parte del Comune di Fiumicino), 17, 18 e 19 ne siano esenti. Le aree interessate dalla presenza di tali cavità sono prevalentemente quella orientale dove si sviluppano i depositi piroclastici pozzolanacei del Distretto Vulcanico dei Colli Albani.

In 14 casi il dissesto è avvenuto in sottterraneo senza ripercussioni in superficie. Si tratta di crolli o lesioni nelle volte o nei pilastri delle cavità che hanno provocato la rottura di reti idriche o fognarie, danni a strutture in sotterranee (gallerie etc.), pericoli per la fruibilità degli ambi ipogei (catacombe etc.).

In 82 casi il dissesto provocato dall'instabilità delle cavità sotterranee si è manifestato invece in superficie con la formazione di voragini (Fig. 2) di forma generalmente circolare o ellittica che hanno raggiunto anche grandi dimensioni (fino a 700 metri quadrati di estensione) e profondità (oltre 10 metri dal piano campagna).



Fig. 2 - Sinkhole con sprofondamento della sede stradale nei pressi di Via Casilina a Roma.

I dissesti, localizzati quasi sempre all'interno di aree a forte urbanizzazione, sono dovuti all'instabilità di cavità di origine antropica, costituite nella stragrande maggioranza dei casi da cave in sottterraneo (90%) e molto in subordine da catacombe o da cunicoli idraulici. In 90 casi le cavità origine del dissesto risultano scavate nei terreni piroclastici tipici della campagna romana; nei restanti 6 casi erano invece ricavate nei terreni sabbioso-ghiaiosi di età pleistocenica (fig. 3)

I dissesti, oltre a produrre danni materiali hanno interessato, per fortuna non frequentemente, anche l'incolumità delle persone. Si registrano infatti quattro casi con morti. Il più antico di questi è avvenuto il 14 ottobre del 1928 quando un movimento franoso interessò il versante meridionale del rilievo di Monteverde dove erano presenti numerose cavità sotterranee che collassarono provocando ingenti danni agli edifici sovrastanti, uno dei quali, in Via dell'Ongaro, crollò seppellendo tra le macerie un'anziana donna (PIPERNO, 1929; CORAZZA *et al.*, 2002).

Nel 1937 poi, in Via Ceccano (Municipio VII), in un'area urbana, il crollo di una cava sotterranea di pozzolana collegata ad una rete caveale caratterizzata da una altezza di circa 3-4 m, e da una profondità minima dal piano campagna creò una voragine, avente un'area di circa 60-70 m², di forma circolare ed una profondità di circa 8 m. La voragine provocò il crollo di un edificio e la morte di quattro persone (CERLESI, 1990).

Gli altri due casi con vittime sono connessi a dissesti in sottterraneo avvenuti in cavità usate come fungaie e situate in zone non urbanizzate del territorio dell'attuale Municipio XI. Il primo caso è avvenuto l'8 settembre 1994 in Via Appia Pignatelli e il secondo 7 Luglio 1997, in Via dell'Almone. In tutti e due le situazioni il crollo della volta di gallerie scavate in depositi pozzolanacei e utilizzate per la coltivazione di funghi provocò la morte di un operaio dell'azienda che gestiva la fungaia.

Vanno segnalati anche due casi dove fortunatamente si sono avuti solo alcuni feriti. Il primo, ancora in Via Ceccano-Palazzina Panci, nel 1944, dove una voragine prodottasi

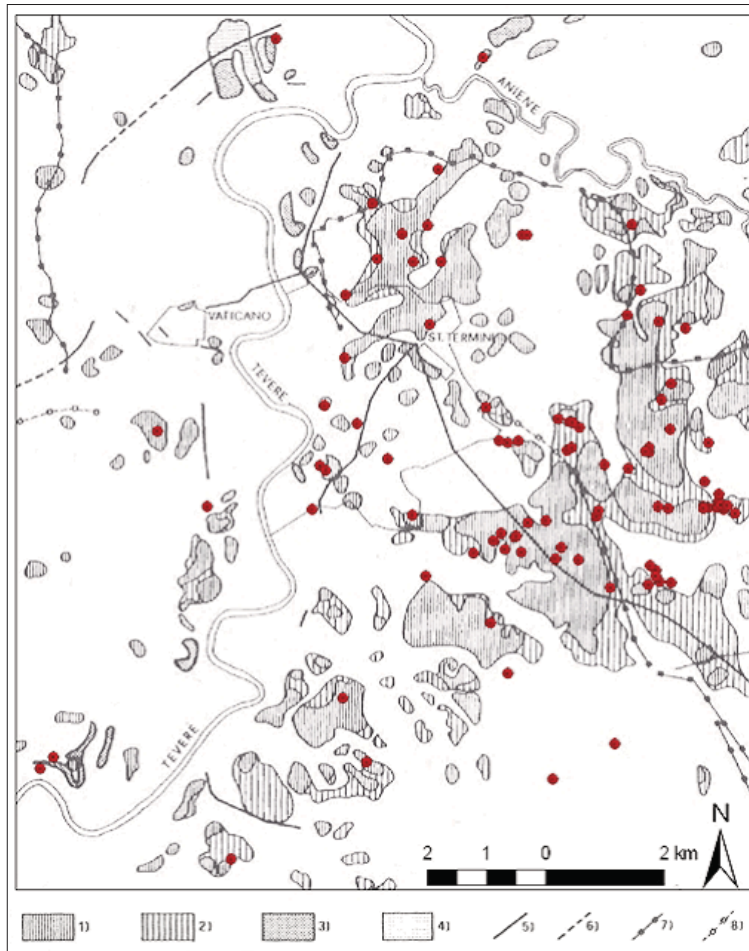


Fig. 3 – Tipologia cavità sotterranee presenti nella città di Roma e ubicazione dei sinkholes censiti [da Ventriglia, 2002 – modificato]. Legenda. Cavità accertate con indagini dirette: 1- in piroclastiti; 2 - in sabbie e ghiaie. Cavità individuate con indagini indirette 3 - in piroclastiti; 4 - in sabbie e ghiaie. 5 - gallerie ferroviarie. 6 - gallerie stradali. 7 e 8 - acquedotti.

nel giardino privato della palazzina provocò un ferito. La voragine, avente un'area di circa 15-20 mq, di forma circolare ed una profondità di circa 12-14 m si verificò in corrispondenza di un pozzo di accesso ad una rete caveale che era stato riempito negli anni '40 quando gli ipogei erano utilizzati come rifugio antiaereo. Il secondo, avvenuto il 7 giugno 1958, in località Vigna Clara nel Comune di Roma (Municipio XX) in area urbana dove una voragine, dovuta al crollo di un ipogeo antropico scavato all'interno di depositi sabbiosi e ghiaiosi, provocò due feriti.

In altri sette casi i dissesti hanno portato all'emanazione di ordinanze di sgombero precauzionali per un totale di circa 200 persone evacuate.

3. ANALISI INTERFEROMETRICHE DELL'AREA ROMANA

La zona di Roma è uno dei siti campione del "Progetto SAR.net" commissionato dal Dipartimento della protezione civile al Dipartimento Scienze della Terra dell'Università di Firenze. Tale progetto prevede la realizzazione di un sistema di sorveglianza basato sull'utilizzo di dati telerilevati da satellite ed elaborati con tecniche interferometriche avanzate per l'individuazione, la mappatura, il monitoraggio e l'analisi degli scenari di rischio connessi a movimenti di massa localizzati.

Nell'ambito del progetto i dati radar satellitari relativi al periodo 1992-2007 sono stati elaborati con la tecnica dei *Permanent Scatterers* dalla società di *spin-off* del Politecnico di Milano - TeleRilevamento Europa (TRE)

La tecnica convenzionalmente utilizzata per lo studio dei movimenti del terreno con le immagini radar satellitari è l'interferometria differenziale (DInSAR) che consente di individuare e misurare, attraverso il confronto tra di due interferogrammi della stessa scena, eventuali spostamenti delle varie porzioni dello scenario (MASSONET & FEIGL, 1998; ROSEN et al., 2000).

Il Politecnico di Milano ha sviluppato e brevettato un algoritmo di elaborazione interferometrica multi-interferogramma capace di fornire misure di spostamento con precisione millimetrica su alcuni punti (corrispondenti generalmente a costruzioni antropiche) chiamati PS - *Permanent Scatterers* (COLESANTI et al., 2003, FERRETTI et al., 2000, 2001)

La tecnica dei PS dà la possibilità di ottenere una mappa bidimensionale della distribuzione spaziale dei movimenti del terreno con un'accuratezza nella misura comparabile con quella delle tecniche di monitoraggio topografico convenzionali ottenendo delle mappe in cui, per il periodo di osservazione, i PS vengono distinti in base alle velocità medie di avvicinamento/allontanamento dal sensore espresse in mm/anno e grafici in cui si può osservare l'andamento nel tempo degli spostamenti.

Le immagini radar della zona di Roma che sono state elaborate con la tecnica dei PS sono quelle delle piattaforme satellitari dell'ESA (*European Space Agency*) ERS1, ERS2 e ENVISAT e del satellite canadese RADARSAT sulle quali sono montati dispositivi di telerilevamento attivo costituiti da sistemi SAR (Radar ad Apertura Sintetica).

Questi satelliti montano un sistema SAR operante nella banda delle microonde e seguono orbite eliosincrone, ad una quota di circa 800 km, inclinate rispetto ai meridiani ed illuminano una striscia di terreno di circa 100 km.

La stessa zona, a causa dei movimenti relativi dei satelliti e della Terra, viene osservata lungo due diverse orbite di acquisizione: ascendente e discendente. In entrambe le orbite i satelliti osservano verso destra lungo una linea di vista (LOS - *line of sight*) inclinata rispetto al nadir con angoli diversi a seconda del satellite. La stessa orbita nominale viene ripercorsa ogni 35 giorni dai satelliti ERS1/2 e ENVISAT e ogni 24 giorni da RADARSAT, consentendo così di acquisire dati telerilevati della stessa scena al suolo in tempi differenti.

I dati RADARSAT sono stati acquisiti con due modalità:

- *standar beam* - risoluzione al suolo 26,6 x 27,0 m
- *fine beam* - risoluzione al suolo 8,4 x 8,4 m

Le analisi effettuate con la tecnica PS dalla società TRE sulle immagini radar disponibili per l'area romana sono di due tipi:

1. SPSA - *Standard Permanent Scatterers Analysis*, per applicazioni su larga scala;
2. APSA - *Advanced Permanent Scatterers Analysis*, per applicazioni ad alta risoluzione su aree limitate.

Nella tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche di questi due tipi di analisi.

Tabella 2 - Caratteristiche analisi PS.

Parametro	Analisi PS	
	SPSA	APSA
Dimensioni area minima	100 km ²	1 km ²
Dimensioni area massima	-	100 km ²
Risoluzione della cella SAR al suolo	circa 4 x 10 metri	circa 4 x 5metri
Serie temporali delle misure	solo per i PS ad alta affidabilità	tutti i PS

Nella tabella 3 è riportato invece un quadro sintetico delle caratteristiche dei dati satellitari disponibili.

Tabella 3 - Sintesi dei dati satellitari elaborati con la tecnica dei PS per l'area di Roma.

Satellite	Orbita	Elaborazione	Numero scene	Range temporale	Densità (PS/Km ²)
ERS 1/2	Discendente	SPSA	65	21.04.1992-29.12.2000	70
ERS 1/2	Ascendente	SPSA	33	28.04.1993-11.11.2000	33
RADARSAT <i>fine beam</i>	Ascendente	SPSA	53	07.03.2003-14.06.2007	277
RADARSAT <i>standard beam</i>	Discendente	SPSA	49	15.03.2003-11.11.2006	70
RADARSAT <i>fine beam</i>	Ascendente	APSA	55	07.03.2003-14.06.2007	1742
ENVISAT	Discendente	SPSA	13	03.01.2003-01.07.2005	4

L'elaborazione APSA delle immagini RADARSAT *fine beam* è stata effettuata solo per una limitata porzione (circa 15 km²) dell'area urbana di Roma.

I dati evidenziano come la densità di PS per Km² sia notevolmente maggiore con le immagini acquisite dal satellite RADARSAT in modalità *fine beam* e, soprattutto, con l'elaborazione di tipo APSA.

La differenza tra la densità dei PS ERS rispetto a quella dei PS RADARSAT dipende oltre che dalle modalità di acquisizione e di elaborazione anche dal numero di scene elaborate e dal tempo di rivisitazione di una stessa scena da parte del satellite: più lungo per ERS (35 giorni) rispetto a quello di RADARSAT (24 giorni).

Per ognuno dei dataset è possibile elaborare una mappa di distribuzione dei PS, ottenuta dall'analisi delle velocità medie (misurate rispetto alla LOS) calcolate sull'intero periodo di monitoraggio. Il segno negativo della velocità indica un allontanamento rispetto al satellite, mentre il segno positivo indica un avvicinamento rispetto al satellite, sempre misurato lungo la linea di vista.

L'imposizione di una soglia di velocità, valutata in funzione dell'accuratezza delle misure, è funzionale alla distinzione delle aree stabili (velocità comprese tra +1,5 e -1,5 mm/anno) e di quelle in movimento.

4. CORRELAZIONE TRA I SINKHOLES E I PS ERS (PERIODO 1992-2000)

Una quarantina dei casi di sinkholes censiti dal Dipartimento della protezione civile sono avvenuti tra il 1992 e il 2000, periodo per il quale si dispone di immagini radar acquisite dalle piattaforme satellitari ERS1 e ERS2 (tabella 4).

Tabella 4 - Sinkholes avvenuti a Roma tra il 1992 e il 2002

Data	Localizzazione	Data	Localizzazione
1992	Via Buie d'Istria	1997	Via G. Grezar
1992	Via Appia Nuova -Villa Lazzaroni	1997	Via Sezze
1992	Via Macedonia	1997	Via Tagliamento
1993	Via Dulceri	1997	Via dell'Almone
1993	Piazza Copernico	1998	Piazza Buenos Aires
1993	Via F. Nardini- piazza Armellini	1998	Parco di Villa Ada
1994	Via Appia Pignatelli,	1999	Via Casilina 701
1994	Via Prenestina ang. Via Dignano d'Istria	1999	Via Teano
1994	Via Latina	1999	Via Trinchieri
1994	Via Simeto	1999	Via Casilina - Parco Labicano
1995	Via dell'Oratorio Damasiano	1999	Via Policastro
1995	Via Cristoforo Colombo	1999	Vigna Barberini -Palatino
1995	Via Sestio Menas	1999	Via Appia Antica - Castello Caetani
1995	Via Borsa	1999	Via Ferentino angolo Via Arpino
1995	Via Terracina,	1999	Villa Pamphili - Casina Algardi,
1996	Via Fanfulla da Lodi	1999	Via Oristano
1996	Via Conte di Carmagnoli	2000	Via Pienza
1996	Via Fortifocca	2000	Via Bartoli
1997	Via Romanello da Forlì	2000	Via Appia Pignatelli

Da una prima analisi dei PS relativi alle immagini radar dei satelliti ERS non si evidenzia nessuna correlazione tra i sinkholes censiti e i PS con dati di spostamento. In linea generale i sinkholes censiti nella città di Roma sono ubicati in zone che l'analisi interferometrica individua come stabili (fig 4). Gli spostamenti (abbassamenti) rilevati da satellite riguardano le zone alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti di sinistra idrografica, ove le caratteristiche geotecniche dei sedimenti favoriscono l'insorgere di fenomeni di subsidenza (CASAGLI *et al.*, 2008a, 2008 b).

La disponibilità di PS relativi all'analisi delle immagini RADARSAT nel periodo 2003 - 2007 ha permesso di estendere la ricerca di possibili correlazioni tra spostamenti individuati da satellite e sinkholes avvenuti in tale periodo. In particolare è stata analizzata la situazione relativa alla voragine avvenuta a via Galatea il 21 gennaio 2008 per il quale si disponeva di studi e indagini di dettaglio messi a disposizione dall'Ufficio Extradipartimentale della Protezione Civile del Comune di Roma

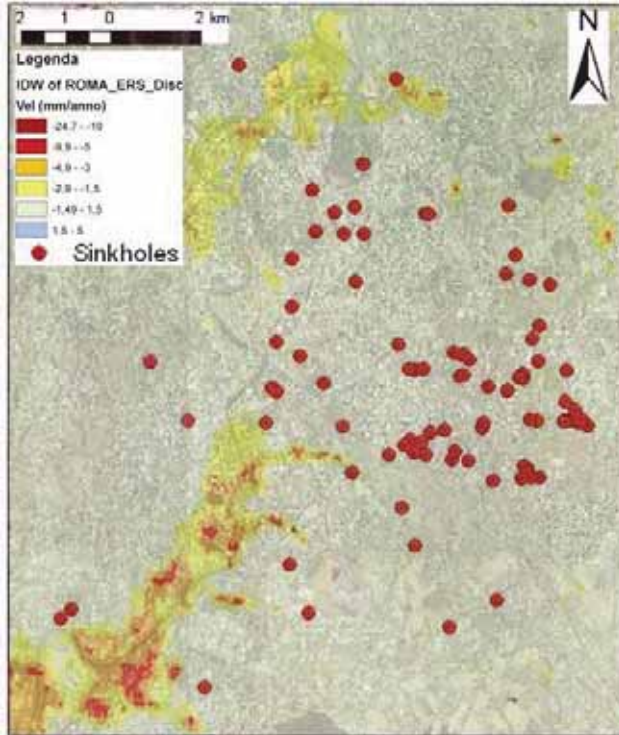


Fig. 4 - Mappa delle velocità dei PS ERS discendenti [1992 - 2000] e localizzazione dei sinkholes censiti. I valori tra -1,49 e 1,5 mm/anno indicano stabilità; quelli minori di -1,49 mm/anno indicano un allontanamento rispetto al satellite [abbassamento] mentre quelli superiori a 1,5 mm/anno indicano un avvicinamento rispetto al satellite [sollevamento].

5. SINKHOLE DI VIA GALATEA

Il giorno 21 gennaio 2008 alle ore 16,00 circa in Via Galatea, si è formata una voragine che ha determinato l'interruzione totale della sede stradale e dei pubblici servizi (reti elettrica, idrica, fognaria, gas e telefonica) per un totale di 150 nuclei familiari coinvolti. Via Galatea si trova nell'VIII Municipio del Comune di Roma, in un'area posta tra l'autostrada A24 e il Grande Raccordo Anulare (fig. 5)

La voragine creatasi aveva una forma grosso modo ellittica, con dimensioni degli assi principali rispettivamente di 11 e 5,5 metri e una profondità di circa 4,5 metri; il volume mobilitato è stato di circa 600 mc (fig. 6). Lo sprofondamento è stato causato dal crollo della volta di una cavità sotterranea scavata in terreni vulcanici facente parte di una più estesa rete caveale realizzata dall'uomo per l'estrazione di materiali da costruzione. Nell'VIII Municipio l'escavazione in sotterraneo ad opera dell'uomo è stata persistente nel tempo ed è proseguita sino agli inizi del XX secolo portando alla creazione di un vasto sistema di gallerie.



Fig. 5 - Localizzazione del sinkhole di Via Galatea.



Fig. 6 - Sinkhole a Via Galatea: vista della voragine e della volta della cavità sottostante (foto dell'Associazione "Roma Sotterranea").

Dal punto di vista geologico l'area è caratterizzata dalla presenza di vulcaniti attribuibili all'attività del Distretto Vulcanico dei Colli Albani (fig. 7). Nella zona sono presenti i terreni appartenenti, dall'alto verso il basso, alle seguenti formazioni:

5.1 (SFTba) deposito alluvionale

Il deposito forma la piana alluvionale del Fiume Aniene ed è prevalentemente costituito da sedimenti fini siltoso-argillosi alternati a livelli sabbiosi e a livelli di torbe a diversa profondità. Alla base del deposito sono presenti livelli ghiaiosi e sabbiosi (OLOCENE).

5.2 (VSN2) Pozzolanelle

Deposito piroclastico massivo, di colore da viola a nero, a matrice cineritico grossolana-lapillosa, povero in fini e ricco di cristalli di leucite, biotite e clinopirosseno, contenente grosse scorie nere, generalmente incoerente (PLEISTOCENE MEDIO p.p.);

5.3 (VSN1) Tufo lionato

Deposito piroclastico massivo, litoide, a matrice cineritico-lapillosa con abbondanti pomici gialle, scorie grigie, litici lavici e olocristallini a gradazione inversa, di colore da giallo a rosso a marrone in gradazione verticale (PLEISTOCENE MEDIO p.p.).

5.4 (PNR) Pozzolane nere

Unità piroclastica di colore nero, in facies massiva e caotica, localmente con gas-pipes, a matrice scoriaceo-cineritica, nella quale sono dispersi scorie, di dimensioni fino a 15 cm, litici lavici, piroclastici, olocristallini e sedimentari termometamorfosati di dimensioni fino a 10 cm e cristalli di leucite e clinopirosseno (PLEISTOCENE MEDIO p.p.).

5.5 (RED) Pozzolane rosse

Unità piroclastica massiva e caotica, semicoerente, da rosso a viola vinaccia a grigio scuro, a matrice scoriacea povera della frazione cineritica, con scorie di dimensioni fino a 24 cm, litici lavici, sedimentari termometamorfosati e olocristallini di dimensioni fino a 20 cm e abbondanti cristalli di leucite, clinopirosseno e biotite (PLEISTOCENE MEDIO p.p.).

Gli studi commissionati dall'Ufficio Extradipartimentale della Protezione Civile del Comune di Roma all'Associazione "Roma Sotterranea" e al Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade dell'Università di Roma "La Sapienza" per l'analisi della pericolosità e per la definizione degli interventi di ripristino e messa in sicurezza hanno permesso di acquisire un quadro conoscitivo di grande dettaglio.

I rilievi eseguiti da Roma Sotterranea hanno consentito di mappare con precisione la rete caveale, di identificare le formazioni geologiche nelle quali sono state realizzate le cave in sotterraneo e di rilevare lo stato di fratturazione di tali formazioni, la presenza di eventuali segni di cedimenti e di arrivi di acqua.

Le gallerie realizzate per cavare i materiali vulcanici si sviluppano sotto via Galatea e si estendono verso est, dove sono interrotte da crolli provocati, presumibilmente, dai lavori eseguiti per la costruzione di alcuni fabbricati. Si sviluppano inoltre sotto lo svincolo che dal GRA permette l'ingresso nell'autostrada A24 (fig. 8).

L'estesa rete caveale rilevata è stata realizzata per l'estrazione della formazione vulcanica delle Pozzolane Rosse anche se l'escavo non è arrivato fino alla base di tale formazione. Sopra le Pozzolane rosse sono presenti, e sono stati coltivati, terreni vulcanici granulari di modesto spessore costituiti da un livello grigio prevalentemente sabbioso (livello di riferimento per l'estrazione) e un livello pozzolanaceo marrone. Solo in alcune zone sopra a tali terreni nelle gallerie sono visibili altre formazioni come le Pozzolane Nere,

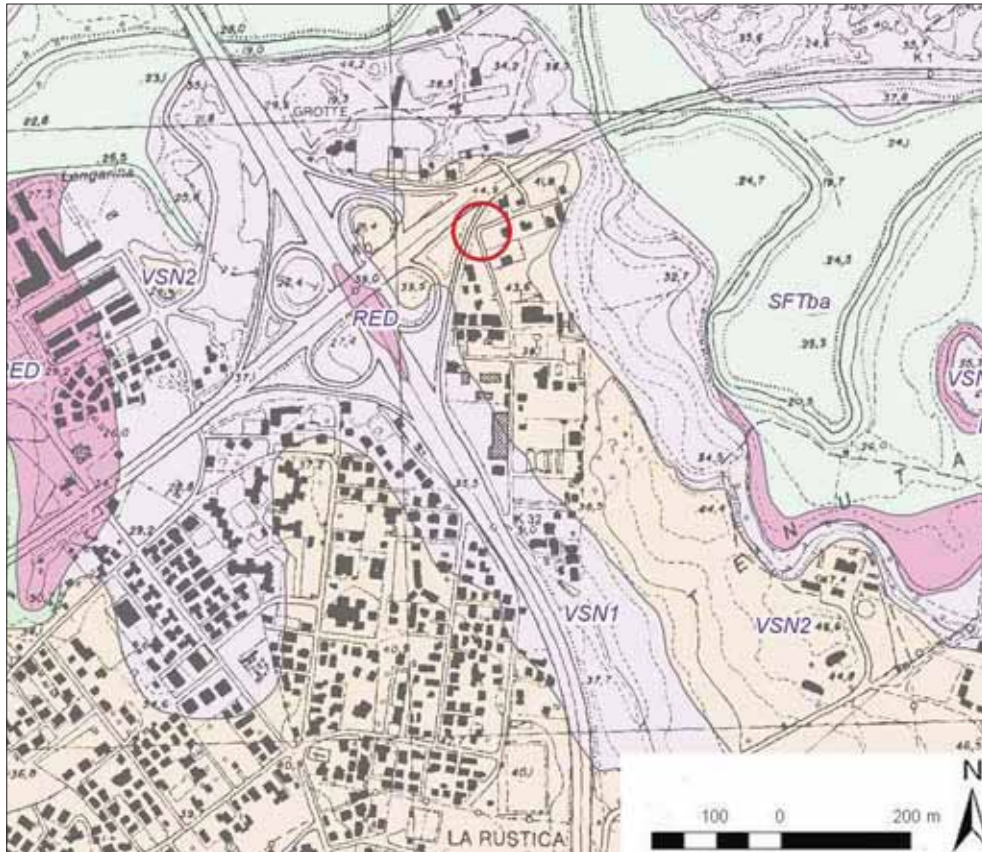


Fig. 7 - Sinkhole a Via Galatea (cerchio rosso): stralcio Carta geologica del Comune di Roma (da Funicello et al. 2008). Legenda: SFTba: deposito alluvionale (Olocene); VSN2: Pozzolanelle (Pleistocene Medio p.p.); VSN1: Tufo lionato (Pleistocene Medio p.p.); RED: Pozzolane rosse (Pleistocene Medio p.p.).

coltivata solo localmente, e il Tufo Lionato, che non è stata coltivato e che, in ragione della sua natura litoide, permette il mantenimento di sezioni delle gallerie con tetto orizzontale. Lo stato di fratturazione delle formazioni non evidenzia situazioni critiche visto che nessuna delle fratture rilevate sembra costituire una via preferenziale di debolezza.

Negli ipogei non sono stati rilevati segni di cedimenti rilevanti o potenziali e la forma stessa delle sezioni, con angoli tra pareti e volte anche di 90 gradi, evidenzia una generale stabilità delle gallerie in assenza di disturbi e di carichi antropici quali infissione di pali di fondazione (riscontrati in alcuni degli edifici presenti nella zona), scavi di trincee profonde, vibrazioni forti e ripetute.

Nelle gallerie non è stata rilevata la presenza di infiltrazioni naturali d'acqua e solo in una zona è stata constatata la presenza di un arrivo d'acqua proveniente da uno scarico privato. Le indagini topografiche e geofisiche e gli studi condotti dal Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade dell'Università di Roma "La Sapienza" (vedi fig. 8) hanno permesso, attraverso un'analisi condotta su alcune sezioni critiche, di ricostruire la geometria delle

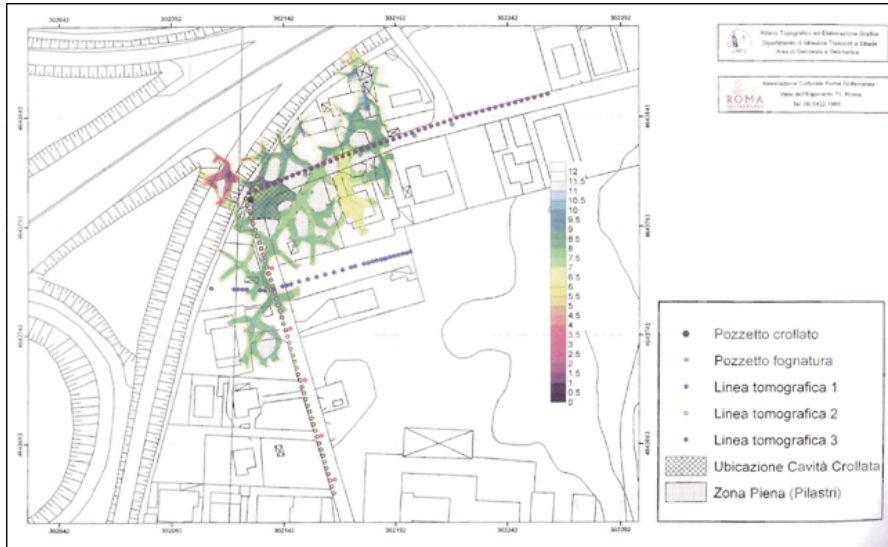


Fig. 8 - Rilievi e indagini effettuate dalla Associazione "Roma Sotterranea" e dal Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade - Università "La Sapienza" [dati forniti dall'Ufficio Protezione Civile del Comune di Roma]. Nella figura sono osservabili in particolare il reticolo di gallerie sotterranee (distinto con un diverso colore in base alla profondità dalla superficie del tetto delle cavità) e il tracciato della fognatura realizzata recentemente lungo Via Galatea.

cavità rispetto allo strato di copertura e alle opere e strutture antropiche presenti in superficie e di fare una valutazione empirica della stabilità attuale delle cavità al fine di definirne la pericolosità.

L'analisi è stata effettuata sulla base della determinazione della relazione tra porzione di terreno influenzata dalla presenza di carichi esterni e il volume interessato dal vuoto della cavità, valutando la loro intersezione come un potenziale fattore di rischio per la stabilità della cavità.

L'insieme delle indagini acquisite ha evidenziato come la formazione del sinkhole antropogenico del gennaio 2008 sia dovuta alla concomitanza di più fattori:

la presenza di gallerie [antiche cave in sotterraneo di pozzolane] le cui volte sono situate anche a pochi metri di profondità dalla superficie;

la presenza di una conduttura fognaria per la cui la realizzazione è stata scavata una trincea che incide la porzione di terreno sovrastante la rete caveale [nel punto in cui è avvenuta la voragine la base della trincea si trova a meno di 1 metro dalla volta delle cavità];

la presenza di vibrazioni indotte dal traffico, in particolare da quello pesante, che transita lungo Via Galatea (diretto ad un deposito di materiali edili) e lungo la rampa di accesso dello svincolo autostradale.

In particolare la recente realizzazione della rete fognaria lungo via Galatea sembra essere con tutta probabilità la causa principale del dissesto in quanto è andata ad indebolire lo spessore di terreno sovrastante le cavità in un punto di particolare debolezza (fig. 9).



Fig. 9 – Sinkhole a Via Galatea: a sinistra vista delle reti di servizio interrotte dalla voragine; a destra vista della trincea scavata per la messa in opera della fognatura (foto dell'Associazione "Roma Sotterranea").

6. CORRELAZIONE TRA IL SINKHOLE DI VIA GALATEA E I PS ERS E RADARSAT

Al fine di verificare le condizioni generali di stabilità della zona di via Galatea e individuare eventuali possibili precursori di evento per il sinkhole del gennaio 2008 è stata effettuata un'analisi dei dati PS, ERS e RADARSAT, disponibili per la zona ove è avvenuto il dissesto. Il primo confronto è stato effettuato con i PS ERS discendenti, che si riferiscono a n. 65 scene relative al periodo 21 aprile 1992 – 20 dicembre 2000 e che sono stati elaborati con la tecnica SPSA.

I PS hanno una densità abbastanza buona nell'abitato e sono presenti nella zona in cui avvenuta la voragine anche in prossimità della medesima. Nessuno di essi tuttavia evidenzia spostamenti essendo le velocità misurate tutte comprese tra -1,49 e + 1,50 mm/anno, valori che in base all'accuratezza del data set disponibile indicano stabilità.

Il secondo confronto è stato effettuato con i PS ERS ascendenti, che si riferiscono a n. 33 scene relative al periodo 28 aprile 1993 – 11 novembre 2000 e che sono stati elaborati anch'essi con la tecnica SPSA.

I PS hanno una densità media nell'abitato, sono poco numerosi nella zona in cui avvenuta il sinkhole e nessuno di essi è ubicato in prossimità del dissesto. Nessuno dei PS ERS ascendenti evidenzia spostamenti nel periodo considerato.

L'ultimo confronto è stato effettuato con i PS RADARSAT ascendenti, in modalità *fine beam*, che si riferiscono a n. 55 scene relative al periodo 7 marzo 2003 – 14 giugno 2007 e che sono stati elaborati con la tecnica SPSA.

I PS hanno una densità molto elevata nell'abitato e sono molto numerosi nella zona in cui avvenuta la voragine. Alcuni PS sono situati nelle immediate vicinanze del sinkhole ed evidenziano spostamenti significativi nel periodo antecedente il 21 gennaio 2008, giorno in cui è avvenuta la voragine. In particolare due PS (evidenziati con il colore giallo)



Fig. 10 - Sinkhole a Via Galatea [cerchio rosso]: distribuzione dei PS ERS discendenti [periodo 1992-2000].



Fig. 11 - Sinkhole a Via Galatea [cerchio rosso]: distribuzione dei PS ERS ascendenti [periodo 1993-2000].

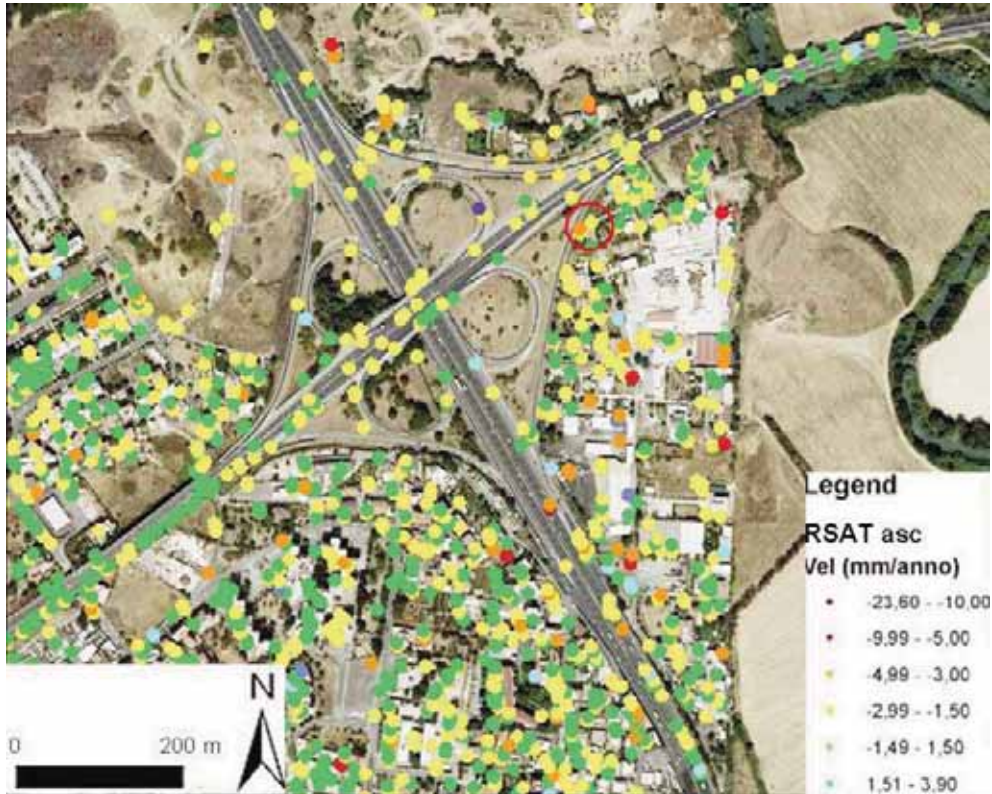


Fig. 12 - Sinkhole a Via Galatea (cerchio rosso): distribuzione dei PS RADARSAT ascendenti (periodo 2003-2007)

mostrano velocità di allontanamento (abbassamento) tra 1,50 e 2,99 mm/anno e un PS (evidenziato con il colore arancione) mostra velocità tra 3,00 e 4,99 mm/anno.

Va ricordato che l'analisi di tipo SPSA - *Standard Permanent Scatterers Analysis* permette di calcolare per tutti i PS le velocità medie (misurate rispetto alla linea di vista) sull'intero periodo di monitoraggio e solo per alcuni PS restituisce le serie temporali delle misure rappresentabili in grafici tempo-velocità. Per i PS situati vicino al sinkhole le serie temporali non sono disponibili e quindi non è possibile comprendere se i movimenti riscontrati siano distribuiti in tutto il periodo considerato o abbiamo avuto inizio in un determinato momento. In ogni caso, il dato interferometrico evidenzia come la voragine sia stata preceduta tra il marzo 2003 e il giugno 2007 da abbassamenti anche significativi del livello del suolo che si prefigurano come precursori dell'evento del gennaio 2008.

7. CONCLUSIONI

L'analisi dei PS relativi alle immagini radar dei satelliti ERS 1/2 non si evidenzia nessuna correlazione tra i sinkholes censiti a Roma nel periodo 1992-2000 e i PS con dati di movimento (abbassamento).

L'analisi dei PS relativi alle immagini radar del satellite RADARSAT ha individuato invece una correlazione tra PS con movimenti e il sinkhole di Via Galatea del gennaio 2008 evidenziando spostamenti significativi nei mesi precedenti l'evento.

L'elaborazione delle immagini del satellite RADARSAT permette di ottenere densità medie di diverse centinaia di PS per km², fornendo un cospicuo numero di punti di misura e consentono quindi valutazioni areali e anche temporali di grande dettaglio, potenzialmente in grado di individuare in alcuni casi movimenti precursori di voragini come avvenuto per lo sprofondamento a Via Galatea.

I risultati ottenuti spingono ad estendere la *back analysis* a tutti i casi di sprofondamento avvenuti a Roma, anche dovuti a cavità createsi all'interno di terreni di riporto, occorsi tra il 2003 e oggi.

Prospettive ancora più interessanti per l'individuazione di precursori di evento possono avere le analisi interferometriche delle immagini radar delle piattaforme satellitari con tempi di rivisitazione più brevi di quelli di RADARSAT come TerraSAR-X (11 giorni) e COSMO-SkyMed (fino a 9 -12 ore).

L'integrazione dei dati interferometrici con quelli geologico-tecnici può offrire in ultima analisi un utile strumento per la definizione del quadro conoscitivo dei fattori di instabilità delle cavità antropiche in aree urbane, per il miglioramento delle procedure di valutazione della pericolosità e per il monitoraggio dei movimenti.

Si ringrazia l'Ufficio Extradipartimentale di protezione civile del Comune di Roma, e in particolare la dott.ssa Patrizia Cologgi, per la messa a disposizione della documentazione tecnica relativa alle indagini condotte nella zona di Via Galatea.

BIBLIOGRAFIA

- CASAGLI N., CORAZZA A., DEL CONTE S. & PROIETTI C. (2008a) - *Contribution of Permanent Scatterers technique to the analysis of natural subsidence in urban area and multi-temporal urbanization impact* - 33° IGC, Oslo, August 6 - 14, 2008
- CASAGLI N., CORAZZA A., DEL CONTE S., FERRETTI A. & PROIETTI C. (2008b) - *Contribution of Permanent Scatterers to the analysis of subsidence in urban area* - Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-03536, EGU 4° General Assembly 2008, Wien, Austria, April 13-18, 2008.
- CERLESI E. (1990) - *La costruenda rete fognaria e la latomia di Centocelle Vecchia*, Roma.
- COLESANTI C., FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. (2003) - *Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique* - Engineering Geology, **68**, 3-14.
- CORAZZA A. (2004) - *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile*. Atti del Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio" Roma 20-21 maggio 2004, 319-330.
- CORAZZA A., LEONE F. & MAZZA R. (2002) - *Il quartiere di Monteverde a Roma: sviluppo urbanistico e dissesti in un'area urbana*. Geologia dell'Ambiente, anno X, **50**, 8-18, SIGEA, Roma.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F., (2000) - *Non-linear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR interferometry*- Trans. on Geoscience and Remote Sensing, **38** (5), 2202-2212.

- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. (2001) - *Permanent Scatterers in SAR interferometry* - I.E.E.E Trans. Geosci. Remote Sens., **39** (1), 8-20.
- FUNICIELLO R. [a cura di] (1995) - *La geologia di Roma. Il Centro storico*. Memorie descrittive della Società Geologica d'Italia, **50**.
- FUNICIELLO R., PRATURLO A., & GIORDANO G. [a cura di] (2008) - *La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*. Memorie descrittive della Società Geologica d'Italia, **80**.
- MASSONET D. & FEIGL K.L. (1998) - *Radar interferometry and its application to changes in the Earth surface* - Rev. Geophys., 36.
- PIPERNO F. (1929) - *Relazione sul disastro del 14 ottobre 1928*. Commissione cooperativa edilizia del Senato, Roma.
- ROSEN P.A., HANSLEY S., JOUGHIN I.R., LI F.K., MADSEN S.N., RODRIGUEZ E. & GOLDSTEIN R.M. (2000) - *Synthetic aperture radar interferometry* - Proc. I.E.E.E., 88 (3).
- VENTRIGLIA U. (1971) - *La geologia della città di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma, Roma.
- VENTRIGLIA U. (2002) - *La geologia del territorio del Comune di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma, Roma.

GENESI ED EVOLUZIONE DI UN SINKHOLE CONNESSO A CAVITÀ ANTROPICHE SOTTERRANEE NEL DISTRETTO ESTRATTIVO DI CUTROFIANO (PROV. LECCE, PUGLIA)

di De Pascalis A.¹, De Pascalis F.¹ & Parise M.²

ABSTRACT

The territory of Cutrofiano, in inland Salento (the southernmost part of Apulia region, southern Italy) is well known for the underground quarrying activity that intensely developed in the last century, exploiting the local calcarenite rocks, to be used as a building material. A very complex and intricate network of subterranean galleries was realized at depth variable from some 10 m in the proximity of the town, to 40-45 m a few km farther south. Total length of the underground quarries is in the order of several tens of kilometers. Presence of the quarries is at the origin of the many events of sinkholes that interested the territory south of Cutrofiano, starting from the 1950's. Vaults and walls of the underground galleries are in fact frequently affected by instability processes and deformations, with detachment of large volumes of rock. Such instabilities may propagate upward, until causing the formation of sinkholes at the ground surface, that locally might interact with the built-up environment.

From a geological standpoint, the study area presents, below the shallow soil cover, alternating sands and bioclastic calcarenites, which overlay a mostly clay formation, consisting of an upper silty level (until 12-13 m depth), and a lower clay level that can be found until the maximum depth at 35 m below the ground surface. The clays gradually pass, through a sandy deposit, to the 25-30 mt thick "Salento Calcarenite" Fm. The latter is the object of the underground quarries, whose presence is testified at the surface by the tens of shafts (diameter 2,5 m), through which access to the quarries was ensured. After abandonment of the quarrying activity, these shafts have often been used to discharge illegally wastes underground.

Recently, during reclamation works in the area, formation of a new sinkhole was observed, and its evolution monitored for several months. The sinkhole is about circular in plan view, and occurred during the night of July 15, 2008. Initially, it presented size of 25,10 m x 21, 90 m, and was 1,20 m deep. A topographic survey was carried out soon after its formation, and repeated after 16 months in order to check the evolution of the sinkhole. In addition, direct (boreholes) and indirect (electrical tomography) surveys were performed at the site, mostly to evaluate the possibility of sinkhole evolution toward the west, where a province road is located. The surveys, and in particular the topographic monitoring, highlighted the increase in depth of the sinkhole, about

¹ Astra Engineering, Galatina (LE)

² CNR-IRPI, Bari; m.parise@ba.irpi.cnr.it

doubled, and its elongation in ESE direction, where another older sinkhole is present a few tens of meters apart.

RIASSUNTO

Il territorio di Cutrofiano, comune dell'area interna della Penisola Salentina (Puglia), è ben noto da decenni per la intensa attività estrattiva in sotterraneo che ha caratterizzato le locali rocce calcarenitiche, da sempre utilizzate come materiale da costruzione. La presenza di estesi e complessi sistemi caveali ipogei (a profondità variabili da circa 10 m a 40-45 m, e con lunghezze totali nell'ordine di svariate decine di chilometri) è all'origine di numerosi eventi di sprofondamento che, a iniziare dagli anni '50 del secolo scorso, hanno interessato il territorio a sud di Cutrofiano. Le volte e le pareti delle cave sotterranee, laddove l'escavazione è stata più aggressiva e disordinata, sono infatti di frequente caratterizzate da diffusi eventi di instabilità, con distacchi di grossi blocchi rocciosi. Le ripercussioni di tali eventi si possono propagare in superficie, risultando nella formazione di più o meno ampie depressioni del terreno che hanno modificato il territorio producendo vistose forme di superficie.

L'area in esame è caratterizzata in affioramento dalla presenza, al di sotto della copertura di terreno vegetale, di un'alternanza disordinata di livelli sabbiosi e di calcarenite organogena. Questi depositi ricoprono con continuità una formazione, del tutto simile alle "Argille subappennine", dove è possibile distinguere due orizzonti: uno superiore prevalentemente siltoso, rinvenibile mediamente fino alla profondità di 12-13 m dal piano campagna, ed uno decisamente argilloso che si spinge fino alla profondità di 35 m dal piano campagna. Le argille passano gradualmente verso il basso, attraverso una formazione di "Sabbie a Brachiopodi", alle "Calcareniti del Salento" il cui spessore è di circa 25-30 m.

La presenza delle cave ipogee, attestate nel banco calcarenitico, è testimoniata, specie nella campagna a sud di Cutrofiano, dalle decine di boccapozzi di forma circolare, del diametro medio di 2,5 metri, dai quali si accedeva alle cave e che invece sono stati utilizzati, non di rado, per sversare rifiuti nel sottosuolo. Di recente, nel corso di operazioni di bonifica di una parte delle cave ipogee, e di verifica delle relative condizioni di stabilità, è stato osservato un *sinkhole* di neo-formazione, il cui sviluppo è stato controllato per diversi mesi. Lo sprofondamento, di forma grossomodo circolare, avvenuto nella notte del 15 luglio 2008, presentava, nell'immediato, le seguenti dimensioni: 21,90 m circa di lunghezza; 25,10 m circa di larghezza profondità massima pari a 1,20 m. Si è proceduto ad un immediato rilievo topografico dell'area interessata ed all'effettuazione di indagini dirette (carotaggi) ed indirette (tomografie elettriche) anche al fine di accertare se l'evoluzione dello sprofondamento avesse potuto interessare la zona ad ovest, ove corre una strada provinciale. Il monitoraggio ha evidenziato ad oggi un incremento notevole della profondità dello sprofondamento, mediamente più che raddoppiato, ed un suo allungamento verso est-sud-est, quasi a volersi congiungere con un altro sprofondamento, presente da anni proprio in quella direzione, distante poche decine di metri.

1. INTRODUZIONE

E' ben nota la diffusione di cave sotterranee in Italia centro-meridionale (AVERSA & EVANGELISTA, 1998; DEL PRETE & PARISE, 2007; GISOTTI, 2008), originata dalla presenza di materiali di interesse per le attività estrattive (tufi vulcanici, calcareniti), presenti al di sotto di

coperture a spessore variabile, o scavati ed estratti in sottoterraneo al fine di conservare l'utilizzo (e, pertanto, il valore) agricolo dei sovrastanti terreni. In Puglia, tra le varie aree interessate da presenza di cave sotterranee (SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA, 1989; CHERUBINI *et alii*, 1993; CHERUBINI & SGOBBA, 1997; SANNICOLA, 1997; FIORITO & ONORATO, 2004; WAGENSOMMER, 2007), uno dei distretti estrattivi di maggiore importanza in tal senso è indubbiamente quello di Cutrofiano, nel Salento leccese, dove nel secolo scorso fu intensivamente avviata la coltivazione in sottoterraneo mediante realizzazione di numerose cave ipogee (MENEGATTI & TONI, 1970; TONI, 1990; MAINARDI, 1999).

La presenza di cavità sotterranee pone chiaramente seri problemi in termini di sicurezza e di salvaguardia della privata e pubblica incolumità. Specie allorché tali cavità sono dislocate a pochi metri di profondità, i dissesti che in esse avvengono possono ripercuotersi in maniera più o meno diretta sul sovrastante ambiente antropizzato, ed indurre danni, anche di notevole entità. Se le cavità sono poste a maggiore profondità (oltre i 10-15 metri) può comunque accadere che i dissesti che vi si verificano inducano la propagazione delle deformazioni verso l'alto, interessando la sovrastante copertura di materiali, sino a determinare la formazione di *sinkhole* in superficie (WALTHAM & LU, 2007; PARISE, 2008; LOLLINO & PARISE, 2010).

Come emerso da studi svolti dal Dipartimento della Protezione Civile (CORAZZA, 2004), i fenomeni di sprofondamento connessi a cavità antropiche in Italia risultano nettamente prevalenti rispetto a quelli dovuti a cavità di origine naturale (794 casi contro 215 nell'intero territorio nazionale). Tra le tipologie di cavità antropiche all'origine dei dissesti, le cave sotterranee hanno un ruolo primario. Anche di recente, casi come quello verificatosi a Gallipoli nel marzo 2007 (DE DONATIS, 2006/07; DELLE ROSE, 2006/07; PARISE & DELLE ROSE, 2009) hanno posto all'attenzione della pubblica opinione tale problematica, che indubbiamente è di grande interesse nella regione Puglia, ma che non sempre è stata oggetto della dovuta attenzione. Proprio al fine di evidenziare l'attualità del tema *sinkhole* in Puglia, si propone in questo studio l'analisi della formazione e della evoluzione del più recente sprofondamento registrato nel territorio di Cutrofiano, una delle aree regionali, come già accennato in precedenza, dove la presenza di cave sotterranee risulta maggiormente elevata (BARNABA *et alii*, 2010).

2. LE CAVE SOTTERRANEE DI CUTROFIANO

Nel Salento una tettonica prevalentemente di tipo disgiuntivo ha dislocato in blocchi il basamento carbonatico cretaceo, creando una struttura ad *horst e graben*, in cui le Serre Salentine, allungate in senso NW-SE, costituiscono le zone di alto morfologico-strutturale, intervallate dai settori ribassati, che risultano colmati da depositi più recenti (D'ALESSANDRO *et alii*, 1987).

Nel territorio di Cutrofiano (Fig. 1), la locale successione stratigrafica mostra in superficie la presenza di sabbie limose ospitanti una falda superficiale, sita a profondità media intorno ai 5 metri, e sostenuta alla base da argille grigio-azzurre. Tale falda, a carattere sospeso, presenta oscillazioni che sono direttamente connesse alla ricarica meteorica (CALÒ *et alii*, 1991, 2006). Sabbie limose ed argille grigio-azzurre risalgono al Pleistocene inferiore-medio, con spessore totale nell'ordine di 15-25 m, i primi 5-8 dei quali sono a prevalenza sabbiosa, mentre nei restanti predominano le litologie argillose (Fig. 2). La successione prosegue verso il basso con le Calcareniti del Salento del Pleistocene inferiore: calcareniti organogene biancastre a grana media, poco stratificate e tenere, in

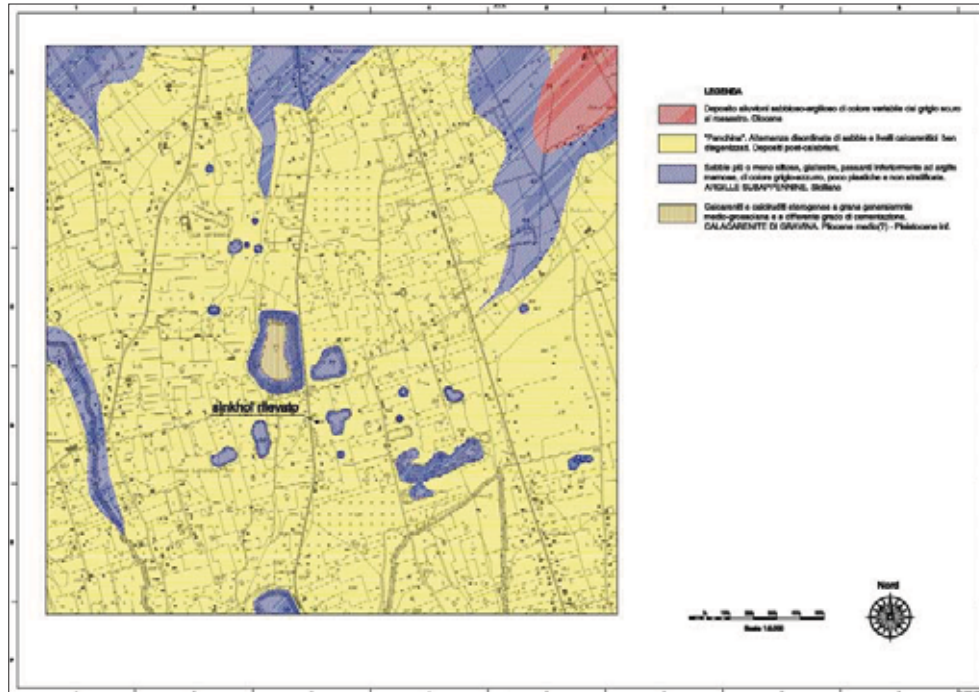


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio, e schema geologico.

spessore di 15-20 m. Nell'ambito di tale formazione si possono distinguere, dall'alto verso il basso:

- a) calciruditi giallastre, compatte, in spessore di 2-3 m, localmente note con il nome di *mazzara*;
- b) calcareniti bianco-giallastre, a grana media, ben cementate, con spessore di 4-5 m;
- c) calcareniti biancastre a grana fine, mediamente cementate, in spessore variabile dai 7 ai 12 m;
- d) calcareniti biancastre poco cementate, a grana da media a fine, in spessore di 2-3 m.

Le Calcareniti del Salento, ed in particolare i due livelli centrali (b e c nella suddivisione su riportata) che presentano le migliori caratteristiche tecniche, sono il litotipo oggetto dell'attività estrattiva sotterranea a Cutrofiano, utilizzato come materiale da costruzione (DE GIORGI, 1901; TONI & QUARTULLI, 1986).

Infine, ancora procedendo verso il basso, la successione continua con la Pietra Leccese, del Miocene inferiore-medio (calcareniti marnose organogene avana-giallastre, a grana medio-fine, con spessore di circa 30 m), in trasgressione sul substrato carbonatico del Cretaceo superiore, rappresentato dai Calcari di Melissano (COTECCHIA, 1953; MARTINIS, 1967; CIARANFI *et alii*, 1988), posti nella zona di Cutrofiano intorno ai 90 m di profondità: si tratta di calcari microcristallini, con locali intercalazioni di dolomie.

L'assetto geologico-strutturale a sud dell'abitato di Cutrofiano presenta una generale immersione degli strati verso i quadranti meridionali ed occidentali; ciò fa sì che i livelli calcarenitici con le migliori caratteristiche tecniche (quelli cioè interessanti ai fini estrat-

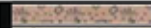
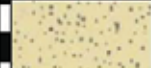



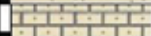
- Sondaggio n° 1 - Profondità raggiunta m-42 dal p.s. - Quota Ass. P.C. m 68 s.l.m.				
Quote (mt)	Litologie	Descrizione	Quote	Falda
1		Terrano vegetale	0.80	
2		Sabbie calcaree incoerenti con frequenti intersezioni di livelli calcarei o arenacei, frammate a calcare polverulento biancastro.	3.50	
3				
4				
5		Sabbie limo-argillose di colore giallo-verdastro.	5.50	
6			8.00	7.00
7		Limi argillosi di colore verdastro con frequenti striature grigie e rare venature di calcare polverulento biancastro.		
8		Argille talora siltose di colore variabile fra il grigio e l'azzurro.	24.00	
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24		Sabbie talora debolmente argillose di colore marrone chiaro.	27.00	
25		calcareniti a grana medio-grossolana di colore biancastro.	42.00	
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				

Fig. 2 - Colonna stratigrafica tipo dell'area in esame.

tivi] siano presenti nel sottosuolo a profondità variabile da poco più di 7 m nei pressi dell'abitato, sino a oltre 50 m qualche chilometro più a S.

Come già accennato, i motivi all'origine dell'apertura di cave sotterranee sono da ricercare, oltre al su richiamato assetto geologico, alla possibilità di evitare la perdita nel valore dei terreni per l'attività agricola. Una volta decisa l'apertura di una cava sotterranea, la profondità di interesse veniva raggiunta scavando un pozzo verticale di diametro pari a 3 m (Fig. 3). Questi era rivestito con conci rettangolari di calcarenite, al fine di sostenere lo scavo all'interno dei materiali di copertura, la cui spinta poteva risultare in problemi di stabilità delle pareti del pozzo (specialmente in corrispondenza delle argille). Si realizzavano così anelli di rivestimento intorno alle pareti del pozzo, l'ultimo dei quali era posto in appoggio sul *mazzaro*. Il livello di *mazzaro*, infatti, per il maggior grado di cementazione che lo caratterizza, costituiva il supporto delle gallerie, consentendo pertanto di procedere con lo scavo nei sottostanti livelli, a cementazione inferiore. La stessa forma del pozzo cambiava una volta raggiunto il *mazzaro*, passando da circolare ad una forma a campana, la quale si raccordava alle pareti delle sottostanti gallerie. Queste presentavano in media una sezione di 5 x 5 m. Lo scavo procedeva a croce o a pilastri sfalsati, lungo bancate calcarenitiche di spessore massimo di 9 m; le gallerie presentano infatti, con rare eccezioni, altezze comprese tra i 6 e gli 8 m. La loro monotonia e regolarità era interrotta localmente da piccole stanze laterali, per il deposito di attrezzi o adibite per momenti di riposo degli operai.

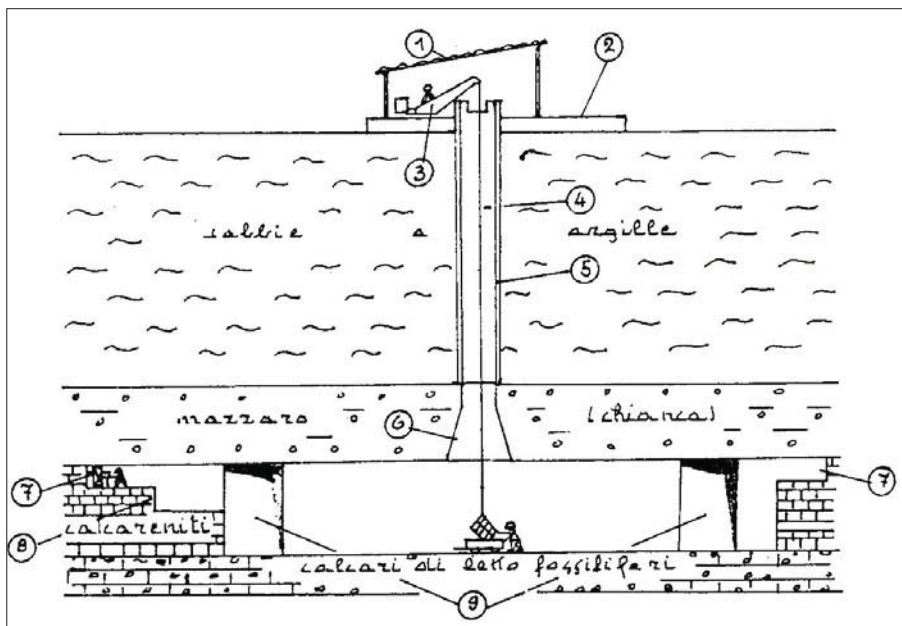


Fig. 3 - Schema esemplificativo delle attività di apertura e lavorazione delle cave sotterranee a Cutrofiانو (da Toni & Quartulli, 1986). Legenda: 1) copertura; 2) piano di carico esterno; 3) gru; 4) pozzo principale; 5) rivestimento; 6) campana; 7) fassa; 8) bancata; 9) galleria.

Altro elemento degno di interesse nella realizzazione delle cave ipogee era il pozzo secondario, scavato lateralmente a quello principale, che serviva per il passaggio del personale mediante scale di ferro che erano poggiate su piani di riposo distanziati 4-6 m. Il cosiddetto *lanternino* era di piccole dimensioni (1,50 x 0,60 m, oppure 2 x 0,80 m) ed usciva nel pozzo principale, consentendo di raggiungere la base della galleria principale con un'ultima lunga scala di ferro o mediante una scalinata intagliata nella parete calcarenitica del tratto basale del pozzo.

Di fondamentale importanza il ruolo svolto dai pilastri che separavano le gallerie: questi, estremamente regolari, presentavano in media larghezza pari a 20 m, ed avevano il ruolo primario di fungere da sostegno dello scavo sotterraneo. Se i valori medi di larghezza ed altezza delle cave ipogee, e di conseguenza dei pilastri, erano rispettati si poteva osservare uno sviluppo notevole degli ambienti ipogei, senza che ciò comportasse particolari problemi in termini di stabilità. Si è però osservato che, laddove ci si spingeva a maggiori altezze con lo scavo, o si ampliava la larghezza delle gallerie a discapito dei pilastri, si cominciarono ad osservare segnali indiscutibili di deformazione su volte e pareti, sino all'occorrenza di distacchi e crolli.

Tali fenomeni di instabilità avvenuti nel sottosuolo hanno avuto una propagazione verso l'alto, con sviluppo delle deformazioni nei sovrastanti livelli, sino al raggiungimento della superficie topografica ed alla formazione di sprofondamenti. Molte cave sotterranee vennero pertanto via via abbandonate, mentre in superficie le corrispondenti aree risultavano caratterizzate da più o meno nette depressioni che, nel caso raggiungessero i livelli argillosi al di sotto delle sabbie limose, presentavano l'affioramento della tavola d'acqua corrispondente alla falda superficiale sospesa.

Sebbene il territorio a S di Cutrofiano sia costellato da numerose forme connesse a sprofondamenti, ed alla loro successiva evoluzione, con coalescenza di forme limitrofe e formazione di estese depressioni, ricerche storiche eseguite nell'area hanno portato a ben scarsi risultati sulle relative epoche di occorrenza (PARISE *et alii*, 2008). Una delle aree maggiormente colpite da tali fenomeni risulta comunque essere la zona Signorella, sede del *sinkhole* più recente, la cui analisi è oggetto del presente lavoro.

A partire dal 2004, nell'ambito di progetti di caratterizzazione e bonifica della zona giunti a completamento a fine 2009 sono state avviate indagini sulle cave sotterranee di Cutrofiano. Tali attività hanno finalmente consentito di raccogliere numerose informazioni sull'andamento delle cave ipogee e le loro condizioni di stabilità. Per ciascuna cava esplorata è stato condotto un attento rilevamento speleologico e geologico-applicativo, essenzialmente dedicato alla cartografazione di qualunque elemento di dissesto osservato nel sottosuolo (da crolli già avvenuti, a presenza di lesioni o fratture, deformazioni, ecc.). Alcuni esempi di rilievi delle cave ipogee sono riportati in figura 4. Non tutte le cave rilevate mostrano situazioni di pericolo e dissesti in atto od incipienti; dalle analisi preliminari dei dati sinora raccolti ed elaborati sembra che il mancato rispetto delle dimensioni (larghezza ed altezza) delle cave ipogee possa essere uno dei principali fattori all'origine dei dissesti, insieme ai meccanismi di alterazione della roccia che inducono un progressivo decadimento delle caratteristiche fisico-meccaniche. Non si è invece avuto alcun riscontro all'ipotesi in base alla quale i dissesti si svilupperebbero in corrispondenza delle cave ipogee scavate manualmente (BRUNO & CHERUBINI, 2005), di contro ad una maggiore stabilità di quelle in cui le operazioni di scavo erano meccanizzate.

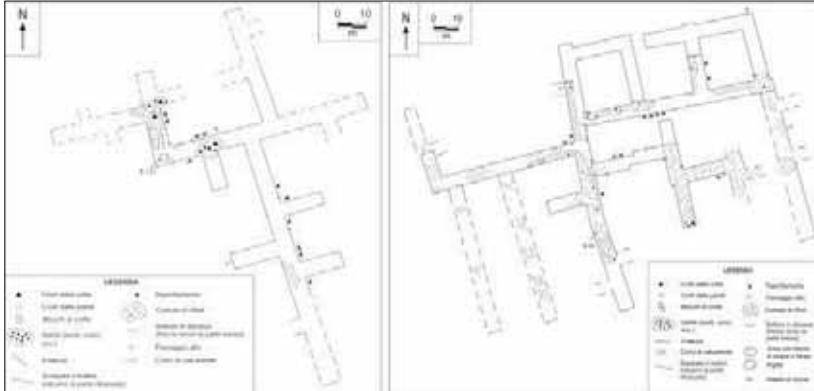


Fig. 4 - Esempi di rilievi delle cave sotterranee, eseguiti nell'ambito delle operazioni di bonifica (anni 2008-2009).

3. IL SINKHOLE DEL 15 LUGLIO 2008

In data 15 luglio 2008, nei pressi di Casino Orsini si è verificato uno sprofondamento del terreno, che ha interessato un'area di forma approssimativamente circolare, lunga 21,90 m, larga 25,10 m e profonda 1,20 m (Fig. 5). Il *sinkhole*, visionato il giorno successivo dagli scriventi, presentava una serie di fratture superficiali che si estendevano tutt'intorno il suo sviluppo (Fig. 6). Distante poco meno di 22 m dalla Strada Provinciale 198, esso costituiva un chiaro elemento di pericolo, da monitorare e di cui seguire gli eventuali sviluppi evolutivi.



Fig. 5 - Il sinkhole, fotografato pochi giorni dopo la sua formazione (luglio 2008).

Al momento della formazione del *sinkhole*, il principale motivo di preoccupazione, stante la localizzazione in un terreno rurale, era la sua possibile evoluzione, con ampliamento dell'area interessata, in particolare in direzione W, verso la strada provinciale. L'altro elemento a rischio presente in zona era una costruzione disabitata (Casino Orsini), sita a poca distanza dal *sinkhole*, e sulla quale si osservavano alcune lesioni (Fig. 7); non si era in grado però di affermare se queste fossero legate allo sviluppo dello sprofondamento, o preesistenti ad esso, e quindi connesse a vetustà dell'edificio e/o problemi strutturali. Al fine di acquisire dati utili alla comprensione del fenomeno, l'Amministrazione Comunale ha pertanto provveduto a far svolgere indagini dirette ed indirette (LIGORI, 2009). Venivano eseguiti 6 carotaggi a distruzione di nucleo lungo il bordo della SP 198, per una profondità di circa 40 metri, e si eseguivano 6 stendimenti geoelettrici (con due distinti array



Fig. 6 - Evidenze delle fratture concentriche in esterno, e dei gradini all'interno dell'area interessata dal sinkhole.



Figura 7 - Lesioni sulle pareti del Casino Orsini, nei pressi del sinkhole.

elettrodici, il Wenner ed il polo-dipolo], utilizzando 48 elettrodi, con spaziatura pari a 5 m e lunghezza totale degli stendimenti pari a 235 m ciascuno.

In nessuno dei carotaggi effettuati è stata rilevata la presenza di cavità sotterranee, il che indica che le cave non si spingono a ridosso della strada provinciale, sul lato E. Come mostrato nella figura 8, che riassume le indagini eseguite e i risultati della tomografia elettrica a una profondità di 28 m dal piano campagna, le principali anomalie di resistività si osservano ad W ed a N del *sinkhole*, mentre nessun elemento particolare si registra in corrispondenza dello stesso. Ciò evidenzia presumibilmente i limiti delle indagini indirette, che risultano anche da quanto registrato ad W della SP 198: la cava ipogea corrispondente al pozzo B 33 si attesta infatti ad una profondità di 35 m dal piano campagna, ma i suoi settori più occidentali non risultano chiaramente dai profili elettrici 5 e 6, che pure sono ubicati al di sopra di almeno due gallerie sotterranee.

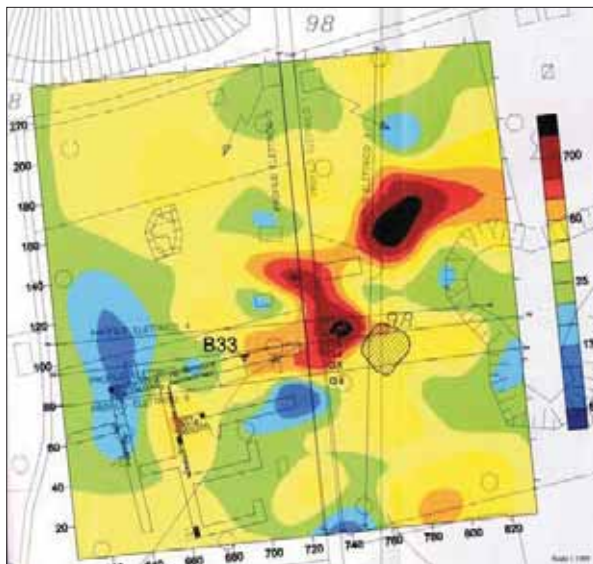


Fig. 8 - Localizzazione delle indagini dirette ed indirette, e distribuzione della resistività a - 28 m dal piano campagna [da Ligori, 2009]. I cerchi con i numeri da 1 a 6, subito ad E della Strada Provinciale, indicano i sondaggi a distruzione di nucleo; è anche riportato l'andamento della cava sotterranea corrispondente al pozzo B 33, ad W della Strada provinciale. Il *sinkhole* è indicato dalle linee oblique.

La presenza, a distanza di circa 30 m dal *sinkhole*, di un boccapozzo di accesso alle cave sotterranee, poteva consentire un'ispezione diretta nel sottosuolo, al fine di accertare la tipologia e l'entità dei dissesti all'origine della formazione dello sprofondamento in superficie. Purtroppo, l'apertura del boccapozzo rivelava come esso fosse stato negli anni utilizzato per lo scarico di rifiuti (in gran parte pneumatici), ai quali era stato poi appiccato fuoco, come ben evidente dalle pareti annerite del pozzo stesso (Fig. 9). Pur intervenendo con operazioni di bonifica dei rifiuti, mediante l'utilizzo di appositi mezzi meccanici che evitassero la discesa diretta degli operatori nel pozzo, non è stato pertanto possibile ispezionare direttamente la cava sotterranea, né muoversi da questa in direzione del *sinkhole* appena generato.



Fig. 9 – Boccapozzo sito nei pressi del sinkhole, poco a N di questo.

Al fine di raccogliere ulteriori elementi relativi alla evoluzione recente del sito in esame, è stata condotta un'analisi foto-interpretativa multi-temporale su fotografie aeree relative a tre voli risalenti, rispettivamente, al 1954, 1978 e 1983 (Fig. 10). Le fotografie aeree del 1954, per le quali non si ha riscontro di mese e giorno delle riprese, sono quelle a scala minore (circa 1:33.000) e sono parte del volo noto come "volo Italia". Le foto aeree del 1978 derivano da una levata aerea eseguita il 18 novembre, con scala all'incirca pari a 1:15.000. Il volo del 1983 è stato eseguito nel mese di giugno, e anch'esso ha prodotto fotografie alla scala di circa 1:15.000.

L'analisi fotointerpretativa di immagini aeree riprese in momenti temporali diversi è uno strumento estremamente utile alla valutazione della evoluzione del paesaggio, nonché delle modificazioni eventualmente indotte su di esso ad opera dell'uomo. Nel caso specifico di Cutrofiano, nonostante il limite rappresentato dalla scala delle foto del 1954, la fotointerpretazione di ciascuna levata aerea ha consentito l'identificazione dei limiti delle forme del paesaggio e la relativa cartografazione, mentre il confronto tra le cartografie così prodotte consente di effettuare alcune considerazioni sulle forme esaminate nell'arco di tempo che va dagli anni '50 ad oggi.

Il settore in cui è ubicato il *sinkhole* del 15 luglio 2008, attualmente di forma trilobata, deriva chiaramente da coalescenza di originarie forme singole. Nel 1954 le voragini non risultano ben evidenti, presumibilmente a causa della scala dei fotogrammi. Si intravedono comunque due blande depressioni, che sembrano più evidenti ai margini W e S del sito. Nel 1978 si individuano due nette voragini: quella meridionale di forma ellittica, con asse maggiore in direzione NW-SE, mentre l'altra, nel settore orientale del sito, è a sua volta formata da una voragine circolare all'estremo E, e da una più piccola, anch'essa circolare ma meno profonda, subito a SW. Proseguendo verso W, con andamento rettango-

lare si sviluppa quella che diverrà successivamente un'area di cava a cielo aperto. Tutte le voragini descritte non sembrano allagate nelle foto del 1978, ma risultano parzialmente in ombra sulle immagini, il che rende non certa l'identificazione della presenza o meno di acqua al loro interno.

Nel 1983 la depressione si presenta complessivamente con un andamento che ricalca alquanto quello riportato sulla carta topografica. Internamente, però, si riscontrano alcune differenze: è possibile infatti riconoscere due parti più profonde, ubicate rispettivamente al margine S (forma circolare, non allagata) e al margine ENE (più profonda, di forma composita: rettangolare in direzione E-W, ma con terminazione circolare verso E; allagata). Il resto della depressione appare ben marcato rispetto al piano campagna, segno presumibile che è già stata avviata la coltivazione della cava superficiale.

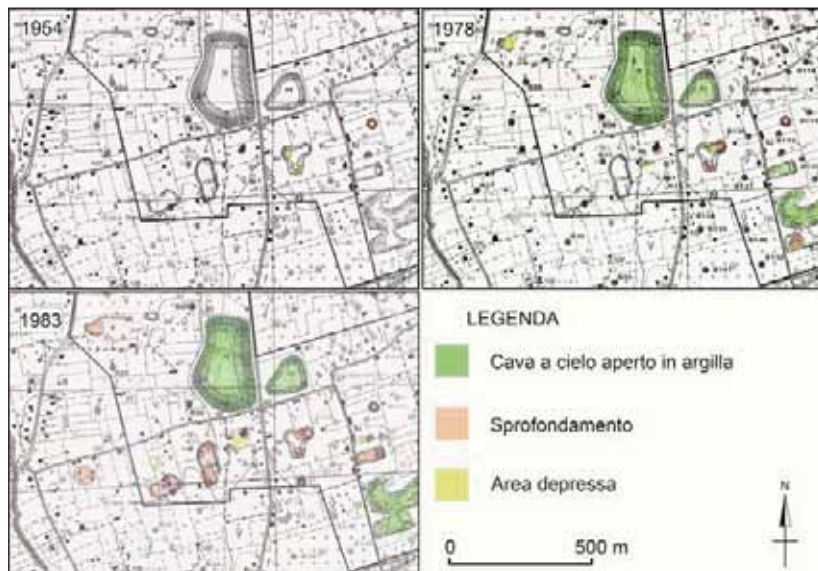


Fig. 10 - Evoluzione multi-temporale (1954-1978-1983) di cave superficiali, depressioni e voragini nella zona Signorella. Il verde indica la presenza di cave superficiali, il giallo le depressioni, l'arancione i sinkhole.

Entrando più nel dettaglio, la zona direttamente interessata dal *sinkhole* del 15 luglio 2008 non è individuabile come voragine o depressione sulle foto del 1954 e del 1978, ma su quelle 1983 si osserva la presenza di una zona depressa di piccole dimensioni proprio in corrispondenza del settore dove si svilupperà nel 2008 il *sinkhole*.

Altro elemento di notevole importanza nell'analisi delle foto aeree multi-temporale è l'osservazione della presenza o meno di acqua in corrispondenza delle varie depressioni e voragini. Come noto, infatti, il Salento leccese è interessato da problemi di allagamento (CARROZZO *et alii*, 2003; DELLE ROSE & PARISE, 2009), principalmente derivanti dalla morfologia dei luoghi e dalla natura carsica del territorio, ma indubbiamente connessi anche alle modificazioni antropiche indotte nel corso dei secoli, con obliterazione o copertura di molti punti naturali di assorbimento delle acque meteoriche, mentre altri sono stati modificati ed utilizzati per lo smaltimento di acque reflue (DELLE ROSE *et alii*, 2001).

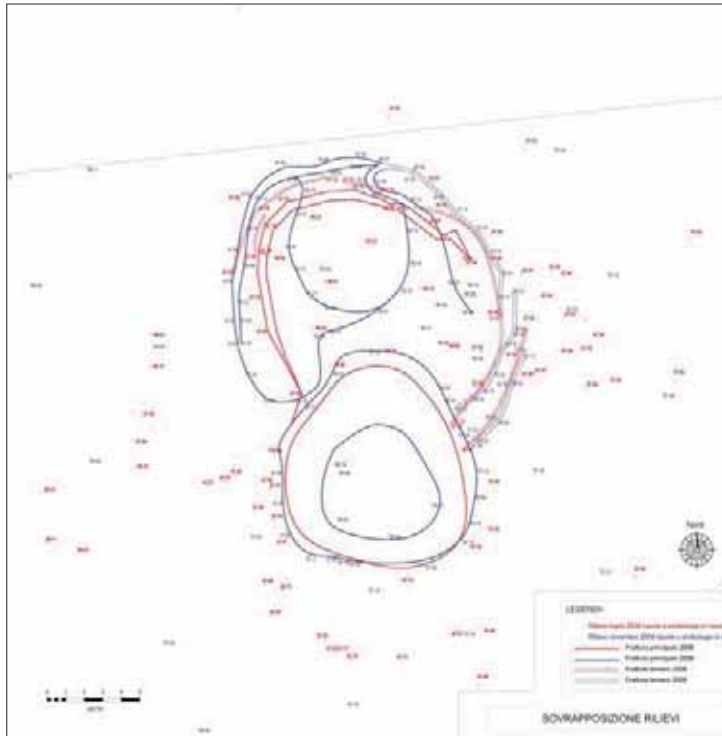


Fig. 11 – Schema di evoluzione del sinkhole, sulla base di rilievi topografici eseguiti subito dopo la sua formazione (luglio 2008) e a distanza di oltre un anno (novembre 2009).

Successivamente alla formazione del *sinkhole*, sono stati eseguiti in due date diverse [subito dopo lo sviluppo del *sinkhole*, nel luglio 2008, e a oltre un anno di distanza nel novembre 2009] rilievi topografici per la sua precisa caratterizzazione. Le operazioni di rilievo topografico sono state eseguite tramite strumentazione GPS - Leica System 1200, costituita dal palmare RX1250XC con antenna GPS Bluetooth. Detta strumentazione GPS misura la fase dei segnali ricevuti dai satelliti e, una volta osservata e calcolata una linea base tra i due ricevitori utilizzati, allorché questi osservano il medesimo gruppo di satelliti simultaneamente, determina le coordinate e la relativa quota altimetrica di ciascun punto. La strumentazione utilizzata in campo, sfruttando la ricezione dei dati GNSS (*Global Navigation Satellite System*, e in particolare dodici stazioni permanenti a terra distribuite sul territorio della Regione Puglia) della rete della Regione Puglia e la relativa correzione differenziale in tempo reale dei dati acquisiti dal ricevitore GPS, ha consentito di raggiungere un'accuratezza centimetrica del dato di posizione. I rilievi topografici consentono di fare alcune considerazioni sull'evoluzione del fenomeno (Fig. 11): la fase di attivazione del *sinkhole* ha prodotto le forme più evidenti in superficie, come conseguenza di un probabile fenomeno di instabilità avvenuto nelle sottostanti cave. Successivamente, nei giorni immediatamente successivi alla formazione del *sinkhole*, si è registrata l'apertura di una serie di fratture concentriche, intorno al perimetro dello sprofondamento (Fig. 6), ma dopo qualche giorno la situazione sembrava aver raggiunto un proprio equilibrio.

Il rilievo topografico effettuato nel novembre 2009 evidenzia però alcune differenze (Fig. 11), sia in termini di allargamento dei bordi dello sprofondamento, che nell'aumento della massima profondità, il che sta ad indicare che assestamenti sono tuttora in atto, e che presumibilmente nel sottosuolo si possa verificare una ulteriore evoluzione per crolli ed instabilità. Purtroppo, l'impossibilità di eseguire rilievi diretti nelle cave sotterranee, a causa dei motivi richiamati in precedenza, non ha consentito di descrivere con chiarezza la tipologia dei fenomeni di instabilità che hanno determinato la genesi del *sinkhole* in superficie.

4. CONCLUSIONI

Lo sviluppo del *sinkhole*, nella notte del 15 luglio 2008, nei pressi di un'area dove erano già in corso operazioni di bonifica delle cave sotterranee, evidenzia come tali fenomeni si possano verificare senza dare significativi elementi di allarme (sviluppo di deformazioni in superficie, apertura di fratture, ecc.). La previsione della genesi di sprofondamenti connessi ad attività antropiche risulta pertanto estremamente difficile, e non può che basarsi su una approfondita conoscenza del sottosuolo, ottenibile mediante indagini geognostiche dirette ed indirette, che, ove possibile, devono necessariamente essere integrate da esplorazioni dirette di carattere speleologico, finalizzate anche alla osservazione di eventuali dissesti o deformazioni in atto. Tali rilievi sono infatti gli unici in grado di consentire una reale taratura dei dati di carattere geofisico, che altrimenti conservano un certo grado di aleatorietà.

Un territorio quale quello sito a S di Cutrofiano, che è stato intensamente sfruttato per attività estrattiva in sotterraneo, e quindi è caratterizzato da un sistema labirintico, seppur regolare di cave ipogee, va monitorato di continuo, al fine di evidenziare qualsiasi segnale premonitore che possa indicare il futuro sviluppo di ulteriori *sinkhole*. Di pari passo al monitoraggio, è quanto mai opportuno approfondire la conoscenza del territorio, con particolare riguardo all'andamento delle cave sotterranee, visto che, ad eccezione di quella prodotta nel corso delle recenti operazioni di bonifica, non esiste una documentazione specifica dello sviluppo delle cavità nel sottosuolo.

Ciò assume ulteriore importanza se si considera che le cave in buone condizioni, all'interno delle quali non è stato osservato alcun dissesto, potrebbero essere oggetto di piani di recupero (CALÒ *et alii*, 1992) ed utilizzate, ad esempio, anche per la realizzazione di attività di tipo museale che illustrino gli elementi di archeologia industriale dei siti.

BIBLIOGRAFIA

- AVERSA S. & EVANGELISTA A. (1998) – *The mechanical behaviour of a pyroclastic rock: yield strength and "destruction" effect*. Rock Mechanics and Rock Engineering, **31** (1), 25-42.
- BARNABA F., CAGGIANO T., CASTORANI A., DELLE ROSE M., DI SANTO A.R., DRAGONE V., FIORE A., LIMONI P.P., PARISE M. & SANTALDIA F. (2010) – *Sprofondamenti connessi a cavità antropiche nella Regione Puglia*. Presente volume.
- BRUNO G. & CHERUBINI C. (2005) – *Subsidence induced by the instability of weak rock underground quarries in Apulia*. Giornale di Geologia Applicata, **1**, 33-39.
- CALÒ G.C., GNONI R. & STANI M. (1991) – *Caratteri idrogeologici delle falde superficiali della Penisola Salentina e valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Amministrazione Provinciale di Lecce.

- CALÒ G.C., MELIDORO G. & MONTERISI L. (1992) – *Recupero tecnico-economico di cave sotterranee in rocce calcarenitiche nella Provincia di Lecce*. Atti 1° Conf. Europea “Euro-cave 92”, Courmayeur.
- CALÒ G.C., LUCREZIO D., POLITO L.A., SPIZZICO V. & TINELLI R. (2006) - *Un nuovo piano di coltivazione per il rilancio dell’attività estrattiva a Cutrofiano (Penisola Salentina, Puglia)*. Atti Conv. “Le risorse lapidee dall’antichità ad oggi in area mediterranea”, Canosa di Puglia, 25-27 settembre 2006, 351-356.
- CARROZZO M.T., DELLE ROSE M., DE MARCO M., FEDERICO A., FORTE A., MARGIOTTA S., NEGRI S., PENNETTA L. & SIMEONE V. (2003) – *Pericolosità ambientale di allagamento nel Salento leccese*. Quaderni di Geologia Applicata, **2** (1), 77-85.
- CHERUBINI C. & SGOBBA D. (1997) - *Le cave sotterranee di tufo pugliesi: descrizione degli ipogei e valutazione di stabilità*. Atti IV Conv. Naz. Cavità Artificiali, Osoppo, 30 maggio – 1 giugno 1997, 51-68.
- CHERUBINI C., GERMINARIO S., PAGLIARULO R. & RAMUNNI F.F. (1993) – *Caratterizzazione geomeccanica delle calcareniti di Canosa in relazione alla stabilità degli ipogei*. Atti I Conv. Naz. “Le pietre da costruzione in Puglia: il Tufo Calcareo e la Pietra Leccese”, Bari, 221-230.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) – *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. Memorie Società Geologica Italiana, **41**, 449-460.
- CORAZZA A. (2004) – *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile*. Atti 1° Seminario “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio”, Roma, 20-21 Maggio 2004, 319-330.
- COTECCHIA V. (1953) – *Osservazioni geologiche e materiali naturali per la fabbricazione di cemento e laterizi nella zona di Galatina (Lecce)*. Annali della Facoltà di Ingegneria, Università di Bari, **1**, 193-214.
- D’ALESSANDRO A., LOIACONO F. & RICCHETTI G. (1987) – *Note illustrative alla carta geomorfica del Salento Meridionale (F. 525 “Gallipoli”, 526 “Nardò”, 527 “Otranto”, 536 “Ugento” e 537 “Capo S. Maria di Leuca”)*. Atti Convegno sulle Conoscenze Geologiche del Territorio Salentino, Quaderni di Ricerche del Centro Studi Geotecnica e d’Ingegneria, Lecce, **11**, 207-222.
- DE DONATIS M. (2006/2007) – *La voragine di Gallipoli: primi risultati delle prospezioni geofisiche (GPR) eseguite nell’area*. Geologi e Territorio, **4/2006-1/2007**, 21-24.
- DE GIORGI C. (1901) - *Note e ricerche sui materiali edilizi adoperati nella provincia di Lecce*. Congedo, Galatina (reprint in 1981).
- DELLE ROSE M. (2006/2007) – *La voragine di Gallipoli e le attività di Protezione Civile dell’IRPI-CNR*. Geologi e Territorio, **4/2006-1/2007**, 3-12.
- DELLE ROSE M. & PARISE M. (2009) - *Water management in the karst of Apulia, southern Italy*. In: BONACCI O. & ZUPAN Z. (Eds.), “Abstract book”, Int. Interdisc. Scient. Conf. “Sustainability of the karst environment – Dinaric karst and other karst regions”, Plitvice Lakes (Croatia), Sept. 23-26, 2009, p. 41.
- DELLE ROSE M., PARISE M., PROIETTO G. & TARTARELLI M. (2001) – *L’Aviso Neviera (Pu 196) a Sogliano Cavour (provincia di Lecce)*. Puglia Grotte, bollettino del Gruppo Puglia Grotte, Castellana-Grotte, 35-42.

- DEL PRETE S. & PARISE M. (2007) – *L'influenza dei fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione di cavità artificiali*. Opera Ipogea, **2**, 3-16.
- FIORITO F. & ONORATO R. (2004) – *Le cave ipogee di Colle S. Lazzaro – Gallipoli. Primi studi*. Atti Spelaion 2004, Lecce, 10-12 dicembre 2004, 125-136.
- GISOTTI G. (2008) – *Le cave. Recupero e pianificazione ambientale*. Flaccovio Editore, 422 pp.
- LIGORI F. (2009) – *Relazione illustrativa dei lavori di bonifica ex cave ipogee Il lotto*. Comune di Cutrofiano, relazione inedita, marzo 2009.
- LOLLINO P. & PARISE M. (2010) – *Analisi numerica di processi di instabilità in cavità sotterranee e relativi effetti in superficie*. Presente volume.
- MAINARDI M. (1999) – *Cave e cavamonti*. FENEAL-UIL Lecce, Edizioni Del Grifo, 135 pp.
- MARTINIS B. (1967) – *Note geologiche sui dintorni di Casarano e Castro (Lecce)*. Riv. Ital. Paleont., **73**, 1297-1380.
- MENEGATTI S. & TONI L. (1970) – *Coltivazione di tufo calcareo in sottterraneo nel comune di Cutrofiano in provincia di Lecce*. Terra d'Otranto, Lecce, XXIV, n. 10-11, 21-43, n. 12, 19-36.
- PARISE M. (2008) – *Rock failures in karst*. In: CHENG Z., ZHANG J., LI Z., WU F. & HO K. (a cura di), *Landslides and Engineered Slopes*. Proc. 10th Int. Symp. Landslides, Xi'an (China), June 30 – July 4, 2008, **1**, 275-280.
- PARISE M. & DELLE ROSE M. (2009) – *Sinkhole development induced by underground quarrying, and the related hazard*. Geophysical Research Abstracts, **11**, 214.
- PARISE M., DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., DONNO G. & INGUSCIO S. (2008) – *Cavità sotterranee a fini estrattivi, e loro connessione con fenomeni di sprofondamento e subsidenza in agro di Cutrofiano (Lecce)*. Atti "Spelaion 2006", Borgo San Celano (FG), 55-69.
- SANNICOLA G. (1997) – *Li Tagghiati e li Zuccaturi. Le cave ed i cavatori (Archeologia industriale a Grottaglie)*. Lu Lampiune, **2**, 103-107.
- SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.P.A. (1989) – *Interventi urgenti a salvaguardia della pubblica e privata incolumità. Rilevamento cavità sotterranee della città, studi e indagini geognostiche del territorio. Relazione generale*. Comune di Canosa di Puglia, 170 pp.
- TONI L. (1990) – *Le cave in sottterraneo di Cutrofiano*. Edizioni Del Grifo, 125 pp.
- TONI L. & QUARTULLI S. (1986) – *Coltivazione di calcareniti in sottterraneo nel comune di Cutrofiano (Lecce)*. Quarry and Construction, febbraio 1986, 23-26.
- WAGENSOMMER A. (2007) – *Censimento delle tufare ipogee del Gargano*. Atti del I Convegno Regionale di Speleologia in Cavità Artificiali, Castellana-Grotte, 24-25 marzo 2007, Grotte e Dintorni, anno VI, n. 12, 111-120.
- WALTHAM T. & LU Z. (2007) – *Natural and anthropogenic rock collapse over open caves*. In: PARISE M. & GUNN J. (Eds.), *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: recognition, analysis, and mitigation*. Geological Society of London, sp. publ., **279**, 13-21.

INDAGINI GEOGNOSTICHE NELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI SUBSIDENZA DA COLTIVAZIONI MINERARIE PER VUOTI

*di Del Greco O., Godio A., Oggeri C., Vigna B.
DITAG Politecnico di Torino*

ABSTRACT

Due to mining activity, both during operation and also after closure, induced subsidence represents one of the most important possible consequences: the related phenomena are different, depending on the depth and pattern of the voids, and also related to geomechanical characteristics of the geological formations. In particular it is possible to put in evidence the case of wide subsidence basins (e.g. coal mining, gypsum mining) and the case of local collapses (e.g. gypsum mining, limestone quarrying, salt mining) which can develop to chymneying and to the formation of sinkholes.

The paper refers on some possible key issues in order to better understand these phenomena, focusing the fact that each situation is demanding for a proper investigation plan, by adopting geophysical, hydrogeological and geomechanical methods, by the illustration of some case histories followed by authors. Consequences of the possible failures have to be carefully evaluated by considering the presence of underground water: in such circumstances phenomena can significantly change the gravity and the evolution, thus involving also wide surface areas.

1. GENERALITÀ

Le coltivazioni minerarie, in particolare quelle per vuoti, possono indurre fenomeni di subsidenza ad evoluzione graduale o repentina. In taluni casi la presenza di circuiti carsici o di cavità, riscontrabili ad esempio in coltivazioni di depositi evaporitici, gessosi, o in presenza di rocce incassanti carbonatiche, porta a interferenze in termini importanti con l'evoluzione degli scavi. La nota richiama le principali tecniche di indagine finalizzate all'individuazione di tali vuoti nel caso emblematico di formazione di sinkhole conseguente ad attività minerarie in corso in presenza di carsismi ed uno sprofondamento derivante da scavi abbandonati, nei quali le indagini geofisiche, geognostiche, idrogeologiche hanno permesso di comprendere l'evoluzione del fenomeno. Le medesime tecniche di indagine sono proponibili per una valutazione del rischio di aree minerarie dismesse, ai fini dell'individuazione delle opere di prevenzione o bonifica.

L'acquisizione di dati geofisici è finalizzata a mettere in evidenza la risposta dei parametri investigati, per mezzo di misure dalla superficie (e talvolta in foro) di tipo passivo (ad esempio il campo gravitazionale o magnetico terrestre) oppure attive, mediante l'immissione controllata di una sorgente di energia elettrica, di un campo elettromagnetico o di una perturbazione elastica.

Le metodologie geofisiche si basano sulla individuazione delle anomalie di uno o più parametri fisici quali la densità, la suscettività magnetica, la velocità onde sismiche, la resistività elettrica e la permittività elettrica. Il contrasto tra le proprietà della roccia incassante ed il vuoto minerario sono in generale piuttosto elevate:

- il contrasto di densità si riferisce alla variazione di contrasto tra 2000-2700 kg/m³ della roccia e valori quasi nulli del “vuoto” minerario,
- il contrasto di suscettività magnetica è presente solo se la roccia incassante è caratterizzata da presenza di minerali magnetizzabili (ossidi di ferro...);
- il valore di velocità delle onde sismiche (onde di compressione e onde di taglio) dipende dalle caratteristiche meccaniche: rocce compatte sono caratterizzate da valori di velocità delle onde di compressione compresi tra 2500 e 3500 m/s; i valori delle onde di taglio sono dell'ordine di 1000-2000 m/s; in aria le onde di compressione si propagano a velocità di circa 300 m/s e le onde S non si propagano;
- la resistività elettrica della roccia è dell'ordine di 10⁴-10⁵ ohm m, mentre in aria il valore tende a infinito;
- la permittività elettrica della roccia è circa 5-10 volte superiore a quella dell'aria.

Le indagini vengono realizzate lungo profili per l'elaborazione bidimensionale di sezioni del sottosuolo oppure si articolano su una griglia regolare per elaborare la distribuzione tridimensionale del parametro in oggetto. La spaziatura tra i diversi punti di misura deve essere tale da campionare in modo adeguato l'anomalia di risposta del parametro investigato: tanto più il vuoto è superficiale, tanto più la densità delle misure deve essere elevata con spaziature decimetriche tra i punti di misura.

Le misure di campo gravitazionale terrestre permettono di risalire alle variazioni di densità del sottosuolo; il metodo è sensibile alla presenza dei vuoti benché la fase di acquisizione dei dati richiede accuratezza nella misure del valore di accelerazione di gravità (dell'ordine di 10⁻⁷) e nella referenziazione topografica delle stazioni di misura (accuratezza sub-centimetrica nella stima del valore di quota). L'elaborazione richiede una notevole esperienza e sensibilità per depurare le misure grezze degli effetti topografici. L'elaborazione delle anomalie di accelerazione di gravità dovuta alla mancanza di massa (vuoto minerario) permette di elaborare modelli bidimensionali o tridimensionali del valore di densità del sottosuolo.

L'applicazione di metodi sismici ad alta risoluzione per individuare i vuoti a profondità di pochi metri o poche decine di metri dalla superficie è piuttosto consolidata. Metodi sismici a riflessione, tomografie dalla superficie e cross-pozzo, profili sismici verticali sia per onde P e onde S sono stati applicati in diversi progetti dimostrativi per valutarne efficacia e limiti (PETERIE *et al.*, 2009, WALTER *et al.*, 2009, HOCKEY *et al.*, 2009, HANNA e PFEIFFER, 2007).

La sensibilità dei metodi elettrici è spesso condizionata dalla presenza di materiale di copertura detritica (eterogeneità superficiale); a differenza dei metodi sismici, la capacità risolutiva tende a deteriorarsi con la profondità. Non sempre le anomalie di resistività dovute alla presenza dei vuoti sono chiaramente visibili. I metodi di tomografia elettrica di resistività sono peraltro poco costosi; vengono pertanto spesso utilizzati per delineare sezioni geologico-stratigrafico con una discreta accuratezza e per guidare l'interpretazione di rilievi sismici, minimizzandone l'ambiguità interpretativa.

I rilievi georadar si basano sul contrasto delle proprietà elettromagnetiche dei mezzi (permittività e resistività elettrica); sono caratterizzate da elevata risoluzione verticale e orizzontale (metrica o sub-metrica) che dipende dalla frequenza utilizzata (nel campo

compreso tra 10 MHz e 500 MHz) e dalla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nella roccia (compresa tra 0.1 e 0.15 m/ns). Le sezioni georadar sono molto simili alle sezioni di sismica a riflessione: forniscono una rappresentazione con risoluzione decimetrica delle principali strutture del sottosuolo. I costi del rilievo sono contenuti (ordine di qualche euro per metro di profilo) ma i limiti di profondità di indagine (qualche decina di centimetri in rocce elettricamente molto conduttive) spesso condizionano l'applicabilità del metodo in zone interessate da coperture con materiali argillosi.

2. I GIACIMENTI GESSOSI

Negli ammassi rocciosi costituiti da rocce evaporitiche ed in particolare nei depositi di gesso numerose sono le problematiche tecniche e di impatto ambientale che devono essere risolte per consentire i lavori di scavo in sotterraneo in sicurezza (Bonetto et al., 2006).

Le difficoltà maggiori riguardano l'individuazione di cavità carsiche naturali presenti in questi ammassi rocciosi che possono raggiungere anche rilevanti dimensioni ed ospitare, talvolta, ingenti volumi di acqua con pressioni anche assai elevate. L'intercettazione casuale di queste cavità, che possono costituire enormi serbatoi con acqua in pressione che può raggiungere diversi bar, causa fenomeni di *inrush*, estremamente pericolosi per i lavori in sotterraneo, e possibili collassi delle cavità carsiche più ampie in seguito del rapido svuotamento dei vuoti e della diminuzione della pressione idrostatica. Ampi fenomeni di *sinkhole* possono raggiungere la superficie come quello verificatosi a Moncalvo d'Asti che raggiungeva un diametro di oltre 20 m ed una profondità di quasi 15 m (Fig. 1) (Amalberto et al., 2006, Vigna et al., 2009).



Fig. 1 - Il sinkhole verificatosi presso la cava in sotterraneo di Moncalvo d'Asti

In genere gli ammassi rocciosi costituiti da rocce evaporitiche sono caratterizzati da una notevole eterogeneità dello stato di carsificazione e fratturazione con estesi settori dove la roccia presenta buone caratteristiche geologico-tecniche e limitate porzioni dove la rete carsica si è sviluppata seguendo le principali discontinuità costituite da reti di fratture interconnesse o giunti di strato come i livelli siltoso-marnosi che frequentemente separano le bancate di rocce evaporitiche. In corrispondenza di questi ammassi rocciosi vengono sovente intercettate dagli scavi minerari numerose cavità carsiche con morfologie e problematiche tecniche piuttosto diverse a secondo della loro appartenenza alle diverse zone che costituiscono un sistema carsico: le zone di assorbimento e di percolazione superficiale e la zona di circolazione idrica profonda. Le forme di dissoluzione svilup-

pate nei primi metri di una successione evaporitica sono in genere costituite da cavità cilindriche o imbutiformi a sviluppo sub-verticale con altezze che possono superare la decina di metri e diametro fino a 6-7 m; spesso la sezione presenta un graduale restringimento verso il basso che dà luogo ad un profilo marcatamente conico. Talvolta il numero di cavità per unità di superficie è così elevato da generare frequenti rapporti di interferenza e coalescenza delle diverse forme carsiche con una configurazione dell'interfaccia gesso-coperture molto irregolare e contraddistinta da culminazioni rocciose alternate a profonde depressioni. Nella "zona di percolazione" in connessione con le forme epicariche è presente un reticolo carsico caratterizzato da uno sviluppo inizialmente sub-verticale che scendendo in profondità tende ad impostarsi su piani sub-orizzontali. Le dimensioni dei vuoti carsici sono in stretta relazione con i volumi idrici defluiti ma in genere non raggiungono dimensioni rilevanti superiori alla decina di metri. Le cavità ipogee in genere si estendono a profondità non elevate e nelle cave in sotterraneo, in cui i livelli di coltivazione vengono spinti ben al di sotto della quota dei fondovalle principali, si osserva un diradamento delle cavità procedendo verso le parti più profonde delle masse gessose con una netta diminuzione del loro diametro. Il fronte di dissoluzione sembra quindi arrestarsi quasi completamente in prossimità della quota dei fondovalle. Sulla base dei dati bibliografici risulta che, in profondità, al di sotto della "zona di saturazione" che in genere corrisponde con il livello dei fondovalle, non si possano sviluppare una rete carsica estesa a causa della rapida sovrassaturazione delle acque di circolazione. Nell'intero territorio nazionale non sono mai state segnalate cavità con morfologie "a pieno carico" sviluppate al di sotto della quota del reticolo di drenaggio superficiale mentre sono assai estese e conosciute le cavità carsiche nella "zona non satura" di un sistema carsico.

Nel settore del Monferrato e della Collina di Torino, dove sono presenti numerose cave in sotterraneo per la coltivazione dei gessi [Cave di Moncalvo, Montiglio, Murisengo, Cocconato, Calliano, Moncucco] sono, al contrario di quello fin ora ipotizzato, state intercettate cavità carsiche di grandi dimensioni, con sviluppo di oltre 1 km [Grotta di Moncalvo d'Asti] e condotti con sezione di oltre 10 m, completamente sature d'acqua [VIGNA *et al.*, 2009].

L'esistenza di reti carsiche sviluppate anche diverse decine di metri al di sotto della quota dei fondovalle principali sembra essere legata a processi di carsificazione di tipo "ipogeo-nico" con apporti di acque molto profonde circolanti in differenti ammassi rocciosi o alla presenza di un "carsismo in stratatale" legato ad apporti di acque circolanti in acquiferi diversi [rocce carbonatiche o livelli sabbioso-ghiaiosi] sottostanti o sovrastanti l'ammasso evaporitico. [KLIMCHOUK, 2007].

Risulta quindi di fondamentale importanza, per la sicurezza dei luoghi di scavo in sotterraneo ed in superficie, evitare l'insorgere di tali problematiche attraverso una serie di appropriate indagini e rilevamenti.

Lo studio idrogeologico relativo all'ammasso evaporitico riveste un'importanza fondamentale per l'individuazione della presenza di una rete carsica e la sua caratterizzazione dal punto di vista idrodinamico e idrogeochimico. L'intercettazione della rete di drenaggio delle acque sotterranee attraverso l'esecuzione di sondaggi meccanici rimane una operazione piuttosto difficile da eseguirsi in quanto la carsificazione interessa limitatissime porzioni dell'ammasso roccioso ed un sondaggio meccanico può transitare a pochi metri da una cavità indicando una completa assenza d'acqua. Occorre ribadire come il comportamento molto plastico questi ammassi rispetto agli stress deformativi in genere causi una fatturazione della roccia assai limitata e di conseguenza la circolazione attiva del

flusso sotterraneo si concentra unicamente in limitate porzioni altamente carsificate. Le probabilità di intercettare questi vuoti sono quindi strettamente legate al numero di sondaggi eseguiti. Una volta individuata l'altezza idrica dell'acquifero occorrerà attrezzare i fori con acquisitori automatici di livelli per conoscere nel tempo ed in seguito alle precipitazioni le variazioni dei livelli idrici. Tali informazioni sono indispensabili per programmare i piani di coltivazione in sotterraneo e, se necessari, gli interventi di abbassamento controllato della falda idrica. La medesima strumentazione evidenzierà la buona riuscita o meno degli interventi adottati. In figura 2 viene presentato l'andamento dei livelli idrici nel tempo misurato presso una cava in sotterraneo nel Monferrato e gli abbassamenti che si sono verificati in seguito alla realizzazione di opere di drenaggio per consentire lo scavo in situazioni di sicurezza.

L'ulteriore realizzazione di perforazioni sub-orizzontali sui fronti di scavo sembra rappresentare la soluzione più sicura per gli scavi in quei settori dove le informazioni idrogeologiche sono carenti e poiché tali indagini sono da ritenersi puntuali l'accoppiamento con indagini georadar in foro consentirebbero un'estensione dell'area indagata decisamente maggiore.

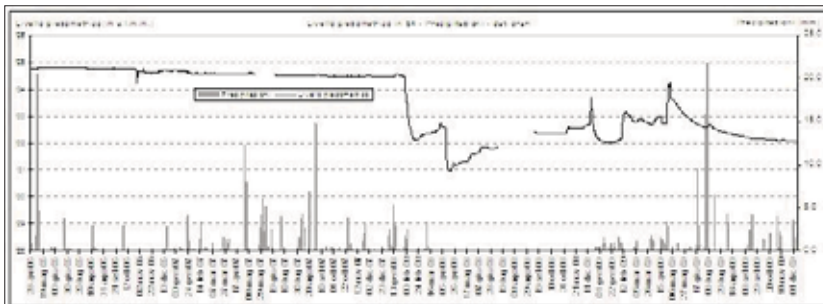


Fig. 2 - Andamento nel tempo delle precipitazioni e dei livelli idrici rilevati in un piezometro in una cava in sotterraneo del Monferrato

Nell'ammasso roccioso possono inoltre essere presenti differenti tipi di circolazione idrica con rischi di venute d'acqua improvvise e rilevanti in relazione alla tipologia del circuito. Per la caratterizzazione dei diversi sistemi idrici sono sicuramente di grande aiuto le analisi idrogeochimiche: le acque collegate alla rete carsica che possono causare abbondanti ed improvvise venute idriche presentano in genere potenziali redox (Eh), tenori dei nitrati, alcalini e cloruri piuttosto diversi rispetto ai valori che caratterizzano le acque profonde il cui intercettamento non costituisce un pericolo rilevante. In figura 3 vengono ben evidenziate le concentrazioni dei nitrati e del potenziale redox (Eh) delle acque profonde (Eh negativi e tenore in nitrati molto basso) e della circolazione carsica (Eh positivi e tenore in nitrati elevato) rilevate presso la cava in sotterraneo di Moncalvo d'Asti. Nelle situazioni in cui vengono intercettate dagli scavi in sotterraneo delle cavità carsiche sarà di fondamentale importanza la realizzazione di esplorazioni e rilievi topografici dettagliati da parte di speleologi per ricostruire in tre dimensioni la geometria dei reticoli carsici evitando così che gli scavi vadano ad intercettare i vuoti maggiori che sicuramente costituiscono porzioni dell'ammasso con caratteristiche geomeccaniche molto scadenti. In figura 4 viene rappresentata la planimetria della cava di Moncalvo e della prima cavità intercettata dai lavori di scavo responsabile dell'*inrush* e del *sinkhole* ubicato in corrispondenza di un ampio salone collassato in seguito al rapido svuotamento della grotta.

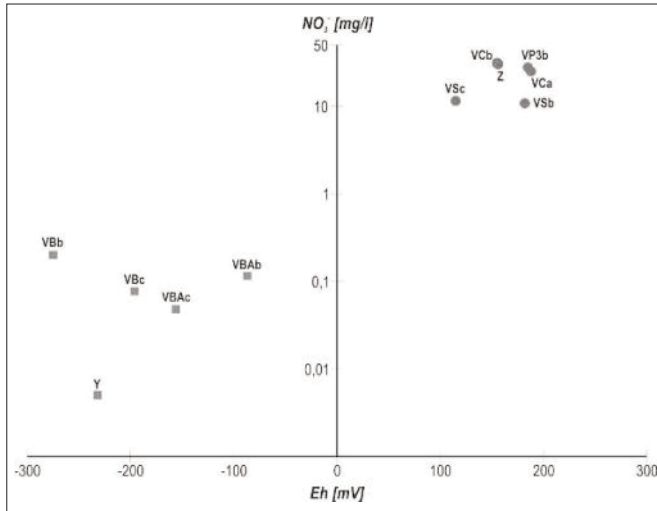


Fig. 3 - Concentrazione del potenziale redox [Eh] e dei nitrati rilevati nel sito di Moncalvo. I campioni VBb, Vbc, VBAc, VBAb e Y sono relativi alle acque profonde, i campioni VSc, VSb, VCa, Z, VCb e VP3b sono relativi alle acque della circolazione carsica (da Vigna et al 2009)

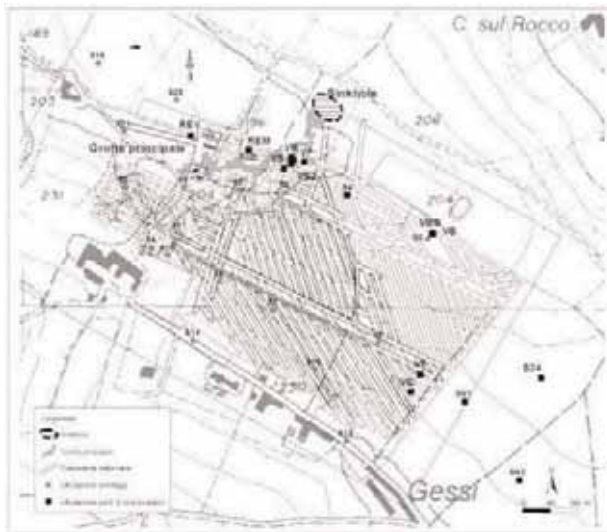


Fig. 4 - Rilievo planimetrico della cava in sotterraneo di Moncalvo, della cavità carsica e dei sondaggi eseguiti nell'area (da Amalberto et al 2006)

Nelle figure 5 e 6 si riportano alcuni risultati del rilievo sismico e di tomografia elettrica, realizzato in superficie in prossimità della zona del sinkhole. L'indagine geofisica era finalizzata a verificare il modello geologico stratigrafico dell'area (materiale di copertura detritico-argille-marne-gessi) definendo gli spessori dei diversi materiali e le principali morfologie sepolte.

Nella zona più superficiale della tomografia elettrica di resistività (Figura 5) si individua un primo elettrostrato di spessore metrico con discreta continuità laterale e valori di resistività di 35-40 ohm m; tale elettrostrato corrisponde al suolo agrario. Il secondo orizzonte, elettricamente più conduttivo, è caratterizzato da valori di resistività compresi tra 5 ohm m e 20 ohm m; esso ha spessore variabile compreso tra di circa 35 - 40 metri ad inizio del profilo e tende a diminuire fino a valori di circa 10-15 metri verso la fine del profilo. In profondità si osserva un passaggio, con un gradiente verticale di resistività piuttosto marcato, ad una formazione elettricamente resistiva, caratterizzata da valori di 80-100 ohm·m. La morfologia di tale orizzonte si presenta con andamento che risale dall'inizio verso la fine della sezione, fino a ad essere sub-affiorante in corrispondenza delle coordinate finali della sezione. I valori di resistività osservati sono riconducibili in prima approssimazione a formazioni prevalentemente argillose con passaggio in profondità a formazioni marnoso/gessoso più resistive

La sezione verticale di tomografia sismica a rifrazione (Fig. 5) descrive la distribuzione delle velocità delle onde di compressione (onde P), lungo lo stesso allineamento della tomografia elettrica descritta in precedenza. Le formazioni superficiali sono caratterizzate da valori di velocità compresi tra 300 m/s e 800 m/s, indicative della detritica fortemente aerata. Il secondo orizzonte sismico ha uno spessore medio di circa 15-20 metri; esso è caratterizzato da valori di velocità compresi tra 1200 m/s e 1700 m/s. Il substrato di materiale coerente è caratterizzato da valori di velocità superiori a 3000 m/s, ad indicazione della natura compatta e litoide della formazione. La morfologia dell'interfaccia con l'orizzonte superiore si presenta piuttosto articolata; la profondità di tale interfaccia è di conseguenza variabile e risulta compresa tra un valore massimo di circa 40 m e un minimo di 20 metri.

Dal confronto tra la sezione di resistività e la sezione di velocità delle onde P, emerge un buon accordo circa le principali macrostrutture: in particolare il passaggio, a profondità comprese tra 40 e 50 metri dal piano campagna, ad una formazione più resistiva ed al tempo stesso caratterizzata da elevati valori di velocità delle onde elastiche di compressione (valori superiori a circa 3000 m/s) individua con discreta accuratezza il passaggio alle formazioni gessose. Alla scala risolutiva delle due immagini (da metrica in superficie a circa decametrica in profondità) non si evidenziano particolari situazioni morfologiche riconducibili a marcate discontinuità strutturali e/o cavità.

La sezione sismica a riflessione per onde P è rappresentata in figura 6; le ascisse si riferiscono all'inizio del profilo sismico a rifrazione; pertanto, la sezione sismica a riflessione si sovrappone alla zona centrale della sezione di tomografia rifrazione. La conversione in profondità della sezione a riflessione è stata ricavata sulla base dei valori medi di velocità individuati dall'elaborazione tomografica a rifrazione.

La sezione a riflessione presenta una risoluzione laterale metrica e consente una valutazione di maggior dettaglio in merito alle discontinuità laterali degli orizzonti, fino a profondità di circa 80 metri da piano campagna. La riflessione principale, lateralmente ben correlata, individua l'interfaccia tra gli orizzonti di copertura ed i gessi; la risoluzione verti-

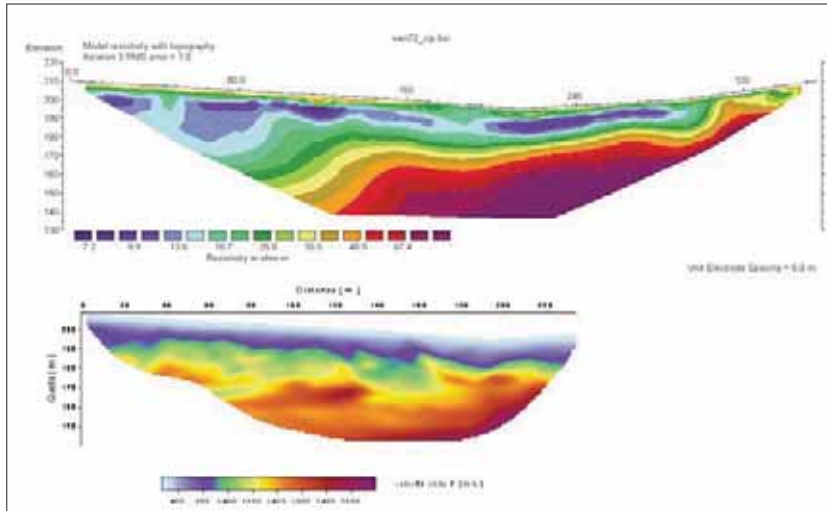


Fig. 5 - Integrazione di rilievo di tomografia elettrica e di tomografia sismica a rifrazione (onde P) per la stima dei materiali di copertura in zona mineraria per la coltivazione di gessi

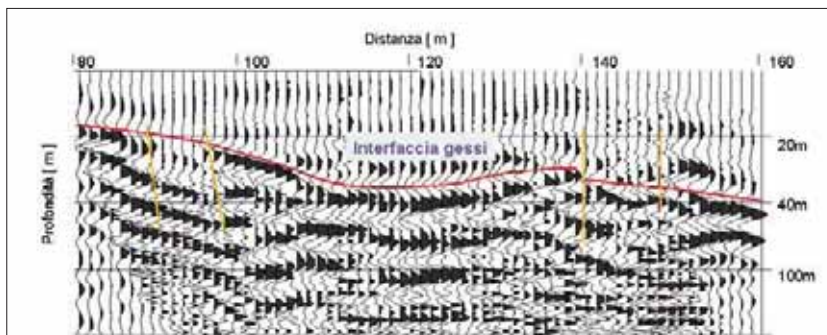


Fig 6 - Esempio di sezione sismica a riflessione per individuare materiale di copertura e potenziali discontinuità in zona mineraria per la coltivazione di gessi.

cale all'interno dei gessi è legata alla lunghezza d'onda che è pari a circa 30 metri. Si noti la necessità di utilizzare una scala non lineare sull'asse delle profondità per tenere conto della repentina variazione di velocità tra il materiale di copertura [velocità inferiori a 1500 m/s] e il substrato ad elevata velocità [valori superiori a 3000 m/s].

La lettura delle dislocazioni laterali del riflettore principale (indicate con linee verticali in color arancione in fig. 6) consente di formulare alcune ipotesi circa la presenza di discontinuità strutturali presenti nella formazione gessosa. In particolare tra le coordinate 90 m e 97 m si individua una prima discontinuità laterale del riflettore; una seconda discontinuità è invece localizzata in prossimità della coordinata 140 metri. Quest'ultima è rappresentata nella sezione da una dislocazione verticale del segnale associato al riflettore, interpretabile come una probabile discontinuità morfologica dell'interfaccia copertura-gessi. La discontinuità in corrispondenza delle coordinate 90-95 metri presenta

caratteristiche particolari: il segnale sismico di riflessione tende ad essere attenuato in modo significativo rispetto alle ampiezza medie attribuibile dei segnali riflessi da tale orizzonte riflettore. Il comportamento è pertanto associabile ad una intensa diminuzione delle caratteristiche di impedenza acustica tra il materiale di copertura ed il substrato, diminuzione interpretabile con la presenza di una zona intensamente destrutturata/fratturata.

3. COLTIVAZIONI PER RIPIENA ABBANDONATE

La varietà e la complessità della casistica di scavi minerari dismessi sono evidentemente molto numerose, e da ciò discende la necessità di considerare ogni situazione nella sua particolarità. È tuttavia possibile operare una distinzione tra le coltivazioni per vuoti e quelle con ripiena, a loro volta suddivise tra quelle che sono state condotte al di sotto di aree pianeggianti ovvero quelle eseguite in contesti collinari o montani. Le subsidenze possono essere dovute a differenti fenomeni; nel caso di strutture con vuoti residui si possono verificare crolli localizzati in progressiva evoluzione sino all'eventuale raggiungimento del soprassuolo; nel caso di coltivazioni ripienate si possono verificare, anche a distanza di molto tempo, cedimenti per assestamento delle ripiene; infine nel caso di coltivazione a debole profondità su ampie aree, si possono indurre veri e propri bacini di subsidenza. Tra le varie condizioni da investigare, quella relativa allo sviluppo dei vuoti minerari è sicuramente una delle principali, soprattutto se lo sviluppo planimetrico – o su più livelli – non rispettava uno schema regolare.

Il caso qui riportato è quello di una coltivazione in area collinare, con ripienamento degli scavi: si tratta della miniera di Gavorrano situata nella Toscana meridionale nell'area delle Colline Metallifere. In essa sono state coltivate, per gran parte del xx secolo, alcune masse di pirite tra cui, la più importante, denominata "Massa Boccheggiano". La coltivazione è stata inizialmente condotta, per molti decenni, con il metodo per ripiena sciolta discendente, fino a quando, verso la fine degli anni '60, i problemi posti da questo metodo sono diventati insostenibili e, dopo un periodo di alcuni anni di sperimentazioni, si è proseguita la coltivazione ancora in senso discendente ma impiegando la ripiena cementata che ha consentito di risolvere con successo i problemi tecnici precedenti. Infine, nel 1981, la miniera ha terminato la sua attività per l'esaurimento del giacimento [Del Greco et al., 2008].

Le gallerie di coltivazione e servizio hanno raggiunto la profondità di -200 m s.l.m. ed è quindi stata necessaria, durante il periodo dell'attività estrattiva, l'educazione delle acque dal sottterraneo in forma "imponente" poiché l'area della miniera è interessata dalla forte presenza di acque sotterranee di tipo idrotermale. La parte più a valle dell'abitato locale si chiama appunto Bagno di Gavorrano per la presenza "antica" di numerose sorgenti idrotermali.

Dopo la cessazione dell'attività estrattiva, il pompaggio dell'acqua dal sottterraneo è stato proseguito e gradatamente rallentato, consentendo così una prima risalita controllata dell'acqua dalla quota di -200 m a -140 m seguita da altre sino alla quota attuale di -80 m. Il deposito principale della miniera di Gavorrano (la Massa Boccheggiano) era costituito da un ammasso di pirite di forma lenticolare, con sviluppo verticale di circa 300 m. L'ammasso era compreso tra un granito porfiroide, a letto, e un calcare massiccio e cristallino, a tetto, che separava la pirite da una massa di calcare cavernoso, molto permeabile. Alla base del corpo di pirite vi era una formazione di filladi (Fig. 7).

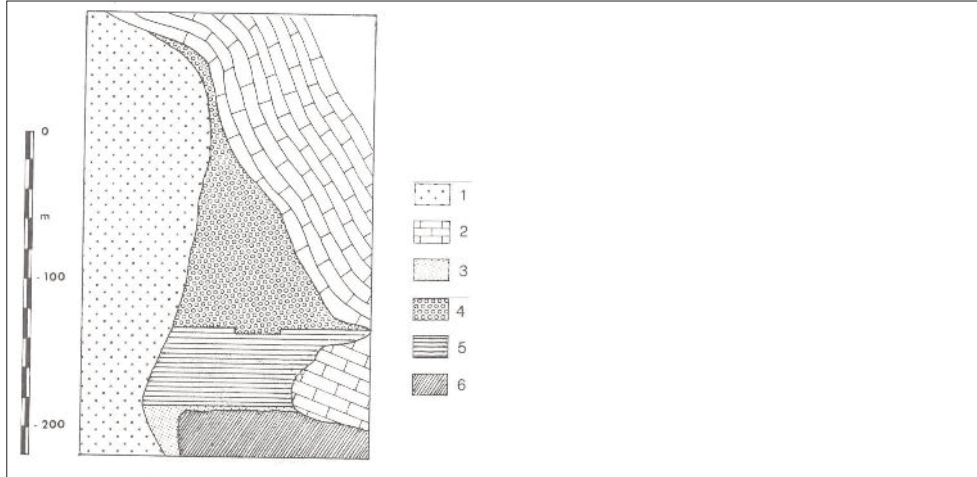


Fig. 7 - Sezione verticale della Massa Boccheggiano: 1) Granito; 2) Calacare Cavernoso (Trias); 3) Pirite; 4) Ripiena sciolta; 5) Ripiena cementata; 6) Filladi.

La scarsa resistenza meccanica della pirite aveva richiesto di adottare un metodo di coltivazione per ripiena, poiché un metodo per frana avrebbe provocato inaccettabili cedimenti delle formazioni di tetto con conseguente forte presenza di acqua nei cantieri di coltivazione. Identicamente, un metodo per vuoti non era possibile per la scarsa resistenza meccanica della massa di pirite.

Fino alla seconda metà degli anni '60 è stato impiegato un metodo di coltivazione per fette orizzontali discendenti e ripienamento dei vuoti con materiale sciolto. L'applicazione di questo metodo, continuata per diversi decenni, portò ad evidenziare sempre più una serie di problemi tecnici:

- l'assestamento progressivo delle ripiene provocava la fratturazione dei calcari di tetto e quindi l'aumento della presenza d'acqua in sotterraneo, e, inoltre, rendeva i cantieri di lavoro sempre più piccoli,
- si richiedeva un grande uso di armature in legname che rimanevano inglobate nelle ripiene,
- l'ambiente di lavoro era difficile per temperatura, umidità, presenza d'acqua e cattivo odore prodotto dal degrado del legname,
- per ottenere la produzione richiesta di pirite era necessario mantenere aperti numerosi piccoli cantieri, con costi di produzione molto elevati.

L'introduzione graduale della ripiena cementata, che seguiva lo stesso schema di coltivazione discendente, portò infine ad un radicale cambiamento delle condizioni dei cantieri di coltivazione e della produttività:

- le trincee di coltivazione assunsero dimensioni trasversali di 3,5 m in altezza e 7-8 m in larghezza, con totale assenza di mezzi di sostegno,
- le più ampie dimensioni dei cantieri consentirono di introdurre mezzi meccanici di alta potenzialità, e di ridurre il numero dei cantieri di coltivazione (la produttività passò da 6,1 a 40 t/uomo per turno),
- si ebbero grandi miglioramenti nelle condizioni ambientali e di statica del sotterraneo,

- si arrestarono i cedimenti nelle formazioni di tetto.

La coltivazione di ogni fetta orizzontale di pirite era attuata scavando una galleria di servizio lungo il contatto con il granito; da essa si aprivano trasversalmente trincee affiancate con sezione trasversale delle dimensioni sopra indicate e lunghezza variabile da 10 m a oltre 100 m, sino a raggiungere il contatto di tetto con i calcari.

Al completamento della coltivazione di ogni trancia si stendeva al piede un reticolato di tondini metallici che rimaneva inglobato nella ripiena. Ciò faceva sì che nella coltivazione della fetta sottostante, il cantiere risultasse totalmente autoportante senza dover installare altre opere di sostegno.

La ripiena cementata era realizzata con inerte calcareo, proveniente da una cava di prestito adiacente alla miniera, cemento con dosaggio di circa 150 kg/m^3 e rapporto acqua cemento di 0,8-1. Il ripienimento dei vuoti di coltivazione avveniva con trasporto pneumatico di tipo continuo (Fig. 8).

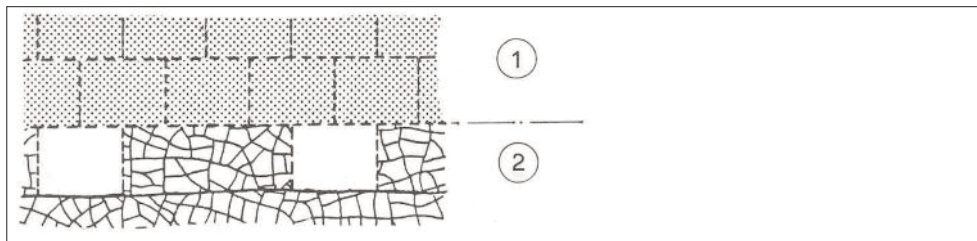


Fig. 8 - Sezione verticale schematica di un pannello di coltivazione. Al di sotto delle trincee ripienate con materiali cementati [1], vi sono le trincee in coltivazione alternate con la pirite ancora da coltivare [2].

Il sistema idrogeologico nell'area di Gavorrano è costituito da tre sotto-sistemi: uno superficiale, nelle formazioni alluvionali, un sistema carsico ed uno idrotermale profondo. Le acque di questi due ultimi sistemi sono state forzatamente mescolate dalle operazioni di scavo della miniera. La circolazione preesistente, con sorgenti localizzate ad una quota di +180 m s.l.m., fu depressa sin alla quota di -250 m dalla rete di scavi minerari e si produsse il prosciugamento delle vecchie sorgenti idrotermali che affioravano in corrispondenza dell'abitato di Bagno di Gavorrano (Fig. 9). Durante le coltivazioni minerarie, furono intercettate acque termali con temperature sino a 47°C .

La piovosità media annuale dell'area è di 750-800 mm con una quantità media di evapotraspirazione di 430 mm. La massima piovosità si ha in novembre (120 mm) e quella minima in luglio (20 mm). Sulla base di tali dati e attribuendo opportuni valori di permeabilità alle masse dei diversi litotipi presenti, si è calcolato che la ricarica annuale della falda sia di circa $1,1 \text{ Mm}^3$. È importante osservare che, localmente, la conducibilità idraulica della massa rocciosa è fortemente influenzata dalla presenza delle strutture minerarie e dalle conseguenze indotte da queste (gli scavi rimasti vuoti, l'incremento del grado di fratturazione delle rocce circostanti, l'allargamento delle fratture per la circolazione di acque acide, le caratteristiche dei diversi materiali di ripienimento, etc.).

Al termine dell'attività estrattiva di una miniera la risalita del livello dell'acqua in sottoterraneo è un evento normale. Per prevederne gli effetti sulla statica del sottoterraneo e sul chimismo delle acque è importante registrare ogni possibile dato durante la fase di abbassamento del livello dell'acqua o durante risalite occasionali o accidentali.

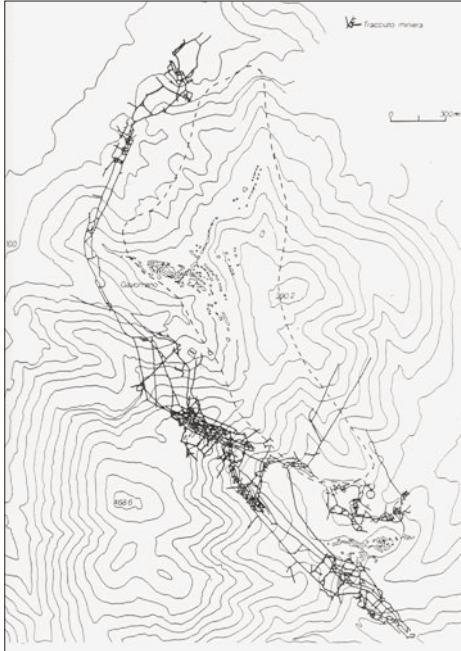


Fig. 9 - Mappa dell'area collinare di Gavorrano. In tratteggio vi sono i contorni proiettati del plutone granitico, nonché le tracce delle gallerie di collegamento fra le masse mineralizzate e dei livelli principali di coltivazione.

Il controllo del ripristino della falda, avviato nella miniera di Gavorrano nell'agosto del 1995, è regolato da un sistema di pompe sommerse costituito da tre punti di pompaggio localizzati in diversi pozzi della miniera (Impero, Roma e Rigoloccio). Il pompaggio controllato ha la funzione di evitare una crescita troppo rapida del livello di falda, che potrebbe indurre flussi turbolenti ed erosione interna delle ripiene, gradienti idraulici eccessivi e la riemersione in superficie della falda in aree abitate (Bagno di Gavorrano). La prima fase di allagamento è andata dal livello -250 m a -140 m (agosto-ottobre 1995); nella seconda fase il livello è cresciuto fino a -110 m (maggio-agosto 2005), la terza fase a -80 m (agosto-dicembre 2006). Inoltre, il controllo dell'allagamento ha permesso di valutare il volume di acqua immagazzinato nel complesso delle strutture della miniera, come anche i cambiamenti nella composizione chimica delle acque drenate.

Occorre ricordare che storicamente il passaggio del fronte della Seconda Guerra Mondiale tra il 1944 e il 1945 causò una crescita forzata del livello dell'acqua; insieme ai dati raccolti dal 1995 ad oggi, queste sono le sole informazioni disponibili sull'interazione acqua-miniera. I dati relativi all'allagamento forzato del 1944-45 unitamente a quelli relativi all'innalzamento controllato del livello dell'acqua per mantenere le quote prefissate per ogni fase di allagamento, hanno portato a formulare una relazione tra l'innalzamento della falda e la portata del pompaggio; tali grandezze sono correlate secondo la seguente forma generale:

$$\Delta H = - (H_t + H_o) * \exp(-a * \Delta t) + (H_t + H_o)$$

dove H_t e H_o sono le quote dei livelli di falda finale e iniziale e Δt è il tempo trascorso tra una fase di innalzamento e quella successiva, mentre il coefficiente “a” è stato determinato sperimentalmente sulla base dell’analisi dei dati del periodo di osservazione (Fig. 10).

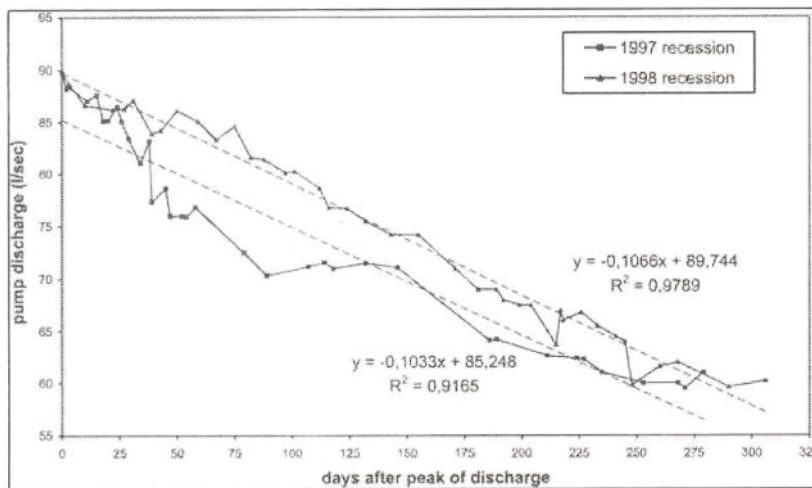


Fig. 10 - Andamento del pompaggio nel tempo

Dal 1995 l'emungimento delle pompe è stato circa costante e pari a 65 l/s, ad eccezione di tre periodi di intense precipitazioni meteoriche, quando l'emungimento è stato di 110 l/s. Recentemente, in particolare durante l'ultima fase di innalzamento, l'emungimento è stato inferiore. Considerando che le precipitazioni meteoriche negli ultimi anni sono state praticamente invariate in quantità, possiamo supporre che l'acquifero si sia ampliato in quanto l'acqua ha trovato nuove vie di scorrimento nell'ammasso roccioso. Ciò ha permesso di immagazzinare circa $550 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ di acqua. Utilizzando i dati registrati in modo completo durante le due fasi (1997, 1998) di incremento dell'emungimento, è stato possibile portare a termine un'analisi che ha fornito un buon livello di conoscenza della struttura dell'acquifero. Partendo da questi dati e dall'analisi sviluppata, si è avuta conferma dei risultati precedentemente ottenuti riguardanti il bilanciamento della falda. Infatti, in accordo con l'analisi, le risorse d'acqua medie rinnovate annualmente ammontano a $2,2 \text{ Mm}^3$ pari a 66 l/s. Questi valori sono comparabili con l'emungimento medio annuo delle pompe (65 l/s o $2,08 \text{ Mm}^3$). Infine, confrontando questi dati con quelli ottenuti dalle analisi di infiltrazione effettive ($1,1 \text{ Mm}^3$), ne risulta che quasi 1 Mm^3 di acqua calda passi ogni anno dal sistema di circolazione profondo alla massa di acqua che interessa le strutture minerarie.

L'allagamento dei livelli della miniera è senza alcun dubbio una causa importante di modifica delle proprietà originarie dell'acqua in sottoterraneo. La ragione sta nel fatto che la risaturazione della roccia e il riempimento delle gallerie di accesso sono associati all'asportazione dei prodotti dell'ossidazione della pirite ricca di solfati e metalli pesanti. Finora le analisi delle acque pompate hanno indicato che le caratteristiche chimiche non variano nel tempo. Sarà necessario verificare i parametri quando i settori più vecchi della miniera saranno stati ulteriormente allagati (Fig. 11).

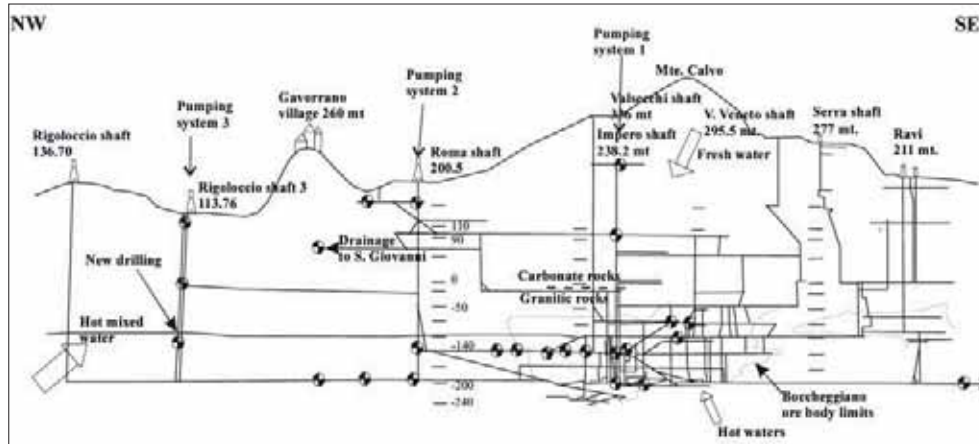


Fig. 11 - Schema dell'impianto di eduazione acque a Gavorrano

Tutti gli elementi tossici (As, Hg, Pb, Cr, Zn, etc.) sono stati trovati in tracce e nell'acqua è quasi assente la contaminazione da ioni quali nitrati, fosfati, ecc. I solfati hanno concentrazione ben al di sopra dei valori di soglia concessi, mentre i componenti con ferro e manganese variano da campione a campione. L'acidità è relativamente stabile (6,5).

Il modello idrogeologico, dopo l'acquisizione di tutti i dati, considera un ampio schema della situazione della falda nell'area della miniera di Gavorrano. Le campagne di indagini sono state utili per formulare un diagramma delle direzioni di flusso ipotetiche per tenere sotto controllo la sorgente antica (Bagno di Gavorrano), la sua riattivazione e la quota di falda nell'area della miniera. I dati raccolti durante la seconda fase di allagamento della miniera (da -140 m a -110 m) in cinque punti di controllo (fori di sondaggio) hanno fornito risultati considerevolmente differenti da quelli precedenti. Solo un foro di sondaggio ha mostrato importanti differenze della quota di falda. Questo si trova in corrispondenza della faglia principale, nel centro abitato di Bagno di Gavorrano vicino all'antica sorgente. Si è supposto che i due acquiferi (quello superficiale e quello carsico-termale) fossero collegati dalla faglia stessa e la falda potesse alzarsi e abbassarsi in accordo con gli eventi meteorici. Così il grafico del livello di questo foro mostra un andamento a scalini dovuto allo stabilizzarsi della falda. Nel complesso, il livello della falda in quest'area non è cambiato dall'ultimo valore registrato prima della seconda fase. Il livello di acqua nella miniera è stato aumentato da -140 m a -130 m chiudendo il sistema di pompaggio. Dopo un mese il livello dell'acqua era salito a -110 m. Il motivo per cui il livello dell'acqua è cresciuto di soli 30 metri può essere cercato nella geometria dei tunnel della miniera di Gavorrano: la maggior parte delle gallerie è già allagata e situata al di sotto di -140 m. Comunque c'è un altro importante capitolo nella storia della miniera e nel metodo di sfruttamento adottato tra le quote -140 m e -110 m. I tunnel più profondi sono i più recenti; quelli più vicini alla superficie sono i più antichi e corrono i maggiori rischi strutturali, chimici e idrogeologici, quindi l'allagamento deve procedere lentamente. Ora il livello dell'acqua è reso stabile alla quota di -80 m, mediante il sistema di pompaggio.

Sulla scorta della conoscenza delle caratteristiche meccaniche delle ripiene, si può ritenere che quelle cementate abbiano un elevato coefficiente di riempimento e un notevole

grado di continuità e resistenza; in altre parole, non si ritengono possibili significativi assestamenti futuri delle masse di ripiena cementata.

Diversa è la situazione delle ripiene sciolte che, per la loro stessa natura discontinua, la forte presenza di legname, il progressivo assestamento della struttura, comprese le rocce di tetto, possano verosimilmente subire ulteriori forti assestamenti anche con carattere di cedimenti improvvisi.

La cessazione dell'eduzione forzata delle acque dal sottterraneo farebbe risalire il livello di saturazione a quello di una galleria di eduzione per gravità posta alla quota di +70 m s.l.m. In questa condizione si può ipotizzare che un improvviso cedimento strutturale in sottterraneo (nelle masse di ripiena sciolta e nelle rocce fratturate di tetto) causerebbe un possibile fenomeno impulsivo nella massa d'acqua con possibili fuoriuscite rapide di acqua e di materiali detritici dalla galleria di scolo e da vie di sorgenti non più attive dopo l'abbattimento della falda ad opera dell'attività mineraria. Tale evento appare possibile, anche se l'entità di eventuali cedimenti strutturali sarebbe comunque limitata giacchè i metodi di coltivazione impiegati non hanno lasciato in sottterraneo vuoti significativi.

Un esame generale delle indagini e dei monitoraggi eseguiti sull'area mineraria di Gavorrano è riportata nella nota di GARZONIO *et al.*, [2004].

4. COLTIVAZIONI ABBANDONATE PER VUOTI

Vi sono numerosi esempi di coltivazioni per vuoti, non ripienati o ripienati solo in parte, realizzati a debole profondità, che possono facilmente evolvere, anche a distanza di anni, con cedimenti, subsidenze e crolli sino a giorno. La casistica è nutrita in riferimento a coltivazioni di minerali industriali, quali gessi o fluoriti, meno nel caso di vuoti di cave di pietra ornamentale. Ciò è evidentemente in relazione alle caratteristiche geomeccaniche della formazione interessata dagli scavi e delle coperture.



Fig. 12 - A sx: evidenze superficiali di inizio del fenomeno di richiamo per subsidenza da crollo: alberi reclinati all'interno del bacino. A dx: evoluzione finale del crollo: ancora chiaramente visibile la camera di coltivazione e la copertura rocciosa e detritica, quest'ultima a formare la scarpata.

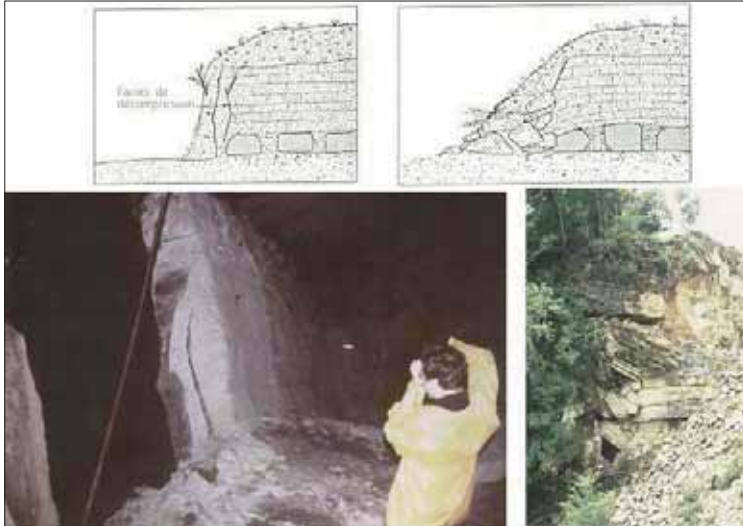


Fig. 13 - In alto, schemi evolutivi di crollo in coltivazioni per vuoti di pietra calcarea. In basso, esempio reale nella cava di pietra di Saltrio (Varese).

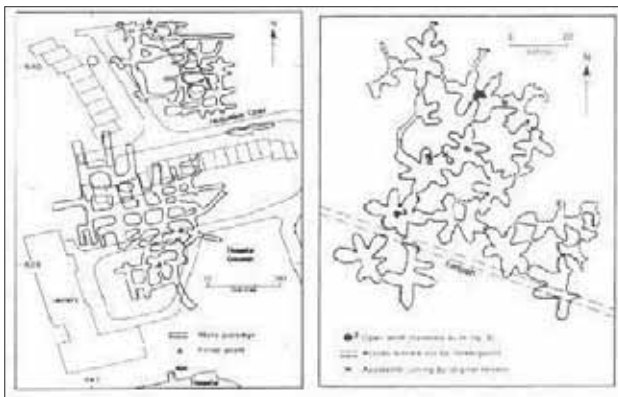


Fig. 14 - Esempi di disposizione planimetrica irregolare degli scavi di cave di gesso dei primi del 1900 in Francia.

A titolo di esempio si riporta la situazione del sito minerario dismesso di Vallarsa (BZ), ove la coltivazione dei filoni fluoritici lasciava in posto una corona degli scavi talora troppo esigua per consentire lo sviluppo di un tetto stabile (fig. 12).

Nel caso di coltivazioni per pietre da taglio si possono riscontrare – e in effetti si sono manifestati – fenomeni di crollo progressivo e di franamento dei versanti di imbocco delle coltivazioni (fig. 13).

Un ulteriore elemento su cui porre l'attenzione dei metodi di indagine (segnatamente sondaggi esplorativi, geoelettrica, sismica, georadar e gravimetria), ai fini della loro scelta, ubicazione ed interpretazione, è legato all'irregolare disposizione planimetrica delle coltivazioni più antiche, ancora rinvenibili (fig. 14).

5. CONCLUSIONI

La finalità delle indagini geognostiche, siano esse di tipo geofisico, idrogeologico o geotecnico è rivolta all'individuazione della rete di vuoti, naturali o coltivati, al fine di comprendere l'evoluzione della statica degli scavi, in fase di coltivazione ed anche a distanza di tempo. I tre esempi citati valgono a dimostrare come la fenomenologia possa coinvolgere significative porzioni di territorio con determinanti conseguenze in termini di gestione del rischio. Va comunque evidenziato come il livello di conoscenza debba essere particolarmente spinto qualora: a) vi siano nell'area di interesse attività estrattive in corso; b) vi sia la possibilità di insediamenti di tipo civile; c) si possano determinare interferenze con il regime idrogeologico. Inoltre, una chiara e accessibile documentazione tecnica dovrebbe essere resa disponibile agli enti territoriali, al fine di conservare precisa memoria storica su aspetti fonte di potenziale rischio.

BIBLIOGRAFIA

- AMALBERTO S., BANZATO C., CIVITA M., FIORUCCI A. & VIGNA B. (2006). *L'inrush nella cava di gesso di Moncalvo (Asti)*. Proc. Conf. GEAM "Le cave in sotterraneo", Torino.
- BONETTO S., FORNARO M. & OGGERI C. (2006). *Geo-surveying for exploitation in gypsum and for safe underground mining*. Proc. Int. Symp. MPES2006, Turin.
- DEL GRECO O., GARZONIO C.A. & OGGERI C. (2008). *Stability and environmental problems due to groundwater level raising in the abandoned Gavorrano mine*. Proc. Int. Symposium IMWA 2008. Karlovy Vary.
- FIORASO, G., BICCHI, E., IRACE, A., AND P. BOANO, P. (2004). *Manifestazioni carsiche nelle evaporiti messiniane del Monferrato e della Collina di Torino (Italia Nord-Occidentale): analisi dei meccanismi genetici nel quadro dell'evoluzione pliocenico-quadernaria del bacino Terziario Piemontese*. Il Quaternario, **17(2)**: 453-476
- GARZONIO C.A., BARSUGLIA F. & IOTTI A. (2004). *Le indagini e il monitoraggio di fenomeni di subsidenza e sprofondamento nell'area mineraria di Gavorrano (Italia)*. Proc. 1° Sem. Sinkhole APAT, Roma, 441-452.
- HANNA K. AND PFEIFFER J. (2007), *Geophysical Technologies to Image Old Mine Works*, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 20, 1527-1537.
- HICKEY C. J., SCHMITT D. R., SABATIER J. M., AND RIDDLE G. (2009), *Seismic Measurements for Detecting Underground High Contrast Voids*, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 22, 929-936.
- KLIMCHOUK, A. B. (1996). *The typology of gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution*. International Journal of Speleology, **25**: 49-60.
- KLIMCHOUK, A. B. (2007). *Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective*. National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, USA, 106 p.
- KLIMCHOUK, A. B., AND FORD, D.C. (2000). *Types of karst and evolution of hydrogeological setting*. In: Klimchouk, A. B., Ford, D.C., Palmer, A.N., and Dreybrodt, W. (Eds.): *Speleogenesis Evolution of karst aquifers*, National Speleological Society, Huntsville, USA, 45-53.
- PETERIE S. L., MILLER R. D., AND STEEPLES D. W. (2009), *Diffraction imaging versus reflection processing for shallow void detection*, SEG, Expanded Abstracts, 28, 1421-1424.



- VIGNA, B., FIORUCCI, A., FORTI, P., AND DE WAELE, J. (2009). *Hypogene gypsum karst and sink-hole formation at Moncalvo (Asti, Italy)*. Geophysical Research Abstracts, 10, EGU08-A-02426.
- WALTERS S. L., MILLER R. D., STEEPLES D. W., XIA J., AND ZENG C. (2009), *Detecting Tunnels and Underground Facilities Using Diffracted P-Waves*, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 22, 937-942.

REALIZZAZIONE DI OPERE IN SOTTERRANEO IN PRESENZA DI CAVITÀ IN AMBITO URBANO. IL CASO DI ROMA.

*di Fiore R., Pacifici G., Sciotti A.
Roma Metropolitane Srl*

ABSTRACT

In recent years the public transport problem become a priority question for political and managerial class of Rome Municipality. Many intervention plans have been defined, and foremost the Subway network extension takes the main rule. The company "Roma Metropolitane" was created expressly to realize, extend and modernize Rome Subway. At the moment, under Roma Metropolitane supervision and control, the new Line C and Line B1 are under construction (about 30 km and 34 stations). Moreover, the tender procedures about new line D (20 km and 22 stations) and the extend of line B (4 km and 3 stations) are ongoing.

Such a program of interventions in Rome subsoil necessarily needs careful feasibility study, suitable prior assessment of territory vulnerability and measures that guarantees territorial safety and stability. So a careful preliminary study for the geological-geotechnical-hydrogeological characterization and a suitable analysis of risk connected to new structures realization (tunnels/shafts/stations) assume a fundamental role.

Among risk factors we have to analyze there is cavities presence, particularly important in some zones of Rome, as consequence of city history and its soil characteristics.

Since early stage, during planning and designing phase, Roma Metropolitane has given particular attention to the evaluation of risks related to interference between new structures and cavities.

This approach allowed to define the integrative investigations that Contractors will have to realize and the methodology of intervention for interference solving.

The intent of this article is to supply an explanatory layout of the Roma Metropolitane approach and the results achieved by first interventions implemented.

1. PREMESSA

Realizzare opere in sotterraneo è, da sempre, una sfida complessa, che coinvolge personale tecnico fortemente specializzato in grado di affrontare e risolvere - con l'ausilio di adeguati approcci e metodologie progettuali, nonché di tecnologie sempre più avanzate - le difficoltà e gli imprevisti, con cui ci si scontra già dai primi studi di fattibilità e fino al completamento dell'opera stessa.

E' facilmente intuibile che il numero dei parametri in gioco e delle variabili da valutare aumenta esponenzialmente nel caso di una linea metropolitana da realizzare in un ambito urbano fortemente antropizzato, come quello romano.

Un attento studio preliminare per la caratterizzazione geologica-geotecnica-idrogeologica ed una adeguata analisi del rischio connesso alla realizzazione delle nuove opere (gallerie/pozzi/stazioni), assumono un ruolo importante già dalla fase di programmazione degli interventi. Diventano poi elementi fondamentali nella fase di progettazione e di gestione in corso d'opera della realizzazione delle opere.

Tra i principali fattori di rischio che devono essere considerati nella pianificazione e progettazione di opere in sottterraneo a Roma vi è quello della presenza di cavità, connessa alla storia della città ed alle particolari caratteristiche del sottosuolo. Rispetto a tale rischio un approccio corretto richiede un attento piano di indagini e l'attuazione tempestiva delle conseguenti necessarie azioni correttive: scelte di tracciato e ubicazione delle opere, definizione delle metodologie costruttive e delle tecnologie esecutive, interventi di 'bonifica' delle cavità stesse.

Questo è l'approccio con il quale sta operando Roma Metropolitane Srl - società costituita dal Comune di Roma per svolgere tutte le funzioni connesse a realizzazione, ampliamento, prolungamento e ammodernamento delle linee metropolitane della Città - nell'ambito delle attività, dapprima di progettazione e successivamente di controllo dell'esecuzione, per la realizzazione di nuove tratte di metropolitana.

Ad oggi sono infatti in corso i lavori per la nuova Linea C e per la diramazione della esistente Linea B da piazza Bologna fino a Montesacro (Linea B1), sono in corso le procedure di gara per individuare le Imprese esecutrici per la nuova Linea D ed il prolungamento della esistente Linea B oltre Rebibbia, sono in fase di redazione i progetti per ulteriori prolungamenti delle linee esistenti.

2. INQUADRAMENTO GENERALE DEL RISCHIO CAVITÀ A ROMA

La particolare geologia del sottosuolo romano e la storia della città, hanno fortemente influenzato lo sviluppo di un contesto urbano altamente addensato al di sopra di un territorio intensamente sfruttato. Infatti, la presenza di depositi sedimentari con rilevante componente sabbiosa e ghiaiosa, ma soprattutto la presenza su quasi tutto il territorio di unità di origine vulcanica dei distretti dei Colli Albani e Sabatini, hanno fatto del sottosuolo romano una eccezionale risorsa per l'estrazione in cava di materiale edilizio, favorendo e condizionando lo sviluppo della città.

La conoscenza storica dello sfruttamento del territorio, della presenza di antichi cunicoli, catacombe, pozzi, condotte idrauliche e fognarie, nonché della formazione e dello sviluppo naturale di cavità, risulta una base di partenza importante per un inquadramento generale del rischio cavità per la realizzazione di opere in sottterraneo. Dalle fonti bibliografiche disponibili è possibile inquadrare, con una certa attendibilità, il rischio cavità relativo al settore di interesse, sulla base delle esperienze degli autori che classificano l'eventuale presenza cavità come improbabile, possibile, probabile o certa. Talvolta vengono inoltre indicati i fattori che hanno permesso tale classificazione, come conoscenze geologiche-stratigrafiche, segnalazioni o presenza accertata di imbocchi di rete caveale, cave a cielo aperto, indagini dirette.

Inoltre, i processi di trasformazione del territorio e, negli ultimi anni, le numerose campagne di indagini, realizzate prevalentemente da Enti Pubblici e preventive alla progettazione delle future linee metropolitane, hanno permesso di integrare ulteriormente le conoscenze sul sottosuolo romano, segnalando nuovi complessi di reti caveali sotterranee e mettendo a disposizione numerose informazioni dirette.

3. INQUADRAMENTO GENERALE DEL RISCHIO CAVITÀ CONNESSO ALLA REALIZZAZIONE DELLE LINEE METROPOLITANE C E B1

Una serie di indagini mirate, eseguite attraverso campagne successive svolte a vario livello di approfondimento, sulla base di una preventiva analisi bibliografica, hanno permesso di accertare la presenza di reti caveali, generalmente sviluppate con struttura a camere e pilastri, interferenti con il tracciato.

Il fenomeno cavità è particolarmente sviluppato nel settore sud-est della città e riveste, per interferenze con il tracciato della metro C, un ruolo importante per estensione lungo la tratta T5 (Malatesta-Alessandrino), ed un carattere più marginale per la tratta T4 (S. Giovanni-Malatesta) (fig.1).



Fig. 1 - Tracciato delle tratte T4 e T5 della metropolitana linea C di Roma

Per la tratta T5, la rete caveale si sviluppa principalmente nelle Pozzolane Nere, ma non mancano dati che individuano la presenza di cavità anche nell'Unità di Villa Senni e nelle Pozzolane Rosse. Le gallerie hanno mediamente altezza e larghezza dell'ordine di 3-4 metri e possono svilupparsi fino a 10-20 metri dal piano campagna.

Ciò rappresenta quindi un fattore rischio, relativamente all'esecuzione dei lavori per la realizzazione delle strutture (pozzi, stazioni, gallerie) che possono direttamente interferire con cavità pre-esistenti e/o indirettamente generare vibrazioni e subsidenze in grado di attivare processi di collasso di cavità limitrofe alle opere stesse. E' indubbia quindi la sussistenza di una particolare situazione di pericolosità, da valutare attentamente sia relativamente al personale addetto ai lavori, sia con riguardo al contesto ambientale e urbano al contorno (fabbricati, viabilità, infrastrutture, sottoservizi, ecc.).

È stata quindi messa a punto dalla STA prima e da Roma Metropolitane ora - con la consulenza specialistica del Prof. Geol. Maurizio Sciotti - una procedura di indagini, analisi e controllo del rischio 'cavità', che avviata dalla Committenza in fase di progettazione, ha poi trovato un'attuazione esaustiva, ad esempio, da parte del General Contractor al quale è stata affidata la progettazione esecutiva e la realizzazione della nuova Linea C.

In tale procedura si è necessariamente tenuto conto del fatto che le analisi progettuali condotte secondo i modelli geotecnici previsionali standard rischiano di non risultare esau-

stive a causa della estrema variabilità dei parametri di input e della eterogeneità delle situazioni.

Ad esempio i prodotti vulcanici, sede principale dello sviluppo di cavità antropiche, risultano in molti casi difficilmente classificabili, anche per la ben nota complessità di campionamento e conseguente difficile valutazione dei parametri mediante prove di laboratorio. Così come è evidente che la migliore metodologia possibile di valutazione - quella di classificare le cavità mediante un approccio geomorfologico, ovvero visivo, che valuti la stabilità del cavo analizzando i diversi fattori in gioco (morfologia, stato di conservazione e di alterazione, struttura, presenza di crolli, di fratture, di acqua) e tenga conto del naturale processo evolutivo dello stesso - non è sempre praticabile in quanto richiede necessariamente l'accesso (fisico e/o visivo) alle cavità da valutare.

E comunque le valutazioni sulla pericolosità connessa alla presenza di cavità non possono prescindere dal considerare le tipologie di opere e le metodologie costruttive previste.

L'interferenza con una cavità potrebbe indurre la perdita dei fanghi bentonitici utilizzati per la stabilizzazione delle pareti dello scavo durante la realizzazione di pali o diaframmi, e quindi l'innescare di smottamenti e franamenti più o meno estesi, con potenziali risentimenti fino in superficie. Così come l'esecuzione di uno scavo tra paratie e/o pali, per stazioni o pozzi, potrebbe indurre fenomeni deformativi imprevedibili qualora a tergo (o al piede) dell'opera di sostegno fosse presente una cavità di dimensioni tali da risultare influente. Non si può inoltre trascurare il rischio connesso alla perdita di pressione al fronte durante lo scavo con TBM (Hydroshield o EPB) dovuto alla fuga di 'cake' o bentonite verso una cavità intercettata, o quello relativo al collasso di una cavità immediatamente a tergo del rivestimento della galleria a seguito del disturbo tensionale indotto dallo scavo stesso.

Appare evidente la molteplice tipologia di fenomeni e quindi la difficoltà di una loro schematizzazione ai fini di valutazioni progettuali rigorosamente analitiche.

Un approccio di tipo empirico-osservazionale, peraltro introdotto come metodo di progetto ed esecuzione delle opere in sotterraneo dalle nuove Norme Tecniche (D.M. 14/01/08), appare quindi quello che meglio si adatta alla situazione specifica.

In considerazione delle difficoltà di individuazione certa di tutte le cavità presenti nell'area di potenziale interferenza con le opere da realizzare e di schematizzazione dei fenomeni connessi alla interferenza (diretta e/o indiretta) tra opere e cavità, si è ritenuto opportuno procedere con un approccio tipo 'risk management': valutazione del livello di pericolosità connesso, per il 'rischio cavità' alle diverse tratte/opere; definizione degli strumenti mediante i quali agire, in corso d'opera, per la mitigazione del rischio iniziale (indagini supplementari, interventi di 'bonifica'); modalità per la gestione, in corso d'opera, del rischio residuo (monitoraggio).

Tali valutazioni sono state condotte facendo riferimento a quanto già definito progettualmente (mediante modelli geotecnici previsionali standard) relativamente ai limiti di accettabilità per i valori di alcune grandezze caratteristiche dell'interazione terreno-strutture e dell'effetto degli scavi da realizzare (subsidenze e cedimenti), fissati in modo da garantire la sicurezza in fase realizzativa, l'adeguatezza statica delle strutture da realizzare, la funzionalità delle opere a lungo termine ed il rispetto delle pre-esistenze.

Le attività da condurre per la gestione del rischio associato all'interferenza con eventuali cavità sono finalizzate all'obiettivo di non superare i suddetti limiti di accettabilità, tenendo

conto che essa può indurre effetti locali rapidi (crolli, smottamenti,) e/o amplificazioni dei fenomeni 'deformativi' attesi (rapidi e/o progressivi nel tempo).

La stessa procedura è stata mutuata ed adattata anche all'altra linea attualmente in fase di costruzione, la Linea B1, per la quale l'aspetto 'cavità' riveste una minore importanza. Il tracciato interessa infatti un'area della città caratterizzata sostanzialmente dalla presenza di depositi alluvionali recenti, sovrastati da spessori variabili di terreni di riporto. Solo in corrispondenza del sottoattraversamento della via Nomentana e del tratto di linea immediatamente adiacente alla esistente Stazione di Piazza Bologna, il tracciato interessa - direttamente e/o indirettamente - depositi piroclastici sicuramente (catacombe) o potenzialmente interessati da cavità di natura antropica. Nella figura 2 è rappresentata la situazione nella zona della via Nomentana: si tratta di catacombe ubicate a quote ben superiori a quelle delle gallerie che devono essere realizzate.

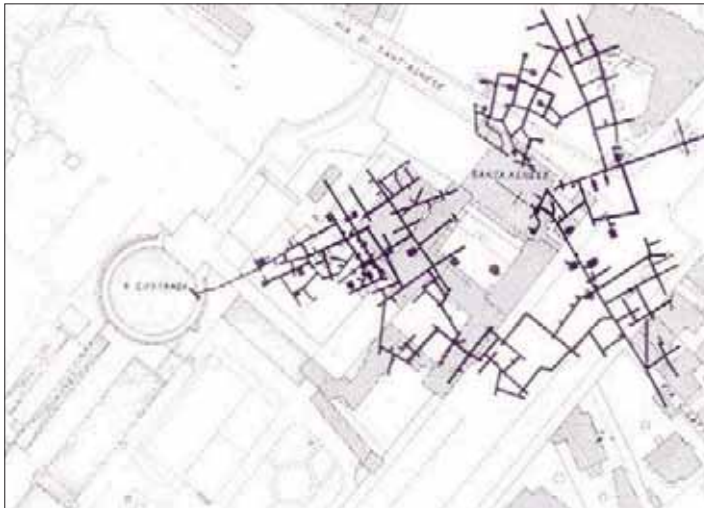


Fig. 2 - Via Nomentana: Mappa generale catacombe di Santa Agnese
[da: Pontificia Commissione di Archeologia Sacra]

Al momento dell'espletamento delle procedure di gara, Roma Metropolitane ha quindi messo a disposizione dei concorrenti delle carte tematiche che, sulla base della distribuzione e delle caratteristiche delle cavità lungo il tracciato (così come ricostruite dalle indagini effettuate nelle precedenti fasi di progettazione), evidenziavano il livello di rischio ad esse connesse, con riferimento alle opere da realizzare (gallerie, pozzi, stazioni). Tali valutazioni sono state condotte in funzione delle metodologie costruttive, delle distanze reciproche e dei rapporti dimensionali tra cavità e strutture da realizzare. Allo stesso tempo, nel 'Capitolato di Progettazione', redatto sempre da Roma Metropolitane e allegato ai documenti di gara, sono state definite le modalità di esecuzione delle successive indagini di approfondimento e le tipologie di intervento per la 'bonifica' delle cavità interferenti, alle quali il Contraente/Appaltatore è tenuto ad attenersi nelle successive fasi di progettazione/realizzazione.

4. PROCEDURA PROGETTUALE-OPERATIVA: IL CASO DELLA LINEA C

4.1 Fase 1 - indagini

Ai fini di una valutazione della probabilità e della pericolosità connesse al rischio 'cavità' è necessario redigere una mappatura plano-altimetrica della rete caveale, ed effettuare una valutazione dello stato di conservazione e delle condizioni di stabilità delle strutture.

Ad oggi esistono una serie di tecniche di indagine, dirette o indirette, atte ad individuare con precisione la posizione, e gli eventuali sviluppi in maglie, delle strutture caveali.

In una città come Roma è opportuno che tali indagini siano pianificate solo dopo un'attenta ed esaustiva *ricerca bibliografica* che consenta di raccogliere i dati effettivamente già disponibili e che ne realizzi una esposizione organica e finalizzata allo scopo preposto. Sulla base di quanto noto appare evidente che, ove possibile, sia opportuno ricorrere all'*accesso diretto* all'interno delle strutture caveali, in quanto esso consente una valutazione dello stato di conservazione ed una stima della stabilità delle strutture, e soprattutto una mappatura plano altimetrica di dettaglio della rete. Ma nella maggior parte dei casi tale soluzione non è percorribile e bisogna quindi ricorrere ad altre tipologie di indagine quali sondaggi, video-ispezioni e prospezioni geofisiche.

Con un'adeguata campagna di *sondaggi*, anche a distruzione di nucleo, è possibile tarare ed integrare le informazioni raccolte dalla ricerca bibliografica, acquisendo ulteriori dati finalizzati alla riduzione del rischio 'cavità' ed alla valutazione della connessa pericolosità. Le maglie secondo le quali eseguire tali sondaggi dipendono dalle specifiche situazioni e vanno stabilite in funzione dei rapporti geometrici tra opere da realizzare e situazione delle cavità pre-esistenti, sulla base di un'analisi costi-benefici (maglie molto fitte a fronte di elevate pericolosità ed intensità del danno connesse al rischio specifico).

Tali sondaggi possono essere integrati con *video ispezioni*, *mappature con laser scanner o fotogrammetria 3D* per eseguire rilievi di dettaglio ed individuare gli sviluppi plano-altimetrici delle reti caveali. L'adozione di tali tecniche rende possibile la mappatura della rete mediante sondaggi mirati, anziché attraverso l'utilizzo di una maglia di sondaggi rigida a dimensioni prestabilite che risulta economicamente svantaggiosa e con un alto grado di aleatorietà.(Fig.3)

L'applicabilità delle diverse tecniche geofisiche risulta influenzata da numerosi fattori. La presenza di fabbricati e di sottoservizi, l'eterogeneità dei terreni e le loro proprietà fisiche, la presenza di una falda acquifera, ancor più se discontinua o presente in "sacche", le dimensioni, la forma e la profondità delle cavità, possono rendere particolarmente complessa (se non impossibile in alcuni casi) l'acquisizione e l'interpretazione dei dati ed in alcuni casi l'indagine potrebbe conseguentemente restituire un quadro generale difforme dalla realtà.

Tra le indagini geofisiche, le più note risultano essere il georadar, la geosismica e la geoelettrica.

Il georadar risulta una metodologia di indagine precisa, rapida ed economica, ma, soprattutto in un contesto urbano, la presenza di sottoservizi, interferenze varie, terreni eterogenei, argillosi o molto umidi, rendono tale tecnologia applicabile esclusivamente nei primi 2-3 metri di terreno all'intorno del punto di indagine.

L'indagine geosismica, applicata alla ricerca cavità, necessita di situazioni al contorno particolari (geologia regolare, rumore di fondo nullo o molto limitato, ecc) e risulta poco precisa, con una risoluzione limitata e con un alto grado di aleatorietà.

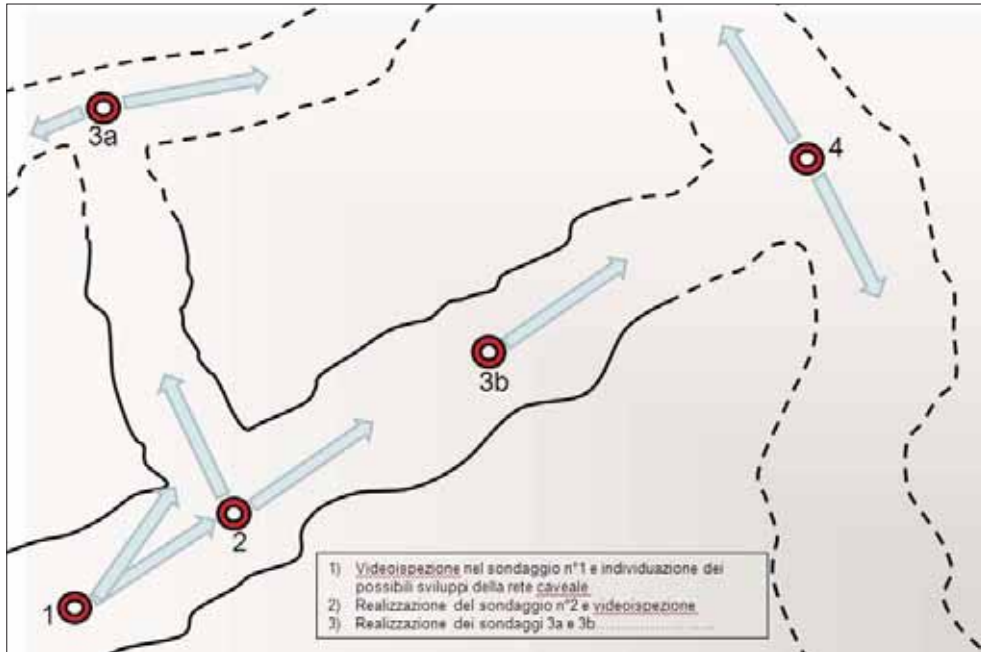


Fig. 3 - Videoispezione: fasi realizzative per il rilievo di una rete caveale

L'indagine geoelettrica, basata sullo studio e l'interpretazione della resistività dei terreni [o delle strutture in essi presenti] mediante l'analisi di corrente indotta, restituisce una mappatura [cromatica, a due o tre dimensioni, con una risoluzione anche di poche decine di centimetri nei primi metri ma che diminuisce con la profondità] dove le anomalie riscontrate rappresentano punti/strutture a bassa trasmissività [cavità, strutture murarie, lignee, ecc]. E' una tecnica che consente di indagare superfici e volumi anche estesi in funzione del numero di sensori utilizzati che, oltre che dai costi, dipende anche dagli spazi a disposizione per lo stendimento dei cavi [se eseguita dalla superficie] o dal numero di perforazioni a disposizione [se eseguita in foro].

A livello generale, comunque, le prove geofisiche consentono di rilevare esclusivamente delle "anomalie", ma non permettono di classificarne la natura. Risultano quindi non esauritive allo scopo. Tanto che per l'esperienza romana, l'utilizzo abbinato geoelettrica-sondaggi è risultato essere il binomio più affidabile per l'individuazione mirata delle cavità. La realizzazione di un sondaggio, ancor meglio se a carotaggio continuo, risulta infatti indispensabile per confermare la presenza di anomalie riscontrate, ad esempio, con tomografia elettrica, e individuarne la natura. Una volta "scartate" le anomalie non interessanti allo scopo, è possibile realizzare, mediante l'esecuzione di sondaggi a distruzione di nucleo "mirati", una mappatura di dettaglio dell'eventuale sviluppo di una rete caveale.

In particolare, nelle diverse fasi procedurali della Linea C sono state utilizzate tutte le sopra citate tecniche di indagine al fine di acquisire i dati necessari alle successive analisi e valutazioni progettuali, relativi a posizione, dimensione e sviluppo in maglie, delle strutture caveali.

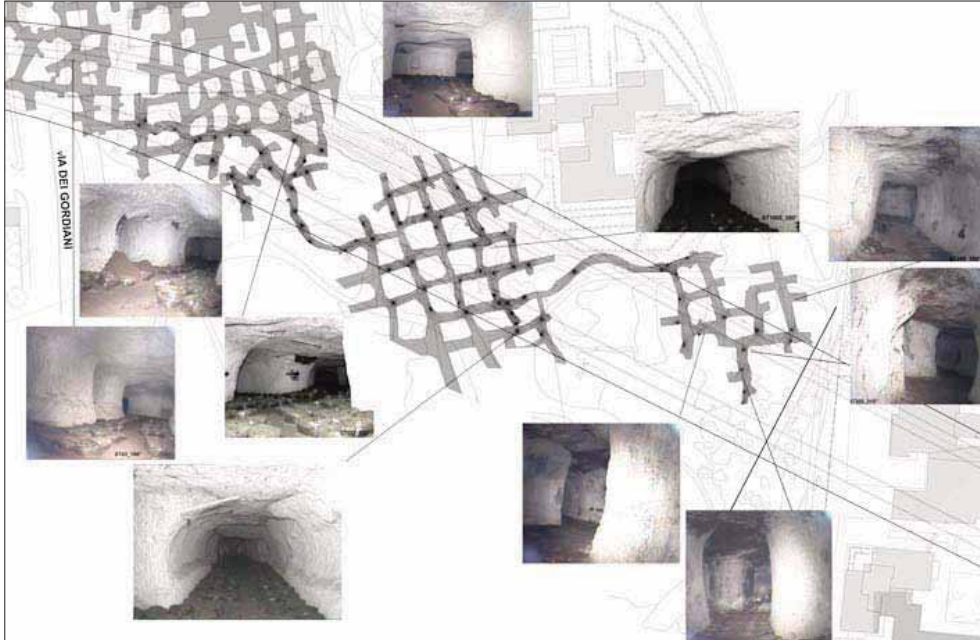


Fig. 4 - Mappatura rete caveale interferente con la linea C nella tratta Teano-Gardenie

Dapprima, nella fase di progettazione, una adeguata *ricerca bibliografica* ha consentito di caratterizzare il territorio, operando un accurato censimento delle cavità a vario titolo note, riportando sulla cartografia di progetto le informazioni raccolte in merito alla loro ubicazione, dimensione, estensione. Le principali "fonti bibliografiche" risultano essere: letteratura (vedi bibliografia dell'articolo); istituti universitari; CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche - Dipartimento Terra e Ambiente); Servizio Geologico Nazionale; Servizio Geologico e Difesa del Suolo della Provincia di Roma; Sigea (Società Italiana di Geologia Ambientale).

Tali informazioni sono state tarate ed integrate mediante alcune specifiche campagne di *sondaggi a distruzione* (con eventuale video-ispezione nel caso di accertamento della esistenza di una cavità) condotte, unitamente a quelle di caratterizzazione geologica-geotecnica dei terreni interessati dagli interventi di progetto, con lo scopo di confermare i dati raccolti e/o acquisirne di integrativi.

Successivamente, nella fase realizzativa, tali dati sono stati integrati con quanto emerso dagli ulteriori sondaggi effettuati per la caratterizzazione geotecnica dei terreni e/o per l'installazione della strumentazione di controllo (piezometri, assestimetri, inclinometri), dalle indagini effettuate per la bonifica di ordigni bellici e per lo svincolo archeologico. Appare evidente come, una volta avviate le attività realizzative - e quindi necessariamente acquisite le aree di cantiere e dispiegati in cantiere i mezzi operativi necessari - vi è la possibilità di estendere le indagini in modo molto più incisivo rispetto alle precedenti fasi di progettazione.

Sulla base delle informazioni note è stata quindi effettuata una estesa e significativa campagna di indagini di tipo geoelettrico sulle aree giudicate a maggiore 'rischio cavità' e/o come necessitanti di approfondimenti.

A titolo di esempio, nella figura 4 è riportata una ricostruzione "in itinere" della rete caveale relativa al tratto di gallerie tra le stazioni Teano e Gardenie della costruenda linea C di Roma.

In generale tutte le indagini effettuate hanno mirato ad accertare la presenza di cavità di dimensioni e/o estensione significativa ai fini delle opere da realizzare. L'individuazione di cavità e/o cunicoli di piccolo diametro o con sviluppo puntuale risulta ovviamente un'impresa complessa, costosa e con margini di aleatorietà molto elevati. Salvo casi specifici, quindi, indagini con risoluzione di elevato dettaglio non sono state (o non vengono) effettuate, in quanto lo sviluppo su volumi poco significativi e, generalmente, molto superficiale, rende la presenza di tali strutture poco rilevante da un punto di vista realizzativo dell'opera.

4.2 Fase 2 - analisi e valutazioni

Al termine della fase di progettazione precedente alla gara, sulla scorta di quanto acquisito dalle indagini al tempo eseguite, è stato possibile redigere una classificazione delle differenti aree in funzione della probabilità di presenza di cavità (Figura 5). E' stata poi valutata la pericolosità ad essa connessa con riferimento alle opere da realizzare, tenendo conto delle metodologie costruttive, nonché delle distanze reciproche e dei rapporti dimensionali tra cavità e strutture da realizzare.



Fig. 5 - Linea C. Tratta T5. Planimetria generale cavità sotterranee [STA-Prof. Geol. M. Sciotti]

In entrambi i casi gli effetti degli scavi e dei conseguenti assestamenti dei terreni potrebbero ingenerare fenomeni di instabilità e crolli all'interno delle cavità, con potenziali evidenti risentimenti in superficie.

4.3 Fase 3 – mitigazione del rischio

Per la mitigazione preventiva della pericolosità associata al 'rischio cavità', la scelta è stata quella di prevedere degli interventi di 'bonifica' delle cavità, secondo modalità e criteri definiti nel 'Capitolato di Progettazione' redatto da Roma Metropolitane ed allegato ai documenti di gara e poi contrattuali.

L'intervento di bonifica prevede, nel caso di cavità di grandi dimensioni e/o di una rete caveale, la realizzazione di pareti di confinamento che delimitino e suddividano in compartimenti la cavità di cui deve essere realizzata la bonifica. Tale procedura permette anche una più semplice verifica dei volumi iniettati in funzione della stima condotta in fase di indagini preliminari.

Queste barriere possono essere realizzate mediante la costruzione di vere e proprie pareti, nel caso la cavità sia dotata di accesso e risulti in sicurezza (o vi possa essere messa tramite l'utilizzo di puntellamenti, centine e spritz beton). Altrimenti, nel caso in cui per assenza di accesso o per motivi di sicurezza non sia possibile effettuare dall'interno l'intervento, il confinamento delle cavità deve essere realizzato direttamente da piano campagna. Si può procedere, nel caso di cavità poco profonde, direttamente con uno sbancamento dall'alto. In alternativa, è possibile formare una piramide che chiude completamente la sezione del cavo mediante il getto, in più fasi, di miscele cementizie "magre" con elevato angolo di attrito, iniettate attraverso un foro di sondaggio realizzato da piano campagna che intercetta la volta della cavità. Tale tecnica, tuttavia, non sempre assicura un'ottima tenuta delle pareti di confinamento.

Nel caso specifico, almeno per quanto concerne le situazioni più "delicate" per le caratteristiche della rete caveale (condizioni di instabilità, particolari geometrie, elevata estensione) o per vincoli in superficie (edifici, opere infrastrutturali, ecc.), si è deciso di ricorrere ad un intervento più specialistico, con maggiori oneri, che garantisce ottimi risultati. In questo caso le pareti di confinamento vengono ad essere costituite mediante micropali in acciaio di diametro 130mm affiancati, realizzati dalla superficie attraverso perforazioni di diametro 250mm ed interasse 400mm ed attestate fino a 3 metri oltre la base della cavità. L'armatura dei micropali è predisposta con valvole di iniezione di non ritorno (manchettes) ed attrezzata con sacco otturatore in materiale sintetico per tutta l'altezza della cavità. In prima fase, viene realizzata una guaina a riempimento dell'intercapedine tra micropalo e perforazione fino alla base della cavità. Successivamente vengono iniettati micropali alternati, con espansione e riempimento dei sacchi otturatori mediante malta a presa rapida per formare delle colonne primarie. Nelle fasi successive vengono iniettati i micropali secondari ed i relativi sacchi otturatori, a chiudere completamente la sezione del cavo, confinando così a compartimenti la cavità. In ultima fase viene sigillata l'intercapedine tra palo e perforazione al di sopra del sacco otturatore. La struttura flessibile e la forma adattabile dei sacchi otturatori consente evidentemente di ottenere una perfetta sigillatura. L'armatura dei pali è dimensionata per resistere alla spinta, in fase fluida, del materiale di riempimento che verrà successivamente iniettato. Nelle Figg.7, 8, 9 e 10]

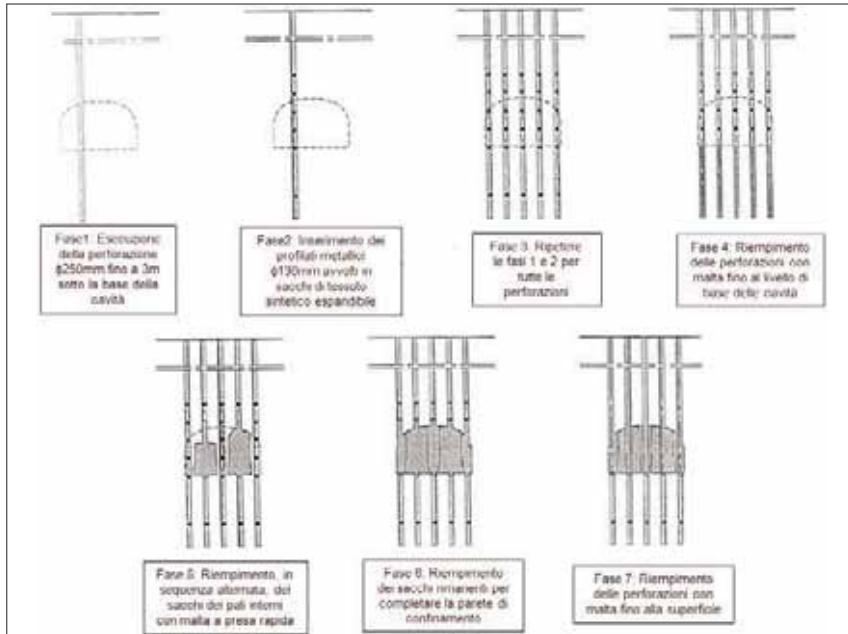


Fig. 7 - Intervento con sacchi otturatori: fasi realizzative

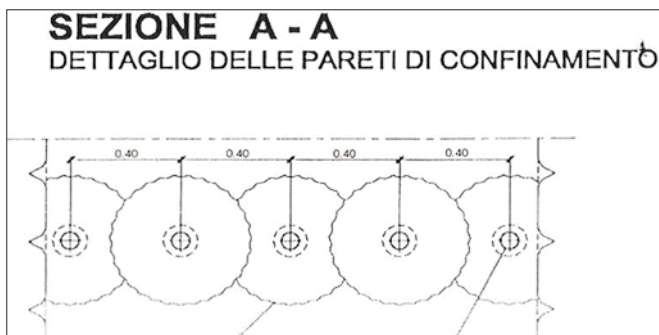


Fig. 8 - Dettaglio sacchi otturatori

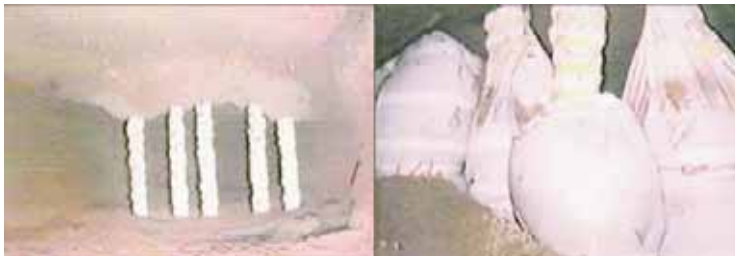


Fig. 9 - Sacchi otturatori installati e in fase di iniezione [da: Lanzini M. 2009]

Una volta “arginato” il settore di cavità dove si deve eseguire l’intervento, si procede al riempimento della stessa mediante miscele tipo GEOMIX di consistenza adeguata. Il prodotto, a base di leganti idraulici ed aggregati naturali, fluido, autolivellante e privo di segregazione ed essudazione, viene pompato dalla superficie attraverso apposite aperture o utilizzando le perforazioni realizzate nella fase di indagine. Il controllo del corretto riempimento del cavo e l’eventuale necessità di intervento su più punti a causa della presenza di “sacche” in calotta, viene monitorato attraverso video ispezioni, contestuali alla fase di pompaggio, eseguite da fori limitrofi. (Fig.10)

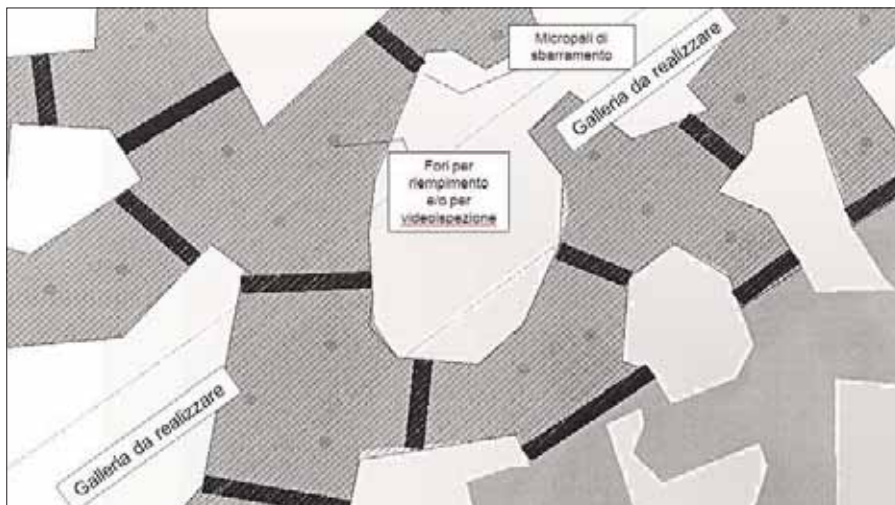


Fig. 10 - Intervento di bonifica su rete caveale interferente con il tracciato

Il materiale impiegato per il riempimento deve avere caratteristiche fisico meccaniche e di permeabilità il più possibile simili al terreno in cui sono state realizzate le cavità. Infatti deve avere una resistenza sufficiente a sostenere le gallerie e garantirne la stabilità, ma deve risultare facilmente scavabile (diaframmi e/o TBM).

4.4 Fase 4 – controllo del rischio ‘residuo’

Nella fasi di indagine e di analisi/valutazioni è stata valutata la pericolosità connessa al ‘rischio cavità’ con riferimento alle specifiche opere da realizzare, definendo i criteri e gli interventi preventivi atti a contenere il livello di rischio atteso entro limiti accettabili. Infatti non è tecnicamente ed economicamente possibile azzerare completamente il suddetto rischio, ma solo contenerlo entro un livello ‘residuo’ ritenuto congruente con le previsioni progettuali generali in merito alla sicurezza in fase realizzativa, all’adeguatezza statica delle strutture da realizzare, alla funzionalità delle opere a lungo termine ed al rispetto delle pre-esistenze.

Tale ‘rischio residuo’ va quindi gestito in corso d’opera, anche attivamente, perseguendo quindi qualsiasi azione atta ad una sua ulteriore minimizzazione.

A tale scopo si sono individuati i seguenti tipi di interventi/azioni:

- integrazione delle indagini progressivamente con il procedere delle attività/lavorazioni;
- attuazione di adeguate metodologie di controllo dell'esecuzione delle lavorazioni;
- monitoraggio del contesto geotecnico ed urbano.

L'avanzamento delle lavorazioni ed i conseguenti riscontri in corso d'opera possono evidenziare la necessità/opportunità di integrare le indagini fino al momento eseguite. Risulta evidente come l'estensione e l'intensità delle indagini, se significative, siano inversamente proporzionali al livello di rischio, anche di quello 'residuo' ritenuto accettabile.

In considerazione del contesto urbano in cui ci si trova a dover operare, nonché delle situazioni di 'ingegneria estrema' da affrontare (sia progettualmente che operativamente), per l'esecuzione delle lavorazioni connesse alle opere geotecniche-strutturali è previsto il ricorso ad attrezzature tecnologicamente all'avanguardia, dotate dei più moderni sistemi di controllo dei numerosi parametri operativi.

Si pensi ad esempio all'idrofresa per la realizzazione di diaframmi in c.a. ed alla tecnologia jet-grouting per la realizzazione dei tamponi di fondo di pozzi e stazioni fino alla profondità di oltre 55 m dal piano campagna, o alle Tunnel Boring Machine utilizzate per lo scavo delle gallerie di linea con oltre 3 bar di carico idraulico.

Si tratta di lavorazioni caratterizzate quindi da un'elevata componente tecnologica, ma con una componente 'umana' che continua a giocare un ruolo significativo nella gestione in corso d'opera. Risulta conseguentemente necessario ed opportuno un controllo costante dei parametri di lavoro, sia per una verifica delle previsioni progettuali e/o operative iniziali (ad esempio, valori ottenuti da campi prova preventivamente realizzati per la taratura delle modalità operative delle attrezzature), sia per l'obiettivo di individuare tempestivamente anomalie che possano essere riconducibili ad interferenze impreviste e/o imprevedibili con cavità e/o reti caveali.

In tale senso la esecuzione degli appalti in regime di 'Assicurazione Qualità' rappresenta un punto di partenza fondamentale: le attività di controllo devono essere pre-definite ed attuate secondo un preciso Piano di Controllo e Prove, specifico per ogni lavorazione; le responsabilità per l'esecuzione dei vari controlli sono codificate nell'ambito di specifici mansionari; le modalità di registrazione e certificazione dei controlli sono esplicitate preventivamente. In corso d'opera, le attività della Stazione Appaltante (Roma Metropolitana) e del General Contractor, tra loro complementari, sono gestite sulla base dei suddetti Piani.

Con il controllo costante in corso d'opera è possibile ad esempio, a titolo indicativo ma non esaustivo, individuare:

nell'esecuzione dei diaframmi e pali

- deviazioni dello scavo dalla verticale di progetto,
- perdite dei fanghi bentonitici,
- volumi di getto (cls) superiori al teorico,

nell'esecuzione del jet-grouting

- deviazioni delle perforazioni dalla verticale di progetto,
- perdita del fluido di perforazione,
- assenza di refluo durante l'esecuzione del trattamento,

nello scavo delle gallerie

- deviazioni dello scavo dall'asse di progetto,
- diminuzione della pressione al fronte di scavo,
- volumi di iniezione di back-filling superiori/inferiori al teorico,
- pressioni di iniezione di backfilling inferiori a quelle di progetto

tutte anomalie, direttamente o indirettamente riconducibili alla possibile presenza di vuoti, più o meno estesi, al fronte di scavo e/o all'intorno del profilo di scavo.

Quanto sopra deve comunque essere associato ad un attento monitoraggio del contesto geotecnico ed urbano, allo scopo di acquisire i dati necessari a valutare compiutamente - o almeno in maniera più esaustiva possibile - le eventuali anomalie riscontrate in corso d'opera.

Tale monitoraggio è condotto con specifica strumentazione nell'intorno delle aree di lavoro per il controllo di spostamenti nel terreno, di variazioni del livello di falda, di spostamenti indotti in superficie e/o sui fabbricati. A tale scopo sono stati (e vengono) installati strumenti quali inclinometri, assestimetri, piezometri, mire ottiche, capisaldi, con acquisizione manuale e/o automatica (real-time).

In particolare, per quanto riguarda le TBM è attuato un monitoraggio in continuo per la ricerca di cavità anche in fase di realizzazione delle gallerie, operando dal fronte di scavo quindi superando anche le difficoltà connesse a vincoli in superficie (fabbricati, rete viaria, sottoservizi, ecc).

In generale esistono diverse tecniche (georadar, geoelettrica) che possono essere sviluppate dal fronte della TBM e permettono di indagare il terreno in prossimità dello scavo, solitamente con ottimi risultati fino a 5-10 metri di distanza dal fronte, prevedendo così con un certo anticipo la presenza di anomalie.

In particolare le TBM all'opera sulla Linea C sono dotate di un sistema di monitoraggio continuo in fase di avanzamento: BEAM (Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring) (Fig.11).

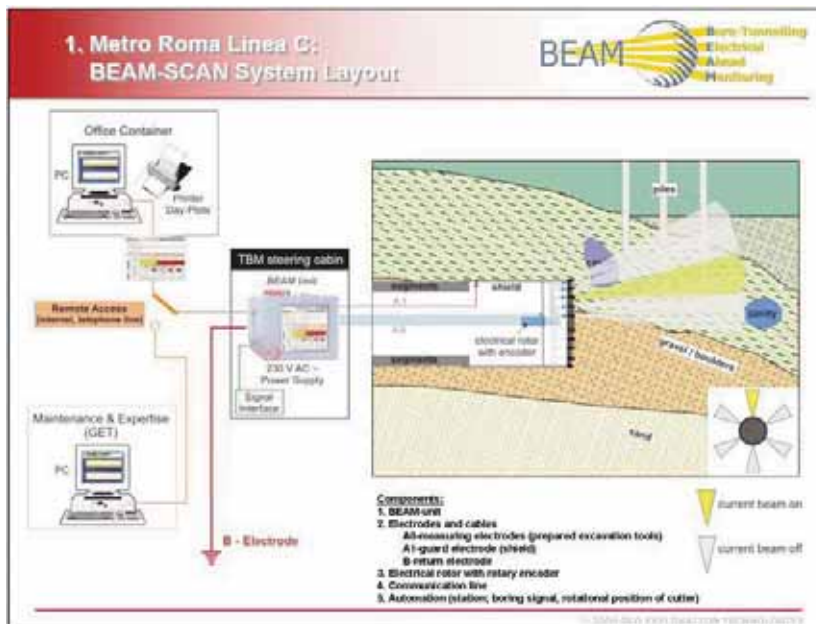


Fig. 11 - Sistema di monitoraggio BEAM (Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring)

Tale sistema, di tipo geoelettrico, risulta in grado di indagare in avanzamento fino ad una distanza pari a 2-3 volte il diametro della TBM. Si sta dimostrando utile anche al fine di pianificare e tarare i parametri macchina (caratteristiche delle miscele iniettate e pressioni imposte per il controbilanciamento del fronte, spinta, coppia di rotazione, ecc), e in relazione alla necessità di ottimizzare la velocità di avanzamento, sempre procedendo con lo scavo in condizioni di sicurezza.

Nella Figura 12 sono riportati alcuni esempi di visualizzazioni grafiche ottenibili in corso d'opera, relativamente alla possibile caratterizzazione del terreno in avanzamento ed all'intorno dello scavo, ed alla verifica di potenziali anomalie causate dalla presenza di cavità.

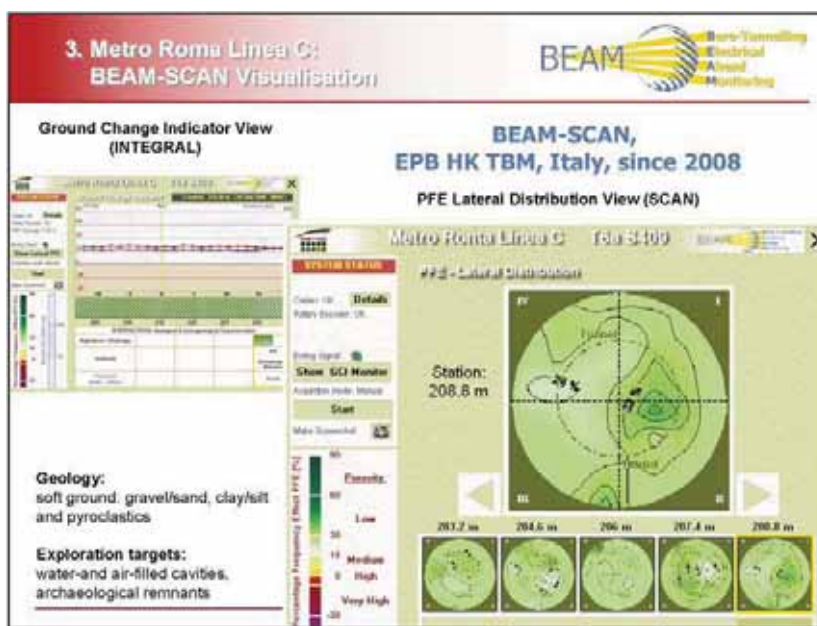


Fig. 12 - Sistema BEAM: caratterizzazione e verifica presenza di anomalie

Qualora durante la gestione in corso d'opera si riscontrassero anomalie tali da configurare scenari di rischio peggiori di quelli previsti in progetto come accettabili, si deve necessariamente provvedere ad attuare delle specifiche azioni correttive per riportare il livello di 'rischio residuo' ai limiti previsti.

Tra tali azioni è prevista anche una estensione degli interventi di bonifica delle cavità già realizzati, andando ad interessare le eventuali 'nuove' cavità individuate. Le modalità possono essere quelle già prima descritte, intervenendo dalla superficie, oppure si possono utilizzare delle apposite predisposizioni delle TBM.

Le macchine della Linea C - così come quelle all'opera sulla Linea B1 - sono allestite con apposite tasche sul mantello, che permettono di eseguire delle perforazioni (ad ombrello al contorno del fronte di avanzamento e/o sullo stesso fronte di scavo), tramite le quali ottenere dei dati sui terreni mediante carotaggi e/o effettuare delle iniezioni di riempimento.

BIBLIOGRAFIA

- CRESCENZI R., PIRO M., VALLESI R. (1995) - *Le cavità sotterranee a Roma*. Mem. Descrittive Carta Geologica d'Italia, v. L, 249-278.
- LANZINI M. (1995) - *Il problema delle cavità sotterranee a Roma (un rischio geologico)*. SIGEA, Geologia dell'ambiente, 3.
- LANZINI M. (2009) - *Lezioni di Geologia Urbana. Problematiche, metodologie e casi di studio nell'attività professionale*. Corso di aggiornamento professionale organizzato dalla Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA), Roma.
- MAZZA R., CAPELLI G., LANZINI M. (2008) - *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma*.- La geologia di Roma dal Centro Storico alla periferia. Mem. Descrittive Carta Geologica d'Italia, v. LXXX (2), 149-170. Dipartimento Scienze Geologiche dell'Università degli Studi Roma Tre, S.EL.CA, Firenze.
- SCIOTTI M. (1982) - *Engineering Geological Problems Due to Old Underground Quarries in the Urban Area of Rome* - Proc. IV Int. Congress I:A:E.G., New Delhi
- SCIOTTI M. (1984) - Il problema del recupero delle zone interessate da vecchie cave in sotterraneo nell'area urbana di antichi centri abitati. Quarry and Construction.
- SCIOTTI M. (2001) - *Il rischio cavità sotterranee nell'area del Comune di Roma*. Rapporto inedito per il Comune di Roma - Protezione Civile
- SCIOTTI M. (2001) - *Assetto geologico, geomorfologico e geologico-tecnico dei Comprensori Direzionali "Casilino" e "Centocelle"*. Rapporto inedito per il Comune di Roma - Uff. Progetti Metropolitan.
- SCIOTTI M. (2003) - *Distribuzione delle cavità lungo la Linea C ed interferenze con le opere*. In:
S.T.A. - Roma Metropolitane - Documenti a base di Gara per la Linea C della metropolitana di Roma.
- STA (2003) - *Linea C. Capitolato di progettazione opere civili*. - Documenti a base di Gara per la Linea C della metropolitana di Roma.
- VENTRIGLIA U., SCIOTTI M. (1970) - *Cavità sotterranee* - Carta geologica della città di Roma. LAC, Firenze.

THE ROLE PLAYED BY GROTTOS IN INCREASING THE SEISMIC DAMAGE: THE CASE OF RIONERO IN VULTURE (SOUTHERN ITALY)

di Gizzi F.T.¹, Loperte A.², Satriani A.², Potenza M.R.¹, Proto M.², Lapenna V.²

ABSTRACT

The contribution deal with the multidisciplinary investigation aimed to identify the role played by grottoes in increasing the macroseismic effects in a medieval town of the southern Italy. This area was hit by strong historical seismic events, among which the 1930 Irpinia one (I_o=X MCS; M_e=6.7) that gave rise heavy effects in the territory ranging from Melfi to Ariano Irpino, causing very deep damage to private and public buildings.

This earthquake has left a huge amount of technical documents that indicate that Rionero in Vulture was strongly damaged (I_s=VIII MCS) within five areas, especially. Damage increase in some of these areas was also recorded during the 1851 (I_o=X MCS; I_s=IX MCS; M_e=6.3) and 1980 earthquakes (I_o=X MCS; I_s=VII MCS; M_e=6.7).

One peculiarity of the towns surrounding the extinct Vulture volcano, including Rionero, is the presence of hundreds of man-made caves dug in pyroclastic deposits. These grottoes overlap on several topographic levels. Cave density is usually high in the quarters on steep slopes. Grottoes are both below and at the same topographic level as the buildings with a broad horizontal extension, which is also beneath the streets.

Now, considering that a cross-correlated analysis of historical data suggest that the uneven damage pattern in Rionero in Vulture can not be attributed only to the building vulnerability, it was analysed the role played by the hundreds of grottoes localised in the urban framework.

Starting from these preliminary remarks, historical data joined with geophysical prospecting, such as georadar investigations, allowed to infer the spatial distribution and the geometrical features of the cavities in the areas of Rionero more damaged by the 1930 earthquake.

On the whole, the data suggest that the number, the size and the instability of the grottoes vaults played an important role in producing an increase of seismic damage in the overhanging buildings.

1. INTRODUCTION

It is well-know that subsoil features can strongly change the seismic effects on buildings, causing an increase of damage. Among causes that can bring about the differential effects, the stability of foundation subsoil during seismic shaking is of great importance.

1 Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali (IBAM)-CNR-Area della Ricerca di Potenza

2 Istituto per le Metodologie di Analisi Ambientale (IMAA)- CNR-Area della Ricerca di Potenza

From this point of view, the presence of underground voids in urban areas needs to be thoroughly considered. This condition is common to many cities over the world, such as Mexico City, Rome, Nottingham, New Orleans, Naples, Palermo, and Catania where both natural cavities (mainly of karst origin) and man-made ones (frequently dug in volcanic deposits) are present.

Starting from these preliminary remarks, this paper presents a study aimed to investigate the role played by grottoes in increasing the seismic effects in an urban context. The site considered is Rionero in Vulture, a town characterised by both hundreds cavities and high seismicity. For this town, a highly-detail map of seismic damage caused by the 1930 Irpinia earthquake ($M_e=6.7$, $I_s=VIII$ MCS) was already available (GIZZI AND MASINI, 2006). To understand the role played by cavities during the historical seismic shaking it is fundamental to identify both the density and the geometrical features of the grottoes. To this purpose, geophysical investigations integrated by site surveys and analysis of historical-technical documents were carried out. Taken together, these data allowed to obtain more insights about the influences of the man-made caves on seismic damage.

As regards geophysical surveys, four georadar prospecting, in the area of Rionero that suffered highest damage for the 1930 earthquake, were performed.

The choice of georadar as a technique for investigating the underground cavities was driven both by logistical considerations about the execution of the surveys and by considerations about the geological features of the site.

As concern the first aspect, an advantage of the georadar technique consists in the fact that electrodes do not need to be put in the soil. This allows to save many time and to investigate sectors of the urban area otherwise hard to survey for logistical constraints (e.g.: road traffic).

As regards the site features, the use of the georadar in this context was thought to be suitable considering that the supposed air-filled or water-saturated backfilling voids represent significant radar reflectors compared to the geological properties of the subsoil.

Georadar prospecting method has already proved to be a very useful tool for detecting the location and the geometry of the underground cavities in urban and in non-urbanised areas characterised by different geological settings (e.g.: ULUGERGERLI AND AKCA, 2006; MOCHALES *et al.*, 2008; WADHWA *et al.*, 2008). By this study, we hope to meaningfully add to the body of knowledge about the seismic behaviour of such sites and, thereby, of identifying potentially 'weak' urban zones can be so that suitable prevention strategies can be implemented to preserve the historical centre.

2. GEOLOGICAL SETTING

Rionero in Vulture is located close to the extinct Vulture volcano, in southern Apennines (Fig. 1). This chain is a Neogene fold and thrust belt that is made up of a buried carbonate duplex system tectonically overlain by NE verging thrust sheets (MOSTARDINI & MERLINI, 1986; PATACCA & SCANDONE, 1989; LENTINI *et al.*, 1996) made-up of Mesozoic-Paleogene sediments laid in platform and basin paleogeographic domains.

These were involved in the contractional episodes since the late Oligocene-early Miocene times (PESCATORE *et al.*, 1999). Since Pliocene to Quaternary, extensional tectonics progressively replaced the compressional field. During the Middle Pleistocene, the most recent chain deformation occurred on its southern and easternmost portion (SCANDONE *et al.*, 1992) and the history of strato-volcano Vulture had its beginning.

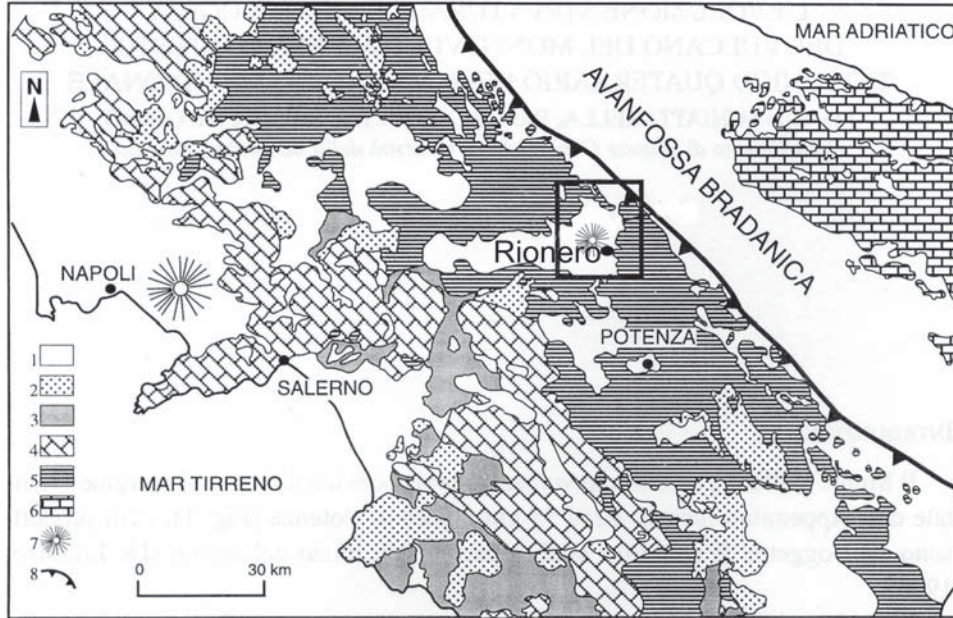


Fig. 1 - Tectonic outline of the southern Apennines. 1=Bradanic foredeep and intrapenninic sediments. Volcanoclastic rocks (plio-quadernary); 2=Sinorogenic sediments [Miocene]; 3=Liguride complex [Cretaceous-Oligocene]; 4=Apennine platform carbonate [Mesozoic-Cenozoic]; 5= Lago-negro basin sediments [Trias-Miocene]; 6=Apulian platform sediments [Trias-Pliocene]; 7=Volc-anoes; 8=Buried allochthonous front. Vulture area is shown from the rectangle [from Pescatore et al., 1999, modified].

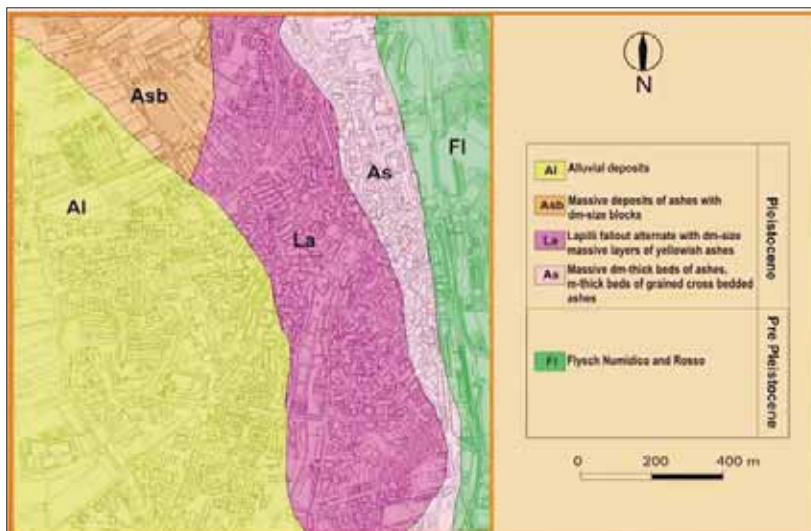


Fig. 2 - Simplified geological map of Rionero in Vulture

The products of Vulture are composed of highly undersaturated alkaline-potassic to ultra-potassic rocks such as foidites, tephrites, phonolites, trachites with age ranging from 0.674 ± 7 to 0.132 ± 12 ka Before Present (BROCCHINI *et al.*, 1994). Recently, the volcanic products have been grouped in two supersyntheses: Vulture Mount and Monticchio ones (Schiattarella *et al.*, 2005; Giannandrea *et al.*, 2006). Rionero in Vulture is situated in this geographic-geological background. In detail, in the town examined here pyroclastic products belonging to Vulture Mount supersynthem outcrop.

One peculiarity of the towns surrounding Vulture Mount, included Rionero, is the presence of hundreds of man-made caves dug in pyroclastic deposits. These grottoes overlap on several topographic levels. Cave density is usually high in the quarters on steep slopes. Grottoes are both below and at the same topographic level as the buildings with a broad horizontal extension, which are also beneath the streets. Nowadays, the caves are used for storage or as wine cellars and stables.

3. THE JULY 23, 1930 EARTHQUAKE: DIFFERENTIAL DAMAGE IN RIONERO IN VULTURE

In about eight centuries, the Vulture area has experienced at least ten earthquakes felt with a site intensity $I_s \geq VI$ MCS. Among these historical events, seven hit the town analysed here.

The last significant event that affected the area investigated was on July 23, 1930. It is the Irpinia earthquake whose epicentral intensity (I_0) and magnitude (M_e) have been respectively evaluated as X in Mercalli-Cancani-Sieberg scale and 6.7 (BOSCHI *et al.*, 2000). The event hit at 00:08 GMT an area of about 6,500 km². It caused heavy damage to the territory ranging from Melfi to Ariano Irpino, killed 1404 people and caused very deep damage to private and public buildings.

As regards the earthquake effects on the population of Rionero, they can be summarized in 25 dead. Moreover, the event caused heavy losses of private and monumental buildings. In order to delineate the damage 'scenario' for Rionero, expert unpublished technical-administrative documentation produced by the Genio Civile (Civil Engineers) supplemented by sources taken from web sources were analysed (GIZZI AND MASINI, 2006; GIZZI, 2009). Observing the damage pattern (Fig. 3) it emerges that higher effects were concentrated within five areas: *Rione Costa*, which is the most affected quarter, *Rione dei Morti* in the central-southern part of the town, *Rione Calvario*, *Rione Piano delle Cantine* and the area *close to Mother Church* in the northern area.

A cross-correlated analysis of the historical data suggest that the distribution of the damage can not be attributed only to the building vulnerability. Therefore, it is important to analyse how the geological features of the town and/or human intervention on urban territory influenced the damage. This also considering that coeval surveys indicate in grottoes the main cause of the uneven effects.

To address this point, georadar investigations and field surveys were performed. In detail, geophysical surveys were addressed in *Rione Costa*, the quarter where the highest damage was registered during the 1930 earthquake.

4. GROUND PENETRATING RADAR SURVEY

Ground penetrating radar (GPR) is a geophysical technique for shallow investigations with high resolution which has undergone a rapid development during the last two decades (BLINDOW *et al.*, 1987). GPR methods measure the travel time of an electromagnetic wave

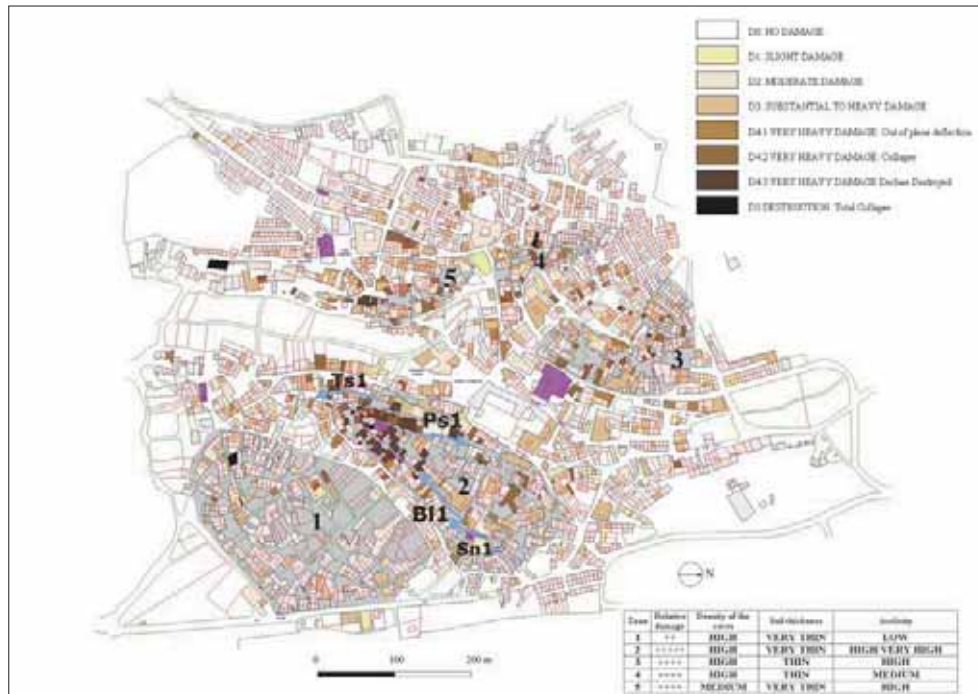


Fig. 3 - Damage pattern for Rionero in Vulture as delineated by the analysis of historical sources [degree of damage is given in EMS-98 scale, Grunthal, 1998]. The figure also shows the areas in which the caves are localized. At the bottom right-corner a table reports some features of these areas that seem suggest a key role in producing a local increase of damage. Profiles of georadar investigations are also indicated [Ts1=Trieste street; Ps1= Pisacane street; B11= Belvedere street; Sn1=San Nicola street].

transmitted from a transmitter antenna, reflected from the subsurface, and received via receiver antenna. The principles of the GPR method have been described extensively in the literature [MOREY, 1974; ULRIKSEN, 1982; DAVIS AND ANNAN, 1989].

GPR has been used increasingly and accepted for geological, engineering, environmental [LOPERTE *et al.*, 2004, PISCITELLI *et al.*, 2007] and archaeological science starting from the 1980s. In fact, it offers very high performances in terms of non invasivity, real time information and available spatial resolution thanks to the use of a easy and portable instrumentation able to perform measurements in an easy and fast way [DANIELS, 1996, LAZZARI *et al.*, 2006].

A SIR 2000 Radar System matched to a monostatic antenna of 400 MHz central frequency was used to accomplish the survey. The data were acquired in continuous mode. The acquisition time range was 140 ns.

The GPR data set was analysed using the REFLEX- Win Version 5.0.5 program [SANDMEIER, 2001].

Standard data processing has the aim to improving the “imaging” by correctly locating and focussing all the reflectors. It was performed through different steps. The first step

was the trace removal to eliminate the ends of the radargrams when the antenna was not dragged.

Then, a zero time correction removed the propagation path of the signal within the cable and antenna. The third step was the gain removal and the energy decay compensation to restore a correct amplitude along each wavelet. A band-pass frequency filter with cut-off frequencies was set to reduce the noise at high and low frequencies. Subsequently, the background removal eliminated all the reflections that are not spatially varying along the direction of antenna's movement. Then, a Kirchhoff migration was performed by using a constant velocity of 0.05 m/ns obtained by the hyperbolas adaptation. Finally, an envelope function was needed to show the results in terms of instantaneous amplitude of the processed signal. The result of the standard data processing is shown in figures 3 to 6.

4.1 GPR results

As indicate above, four georadar surveys were addressed in Rione Costa, the quarter where highest damage was registered during the 1930 earthquake. This area was selected whereas both on site surveys and historical documents indicated this zone have the highest number of grottoes.

The four GPR-profiles comprising about 700 m of linear survey were obtained, of these the most relevant radar sections will be shown.

The SN1 GPR-section, 37 m long, shows two hyperbolic anomalies between 18 and 28 m related to cavities. As shown in fig. 4, the cavities, placed at 0.8 and 1m deep respectively, are about 5 and 4 m wide.

Moreover, the shallow part is characterized by many hyperbolic reflectors, between 0 and 8 m and between 21 and 35m, caused by the presence of wire mesh. Horizontal layer at 1.6m depth is also shown. The lower part of GPR-section shows the presence of an absorbing area, probably correlated to the presence of water saturated soil.

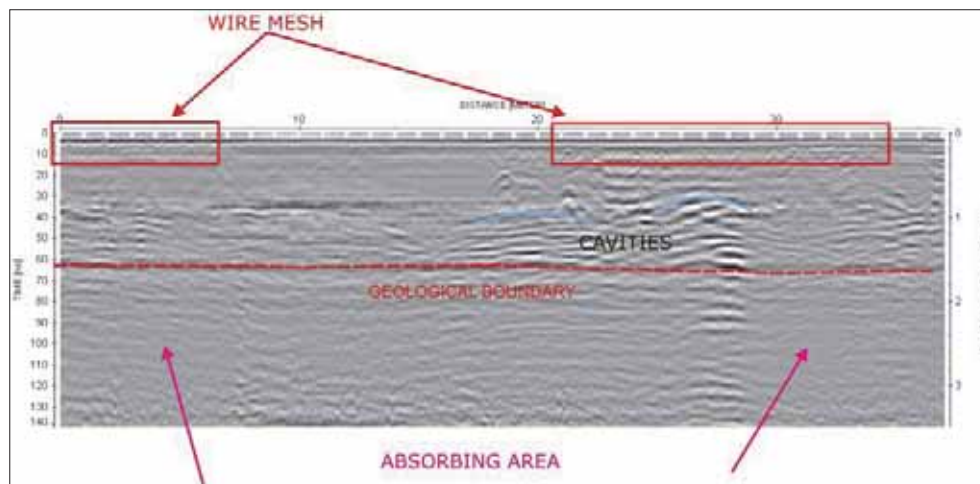


Fig. 4 - SN1 georadar profile carried out along San Nicola street.

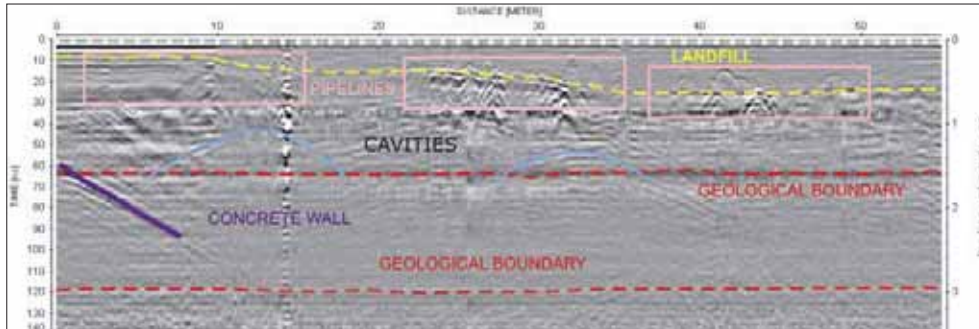


Fig. 5 - BL1 georadar profile carried out along Belvedere street.

BL1 GPR-section, is 55m long and is characterized by hyperbolic anomalies associated with the presence of cavities, located between 7 and 14 m at a depth of about 1m and between 28 m and 34 m at a depth of about 1.2m from the origin of the profile (Fig.5). Furthermore, this section shows a surface layer which tends to deepen to about 1 m and two nearly horizontal layers at 1.6 and 3.0 metres.

The lower part of GPR-section shows the presence of an absorbing area, probably related to the presence of water saturated soil.

Finally, throughout the section we observe the presence of pipelines identifiable by reflections hyperbolic surface.

The PS1 radar section is 53 m long (Fig. 6). In particular, the right side of electromagnetic section is, instead, characterized by two hyperbolic reflectors related to air filled cavities. For these cavities, placed at a depth of about 0.7 m and with a total width of about 8 m has been possible to do an inspection which confirmed the georadar data.

Moreover, the shallow part is characterized by many hyperbolic reflectors determinate of the presence of wire mesh between 7 and 25 m.

As the previous GPR section, also the PS1 section shows two layers at different depth, 1.6 and 3.0 metres, and the lower part of GPR-section with an absorbing area, probably related to the presence of water saturated soil.

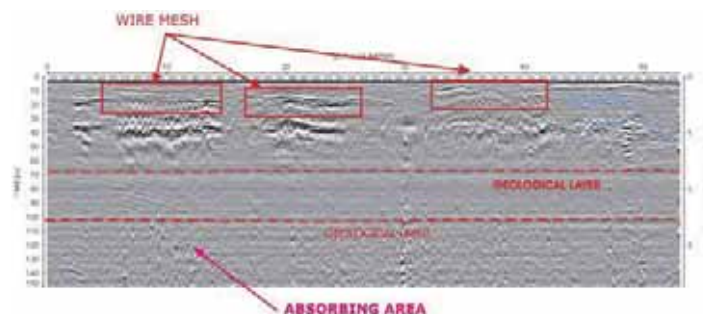


Fig. 6 - PS1 georadar profile carried out along Pisacane street. They are also shown the geological layers that site surveys indicate as an a succession of pumices and ashes.

Fig. 7 shows a GPR section characterized by an evident shallow (0.4 m depth) air filled cavity between 32 and 37 m.

Moreover, the superficial part presents many hyperbolic reflectors determined by underground structures, like wire mesh and pipelines. At a depth of 1.6 m a horizontal geological layer is evident as in the previous radargram sections.

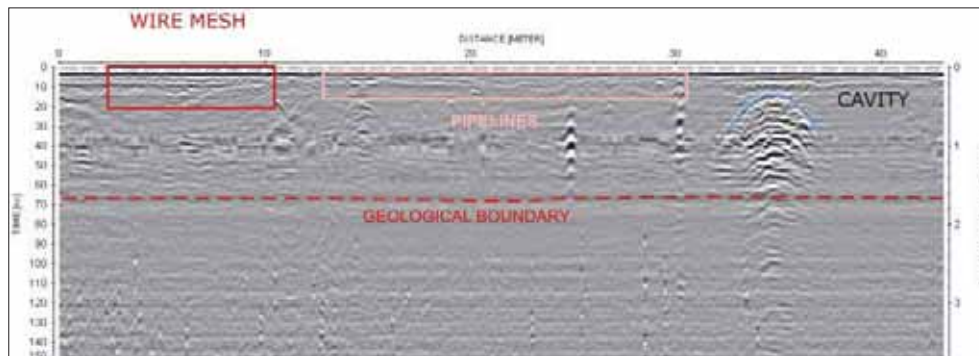


Fig. 7 - TS1 GPR carried out along Trieste street.

5. THE ROLE OF CAVITIES ON BUILDING DAMAGE

According to georadar investigations, site surveys and analysis of historical documents Figure 3 shows the main urban areas of the downtown (1-5) in which the grottoes are located. Figure also reports a table where are indicate some main features of the Rionero areas, such as the distribution of damage, the cave density, the soil thickness above the grottoes, and the ground acclivity.

Analysing all these data, it can be seen that the combination of three factors (density of the caves, soil thickness and acclivity) at the top of the variation range caused the highest damage [*Rione La Costa* [zone 2]] whereas the combination of the same factors at intermediate level caused higher damage [zone 3-4-5]. Even if only one factor belongs to the lowest class of the range, a decrease of damage is evident [Zone 1].

On the whole, the analysed data suggest that the widespread grottoes played a key role in producing a local increase of damage due to a mutual relationship between the buildings and the grottoes.

To strengthen this hypothesis, it should be emphasized that the caves show a prevalence of medium-high size (length is also beyond 15-20 metres) with numerous joints in the pyroclastic deposits where they were dug. Size of some grottoes is also evident by the analysis of technical maps attached to the archive documents concerning the 1930 earthquake [Fig. 8]. Obviously, size and joints are further predisposing factors for the seismic instability of the building-soil system.

However, another increased damage factor can be found in *Rione Costa* and *Rione dei Morti*. In these quarters, historical written sources refer that some buildings were founded on made land therefore during the earthquake possible consolidation phenomena with consequent differential sinking of the foundation soil took place. Georadar surveys show that made land has a variable thickness (0-1.5m) due to the need to level the soil.

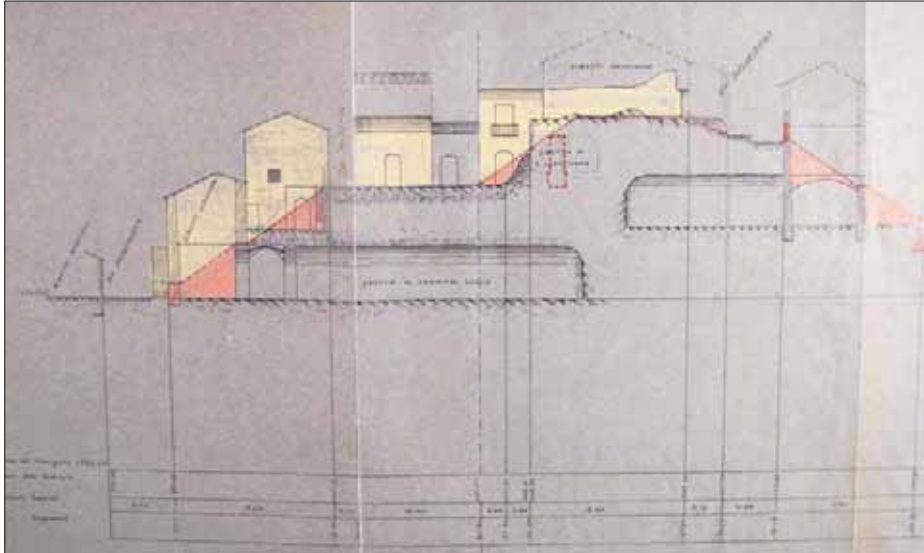


Fig. 8 - Profile along Rione Costa, as shown by a historical map. The scale of drawing indicates that grottoes have a size that can exceed 15-20 m in length.

On the whole, the analysed data suggest that the widespread grottoes played a key role in producing a local increase of damage due to a mutual relationship between the buildings and the grottoes.

6. CONCLUSIONS

The work presented here has discussed about multidisciplinary investigations aimed to identify the role played by grottoes in increasing the macroseismic effects in a medieval town of the southern Italy hit by the strong 1930 Irpinia earthquake.

Historical data joined with geophysical prospecting, such as georadar investigations, allowed to infer the spatial distribution and the geometrical features of the cavities in the areas of Rionero more damaged by the 1930 earthquake.

Cross-correlated analysis of all data suggest that the underground of Rionero is crossed by cavities that not rarely exceed 15-20 metres in length. Geophysical investigations are demonstrated be of great importance in this urban context because most caves are abandoned and, therefore, they can not be surveyed.

Features of the grottoes suggest that more orders of caves are near and can statically and dynamically to interact. Moreover, caves not rarely are just below the foundation soils and they do not seem to show strengthening interventions.

All these considerations lead us to suppose that underground voids played an important role in increasing the 1930 seismic damage by reducing the stability of the building-foundation soils.

To better to corroborate this work hypothesis, the approach above indicated will be integrated by further geophysical investigations [georadar analysis with lower frequency antenna, geoelectrical surveys, ambient noise measurements] that will allow to suggest intervention to mitigate the seismic risk of the historical centre.

As above mentioned, the town considered here is characterised by hundreds of man-made cavities dug in historical times. These site conditions are common in several cities over the world, such as Mexico City, Nottingham, Catania, and Naples. Therefore, a similar methodological approach could be adopted in these sites, too.

REFERENCES

- BLINDOW N. ERZENGER P. PAHLS H., SCHOLZ H. & THYSSEN F. (1987) - *Continuous profiling of subsurface structures and groundwater surface by EMR methods in Southern Egypt*. Berliner Geowiss. Abh. (A) **75** 2, 575-627.
- BOSCHI E. GUIDOBONI E. FERRARI G. MARIOTTI D. VALENSISE G. & GASPERINI P (Eds) - *Catalogue of Strong Italian Earthquakes from 461 B.C. to 1997*. Ann. Geof. 43 (4), with CD-ROM, 2000.
- BROCCHINI D. LA VOLPE L. LAURENZI M. A. & PRINCIPE C. (1994) - *Storia evolutiva del Monte Vulture*. Plinius, **12**, 22-25.
- DANIELS D J. (1996) - *Subsurface-penetrating radar*. The Institution of Electrical Engineers, London.
- DAVIS J.L. & ANNAN AP (1989) - *Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. Geophysical Prospecting, **37**, 531-551.
- GIANNANDREA P. LA VOLPE P. PRINCIPE C. & SCHIATTARELLA M. (2006) - *Unità stratigrafiche a limiti inconformi e storia evolutiva del vulcano medio-pleistocenico di Monte Vulture (Appennino meridionale, Italia)*. Boll. Soc. Geol. It., **125**, 67-92.
- GIZZI F.T. (2009) - *The electronic trading site eBay as a useful tool for obtaining historical data on natural events*. Computers & Geosciences, **9**, 1950-1957.
- GIZZI, F.T. MASINI N. (2006) - *Historical damage pattern and differential seismic effects in a town with ground cavities: A case study from Southern Italy*. Eng. Geol. **88**, 41-58.
- GRÜNTAL G. (ED.) (1998) - *European Macroseismic Scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg.
- LAZZARI M. GERALDI E. LAPENNA A. LOPORTE A. (2006) - *Natural hazards vs human impact: an approach in geomorphological risk assessment on the Tursi historical site, Southern Italy*. Landslides, **3(4)**, 275-287.
- LENTINI F. CATALANO S. & CARBONE S. (1996) - *The external thrust system in Southern Italy: a target for petroleum exploration*. Petroleum Geosciences, **2**, 333-342.
- LOPERTE A. CRISTALLO F. LAPENNA V. BAVUSI M. PISCITELLI S. RIZZO E. (2004). *GPR and Electrical tomography survey to detect cavities in the urban area of Matera (Southern Italy)*. Progress in Electromagnetic Research Symposium, 28-31 March 2004, Pisa, Italy.
- MOCHALES T. CASAS A. M. PUEYO E. L. PUEYO O. ROMÁN M. T. POCOVÍ A. SORIANO M. A. ANSÓN D. (2008). *Detection of underground cavities by combining gravity, magnetic and ground penetrating radar surveys: a case study from the Zaragoza area, NE Spain*. Env. Geol., **53**, 1067-1077.
- MOREY, R.M. (1974) - *Continuous subsurface profiling by impulse radar*. In : *Proceedings of Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*, Am. Soc. Of Civil Engineers, Henniker, NH, 213-232.
- MOSTARDINI F. MERLINI S. (1986) - *Appennino centro-meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 177-202.
- PATACCA E. SCANDONE P. (1989) - *Post-Tortonian mountain building in the Apennines. The role of the passive sinking of a relic lithospheric slab*. The lithosphere in Italy.

- Advances in Earth Science Research. Proc. It. Nat. Comm. Int. Lith. Progr. Mid-term Conf. (Rome, 5-6 May 1987), Accademia Nazionale dei Lincei, **80**, 157-176.
- PESCATORE T. RENDA P. SCHIATTARELLA M. TRAMUTOLI M. (1999) - *Stratigraphic and structural relationship between Meso-Cenozoic Lagonegro basin and coeval carbonate platforms in southern Apennines, Italy*, Tectonophysics, **315**, 269-286.
- PISCITELLI S. RIZZO E. CRISTALLO F. LAPENNA V. CROCCO L. PERSICO R. SOLDVIERI F. (2007) - *GPR and microwave tomography for detecting shallow cavities in the historical area of "Sassi of Matera" (southern Italy)*. Near Surface Geophysics, **5**, 275-284.
- SANDMEIER K.J. (2001) - Program for Processing and Interpretation of Reflection and Transmission data, Karlsruhe, Germany.
- SCANDONE P. PATACCA E. MELETTI C. BELLATALLA M. PERILLI N. SANTINI, U. (1992) - *Struttura geologica, evoluzione cinematica e schema sismotettonico della penisola italiana*, in Atti del Convegno Annuale del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (Pisa, 25-27 giugno 1990) , 119-135.
- SCHIATTARELLA M. BENEDEUCE P. DI LEO P. GIANO S.I. GIANNANDREA P. & PRINCIPE C. (2005). *Assetto strutturale ed evoluzione morfotettonica quaternaria del vulcano del Monte Vulture (Appennino lucano)*. Boll. Soc. Geol. It., **124**, 543-562.
- ULRIKSEN P. (1982) - Application of impulse Radar to Civil Engineering. Doctoral Thesis, Lund university of Technology, Dept. of Eng. Geol., Sweden. Coden: Lutvdg/(TVTTG-1001)/1-175, 1982.
- ULUGERGERLI E.U & AKÇA I. (2006) - *Detection of cavities in gypsum*. The Journal of the Balkan Geophysical Society, **9(1)**, 8-19.
- WADHWA R.S. GHOSH N. CHANDRASEKHAR V. & RAJIB K.SINHARAY (2008) - *Delineation of cavities in a canal by geophysical survey in Navargaon project area, Maharashtra*. Journal of Indian Geophysical Union, **12(1)**, 55-62.

ANTHROPOGENIC SINKHOLES: SIMULAZIONE ATTRAVERSO MODELLAZIONE NUMERICA DELLO SPROFONDAMENTO PRODOTTO IN SUPERFICIE DAL COLLASSO DI UNA CAVITA': IL CASO DELLA GROTTA DI COCCEIO (CAMPI FLEGREI, NAPOLI)

di Guarino P.M.¹ & Minutolo V.²

ABSTRACT

The Grotta di Cocceio is a 960 meters long gallery that was built between 36 and 38 b. C. by L. Cocceio Aucto; it connected Averno lake to the ancient harbour (now filled) of Cumae.

Along gallery's course, there are three cartridge chambers, due to wartime weapons's explosion, happened during the second world war: the largest one is named "main cartridge chamber".

The main cartridge chamber is entirely excavated in tuff deposits belonging to Archiaverno Yellow Tuff formation (12 ky b.p.), and is subjected to mass and block rock falls from the roof.

At the top of the tuff formation, there is a loose pyroclastic deposit constituted by the products of Fondi di Baia (8.4 ky b.p.), Baia (5 ky b.p.) and Averno (3.7 ky b.p.) eruptions.

In the study area, the thickness of pyroclastics surmounting the tuff is about 12 meters, as it emerged from the results of a core drilled close the gallery's axis.

These conditions produce a very high risk state, due to the possible sinking of terrain and rock diaphragm that divides the cave from topographical surface.

The prediction of cavity roof stability is obtained by numerical calculation used in order to evaluate the expected shape of the area above cavity roof expected to be involved in collapse. The Finite Element Method has been employed for discretize the soil mass as an elastic plastic continuum where elastic properties have been considered by analogous material data and plastic behaviour has been derived by literature. The proposed calculation, together with actual stress and strain in the soil, are able to detect the shape and the amplitude of the area subjected to possible collapse.

1. INTRODUZIONE

Costruita dall'architetto L. Cocceio Aucto tra il 38 e il 36 a.C. in esecuzione del progetto di Agrippa di collegare il lago d'Averno (sede del nuovo *portus Julius*) con Cuma e il suo porto, la Grotta di Cocceio, completamente scavata nel tufo, presenta un andamento pressoché rettilineo, con una lunghezza di 960 m circa e una altezza compresa tra 4 e 10 m.

1 ISPRA – Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia

2 Department of Civil Engineering, S.U.N., Italy



Fig. 1 - Ortofoto del settore occidentale dei Campi Flegrei. La linea continua indica lo sviluppo della Grotta di Cocceio.

Il piano di calpestio si sviluppa in leggera pendenza, dal momento che i due imbocchi, posti, l'uno in prossimità del lago di Averno e l'altro sul versante occidentale dell'edificio vulcanico dell'Averno, sono ubicati a quota diversa, rispettivamente: 2 e 41 m s.l.m.

La galleria è provvista di un impianto di illuminazione ed areazione costituito da 5 lucernai a sviluppo verticale, un pozzo-luce laterale alla grotta e due rampe oblique che dovrebbero convergere in un ulteriore pozzo luce, allo stato attuale interrato.

Lungo lo sviluppo della galleria, sono presenti tre "camere di scoppio", connesse alla esplosione di ordigni bellici avvenuta nel corso della seconda guerra mondiale, di cui la più ampia, denominata "cavità di scoppio principale" è ubicata tra le progressive 525 e 578 a partire dall'ingresso lato Cuma.

Negli ultimi anni sono peggiorate le condizioni di stabilità relative ad alcuni lucernai ed alla volta della cavità di scoppio principale, quest'ultima soggetta al distacco di blocchi e massi. In superficie, in corrispondenza del percorso della galleria, oggetto negli ultimi anni di interventi di recupero e valorizzazione da parte della Soprintendenza Archeologica, sono presenti masserie e ville. Tale situazione determina condizioni di rischio elevato, connesse al possibile crollo del diaframma di terreno e roccia che separa la cavità dal piano campagna.

Lo studio è stato finalizzato alla valutazione della stabilità del complesso cavità-sottosuolo-edifici ed alla definizione dell'area che potrebbe essere interessata dallo sprofondamento in superficie nell'ipotesi di crollo della volta della cavità o di parte di essa.

L'area di studio ricade nel settore occidentale della caldera dei Campi Flegrei (fig. 1).

La caldera dei Campi Flegrei è una struttura complessa (ORSI *et al.*, 1996) composta dalla caldera dell'Ignimbrite Campana (37 ky) e dalla caldera del Tufo Giallo Napoletano (12 ky), entrambe legate a imponenti fenomeni di collassamento successivi alle due principali eruzioni alto-pleistoceniche che hanno caratterizzato l'attività vulcanica flegrea.

Dopo la formazione di ciascuna caldera, l'attività vulcanica è migrata all'interno dell'area collassata, dando a luogo a eventi eruttivi di minore magnitudo.

L'attività vulcanica successiva alla eruzione del Tufo Giallo Napoletano viene suddivisa da Di VITO *et al.*, (1999) in tre epoche di attività (12 – 9.5, 8.6 – 8.2, 4.8 – 3.8 ky) separate da due lunghi intervalli di quiescenza in cui si sono sviluppati due paleosuoli (paleosuolo A e B *Auct.*) che costituiscono importanti *marker* stratigrafici in tutto l'areale flegreo.

Attualmente il sistema è ancora attivo, come testimoniano l'eruzione del 1538 e conseguente formazione di M. Nuovo, l'attività bradisismica e fumarolica.

L'assetto geologico e stratigrafico dell'edificio vulcanico dell'Averno è dato, pertanto, da una struttura più antica, Archiaverno *Auct.* (12 ky b.p.), sulla quale poggiano i depositi appartenenti al ciclo successivo. All'affioramento prevalgono i prodotti relativi alla eruzione più recente (Averno 2 in Di VITO *et al.*, 1999) verificatasi circa 3.700 anni orsono, il cui *vent* eruttivo è localizzato proprio in corrispondenza dell'omonimo lago.

3. L'ASSETTO GEOLOGICO DELLA GROTTA DI COCCEIO E LA CAVITÀ DI SCOPPIO PRINCIPALE

La Grotta di Cocceio è stata scavata nei terreni tufacei della formazione del Tufo Giallo dell'Archiaverno e mantiene una orientazione media dell'asse di circa N50°W.

A tetto della formazione tufacea è presente una successione di depositi piroclastici incoerenti relativi alle eruzioni dei vulcani di Fondi di Baia (8.4 ky b.p.), Baia (5 ky b.p.) e Averno (3.7 ky b.p.).

Nell'area di studio, lo spessore delle piroclastiti a tetto del tufo è di circa 12 m, come risulta da un sondaggio realizzato in prossimità dell'asse della galleria (fig. 2).

La Cavità di scoppio principale presenta forma in pianta subellittica: lunghezza 52 m, larghezza media 15 m e altezza massima 39 m (fig. 3).

Molto irregolare e articolata risulta la geometria della calotta, nella quale, al centro della volta, si sviluppa una sorta di stretto "camino" verticale a sezione sub circolare (fig. 4).

Le pareti della cavità sono costituite da tufo ricco in pomici, in cui una intensa fratturazione connessa all'esplosione degli ordigni si sovrappone alla fratturazione naturale data da un sistema principale orientato circa N55°E con orientazione all'incirca subortogonale all'asse della galleria, e due sistemi secondari, orientati circa N10°E e N35°E.

I sistemi di fratturazione sono nel complesso subverticali, ad eccezione di quello orientato N35°E che immerge verso SE con una inclinazione di circa 30° sull'orizzontale.

Lungo lo sviluppo della galleria e in corrispondenza della cavità non sono state riscontrate deformazioni nell'ammasso tufaceo e nei piedritti; sono state invece osservati, sul fondo della cavità, in corrispondenza del camino di scoppio, massi e blocchi delle dimensioni fino al metro cubo, crollati dalla volta e la presenza di un gocciolamento di acque provenienti dalla parte più alta della volta, legato probabilmente alla naturale infiltrazione delle acque meteoriche, favorita dallo spessore ridotto del materiale di copertura.

4. LA MODELLAZIONE NUMERICA: METODOLOGIE E RISULTATI

L'influenza della presenza della cavità di scoppio sullo stato di equilibrio del sottosuolo è stata valutata effettuando una analisi della evoluzione del sottosuolo in presenza di cavità, utilizzando una procedura ad Elementi Finiti, F.E.M., facendo uso del software Ansys®.

Per tale scopo è stato necessario adoperare formulazioni che tengano in conto il comportamento non lineare dei materiali presenti. La descrizione del comportamento del mate-

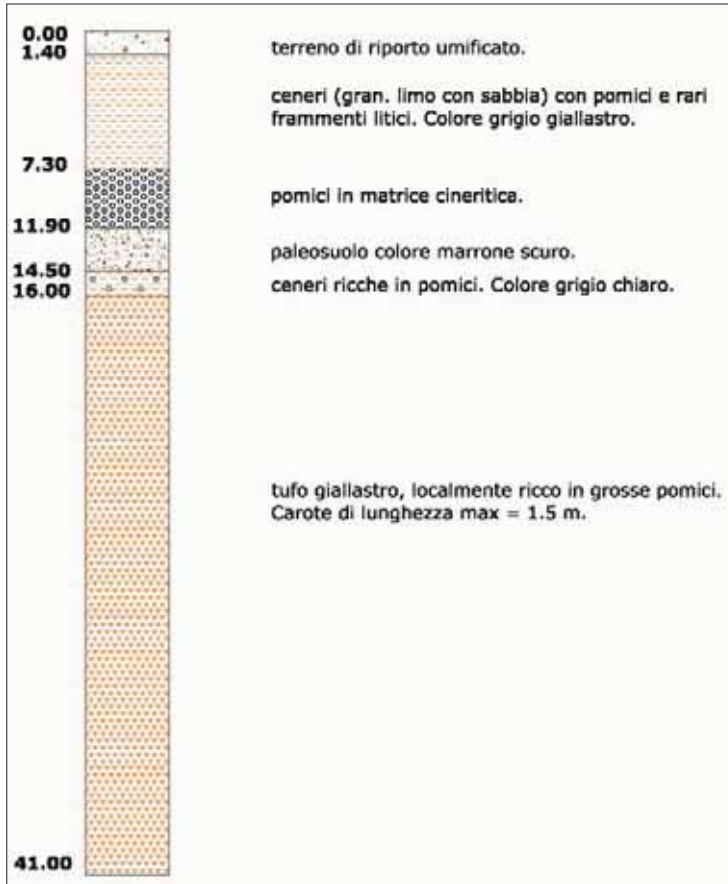


Fig. 2 - Stratigrafia del sondaggio SB realizzato in prossimità dell'asse della camera di scoppio principale.



Fig. 3 - Sezione della cavità di scoppio principale.



Fig. 4 - Ingresso e volta della camera di scoppio principale.

riale terreno in situazioni di scavo e in presenza di cavità sotterranee deve tenere conto di non linearità costitutive, che impongono una strategia di analisi incrementale.

Le difficoltà di un tale tipo di analisi consistono nella notevole dimensione della *mesh* di elementi, con la conseguente crescita del tempo di calcolo e dell'accuratezza dei risultati, e nella possibile nascita di fenomeni di concentrazione di sforzo che provocano la perdita della stabilità della soluzione [DESRUES, 1999; RYZHAK, 1994; SLUYS & ESTRIN, 2000].

Un ulteriore importante aspetto delle analisi consiste nella scelta della legge costitutiva in termini di legge di flusso plastico. E' noto che le analisi in ambito ultra-elastico impongono di definire oltre al dominio delle tensioni elastiche, la legge di incremento della deformazione permanente, la cui conoscenza è indispensabile per costruire gli algoritmi di ritorno al passo, necessari per effettuare il calcolo incrementale. Dalla natura della legge di flusso dipende, infatti, la stabilità costitutiva del materiale nel senso di Drucker [LUBLINER, 1998].

Nel presente studio si è scelto di assegnare ai materiali con i quali sono stati schematizzati gli strati di terreno, la stessa descrizione in termini di legge di Drucker-Prager, assumendo quali parametri di crisi la coesione c e l'angolo di attrito interno ϕ . In particolare si è considerata la presenza di due materiali: il primo, materiale sciolto del ricoprimento, classificabile dal punto di vista meccanico come sabbia limosa non coesiva e il secondo materiale del corpo del sottosuolo studiato: tufo, roccia tenera coesiva. I parametri dei materiali sono riportati in Tabella 1:

Tabella 1: parametri di resistenza

Materiale	ϕ [°]	ψ [°]	c [MPa]
Ricoprimento	30	0	0
Tufo	40	40	1.5

Il potenziale plastico, che governa la legge di flusso è stato scelto non associato, con angolo di flusso pari a $\psi = 0^\circ$ per lo strato piroclastico di ricoprimento, in quanto si è considerato un comportamento puramente slittante dell'incremento di deformazione permanente [MINUTOLO *et al.*, 2003]; per lo strato di tufo si è assunto un comportamento plastico associato, $\psi = \Phi$.

La rappresentazione del legame nel piano di Mohr è analoga a quella del criterio omonimo, dal quale differisce nella rappresentazione tridimensionale nello spazio delle tensioni principali, dove il dominio di Drucker-Prager è il cono a sezione circolare con l'asse coincidente con la retta idrostatica e ampiezza 2Φ la sezione del cono con il piano deviatorico è un cerchio di raggio pari alla coesione c . Il vertice del cono è sull'asse idrostatico ad una distanza dall'origine pari al valore della tensione idrostatica di crisi per trazione.

Nel caso di materiale associato, la velocità di deformazione permanente conseguente ad una tensione di crisi, il cui vettore rappresentativo abbia estremo sulla superficie del cono, risulta rappresentata da un vettore ortogonale alla superficie del cono; nel caso di materiali slittante, la velocità di deformazione risulta parallela all'asse delle tensioni tangenziali (fig. 5).

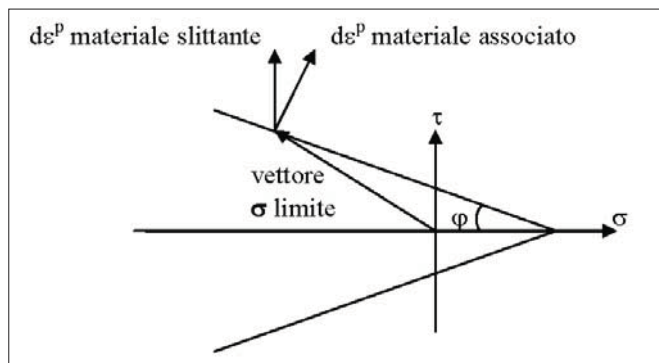


Fig. 5 - Rappresentazione nel piano di Mohr del legame costitutivo dei materiali.

Il legame deformazioni-tensioni derivante dalle scelte effettuate per entrambi i materiali in esame è stato introdotto nell'analisi numerica incrementale, attraverso la quale si è determinato lo stato tensionale litostatico in presenza della cavità e successivamente si è ricercata la forma ottima del volume di terreno collassabile a causa del cedimento del tetto della cavità.

La procedura di calcolo ha previsto l'assegnazione del peso proprio del terreno attraverso la densità dei materiali, assunta pari a $\gamma = 1500 \text{ kg/m}^3$ e di un'accelerazione in direzione verticale costante nel tempo pari all'accelerazione di gravità $acel = g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

5. Discretizzazione

Si è optato per una descrizione bidimensionale piana al fine di ridurre il numero dei parametri meccanici del modello e diminuire i tempi di calcolo. La planeità dello stato di deformazione si traduce nell'assumere trascurabile la componente di spostamento ortogonale al piano della sezione in esame, ipotesi che può essere accettata con buona approssimazione nel caso trattato se si considera che lo spessore di materiale in direzione ortogonale alla sezione è tendenzialmente infinito rispetto alle dimensioni del modello. Le deformazioni trasversali, di conseguenza, risultano principali e nulle, a differenza delle tensioni trasversali che risultano ancora principali, nel caso in esame di materiale isotropo, ma di valore non nullo. Le variabili di stato, deformazione e relative tensioni fuori piano sono in

ogni caso, comunque, dipendenti dalle variabili in piano consentendo così uno studio puramente bidimensionale con notevole economia di mezzi e tempi di calcolo.

Gli elementi adoperati sono costituiti da quadrilateri con quattro nodi, l'interpolatore del campo di spostamento è, quindi un polinomio Lagrangiano lineare e il corrispondente interpolatore della deformazione è di ordine costante così come quello della tensione (ZIENKIEWICZ & TAYLOR, 1992). L'analisi citostatica, condotta in regime ultraelastico conferma il dato atteso che nell'intorno della cavità, sia in configurazione precedente allo scoppio, sia in quella successiva si presenta un incremento dello sforzo pari circa a due volte lo sforzo alla quota del foro in un ammasso privo di cavità in accordo con le soluzioni dell'elasticità classica che prevedono, nell'intorno di un'inclusione circolare in un semipiano elastico uno sforzo triplo dello sforzo medio (MINUTOLO *et al.*, 2004).

L'analisi della stabilità del tetto della cavità per la previsione dell'ampiezza dell'area interessata dal collasso è stata affrontata considerando la formazione di un camino inizialmente di forma cilindrica. La configurazione cilindrica del camino è risultata instabile in quanto numerosi elementi del primo strato superficiale di terreno sono interessati dalla nascita di un meccanismo. Si è proceduto a definire una successione di passi di analisi nei quali si sono progressivamente eliminati gli elementi coinvolti nei meccanismi di collasso fino al raggiungimento di una configurazione di equilibrio nella quale nessun elemento è coinvolto in cinematismi. Si è assunto, quindi, che la configurazione raggiunta sia quella di equilibrio conseguente al crollo del tetto della cavità.

Nella figura 6 si riportano le deformazioni permanenti risultanti dall'analisi ultraelastica nella configurazione di equilibrio conseguente al crollo del tetto della cavità.

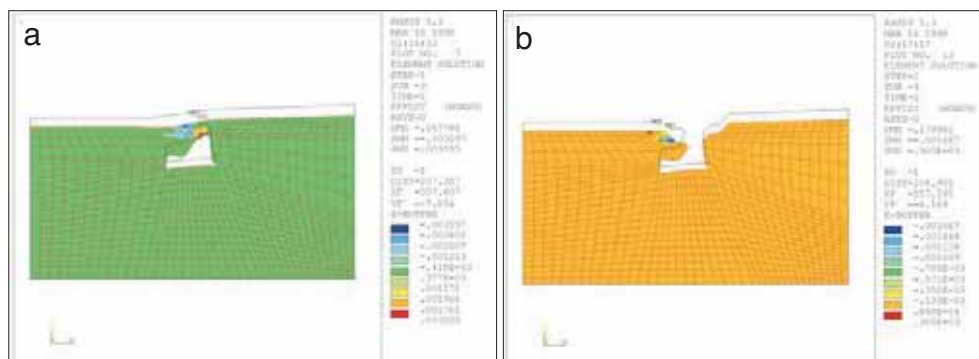


Fig. 6 - Deformazioni permanenti risultanti dalla analisi ultraelastica nelle configurazioni di equilibrio precedente [a] e seguente [b] al crollo del tetto della cavità.

6. CONCLUSIONI

Obiettivo della ricerca è stato lo studio della stabilità del complesso cavità-sottosuolo-edifici in un'area del territorio di Bacoli (NA), in corrispondenza della galleria di età romana, denominata Grotta di Cocceio, lungo la quale sono presenti alcune cavità dovute a crolli conseguenti ad esplosioni di ordigni bellici, verificatisi nel corso della 2a guerra mondiale. Lo studio della stabilità della volta della *camera di scoppio principale* è stato

affrontato attraverso una semplice applicazione di una procedura FEM incrementale, nella quale la stabilità della cavità è stata assunta con riferimento alla prima configurazione di equilibrio convergente conseguente all'eliminazione degli elementi finiti nei quali si è accumulata eccessiva deformazione permanente. Tale analisi costituisce una stima affidabile di prima approssimazione per la determinazione dell'area a rischio di crollo per il collasso del tetto della cavità.

L'estensione in superficie dell'area coinvolta nel crollo così stimata, corrisponde ad un'ellisse con diametro maggiore e minore pari a 76 e 48 m (fig. 7).

Nell'area circostante, esterna al crollo, si determinerebbe un sollevamento della superficie topografica per effetto della redistribuzione delle sollecitazioni dei materiali, compreso tra 5,4 mm in prossimità del margine del crollo e 2,3 mm ad una distanza di 25 m da esso (lungo la sezione longitudinale della cavità).

Il risultato dell'analisi potrà essere ulteriormente migliorato introducendo, in futuro, una metodologia di ricerca obiettivo basata sui principi dell'ottimizzazione strutturale (MINUTOLO & RUOCCO, 2005) in congiunzione con i metodi dell'analisi limite (GESUALDO, 2001a, 2001b).



Fig. 7 - Simulazione del crollo della volta della cavità attraverso l'applicazione di una procedura FEM incrementale: in evidenza l'area interessata dallo sprofondamento in superficie.

BIBLIOGRAFIA

- DESRUÉS J., CHAMBON R. (1999) - *Shear band analysis and shear moduli calibration*. Int. J. Solids Structures Vol. 39, pp. 3757-3776.
- DI VITO M., ISAIA R., ORSI G., SOUTHON J., D'ANTONIO M., DE VITA S., PAPPALARDO L. & PIOCHI M. (1999) - *Volcanism and deformation since 12,000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy)*. J. Volc. Geotherm. Res., **91**, 221-246.

- ESHLEY J.D. (1959) - *The Elastic Field Outside an Ellipsoidal Inclusion*. Proceedings of the Royal Society of London A 252, p 561
- GESUALDO A., NUNZIANTE L., MINUTOLO V. (2001A) - *Local Collapse in Soft Rock Bank Cavities*. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE), vol.127, n.12.
- GESUALDO A., NUNZIANTE L., MINUTOLO V. (2001B) - *Failure in Mohr Coulomb Soil Cavities*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 38, n.6.
- LUBLINER J. (1998) - *Plasticity Theory*. Mac Millan.
- MINUTOLO V., GESUALDO A., NUNZIANTE L. (2003) - *The collapse of blocks from the roof of cavities by non associative plasticity*. XVI Congresso AIMETA , Ferrara.
- MINUTOLO V., RUOCCO E., MIGLIORE M.R. (2004) - *Shape Sensitivity Analysis by Perturbation Method and BEM*. International Association for Boundary Element, IABEM Conference, Minneapolis, USA.
- MINUTOLO V., RUOCCO E. (2005) - *Boundary Element Modelling and Optimisation of Structures Made of Functionally Graded Materials*. VI Inter. Conference on Boundary Element Techniques, Montreal.
- ORSI G., DE VITA S. & DI VITO M. (1996) - *The restless resurgent Campi Flegrei Nested Caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration*. J. Volc. Geotherm. Res., **74**, 179-214.
- RYZHAK E.I. (1994) - *On stability of homogeneous elastic bodies under boundary-conditions weaker than displacement conditions*. Quart. J. Mech. Appl. Math. Vol. 47, pp. 663-672.
- SLUYS, L.J., ESTRIN, Y. (2000) - *The analysis of shear banding with a dislocation based gradient plasticity model*. Int. J. Solids Structures Vol. 37, pp. 7127-7142.
- ZIENKIEWICZ O., TAYLOR R. (1992) - *The Finite Element Method*. Mc Graw-Hill.

STUDI GEOLOGICI ED INDAGINI GEOGNOSTICHE PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO SINK-HOLES, PER IL PROGETTO DI RADDOPPIO DELLA LINEA FERROVIARIA ROMA-PESCARA (TRATTO LUNGHEZZA-GUIDONIA)

di Lanzini M.¹, Di Girolamo M.², Liperi L.³, Meloni F.³, Zizzari P.³, Menichelli R.⁴, Galdi M.⁵

ABSTRACT

In this note we describe the methods of geological study performed under the project doubling the current railway line Rome-Pescara (Commissioned by RFI SpA), the stretch of about 10 km from the zone of Lunghezza and area of Guidonia characterized by the presence of risk-Sink-hole.

For design studies, of the railway route in the Basin Water Albule was critical in the provision of geological research and investigation geognostic that have developed between the years 2003-2006 and that have investigated aspects of tectonic, geological, hydrogeological, geomorphological and seismic area under examination, carried out in compliance with D.G.R. No. 1159/2002 of August of the Lazio Region in reference to the risk sink-holes.

During these studies were developed following topics:

- tectonic framework, geological-structural, morphological, geological and seismic sector affected by the project;
- Dynamic geomorphological or potential competitors;
- Characters Hydrogeological
- Analysis of morphological, geological and hydrogeological conditions along the axis of the project;
- Description and analysis of morphological and karst phenomena common in the waters Albule on recent and historical data;
- Interpretation of data gravimetric anomaly measured along the axis and Geoelectric in station areas;
- Location of critical areas and their type morphodynamics risk sink-holes along the rail and corresponding to the areas of new stations;
- Identifying the types of intervention and mitigation in critical areas.

1 geologo, Libero Professionista – VIA Ingegneria srl

2 VIA Ingegneria srl

3 Regione Lazio, Dip. Territorio, Dir. Ambiente e Coop. tra i popoli, Area Difesa del Suolo, lliperi@regione.lazio.it, fmeloni@regione.lazio.it, pzizzari@regione.lazio.it

4 Geopolis srl

5 RFI spa

1. PREMESSA

In questa nota si descrivono le metodologie di studio geologico effettuate nell'ambito del progetto di raddoppio della attuale linea ferroviaria Roma-Pescara (Committente RFI spa), nel tratto di circa 10 Km, compreso tra la zona di Lunghezza e la zona di Guidonia, caratterizzato dalla presenza del Rischio-Sink-hole.

Per gli studi di progettazione, del tracciato ferroviario ubicato nel Bacino delle Acque Albule, nel territorio dei comuni di Tivoli e Guidonia], è stato fondamentale l'apporto delle ricerche geologiche e delle indagini geognostiche che si sono sviluppate nel periodo compreso tra gli anni 2003-2006 e che hanno approfondito gli aspetti tettonici, geologici, idrogeologici, geomorfologici e sismici dell'area in esame, eseguiti in ottemperanza alla Delibera della Regione Lazio dell'Agosto 2002 n. 1159 in riferimento al Rischio sink-holes.

Nel corso di tali studi sono stati sviluppati i seguenti argomenti:

- Inquadramento tettonico, geologico-strutturale, morfologico, idrogeologico e sismico del settore interessato da progetto;
- Dinamiche geomorfologiche attuali o potenziali;
- Caratteri idrogeologici ;
- Analisi delle caratteristiche morfologiche, geologiche e idrogeologiche lungo l'asse di progetto;
- Descrizione ed analisi dei fenomeni morfologici e carsici diffusi nell'area delle Acque Albule, su dati recenti e storici;
- Interpretazione dei dati rappresentanti anomalie gravimetriche misurati lungo l'asse e delle indagini geoelettriche nelle aree di stazione;
- Localizzazione delle zone critiche e loro tipologia morfodinamica per il rischio sink-holes lungo l'asse ferroviario ed in corrispondenza delle aree delle nuove stazioni;
- Individuazione delle tipologie di intervento e mitigazione nelle zone critiche.

2. INQUADRAMENTO TETTONICO E IDRO-GEO-MORFOLOGICO

L'area delle Acque Albule è stata oggetto, nel passato, di numerosi studi che hanno interessato i vari aspetti geologici, geostrutturali, idrogeologici, geochimici, geotermici, ecc., tutti tesi a definire un modello geologico generale in grado di giustificare la presenza, così diffusa, di fenomeni di emissioni di acque mineralizzate e di gas, di fenomeni di sprofondamento (sink holes), di subsidenza e di fenomeni passati e recenti di travertinizzazione. Le prime osservazioni di carattere geologico che hanno interessato il territorio del Bacino delle Acque Albule furono effettuate sin dalla metà XIX sec. (PONZI, 1860; 1862) mentre il primo studio approfondito di tipo geologico e sedimentologico venne eseguito dal Maxia agli inizi degli anni '50. Successivamente negli ultimi dieci anni si sono susseguiti numerosi studi di carattere geologico, geostrutturale, sismico, idrogeologico, ecc. da parte di Enti Pubblici (Univ. La Sapienza, Univ. Roma III, INGV, Regione Lazio, ecc.) e di ricercatori e studiosi che hanno potuto anche utilizzare dati stratigrafici di sondaggi (Bono P., Capelli G., Caramanna G., De Rita D., Di Filippo M., Faccenna C., Funicello R., Mazza R., Parotto M., Toro B., Ventriglia U., ecc.).

In particolare si segnalano gli studi condotti nell'ambito del "Progetto Sink-hole" condotti tra il 1998 e il 2002 dal Dipartimento di Scienze Geologiche di Roma TRE in collaborazione e con finanziamento della Regione Lazio (Delib. C.R.L. n. 4662 del 31/8/1999). Ulteriori studi e ricerche sul rischio sink-holes sono reperibili negli Atti del Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle Amministrazioni Statali e Locali nel governo del territorio", organizzato dall'APAT (Roma, Maggio 2004).

L'area delle Acqua Albule è rappresentata da una estesa placca travertinoso parzialmente in affioramento, che si sviluppa a nord del Fiume Aniene, tra i Comuni di Guidonia e Tivoli; ivi sono noti, dall'antica Roma ad oggi, diffusi fenomeni di emissione di acque mineralizzate e di gas che vengono localmente a giorno in corrispondenza di una serie di "laghetti", come quelli delle Colonnelle, della Regina, ecc.. Questa realtà geologica così particolare, oltre agli interessanti aspetti naturalistici, costituisce nel contempo una risorsa ed infatti le acque sono incanalate ed utilizzate nelle Terme di Bagni di Tivoli, mentre i travertini sono coltivati con numerose cave a cielo aperto.

L'area in esame si estende, per una superficie di circa 40-45 Km², con una morfologia blandamente inclinata e con quote che variano da 80-85 metri, ai piedi dei Monti Cornicolani a nord, fino a circa 40-45 m, lungo l'asta del Fiume Aniene a sud; dal punto di vista morfologico l'unico e significativo elemento da segnalare sono le numerose cave di travertino a cielo aperto, che hanno localmente alterato e modificato la originaria morfologia. Il Bacino delle Acque Albule è delimitato geograficamente a nord e ad est dai rilievi carbonatici mesozoici rispettivamente dei Monti Cornicolani e dei Monti Tiburtini-Prenestini; a sud il limite è posto lungo il Fiume Aniene, mentre a ovest l'area è delimitata dai rilievi dolcemente collinari con affioramenti piroclastici e alluvionali pleistocenici.

2.1 Caratteri tettonico-strutturali

Il bacino delle Acque Albule è localizzato in corrispondenza del margine occidentale dell'Appennino Laziale-Abruzzese, in corrispondenza di una fascia strutturalmente complessa, che ha subito una serie di fasi tettoniche, sia compressive che distensive, che si sono sviluppate dal Miocene fino a tempi recenti.

In particolare si individuano tre fasi deformazionali di compressione dal Tortoniano al Pliocene inferiore ed una fase distensiva dal Pliocene medio al recente (MATTEI, 1986).

La fase distensiva si è esplicata lungo direttrici di svincolo (faglie) con assi NW-SE e N-S che hanno abbassato e disarticolato il basamento carbonatico mesozoico, attraverso la formazione di zone depresse e rilevate (horst e graben) di direzione appenninica e di forma allungata. Una di dette strutture rilevate è rappresentata dall'asse Monte Soratte-Monti Cornicolani che, in corrispondenza dell'area delle Acque Albule, prosegue più a sud, sepolto da sedimenti plio-pleistocenici e quaternari.

Questo sistema di faglie è stato attivo anche negli ultimi 600.000-700.000 anni con formazione di zone subsidenti e con geometrie di taglio trascorrente, tipo "pull-apart", che hanno determinato inizialmente la risalita di magmi e conseguenti attività vulcanica sabatina ed albana e, successivamente, circa 160.000 anni fa, la risalita di acque mineralizzate con formazione della estesa placca travertinoso delle Acque Albule (Fig. 1).

2.2 Caratteri geologici e stratigrafici dei travertini

Nell'area delle Acque Albule si individua la seguente serie stratigrafica, dall'alto verso il basso (Fig. 2).

- 1 Alluvioni oloceniche della valle dell'Aniene e dei suoi affluenti
- 2 Travertini
- 3 Depositi marini plio-pleistocenici
- 4 Substrato carbonatico mesozoico

In questo paragrafo si descrivono i caratteri dell'unità travertinoso, con riferimento alle problematiche di rischio sink-holes.

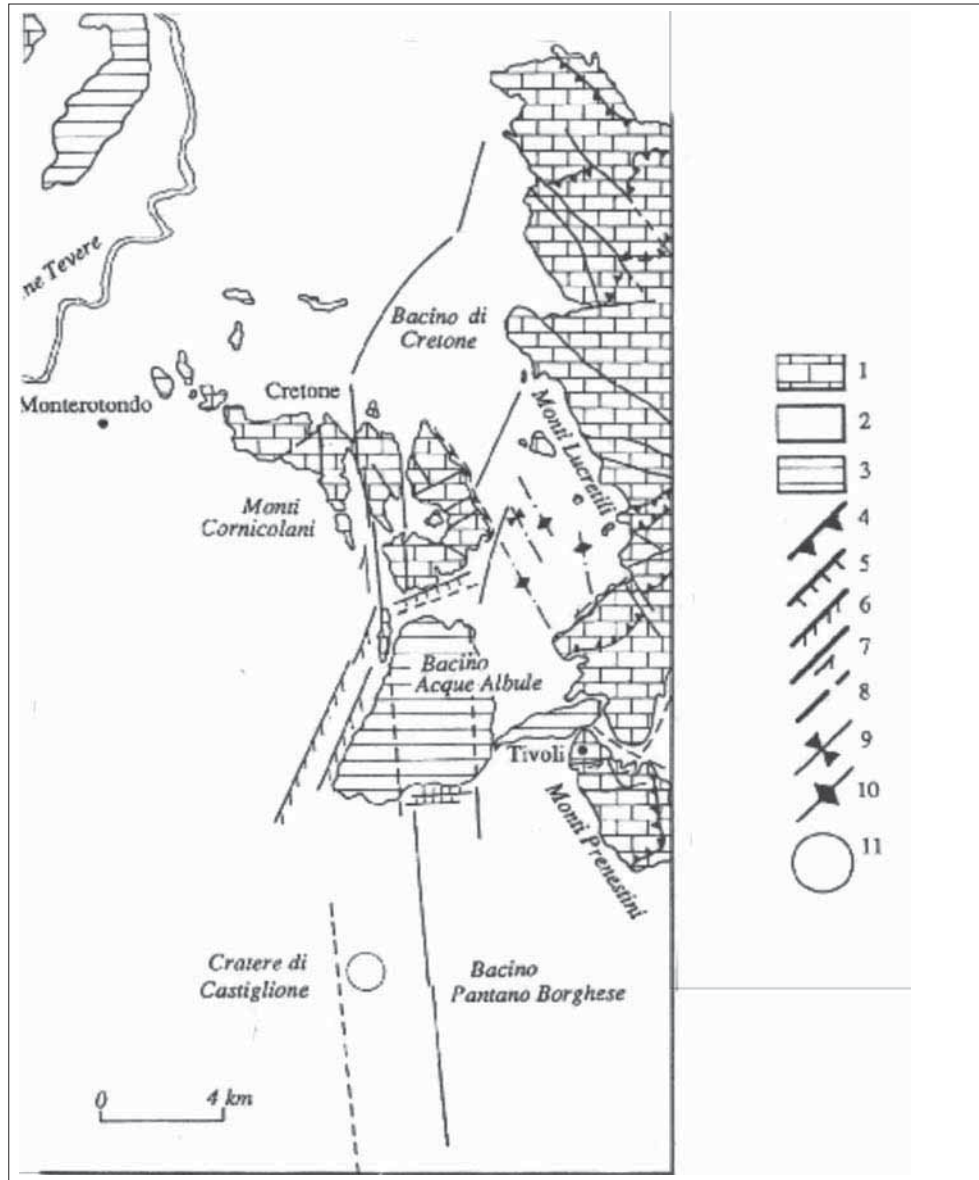


Fig. 1 - Schema neo-tettonico semplificato dell'area delle Acque Albule. Legenda: 1) serie calcareo-silico-clastiche-marnose "sabine" (Triassico superiore-Miocene); 2) depositi sedimentari "neo-autoc-toni" (Pliocene-Pleistocene) e depositi vulcanici (Pleistocene); 3) depositi travertinosi (Quaternario); 4) sovrascorrimenti; 5) faglie normali; 6) faglie oblique; 7) faglie trascorrenti; 8) faglie; 9) assi di sinclinali plioceniche; 10) assi di anticlinali pleistoceniche; 11) centro vulcanico (Funciello, 1995)

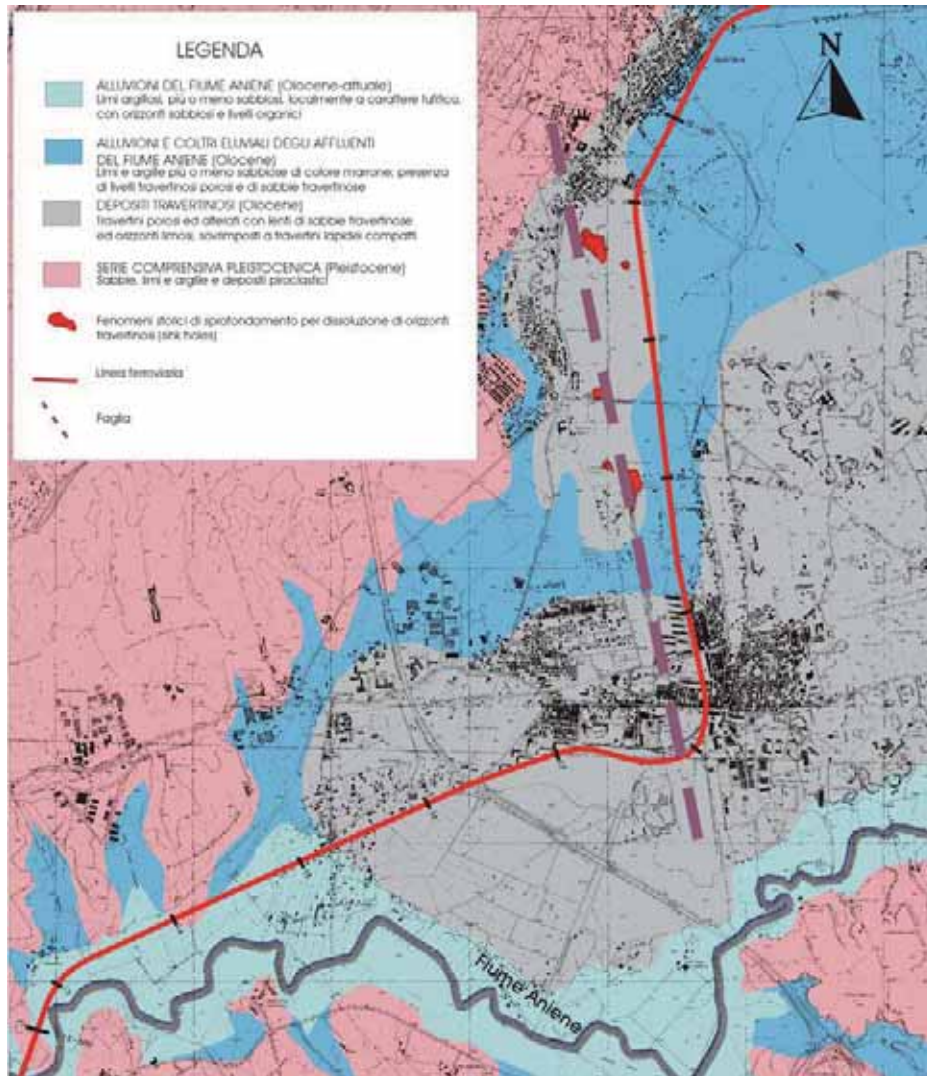


Fig. 2 - Schema geologico dell'area delle Acque Albule e asse ferroviario di progetto

La placca travertinosa, ricostruita sulla base di sondaggi geognostici, ha una forma allungata nord-sud, lunga circa 9 Km e larga circa 7 Km; lo spessore massimo del corpo travertinoso lungo l'asse N-S è di circa 80-90 metri, con spessori che diminuiscono velocemente verso ovest e più lentamente verso est. La quota del letto posto a circa -20/-30 m slm.

La Figura 2 mostra la forma e le isopache del corpo travertinoso (Faccenna, 1994); in tale figura si mostra inoltre l'andamento delle isoterme della falda e le sorgenti principali. Durante la fase di deposizione dei travertini, ai bordi di questi è proseguita la sedimentazione pleistocenica e olocenica con depositi argillosi e sabbiosi, localmente con strati di sabbie travertinose erose risedimentate ed a volte interdigerati con i travertini stessi. I travertini sono costituiti da due unità litologiche principali, delle quali la superiore è costituita da travertini porosi, vacuolari ed alterati, mentre la bancata inferiore è costituita da travertini lapidei, che sono diffusamente coltivati nelle numerose cave aperte nell'area. I carotaggi hanno permesso la suddivisione delle due facies dei travertini: della bancata superiore e di quella sottostante.

Travertini porosi, alterati, con orizzonti di sabbie travertinose (testina)

La bancata superiore, a volte affiorante, è costituita da travertini bianco-giallastri, con una notevole porosità e struttura vacuolare, che si presentano più o meno fratturati ed alterati, e prende il nome locale di "testina"; tale litotipo è inoltre caratterizzato da frequenti orizzonti di sabbie travertinose sciolte e, soprattutto ai bordi della placca al passaggio verso i depositi alluvionali, da orizzonti alluvionali limo-argillosi che interrompono la continuità dei depositi travertinosi stessi.

Mentre i travertini lapidei e bianchi sottostanti sono quelli tipici di cava, questi travertini superiori sono scartati dai cavaatori.

Lo spessore di questi depositi travertinosi varia da un minimo di 7-9 m fino a più di 20 metri ed è sempre sovrapposto ai travertini bianchi, lapidei e compatti.

Travertini compatti, biancastri

La bancata inferiore, caratterizzato da una maggiore densità e compattezza, e da una colorazione biancastra, presenta un aspetto spiccatamente lapideo, con variabile fratturazione. Questi travertini, che sono diffusamente coltivati nelle cave, sono stati intercettati a profondità variabili da 7 a 25 metri dal piano campagna.

Nel corso dei sondaggi eseguiti nelle varie fasi di indagine all'interno dei depositi travertinosi porosi ed alterati della bancata superiore, sono stati intercettati dei vuoti in 10 sondaggi ed a quote variabili da 2 a 8 m dal piano campagna.

Tali vuoti sono usuali in questi depositi travertinosi e sono dovuti a fenomeni di dissoluzione dei carbonati, da parte di acque circolanti; a fronte di questi vuoti si segnalano inoltre numerose zone fratturate, sovente riempite di sabbie travertinose.

2.3 Caratteri idrogeologici

L'area delle Acque Albule, configurandosi come un'area depressa percorsa dall'Aniene, ha i suoi caratteri idrogeologici principali condizionati e governati dai caratteri di piovosità e di permeabilità dei rilievi che la delimitano a nord ad est.

Nelle strutture carbonatiche fratturate e carsificate dei rilievi che circondano la piana delle Acque Albule, si individua una falda libera, alimentata dalle precipitazioni meteoriche;

le acque di tale falda permeando verso il basso, nelle fratture si mineralizzano e, al di sotto della piana delle Acque Albule, costituiscono una circolazione idrica imprigionata, taponata dai depositi impermeabili marini delle Argille di Monte Vaticano; tali ultimi depositi, al tetto e nelle zone bordiere ai rilievi, sono caratterizzati anche da sedimenti sabbiosi più grossolani.

Al di sopra di detta barriera idraulica è impostata una seconda falda, che costituisce l'acquifero dei travertini, con acque caratterizzate vari gradi di mineralizzazione e che, in determinati punti singolari, presenta diffusi fenomeni di emergenze di acque fortemente mineralizzate (Lago Delle Colonnelle e della Regina).

L'andamento delle isopieze della falda superiore è localmente modificato dalla presenza dei depositi travertinosi che sono invece caratterizzati da una elevata permeabilità per fratturazione e per dissoluzione; tali ultimi fenomeni determinano localmente la presenza e/o la formazione di vuoti carsici.

Date le emergenze sorgentizie con acque mineralizzate in superficie si deve ammettere una comunicazione fra i due Complessi Idrogeologici (quello profondo nei carbonati e quello libero nei travertini); tale comunicazione può avvenire anche in corrispondenza delle zone bordiere della piana delle Acque Albule, ove il bed-rock carbonatico è a quote superiori e le Argille di Monte Vaticano (acquiclude) hanno spessori minori.

I rapporti fra i vari Complessi idrogeologici sopra descritti sono rappresentati in genere in letteratura dalla seguente sezione schematica (non in scala) con direzione sud-nord (Fig. 3):

2.4 Sismicità

In base alla recente Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, i comuni di Guidonia e di Tivoli, attraverso i quali si sviluppa l'asse ferroviario in progetto, sono stati inclusi nella Zona Sismica 2.

L'area in studio è interessata da una sismicità "satellite", rispetto alla principale attività albana, con una sismicità di magnitudo non superiore a 3.3, corrispondente circa al IV grado della Scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS). Si segnala inoltre l'area sismogenetica di Palombara Sabina con eventi sismici massimi epicentrali di VIII grado MCS (terremoto del 24 Aprile 1901).

I risentimenti maggiori sono invece stati risentiti in occasione di forti terremoti dell'Appennino Centrale che, nell'area romana, possono raggiungere il VI-VII grado MCS.

Si segnala inoltre la recente individuazione di un centro sismogenetico con intensità massima di V-VI MCS, localizzato nel settore occidentale del Bacino delle Acque Albule, lungo le direttrici di faglia nord-sud già descritte; gli ultimi eventi sismici, avvenuti nel 2001 sono caratterizzati da profondità ipocentrali modeste, comprese fra 300 e 800 m (Gasparini, 2001).

3. FENOMENI MORFODINAMICI CARSICI NELL'AREA DELLE ACQUE ALBULE

Data la finalità di questa nota si descrivono qui di seguito i principali elementi morfologici e le dinamiche deposizionali dei travertini.

Il travertino è una roccia carbonatica di sedimentazione chimica che si forma per precipitazione di carbonato di calcio (CaCO_3) proveniente da acque calde ricche o soprassature di bicarbonato di calcio [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$], solubile nell'acqua.

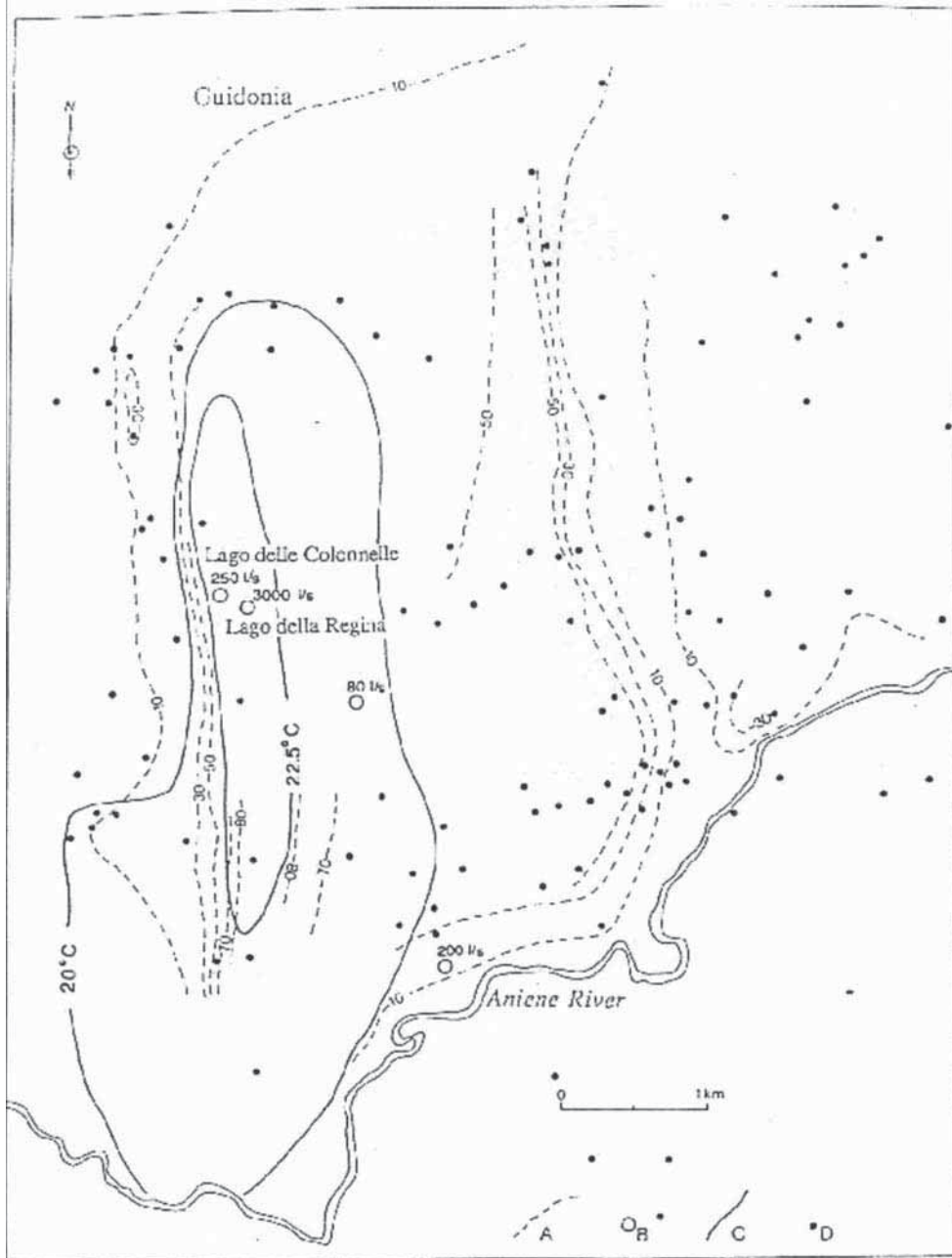


Fig. 3 - Mappa delle isopache dei depositi travertinosi. Legenda: A) contorno dei depositi travertinosi; B) sorgenti principali (> 80 l/sec); C) isoterme della falda; D) sondaggi (Faccenna, 1994)

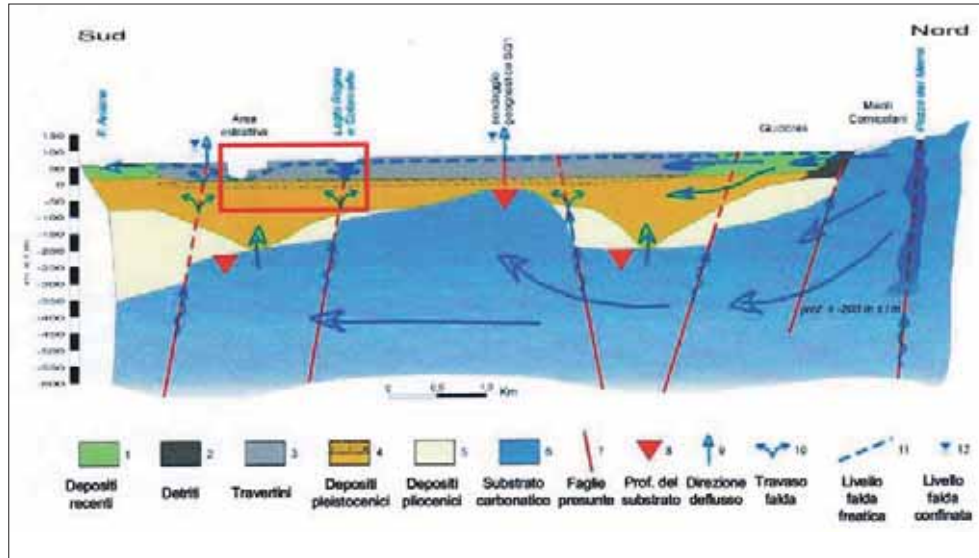


Fig. 4 - Profilo geologico schematico nord-sud con rappresentazione della circolazione idrica profonda

Queste acque juvenili sono di provenienza “profonda” nel senso che, per acquisire tali caratteristiche geochemiche, debbono aver attraversato, durante il loro cammino in profondità, masse calcaree e debbono essere state sottoposte a forti condizioni di pressione e temperatura che hanno permesso loro di sciogliere il carbonato di calcio della roccia e di arricchirsene.

Le zone di risalita delle acque mineralizzate possono invece avvenire attraverso faglie o in corrispondenza di zone nelle quali le masse carbonatiche raggiungono quote prossime alla superficie, aiutata anche dalle pressioni dei gas solforosi che le accompagnano (in questa sede non si discutono i reali percorsi di risalita, sui quali ancora si dibatte, dato che, in base ai dati di letteratura, i fluidi dovrebbero attraversare una barriera costituita da alcune centinaia di metri di argille plioceniche).

Le acque, una volta raggiunta la superficie, cominciano a defluire verso i punti più bassi del bacino ed a formare laghetti; inoltre, per effetto diminuzione della pressione e della temperatura, a seguito di miscele con acque fredde della falda superficiale, si determinano le condizioni chimico-fisiche che favoriscono la precipitazione e quindi la successiva sedimentazione del carbonato di calcio sotto forma di una specie di fango calcareo, che nel tempo avrebbe formato la placca travertinosa di Tivoli-Guidonia.

Durante la sedimentazione del carbonato di calcio si possono essere verificati anche fenomeni erosivi e deposizionali di materiale terrigeno (alluvioni) con il risultato di costituire strati di carbonato di calcio misto a particelle terrose e zone con sabbie concrezionate (travertini porosi); oppure le alluvioni del Fiume Aniene a loro volta possono aver dato luogo alla sedimentazione di orizzonti limo-argillosi con la temporanea interruzione della deposizione carbonatica (falda cenere).

Il travertino come appare lungo le pareti di cava assume aspetti e colorazioni alquanto diversificati: infatti sono presenti zone con roccia compatta e molto resistente, zone con

presenza di fratture riempite o meno di argilla, soprattutto nelle zone più superficiali, zone con sabbie travertinizzate e/o di travertino poroso di colore brunoastro (apporti di materiale sedimentario terrigeno); inoltre si individua la presenza di piccoli pori beanti di dimensioni millimetriche e centimetriche che attraversano sovente l'intera massa travertinosa e anche di cavità carsiche di dimensioni maggiori.

Questo ultimo aspetto è dovuto ai gas solforosi che risalgono in superficie a forma di bolle allorché superavano lo strato di fango calcareo, dando origine così alla tipica struttura vacuolare del travertino. Pori e vacuoli erano però anche causati dal fatto che l'area del bacino delle Acque Albule era ricchissima di vegetazione, la quale veniva imprigionata e incrostata dalla continua sedimentazione del carbonato di calcio; successivamente alla decomposizione di questi vegetali restavano i vuoti da loro lasciati.

Dal punto di vista geologico il travertino si presenta caratterizzato da due unità litostratigrafiche ben distinguibili dal punto di vista sedimentologico: la prima definibile come "travertino antico" mentre la seconda è definita "travertino recente". Il travertino antico, più profondo, si presenta in bancate decametriche sub orizzontali, ed è generalmente compatto, decisamente lapideo, anche se non mancano settori fratturati e carsificati con colori che vanno dal bianco latte sino al giallo ocra e marroncino. Il travertino recente, sovrapposto al "travertino antico" e denominato localmente "testina" o "cappellaccio", è costituito da un sabbione calcareo incoerente o poco coerente, superficiale e di spessore variabile ma generalmente crescente da nord verso sud ove può in taluni casi superare i 10-15 m di spessore.

Un altro aspetto fisico del travertino è dovuto alla presenza di fratture che attraversano l'ammasso, legate quest'ultime alle sollecitazioni tettoniche recenti, ed alla presenza di vuoti di forma molto variabile dovuta a fenomeni di successiva carsificazione e dissoluzione dei carbonati.

Durante l'indagine geognostica si sono incontrate alcune cavità di potenza variabile da decimetrica a metrica, soprattutto all'interno dei travertini porosi superficiali.

Da quanto esposto emerge che il travertino, soprattutto quello spiccatamente lapideo, è caratterizzato da un assetto massivo (praticamente impermeabile), ma con una presenza di fratture e cavità carsiche beanti che determinano una generale elevata permeabilità per fratturazione e permettono la presenza di una circolazione idrica all'interno del corpo travertinoso.

La circolazione idrica all'interno della placca travertinosa è pertanto estremamente complessa e variabile, in quanto questa avviene entro fratture, cavità carsiche ed è localmente tamponata dalla presenza di livelli argillosi delle "falde cenere".

Il chimismo è nel contempo variabile in quanto gli apporti mineralizzati provenienti dalla base e trasversalmente si miscelano con acque dolci di origine piovana provenienti dalla superficie; la permeabilità per fratturazione, determina inoltre gradi di miscelazione molto variabili sia in senso laterale che verticale.

A tale proposito si cita il fatto che le acque del Lago di S. Giovanni, localizzato a breve distanza dai laghi Colonnelle e La Regina caratterizzati da acque molto mineralizzate, è costituito da acque quasi dolci. Inoltre si segnala nel settore meridionale del bacino delle Acque Albule un pozzo presso il Km 25 della Via Tiburtina che ha attraversato soltanto travertini ed ha intercettato acqua potabile, dolce, leggermente gassata (Ventriglia, 1990).

La circolazione idrica e la variabilità sia verticale che areale della mineralizzazione delle acque è ulteriormente complicata dall'abbattimento locale della falda che avviene nelle

aree di estrazione del travertino: in tali casi il pompaggio delle acque determina gradienti artificiali che modificano i fenomeni di miscelazione fra falde minerali e di apporto meteorico. In effetti lungo le pareti e sul fondo delle cave sono riscontrabili venute d'acqua diffuse da zone travertinose porose, da fratture e con una certa diversificazione del chimismo. La variabilità del chimismo delle acque di falda dell'acquifero dei travertini presenta inoltre una variabilità temporale.

I fenomeni sopra descritti hanno determinato nell'area delle Acque Albule la presenza di sorgenti di acque mineralizzate, canali di smaltimento, laghetti di raccolta in zone depresse, zone di sprofondamento di cavità carsiche e aree di subsidenza, inghiottitoi, ecc. Tali fenomeni e morfologie non sono attualmente quasi più visibili, data l'intensa urbanizzazione di tutta l'area.

Tipologie dei fenomeni carsici di superficie

Sulla base dei vari fenomeni legati al carsismo precedentemente descritti che si sono storicamente verificati nell'area delle Acque Albule, si sono individuate delle tipologie di tali fenomeni con particolare riferimento alle problematiche progettuali di raddoppio della linea ferroviaria in esame.

Queste problematiche fanno specifico riferimento alle varie fenomenologie che possono portare a fenomeni di sprofondamento e/o subsidenza che possono inficiare la stabilità della linea ferroviaria.

La Figura seguente (Fig. 5) mostra schematicamente queste tipologie:

Il dissesto tipo 1 è legato alla presenza di un vuoto che nel tempo, sia naturalmente che per effetto di incrementi di carichi, può collassare improvvisamente; questa tipologia di dissesto prefigura che la roccia incassante sia costituita da roccia travertinosa con caratteri lapidei-semilapidei.

I dissesti tipo 2, 3 sono invece legati sia a cavità antiche già collassate e/o con comunicazione con la superficie, più o meno riempite di detriti e/o attualmente obliterate da riporti; queste tipologie di dissesto, che coinvolgono prevalentemente zone con travertini semilapidei, sono caratterizzate da lenta fluidificazione dei terreni di superficie all'interno delle cavità stesse, favorite localmente dalle escursioni della falda; questi tipi di dissesto possono determinare lente subsidenze che possono evolvere anche con collassi improvvisi.

Il dissesto tipo 4 invece non è direttamente legato a fenomeni carsici attivi, ma alla subsidenza di depositi lacustri compressibili che hanno riempito antichi laghetti e/o zone con polle d'acqua e/o fossi ormai colmati; in questo caso le problematiche sono di carattere essenzialmente geotecnico.

Il dissesto tipo 5 è invece legato a cavità preesistenti e/o a fenomeni di dissoluzione in atto all'interno di strati di sabbie travertinose e/o travertini teneri porosi, alternati ad alluvioni; si fa riferimento in particolare alle zone bordiere della placca di passaggio eteropico ai depositi alluvionali; questi tipi di dissesto possono determinare prevalentemente lente subsidenze che possono evolvere anche con collassi improvvisi.

4. METODOLOGIA DI STUDIO

Gli studi di prima fase sono stati preceduti da una ricerca su cartografia storica (Tavole IGM, MAXIA, 1950, ecc) della evoluzione morfologica ed urbanistica dell'area; in contemporanea si sono programmate indagini geognostiche lungo l'asse consistenti in:

CONFIGURAZIONI STRATIGRAFICHE E MECCANISMI DI SPROFONDAMENTO



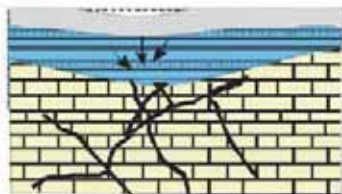
- 1 Travertino fratturato, affiorante e/o subaffiorante, con cavità carsiche
 Tipo di dissesto: crollo improvviso della calotta per superamento della resistenza al taglio della roccia incassante (Colapse Sinkhole)



- 2 Travertino fratturato, affiorante e/o subaffiorante, con cavità comunicante sulla sommità e parzialmente riempito di detriti (antico crollo)
 Tipo di dissesto: crollo improvviso (Colapse Sinkhole) e/o lenta subsidenza



- 3 Fenomeni di risalita di acque mineralizzate e/o escursioni della falda che dissolvono sabbie travertinose e/o terreni di riempimento di cavità, provocando vuoti che migrano via via verso la superficie
 Tipo di dissesto: crollo improvviso e/o lente subsidenze (Piping Sinkhole)



- 4 Depositi lacustri depositati in antiche aree depresse e/o laghetti e/o fossi, ormai colmati
 Tipo di dissesto: fenomeni di subsidenza per consolidazione e/o incrementi di carico sui terreni compressibili (Settlement)



- 5 Fenomeni di risalita di acque mineralizzate e escursioni della falda che dissolvono sabbie travertinose nell'ambito di depositi alluvionali, provocando vuoti che migrano via via verso la superficie
 Tipo di dissesto: crollo improvviso e/o lente subsidenze (Piping Sinkhole)

Fig. 5 - Tipi di dissesti legati alle dinamiche carsiche

- sondaggi geognostici a carotaggio continuo
- sondaggi geognostici a distruzione di nucleo
- esecuzione di prove geotecniche in foro (SPT)
- prelievo di campioni indisturbati
- prove di permeabilità in foro tipo Lefranc
- installazione di numerosi piezometri
- prove penetrometriche dinamiche con penetrometro leggero
- pozzetti esplorativi
- esecuzione di prove di laboratorio

Le indagini geognostiche sono state eseguite dalla Tecnogeo.

In tale fase si sono redatte le seguenti Carte Tematiche:

- Carta Geologica
- Carta Idrogeologica
- Profilo Geolitologico
- Carta degli aspetti idrografici e geomorfologici delle Acque Albule prima delle urbanizzazioni
- Carta degli aspetti idrografici e geomorfologici delle Acque Albule nei primi anni '50
- Carta delle dinamiche geomorfologiche attuali;

Successivamente è stato redatto un secondo studio eseguito in ottemperanza della Delibera della Regione Lazio dell'Agosto 2002 n. 1159 che individua i Comuni di Tivoli e Guidonia come soggetti a rischio sink-hole, nella quale si prescrive che i progetti che interessano tali aree debbano essere corredati da indagini geofisiche per valutare il rischio di sprofondamento e/o fenomeni collaterali di subsidenza.

Tale secondo studio si è avvalso di metodologie geofisiche (microgravimetriche e geoelettriche) che hanno interessato l'asse ferroviario di progetto nei tratti che potenzialmente potevano essere sede di fenomeni di carsismo e/di sprofondamento, per una lunghezza totale di circa 5,4 Km (Fig. 6).

Le possibili metodologie atte all'individuazione di cavità sotterranee a profondità di alcune decine di metri sono essenzialmente due: la geoelettrica e la microgravimetria; queste metodologie sono attualmente considerate le più precise e raffinate tra quelle al momento conosciute.

Sulla base di prove sperimentali lungo l'asse si è stati costretti ad escludere la metodologia geoelettrica per i notevoli disturbi di variabilità del campo elettrico causati dal frequente passaggio di treni lungo la vicina linea ferroviaria. Invece la metodologia geoelettrica si è potuta utilizzare in alcune aree ove sono ubicati gli edifici delle stazioni, dopo verifica sperimentale della sua applicabilità.

Tale studio è corredato da una serie di carte tematiche (Profilo Geologico e interpretazione microgravimetrica (Fig. 7); Carta del Rischio Sink-Holes).

Sulla base dei risultati dell'indagine geofisica, che ha individuato una serie di anomalie gravimetriche, si è svolta una terza indagine, tesa a verificare con ulteriori sondaggi geognostici a carotaggio continuo ed a distruzione di nucleo, la reale entità delle anomalie stesse. Tale fase di indagini ha permesso, oltre che la verifica delle anomalie gravimetriche, anche una revisione del Profilo Geologico, del Profilo Geologico e interpretazione gravimetrica e della Carta del Rischio Sink-holes.

Per verificare le geometrie ipogee di alcune cavità carsiche si sono inoltre eseguite ispezioni televisive in foro; inoltre al fine di individuare le possibilità di saturazione di detti vuoti



Fig. 6 - Indagine gravimetrica

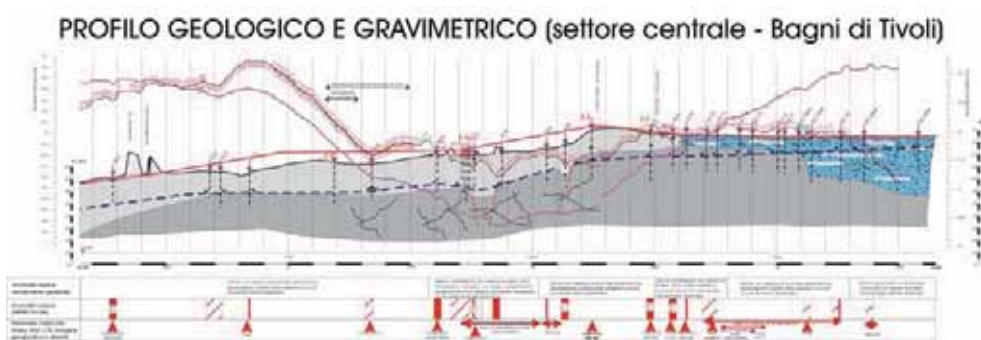


Fig. 7 - Stralcio da Profilo Gravimetrico con interpretazione geologica e delle varie dinamiche di dissoluzione carsica

si sono eseguite prove sperimentali di iniezione e saturazione dei vuoti con malte appositamente studiate.

Gli aspetti geotecnici sono stati sviluppati in una apposta Relazione Geotecnica, corredata da una Carta Geologico-tecnica, da un Profilo Geologico-tecnico e da Sezioni Geologico-tecniche delle Opere d'Arte

5. CONCLUSIONI

Da quanto precedentemente svolto emerge chiaramente come gli aspetti geologici, geomorfologici e la ricostruzione geoambientale storica ed attuale dell'area delle Acque Albule, abbia rappresentato la base necessaria per una corretta progettazione del raddoppio della linea ferroviaria.

Gli studi geologici e le indagini geognostiche e geofisiche hanno infatti raggiunto una attendibile individuazione delle zone con potenziale presenza di fenomenologie carsiche, una loro modellazione morfodinamica e una valutazione locale del rischio sink-holes; ciò ha permesso una efficace articolazione delle soluzioni progettuali.

BIBLIOGRAFIA

- AMATO A., DI FILIPPO M., MATTEI M., MONTONE P., SCARPA R. (1986) - *Interpretazione congiunta di profili gravimetrici e di sismica a rifrazione nella Provincia di Roma*, Mem. Soc. Geol. It., **35**, 469-474
- ARGENTIERI A. ET ALII. (2004) - *La depressione del "Il Laghetto" (Roma): un possibile sink hole?*. Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma, 20-21 Maggio 2004, Aula Magna dell'Angelicum.
- BENVEGNÙ F. ET ALII (1988) - *Natural Analogues and evidence of long-term isolation capacity of clays occurring in Italy*. Commission of the European Communities. EUR 11896
- BONO P. (2000) - *Le risorse ambientali della pianura di Tivoli: quadro geo-ambientale di riferimento*. in "Atti del Convegno: Il Travertino. Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio", Guidonia 27-28 Ottobre 2000.
- CARAMANNA G. (2002) - *I laghetti sorgivi delle Acque Albule*. in: Giardini M. [a cura di] "Atti: Il Travertino. Aspetti naturalistici e sfruttamento industriale all'inizio del terzo millennio", Prov. di Roma
- COLOMBI A., NOLASCO F. (2004) - *Il rischio sink-hole nella Regione Lazio. Quadro normativo e prospettive future*. Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma, 20-21 Maggio 2004, Aula Magna dell'Angelicum.
- DI FILIPPO M., FAVALI P., SCALERA G.C., TORO B. (1986) - *Lazio: studio delle strutture tettoniche profonde e superficiali mediante il confronto di dati gravimetrici e sismologici*, Mem. Soc. Geol. It., **35**, 459-467
- DI FILIPPO M., RUSPANDINI T., TORO B. (1991) - *Evidenze di taglio N-S in Sabina meridionale*, Studi Geologici Camerti, Vol. Spec. 1991/2 -CROP11, 67-71.
- COSENTINO D., PAROTTO M. (1986) - *Assetto strutturale dei Monti Lucretili settentrionali (Sabina): nuovi dati e schema tettonico preliminare*. Geologica Romana, **25**, 73-90.
- FEROCI M., FUNICIELLO R., MARRA F., SALVI S. (1990) - *Evoluzione tettonica e paleogeografica plio-pleistocenica dell'Area di Roma*. Il Quaternario, **3**, (2).

- FACCENNA C., FUNICIELLO R. (1993) - *Tettonica pleistocenica tra il Monte Soratte e I Monti Cornicolani (Lazio)*. Il Quaternario, **6** (1), 103-118
- FACCENNA C. (1994) - *Structural and hydrogeological features of Pleistocene shear zones in the area of Rome (Central Italy)*. Annali di geofisica, vol XXXVII, n. 1, 121-133.
- FACCENNA C., FUNICIELLO R., MATTEI M. (1994) - *Late Pleistocene N-S shear zones along the Latium Tyrrhenian Margin: structural characters and volcanological implications*. Boll. Geofis. Teorica ed. Appl., VOL. XXXVI, n. 141-144, 507-522.
- FACCENNA C., FUNICIELLO R., MONTONE P., PAROTTO M., VOLTAGGIO M. (1994) - *Tettonica trascorrente del pleistocene superiore nel bacino delle Acque Albule (Tivoli, Lazio)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **49**, 37-50
- FUNICIELLO R., GIULIANI R., MARRA F., SALVI S. (1991) - *Superfici strutturali plio-quadernarie al margine sud-orientale del distretto vulcanico sabatino*. CROP 11, 301-304
- FUNICIELLO R., MARRA F., ROSA C. (1995) - *Stratigrafia e assetto geologico dell'area romana, in La geologia di Roma. Il centro storico*. Serv.Geol.Naz., Ist.Naz.Geof., Dip.Sc.Geol.III Univ.Roma
- LA CHIOMA A., (1986) - *Le Acque Albule nella Storia e nella Memoria*.
- GASPARINI C. ET ALII. (2001) - *Analisi del periodo sismico avvenuto nel territorio di Guidonia Montecelio nel Giugno 200*. Atti XX GNGTS.
- MATTEI M., MONTONE P., SALVINI F. (1986) - *Analisi strutturale dei rilievi di margine appenninico intorno a Tivoli (Roma)*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 579-589
- MAXIA C. (1950) - *Il Bacino delle Acque Albule*. Contr.Sc. Geol. Suppl. Ric. Sc., Roma, 20, 27-44
- MAXIA C. (1954) - *La geologia dei Monti Cornicolani*. Ist. Geol. Pal. Università di Roma, Pubbl. n. II, Roma
- NISIO S, SALVATI R. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento catastrofico, proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*. Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma, 20-21 Maggio 2004, Aula Magna dell'Angelicum.
- OGNIBEN L., PAROTTO. M. (1975) - *Structural Model of Italy*. CNR, Roma
- PENTECOST A., TORTORA P. (1989) - *Bagni di Tivoli, Lazio: a modern travertine-depositing site and its associated microorganisms*. Boll. Soc. Geol. It., **108**, 315-324
- SALVATI R., CAPELLI G., GARELLO M. (2004) - *Carta delle aree a rischio sinkhole della Regione Lazio*. Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma, 20-21 Maggio 2004, Aula Magna dell'Angelicum.
- SALVI S., ET ALII, (2004) - *Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sink-hole del Bacino delle Acque Albule (Lazio)*. Convegno "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma, 20-21 Maggio 2004, Aula Magna dell'Angelicum.
- VENTRIGLIA U. (1971) - *La geologia della città di Roma*. Amministrazione Provinciale di Roma, Roma.
- VENTRIGLIA U. (1990) - *Idrogeologia della Provincia di Roma*. Provincia di Roma, Ass. LL.PP. Viab. e Trasp., Roma.

COLLASSO DI CAVITÀ ANTROPICHE E SVILUPPO DI PIPING-SINKHOLES IN AMBITO URBANO: IL CASO DI STUDIO DEL CENTRO STORICO DI TURSI (BASILICATA)

di Lazzari M.

CNR-IBAM, Contrada S. Loja, Zona Industriale Tito Scalo (PZ), I- 85050

m.lazzari@ibam.cnr.it

ABSTRACT

The Tursi–Rabatana historical site is very representative of the cultural heritage of Basilicata, southern Italy. Morphological evolution of the landscape is characterized by very intense erosive phenomena such as landslides, deep gullies, rills, and piping, which affect the perimeter of urban settlements and threaten the conservation of these sites. Rainfalls and the lithology of the substratum are the main factors to which the landscape evolution is linked, triggering landslide and linear erosion phenomena. Climate analysis carried out during the last century showed an increasing trend in the rainfall intensity over extremely short periods. This condition also induced an increase in the vulnerability level of the slopes. Integrated analysis between territorial data (geology, geomorphology, climate) and historical documents showed that, at least from the last century, the geomorphological hazard has been accentuated by the intense human activity of cave excavation along several fronts under the present urban area. This work also produced evidence that the human interventions occurring during the historical period have been a determining factor in increasing the hazard level and accelerating the preexisting morphological processes producing also sinkhole-triggering. The evaluation of the anthropogenic contribution to raise the geomorphological risk level was carried out on the basis of observations of the widespread static conditions and damages of the cave vaults (man-made environment) located under the built-up area caused by water infiltration and piping erosion, favored by the lack of waterproofing of the urban ground and the reactivation of the ancient hydraulic network. To mitigate the hazard and risk level it is necessary to execute some remedial works, and above all, to reduce the water infiltration rate, thereby waterproofing the urban ground and disabling the ancient hydrological system, as well as effecting a static consolidation of the cave (vaults) network and a decrease in erosion rate along the slopes (for example grassing the slope surface).

1. INTRODUZIONE

Il termine *sinkhole* è stato introdotto per la prima volta da FAIRBRIDGE (1968) per indicare una depressione di forma sub-circolare dovuta al crollo di piccole cavità carsiche sotterranee, sinonimo dunque di dolina (doline). Successivamente il termine è stato ripreso da altri autori (MONROE 1970; JENNINGS 1985; WHITE 1988 ed altri) ed affiancato da un attributo che ne chiariva la genesi, distinguendo così *solution sinkhole*, *collapse sinkhole* e *subsidence sinkhole*.

Attualmente negli Stati Uniti e in Gran Bretagna il termine *sinkhole* è usato frequentemente e definisce una qualunque cavità nel terreno (non necessariamente legata a fenomeni carsici) di forma non più necessariamente sub-circolare, apertasi nel terreno per cause antropiche o per motivi diversi [BECK 1984, 1988, 1989; BECK & WILSON, 1987]. In Italia il termine *sinkhole* è stato introdotto, a partire dagli anni novanta, [FACCENNA *et al.*, 1993; BRUNAMONTE *et al.*, 1994; NOLASCO, 1998; CIOTOLI *et al.*, 1998, 2000; NISIO *et al.*, 2004] per indicare un tipo particolare di sprofondamento, con forma sub-circolare, ma di genesi incerta. Successivamente, anche in Italia, il termine è stato usato secondo l'accezione anglosassone, sinonimo dunque di sprofondamento s.l., di dolina, di sprofondamento antropico, e di camino di collasso.

A tal proposito per *piping sinkhole* si intende indicare quei fenomeni di sprofondamento naturale in cui i processi di erosione profonda dal basso sono i principali meccanismi genetici di innesco [Nisio, 2003]. Essi risultano concentrati in Italia nelle piane alluvionali, nelle immediate vicinanze di dorsali carbonatiche, in contesti geologico-strutturali ed idrogeologici complessi innescati da cause di diversa natura (sismi, siccità, alluvioni, emungimenti di acque, etc.).

La loro genesi risulta legata alla propagazione di una cavità all'interno del materiale di copertura, per effetto del *piping*, a partire dal tetto del *bedrock* (substrato) verso l'alto; il fenomeno procede verso l'alto fino a quando il terreno di copertura, non sopportando più gli sforzi di taglio, collassa dando luogo ad una voragine che si forma velocemente nell'arco di 6-24 ore.

Lo sviluppo di tali fenomeni è difficile previsione soprattutto in ambito urbano, dove le interferenze tra ambiente naturale ed antropico sono numerose e non sempre conosciute. E' quest'ultimo il caso del centro storico di Tursi (Fig. 1) dove i processi morfoevolutivi naturali della collina su cui sorge l'abitato sono stati accelerati dall'attività antropica secolare di escavazione di grotte e tunnel sotterranei multilivello al di sotto dell'area urbana, spesso causa di collassi ed apertura di voragini di grandi dimensioni (Figg. 2, 3 e 4).

La ricerca condotta sul territorio di Tursi analizzando, in particolare, il settore in cui ricade il suo borgo antico "*Rabatana*", ha utilizzato un approccio integrato (prospezioni geofisiche GPR e ERT, analisi storiche d'archivio, analisi climatiche, rilevamento geologico e geomorfologico) correlando tra loro i diversi fattori naturali ed antropici responsabili dell'evoluzione del paesaggio tursitano in epoca storica.

2. CASO DI STUDIO

L'area urbana di Tursi e della Rabatana è geograficamente localizzata nel settore sudoccidentale della Basilicata in corrispondenza di un'area collinare posta ai piedi della catena montuosa sudappenninica (Fig. 1).

Il sito è geologicamente caratterizzato dall'affioramento di successioni plio-pleistoceniche riferibili a depositi d'avanfossa autoctoni (*Formazione delle Sabbie di Tursi ed Argille grigio-azzurre*). La Formazione sabbioso-conglomeratica e sabbioso-limosa delle Sabbie di Tursi [ZAVALA, 2000] è costituita da un grosso corpo sabbioso giallastro a geometria lenticolare di ambiente deposizionale di fronte deltizia e transizionale, avente uno spessore massimo di 500 m, la cui base, litologicamente caratterizzata da numerose intercalazioni conglomeratiche, poggia in discordanza sui termini formazionali pre-pliocenici.

Il clima è di tipo continentale temperato con alternanza di periodi molto piovosi ed umidi (autunno-inverno) con periodi caldi e secchi (estate). Tale classificazione è stata confer-

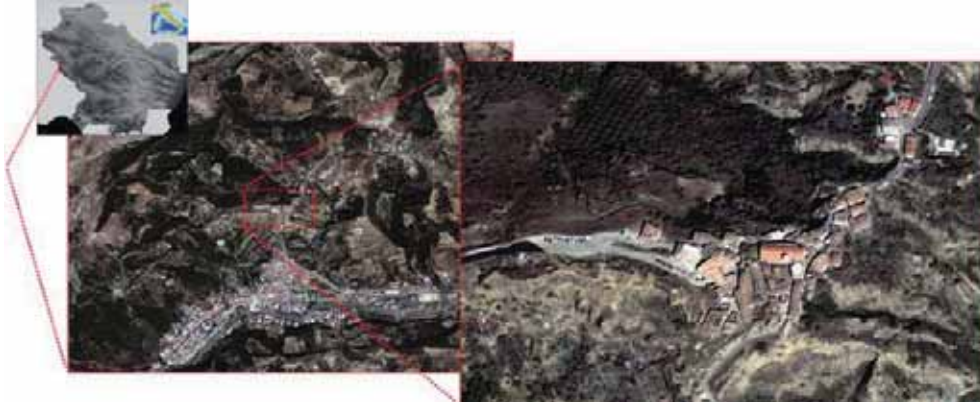


Fig. 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio.



Fig. 2 - Ispezione all'interno di una cavità sotterranea (50 m di lunghezza per 8 di altezza) presente al di sotto del centro abitato e di cui gli stessi abitanti avevano perso memoria.



Fig. 3 - Esempio di sinkhole generatosi per piping al di sotto di un fabbricato, ubicato nella parte di monte del centro storico, che ne ha determinato il crollo.



Fig. 4 - Crollo di cavità all'interno di un edificio nel centro storico con fluidificazione del materiale verso cavità con accesso diretto alle ripide scarpate che circondano il sito.



Fig. 5 - Sinkhole generatosi nell'Ottobre 2006 nei pressi della Chiesa madre della Rabatana.

mata dall'analisi complessiva dei dati pluviometrici reperiti dalla consultazione degli Annali Idrologici del Servizio Idrografico Nazionale riferiti ad un periodo di osservazione di 78 anni (1923-2001).

A seguito degli eventi piovosi del gennaio 1972 il sito è stato sottoposto a vincolo di trasferimento totale con Decreto del P.G.R. n° 73 del 29/9/72 e dal 1973 risulta pressoché disabitato ed abbandonato al degrado strutturale e paesaggistico. Il centro storico è caratterizzato da una fitta rete di grotte comunicanti, parte delle quali terminano sospese sul pendio scosceso che domina l'abitato di Tursi, scavate nella Formazione pleistocenica delle Sabbie di Tursi e poste a più livelli di profondità. Lo scavo di grotte, utilizzando le caratteristiche litologiche e morfologiche dei terreni affioranti, si sviluppa dalla Rabatana fino alle aree di fondovalle del T. Pescogrosso, principale affluente del fiume Sinni.

Lazzari et alii (2006) analizzando i dati climatici storici hanno evidenziato come nell'ultimo secolo si sia affermato un evidente trend nell'aumento dell'intensità delle piogge di breve durata e concentrate nel tempo, tanto da determinare un'accelerazione dei processi morfoevolutivi delle colline sabbioso-limose fratturate su cui si erge l'abitato della Rabatana attraverso processi di erosione sotterranea (*piping*), che interagendo con le volte delle cavità antropiche hanno prodotto collassi e voragini di grandi dimensioni classificabili come *piping-sinkholes* (Figg. 5, 6 e 7).

I dati d'archivio (Tab. 1) hanno dimostrato una sostanziale condizione di vulnerabilità del territorio legata alla concorrenza di fattori naturali, quali la piovosità, la litologia e le frane, ed antropici (escavazione di grotte e cisterne a più livelli al di sotto del centro urbano) i quali avrebbero accelerato i processi morfogenetici in atto, elevando il livello di rischio per l'abitato. Da ispezioni dirette e dai dati catastali sono state censite più di 100 cavità antropiche su un'area di circa 2 km², parte delle quali si sono evolute in *sinkholes* con collassi dovuti a fenomeni di *piping*. È emerso, infatti, che nel 38% dei casi si sono registrate

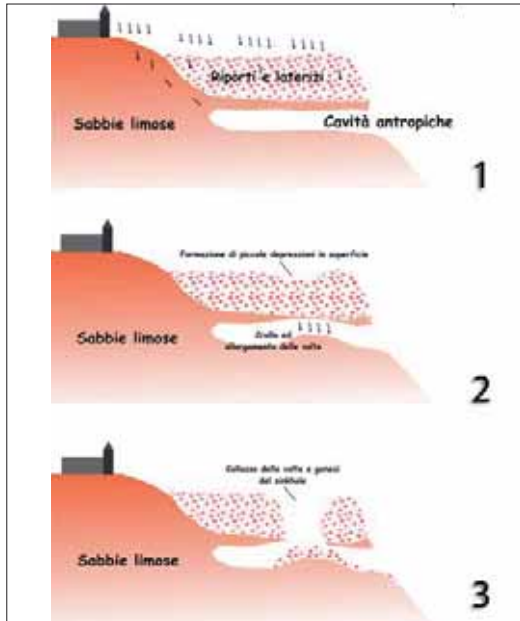


Fig. 6 - Modello schematico rappresentante la formazione di piping sinkhole in ambito urbano. La condizione di partenza [reale rispetto al caso di studio] è costituita da un substrato arenaceo-sabbioso-limoso fratturato interessato da grotte antropiche prive di rivestimenti [1] e con una copertura costituita da riporti e laterizi spesi fino a 5 m. Durante i periodi piovosi l'acqua d'infiltrazione superficiale esercita un'azione erosiva tendendo ad allargare le volte delle cavità [2]. Nei casi in cui il diaframma che separa la cavità dai riporti è ridotto al punto tale da non esercitare più un'azione di autoportanza delle volte, si verifica il crollo ed il relativo richiamo del materiale di copertura con la produzione di un sinkhole [3].

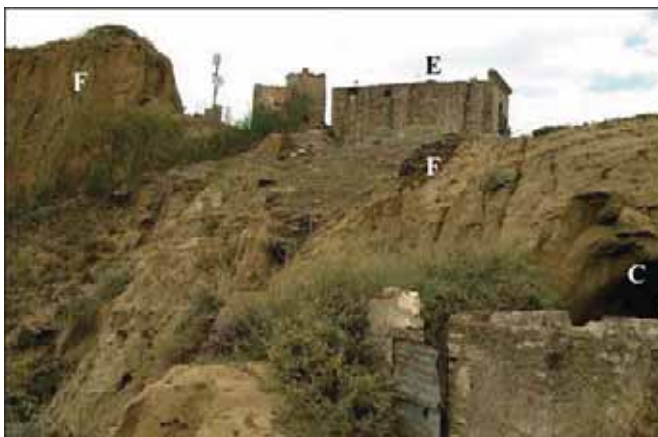


Fig. 7 - La figura evidenzia la presenza di edifici [E] storici danneggiati al di sopra del substrato sabbioso fratturato [F] con cavità antropiche [C]. Le fessurazioni favoriscono l'infiltrazione dell'acqua che asportando la porzione granulometrica fine limoso-sabbiosa tende ad allargare le fessure per piping ed a far crollare le volte delle grotte.

Tabella 1 - Sintesi dei principali eventi calamitosi naturali con crolli di grotte e sprofondamenti che hanno colpito il territorio della Rabatana dal 1858 al 2006.

Data Evento	Tipologia Evento	Danni
10 ottobre 1858	Frane	Apertura di una voragine avanti al portone del Palazzo Donnaperna con interruzione della strada esistente. Frana lungo la rupe che costeggia la piazzetta della Rabatana ed interruzione della strada.
Gennaio- Febbraio 1907	Alluvione Frane	Durata delle piogge 7 giorni, con i seguenti danni: strade interne ed esterne crollate e ben 60 case dichiarate inabitabili, a causa dello sfaldamento delle sottostanti grotte; quattro morti; danni al ponte Rabatana e ai ruderi dell'antico castello che minacciano di cadere sulle case sottostanti;
Novembre 1908	Frane Alluvioni	Franamenti verificatisi sotto Piazza Plebiscito, a ridosso di Via Pandosio per collasso cantina. Danni alle mulattiere a seguito di piogge ininterrotte dalla durata di tre giorni.
13 Gennaio 1909	Frane	Sprofondamento di una grotta nel Rione Maurigi: due persone morte. Pericolo di crollo di altre grotte sotto Piazza Plebiscito.
Novembre 1921	Alluvioni Frane	Franamento di una cantina in Via Seminario Vecchio a causa delle forti piogge.
Inverno 1930-31 febbraio 1931	Frane e Alluvioni	Danni alla chiesa di S. Maria Maggiore. Chiusura e riempimento di grotte sotto fabbricati. Crollo di 15 case, 14 case inabitabili da demolire e 54 case danneggiate riparabili. Danni al palazzo Donnaperna (crollo parte destra). I ^a proposta di trasferimento parziale della Rabatana (Legge 9/7/1908).
1950-51 gennaio 1950	Alluvioni	Pericolo di frane in Via Mario Pagano. Grotta larga 5 m piena d'acqua in prossimità ponte Rabatana. Allagamento abitazione Via Roma.
Febbraio 1951	Frana	Crollo di grotta in Via Goldoni - Via Novelli con apertura di una voragine e crollo di una parte di edificio adiacente. Dissesti alle grotte sottostanti con minaccia di crollo di un agglomerato di case adiacenti nella parte estrema della frazione Rabatana.
aprile 1952 e autunno 1953	Alluvioni e Frane	Pericolo di cedimento nel Rione S. Michele e crolli di solai. Crolli di volte di grotte in via S. Maria delle Grazie in corrispondenza di un'alta scarpata.
settembre-ottobre 1958	Frana e Alluvioni	Frana strada di accesso alla Rabatana per le forti piogge e crolli di volte di grotte di privati cittadini.
febbraio e novembre 1959	Alluvione e Frana	Frana in Via Dante con pericolo di crollo delle case sul bordo scosceso del Rione. Crollo di una grotta per infiltrazioni dovute alle piogge abbondanti in Via V. Emanuele e Via Garibaldi. Chiusura e riempimento di grotte sottostanti fabbricati.
novembre - dicembre 1968	Alluvione	Infiltrazione in grotte sotto manto stradale con smottamenti e pericolo di crolli.
Gennaio 1985	Alluvione Frane	Piogge torrenziali dopo abbondanti nevicate di dicembre hanno causato il crollo di una casa (16/1/85) e lo sprofondamento di una grotta in Rabatana. Ordinanza di sgombero di 29 fabbricati (83 persone).
fine 1986	Frane	I fenomeni d'instabilità sono prodotti da processi erosionali; crolli e sprofondamenti come quello di Via V. Emanuele sono indotti da un gran numero di grotte sotterranee antropiche. Frana a monte di Via Roma.
Settembre 2006	Frana	Collasso gravitativo con apertura di una voragine (sinkhole) nei pressi della Chiesa Collegiata della Rabatana

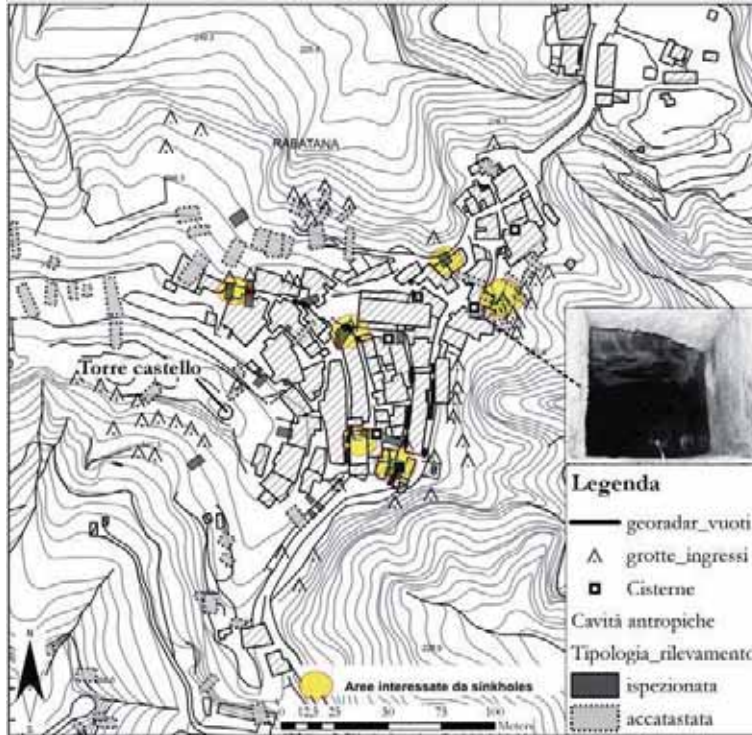


Fig. 8 - Distribuzione delle cavità [ispezionate, rilevate con georadar o accatastate] nell'ambito urbano della Rabatana con indicazione della posizione delle cisterne e delle aree interessate da sinkholes. La foto sulla destra mostra una delle cisterne che presentano ancora accumulo d'acqua a testimonianza dell'attività dell'antico sistema di drenaggio delle acque piovane.

collapsi di grotte di natura antropica per erosione sotterranea anche con formazione di *sinkholes* (Fig. 8).

Lazzari et alii (2006) hanno ricostruito il modello morfoevolutivo della collina su cui si erge l'abitato di Tursi mettendo in relazione i processi evolutivi naturali con quelli antropici e dimostrando, anche attraverso la ricerca documentaristica e bibliografica storica, come la tendenza ad un uso sconsiderato ed irrispettoso degli equilibri naturali di questa porzione di territorio da parte dell'uomo è stata, per almeno tutto l'ultimo secolo, una costante negativa che ha comportato danni diffusi e talora purtroppo anche delle vittime, portando in ultima analisi anche alla drammatica cancellazione delle ultime testimonianze storiche dell'insediamento fortificato medioevale.

La ricostruzione della carta delle cavità (Fig. 8) ha permesso di evidenziare le aree a rischio di innesco di *sinkholes*, risultando un importante strumento di analisi territoriale per la pianificazione urbanistica.

3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'analisi territoriale integrata ha permesso di sintetizzare e relazionare i principali fattori geologico-ambientali responsabili dell'evoluzione morfologica del settore studiato. L'inter-

polazione dei dati raccolti ha permesso, inoltre, di distinguere tre zone di rischio geomorfologico principali, con particolare riferimento allo sviluppo di *sinkholes*:

- **zone a rischio elevato** ubicate lungo il perimetro esterno della Rabatana dove giocano un ruolo determinante l'acclività dei versanti, la presenza di fenomeni gravitativi di massa, gli intensi fenomeni erosivi e la concentrazione di ipogei con volte indebolite ed a rischio di crollo (Fig. 8);
- **zone a rischio medio** ubicate a ridosso delle aree ad alto rischio per le quali si prevede un loro probabile coinvolgimento in fenomeni franosi per erosione regressiva delle scarpate di frana (Fig. 8);
- **zone a basso rischio** ubicate in zone semi-pianeggianti o, comunque, non interessate da fenomeni erosivi e franosi ubicate nel nucleo interno all'abitato. Tali aree possono accentuare il loro livello di rischio in concomitanza di eventi piovosi di forte intensità, sia per le infiltrazioni che per i cedimenti delle volte degli ipogei presenti nel sottosuolo dell'abitato (Fig. 8).

In questo contesto di grave e perpetuato dissesto idrogeologico si sono sommati nel tempo eventi sismici anche di forte intensità, che hanno aggravato condizioni di degrado e rischio preesistenti, come per esempio avvenuto per gli eventi sismici del 1857, 1941 e del 1980; tutti gli altri documenti consultati riferiscono lo sviluppo di condizioni d'instabilità del terreno e delle strutture ad azioni di erosione di massa (frane per il 41%) e ad alluvioni (47%) legate a piogge abbondanti e soprattutto concentrate nel tempo.

Sulla totalità degli eventi tabellati e studiati in circa il 30% dei casi studiati si sono verificati crolli in grotte con conseguenti danni per l'abitato, a riprova dell'incidenza del fattore antropico sull'equilibrio naturale del sito.

In conclusione, al fine di stimare il rischio geologico da *sinkhole* nel centro urbano non è sufficiente valutare i processi evolutivi naturali ma anche, e forse soprattutto, l'interazione con quelli antropici. Per quanto concerne, invece, la mitigazione del rischio nel centro storico, sarà necessario provvedere ad un'impermeabilizzazione delle superfici di ruscellamento superficiale per impedire l'infiltrazione delle acque piovane e quindi l'erosione sotterranea ed alla realizzazione di una rete di raccolta delle acque bianche ad oggi assente, nonché impermeabilizzare le volte delle cavità o provvedere al loro colmamento con materiale impermeabile.

BIBLIOGRAFIA

- BECK, B.F. (1984) - *Sinkholes: Their Geology, Engineering and Environmental Impact: Proceedings of the First. Multidisciplinary Conference on Sinkholes*, Orlando, FL: Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, Publisher, 429 pp.
- BECK, B.F. (1988) - *Environmental and Engineering Effects of Sinkholes-the Processes Behind the Problems*. 21 st Meeting of the International Association of Hydrogeologists in Guilin, China, October, 1988. pp. 8.
- BECK, B.F. (1989) - *Engineering and Environmental Impacts of Sinkholes and Karst*. Proceedings of the Third Multidisciplinary Conference, St. Petersburg Beach, FL, October 2-4, 1989, pp. 392.
- BECK, B.F., & WILSON, W.L. (1987) - *Karst Hydrogeology: Engineering and Environmental Applications*. Proceedings of the Second Multidisciplinary Conference on Sinkholes

- and the Environmental Impacts of Karst, Orlando, FL, Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, Publisher, pp. 429.
- Brunamonte F., Prestininzi A. & Romagnoli C. (1994) - *Geomorfologia e caratteri geotecnici dei depositi di terre rosse nelle aree carsiche degli Aurunci orientali (Lazio meridionale, Italia)*. Geol. Rom., **30**, pp. 465-478.
- CIOTOLI G., DI FILIPPO M., NISIO S., ROMAGNOLI C. (1998) - *La piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimica*. Atti Conv. Giovani Ricercatori di Geologia Applicata. Chieti 22-24 Ott. 1998, Vol. abs. 200-201.
- CIOTOLI G. DI FILIPPO M. NISIO S. & ROMAGNOLI C. (2000) - *La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, strutturali, geomorfologici, geofisici e geochimici*. Mem. Soc. Geol. It., **56**, pp. 297-308.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICELLO R., & LOMBARDI S. (1993) - *Tectonic setting and Sink-hole Features: case histories from western Central Italy*. Quaternary Proceeding n. 3, pp. 47-56.
- FAIRBRIDGE (1968) - *The Encyclopedia of Geomorphology*. Ed. Reinhold, New York, 1968, 1295 pp.
- JENNINGS J.N. (1985) - *Karst geomorphology*- Kateprint Co. Ltd, Oxford, pp. 293.
- LAZZARI M., (2004) - *Rischio geomorfologico relativo e dissesto idrogeologico dell'area urbana di Tursi: naturale o antropogenico?* In: "Tursi-La Rabatana" a cura di Cosimo Damiano Fonseca, Ed. Altrimedia, Matera, pp. 287-303, 2 Tav. f.t..
- LAZZARI M., GERALDI E., LAPENNA V., LOPERTE A. (2006)- *Natural hazards vs human impact: an integrated methodological approach in geomorphological risk assessing on Tursi historical site, southern Italy*. Landslides, **3** (4), pp. 275-287, Springer-Verlag.
- MONROE W.H. (1970) - *A glossary of karst terminology*. U.S. Geol. Surv. Water Sup (1970).
- NISIO S. (2003) - *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. Il Quaternario, 16 (1) 2003, pp. 121-132.
- NISIO S., GRACIOTTI R., VITA L. (2004) - *I Fenomeni di Sinkhole in Italia: Terminologia, Meccanismi Genetici e Problematiche Aperte*. Atti 1° Seminario su Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio, APAT Roma, 20-21 maggio 2004, pp. 557-571.
- NOLASCO F. (1998) - *La piana di S. Vittorino. Contributo allo studio dei processi evolutivi dei rischi e della prevenzione*. Regione Lazio- Acea.
- ZAVALA C (2000) - *Stratigraphy and sedimentary history of the Plio-Pleistocene Sant'Arcangelo basin, southern Apennines, Italy*. Riv Ital Paleontol Stratigr., **106**(3), pp.399-416.
- WHITE W.B. (1988) - *Geomorphology and Hydrology of carbonate terrains*. University Press, Oxford, pp. 464.

ANALISI NUMERICA DI PROCESSI DI INSTABILITÀ DI CAVITÀ SOTTERRANEE E DEGLI EFFETTI INDOTTI IN SUPERFICIE

di Lollino P., Parise M.

Consiglio Nazionale Ricerche - IRPI, Bari

ABSTRACT

Natural and anthropogenic caves may represent a potential hazard for the built-up environment, due to the occurrence of underground instability processes, that may propagate upward and eventually reach the surface producing the formation of sink-holes. Especially when the caves are at shallow depth, the effects at the ground surface may result extremely severe. In the Apulia region of southern Italy, there are many sites where underground quarrying developed in the past, due to presence of good rock to be used for building purposes at a certain depth. Development of underground, rather than surface, quarries, was also favoured by the preservation of the terrains above for agricultural practices. The Pliocene-Pleistocene calcarenite (a typical soft rock) was therefore quarried underground, by digging extensive networks of galleries that followed the levels within the local geological succession most suitable for the quarrying activity. With time, these activities underground have been progressively abandoned, and many quarries were later on used for other purposes, including illegal discharge of solid and liquid wastes. Many Apulian towns are nowadays located just above these voids, due to urban expansion in the last decades, and loss of memory of the presence of the underground quarries. Thus, a serious risk exists for the human society, which should not be left uninvestigated.

The present contribution deals with analysis of the main factors at the origin of the instability processes, and in particular those causing weathering of the soft rock, with decay in the physical and mechanical properties of the rock mass. Aimed at exploring the evolution in time of the stability conditions within the cavities, numerical analysis have been implemented by using finite element methods, and applying them to typical case studies in Apulia. A structural model characterized by regular geometry, with rectangular shape of the excavation, has been investigated. In particular, the effects of decay processes in the mechanical properties of the rock mass as a consequence of wetting and environmental weathering in the areas surrounding the cave have been studied, together with the negative effects induced by the quarrying activity itself. Parametric analyses have been carried out to evaluate the influence of both the cave geometry and the overburden on the stability conditions, and the effects of additional weight at the surface as well. Results from the numerical analyses have been eventually compared to the real situations observed within the underground quarries to calibrate the developed numerical models.

RIASSUNTO

Numerose cavità sotterranee, sia di origine naturale che artificiale, presenti in corrispondenza di aree urbane ed extra-urbane sono spesso in condizioni di stabilità precaria e pertanto inducono un livello significativo di rischio per beni e vite umane che interagiscono con le stesse. Nella regione Puglia numerose cavità sono il risultato di attività di cava in sottterraneo operate nei decenni scorsi all'interno di banchi di calcarenite, utilizzata in maniera estensiva come materiale da costruzione. La calcarenite si presenta spesso massiva e poco fratturata, nonché risulta facilmente erodibile e, secondo le classificazioni geomeccaniche disponibili, può essere classificata come roccia tenera. Negli ultimi anni numerosi processi di instabilità sono stati osservati all'interno di queste cavità, in alcuni casi anche fino al collasso globale delle stesse, con gravi conseguenze per la sicurezza delle attività umane in superficie e per la perdita di beni. Il presente lavoro indaga alcuni fattori all'origine dei processi suddetti più ricorrenti, con particolare riferimento sia ai processi di alterazione della calcarenite di natura ambientale, che causano significativi decadimenti delle proprietà fisiche e meccaniche del materiale, che alle attività di cava, le quali essendo spesso prive di programmazione e di adeguata conoscenza dell'impatto delle stesse sulla stabilità dell'ammasso roccioso, hanno progressivamente causato un indebolimento dell'ammasso nell'area della cavità. Al fine di esplorare i processi di evoluzione nel tempo delle condizioni di stabilità delle cavità sono state condotte analisi numeriche con il metodo degli elementi finiti con riferimento a casi storici presenti nel territorio di Cutrofiano, in provincia di Lecce. In particolare, è stato indagato il modello strutturale caratterizzato da semplice geometria rettangolare del cavo, esaminando nello specifico gli effetti di processi di decadimento delle caratteristiche meccaniche della roccia come conseguenza di fenomeni di imbibizione ed alterazione ambientale sulle diverse aree circostanti la cavità, nonché gli effetti di attività di cava peggiorativa delle condizioni di stabilità. Sono state condotte analisi di tipo parametrico per la valutazione dell'influenza dell'assetto geometrico della cavità e della sua copertura sulle condizioni di stabilità della cavità stessa. I risultati delle analisi sono stati quindi messi a confronto con quanto osservato in alcuni siti specifici di studio al fine di calibrare i modelli numerici sviluppati.

1. INTRODUZIONE

La stabilità delle cavità sotterranee, sia di origine artificiale che naturale, induce situazioni di rischio sempre più gravi, poiché gli insediamenti antropici e le infrastrutture tendono in misura crescente ad interagire con le aree dove le cavità sono ubicate. Inoltre, la stabilità di tali cavità dipende in maniera significativa dal grado di avanzamento di processi attivi all'interno delle cavità che sono funzione del tempo, quali ad esempio i processi di alterazione da agenti climatici o i processi ciclici di imbibizione della roccia che circonda le cavità, i quali nel lungo periodo riducono la resistenza degli stessi ammassi rocciosi, compromettendo così la relativa stabilità.

L'area del comune di Cutrofiano (provincia di Lecce, Fig. 1), insieme a tutta la regione del Salento, è caratterizzata dalla presenza di un elevato numero di cavità sotterranee di natura antropogenica, che sono state scavate nel secolo scorso al fine di estrarre materiale di buona qualità e lavorabilità per le attività costruttive locali. Le gallerie sono state scavate per diversi decenni all'interno della formazione della Calcarenite Pleistocenica secondo complessi percorsi sotterranei ubicati ad una profondità media compresa tra 20 e 30 m dal piano campagna [PARISE *et alii*, 2008]. All'interno del complesso delle

gallerie sotterranee sono stati recentemente osservati diversi processi di instabilità, quali fessure che si propagano lungo la volta e le pareti laterali delle cavità, collassi di porzioni di roccia che interessano la volta delle gallerie fino a formare tipiche forme a cupola e rotture per taglio lungo le pareti laterali delle cavità con distacco e scorrimento dei blocchi rocciosi delimitati da tali fratture. Inoltre, sulla base di numerosi rilievi effettuati in sito sono state osservate evidenze di processi di alterazione e di processi di imbibizione della calcarenite immediatamente a ridosso delle cavità, presumibilmente come conseguenza di fenomeni di lenta infiltrazione idrica dall'alto o di più rapide sommersioni delle cavità ad opera di ingenti quantità d'acqua provenienti dai pozzi di accesso. Sulla superficie topografica, al di sopra delle gallerie di coltivazione, sono inoltre presenti segni di subsidenza o di veri e propri sprofondamenti (*sinkholes*), nelle aree dove presumibilmente sono intervenuti processi di collasso generale delle volte delle cavità con coinvolgimento dell'intero spessore di copertura delle gallerie (DE PASCALIS *et alii*, 2010).



Fig. 1 - Carta geologica schematica della Puglia ed ubicazione di Cutrofiانو: Legenda: 1) coperture clastiche recenti (Pliocene - Pleistocene); 2) rocce carbonatiche bioclastiche (Paleogene) e calcareniti (Miocene); 3) rocce di piattaforma carbonatica (Giurassico sup. - Cretaceo), 4) rocce carbonatiche, con selce, di scarpata e bacino (Giurassico sup. - Cretaceo).

In generale, i processi di instabilità locale, che interessano le volte e le pareti laterali delle cavità, sembrano essere l'effetto di valori di resistenza della calcarenite presente non significativamente elevati, così come di processi di scarico tensionale ritardato lungo i contorni delle gallerie, o ancora di processi di degradazione progressiva della calcarenite come effetto dei processi di alterazione e imbibizione prima accennati. L'effetto complessivo nel lungo termine di tali processi consiste nel progressivo aumento delle dimensioni delle cavità fino a valori di dimensioni critiche oltre le quali si innescano processi di collasso generale dell'ammasso sovrastante la volta.

Il presente lavoro discute inizialmente l'assetto geologico dell'intera area nella quale sono presenti le cavità e descrive i diversi processi di instabilità, sia di tipo locale che generale,

delle cavità sotterranee a Cutrofiano così come sono stati osservati in sito sulla base dei rilievi di dettaglio eseguiti negli ultimi mesi. Successivamente, sono prima descritte le principali proprietà fisiche e meccaniche della calcarenite interessata dalle operazioni di cavatura e poi sono presentati i risultati di analisi svolte con il metodo degli elementi finiti al fine di validare le interpretazioni fenomenologiche dei diversi processi, avanzate sulla base dei rilievi in sito e delle analisi geologiche eseguite.

2. ASSETTO GEOLOGICO ED EVIDENZE IN SITO DEI PROCESSI DI INSTABILITÀ

La locale successione stratigrafica a Cutrofiano presenta in superficie sabbie limose sostenute alla base da argille grigio-azzurre del Pleistocene inferiore-medio (CALÒ *et alii*, 1991, 2006). Lo spessore totale è nell'ordine di 15-25 m, i primi 5-8 dei quali sono a prevalenza sabbiosa, mentre nei restanti predominano le litologie argillose. In basso la successione prosegue con le Calcareniti del Salento del Pleistocene inferiore: calcareniti organogene biancastre a grana media, poco stratificate e tenere, in spessore di 15-20 m (Fig. 2). Nell'ambito di tale formazione si possono distinguere, dall'alto verso il basso, 4 livelli, il primo dei quali è costituito da calciruditi giallastre, compatte, in spessore di 2-3 m, localmente note con il nome di *mazzara*; a seguire, calcareniti bianco-giallastre, a grana media, ben cementate, con spessore di 4-5 m, e quindi un livello di calcareniti biancastre a grana fine, mediamente cementate, in spessore variabile dai 7 ai 12 m. Infine, sono presenti calcareniti biancastre poco cementate, a grana da media a fine, in spessore di 2-3 m.

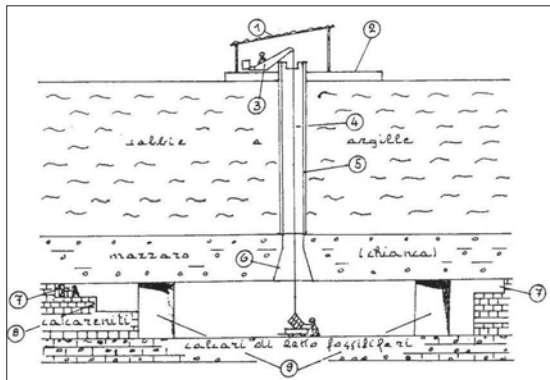


Fig. 2 - Schema semplificato dell'assetto geologico nell'area di Cutrofiano e delle operazioni di cavatura (da Toni & Quartulli (1986).

I due livelli centrali presentano le migliori caratteristiche tecniche, e hanno costituito il litotipo oggetto dell'attività estrattiva sotterranea a Cutrofiano (TONI & QUARTULLI 1986). Procedendo ancora verso il basso, la successione continua con la Pietra Leccese, del Miocene inferiore-medio (calcareniti marnose organogene avana-giallastre, a grana medio-fine, con spessore di circa 30 m), in trasgressione sul substrato carbonatico del Cretaceo superiore, rappresentato dai Calcari di Melissano (COTECCHIA 1953; CIARANFI *et alii* 1988; CALÒ *et alii* 1991), posti nella zona di Cutrofiano intorno ai 90 m di profondità.

L'assetto geologico-strutturale presenta una generale immersione degli strati verso i quadranti meridionali ed occidentali, per cui i livelli calcarenitici con le migliori caratteristiche tecniche risultano presenti nel sottosuolo a profondità variabile da poco più di 7 m nei pressi dell'abitato, sino a oltre 50 m qualche chilometro più a S.

Le gallerie delle cave sotterranee di Cutrofiano sono mediamente larghe poco più di 5 metri, e alte da 6-6,50 a 8 metri (massimo valore osservato: 10 m). Nell'ambito della estesa rete di ambienti sotterranei che si sviluppa per decine di chilometri nel sottosuolo a sud del centro abitato (Fig. 3), sono stati osservati numerosi processi di instabilità, sia dalla volta delle gallerie che lungo le pareti. In volta, i distacchi si presentano come crolli massivi di ingenti volumi dell'ammasso roccioso, coinvolgenti spessori sino a 2-2,5 m (Figg. 4a e 4b). Le morfologie derivanti sono a forma arcuata verso l'alto, e generalmente coinvolgono la galleria in tutta la sua larghezza, mettendo a nudo o addirittura coinvolgendo il livello di *mazzaro*.



Fig. 3 - Esempio di planimetria delle gallerie scavate nell'area a sud di Cutrofiano, con indicazione delle aree soggette a dissesto



Fig. 4 - a) Dissesto dell'intera volta delle gallerie ed accumulo di materiale sul piano di calpestio; b) dissesto di una porzione del tetto della galleria

Lungo le pareti è invece possibile osservare varie tipologie di instabilità, in diverse fasi evolutive: dalla presenza di lesioni più o meno aperte, in genere concentrate agli spigoli delle pareti, a deformazioni delle pareti, con estrusione di materiale sotto forma di cunei di piccole dimensioni, in corrispondenza della zona in cui si sviluppa la rottura. I crolli in parete coinvolgono frequentemente lastre di calcarenite che si distaccano lungo superfici di rottura sub-parallele alla galleria o inclinate verso l'alto, talora isolando blocchi rettangolari, sino a diversi metri di altezza (con spessori massimi nell'ordine di 1,5 m) che vanno a costituire dei torrioni isolati, in piedi a poca distanza dall'originaria parete (Figg. 5a e 5b). Lungo gli spigoli dei pilastri, a causa della presenza di fratture su entrambi i lati, sono frequenti le rotture per scivolamento di cunei. All'interno delle gallerie sono numerosi i segni di ristagno d'acqua sul piano di calpestio dovuto a percolazione dall'alto (Fig. 6a) o di eventi di sommersione parziale o totale di alcune aree delle cavità dovuti all'ingresso copioso di acqua dai pozzi di accesso (Fig. 6b). Con riferimento al primo dei due fenomeni qui citati, occorre ricordare che fenomeni di percolazione e stillicidio dall'alto sono plausibili nelle cavità per la presenza, al di sopra del *mazzaro*, di un banco argilloso



Fig. 5 - a) Dissesti in parete delle gallerie ed accumulo di materiale sul piano di calpestio; b) distacco di blocco colonnare dalle pareti della galleria



Fig. 6 - a) Ristagno d'acqua sul fondo della galleria; b) evidenze di pregressa sommersione parziale della galleria



Fig. 7 - a) Evidenze di subsidenza e sprofondamento; b) evidenze di sprofondamento in fase avanzata

che è sede di falde sospese. Infine, in alcune aree della superficie topografica, al di sopra degli ambienti sotterranei, si rinvergono evidenti processi di sprofondamento in atto a diverso grado di avanzamento (Figg. 7a e 7b).

3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI

La calcarenite tenera Pleistocenica dell'area di Cutrofiano, nella quale sono state scavate le gallerie oggetto del presente lavoro, può essere classificata come roccia da estremamente tenera a molto tenera secondo le classificazioni disponibili in letteratura basate sui valori della resistenza a compressione monoassiale (ISRM 1979; DOBEREINER & DE FREITAS 1986). Il peso dell'unità di volume della roccia, γ , varia tra 14 e 17 kN/m³, il peso specifico dei grani, γ_s , risulta compreso nell'intervallo tra 25.8 e 27.4 kN/m³ e la porosità è compresa tra 28% e 51% (CALÒ *et alii* 1992, COTECCHIA *et alii* 1985). La resistenza a compressione monoassiale risulta particolarmente bassa e compresa nel caso dei campioni più teneri tra 1000 e 2000 kPa (CALÒ *et alii* 1992, CHERUBINI & GIASI 1993; COTECCHIA *et alii* 1985). La resistenza a trazione può essere assunta pari a circa 1/10 di quella a compressione, e quindi in un *range* pari a 100 - 200 kPa. In accordo con i valori di resistenza qui descritti, sono stati dedotti parametri medi di resistenza al taglio secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb pari a $c' = 80 - 200$ kPa e $j' = 30^\circ$. Il modulo

di elasticità longitudinale secante corrispondente a livelli medi di deformazione, E' , stimato a partire dai risultati di prove di compressione monoassiale è compreso in un intervallo tra 100 MPa e 150 MPa. COTECCIA *et alii* (1985) indicano per questa calcarenite un coefficiente medio di imbibizione circa pari al 20% ed una resistenza a compressione monoassiale in condizioni di saturazione più bassa del 20-25% di quella corrispondente a condizioni di umidità in equilibrio con quella ambientale. Numerosi sono i lavori scientifici che descrivono in generale gli effetti dei processi di imbibizione ed alterazione delle rocce calcarenitiche in termini di riduzione, talora significativa, delle relative proprietà meccaniche (DOBEREINER & DE FREITAS 1986; DYKE & DOBEREINER 1991; JENG *et alii* 2004). Per caratterizzare da un punto di vista meccanico la calcarenite corrispondente al livello del cosiddetto *mazzaro*, sulla base delle indicazioni riportate nei riferimenti bibliografici sopra citati, si sono considerati valori dei parametri di resistenza incrementati rispetto a quelli desunti per la calcarenite tenera pleistocenica.

4. ANALISI NUMERICHE

4.1 Ipotesi delle simulazioni

L'interpretazione fenomenologica proposta in questo lavoro circa i processi di instabilità attivi all'interno delle cavità di Cutrofiano prevede che i collassi locali che coinvolgono le volte e le pareti delle cavità siano il risultato di vari fattori concomitanti quali le basse resistenze meccaniche della calcarenite tenera pleistocenica, l'attivazione di processi di scarico tensionale anche ritardati rispetto all'esecuzione dello scavo ed infine una progressiva degradazione fisico-meccanica della calcarenite per effetto di processi di imbibizione ed alterazione della stessa roccia. I processi di collasso generale, che conducono in alcuni casi allo sprofondamento della porzione di ammasso sovrastante le cavità (*sinkhole*) (Figg. 7a e 7b), possono, quindi, risultare come conseguenza delle variazioni delle dimensioni delle cavità (allargamento ed incremento dell'altezza) dovute ai vari collassi locali fino al raggiungimento di dimensioni del cavo che si rivelano critiche per la stabilità della volta. Obiettivo del presente lavoro è stato dunque una validazione di tale interpretazione mediante l'uso di modelli ad elementi finiti.

A tal fine, è stato adottato il codice di calcolo *PLAXIS 8.2* (2003) ed in figura 8 è mostrata la maglia utilizzata per le simulazioni. Lo schema di calcolo prevede un assetto geologico semplificato, con i seguenti strati, dall'alto verso il basso: uno strato di sabbia superficiale, dello spessore di 5 m, uno strato di argilla grigia dello spessore di 15 m, lo strato del *mazzaro*, pari a 3 m di spessore, ed infine il banco della calcarenite tenera, all'interno del quale è stata definita l'area sottoposta a scavo, di forma rettangolare, e con dimensioni pari a $B = 6$ m e $H = 7.2$ m. Tali valori sono rappresentativi delle dimensioni medie delle cavità rilevate in sito.

Il modello costitutivo adottato per i diversi materiali è di tipo elastico-perfettamente plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, flusso non associato ($\psi = 0^\circ$) e resistenza a trazione limitata. In tabella 1 sono riassunti i parametri meccanici di riferimento adottati nelle simulazioni per i diversi materiali sulla base della caratterizzazione geotecnica descritta nel paragrafo 3 e dei dati disponibili in letteratura.

Le analisi sono state condotte in condizioni drenate ed assumendo l'intero dominio di analisi al di sopra della falda, che nell'area delle cavità risulta essere a profondità maggiore. Lo stato tensionale iniziale assegnato al dominio è quello risultante dall'appli-

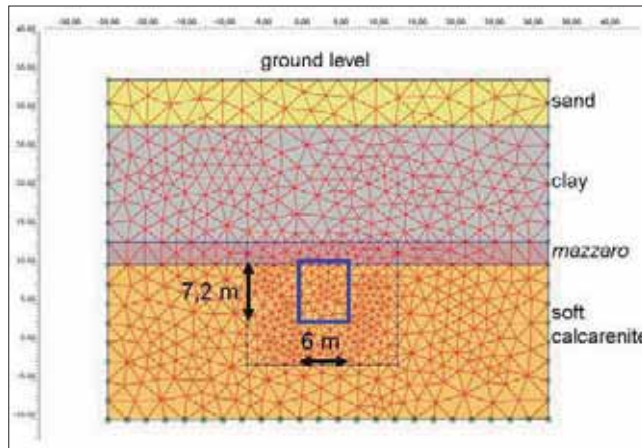


Fig. 8 - Maglia agli elementi finiti adottata nelle simulazioni ed indicazione dell'area della cavità (in blu)

Tabella 1. Parametri fisici e meccanici adottati nelle analisi FEM standard

	γ (KN/m ³)	E' (kPa)	ν'	c' (kPa)	φ' (°)	σ_t (kPa)	σ_c (kPa)
Sabbia	18	70000	0.3	0	28	0	-
Argilla	20	40000	0.25	15	20	0	-
Mazzaro	17.5	180000	0.3	360	33	300	2400
Calcarenite	15.5	100000	0.3	160	30	160	1400

cazione del peso proprio dei diversi strati e dall'assegnazione di un coefficiente a riposo pari a $k_0 = 1$.

Al fine di indagare l'influenza dei diversi fattori prima riportati sull'innesco dei processi di collasso locale e generale, sono state condotte analisi con finalità diversa, come di seguito descritto:

1. Analisi parametriche per la verifica dell'influenza del valore della coesione della calcarenite tenera sulla risposta tenso-deformativa dell'ammasso all'esecuzione dello scavo;
2. Simulazione di una degradazione progressiva della calcarenite tenera presente lungo le pareti delle cavità o del mazzaro in corrispondenza della volta attraverso la riduzione della coesione del materiale ipotizzato sottoposto a degradazione;
3. Analisi che prevedono dimensioni aumentate del cavo, come conseguenza dei processi di instabilità locale, per la verifica delle condizioni di innesco di processi di collasso generale fino alla generazione di *sinkholes*.

4.2 Risultati numerici e discussione

Considerata l'elevata variabilità delle caratteristiche fisiche e meccaniche della calcarenite tenera pleistocenica, inizialmente sono state condotte delle analisi parametriche per verificare l'influenza del valore della coesione dello stesso materiale, e quindi del loro sviluppo di resistenza al taglio, sulla risposta dell'ammasso allo scavo. Pertanto, il valore della coesione, c' , è stato fatto variare tra un valore minimo, $c' = 80$ kPa, ed un valore massimo, $c' = 200$ kPa, che possono essere considerati estremi di un intervallo di valori plausibili per lo stesso materiale. Tutti gli altri parametri sono stati mantenuti invariati e pari ai valori di riferimento in tabella 1. I risultati delle analisi sono mostrati per i due estremi del suddetto intervallo di coesione nelle figure 9a e 9b e nelle figure 10a e 10b, rispettivamente in termini di zone soggette a snervamento e deformazioni di taglio cumulate. Entrambe le figure 9a e 10a mostrano che, per valori elevati della coesione [$c' = 200$ kPa], si generano solo piccole aree plastiche e zone di taglio localizzate in corrispondenza dei vertici della cavità. Invece, le figure 9b e 10b indicano che, per valori prossimi al limite inferiore [$c' = 80$ kPa], per effetto dello scavo della galleria a partire dai vertici della cavità si sviluppano intere zone plastiche che delimitano un vero e proprio meccanismo di rottura per taglio lungo le pareti laterali del cavo con concavità rivolta verso l'apertura stessa. Un simile meccanismo di rottura locale sembra in accordo con le forme dei blocchi dislocati osservati in sito (Figure 5a e 5b). Successivamente, è stata verificata l'influenza sulla risposta allo scavo della resistenza del *mazzaro*, presente immediatamente al di sopra delle cavità, mediante analisi parametriche al variare del valore della coesione dello stesso materiale entro un intervallo compreso tra $c' = 160$ kPa e $c' = 400$ kPa. I risultati di queste analisi in termini di aree soggette a snervamento sono mostrati nelle figure 11a e 11b ed indicano come per valori della coesione del *mazzaro* prossimi al limite inferiore suddetto si formino zone plastiche che delimitano un cuneo esteso per tutta la volta della galleria. Tale meccanismo è in accordo con le tipiche forme arcuate delle rotture osservate in sito lungo le volte delle cavità.

Ulteriori analisi sono state condotte per la verifica degli effetti di presunti processi di imbibizione e di alterazione della calcarenite a ridosso del cavo, in accordo con quanto osservato diffusamente in sito, che possono indurre un eventuale decadimento delle resistenze meccaniche dello stesso materiale. In particolare, a partire dai parametri di riferimento riportati in tabella 1, è stata inizialmente simulata una progressiva riduzione della

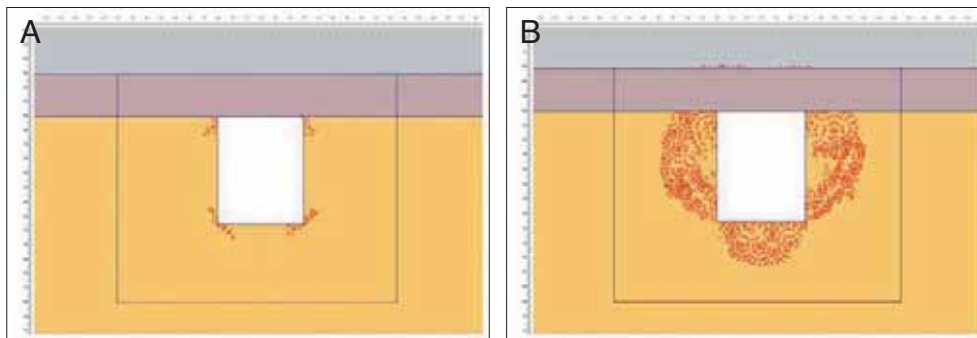


Fig. 9 - Analisi parametrica rispetto alla coesione della calcarenite tenera - zone plastiche: a) $c' = 200$ kPa; b) $c' = 80$ kPa

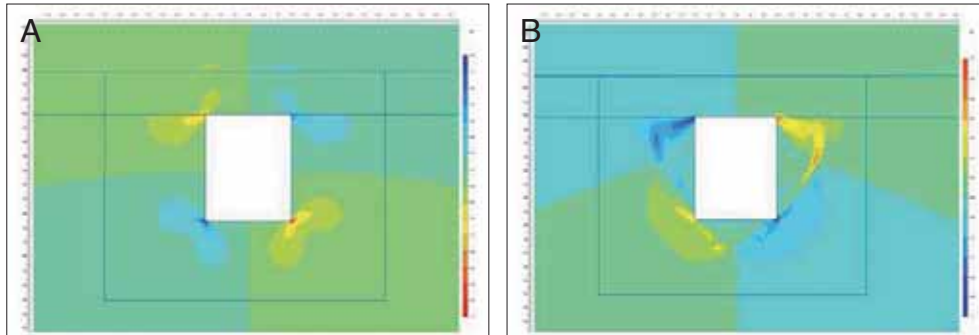


Fig. 10 - Analisi parametrica rispetto alla coesione della calcarenite tenera - isolinee delle deformazioni di taglio: a) $c' = 200 \text{ kPa}$; b) $c' = 80 \text{ kPa}$

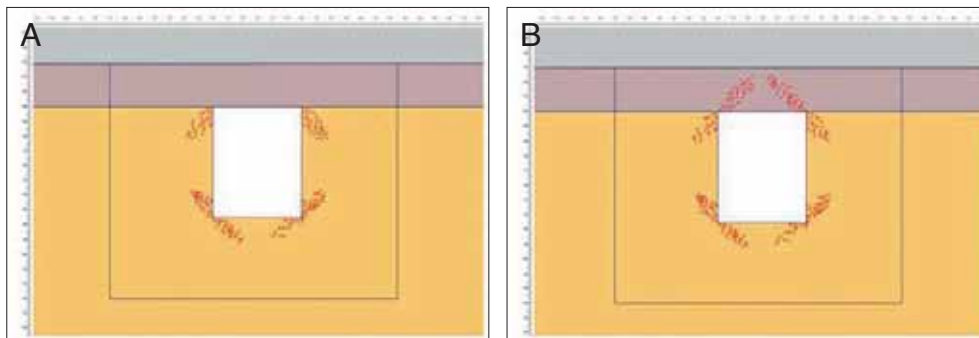


Fig. 11 - Analisi parametrica rispetto alla coesione del mazzaro - zone plastiche: a) $c' = 400 \text{ kPa}$; b) $c' = 160 \text{ kPa}$

coesione della calcarenite tenera lungo le pareti della cavità con grado di degradazione che è massimo sul contorno del cavo e si riduce verso l'interno dell'ammasso. In figura 12a è illustrato lo schema di calcolo adottato in questo caso con indicazione degli strati di materiale con caratteristiche degradate. I risultati delle analisi mostrano che un simile processo comporta la formazione di zone plastiche (Figura 12a) e zone di taglio inclinate verso l'alto a partire dalle pareti laterali del cavo (Figura 12b). Il livello delle deformazioni di taglio è particolarmente elevato nella zona di taglio che parte dall'estremità inferiore delle pareti della cavità. Un simile risultato sembra in sintonia con i meccanismi osservati in sito che prevedono la formazione di lesioni e rotture inclinate verso l'alto a partire dalla base delle pareti, che si chiudono nella parte alta ad isolare blocchi di calcarenite che poi scivolano verso l'interno della galleria. Un processo di degradazione della volta della galleria con riferimento allo strato del *mazzaro*, come probabile effetto di processi di percolazione di acqua dall'alto, induce invece zone di taglio (Figura 13a) e isolinee di spostamenti verticali (Figura 13b) che suggeriscono un meccanismo di rottura locale con formazione di una cupola lungo la volta.

Da ultimo, sono state condotte analisi per la simulazione degli effetti dell'incremento, sia in altezza che in larghezza, delle dimensioni delle cavità, come conseguenza dei processi di collasso locale fin qui descritti. La cavità è stata dunque allargata fino ad una dimen-

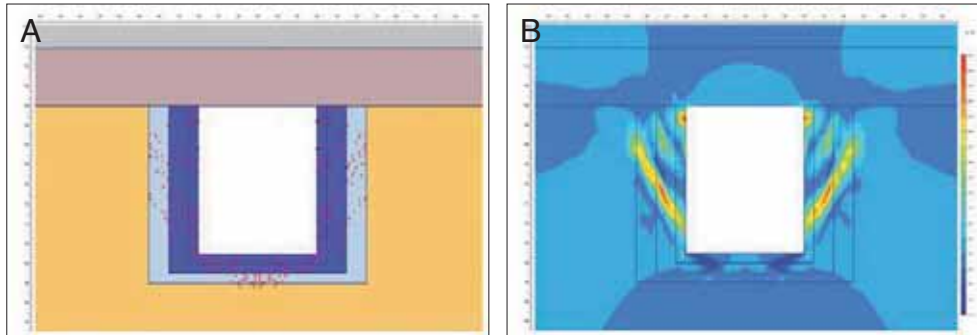


Fig. 12 - Analisi di degradazione della calcarenite tenera lungo le pareti laterali: a) zone plastiche; b) isolinee delle deformazioni di taglio

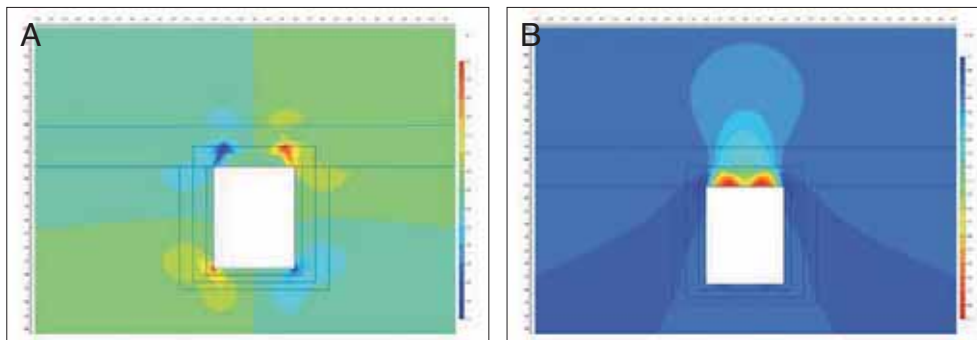


Fig. 13 - Analisi di degradazione del mazzaro: a) isolinee delle deformazioni di taglio; b) isolinee degli spostamenti verticali

sione pari a $B = 8$ m, valore massimo riscontrato per le gallerie in sito, e l'altezza della stessa è stata aumentata fino ad un valore massimo pari a $H_{max} = 9.5$ m. Questo incremento dell'altezza del cavo ha pertanto comportato un assottigliamento dello spessore del *mazzaro* fino ad un valore minimo di 0.5 m. Per spessori del *mazzaro* sul tetto della cavità superiori a questo valore minimo indicato, i risultati delle analisi hanno indicato una formazione di zone plastiche sia all'interno dello strato residuo del *mazzaro* che nella porzione argillosa immediatamente sovrastante, senza tuttavia compromettere la stabilità globale dell'ammasso sovrastante la galleria. Infatti, per queste analisi gli spostamenti verticali calcolati, del valore massimo di pochi centimetri, sono risultati concentrati solo in una piccola zona centrale al di sopra della volta della galleria. Invece, il raggiungimento del valore minimo suddetto di spessore del *mazzaro* al di sopra della cavità ($s = 0.5$ m) comporta la formazione di un meccanismo di collasso generale che richiama i fenomeni di sprofondamento osservati in superficie in alcuni punti al di sopra delle cave (Figg. 7a e 7b). Infatti, in queste ipotesi, le analisi mostrano zone plastiche che si estendono fino in superficie, dove peraltro si allargano in maniera significativa nello strato sabbioso (Fig. 14a), ed isolinee degli spostamenti verticali che indicano un meccanismo "a camino" tipico dei *sinkholes*, con valori di spostamento che aumentano fino a diverse decine di centimetri (Fig. 14b). Per questa analisi, inoltre, è stato osservato il mancato raggiungimento delle convergenze numeriche, che è indicatore di un processo di instabilità di tipo fisico.

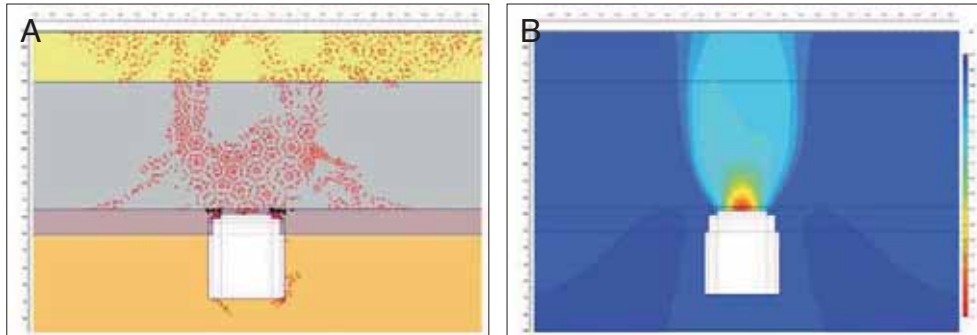


Fig. 14 - Analisi con variazione delle dimensioni della cavità: a) zone plastiche; b) isolinee degli spostamenti verticali accumulati

5. CONCLUSIONI

Analisi agli elementi finiti sono state sviluppate per indagare le caratteristiche ed i fattori all'origine dei processi di instabilità presenti all'interno delle cavità artificiali di Cutrofiano ed in generale per verificare le potenzialità dei metodi numerici nella previsione delle condizioni di stabilità delle cavità sotterranee.

I risultati numerici, per quanto preliminari, risultano in buon accordo con i meccanismi di rottura locale e generale osservati in sito. In particolare, le analisi indicano una significativa influenza nell'innesco dei processi suddetti di collasso delle basse resistenze meccaniche della calcarenite all'interno della quale sono state scavate le gallerie, di processi di scarico tensionale della roccia dovuti all'esecuzione dello scavo, nonché di processi di imbibizione ed alterazione della roccia a ridosso delle cavità. I modelli numerici hanno evidenziato altresì che l'eventualità di collassi generali del tetto delle cavità e dell'ammasso sovrastante, fino alla generazione dei *sinkholes*, sono la probabile conseguenza di variazioni progressive delle dimensioni delle cavità dovute ai processi di collasso interno fino al raggiungimento di dimensioni del cavo critiche per la stessa stabilità.

Sono previsti sviluppi futuri della ricerca finalizzati alla implementazione di modelli costitutivi maggiormente adatti a rappresentare la reale risposta meccanica delle rocce calcarenitiche qui discusse, così come alla simulazione di condizioni al contorno maggiormente realistiche ed in accordo con ulteriori avanzamenti previsti nella comprensione dei processi in sito da un punto di vista fenomenologico.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Giampiero Donno e Salvatore Inguscio per alcune delle fotografie all'interno delle cave sotterranee.

BIBLIOGRAFIA

- CALÒ G.C. GNONI R. & STANI M. [1991] - *Caratteri idrogeologici delle falde superficiali della Penisola Salentina e valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Amministrazione Provinciale di Lecce.
- CALÒ G.C. MELIDORO G. & MONTERISI L. [1992] - *Recupero tecnico-economico di cave sotterranee in rocce calcarenitiche della Provincia di Lecce*. Eurocave '92, Saint-Vincent.

- CALÒ G.C. LUCREZIO D. POLITO L.A. SPIZZICO V. & TINELLI R. (2006) - *Un nuovo piano di coltivazione per il rilancio dell'attività estrattiva a Cutrofiano (Penisola Salentina, Puglia)*. Atti Conv. "Le risorse lapidee dall'antichità ad oggi in area mediterranea", Canosa di Puglia, 25-27 settembre 2006, 351-356.
- CHERUBINI C. & GIASI C.I. (1993) - *Problemi di stabilità di cavità derivanti dall'estrazione di tufo in sotterraneo*. Convegno Internazionale "Le pietre da costruzione: il tufo calcareo e la pietra leccese", Bari.
- CIARANFI N. PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. Memorie Società Geologica Italiana, **41**, 449-460.
- COTECCHIA V. (1953) - *Osservazioni geologiche e materiali naturali per la fabbricazione di cemento e laterizi nella zona di Galatina (Lecce)*. Annali della Facoltà di Ingegneria, Università di Bari, **1**, 193-214.
- COTECCHIA V. CALÒ G. & SPILOTRO G. (1985) - *Caratterizzazione geolitologica e tecnica delle calcareniti pugliesi*. III Convegno Nazionale su Attività Estrattiva dei minerali di 2^a categoria, Bari, 209 - 216.
- DE PASCALIS A., DE PASCALIS F. & PARISE M. (2010) - *Genesi ed evoluzione di un sinkhole connesso a cavità antropiche sotterranee nel distretto estrattivo di Cutrofiano (prov. Lecce, Puglia)*. Presente volume.
- DOBEREINER L. & DE FREITAS M.H. (1986) - *Geotechnical properties of weak sandstones*. Géotechnique, **36**, 79-94.
- DYKE C.G. & DOBEREINER L. (1991) - *Evaluating the strength and deformability of sandstones*. Quart. J. Eng. Geol., **24**, 123-134.
- ISRM (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS) (1979) - *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials*. Int. J. Rock Mech & Min. Sci, **16**, 2, 135-140.
- JENG F.S. WENG M.C. LIN M.L. & HUANG T.H. (2004) - *Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of tertiary sandstones from Taiwan*. Engineering Geology, **73**, 71-91.
- PARISE M., DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., DONNO G. & INGUSCIO S. (2008) - *Cavità sotterranee a fini estrattivi, e loro connessione con fenomeni di sprofondamento e subsidenza in agro di Cutrofiano (Lecce)*. Atti "Spelaion 2006", Borgo San Celano (FG), 55-69.

RISCHI DI CROLLO CATASTROFICO DI CAVITÀ ANTROPICHE: LE EX GALLERIE MINERARIE DI GESSO ALLAGATE DI SANTA BRIGIDA (BG) – STUDI, MODELLAZIONI ED OPERE PILOTA DI CONSOLIDAMENTO

di May A.¹, Carsana M.², Castellanza R.³, Spada M.⁴, Orlandi G.M.⁴, Bianchi S.⁴, Bertolini L.²

ABSTRACT

The paper describes studies, design choices and operational modes of the site pilot intervention for the consolidation of cavities under risk of collapse of a flooded and abandoned gypsum mine, in the municipality of Santa Brigida (BG).

The underground mining activity, using the “room and pillar method”, ended about 40 years ago. Two of the four levels of the mine are currently flooded with a volume of water of more than 60,000 m³.

Water continuously flows to circulate through the soil causing the degradation of evaporites and increasing the risk of collapse.

A catastrophic scenario collapse of the pillars and consequent pushing water pressure towards the village below are possible in the future.

To reproduce in the laboratory the different conditions of degradation on site, more than 200 samples of gypsum and anhydrite, taken from the abandoned mine, have been degraded by immersion in water, both under still or flow conditions.

Results of laboratory test were used for the calibration of a mathematical model able to estimate the trend of reduction over time of the bearing capacity of the pillar and to predict the time of collapse of the pillars.

To consolidate the flooded and inaccessible cavities, a novel technique was developed for filling of the cavities. A soil-cement mixture was injected in the cavities of the mine from outside.

The mixture was especially designed within tight economic constraints and technical characteristics: high fluidity that allows the material to replace the water, moving in the cavity for long distance as well as stability and cohesion to enable the mixture to flow under-water. Also long term stability in contact with sulphate water and a strength comparable to that of compacted soil were required.

Finally, a real scale pilot project was carried out in order to fill, in two steps, about 13000 m³ of cavities.

1 Regione Lombardia, D.G. Territorio ed Urbanistica, Milano, Italia

2 Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G. Natta”, Milano, Italia

3 Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Milano, Italia

4 Studio associato di geologia Spada, Ranica (BG), Italia

1. INTRODUZIONE

I siti minerari abbandonati rappresentano spesso situazioni di rischio significativo, sia diretto che indiretto, per il territorio interessato; gli interventi di messa in sicurezza sono generalmente costosi e complessi a causa delle difficili condizioni di accessibilità, soprattutto quando le gallerie sono state invase dall'acqua.

Nel caso oggetto del presente articolo sono state messe a punto metodologie di analisi del rischio e soluzioni tecniche fortemente innovative per risolvere un problema delicato e complesso che coinvolge la sicurezza di un centro abitato. L'intervento è stato finanziato da Regione Lombardia con fondi messi a disposizione dal Ministero dell'Ambiente ed è stato sviluppato attraverso un processo di stretta collaborazione che ha coinvolto la pubblica amministrazione, i professionisti incaricati, il mondo universitario, la stessa impresa appaltatrice. Si vuole così dare un contributo al confronto aperto fra esperti in ordine alle problematiche poste per la sicurezza di abitati e infrastrutture dalla presenza nel sottosuolo di materiali solubili, riferibili alla categoria delle evaporiti.

1.1 Inquadramento geologico ed idrogeologico e definizione del problema

Il caso presentato riguarda la messa in sicurezza di un sito minerario dismesso, localizzato immediatamente a monte dell'abitato di Santa Brigida, in Provincia di Bergamo; si tratta di una miniera di gesso e anidrite, coltivata con il metodo a camere e pilastri all'interno di un orizzonte evaporitico sovrastato da un potente complesso dolomitico al cui interno è sviluppata un'intensa circolazione idrica. Dopo l'abbandono, avvenuto negli anni 60, la parte inferiore della miniera è stata invasa dall'acqua che sta provocando la progressiva dissoluzione dei pilastri, lasciati in posto dall'attività estrattiva, con il rischio nel medio termine di un collasso dell'intera struttura.

Le rocce evaporitiche, oggetto dell'attività estrattiva, sono costituite da gessi e anidriti appartenenti alla formazione di San Giovanni Bianco (SGB), un'articolata successione di depositi clastici, prevalentemente silicatici, carbonati ed evaporiti, sedimentata in ambiente marino poco profondo nel contesto di profonda trasformazione climatica e paleogeografica connesso alle fasi iniziali dell'apertura del bacino tetideo. Alla variabilità laterale del bacino si aggiungono gli effetti delle deformazioni tettoniche che hanno portato a un assetto articolato, con evaporiti in corpi lenticolari in contatto tettonico con formazioni diverse. In particolare, in territorio di Santa Brigida sono presenti lenti di gessi e anidriti inglobate all'interno di orizzonti terrigeni e sovrastate per sovrascorrimento dalla Dolomia Principale (DB), del Norico, interessata da un'intensa circolazione idrica a carattere carsico (Fig. 1).

Le evaporiti sono state oggetto di attività estrattiva, con sviluppo di tre significativi siti minerari ora abbandonati e individuati come aree a elevato rischio idrogeologico ai sensi della L. 267/98 (Fig. 2a) successivamente confermate nell'ambito del Piano Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Po. Fra queste la Cava Carale è considerata la più pericolosa in quanto è posta immediatamente a monte di un centro abitato ed in caso di collasso l'acqua contenuta nei livelli allagati verrebbe espulsa con violenza e andrebbe a investire le case.

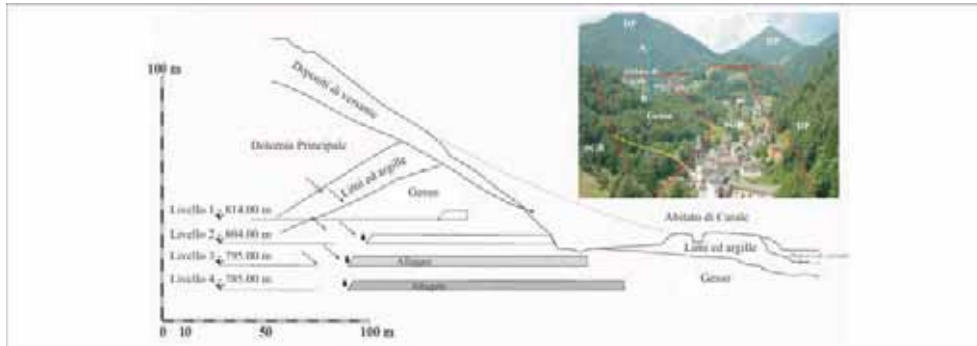


Fig. 1 - Sezione geologica schematica attraverso la ex Cava Carale e vista panoramica dell'area di intervento con indicazione dei principali contatti geologici
 Geological profile of Carale mine, showing the flooded levels and panoramic view with main geological structures

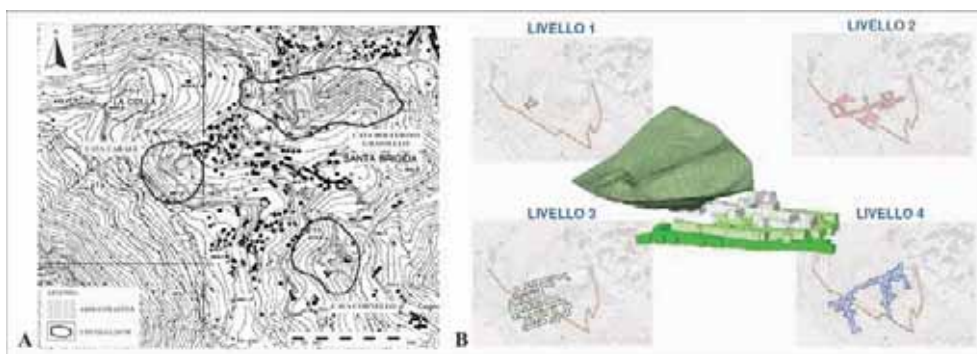


Fig. 2 - Ubicazione dei poli estrattivi di gesso e perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico L. 267/98 a) planimetrie dei livelli minerari e rendering 3D della ex cava Carale b)
 Location of abandoned gypsum mines and contour of hydrogeological risk L. 267/98 a) planimetry and 3D rendering of Carale mines b)

La rappresentazione tridimensionale di Fig. 2b illustra l'articolazione della cava Carale: l'attività estrattiva si è svolta su quattro livelli, due dei quali interamente allagati; complessivamente le cavità relitte ammontano ad oltre 70.000 m³.

1.2 Ipotesi di intervento

La soluzione individuata prevede il riempimento delle gallerie allagate attraverso l'iniezione dalla superficie di una miscela di acqua, terreno e cemento in proporzioni adeguate. Tale miscela consolidandosi assolve al duplice ruolo di riempire i vuoti, sostenendone le pareti e la volta in caso di cedimento dei pilastri e di scacciare la maggior parte dell'acqua. Gli aspetti più delicati dell'operazione sono stati rappresentati dalla messa a punto della composizione della miscela e della tecnologia di miscelazione e iniezione della stessa con modalità e caratteristiche tali da riempire e raggiungere un livello adeguato di consistenza all'interno di cavità invase da un'acqua ricca di solfati. Alcune soluzioni operative sono

state messe a punto direttamente in cantiere durante i lavori per la realizzazione dell'intervento pilota.

Lo sviluppo della soluzione ha compreso i seguenti passaggi:

- Valutazione del rischio: modellazione del processo di degrado dei pilastri che sostengono le cavità, individuazione delle modalità di crollo, stima del tempo disponibile prima che la perdita di capacità portante porti al collasso del sito.
- Progettazione della miscela di riempimento e valutazione sperimentale in laboratorio delle caratteristiche ottenute.
- Sviluppo di un progetto pilota che ha compreso il riempimento di circa 6.000 metri cubi di gallerie allagate nel livello 4.
- Costruzione dell'impianto di lavorazione di cantiere per la preparazione, miscelazione e iniezione della miscela.
- Prove in sito e di laboratorio per verificare i risultati del progetto pilota.
- Miglioramento delle soluzioni tecnologiche e sviluppo dell'intervento per lotti funzionali.
- Monitoraggio a lungo termine.

2. STIMA DEI TEMPI DI COLLASSO DI PILASTRI E DEGLI EFFETTI DEL MATERIALE DI RIEMPIMENTO

L'obiettivo primario delle fasi di studio che hanno preceduto l'intervento di messa in sicurezza è duplice; da un lato, infatti, è necessario stimare il tempo di collasso dei pilastri di gesso immersi in acqua nei livelli allagati al fine di valutare la gravità del rischio del sistema minerario, dall'altro è necessario definire i requisiti del materiale di riempimento al fine di valutarne l'efficacia.

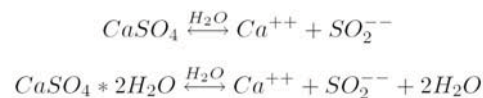
L'approccio metodologico utilizzato è caratterizzato dalle seguenti fasi:

- 1 realizzazione di un'ampia campagna sperimentale al fine di valutare il decadimento delle proprietà meccaniche del gesso e dell'anidrite indotto dall'immersione in acqua in differenti condizioni (flusso non saturo e acqua in quiete con differenti gradi di saturazione);
- 2 sviluppo di un modello analitico per la stima del tempo di collasso dei pilastri; calibrazione sulla base delle prove sperimentali effettuate ed utilizzo come modello previsionale;
- 3 sviluppo di un modello analitico capace di valutare l'efficacia del materiale di riempimento in termini di riduzione del cedimento finale e di allungamento dei tempi di collasso.

Nel seguito verranno presentati sinteticamente i risultati ottenuti in ciascuna delle fasi svolte, per dettagli ed approfondimenti si rimanda alle pubblicazioni citate in seguito.

2.1 Evidenze sperimentali del decadimento delle proprietà meccaniche di anidriti e gesso

Quando l'anidrite o il gesso vengono a contatto con l'acqua si attiva un processo di dissoluzione governato dalle seguenti relazioni chimiche:



Vari Autori (Gysel, 2002, Giambastiani et al., 2004, Raines and Dewers, 1991) hanno studiato i meccanismi di dissoluzione di anidriti e gessi. In questo paragrafo si ricorda solamente che la solubilità dell'anidrite in acqua a 20° è pari 3.0 kg/m³, mentre quella del gesso è pari a 2.5 kg/m³.

Tale processo di dissoluzione interessa principalmente quei pilastri delle miniere abbandonate immersi in acqua.

Per riprodurre in laboratorio le differenti condizioni di degradazione presenti in sito, più di 200 campioni di materiale intatto di gesso ed anidrite, prelevati dalla Cava Carale sono stati degradati mediante immersione in acqua sia in condizioni di quiete sia in condizioni di flusso.

In Fig. 3 e Fig. 4 vengono riportati i risultati della riduzione del carico di rottura di provini cilindrici di anidrite e gesso di 25 mm di diametro e 50 mm di altezza immersi in acqua per differenti tempi di degradazione.

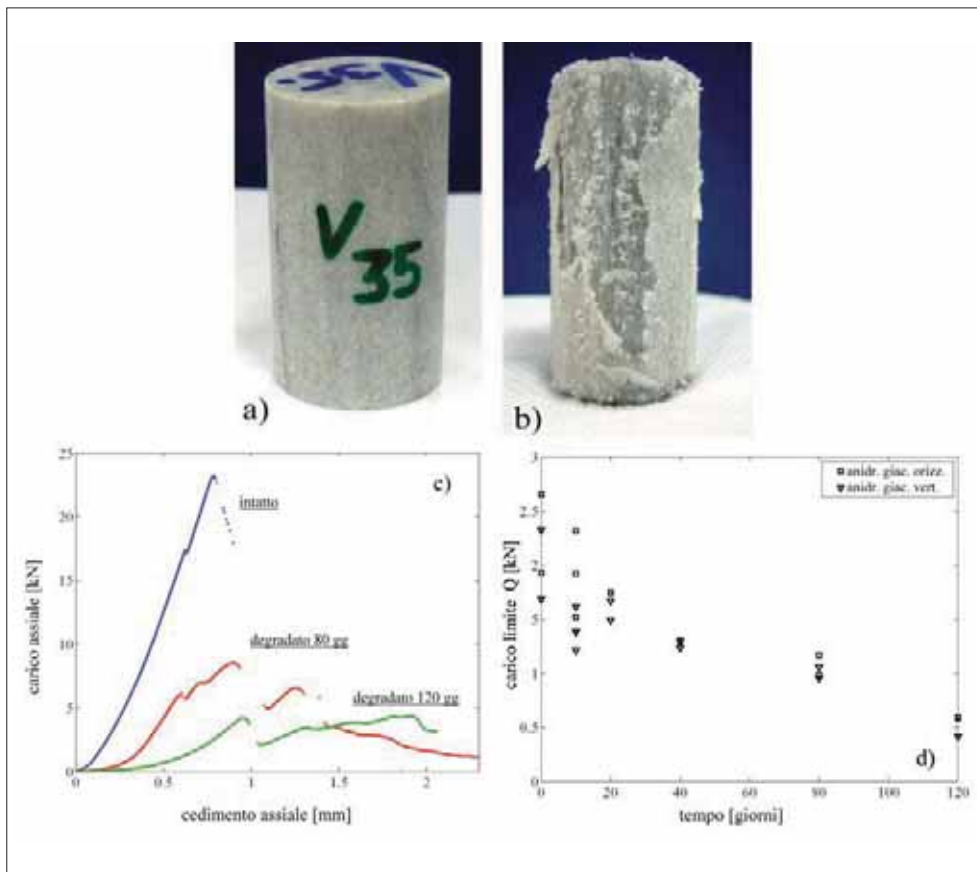


Fig. 3 - a) anidrite intatta; b) anidrite degradata [immersione per 120 giorni in acqua in quiete]; c) e d) prove monoassiali e riduzione del carico ammissibile in funzione del tempo di immersione in acqua in quiete.

Anhydrite: a) surface of an intact specimen; b) surface of a weathered specimen after 120 days in still water; c) e d) uniaxial load tests and reduction of bearing capacity limit load with time exposure to still water.

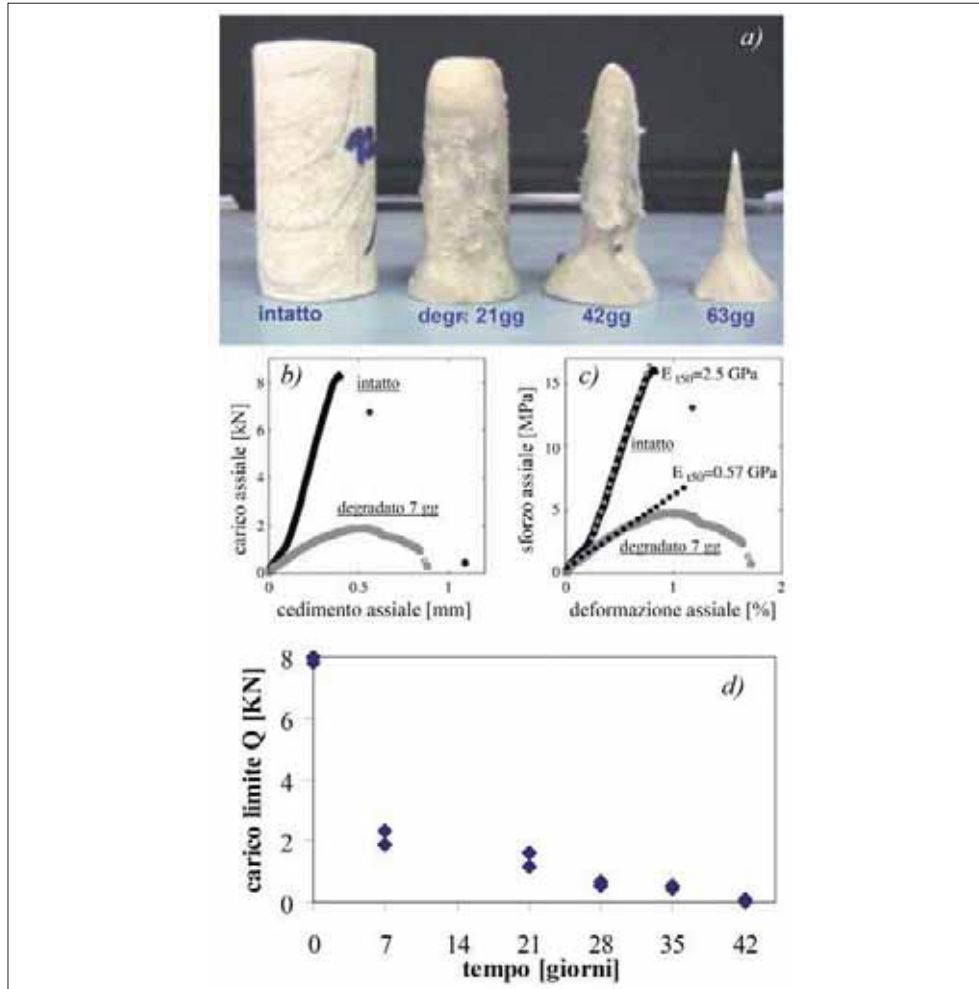


Fig. 4 - a) campioni di gesso al crescere del tempo di immersione in flusso di acqua; b) e c) prove mono-assiali; d) riduzione del carico ammissibile in funzione del tempo di immersione in flusso d'acqua.
 Gypsum: a) specimen shape evolution induced by dissolution; b) e c) uniaxial compression tests; d) reduction of limit load with time exposure to water flux

Inoltre, come mostrato in Fig. 5, sono state effettuate circa 10 prove che hanno riprodotto in scala 1:2000 il collasso di un pilastro immerso in un flusso d'acqua non saturo. L'intera campagna sperimentale effettuata è descritta in CASTELLANZA E NOVA (2009) ed in CASTELLANZA *et al.*, (2009).

2.2 Stima del tempo di collasso di pilastri immersi in acqua

La miniera ha una struttura a "camere-pilastri" e si sviluppa su quattro livelli, due dei quali allagati. Benché le dimensioni dei pilastri siano variabili così come la posizione dei loro assi verticali, si può ammettere in prima approssimazione che la miniera abbia la struttura

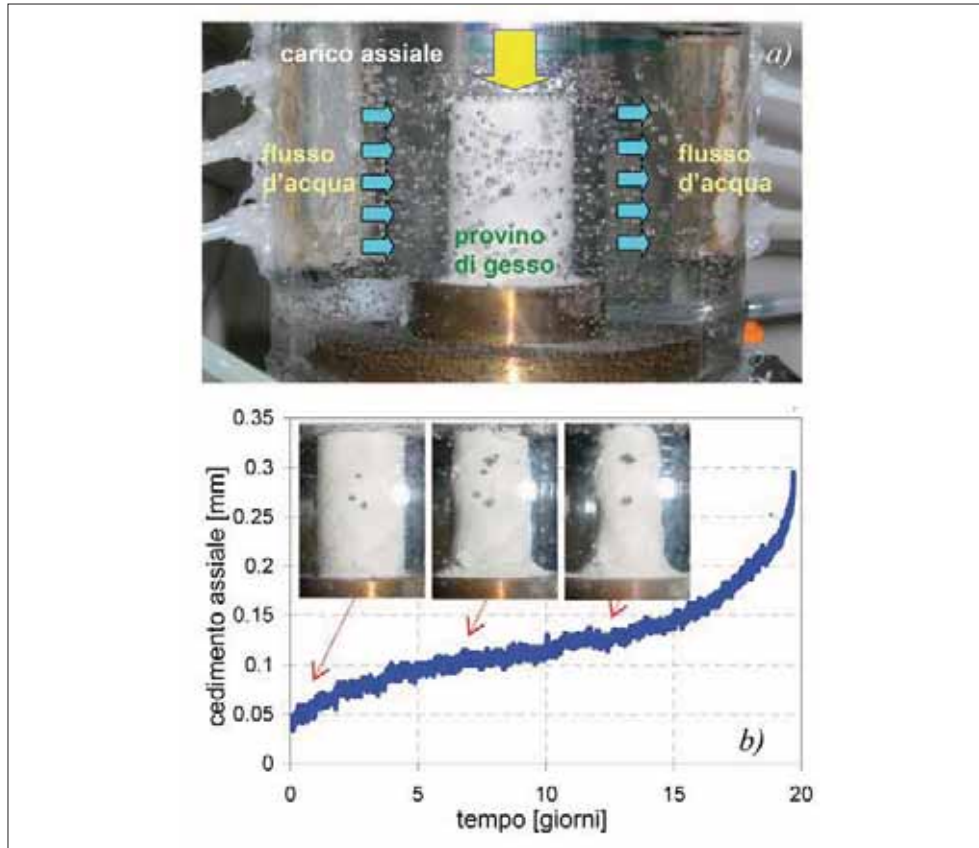


Fig. 5 - a) provino sotto carico immerso in un flusso d'acqua non saturo; b) variazione nel tempo dei cedimenti verticali indotti dall'alterazione fino al collasso.

a) loaded specimen in water flux; b) variation with time of axial displacement induced by weathering until collapse.

periodica indicata in Fig. 6a. Si può allora immaginare che essa sia costituita da celle elementari tutte uguali come quella raffigurata in Fig. 6b.

Si potrà allora studiare il comportamento di una singola cella: il collasso del pilastro corrisponderà, in virtù della periodicità della struttura, al contemporaneo collasso dei pilastri che si trovano allo stesso livello. Quindi il collasso del singolo pilastro sarà associato al collasso dell'intera miniera. Si noti che, benché fortemente idealizzata, tale situazione non è molto lontana dal vero. Anche se i carichi e la geometria dei pilastri sono disomogenei, il collasso di un pilastro provoca l'automatica redistribuzione del carico sui pilastri dello stesso livello di scavo. Il peso della roccia sovrastante deve essere infatti comunque sostenuto per garantire l'equilibrio alla traslazione verticale: se un pilastro cede, gli altri si troveranno a sostenere il carico in precedenza portato da quel pilastro. Come risultato, i pilastri non ancora in condizioni di collasso si troveranno a dover portare un sovraccarico che potrà causare il collasso di un pilastro fino a quel momento in sicurezza, innescando così un effetto domino. Il collasso dell'intera miniera sarà quindi molto prossimo a quello del collasso del primo pilastro.

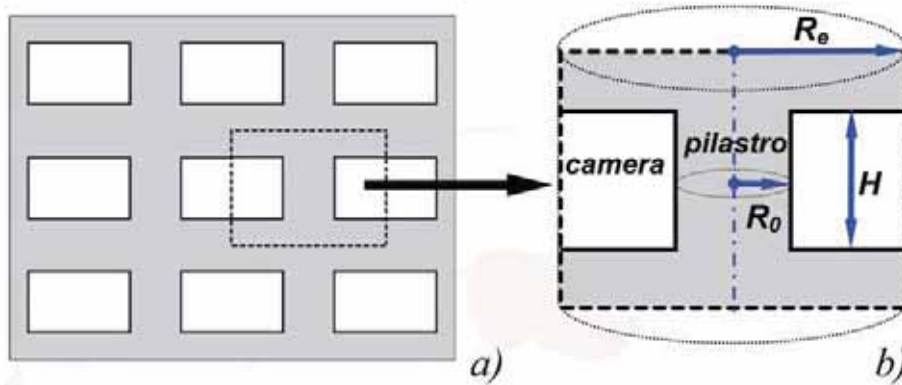


Fig. 6 - a) Sezione semplificata della miniera; b) cella elementare
a) Mine with pillar and chamber structural layout; b) elementary cell

Per ovvie ragioni di semplicità, la cella verrà considerata assialsimmetrica e quindi il pilastro cilindrico di raggio R_0 . Inoltre per ragioni di simmetria sarà necessario che non si verifichino spostamenti radiali dei confini della cella.

Si è assunto inoltre che l'acqua venga assorbita dal gesso in accordo con la cosiddetta "Sharp Front Theory" (Teoria del fronte netto) [GREEN AND AMPT, 1911, PHILIP, 1969]. Con opportune semplificazioni, così come riportato in NOVA E CASTELLANZA [2009] ed in CASTELLANZA *et al.*, (2008) è possibile assumere che l'avanzamento del fronte di saturazione r_f in funzione del tempo possa essere approssimato dalla seguente equazione:

$$r_f = R_0 - \alpha\sqrt{t} \quad [1]$$

Per descrivere gli effetti della riduzione della resistenza del materiale dei pilastri si è sviluppato un modello teorico basato sulle ipotesi mostrate in Fig. 7a. Non appena la roccia viene a contatto con l'acqua [agente degradante] si ha un'immediata perdita di resistenza monoassiale $\Delta\sigma_0$ pari a $\gamma\sigma_{c0}$, successivamente la resistenza si riduce linearmente nel tempo in funzione del parametro β ed infine tale riduzione avanza verso l'interno del pilastro (o provino) assialsimmetrico in funzione al parametro α secondo l'eq. 1. Si avrà allora che ad un dato istante t la resistenza a compressione di σ_c un elemento di volume di gesso rispetto al valore iniziale σ_{c0} sarà data da:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}} = (1 - \gamma) [1 - \beta(t - t_w)] \quad \forall t_w \leq t \leq t_v = t_w + \frac{1}{\beta} \quad [2]$$

dove t_w è il tempo misurato dall'inizio del processo d'infiltrazione per cui il fronte bagnato raggiunge il punto considerato e t_v il tempo nel quale la resistenza a compressione si annulla. Per stimare il carico ammissibile in funzione del tempo $Q(t)$ è necessario integrare la resistenza monoassiale sull'intera sezione del pilastro secondo la seguente equazione:

$$Q = \int_0^{R_0} \sigma_c(r) 2\pi r dr \quad [3]$$

In Fig. 7b viene riportato, per differenti valori di $\hat{\beta}$ (dove $\hat{\beta} \equiv R_0^2 \beta / \alpha^2$), l'andamento di $Q(t)$ normalizzato rispetto al valore del massimo carico ammissibile $Q_0[t_0]$ (pilastro intatto) rispetto alla variabile temporale adimensionalizzata $\hat{x} \equiv \alpha t / R_0$.

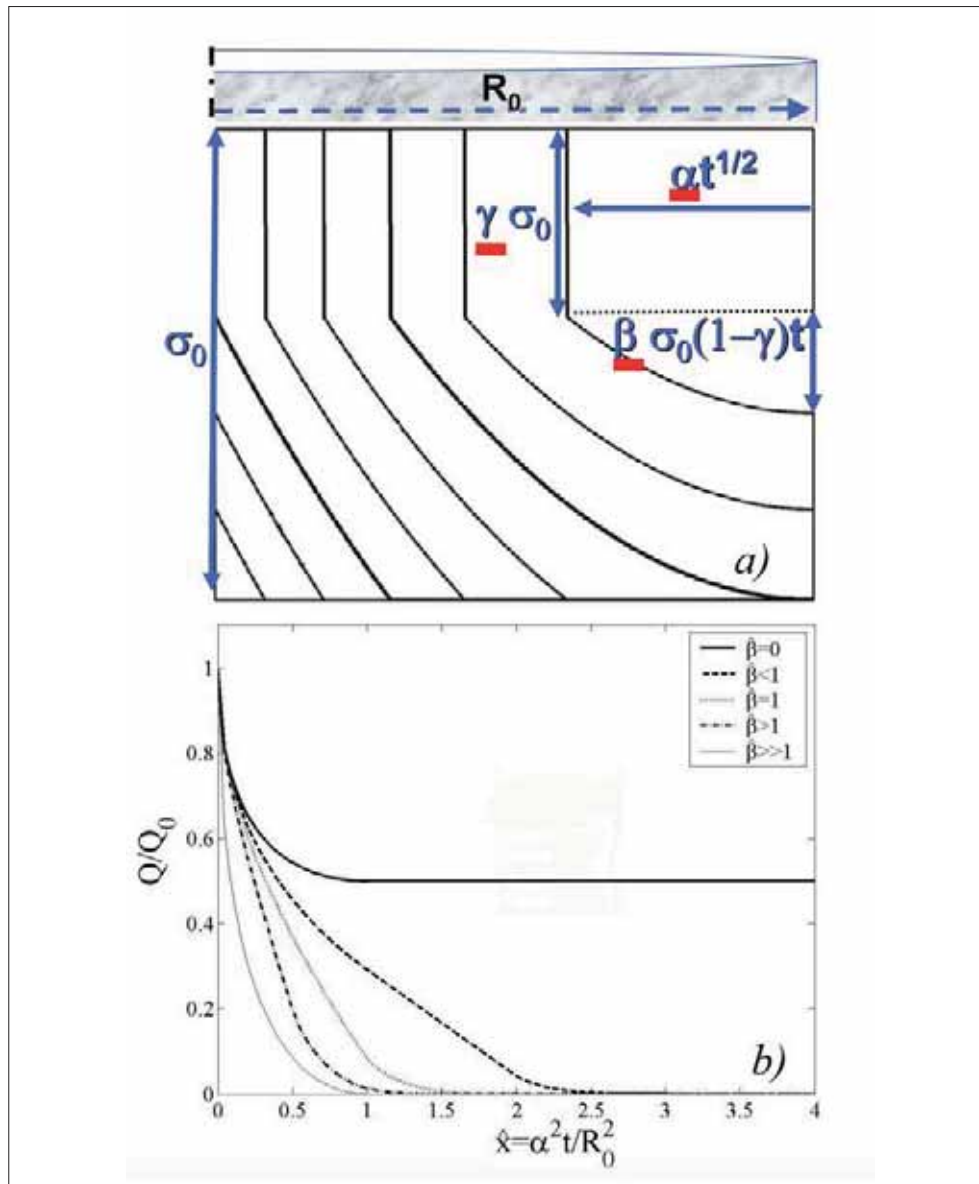


Fig. 7 - a) isocrone dell'evoluzione della resistenza a compressione nel pilastro, b) riduzione della carico ammissibile in funzione del tempo adimensionalizzato per differenti valori del parametro $\hat{\beta}$. a) strength isochrones within the pillar; b) normalised variation with time of bearing capacity for different $\hat{\beta}$.

Utilizzando i dati sperimentali mostrati in Figg. 3d e 4c è possibile validare il modello e stimare i tre parametri α , β , γ (dove $\gamma = \Delta\sigma_0 / \sigma_{c0}$) che caratterizzano gli effetti della degradazione di provini d'anidride con giacitura verticale immersi in acqua in quiete (Fig. 8a) e quelli che caratterizzano la degradazione del gesso immersi in un flusso d'acqua (Fig. 8b).

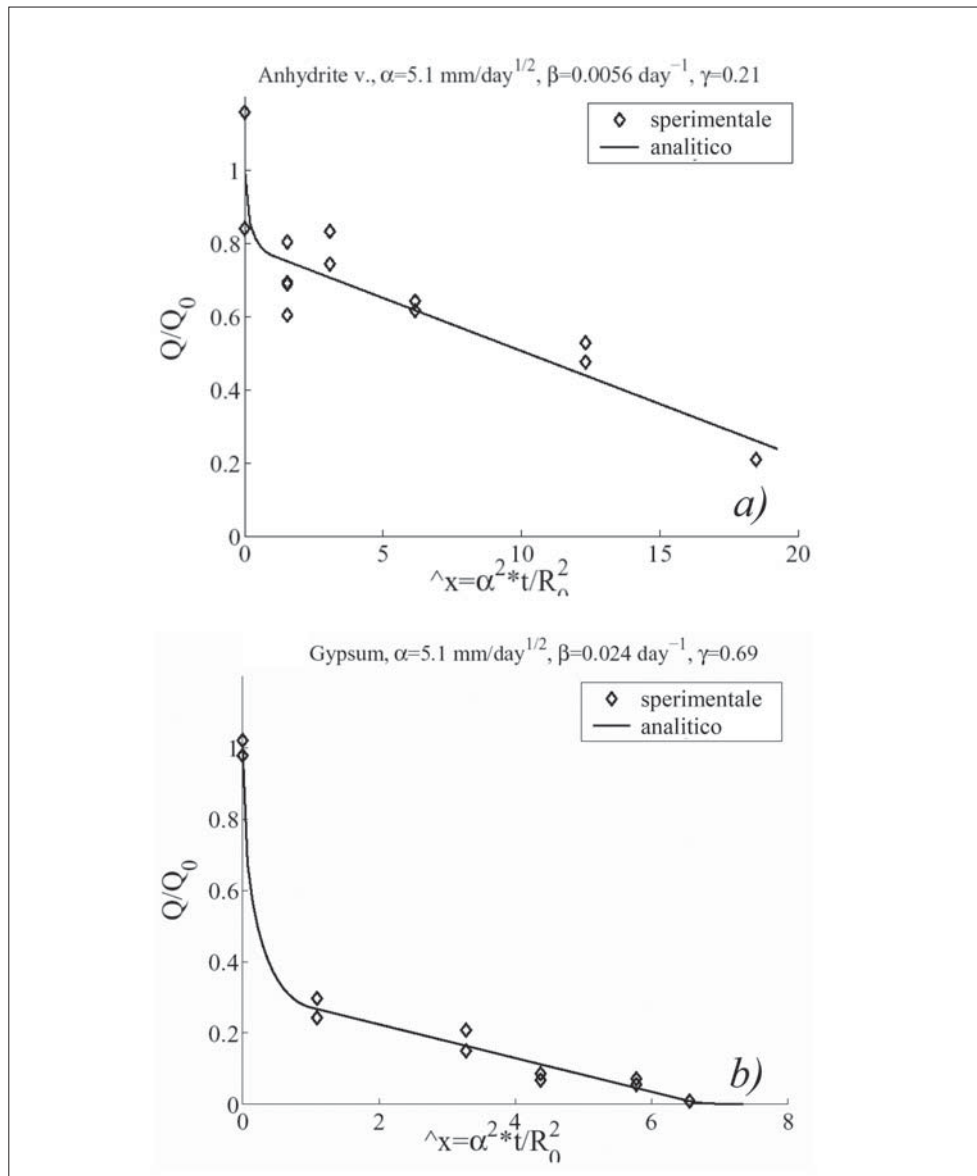


Fig. 8 - a) Calibrazione del modello sui dati sperimentali di Figg. 3 e 4: a) anidride; b) gesso
 a) Model calibration based on Fig. 3 - 4 experimental data: a) anhydrite; b) gypsum

Sulla base dei parametri del modello stimati, è ora possibile eseguire una previsione dei tempi di collasso per pilastri cilindrici al variare del raggio iniziale R_0 e dello stato tensionale medio agente sulla sezione del pilastro in conseguenza del carico geostatico di strati superiori. In Fig. 9a si riporta la previsione per un pilastro di gesso ed in Fig. 9b l'abaco che fornisce i tempi di collasso al variare del raggio R_0 e dello stato tensionale in sito. Per tutti i dettagli del lavoro presentato si rimanda a CASTELLANZA *et al.*, (2008).

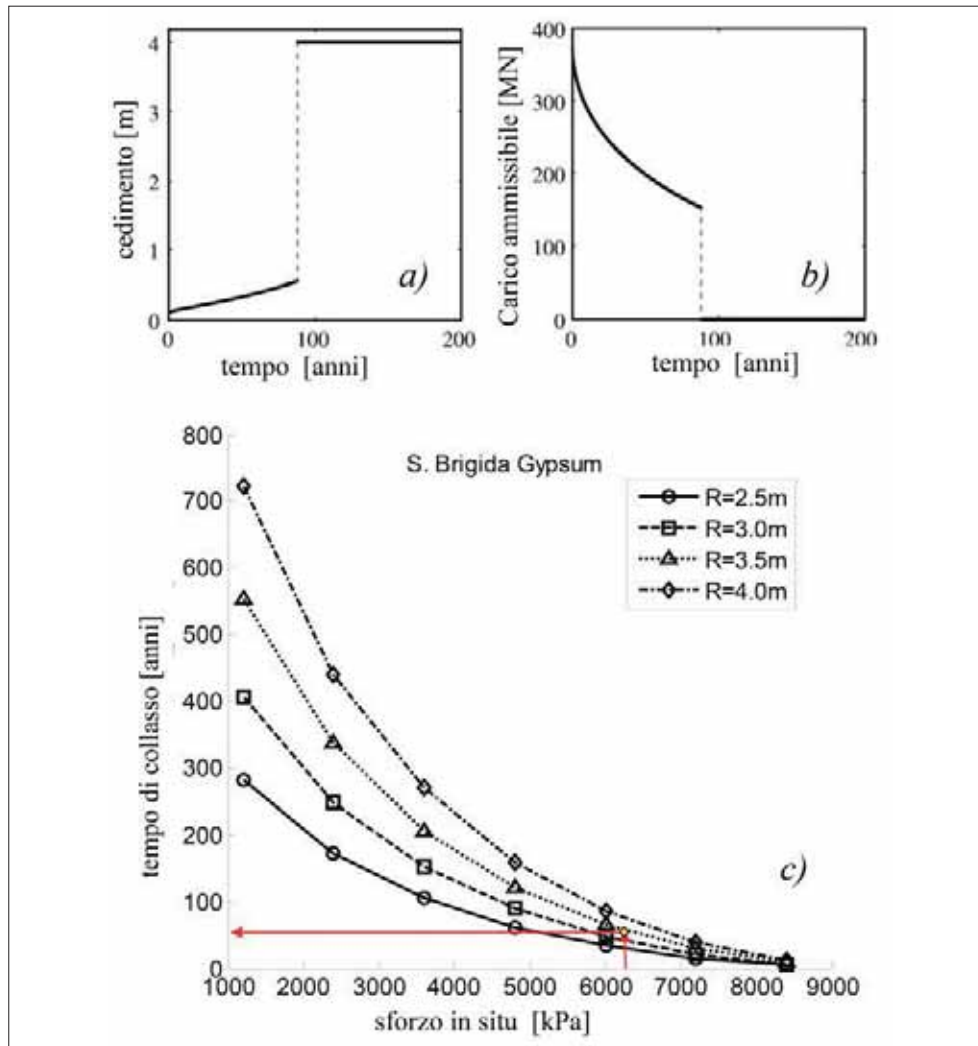


Fig. 9 - a e b): cedimento e carico ammissibile in funzione del tempo di degradazione; il collasso è rappresentato dalla discontinuità; c) Stima del tempo di collasso di pilastri di gesso in funzione del raggio iniziale e dello stato tensionale medio in situ (CASTELLANZA *et al.*; 2008).

a) and b) Displacement and sustainable load as a function of time, when no remediation measures are taken; c) Estimated collapse times for gypsum pillars as a function of the initial radius and stress in situ (CASTELLANZA *et al.*, 2008).

2.3 Modellazione dell'intervento di riempimento

Per evitare che il crollo di un pilastro causi la formazione di un camino nell'ammasso roccioso, è necessario che il carico che il pilastro non può più sostenere venga trasferito altrove. Ciò può essere realizzato riempiendo la cavità, attualmente allagata, con inerti, che possano comprimersi gradualmente a mano a mano che il pilastro perde rigidità a causa del danneggiamento provocato dall'infiltrazione dell'acqua all'interno del pilastro. Il materiale di riempimento deve però avere proprietà in qualche modo contrastanti tra loro. Esso deve essere messo in posto in condizioni pressoché liquide perché le cavità vengano riempite completamente, perché l'inerte possa svolgere la sua funzione di ammortizzatore degli spostamenti dell'ammasso roccioso non più sostenuto dal pilastro. Deve quindi avere inizialmente resistenza al taglio pressoché nulla in modo da avere un angolo di riposo nullo o quasi. D'altro canto è chiaro che, affinché i cedimenti dell'ammasso roccioso siano limitati è necessario che il materiale iniettato acquisti nel tempo una certa rigidità, in modo da opporsi agli spostamenti indotti dall'ammasso stesso.

Si è dunque pensato di iniettare nelle cavità una miscela di terra, acqua e cemento che possedesse opportune caratteristiche meccaniche. Il problema era quindi duplice. Da un lato era necessario stimare quali debbano essere le caratteristiche meccaniche ottimali della miscela (come si vedrà sono rilevanti allo scopo il modulo elastico e il coefficiente di permeabilità). Dall'altro, una volta stabilite queste caratteristiche, era necessario trovare un'opportuna combinazione delle tre componenti della miscela perché essa godesse proprio delle caratteristiche desiderate. Nel seguito ci si occuperà sinteticamente della prima parte di questo problema lasciando ad altri (BERTOLINI *et al.*, 2010) il compito di affrontare il secondo problema nella sezione successiva.

Si tratta dunque di studiare come il carico si trasferisca dal pilastro al materiale di riempimento, immaginando a favore di sicurezza, che la presenza del riempimento non alteri il processo di degradazione dei pilastri e che l'acqua contenuta all'interno dei pori della miscela possa drenare attraverso la roccia (fortemente fratturata) a mano a mano che la miscela viene compressa. Si assumerà inoltre, per ragioni di simmetria, che il flusso dell'acqua possa avvenire solo in direzione verticale e che ciascun pilastro sia circondato uniformemente da un cilindro riempito di miscela, come illustrato in Fig. 10. Ancora per ragioni di simmetria, gli spostamenti orizzontali al contorno dovranno essere nulli. L'insieme pilastro-cilindro di miscela si comporta quindi come un grosso edometro. A differenza di quanto avviene in un edometro normale, però, la tensione verticale non è costante ma dipende dal fatto che il punto considerato appartenga al pilastro o alla miscela.

In condizioni iniziali, quando la miscela non è ancora stata iniettata o non ha ancora raggiunto il tetto della camera, il carico sul pilastro vale Q e quindi lo sforzo verticale medio nel gesso, $\bar{\sigma}_g$, vale Q/A_g , dove A_g è l'area iniziale della sezione del pilastro. La tensione verticale nella miscela, σ_f , [in eccesso rispetto a quella dovuta al peso proprio, che non è rilevante nel problema in esame, perché il trasferimento di carico del pilastro alla miscela avviene dopo che si sono sviluppati i cedimenti dovuti al peso proprio sia del pilastro che della miscela] è invece nulla.

Una volta che la miscela raggiunge il tetto della camera, il processo di trasferimento di carico può (lentamente) avvenire. Questo istante verrà considerato quindi associato a $t = 0$. Per l'equilibrio alla traslazione verticale si avrà in ogni istante t successivo

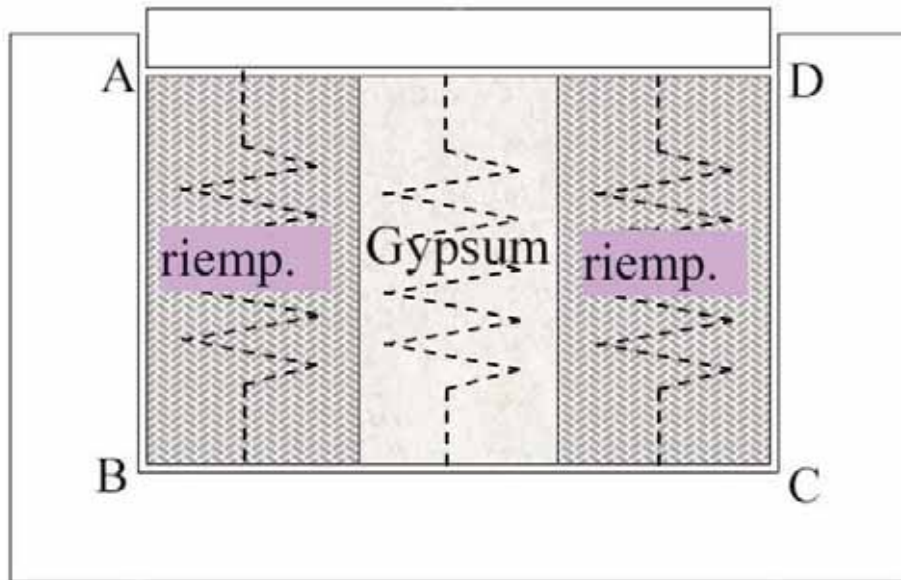


Fig. 10 - Condizioni edometriche assunte per l'insieme pilastro-cilindro.
Assumed mine conditions after chamber filling.

$$Q = \bar{\sigma}_g(t) A_g(t) + (\sigma'_f(t, z) + u(t, z)) \cdot (A - A_g(0)) \quad [4]$$

dove $A_g[0]$ è l'area del pilastro all'inizio del processo, $u(t, z)$ è la pressione dell'acqua nei pori della miscela, variabile nel tempo e con la quota considerata, mentre σ'_f è la tensione verticale efficace agente sullo scheletro solido della miscela, anch'esso variabile col tempo e con la quota. Infine A è l'area della sezione principale della cella.

La congruenza delle deformazioni impone che l'accorciamento del pilastro, inizialmente di altezza $2H$, sia uguale alla riduzione di spessore della miscela. Si avrà allora

$$\frac{2H\bar{\sigma}_g(t)}{E_g(t)} = \int_{-H}^H m_v \sigma'_f(t, z) dz \quad [5]$$

dove E_g è il modulo di rigidezza del gesso, variabile nel tempo a causa del degrado, m_v è la compressibilità edometrica della miscela, considerata invece costante nel tempo e nello spazio.

Infine il bilancio di massa richiede che la variazione di volume della cella sia pari alla quantità di acqua da questa uscente. Detto k il coefficiente di permeabilità della miscela e γ_w il peso specifico dell'acqua, si ricava

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u(t, z)}{\partial z^2} = m_v \frac{\partial \sigma'_f(t, z)}{\partial t} \quad [6]$$

L'Eq. 6 è l'analogo dell'equazione della consolidazione mono-dimensionale di Terzaghi, con la differenza che in questo caso la variazione dello sforzo verticale efficace non è semplicemente pari all'opposto della variazione della pressione neutra. Lo sforzo verticale totale sulla miscela varia infatti nel tempo, al contrario di ciò che avviene in una prova edometrica. Esso però può essere determinato attraverso l'equazione d'equilibrio [Eq.4], con l'ipotesi aggiuntiva che il modulo secante del gesso vari nel tempo allo stesso modo della capacità portante $Q_c[t]$

$$E_g(t) = E_g(0) \frac{Q_c(t)}{Q_c(0)} \quad [7]$$

Si ha allora l'equazione che regola la variazione della pressione neutra nei pori:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{E_g(0)}{A - A_g(0)} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_c(t)}{Q_c(0)} A_g(t) E_g(0) \right) = c_v \frac{\partial^2 u(t, z)}{\partial z^2} \quad [8]$$

Con opportune condizioni iniziali ed al contorno, questa equazione può essere integrata, cosicché si può definire la variazione della pressione neutra nel tempo e nello spazio e da questa si può ricavare l'andamento delle tensioni nella miscela, le conseguenti deformazioni e la variazione dei cedimenti nel tempo.

I risultati previsionali di tale modello sono riportati in Fig. 11a in termini di cedimento atteso in funzione del modulo di rigidezza del riempimento ed in Fig. 11b si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo ipotizzando in questo caso differenti valori del modulo di rigidezza del pilastro.

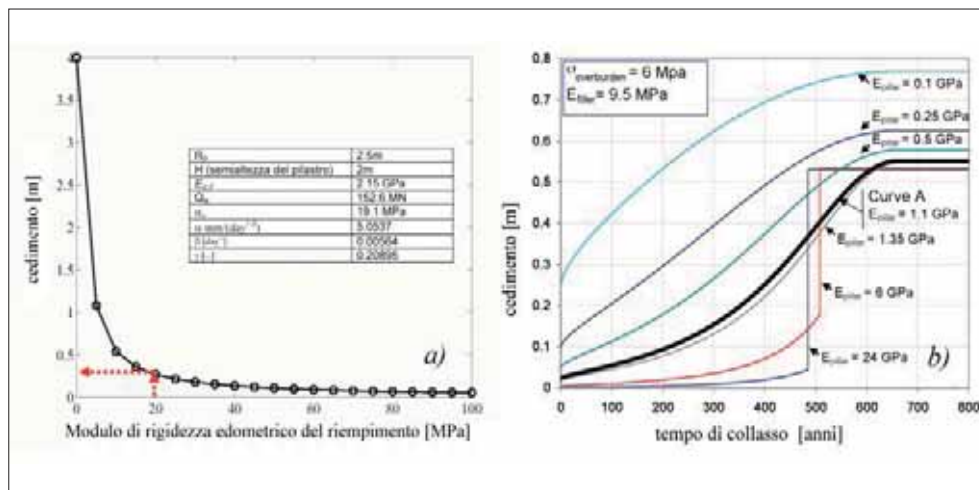


Fig. 11 - Stima della variazione del cedimento nel tempo: influenza della rigidezza del pilastro. Prediction of variation of roof settlement with time: influence of pillar stiffness.

Un'analisi completa del problema, che tiene conto anche della variabilità della rigidità della miscela e dell'entità del carico presente in sito nei pilastri è presentata in GEROLYMATOU E NOVA (2008).

3. SOLUZIONE PROPOSTA

Il riempimento delle gallerie di Santa Brigida è ostacolato dalla inaccessibilità dei due livelli inferiori a causa del loro allagamento, del degrado che hanno subito le pareti delle gallerie e del materiale fangoso che si è conseguentemente depositato sul fondo.

L'unica soluzione praticabile per il riempimento è l'introduzione dalla superficie esterna (tramite la realizzazione di fori e l'inserimento in questi di tubazioni rigide, Fig. 12) di un materiale fluido che possa successivamente far presa, indurire e mantenersi stabile anche a contatto con una soluzione con una significativa concentrazione di ione solfato (0.12% in massa di SO_3). La tubazione di pompaggio deve poter essere calata fino al fondo della galleria, per far in modo che il materiale fluido crei un cumulo che si accresca dal fondo della galleria e allontani l'acqua che riempie le gallerie, senza miscelarsi con essa. In effetti, con questa modalità di getto (utilizzata per i getti subacquei di calcestruzzo) si garantisce che solamente la porzione superficiale di miscela iniettata venga a contatto con l'acqua, mentre il materiale all'interno rimane protetto e non modifica le sue caratteristiche. La miscela deve avere una elevata coesione, per ridurre al minimo la separazione dei suoi costituenti e la miscelazione con l'acqua presente nelle gallerie, oltre a una elevata fluidità, che deve essere mantenuta nel tempo per consentire al materiale già iniettato di spostarsi sotto l'azione del materiale successivamente introdotto dal fondo. Quando la fluidità della miscela diminuisce e non consente più l'iniezione di altro materiale, è necessario sollevare il tubo di iniezione (mantenendolo comunque immerso nel materiale già iniettato) oppure passare ad un altro foro di iniezione, come mostrato in Fig. 12.

3.1 Materiale di riempimento

La necessità di avere un materiale fluido che successivamente indurisca, ha reso praticabile solo il ricorso a materiali cementizi. Nel caso specifico, però, la scelta della miscela di riempimento era complessa a causa delle particolari condizioni: l'allagamento totale o parziale, la presenza sul fondo dei depositi fangosi derivanti dalla dissoluzione del gesso e dell'anidrite, la completa inaccessibilità e un ambiente reso aggressivo dalla presenza di acque contaminate con ioni solfato. Ne è conseguita la necessità di confezionare una miscela caratterizzata da un comportamento reologico di tipo colabile, coesiva e stabile a contatto con l'acqua, con una resistenza a compressione monoassiale dell'ordine di 0.5-1 MPa (secondo quanto stabilito da studi geotecnici (CASTELLANZA *et al.*, 2010) effettuati nell'ambito di tale studio). Inoltre, è stato necessario verificare la stabilità nel tempo della miscela posta a contatto con soluzioni con elevato contenuto di ioni solfato (che, come è noto, possono aggredire i materiali cementizi, Bertolini, 2006, COLLEPARDI *et al.*, 2005). Infine, in considerazione del fatto che il volume totale di miscela da utilizzare per riempire le gallerie è molto elevato (oltre 60000 m³), è stato necessario minimizzare i costi, favorendo l'impiego di materie prime di recupero disponibili in prossimità del cantiere.

Per ridurre al minimo i costi della miscela di riempimento e per garantire una maggiore stabilità al contatto con l'acqua si è, infine, deciso di considerare miscele cementizie ottenute con aggiunta di terreno (ACI, 1997, TATSUOKA *et al.*, 1997) e un ridotto contenuto di

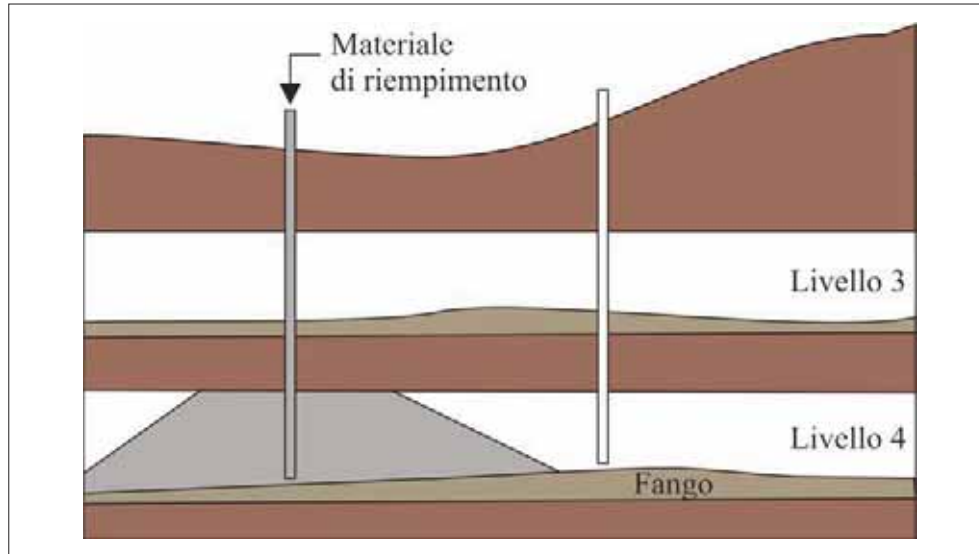


Fig. 12 - Schema di getto del materiale di riempimento all'interno delle gallerie iniettato dalla superficie.

Casting of the filling material inside the tunnels from the surface.

cemento. La Fig. 13 mostra schematicamente le fasi preliminari che hanno portato allo sviluppo di miscele in grado di soddisfare tali esigenze. Si sono utilizzati terreni di composizione prevalentemente limoso-argillosa (Fig. 13a) che si distinguono dalle sabbie per il fatto che, quando sono miscelati con acqua, sono caratterizzati da forze coesive che tengono insieme le particelle. Un contenuto di acqua modesto dà luogo ad un impasto plastico, ma non certo fluido (Fig.13b) e inadeguato all'esigenze di colabilità nell'operazioni di riempimento delle gallerie. Tuttavia, aumentando il dosaggio di acqua e rimaneggiando il terreno con un'energica miscelazione che sminuzzi le particelle di argilla e le faccia entrare in intimo contatto con l'acqua, è possibile ottenere miscele fluide molto stabili, grazie alla buona coesione fra le particelle argillose (Fig. 13c). Affinché una tale miscela possa far presa e indurire, è necessario aggiungere cemento (Fig. 13d), in quantità adeguata alle prestazioni meccaniche richieste. Nel tempo, l'idratazione del cemento consente all'impasto di far presa (divenendo un materiale solido, come mostrato in Fig. 13e) e successivamente di indurire e acquistare resistenza meccanica. In Fig. 13f è mostrato un esempio della microstruttura di questo materiale, osservata al microscopio elettronico a scansione. Per individuare la corretta composizione della miscela e studiarne il comportamento allo stato fresco e indurito è stato effettuato uno studio di laboratorio, di seguito brevemente illustrato; per ulteriori approfondimenti si rimanda ai riferimenti (BERTOLINI E CARSANA, 2009, BERTOLINI *et al.*, 2010).

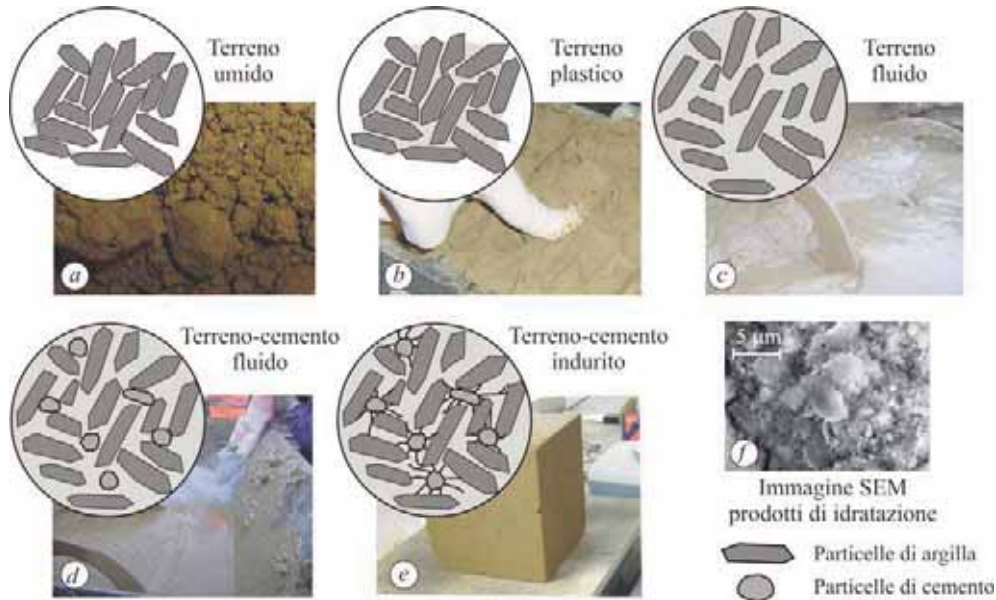


Fig. 13 - Fasi relative allo sviluppo della miscela cementizia fluidificata con terreno.
Steps of the development of the flowable cement-soil mixture.

3.2 Studio di laboratorio

In laboratorio sono state confezionate diverse miscele impiegando un cemento al calcare (CEM II/B-L 32.5R), differenti tipi di terreno e acqua potabile (tranne per alcune miscele per cui si è impiegata acqua solfatica, attinta dalle gallerie di Santa Brigida, al fine di valutare l'effetto dei solfati sulle proprietà della miscela).

Per ottenere una miscela fluida a base di cemento, acqua e terreno, si deve, prima dell'aggiunta di cemento, rimaneggiare il terreno; con progressive aggiunte di acqua si manipola una certa quantità di terreno, inumidendolo prima, sino a renderlo malleabile e di seguito fluido e colabile. Il grafico di Fig. 14a mostra l'andamento della fluidità, misurata in termini di consistenza con prova di spandimento (secondo la EN 1015-3), in funzione del contenuto di acqua rispetto al terreno (ovvero il rapporto a/t). Si può osservare come all'aumentare del rapporto a/t si sia ottenuta una maggiore consistenza, sino a valori di 150%. Ulteriori prove hanno evidenziato che, grazie all'azione coesiva delle particelle di argilla, si possono raggiungere consistenze pari a 270% (corrispondenti ad impasti molto fluidi); si è, tuttavia, osservato che per consistenze di 250-270% il terreno fluidificato inizia ad essere instabile, mostrando una maggiore sensibilità ai fenomeni di bleeding. Per tale ragione si suggerisce il confezionamento di miscele con consistenze non superiori a 250%.

L'aggiunta di cemento alla miscela ha reso meno fluido l'impasto che ha presentato, infatti, una consistenza pari a 80% (punto 2 di Fig. 14a), non sufficiente per garantire l'iniettabilità del materiale all'interno delle gallerie allagate, valutata attraverso prove di riempimento effettuate gettando la miscela attraverso un tubo trasparente in un conte-

nitore e verificando che fluisse dal fondo. Con un'ulteriore aggiunta di acqua [a/t pari a 1.04] si è ottenuto una miscela [con un contenuto effettivo di cemento 142 kg/m^3] avente una consistenza pari a 100%, sufficiente per superare la prova di colabilità anche in presenza di acqua nel contenitore di prova. Si sono analizzate le variazioni di fluidità anche in relazione al diverso tipo di terreno; il grafico di Fig. 14b evidenzia che la correlazione fra consistenza e rapporto a/t dipende dalla composizione del terreno [in termini di sabbia, limo e argilla]. Per ottenere la stessa fluidità con terreni con un maggior contenuto di limo e argilla [terreno 3 di Fig. 14b] è necessario considerare un rapporto a/t più elevato rispetto a terreni sabbiosi [terreno 2].

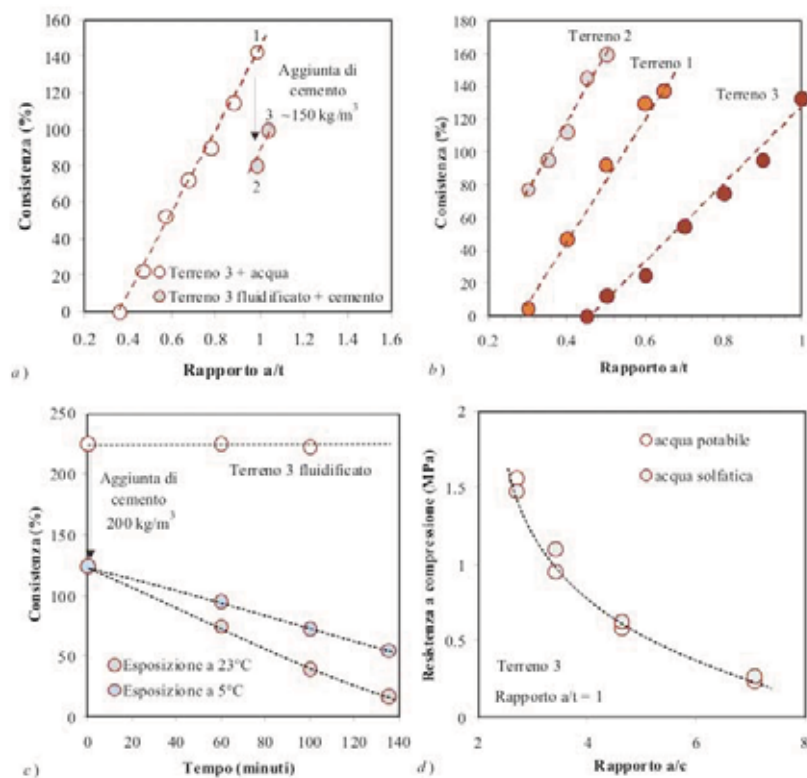


Fig. 14 - Andamento della consistenza in funzione del rapporto acqua/terreno [a/t], a); andamento della consistenza in funzione del rapporto acqua/terreno [a/t] per terreni diversi in termini di contenuto di sabbia, limo e argilla [terreno 1: 22:48:30, terreno 2: 50:36:14 e terreno 3: 12:70:18], b); andamento nel tempo della consistenza di una miscela di terreno fluidificato ed effetto dell'aggiunta di cemento, c); andamento della resistenza a compressione in funzione del rapporto acqua/cemento [a/c] per provini stagionati per 7 giorni, d).

Consistence of a fluidized soil as a function of the water to soil ratio [w/s], a); relationship between consistence and water to soil ratio [w/s] for soils with different sand:silt:clay ratios [soil 1: 22:48:30, soil 2: 50:36:14 and soil 3: 12:70:18], b); example of evolution in time of the consistence of a fluidized soil and fluidized cement-soil mix, c); compressive strength of hardened soil-cement mixes made with a single batch of soil and water to soil ratio of 1, as a function of the water/cement ratio [w/c] after 7-day curing, d).

In cantiere, la grande variabilità di richiesta d'acqua, conseguenza dell'utilizzo di terreni diversi, può tuttavia essere attenuata modificando la granulometria dei terreni con maggiore percentuale di fini attraverso l'aggiunta controllata di sabbia.

Il mantenimento della fluidità nel tempo è un'ulteriore requisito che devono possedere le miscele utilizzate per il riempimento. Il tempo in cui la miscela resta sufficientemente fluida (si è visto che per essere iniettabile deve possedere almeno il 100% di consistenza) vincola, infatti, le quantità di miscela realizzabile e le modalità di confezionamento. Se la miscela mantiene una elevata lavorabilità per tempi più lunghi, sono maggiori le quantità di miscela che possono essere introdotte in un singolo punto di colaggio. Per questo motivo si è analizzata la perdita di lavorabilità nel tempo delle miscele e si sono investigati i fattori che la influenzano. Innanzitutto, si è osservato che le miscele di solo terreno fluidificato, se l'evaporazione dell'acqua è impedita, conservano per lungo tempo la stabilità e la fluidità (Fig. 14c). Viceversa, l'aggiunta di cemento non solo determina una immediata perdita di consistenza, ma questa perdita aumenta con il passare del tempo e dipende dal contenuto di cemento. Ad esempio, nella Fig. 14c si osserva come, a 5°C, una miscela di acqua e terreno con consistenza di 225%, la mantiene anche dopo 2 ore dalla miscelazione, mentre l'aggiunta di 200 kg/m³ di cemento determina un primo abbassamento del 50% di consistenza e una progressiva perdita di lavorabilità di circa 40% nelle 2 ore successive. Riguardo al ruolo della temperatura nel mantenimento della lavorabilità, si nota che una miscela cementizia confezionata a temperatura ambiente (23°C) mantiene la lavorabilità per tempi più brevi rispetto alla medesima miscela cementizia mantenuta a 5°C subito dopo il confezionamento (Fig. 14c). Tuttavia, nel caso delle ex miniere di Santa Brigida, è previsto che le miscele, una volta iniettate, abbiano una temperatura relativamente bassa, in quanto nelle gallerie la temperatura si mantiene su valori di 8-10°C.

Le esigenze di fluidità della miscela devono trovare un buon compromesso con i minimi requisiti prestazionali richiesti per garantire un adeguato consolidamento. A tale scopo è stato necessario individuare i parametri che maggiormente influenzano la resistenza meccanica della miscela; si è verificato che, come per i calcestruzzi, i parametri fondamentali sono il rapporto acqua/cemento (a/c) e la stagionatura. Ad esempio, la Fig. 14d mostra la correlazione tra resistenza a compressione e rapporto a/c ottenuta per le miscele confezionate con il terreno \mathcal{B} e rapporto $a/t = 1$. Il rapporto a/c necessario per raggiungere una determinata resistenza, e di conseguenza il dosaggio di cemento, sono anche influenzati dal tipo di terreno utilizzato.

La Fig. 14d mostra, inoltre, che l'impiego di acqua solfatica non influisce significativamente sulla resistenza delle miscele.

4. PROGETTO PILOTA

La trasposizione in cantiere delle esperienze di laboratorio è stata complessa ed ha comportato la realizzazione di un'impiantistica in grado di riprodurre le caratteristiche tecniche della miscela e di contenere al massimo i costi.

L'intervento ha avuto carattere altamente sperimentale, non vi erano esperienze precedenti, con miscele analoghe e condizioni al contorno paragonabili, per cui è stato necessario strutturare il cantiere come un "campo prove" e creare appositamente sia l'impiantistica di cantiere che le procedure e le modalità operative.

Il lavoro si è sviluppato per passaggi successivi, con una serie di controlli e monitoraggi (sui parametri ambientali e su quelli relativi all'andamento del cantiere ed alle caratteristiche delle miscele) sia in avanzamento, per ottimizzare le operazioni in corso d'opera, che al termine dei lavori, per verificare la rispondenza tra le previsioni e la realizzazione.

4.1 Impianto di cantiere

L'impianto di cantiere è stato creato appositamente, sulla scorta delle indicazioni di laboratorio ed in modo da consentire una corretta produttività, per garantire la sostenibilità economica dell'intervento.

Il materiale utilizzato per la creazione delle miscele cementizie fluide è stato il seguente:

- terreni limoso-argillosi di recupero da scavi locali (circa 1.000-1.100 kg/m³),
- acqua solfata prelevata direttamente dalle gallerie (circa 400 litri/m³),
- cemento Portland al calcare (150 kg/m³).

Il tutto veniva prelaborato, miscelato e mescolato secondo passaggi successivi (Fig. 15) per ottenere una miscela fluida ed in grado di consolidare nel tempo, ad un costo complessivo di 30-40 €/m³ di miscela iniettata, variabile in base alle condizioni logistiche ed alle lavorazioni utilizzate.

La fase più complessa della miscelazione è stata quella di prelaborazione del materiale, cioè dei trattamenti a cui sottoporre i terreni prima di immetterli nella vasca di miscelazione, per evitare la formazione di grumi e blocchi, tipici dei materiali con componente argillosa. Dopo varie prove si è creata una vasca in terra, in cui due escavatori mescolavano i terreni con acqua, in modo da creare una miscela omogenea.

Il materiale prelaborato veniva poi passato attraverso una vasca di mescolazione, con griglie vibranti sia in entrata che in uscita per eliminare i ciottoli, in cui veniva aggiunta l'acqua mancante per la giusta fluidificazione. Contemporaneamente, su una linea parallela, veniva creata una boiaccia di cemento ad acqua.

Il terreno fluidificato e la boiaccia di cemento venivano prima unite e poi mescolate tra di loro, per creare una miscela omogenea ed adeguatamente amalgamata, ed infine iniettate nel sottosuolo nelle gallerie.

Per la lavorazione finale e l'iniezione, in cantiere è stata utilizzata un'autobetonpompa, che ha consentito di operare con buona continuità e senza particolari problemi per il pompaggio delle miscele.

4.2 Iniezioni e controlli durante i lavori

La miscela è stata iniettata nei livelli minerari allagati (livelli 3 e 4) attraverso una serie di fori, diametro variabile da 127 a 250 mm, rivestiti con tubazioni in metallo e/o in PEAD e di lunghezza variabile da 20 ad oltre 50 metri.

I fori sono stati realizzati con una maglia il più possibile regolare (Fig. 16a), compatibilmente con la difficile logistica di un cantiere in zona montana, per poterli utilizzare alternativamente come punti di iniezione e di controllo, per verificare il raggio di influenza dell'iniezione, il livello di riempimento delle gallerie e l'addensamento della miscela nel tempo.

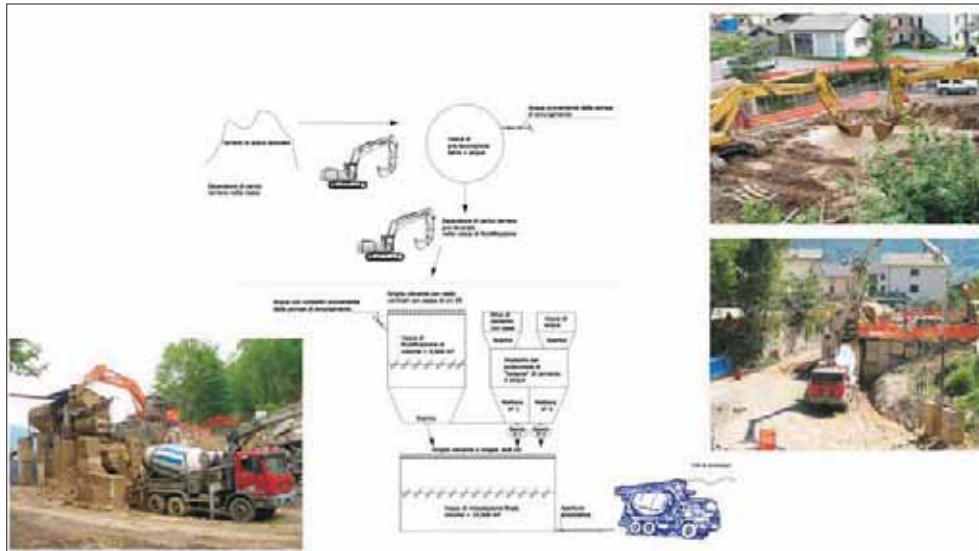


Fig. 15 - Organizzazione del cantiere: prelaborazione, impianto di lavorazione e fase di iniezione
 Worksite structure: preparation, mixing plant and injection

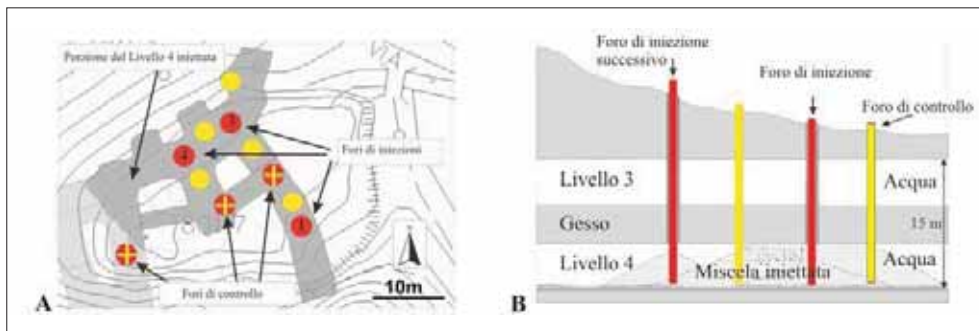


Fig. 16 - Metodologia di iniezione a) planimetria con la distribuzione dei fori di iniezione e di controllo nella parte bassa del cantiere b) sezione schematica delle operazioni di iniezione e controllo nei fori in avanzamento

Methods of mixture injection a) plan view of injection and monitoring boreholes b) Schematic section of the injection layout and boreholes

Per la fase di iniezione sono stati adottati una serie di accorgimenti: l'iniezione è avvenuta sempre dal fondo e 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; la colonna di iniezione veniva fatta risalire lentamente solo quando la massa perdeva in termini di consistenza; il materiale è stato pompato senza alcuna pressione e la mobilità era garantita dalla fluidità. Il materiale si è distribuito 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, a conferma del riempimento totale della zona. L'iniezione totale, ad oggi, suddivisa nei due lotti di intervento completati, è stata di circa 13.000 m³, con una media di iniezione giornaliera di 120-130 m³; i costi, a consuntivo, sono stati in linea con quelli previsti a progetto. Nei lotti completati le iniezioni di riempimento sono state eseguite nei due livelli inferiori (livello 3 e 4), completamente allagati, nella porzione degli stessi più vicina al centro abitato, per creare una prima barriera di protezione verso le abitazioni (Fig. 17).

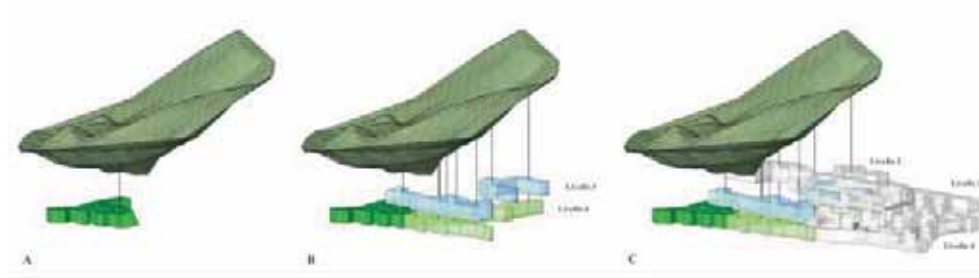


Fig. 17 - Distribuzione delle iniezioni a) porzione del livello 4 iniettata al termine del lotto 1 b) porzioni dei livelli 3 e 4 iniettate al termine del lotto 2 c) visualizzazione complessiva delle porzioni iniettate
 Worsite operations at Carale mine a) part of level 4 filled at the end of stage 1 b) parts of levels 3 - 4 filled at the end of stage 2 c) panoramic view of Carale mine

Durante i lavori sono stati attuati una serie di controlli: verifiche topografiche, monitoraggio piezometrico, quantità e qualità delle acque di scarico, mobilità delle miscele, addensamento e resistenza delle miscele nel tempo. Tutte le verifiche non hanno mostrato anomalie di sorta ed hanno fornito riscontri soddisfacenti.

4.3 Controlli e verifiche a fine lavori

Al termine dei lavori sono state eseguite ulteriori verifiche ed analisi, per la validazione delle opere, quali indagini geofisiche, sondaggi a carotaggio con prelievo campioni ed analisi e prove di laboratorio.

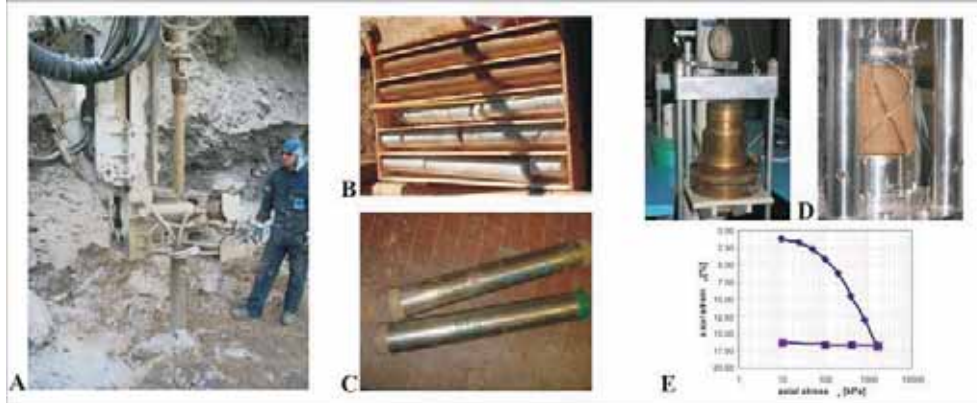


Fig. 18 - Verifiche a fine lavori a) operazioni di sondaggio b) campionamento con carotiere semplice con recupero del gesso in calotta e della miscela iniettata c) campionatore shelby a pareti sottili d) per le analisi udometriche di laboratorio e) Control tests a) boring operations b) control bore with gypsum and mixture c) shelby d) laboratory tests e) oedometric test

A. *Indagini geofisiche* (tomografia elettrica 3D) per investigare in ampio la zona iniettata, individuare il riempimento e valutare la presenza di vuoti consistenti. Le indagini non hanno evidenziato vuoti.

B. *Sondaggi a carotaggio con prelievo campioni*. Lo scopo era duplice: verificare direttamente il grado di riempimento e campionare il materiale per le prove di laboratorio. I sondaggi sono stati eseguiti tra i fori di iniezione, per investigare le situazioni più critiche. Il grado di riempimento è risultato totale in tutte le sezioni investigate ed il materiale, visivamente, si presentava consolidato ed omogeneo (Fig. 18).

C. *Analisi e prove di laboratorio sui campioni di miscela*: i campioni di miscela prelevati in sondaggio sono stati sottoposti, presso il laboratorio di meccanica dei terreni del Politecnico di Milano a prove di caratterizzazione, di compressione monoassiale e, soprattutto, a prove edometriche, per ricavare i parametri di rigidità, deformabilità e permeabilità.

I parametri ricavati dalle prove sono stati inseriti nel modello analitico previsionale di Nova e Castellanza, per verificare l'effetto delle miscele sulla stabilità del sito.

L'immagine seguente (Fig. 19) illustra i risultati del modello, in assenza e con il riempimento.

I risultati evidenziano che:

- in assenza di riempimento dopo 80 anni (a partire dalla data di allagamento dei livelli, circa 40 anni fa) si ha un crollo brusco ed immediato delle cavità con un cedimento in superficie di 4 metri (perché l'altezza dei vuoti minerari è assunta tale)
- in presenza di riempimento il crollo non risulta più brusco ed improvviso, ma è distribuito in oltre 500 anni, con un cedimento immediato di circa 10 cm ed ulteriori 60 cm nei successivi 5 secoli, in modo graduale e progressivo. Inoltre, dato che la permeabilità è bassa ma superiore a 10^{-9} m/sec non si generano picchi di sovrappressione significativi.

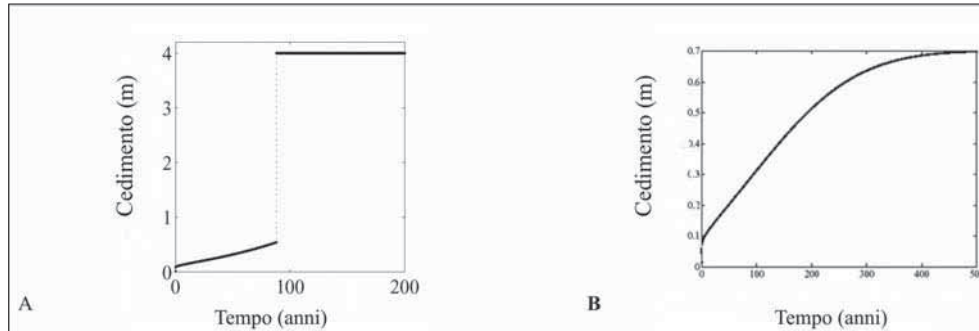


Fig. 19 - Cedimenti attesi nel tempo secondo il modello di Nova e Castellanza a) in assenza di riempimento b) con il riempimento

Final evaluation of remedial measures, according to Nova & Castellanza model a) without filler b) with injected filler

In considerazione del fatto che direttamente sopra le cavità minerarie e nelle immediate vicinanze non ci sono abitazioni, il cedimento previsto è assolutamente compatibile.

L'iniezione consente di evitare un cedimento catastrofico, con espulsione di acqua in pressione verso il paese; inoltre la quantità di acqua presente nelle gallerie è progressivamente ridotta dall'iniezione della miscela che la sostituisce.

Il modello analitico, inoltre, opera a favore di sicurezza perché assume che anche in presenza di riempimento il degrado del gesso prosegua con il tasso attuale. Le prove di laboratorio hanno evidenziato che il degrado è proporzionale alla possibilità di ricambio ed alle velocità di deflusso delle acque che, in presenza di una miscela con bassa permeabilità, riducono nettamente l'azione aggressiva, tendendo alla progressiva saturazione in solfati.

Attualmente è in appalto il terzo lotto dei lavori, che prevede iniezioni per ulteriori 15.000 m³ e dovrebbero portare al completo riempimento il livello 4 ed ad un ulteriore potenziamento del consolidamento del livello 3. Queste nuove opere apporteranno una ulteriore significativa riduzione del grado di rischio della zona, anche se per la completa messa in sicurezza è necessario il riempimento totale delle cavità allagate.

Data la complessità dell'intervento, la delicatezza del contesto geologico-idrogeologico, ed il carattere fortemente sperimentale ed innovativo dell'intervento sull'area sono attivi una serie di controlli, sia sulle acque sotterranee che sulle deformazioni del suolo.

Per quanto riguarda il regime delle acque superficiali i piezometri, posti su un allineamento da monte a valle delle gallerie, vengono controllati periodicamente, per verificare eventuali alterazioni dell'assetto idrogeologico.

Le deformazioni al suolo durante i lavori sono controllate con tradizionali sistemi topografici. Con il terzo lotto dei lavori è stata attivata una convenzione con la soc. TRE (*spin-off* del Politecnico di Milano che possiede il brevetto del metodo) per il controllo delle deformazioni con l'interferometria radar satellitare con la tecnica PS.

La tecnica funziona molto bene per le aree urbanizzate a valle della ex cava; per un migliore controllo nella zona di cava, priva di superfici riflettenti adeguate, sono stati posati 4 bersagli radar (Fig. 20).

L'auspicio è che tali controlli possano proseguire anche dopo le opere, al fine di tenere monitorata l'evoluzione del sistema nel tempo, data la complessità dello stesso.

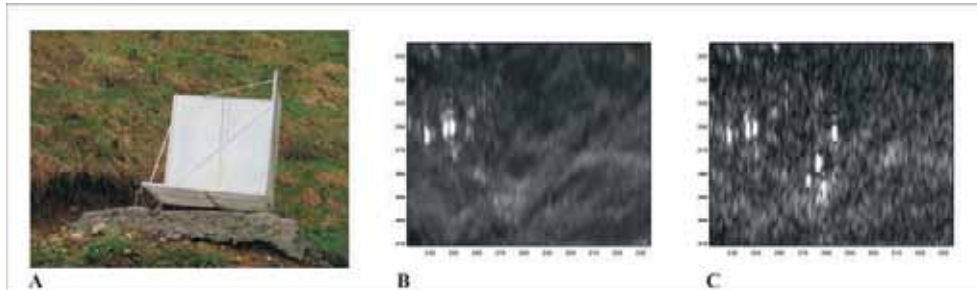


Fig. 20 - Bersagli radar posti in opera nella zona della ex cava Carale per il controllo delle deformazioni del suolo con interferometria radar satellitare con la tecnica PSinSAR a) bersagli radar in opera b) immagine radar in assenza di bersagli c) immagine radar dopo la posa dei bersagli [macchie bianche al centro dell'immagine]

Artificial reflector installed around Carale mine to be used as radar target to measure ground displacement with SAR interferometry (PSinSAR technique) a) artificial reflector b) radar image before reflector installation c) radar image after reflectors installation [reflectors are white points in the central part of the image]

5. CONCLUSIONI

Le verifiche effettuate sull'intervento pilota hanno permesso di stabilire che la soluzione tecnologica messa a punto risponde alle esigenze di messa in sicurezza individuate per il sito di Santa Brigida. La miscela di riempimento, ottenuta aggiungendo cemento a terreni fluidificati, è defluita nelle cavità, senza subire dilavamenti da parte dell'acqua solfatica presente, e le ha riempite completamente; le caratteristiche meccaniche e di permeabilità sono risultate adeguate e permettono di ridurre in modo efficace i cedimenti stimati, diluendoli nel tempo, ed eliminando il rischio di un collasso catastrofico. I costi d'intervento sono decisamente contenuti, mantenendosi dell'ordine dei 30 - 40 € per ogni metro cubo di materiale iniettato.

Al termine dell'intervento pilota, visto l'esito positivo della sperimentazione, Regione Lombardia e Ministero dell'Ambiente hanno messo a disposizione le risorse finanziarie per proseguire con la messa in sicurezza del sito minerario, sviluppata per successivi lotti funzionali; a oggi è stato realizzato il riempimento di circa 13.000 m³ di gallerie e sono in corso di realizzazione i lavori per altri 15.000, a fronte di un totale di circa 65.000. La spesa complessiva è di 3 milioni €.

Si ritiene inoltre che la soluzione adottata, fortemente innovativa, possa essere applicata in altre situazioni con notevoli vantaggi. In particolare, in termini di *know how* trasferibile, la sperimentazione di Santa Brigida ha permesso di ottenere:

- una serie di modelli per la valutazione della perdita di capacità portante dei pilastri e per la predizione delle modalità e dei tempi di collasso di una miniera abbandonata,
- una soluzione innovativa per quanto riguarda la progettazione, il confezionamento e l'iniezione di una miscela adatta a riempire i vuoti, anche in presenza di acqua solfatica, e con costi ragionevoli,
- soluzioni impiantistiche e di processo per la lavorazione in cantiere,
- un modello di collaborazione fra Pubblica Amministrazione, Università, Professionisti e Imprese che ha permesso di sviluppare la soluzione e metterla in atto.

RINGRAZIAMENTI

L'esperienza presentata è stata resa possibile dalla dedizione, dall'impegno e dall'entusiasmo del sindaco di Santa Brigida, il Sig. Giovanni Giuseppe Regazzoni, che tutti chiamavano Bepi. Con la sua capacità di coinvolgere tutti è stato il promotore dell'iniziativa e anche l'ideatore della soluzione di cantiere di prelaborazione dei materiali con vasca in terra (il cosiddetto "metodo della polenta").

Insieme a lui il Prof Roberto Nova, con la sua esperienza, competenza tecnica, e soprattutto con la disponibilità a condividere le conoscenze e a far crescere colleghi e collaboratori, è stato l'anima dello studio e dello sviluppo delle conoscenze scientifiche e tecnologiche che hanno permesso questa realizzazione.

BIBLIOGRAFIA

- ACI, American Concrete Institute (1997) - *State of the Art Report on the soil cement*; ACI 230.1R-90.
- BIANCHI S., ORLANDI G.M., SPADA M. (2009) - *Un intervento pilota di consolidamento gallerie in gesso allagate: l'esperienza di Santa Brigida (BG)*, Dissesti indotti dall'alterazione di rocce evaporitiche, ISBN 9788855530170, Coordinatori: R. Nova, R. Castellanza, Patron editore, Bologna, p. 165-190
- BERTOLINI L. (2006) - *Materiali da costruzione - Degradazione, prevenzione, diagnosi e restauro*; Volume II, Città Studi Edizioni.
- BERTOLINI L., CARSA M., SPADA M. (2010) - *Filling of a flooded gypsum mine with a flowable soil-cement mix*. Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, 22(6), doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000084, pp. 628-636.
- BERTOLINI L., CARSA M. (2009) - *Studio di miscele cementizie fluide con terreno per il riempimento di cave di gesso abbandonate*, Dissesti indotti dall'alterazione di rocce evaporitiche, ISBN 9788855530170, Coordinatori: R. Nova, R. Castellanza, Patron editore, Bologna, 143-164.
- CASTELLANZA R., CROSTA G., FUSI N., GRIZZETTI R., (2009) - *Dissolution of evaporitic rocks: Implications on geomechanical behaviour*, Proc. EUROCK 2009, Rock Engineering in Difficult Ground Conditions - Soft Rocks and Karst - Vrkljan (ed), p. 243 - 248.
- CASTELLANZA R., GEROLYMATOU E., NOVA R. (2008) - *An attempt to predict the failure time of abandoned mine pillars*, Rock Mechanics and Rock Engineering 41, p. 377 - 401
- CASTELLANZA R., NOVA R. (2009) - *Caratterizzazione meccanica di gessi ed anidridi con particolare riferimento a fenomeni degradativi*, Dissesti indotti dall'alterazione di rocce evaporitiche, ISBN 9788855530170, Coordinatori: R. Nova, R. Castellanza, Patron editore, Bologna, p. 97 - 123
- CASTELLANZA R., NOVA R., ORLANDI G.M. (2010) - *Evaluation and Remediation of an Abandoned Gypsum Mine*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 136(4), pp.629-639.
- COLLEPARDI M., OGOUMAH O., SIMONELLI F. (2005) - *Il Calcestruzzo Vulnerabile, Prevenzione, diagnosi del degrado e restauro* Edizione Enco.
- JADOU F., CALABRESE L., ORLANDI G.M., BERRA F. (2009) - *Aspetti geologici, stratigrafici e paleogeografici delle rocce evaporitiche triassiche del Bacino Lombardo*. Dissesti indotti dall'alterazione di rocce evaporitiche, ISBN 9788855530170, Coordinatori: R. Nova, R. Castellanza, Patron editore, Bologna, p. 75-95

- GEROLYMATOU E., NOVA R. (2008) – *An analysis of chamber filling effects on the remediation of flooded gypsum mines*. Rock Mechanics and Rock Engineering 41, p. 403 - 419
- GIAMBASTIANI M., CELESTINO T., BOTOLUCCI A. (2004) – *Time dipendente behaviour of gypsum and anhydrite rocks: preliminary results*. In Schubert, editor, Eurock 2004 Proc. Geomechanics Colloquium, p. 393 – 398: VGE.
- GYSEL M. (2002) – *Anhydrite dissolution phenomena: three case histories of anhydrite karst caused dy water tunnel operation*. Rock Mechanics and Rock Engineering 35, p. 1 - 21
- GREEN W., AMPT G. (1911) – *Studies on soil physics, 1: the flow of air and water through soils*. J. Of. Agric. Sc. 4, p. 1-24
- NOVA R., CASTELLANZA R. (2009) – *Analisi delle condizioni statiche della miniera di Santa Brigida e degli effetti dell'intervento previsto per il risanamento*, Dissesti indotti dall'alterazione di rocce evaporitiche, ISBN 9788855530170, Coordinatori: R. Nova, R. Castellanza, Patron editore, Bologna, p. 127 – 141
- PHILIP. J.R.(1969) – *Theory of infiltration*. Advances in Hydroscience, 5, p. 215-296.
- RAINES M., DEWERS T. (1991) – *Mixed transport/reaction control of gypsum dissolution kinetic in aqueous solution and initiation of gypsum karst*. Chemical Geology 140, p. 29 - 48
- SAKAMOTO A., YAMADA N., SUGIURA K., KAWAMOTO T. (2005) - *An integrated cavity filling technique for adandoned room and pillars lignite mines in Tokai region*. Post- Mining 2005, November 16-17, Nancy, France.
- TATSUOKA F., UCHIDA K., IMAI K., OUCHI T., KOHATA Y. (1997) - *Property of cement Treated soil in Trans Tokyo Bay Project*.Ground Improvement, No. 1, pp. 37-57.

FENOMENI DI SPROFONDAMENTO IN ALCUNI CENTRI URBANI

di Nisio S.

ISPRA – Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico Nazionale

ABSTRACT

Anthropogenic and natural cavities represent a serious hazard for the built-up environment in many Italian towns and cities. They could propagate upward in urban surface producing the formation of anthropogenic sinkholes. In the last years the number of the sinkholes in urban areas is increasing, due to urban expansion, in particular in the big cities like Rome and Naples.

Underground quarrying was developed in the past in some Italian towns, due to presence of good and soft rocks (especially volcanic or limestone rocks) to be used for building purposes.

The soft rocks were therefore quarried underground producing an extensive networks of galleries.

These underground galleries and caves have been progressively abandoned; somewhere the quarries were later used in other ways and after they are filled or obliterate by urban infrastructures.

Some Italian towns are nowadays located just above these network of cavities and the people loss the memory of the presence of the underground galleries; not exist a correct cartography of the cavities and their exact localization.

The left investigation of the network of cavities produce a potential risk for the human structures and activities with the increment of the anthropogenic sinkholes.

In Italy is not present yet a catalog or adjourned database of the sinkholes originated in urban center, induced by human activities. The last works (CORAZZA, 2004) censured 794, in the 2004, anthropogenic sink phenomena and 215 natural sinkholes s.s. or collapse dolines, occurred in rural or urban areas.

The ISPRA *sinkhole project*, that censured 859 natural sinkhole in all the Italian territory, will cured also this argument; it will censured the anthropogenic sinkholes with particular regards to the urban areas.

The purpose of this work is the comparison between the database and the various catalogues (CATENACCI, 1992, CORAZZA, 2004, IFFI project etc.) and the integration with the new phenomena.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni è stato registrato un aumento dei casi di sprofondamento soprattutto nei centri urbani e da ciò emerge una maggiore preoccupazione per il rischio indotto dal fenomeno.

Tali sprofondamenti hanno varie cause riconducibili per lo più di crolli di volte antropiche o di cavità naturali, a scarsa o media profondità dal piano campagna, o connessi a fenomeni di dilavamento di terreni sciolti al di sotto del manto stradale, registrati in concomitanza di eventi piovosi intensi.

Censimenti completi di tali fenomeni non esistono ad oggi in Italia, il tentativo più completo, e che risale agli anni novanta (con dati dal dopoguerra al 1990), è stato pubblicato da CATENACCI (1992), altro censimento è stato realizzato, alcuni anni fa, dalla protezione civile (www.protezionecivile.it; CORAZZA, 2004), per altro oggi non più disponibile. Non risulta tuttavia un catalogo aggiornato a livello nazionale degli sprofondamenti antropogenici e/o naturali avvenuti nei centri urbani.

Gli studi compiuti dalla Protezione Civile nel 2004 attestano 794 casi di sprofondamento di origine antropica e 215 di origine naturale, verificatesi sia nelle aree urbane che in quelle rurali dagli anni ottanta al 2004 (CORAZZA; 2004). Gli studi compiuti sinora dall'ISPRA hanno portato, oltre al censimento dei fenomeni naturali di sinkhole s.s. (n° 859 casi verificatesi da epoche storiche all'attuale) (CAMPOBASSO *et al.* 2004; NISIO, 2008, NISIO in questo volume), all'individuazione di 398 casi di sprofondamento antropico o prettamente carsico (Progetto IFFI) avvenuti in aree urbane e nelle vicinanze di queste (fig. 1).



Fig. 1 - Censimento dei sinkholes naturali (Progetto sinkhole ISPRA) e degli sprofondamenti antropici e carsici (progetto IFFI).

Dai dati sinora raccolti si evince che le aree urbane maggiormente interessate sono Napoli e Roma, in cui sono numerose le cavità antropiche per l'estrazione di terreni da costruzione, seguono altri capoluoghi di provincia quali, Cagliari, Lecce, Bari ed alcuni centri urbani delle Marche e della Sicilia.

Il *Progetto Sinkhole ISPRA*, si occuperà nei prossimi anni anche di quest'aspetto, integrando il database dei sinkholes senso stretto con i casi di natura antropica, e con particolare riguardo a quelli registrati nei centri urbani (fig. 1). Pertanto si è preceduto ad una prima fusione ed integrazione delle raccolte di dati e dei database pubblicati (CATENACCI, 1992; Protezione Civile, 2004, Progetto IFFI).

Si riportano di seguito i primi risultati di questo lavoro, ancora in corso d'opera, ed una prima raccolta esemplificativa dei principali eventi verificatesi negli ultimi anni in alcuni centri urbani d'Italia.

2. GLI SPROFONDAMENTI NEL CENTRO URBANO DI ROMA

Gli sprofondamenti nel centro urbano di Roma sono noti da molti secoli. Il primo sprofondamento di cui si ha menzione è avvenuto in epoca romana, nel foro romano, e ha dato origine ad un lago (*sinkhole?*), noto come *Lacus Curtius* (TITO LIVIO; Annali VII,6), di cui si narra una leggenda.

La leggenda riporta che nel 362 a.C. nel Foro Romano si aprì una voragine molto profonda, che ritenevano senza fondo (TITO LIVIO, 25 a. C.). I sacerdoti interpretarono l'evento come un segno di sventura, predicendo che la voragine si sarebbe allargata fino ad inghiottire l'intera città di Roma, a meno che non si fosse gettato nella cavità quanto di più prezioso ogni cittadino romano possedeva. Il giovane patrizio, Marco Curzio, uno dei più valorosi guerrieri dell'esercito romano, convinto che il bene supremo di ogni romano fossero il valore e il coraggio, si lanciò nella voragine armato ed a cavallo, facendo così cessare l'estendersi della cavità. Il luogo dove si formò la voragine rimase nella leggenda con il nome di *Lacus Curtius*.

Tuttavia esiste una prima versione di Tito Livio, in cui il protagonista, invece, è un altro valoroso, il sabino Mevio Curzio (Mettius Curtius), che, dopo aver ucciso in duello il romano Osto Ostilio, trovò scampo nella palude (*Lacus Curtius*) ove in seguito sarebbe sorto il Foro Romano. Plutarco aggiunge che pochi giorni prima era straripato il Tevere, lasciando depositare fango, ivi precipitò Curzio che non individuò una voragine colma di melma.

In un'altra versione, riportata da Terenzio Varrone, il lago in oggetto sarebbe un luogo dichiarato sacro, secondo l'usanza romana, perché colpito da un fulmine, unica causa dell'apertura della voragine, la cui consacrazione avvenne nel 445 a.C. sotto il Consolato di Gaio Curzio Filone.

Il sito esatto fu identificato, all'interno del foro, da Giacomo Boni il 17 aprile 1903; attualmente il sito si presenta come un avvallamento del terreno di forma trapezoidale di lunghezza di circa 30 m, circondato da pavimentazione in lastroni di travertino, risalente all'età di Cesare (fig. 2); al livello più basso si scorge parte della pavimentazione più antica in blocchi di tufo, con al centro un pozzo, in cui al tempo di Augusto, i passanti erano soliti gettare monete.

L'avvallamento al suolo che oggi si registra in tale sito sembra testimoniare una depressione la cui natura potrebbe essere naturale.

Gli sprofondamenti avvenuti in epoca successiva a quella romana ed in epoca recente (96 casi censiti sino al 2004 dalla Protezione Civile, CORAZZA, 2004) nel centro urbano di



Fig. 2 - Il Lacus Curtius all'interno del Foro Romano, come si presenta oggi (foto da www.liceoberchet.it).

Roma sono 136 sinora e sembrano tuttavia potersi ricondurre al crollo di volte di cavità realizzate per lo più nei terreni vulcanici, subordinatamente sabbiosi o ghiaiosi, per estrazione di materiali da costruzione o per realizzazione di antichi luoghi di culto. Infatti, è nota la presenza al di sotto del centro urbano di una fitta rete di gallerie e cunicoli realizzati a vario titolo che mettono in pericolo la sicurezza della città.

Nel tempo si è persa la memoria della presenza di tale rete caveale; se ne conosce l'esatta ubicazione solo di una parte di essa. Durante l'intensa espansione edilizia degli anni 50-70, si è costruito un tessuto continuo di strutture urbane al di sopra di dette gallerie, non sempre preceduto da indagini tecniche dettagliate. Non sono rari i casi di edifici realizzati con fondazioni dirette al di sopra di reti ipogee a scarsa profondità ed in condizione di potenziale pericolo.

L'aumento registrato negli ultimi anni di casi di sprofondamento in corrispondenza delle suddette cavità determina condizioni di rischio per la cittadinanza e problemi legati alla interruzione di infrastrutture e di reti di sottoservizi (fognature, reti idriche, elettriche, telefoniche, ecc.).

La conoscenza dell'intricata rete di condotti sotterranei realizzata in epoca storica nell'area urbana è indispensabile per la messa in sicurezza del territorio cittadino. La numerosa letteratura disponibile (VENTRIGLIA, 1970; 2002; VENTRIGLIA & SCIOTTI, 1970; BERNABINI, 1982; SCIOTTI, 1982, 1984, 2001a, b 2001; CRESCENZI *et al.*; 1995; LANZINI; 1995, 2009, FUNICELLO *et al.* 2008; MAZZA *et al.* 2008) e la realizzazione di studi storici e di sintesi potrebbero facilitare, tuttavia, ad individuare la suscettibilità allo sprofondamento del centro urbano.

Si riporta, di seguito, un riepilogo di alcuni degli episodi più significativi accaduti a Roma negli ultimi quaranta anni.

15 Novembre 1976: Via Formia, Torpignattara, si apre una voragine che coinvolge la sede stradale, larga 29 metri e profonda otto, causata dal crollo di una delle numerose gallerie naturali presenti nel sottosuolo. Un uomo di 79 anni resta appeso ad una tubatura del gas prima di essere soccorso dai vigili del fuoco.

22 Ottobre 1977: Via Tortona, Appio Tuscolano, un uomo di 57 anni precipita in una voragine larga 30 metri e profonda otto, apertasi a causa della rottura di una conduttura della acqua. L' uomo muore nel fango.

9 Ottobre 1978: Via Gregorio VII, quartiere Aurelio, un autobus di linea resta in bilico su di una voragine apertasi all' altezza di una fermata per la rottura di un collettore fognario.

3 Giugno 1984: Via Sestio Menza, quartiere Tuscolano, una voragine, larga sette metri e profonda sei, si apre improvvisamente coinvolgendo tre automobili in sosta e provocando gravi danni a negozi e abitazioni.

20 Luglio 1986: Via Donna Olimpia, quartiere Monteverde, una voragine si apre durante un violento nubifragio che causa gravi danni in tutta la città.

27 Settembre 1986: Via Guareschi, quartiere Laurentino 38, si apre all' improvviso una voragine larga dieci metri e profonda otto. La cavità rivela resti di valore archeologico ricondotti ad una tomba di età romana.

26 Ottobre 1987: Via San Giosafat, quartiere Aventino, un' automobile cade in una voragine profonda quindici metri e larga dieci, causata da crolli di volta in grotte naturali. Tre occupanti del veicolo restano feriti.

15 Giugno 1995: Via Ludovico da Monreale, quartiere Monteverde, si apre una voragine dovuta questa volta a un allaccio fognario abusivo mal realizzato.

27 Settembre 1995: A Pomezia, si apre una cavità con diametro di 15 metri, nei pressi di piazza della Tecnica; lo sprofondamento danneggia sia una condotta fognante sia la tubatura dell' acquedotto regionale.

1 Marzo 2007: Nel centro urbano di Roma si apre una voragine di alcuni metri di diametro e circa 1.5 di profondità, ne rimane coinvolto un camion (fig. 3).

9 Maggio 2007: Una voragine di tre metri di diametro si apre in via Tuscolana, una delle grandi arterie che attraversano il centro urbano, la causa è la rottura di una conduttura (fig. 4).



Fig. 3 - Voragine presso il centro urbano di Roma i marzo 2007 (foto da www.Repubblica.it).



Fig. 4 - Voragine presso via Tuscolana, maggio 2007 (foto da www.disaster.eu)



Fig. 5 - Voragine nel centro urbano di Roma presso la stazione S. Pietro, 22 dicembre 2008 (foto da www.iltempo.it).

Gennaio 2008: Una voragine di 80 metri e profonda 13 si è aperta lungo via Galatea, quartiere La Rustica. Oltre trenta famiglie sono rimaste senza luce e gas a causa della rottura delle tubature per giorni; lo sprofondamento sembrerebbe essere stato causato dal cedimento del terreno sovrastante vecchie cavità antropiche utilizzate come fungaie.

14 dicembre 2008: Quartiere Prenestino, via Teano, si apre una voragine di alcuni metri di diametro, non si registrano particolari danni.

22 dicembre 2008: Si apre una voragine nel centro di Roma, nei pressi del vaticano, in via Stazione di San Pietro, di alcuni metri di diametro e profondità, un autocarro finisce nella cavità (fig. 5).

15 febbraio 2009: Si apre una voragine in via Nemea, zona piazza Giuochi Delfici.



Fig. 6 - Voragine a Roma presso il quartiere di Tor Pignattara, 21 marzo 2009 (foto da www.Repubblica.it).

21 marzo 2009: Via Leonardo Bufalini, nella zona di Tor Pignattara, si è aperta una voragine (fig. 6) profonda circa 3 metri, e con diametro di circa 7, coinvolgendo il centro della carreggiata; un camion vi è sprofondata con la parte posteriore, coinvolte anche altre due macchine parcheggiate, non ci sono stati feriti. La voragine ha provocato la rottura di una condotta idrica.

05 maggio 2009: Una voragine si è aperta in via Appia Nuova all'altezza di via di Tor del Fiscale, per la pioggia che si è abbattuta nella Capitale nel pomeriggio. Sono intervenuti i vigili del fuoco e i vigili urbani che hanno chiuso il tratto di strada.

10 luglio 2009: Si è aperta una voragine nel quartiere Garbatella-Ostiense; la cavità presenta forma sub-circolare, diametro di circa 1,5 m e profondità di circa 1 m.

3. GLI SPROFONDAMENTI NEL CENTRO URBANO DI NAPOLI

Napoli tra le città italiane, è certamente quella in cui le cavità sotterranee sono state maggiormente indagate (MELISURGO, 1889; GUADAGNO, 1927, 1928; *cum biblo*, AA.VV., 1957, 1967; PENTA, 1960; CROCE, 1967 *cum biblo*; IPPOLITO 1953 *cum biblo*; SCHELILLO, 1966, 1967; VINALE, 1988; PELLEGRINO, 1999, 2002; VALLARIO, 2001 *cum biblo*), con la realizzazione di mappe catastali e cartografia specifica (il Centro Speleologico Meridionale ha rilevato e cartografato, nel solo territorio comunale oltre 750 cavità per una superficie superiore al milione di metri quadrati, i dati sono consultabili su siti specifici in linea sul web). Nel sottosuolo del centro urbano si è scavato per circa 45 secoli per la realizzazione di tre acquedotti (Acquedotto Bolla, di epoca greca, Acquedotto Augusteo, di epoca romana, Acquedotto Carmignano, del XVIII secolo) centinaia di cave ed alcune gallerie di comunicazione. La storia e la genesi dello sviluppo delle cavità sotterranee di Napoli sono strettamente legate alla formazione geologica su cui è sviluppata la città, il *tufo giallo campano Auct*, e alla necessità di estrazione di tale terreno per uso edilizio. Questo terreno, dotato, infatti, di buone caratteristiche fisico-meccaniche, presenta anche caratteristiche di duttilità tali che hanno consentito, da sempre (le prime cavità risalgono ad oltre 4500 anni fa), una facile estrazione. L'estrazione si è perpetuata per migliaia di anni con la realizzazione di cave d'imponenti dimensioni (ad esempio la cavità n° C0022 del censimento del Centro Speleologico Meridionale, ubicata nel quartiere Stella, misura



Fig. 7 - Sprofondamento nel centro storico di Napoli; immagine degli anni '50 (da www.skycrapercity.com).

circa 42.000 m²). Altre importanti opere ipogee sono quelle realizzate con lo scopo di rendere più agevoli le comunicazioni tra la città e le zone ad essa limitrofe quali la *Crypta Neapolitana* tra Mergellina e Fuorigrotta, di epoca pre-romana, e la Grotta di Seiano tra Posillipo e la piana di Bagnoli, di epoca romana.

Tuttavia la presenza di una così estesa rete di gallerie determina, spesso, l'evoluzione in superficie, mediante crolli successivi della volta, dei vuoti ipogei con formazione di fenomeni di sprofondamento che sono avvenuti da sempre [fig. 7] in molti quartieri della città. I casi censiti dalla Protezione Civile sino al 2004 sono stati 146 [CORAZZA, 2004], cui si aggiungono i numerosi casi registrati negli ultimi sei anni.

Si descrivono solo pochi, a titolo di esempio, dei numerosi fenomeni censiti.

12 dicembre 1996: A Miano si forma una voragine con dimensioni di 35 metri di profondità, sotto la bottega di un fabbro, causata probabilmente da infiltrazioni d'acqua; due i morti.

9 maggio 1999: Si apre nel centro storico di Napoli una voragine di 30 metri di profondità; muore un uomo di 53 anni.

9 marzo 2003: Si apre una voragine, nei pressi dell'Ospedale Cardarelli, con diametro di circa venti metri ; 20 famiglie sgomberate.

6 novembre 2004: Via Posillipo, durante un violento temporale, si è prodotto uno sprofondamento che ha coinvolto la sede viaria; un'autovettura è rimasta in bilico sul bordo della voragine, alcuni feriti.

28 settembre 2007: Via Don Bosco si apre una voragine di 4 m di diametro e 2 di profondità a causa del nubifragio.

26 febbraio 2007: Si origina una voragine di due metri di diametro e uno di profondità, in occasione di un evento pluviometrico, nel quartiere di Pianura, in via Russolillo; un'auto con quattro persone a bordo precipita all'interno.

13 novembre 2008: A causa di un forte temporale durato qualche ora, si è aperta una voragine a Scampia, producendo molti danni alla circolazione viaria .

27 gennaio 2009: Via Broggia, tra il museo nazionale e la centralissima Piazza Dante, si apre una voragine nella quale precipita un bus turistico.

31 gennaio 2009: Massa Lubrense - S. Agata, si origina una cavità nel centro urbano con diametro di alcuni metri.



Fig. 8 - Voragine a Napoli presso via Manzoni (foto da www.ilmattino.it).



Fig. 9 - Voragine presso Pozzuoli, 23 giugno 2009 (foto da www.ilmattino.it).

24 Aprile 2009: Via Morghen al quartiere Vomero, una profonda voragine mette in evidenza la presenza di un'antica cava di tufo sotterranea alla profondità di circa 10 metri dal p.c..

7 maggio 2009: Via Manzoni, si apre una voragine al centro della carreggiata (fig. 8), con diametro di alcuni metri e profondità di 2 metri.

Pozzuoli 23 giugno 2009: Via Solfatara, all'altezza della biforcazione per Arco Felice e Pozzuoli porto (fig. 9), una voragine di tre - quattro metri di diametro, profonda alcuni metri, si apre sulla carreggiata stradale.

26 giugno 2009: Via Arenaccia si è verificata uno sprofondamento sulla carreggiata stradale, nessun ferito.

24 settembre 2009: Si registra l'ultimo importante evento, si aprono 3 voragini presso il vico San Carlo alle Mortelle, ai Quartieri Spagnoli, che hanno portato allo sgombero di circa 300 abitanti (fig. 10). Uno degli sprofondamenti ha interessato la navata centrale della chiesa San Carlo alle Mortelle, il crollo del pavimento ha messo in evidenza la presenza di una cavità sotterranea. La seconda voragine si è originata nella strada adia-



Fig. 10 - Sprofondamenti presso il Vico S. Carlo alle Mortelle, 24 settembre 2009; uno sprofondamento ha coinvolto la chiesa di S. Carlo (foto da www.limatino.it).

cente alla chiesa e la terza al piano terra di una abitazione civile. La voragine all'interno della chiesa presenta diametro di circa venti metri ed una profondità di circa 4 metri.

9 novembre 2009: ancora due voragini si aprono in seguito ad un evento piovoso alla periferia di Napoli, nei quartieri Ponticelli e Miano.

4. GLI SPROFONDAMENTI NEL CENTRO URBANO DI CAGLIARI

La storia dei crolli in sotterraneo e degli sprofondamenti verificatesi a Cagliari, registra che, con cadenza annua, in città, evolvono, verso la superficie, vuoti e cavità naturali, grotte o cunicoli artificiali presenti nel sottosuolo del centro urbano (26 sprofondamenti registrati sino al 2004, CORAZZA, 2004). Questi ultimi sono relativi ad antiche cave di roccia per l'estrazione dei materiali da costruzione. Le stesse cavità venivano ancora utilizzate nel Medioevo dapprima come cave di estrazione successivamente come ripari per pastori e bestiame. Nel 1900 esse sono state naturalmente colmate dall'acqua di circolazione superficiale, originando laghi ed acquitrini sotterranei. Inoltre nel sottosuolo del centro urbano sono presenti anche cavità naturali di origine carsica [riscontrate a circa 4 metri di profondità dal p.c.] al cui interno è presente la normale circolazione idrica.

Da alcuni anni, la frequenza dei fenomeni di sprofondamento è aumentata nel centro urbano; si registrano, inoltre, tremori e boati legati alla presenza di crolli sotterranei che avvengono presumibilmente in tali cavità del sottosuolo, queste ultime compromesse, probabilmente, anche dalle opere di manutenzione della rete idrica e fognaria.

Tra i principali eventi si ricordano:

9 agosto 1961: Si apre una voragine che coinvolge un edificio rivelando la presenza di una grotta di origine antropica. L'area circostante piazza d'Armi, compresa la via Marengo e un lungo tratto di via Is Mirrionis, vengono chiuse al traffico per oltre un mese per permettere la demolizione di uno stabile.

12 maggio 1987: Una porzione di una abitazione civile, situata in via Is Mirrionis, è sprofondata in una voragine di neoformazione. Il Gruppo speleologico Pio XI curò l'esplorazione



Fig. 11 – Sprofondamento presso il centro urbano di Cagliari, 8 agosto 2008 (foto di M. Polastri).

di tutte cavità nel circondario di piazza d'Armi e della voragine prodotta. Venne individuata una antica cava sotterranea probabilmente di epoca romana, la cui volta aveva ceduto. Di particolare interesse, al fondo dell'antica cava è stata l'individuazione, inoltre, di due laghi sotterranei.

31 agosto 1993: Tra piazza d'Armi e viale Merello si crea una voragine sul ciglio stradale, di forma ellissoidale, profonda 4 metri, lunga 13 e larga 3. Lo sprofondamento, che portò il manto stradale a sei metri di profondità, lesionò gravemente le pareti dell'adiacente struttura del bar-ristorante, causando, inoltre, con la rottura di una condotta d'acqua potabile, l'allagamento di altri edifici.

8 agosto 2008: Una voragine, con diametro di 4 metri, si apre in via Peschiera coinvolgendo un'autovettura (fig. 11). La voragine è quasi certamente da correlare alla presenza di cavità artificiali. L'innesco dello sprofondamento in superficie potrebbe essere dovuto, tuttavia, anche alla messa in opera di un tombino di ispezione con pozzetto stradale.

5. GLI SPROFONDAMENTI NEI CENTRI URBANI DELLA SICILIA

Sono noti fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani della Sicilia, anche questi connessi alla presenza di cavità antropiche e subordinatamente naturali al di sotto degli abitati.

Palermo, ad esempio, nasconde una sua storia sotterranea dove cavità, pozzi, cunicoli, camere, canali sotterranei, tombe, catacombe e cripte costituiscono quasi un'altra città sotto quella visibile, a molti sconosciuta (TODARO, 1988). Questi sotterranei sono accompagnati da presenza di cavità naturali scavate all'interno delle litologie calcaree; una mappatura adeguata di tutta la rete ipogea ad oggi non è stata realizzata.

Le cavità antropiche sono antichissime, alcune attribuite alla prima età dell'Eneolitico, altre all'età punica e romana. Tali cavità risultano spesso responsabili della formazione di voragini in superficie.

Tra gli sprofondamenti segnalati recentemente nel centro urbano di Palermo:

24 settembre 2008: Nel quartiere Pallavicino, in via Trapani, si apre una voragine a causa di un nubifragio e coinvolge un'autovettura.

22 luglio 2009: Una voragine della profondità di circa un metro e mezzo si è aperta presso borgata Mondello, probabilmente a causa della rottura della rete fognaria.

L'area di *Enna*, è interessata, invece, da fenomeni carsici e da sinkholes naturali (tra cui si ricorda il lago di Pergusa di più di 100 m di diametro, NISIO, 2008), il centro cittadino inoltre non è esente da fenomeni di sprofondamento per dilavamento.



Fig. 12 - Immagine di uno sprofondamento che ha interessato il centro urbano di Enna, 15 ottobre 1991 (foto da quotidiano la repubblica).

15 ottobre 1991: Si origina un'enorme voragine nel centro storico, in seguito ad un evento piovoso intenso. Un'auto rimane coinvolta (fig. 12).

23 dicembre 2008: Una voragine di circa due metri di diametro si origina presso Via Pergusa una delle principali strade d'accesso al centro della città.

Inoltre anche Catania, non è esente dal fenomeno; il **12 Giugno 2008** si forma una sorta di cratere nel mezzo della circonvallazione urbana, precisamente in via Bolano, con alcuni metri di diametro che coinvolge alcune autovetture.

Da segnalare di seguito una serie di episodi registrati a *Canicatti*: **3 novembre 2006** la formazione di una voragine, l'ultima di una serie, nel tratto di strada compreso tra via senatore Sammartino e la strada che porta al nuovo palazzetto dello sport. Negli anni la situazione presso il centro abitato di Canicatti è peggiorata, comportando il quasi totale abbandono di alcuni quartieri.

6. GLI SPROFONDAMENTI NEI CENTRI URBANI DELLA PUGLIA

Le città della Puglia sono interessate da frequenti fenomeni di sprofondamento che rappresentano il maggiore rischio idrogeologico per l'intero territorio regionale.

Tali fenomeni sono strettamente connessi sia a dissoluzione carsica (FAVALE, 1994; PARISE *et al.* 2009) che a cavità antropiche realizzate sin dai tempi primitivi per utilizzi diversi (NARDONE, 1923; FONSECA, 1979, 1980, 1991; FONSECA *et al.* 1979; CASAVOLA & TRACUZZI, 1989; DI BENEDETTO *et al.* 1990; DI BARTOLOMEO, 1995; MONTE, 1995; COTECCHIA & GRASSI, 1997; DELL'AQUILA & MESSINA, 1998; DI BARTOLOMEO & CAZZATO, 2002; DE MARCO *et al.* 2004; FIORITO & ONORATO, 2004; CASAVOLA, 2006; PARISI, 2006; BIXIO *et al.* 2007; CAGGIANO *et al.* 2007, 2008 a, b).

Sono stati eseguiti vari studi e censimenti, con particolare riguardo alle cavità antropiche su tutto il territorio regionale (BRUNO & CHERUBINI, 2007; FIORE, 2006, FIORE & LANZINI, 2007), nonché realizzati censimenti degli sprofondamenti avvenuti negli ultimi anni sia in ambienti rurali che urbani. Dal censimento svolto nel 2004 dalla Protezione Civile



Fig.13 - Voragine presso il centro urbano di Gallipoli che ha coinvolto alcune auto vetture (1 aprile, 2007).

[CORAZZA, 2004], la Puglia risulta tra le regioni maggiormente interessate dai fenomeni di sprofondamento di origine antropica (con 58 casi di sprofondamento imputabili a cavità antropiche e 34 a cavità di origine naturale), di cui le più colpite sono le provincie di Bari (24 casi), Foggia (17 casi) Lecce (14 casi).

Si riportano di seguito alcuni casi registrati negli ultimi anni.

L'abitato di Altamura (Bari) è stato interessato negli ultimi anni da una serie di sprofondamenti [CHERUBINI *et al.* 1993; PECORELLA *et al.* 2004; BERARDI *et al.* 2009 a, b; BUZZANCA *et al.* 2009], connessi strettamente all'attività, che si è esplicata in passato, di estrazione dal sottosuolo del centro urbano e della periferia di calcareniti per uso edilizio. Tale attività estrattiva ha prodotto una intricata rete caveale, al di sotto del centro cittadino, con sviluppo lineare, sinora conosciuto, di circa 12 Km.

Anche il centro urbano di *Bari* è interessato da sprofondamenti [GRECO *et al.* 1991] l'ultimo dei quali si è originato il 18 febbraio 2009, dopo un evento pluviometrico, dando luogo l'apertura di una voragine presso il Lungomare Nazario Sauro di Bari.

A *Gallipoli* il 1 Aprile 2007 una voragine di circa 12 metri di diametro e 6 metri di profondità [fig. 13] si è aperta all'improvviso, in via Firenze, zona nuova della città, nel centro della strada [DE DONATIS, 2007; DELLE ROSE, 2007; BUZZANCA *et al.* 2009]. Nella cavità sono finite tre auto in sosta; la stessa ha interessato anche, lambendolo, un palazzo di tre piani che è stato evacuato a scopo precauzionale. Dopo alcuni giorni la voragine ha quasi raddoppiato le dimensioni a causa di un nuovo crollo, che ha riguardato l'edificio già coinvolto; le famiglie evacuate sono state 45 (circa 200 persone).

Ad *Andria* il 30 dicembre 2009 una voragine larga tre metri e mezzo e profonda cinque metri e mezzo si è aperta, in via De Gasperi, a causa della rottura della rete fognaria.

A *Foggia* il 12 gennaio 2008, in via Napoli la rottura di una tubatura dell'acquedotto ha prodotto l'apertura di una voragine di qualche metro. Inoltre fenomeni di tipo naturale interessano da molto tempo Lesina, canale dell'Acquarotta, coinvolgendo negli ultimi anni anche il centro urbano (una voragine ha interessato Alliste nel 2004, due si sono aperte a Marina di Lesina il 29 maggio 2009; l'ultimo episodio si è registrato il 2 luglio 2009). Altri fenomeni si registrano in provincia di Lecce [TONI & QUARTULLI, 1986; TONI, 1990; PARISE *et al.* 2008].

7. SPROFONDAMENTI IN ALTRI CENTRI URBANI

Molte altre città italiane sono interessate dai fenomeni di sprofondamento naturale e/o indotti dalle attività umane. In Friuli Venezia Giulia il carsismo ad esempio è molto sviluppato, tuttavia, il territorio, nonché la stessa città di Trieste, sono caratterizzati anche da cospicuo sviluppo di cavità antropiche: gallerie d'acqua (acquedotti, torrenti coperti, pozzi e cisterne), manufatti bellici (gallerie di ricovero antiaereo per la popolazione civile, gallerie di ricovero antiaereo per militari, depositi di acqua per la protezione antincendio), sotterranei storici della centro urbano di Trieste (San Giusto, Gesuiti, Santa Maria Maggiore, Rotonda dei Pancera). Durante la prima guerra mondiale molte delle cavità carsiche, a ridosso della città di Trieste, vennero utilizzate come luoghi di osservazione militare subendo adattamenti ed alcune doline di crollo furono anche munite di murature in pietra o cemento.

Fenomeni di sprofondamento carsico o antropico sono diffusi, anche in piccoli centri urbani della provincia di Udine. Nel Comune di Enemonzo, ad esempio, si verificano periodici sprofondamenti del terreno, nonostante gran parte della piana sia soggetta a vincolo di inedificabilità proprio per tale rischio. L'ultimo evento è stato registrato il 21 Marzo 2007.

Negli ultimi anni, inoltre, si è verificata un'accelerazione della subsidenza di un'area che comprende quasi tutto l'abitato della frazione Quinis (Udine), con formazione di ampie voragini. L'insufficiente approfondimento dello studio e la mancanza di dati certi lascia in sospeso una situazione che potrebbe rivelarsi assai pericolosa per i manufatti della zona, ma anche per le persone che vi abitano.

Anche Cividale del Friuli è particolarmente soggetta a questi fenomeni: il 6 marzo 2006 una voragine ha interessato la Strada di Spignon.

Non restano escluse dall'elenco altre città del nord quali *Varese*, ad esempio, che risulta tra le meno interessate dal fenomeno nei censimenti passati (CORAZZA, 2004) eppure negli ultimi anni si registrano alcuni eventi: nell'Agosto 2009 è stata interessata da due voragini di cui una, si è aperta in via Colli, angolo via Peschiera, a pochi decine di metri dalla trafficata rotonda del Montallegro.

A *Firenze*, invece, si sono aperte 4 voragini negli ultimi anni di cui le ultime ad ottobre 2009:

il 18 ottobre 2009 la rottura di un tubo dell'acqua ha provocato l'apertura di una cavità, in viale Guidoni, con alcuni metri di diametro, che ha interessato entrambe le corsie; il 19 ottobre 2009 una voragine si apre all'interno del mercato ortofrutticolo.

Molti altri centri abitati dell'Abruzzo (Fossa, S. Pio delle Camere ad esempio), dell'Umbria (Orvieto), delle Marche e della Basilicata (Matera) nascondono grotte artificiali, realizzate in molti secoli, parte delle quali di proprietà di privati che le adibiscono a cantine. Tale presenza favorisce anche qui l'innescare di voragini. A Sulmona l'11 Gennaio 2009 una voragine di circa trenta metri di diametro e altrettanti di profondità si è aperta nel centro storico nella strada che costeggia le mura cittadine.

Nel sottosuolo di Orvieto, ad esempio, sono state censite circa milleduecento cavità artificiali effettuate a partire dal periodo etrusco, quando gli abitanti iniziarono a ricavarvi cunicoli, cisterne e pozzi, destinati per buona parte alla ricerca, alla captazione e alla conservazione dell'acqua.

L'utilizzo della superficie sotterranea in queste regioni era pratica comune nel medioevo quando le grotte venivano scavate ed utilizzate dai pastori come rifugio. In seguito tali

cavità vennero utilizzate come abitazioni civili e nei secoli successivi proprio intorno ad esse furono edificati piccoli agglomerati e centri urbani.

Lo sviluppo di tale rete di cunicoli gallerie e grotte rappresenta oggi un grande pericolo per i centri abitati dell'Abruzzo, dell'Umbria, della Basilicata e delle Marche, soprattutto nelle aree situate in zone altamente sismiche; in tali aree la presenza di grandi volumi di vuoti nel sottosuolo amplifica gli effetti al suolo di un evento sismico.

8. CONCLUSIONI

Sprofondamenti provocati dal crollo di cavità antropiche presenti nel sottosuolo di molte aree urbane italiane provocano e hanno da sempre provocato danni alle infrastrutture, al patrimonio edilizio, con perdita talvolta di vite umane (CATENACCI, 1992; VALLARIO, 2001). Negli ultimi dieci anni si è assistito inoltre ad un aumento della frequenza dei casi di sprofondamento nei grandi centri urbani, ne sono esempio i casi di Roma e Napoli.

Le tipologie di cavità artificiali presenti in Italia sono molte, alcune di esse sono caratteristiche e tipiche di particolari realtà regionali (SANNICOLA, 1997; MAINARDI, 1999).

I vuoti sotterranei sono stati realizzati principalmente per ricavare materiali da costruzione. L'estrazione di rocce piroclastiche come materiali per l'edilizia è stata diffusa nel Lazio ed in Campania; l'estrazione di inerti per i calcestruzzi, di sabbie e ghiaie per vari usi, ha prevalso nel Lazio, in Abruzzo ed in Puglia. Rocce calcaree particolarmente tenere sono state estratte sin da tempi preistorici da cave in sottosuolo della Puglia, della Sicilia e della Lombardia. Altre grandi cavità nel sottosuolo sono state realizzate per l'estrazione di minerali (gessi, sale argenteo, pirite, oro ed altri metalli, carbone), prevalentemente in Sicilia, Calabria, Lombardia, Trentino Alto Adige, Toscana, Sardegna.

Inoltre intricata rete caveale è stata realizzata ad di sotto di molti centri urbani per la realizzazione di cisterne, serbatoi e cunicoli idraulici e per la costruzione di luoghi di culto sotterranei.

Non meno diffusa risulta la pratica antica di realizzare grotte utilizzate dapprima come rifugi di pastori e bestiame e, successivamente, nelle vicinanze o sopra a tali luoghi sono stati realizzati edifici ed abitazioni civili e le grotte utilizzate come cantine e depositi (Abruzzo, Marche, Basilicata, Puglia e Lazio).

Di tali reti caveali, che costituiscono a volte città sotterranee sotto la città, si è persa memoria, ovvero non sono adeguatamente riportate su cartografia specifica; tuttavia esse sono ancora attive o sepolte da terreni di riporto facilmente asportabili per dilavamento.

La presenza di tali vuoti antropici ovviamente facilita l'insorgere di sprofondamenti di superficie che si perpetua in molti centri urbani da anni. A tali episodi si aggiungono sprofondamenti connessi a fenomeni naturali di dissoluzione carsica particolarmente spinti in formazioni litologiche evaporitiche o carbonatiche (particolarmente diffuse in Friuli Venezia Giulia, Sicilia e Puglia).

Inoltre bisogna tener presente che il mancato controllo e la messa in sicurezza di tali cavità potrebbe amplificare gli effetti di eventuali sismi.

I database realizzati a livello nazionale sinora in Italia (due, CATENACCI, 1992; PROTEZIONE CIVILE, 2004) risultano oggi inadeguati e poco aggiornati sulle effettive realtà del fenomeno. Risulta inoltre necessario suddividere e classificare le tipologie di sprofondamento, dando risalto a quanto avviene nei centri urbani.

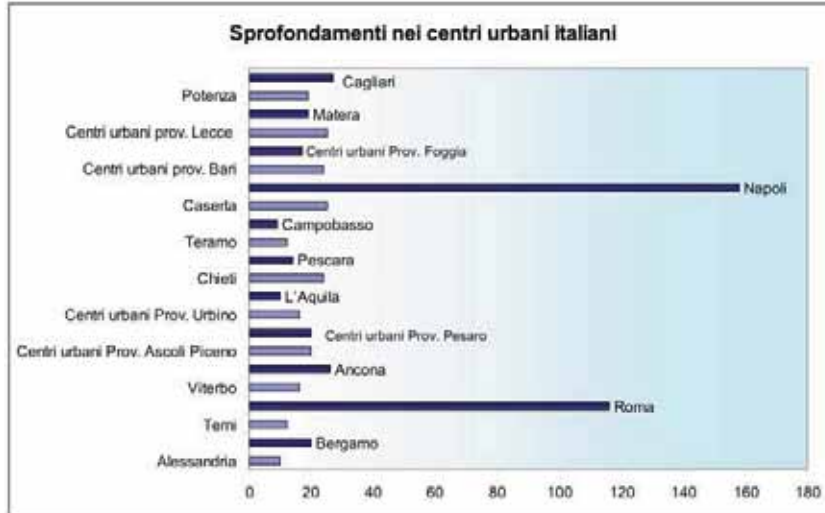


Fig. 14 – Distribuzione dei fenomeni di sprofondamento verificatisi nei centri urbani italiani; vengono riportati i centri urbani che hanno registrato un numero superiore di 10 sprofondamenti negli ultimi quaranta anni; per alcune provincie sono riportati gli sprofondamenti che hanno interessato i centri abitati del territorio provinciale.

Pertanto si è proceduto all'integrazione, la verifica e la fusione di alcuni database inserendo i dati registrati negli ultimi anni.

Le principali città interessate sono risultate Napoli e Roma, segue Cagliari ed i centri urbani delle provincie pugliesi [fig. 14, dove sono riportati i centri urbani che hanno subito più di 10 sprofondamenti nel perimetro cittadino], lucane e marchigiane. Maggiore suscettibilità agli sprofondamenti è risultata negli ultimi anni anche nei centri urbani della Sicilia.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (1957) *Il sottosuolo di Napoli*. A cura del Comune di Napoli.
- AA.VV. (1967) - *Il sottosuolo di Napoli*. A.G.I. Atti VIII Convegno Nazionale di Geotecnica.
- BERARDI C., CAGGIANO T. & FIORE A. (2009a) - *Pericolosità geomorfologica da sprofondamenti. L'attività estrattiva storica in sottosuolo: il caso di Altamura (BA)*. 3° Congresso Nazionale AIGA, San Giovanni Valdarno (AR), 25-27 febbraio 2009.
- BERARDI C., BUONAMASSA G., DENORA A., FIORE A., LORUSSO G., PEPE P., WALSH N. & ZACCARIA V. (2009b) - *Attività di censimento per la pianificazione nelle aree interessate da cavità antropiche. Il Catasto delle Cavità Sotterranee (CCS) di Altamura (BA). Un modello litotecnico e di comportamento previsionale*. 2° Workshop Int. "Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma 3-4 dicembre 2009.
- BERNABINI M. (1982) - *Individuazione di cavità sepolte mediante prospezione geoelettrica: esempi di applicazione: ricerca di tombe nella necropoli sabina di Colle del Forno nei pressi di Montelibretti*. Boll. Serv. Geol. d'It., 103, 67-80

- BIXIO R., PARISE M., SAJ S. & TRAVERSO M. (2007) - *L'acquedotto sotterraneo di Gravina in Puglia "Sant'Angelo-Fontane della Stella"*. Opera Ipogea, **1**, 105-112.
- BRUNO G. & CHERUBINI C. (2005) - *Subsidence induced by the instability of weak rock underground quarries in Apulia*. Giornale di Geologia Applicata, **1**, 33-39.
- BUZZANCA L., CAGGIANO T., CASTORANI A., FIORE A., DENORA D., DI SANTO A.R., PALERMO M.T. & PELLEGRINO R. (2009) - *Sistemi di monitoraggio e caratterizzazione di aree a pericolosità geomorfologica molto elevata per la presenza di cavità antropiche in aree urbanizzate dell'Avampese apulo: i casi di Altamura (BA) e Gallipoli (LE)*. Geitalia 2009, VII Forum Italiano di Scienze della Terra, Rimini 9-11 settembre 2009.
- CAGGIANO T., DI SANTO A.R., FIORE A. & PALUMBO N. (2007) - *Attività dell'Autorità di Bacino della Puglia per l'individuazione, il censimento e la pianificazione degli interventi per la messa in sicurezza dei territori a rischio sprofondamento per la presenza di cavità sotterranee*. Geologi & Territorio, **4-2006/1-2007**, 32-34.
- CAGGIANO T., FIORE A. & PALERMO M.T. (2008a) - *Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione ed all'attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto connesso alla presenza di cavità antropiche nei pressi di via Firenze nell'abitato del Comune di Gallipoli (LE)*. Fondi Por-Puglia 2000-2006.
- CAGGIANO T., FIORE A. & PELLEGRINO R. (2008b) - *Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione ed all'attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto connesso alla presenza di cavità antropiche in località "Fornaci-Chiancone" nell'abitato del Comune di Altamura (BA)*. Fondi Por-Puglia 2000-2006.
- CAMPOBASSO C., GRACIOTTI R., NISIO S. & LETIZIA V. (2004) - *Il progetto sinkhole: le attività svolte dal Dipartimento Difesa del Suolo dell'APAT*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004". 171-188.
- CASAVOLA E. (2006) - *Le cavità artificiali del centro antico di Laterza. Indagine geotecnica*. Cultura Ipogea, p. 31-40.
- CASAVOLA E. & TRACUZZI S. (1989) - *Indagine geologico geotecnica sul centro storico*. All. B. *Aggiornamento condizioni statiche fabbricati del centro storico e interventi immediati da eseguire*. L.R. n. 38/1985, Comune di Laterza.
- CATENACCI V. (1992) - *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., XLVII.
- CHERUBINI C., GERMINARIO S., PAGLIARULO R. & RAMUNNI F.F. (1993) - *Caratterizzazione geomeccanica delle calcareniti di Canosa in relazione alla stabilità degli ipogei*. Atti I Conv. Naz. "Le pietre da costruzione in Puglia: il Tufo Calcareo e la Pietra Leccese", Bari, 221-230.
- CORAZZA A. (2004) - *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile*. Atti 1° Seminario "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", Roma, 20-21 Maggio 2004, 319-330.
- CORAZZA A., MAZZA R. BERTUCCIOLI P. & PUTRINO P. (2002) - *Il Progetto "Cavità" - analisi del rischio dovuto a cavità sotterranee*. Atti dei Convegni Lincei, XIX Giornata dell'Ambiente "Il dissesto idrogeologico. Inventario e prospettive", Roma 5 giugno 2001, 355-363.

- COTECCHIA V. & GRASSI D. (1997) - *Incidenze geologico-ambientali sull'ubicazione e lo stato di degrado degli insediamenti rupestri medioevali della Puglia e della Basilicata*. Geol. Appl. Idrogeol., **32**, 1-10.
- CRESCENZI, R., PIRRO M., VALLESI L. - *Le cavità sotterranee a Roma*- In: La geologia di Roma: il centro storico; Mem. Descrittive Carta Geologica d'Italia, vol. L, 249-278.
- CROCE A. (1967) - *Il sottosuolo della città di Napoli nei riguardi dei problemi geotecnici.*, 1, 53-74.
- DE DONATIS M. (2006/2007) - *La voragine di Gallipoli: primi risultati delle prospezioni geofisiche (GPR) eseguite nell'area*. Geologi e Territorio, **4/2006-1/2007**, 21-24.
- DELL'AQUILA F. & MESSINA A. (1998) - *Le chiese rupestri di Puglia e Basilicata*. Mario Adda editore, Bari, 277 pp.
- DELLE ROSE M. (2006/2007) - *La voragine di Gallipoli e le attività di Protezione Civile dell'IRPI-CNR*. Geologi e Territorio, **4/2006-1/2007**, 3-12.
- DEL PRETE S. & PARISE M. (2007) - *L'influenza dei fattori geologici e geomorfologici sulla realizzazione di cavità artificiali*. Opera Ipogea, **2**, 3-16.
- DE MARCO M., FUCCIO M. & SANNICOLA G.C. (2004) - *Archeologia industriale: i frantoi ipogei nel territorio di Grottaglie (Taranto, Puglia)*. Grotte e Dintorni, **8**, 25-44.
- DI BARTOLOMEO S. (1995) - *Osservazioni tecniche sul consolidamento degli ipogei di Piazza del Popolo*. In: STENDARDO A. (a cura di), *Presicce sotterranea*. Congedo Ed., Galatina, 117-128.
- DI BARTOLOMEO S. & CAZZATO C. (2002) - *Progetto di completamento per il consolidamento statico degli ipogei di Piazza del popolo e zone limitrofe*. Comune di Presicce.
- DI BENEDETTO D., GRECO A. & DEL VECCHIO F. (1990) - *Guida bibliografica di cripte ipogei e insediamenti rupestri della Puglia*. Levante ed., Bari.
- FAVALE F. (1994) - *Le grotte di Polignano*. Federazione Speleologica Pugliese, 250 pp.
- FIORE A. (2006) - *Pericolosità geologica connessa alla presenza di cavità sotterranee. Atto di indirizzo dell'Autorità di Bacino della Puglia*. Geologi & Territorio, **1-2-3**, 3-11.
- FIORE A. & LANZINI M. (2007) - *Problematiche di valutazione del rischio di crollo di cavità sotterranee*. Geologi & Territorio, **4-2006/1-2007**, 35-45.
- FIORITO F. & ONORATO R. (2004) - *Le cave ipogee di Colle S. Lazzaro - Gallipoli. Primi studi*. Atti Spelaion 2004, Lecce, 10-12 dicembre 2004, 125-136.
- FONSECA C.D. (1970) - *Civiltà rupestre in terra ionica*. Ed. Bestetti, Roma.
- FONSECA C.D. (1980) - *La civiltà rupestre in Puglia*. In: AA.VV.: *La Puglia tra Bisanzio e l'Occidente*, 36-116. Milano.
- FONSECA C.D. (1991) - *Le grotte della civiltà rupestre*. Itinerari Speleologici, **5**, 13-25.
- FONSECA C.D., BRUNO A.R., INGROSSO V. & MAROTTA A. (1979) - *Gli insediamenti rupestri medioevali nel Basso Salento*. Congedo Ed., Galatina, 351 pp.
- FUNICIELLO R., GIORDANO G., MATTEI M. (2008) - *Carta Geologica del Comune di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol d'It., 80.
- GRECO A., DEL VECCHIO F., FAVALE F. & RIZZI I. (1991) - *Nota preliminare sul rilievo di cavità nel sottosuolo del borgo antico di Polignano a Mare (Bari)*. Itinerari Speleologici, ser. II, **5**, 147-153.
- GUADAGNO M. (1928) - *Il tufo trachitico ossidianico di Santo Stefano al Vomero, Napoli : secondo contributo alla conoscenza del sottosuolo cittadino* Boll. Soc.Nat. in Napoli, **37**, 113-125.

- GUADAGNO M. (1929) - *Notizie sul pozzo artesiano recentemente trivellato nella piazza S. Maria la Fede, in Napoli : contributo alla conoscenza del sottosuolo cittadino, e delle sue acque sotterranee*. Boll. della Soc. Nat. Napoli, 36, 120-128.
- IPPOLITO F. (1953) - *Studi sulla costituzione geologica del sottosuolo di Napoli*. Boll. Soc. Nat. in Napoli, 57, 95-98.
- LANZINI M. (1995) - *Il problema delle cavità sotterranee a Roma (un rischio geologico)*. SIGEA, Geologia dell'ambiente, 3.
- MAINARDI M. (1999) - *Cave e cavamonti*. FENEAL-UIL Lecce, Edizioni Del Grifo, 135 pp.
- MAZZA R., CAPELLI G., LANZINI M. (2008) - *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma.- La geologia di Roma dal Centro Storico alla periferia*. Mem. Descrittive Carta Geol. d'Italia, v. LXXX (2), 149-170.
- MELISURGO G. (1889) - *Napoli sotterranea: topografia della rete di canali d'acqua profonda. Contributo allo studio del sottosuolo di Napoli*. Ed. F. Giannini, 1889, 44 pp.
- MONTE A. (1995) - *Frantoi ipogei del Salento*. Edizioni del Grifo.
- NARDONE D. (1923) - *Notizie storiche sulla città di Gravina*. Adda Editore, Fondazione Ettore Pomarici Santomasi, V edizione (2007), 387 pp.
- NISIO S. (2008) - *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. Vol. LXXXV; 475pp.
- PARISE M. & DELLE ROSE M. (2009) - *Sinkhole development induced by underground quarrying, and the related hazard*. Geophysical Research Abstracts, **11**, 214.
- PARISE M., DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., DONNO G. & INGUSCIO S. (2008) - *Cavità sotterranee a fini estrattive, e loro connessione con fenomeni di sprofondamento e subsidenza in agro di Cutrofiano (Lecce)*. Atti "Spelaion 2006", Borgo San Celano (FG), 55-69.
- PARISE M., BIXIO R., BURRI E., CALOI V., DEL PRETE S., GALEAZZI C., GERMANI C., GUGLIA P., MENEGHINI M., & SAMMARCO M. (2009) - *The map of ancient underground aqueducts: a nationwide project by the Italian Speleological Society*. Proc. Int. Congr. Speleology, Kerrville (Texas, USA), 19-26 July 2009, **3**, 2027-2032.
- PARISI M. (2006) - *Gravina sotterranea*. Tipolitografia D&B Stampagrafica Bongo, Gravina in Puglia, pp. 126.
- PECORELLA G., FEDERICO A., PARISE M., BUZZACCHINO A. & LOLLINO P. (2004) - *Condizioni di stabilità di complessi rupestri nella Gravina Madonna della Scala a Massafra (Taranto, Puglia)*. Grotte e dintorni, **8**, 3-24.
- PELLEGRINO A. (1999) - *Sviluppi nell'esecuzione e nell'impiego delle indagini geotecniche* : Atti Convegno nazionale di geotecnica : Parma, 22-25 settembre 1999, 179-214.
- PELLEGRINO A (2002) - *Dissesti idrogeologici nel sottosuolo della città di Napoli - Analisi ed interventi*. Atti XXI Convegno Nazionale di Geotecnica, L'Aquila 11-14 settembre 2002.
- PENTA F. (1960) - *Il sottosuolo della città di Napoli in rapporto alla progettazione di una metropolitana*. Atti della Accademia delle scienze fisiche e matematiche. Società nazionale di scienze lettere ed arti in Napoli., ser.3, 3, n. 7, 50 pp..
- SANNICOLA G. (1997) - *Li Tagghiati e li Zuccaturi. Le cave ed i cavatori (Archeologia industriale a Grottaglie)*. Lu Lampiune, **2**, 103-107.
- SCHERILLO A. (1966) - *Osservazioni stratigrafiche sul sottosuolo di via Roma, Napoli*. Boll. Soc. di nat. in Napoli, 63, P. 121-125
- SCHERILLO A. (1967) - *Suolo e sottosuolo di Napoli*. - in AA.VV. "Storia di Napoli", I, 17-54.

- SCIOTTI M. (1982) – *Engineering Geological Problems Due to Old Underground Quarries in the Urban Area of Rome* – Proc. IV Int. Congress I:A:E.G., New Delhi.
- SCIOTTI M. (1984) - *Il problema del recupero delle zone interessate da vecchie cave in sotterraneo nell'area urbana di antichi centri abitati*. Quarry and Construction.
- SCIOTTI M. (2001) – *Il rischio cavità sotterranee nell'area del Comune di Roma*. Rapporto inedito per il Comune di Roma – Protezione Civile.
- SCIOTTI M. (2001) - *Assetto geologico, geomorfologico e geologico-tecnico dei Comprensori Direzionali "Casilino" e "Centocelle"*. Rapporto inedito per il Comune di Roma – Uff. Progetti Metropolitan.
- STENDARDO A. (1995) – *Presicce sotterranea*. Congedo Editore, Galatina, 153 pp.
- TITO LIVIO (27 A. C.) - *Ab Urbe condita*, libri, I, 13; Annali VII,6.
- TODARO P. (1988) - *Carta delle cavità nel sottosuolo di Palermo*.: Tavola II -Scala 1:10000. - Palermo : Libreria Dario Flaccovio editrice. I
- TONI L. (1990) – *Le cave in sotterraneo di Cutrofiانو*. Edizioni Del Grifo, 125 pp.
- TONI L. & QUARTULLI S. (1986) - *Coltivazione di calcareniti in sotterraneo nel comune di Cutrofiانو (Lecce)*. Quarry and Construction, febbraio 1986, 23-26.
- VALLARIO A. (2001) – *Il dissesto idrogeologico in Campania*. CUEN ed., Napoli.
- VENTRIGLIA U. (1971) - *La geologia della città di Roma*. Bardi Ed.
- VENTRIGLIA U. (2002) – *Geologia del territorio del Comune di Roma*. Editore Cerbone, Napoli.
- VENTRIGLIA U. & SCIOTTI M. (1970) - *Cavità sotterranee* - Carta geologica della città di Roma. LAC, Firenze.
- VINALE F. (1988) - *Caratterizzazione del sottosuolo di un'area campione di Napoli ai fini d'una microzonazione sismica* . Rivista italiana di geotecnica: organo dell'associazione geotecnica italiana : meccanica delle terre e delle rocce, fondazioni, costruzioni di materiali sciolti, geologia applicata ,22, 2 (1988), 77-100.

ANALISI DEL RISCHIO NELLA CITTÀ DI TUZLA (BIH) IN RELAZIONE AI FENOMENI DI DEFORMAZIONE DEL SUOLO CONNESSI ALL' ESTRAZIONE DI SALGEMMA.

di Stecchi F.¹, Mancini F.², Gabbianelli G.¹

ABSTRACT

Ground subsidence triggered by salt mining from deposits located beneath the city of Tuzla (Bosnia and Herzegovina) is one of the major dangers acting on a very densely urbanized area since 1950, when the salt deposit exploitation by means of boreholes began. As demonstrated in this paper, subsidence induced several hazard factors such as severe ground deformations, the arising of deep and superficial fractures and a very fast water table rise, connected with the brine extraction, now affecting several districts. The above mentioned factors have been quantified by the use of geomatics methodologies, including field surveys and analysis of geographical data. In order to estimate the historical sinking rates, authors processed the large (and never before processed) amount of topographical data collected during two periods; from 1956 to 1991, and from 1992 to 2003, with only poor data collected. Afterward, traditional surveys were completely and definitively stopped. The analysis reveals a cumulative subsidence as high as 12 m during the whole period, causing damage to buildings and infrastructures within an area that includes a large portion of the historical town, at present almost entirely destroyed. Modern sinking rates have been monitored with static GPS whereas the presence of superficial fractures monitored with kinematic GPS. Factors related to the presence of deep fractures and water table rise have been evaluated by curvature analysis techniques and piezometric data respectively. Finally, hazard factors have been combined in a risk map using the GIS (Geographical Information System) map algebra capabilities and a simple multicriteria decision analysis (MDA). In order to do that, a vulnerability map has been derived on the basis of information reported on a couple of recently sensed high resolution satellite imageries. The final risk, arisen from the combination of single hazard factors and vulnerability map, highlights critical scenarios and unsuspected threatening that are under consideration by the local decision makers and urban planners. In particular, as highlighted in the final risk map, the present-day water table rise, triggered by the decrease in brine pumping, is seriously posing a threat to a portion of the city which is not the most involved in ground deformations.

1 Università di Bologna, Via S. Alberto 163, 48100 Ravenna, Italy, e-mail (francesco.stecchi2, giovanni.gabbianelli)@unibo.it

2 Politecnico di Bari, Via Orabona 4, 70125 Bari, Italy, e-mail f.mancini@poliba.it

1. INTRODUZIONE

Fenomeni di deformazione del suolo connessi alle attività di estrazione da giacimenti di evaporiti sono ampiamente descritti in letteratura, in riferimento a studi condotti in Gran Bretagna (COOPER, 1996, 2002), Germania (REUTER AND STOYAN, 1993; GARLEFF *et al.*, 1997), Spagna (GUTIÉRREZ AND GUTIÉRREZ, 1998; GUTIÉRREZ-SANTOLALLA *et al.*, 2005; SORIANO AND SIMÓN, 1995, 2001, 2002; BENITO *et al.*, 1998, 2000), Stati Uniti (Johnson 1997, 2005) e Francia (Toulemont 1984). Questo lavoro descrive un caso di intensa deformazione del suolo in seguito ai prelievi di salgemma da depositi sottostanti la città di Tuzla (Bosnia Erzegovina) ed illustra l'applicazione di tecniche di geomatica mirate alla definizione dei fenomeni deformativi e delle potenzialità offerte dai Sistemi Informativi Geografici (GIS) nella valutazione del rischio che ne consegue sull'ambiente urbanizzato. Tuzla è nota, sin dal tempo dei Romani, per la presenza di depositi di salgemma e sorgenti di acqua salata. Il nome stesso della città ha origine, nel periodo medioevale di dominio Ottomano, dalla parola "tuz" che in turco significa appunto sale. L'antico metodo di raccolta consisteva, semplicemente, nel convogliare le sorgenti salate in tubazioni con successiva fase di evaporazione in grandi contenitori.

Dal 1950 circa in poi le estrazioni sono state eseguite per mezzo dell'escavazione a secco in miniera ed anche grazie alla costruzione di circa 150 pozzi, tramite i quali prelevare l'acqua salata dalle falde posizionate a circa 400-500 m di profondità. Quest'ultima tecnica di estrazione, meglio conosciuta come *wild brine pumping*, ha originato una dissoluzione dei depositi salini nel sottosuolo difficilmente controllabile.

Nell'area di Tuzla i prelievi hanno alterato gli equilibri idrogeologici preesistenti, con contaminazione delle falde d'acqua dolce, dissoluzione incontrollata e conseguenti ulteriori deformazioni del terreno. Come dimostrato da MANCINI *et al.*, (2009), esiste una correlazione diretta tra i tassi di estrazione e quelli di abbassamento del terreno. Tale evidenza nasce dall'analisi dei dati topografici acquisiti annualmente dagli enti locali tra il 1956 ed il 2003, seppur con alcune interruzioni nel periodo della guerra civile nei paesi Balcanici. I risultati mostrano tassi cumulativi di subsidenza che raggiungono i 12 m, senza generare fenomeni tipici di *sinkhole*, ma provocando comunque ingenti danni ad edifici ed infrastrutture.

Per il periodo menzionato sono stati acquisiti anche i dati delle attività estrattive, i livelli piezometrici, i sondaggi geologici e geotecnici, tutti archiviati e catalogati in un database prodotto dalla Municipalità di Tuzla in collaborazione con la città di Rotterdam (D.O.O. Mining Institute Tuzla, 2000).

Successivamente, la necessità di una più approfondita analisi e comprensione del fenomeno in corso ha portato alla nascita, nel 2003, di un progetto di collaborazione tra il CIRSA (Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Scienze Ambientali, Università di Bologna), la Provincia di Ravenna e la Municipalità di Tuzla. Tra i principali obiettivi del progetto vi era il monitoraggio dei fenomeni più recenti e l'analisi dei vari *(geo)hazard* correlati al fenomeno di deformazione tra cui la subsidenza, la risalita della tavola d'acqua, la formazione di fratture superficiali e profonde. Questi fattori, che singolarmente rappresentano un *hazard*, nel complesso inducono un rischio globale in relazione alla vulnerabilità degli edifici e delle infrastrutture.

Gli *hazards* citati sono stati quantificati separatamente per mezzo di rilievi sul campo e moderne tecnologie informatizzate. La subsidenza è stata monitorata con rilievi geodetici GPS che rivelano abbassamenti recenti nell'ordine dei 15-20 cm annui. Le fratture

superficiali sono state mappate con rilievi GPS cinematici, mentre quelle profonde tramite l'analisi di curvatura effettuata sulla superficie di abbassamento globale. I movimenti della falda freatica sono stati controllati per mezzo di misure piezometriche che evidenziano come, in seguito all'interruzione dei prelievi di acqua, si stiano verificando notevoli risalite che minacciano di sommergere alcune aree della città. Con l'obiettivo di definire una mappa di rischio complessivo, ogni fattore di *hazard* è stato classificato in cinque classi di intensità e soppesato in termini di incidenza tramite analisi multicriteriale. La mappa di *hazard* complessivo è stata quindi ottenuta con tecniche di *map algebra* in ambiente GIS e, in seguito, correlata con la mappa di esposizione degli edifici. La mappa di rischio globale, calcolata moltiplicando la mappa di *hazard* per quella di vulnerabilità, delimita così l'area della città dove controllare con particolare attenzione gli edifici esistenti ed evitare ogni nuovo intervento di costruzione. Attualmente è in corso un nuovo progetto di collaborazione tra l'Università di Bologna, quella di Tuzla ed il Politecnico di Bari finanziato nell'ambito di progetti NATO (SfP-DEMOS 983305) e mirato ad approfondire alcuni aspetti dello studio di carattere geofisico ed idrogeologico.

2. INQUADRAMENTO GENERALE E ASSETTO GEOLOGICO

La città di Tuzla è situata nell'area nordorientale della Bosnia Erzegovina ai piedi del monte Majejica ad un'altitudine media di 239 m sul livello del mare. Il centro cittadino si sviluppa lungo la piana alluvionale del torrente Jala e sulle alture circostanti (Fig. 1).



Fig. 1 - La città di Tuzla rappresentata in un'immagine Quickbird.

Le formazioni geologiche dell'area fanno parte del riempimento del Bacino Sud Pannonic (TARI AND PAMIĆ, 1998) e sono caratterizzate da depositi sedimentari del Miocene composti prevalentemente da calcari, marne, argilliti, arenarie ed evaporiti appartenenti

più precisamente al periodo Aquitaniano-Burdigaliano (HRVATOVIĆ, 2006). I depositi di sale, collocati sotto la città e nelle aree circostanti, hanno forma ellissoidale con estensione di circa 2 Km² (Fig. 2). Prima dell'inizio delle estrazioni dal sottosuolo le formazioni saline erano in equilibrio con la brina saturo di sale e isolate dai depositi impermeabili di argilite. Il prelievo incontrollato della brina ha modificato intensamente l'assetto idrogeologico causando ingressione di acque dolci e conseguente dissoluzione incontrollata dei depositi. Durante gli anni '80, per alcuni mesi, è stata inoltre iniettata acqua dolce per favorire la dissoluzione e ciò a provocato l'unico caso relativo alla formazione di sinkhole descritto nell'area di Tuzla, originando una voragine del diametro di circa 50 metri. Per il resto il fenomeno deformativo è consistito in una sequenza di sprofondamenti e fratturazioni (Tatić, 1979).

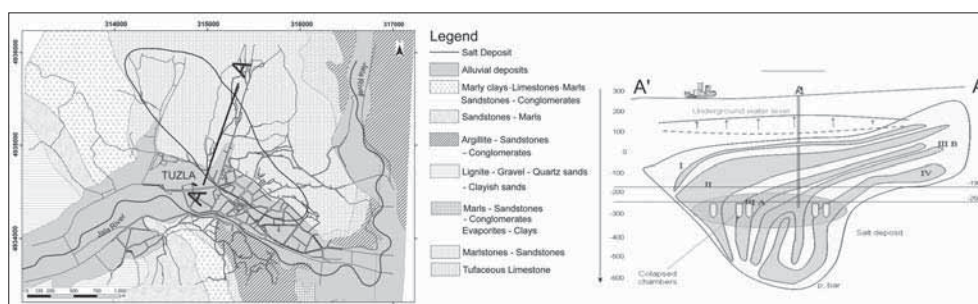


Fig. 2 - Caratterizzazione geologica dell'area.

3. EVOLUZIONE DELLA SUBSIDENZA STORICA E CORRELAZIONE CON LE ATTIVITÀ DI ESTRAZIONE

I primi rilievi topografici risalgono al 1914 quando furono effettuate misurazioni trigonometriche e livellazioni geometriche al fine di determinare eventuali deformazioni del terreno. Un monitoraggio sistematico della subsidenza, con frequenza annuale, ebbe inizio però solo nel 1956 per mezzo di una densa rete di capisaldi estesa per circa 5 Km² sul territorio urbano e suburbano. La continuità del monitoraggio si interruppe nel 1992 in seguito agli eventi bellici che hanno riguardato l'Ex Jugoslavia e, successivamente, le campagne di rilievo si fecero più sporadiche e meno dettagliate.

Per quantificare l'evoluzione del fenomeno i dati compresi tra il 1956 ed il 2003 sono stati analizzati ed elaborati rimuovendo i vari *outliers* e le misure relative a capisaldi instabili o danneggiati. La Figura 3 mostra lo sprofondamento complessivo subito tra il 1956 ed il 2003 ed evidenzia la correlazione con l'ammontare di acqua prelevata in un periodo compreso tra il 1956 ed il 1992 a causa della limitata disponibilità di dati nel periodo successivo.

La subsidenza osservata sull'intero periodo 1956-2003 mostra valori di abbassamento fino a 12 m; in quell'area alcuni capisaldi hanno subito abbassamenti medi fino di 25 cm/anno, che hanno provocato numerosi crolli di edifici e centinaia di proprietà seriamente danneggiate. Dal grafico riportato in Figura 3 emerge come i tassi di subsidenza abbiano raggiunto il picco massimo nel 1982 dopo il quale, in seguito alla riduzione delle attività estrattive, il fenomeno rallenta. L'andamento temporale del confronto tra subsidenza media annua ed estrazioni evidenzia una marcata correlazione inversa tra i due

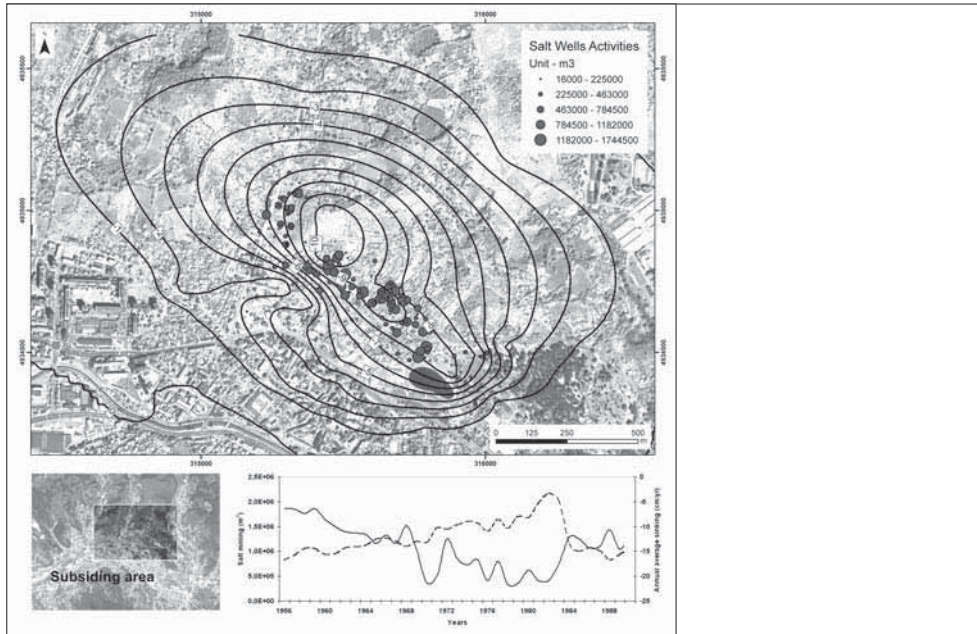


Fig. 3 - Mappa dello sprofondamento complessivo avvenuto tra il 1956 ed il 2003 con distribuzione dei pozzi di estrazione e relazione tra tassi medi annui di subsidenza [cm/anno] con i prelievi annui medi di evaporite [m³].

fattori, identificando con chiarezza la relazione esistente tra i prelievi di acqua e le deformazioni del terreno (MANCINI *et al.*, 2009).

4. ATTUALI FENOMENI IMPATTANTI

Con l'obiettivo di valutare il rischio indotto dal fenomeno analizzato sulla città di Tuzla, i principali fattori di hazard sono stati singolarmente analizzati e quantificati, per poi essere correlati alla vulnerabilità degli edifici in termini di esposizione. Questa fase è stata condotta in ambiente GIS utilizzando un geodatabase investigazione comprensivo di tutte le informazioni. I principali fattori coinvolti nel fenomeno di deformazione del terreno, discussi separatamente nei seguenti paragrafi, consistono nei tassi attuali di subsidenza, nell'analisi dei livelli piezometrici recenti e nella presenza e distribuzione delle fratture superficiali e profonde.

4.1 Tassi di subsidenza attuali

In seguito all'interruzione delle campagne topografiche avvenuta nel 2003, si è presentata la necessità di nuove informazioni circa gli attuali tassi di subsidenza. Nel 2004 è stata istituita una rete GPS, composta di 6 stazioni di riferimento e di circa 60 capisaldi posizionati all'interno dell'area subsidente, poi rilevata mediante posizionamento statico relativo (MANCINI *et al.*, 2009; STECCHI *et al.*, 2006). I rilievi sono stati ripetuti nel 2005, 2006, 2007 e 2009. In Figura 4 è rappresentata la rete con evidenziate le stazioni di riferimento (triangoli) e quelle di raffittimento (punti).

A titolo esemplificativo, in Figura 5 si riporta il confronto tra le soluzioni ottenute nel 2004 e quelle del 2005 dal quale si osservano tassi di subsidenza massimi compresi tra i 10-20 cm/anno (punti 7, 15, 16) mentre nell'area del centro storico questi si attestano su valori inferiori, tra i 2 e i 5 cm/anno. Tra il 2005 ed il 2006 i valori si riducono notevolmente, ad esclusione dell'area dove oggi si trova il lago artificiale Pinga dove ancora si manifestano abbassamenti di 20 cm/anno. Nell'intervallo successivo (2006-2007) la subsidenza si azzerava pressoché ovunque eccetto che nella zona del Pinga che risente presenta tassi di 10 cm/anno.

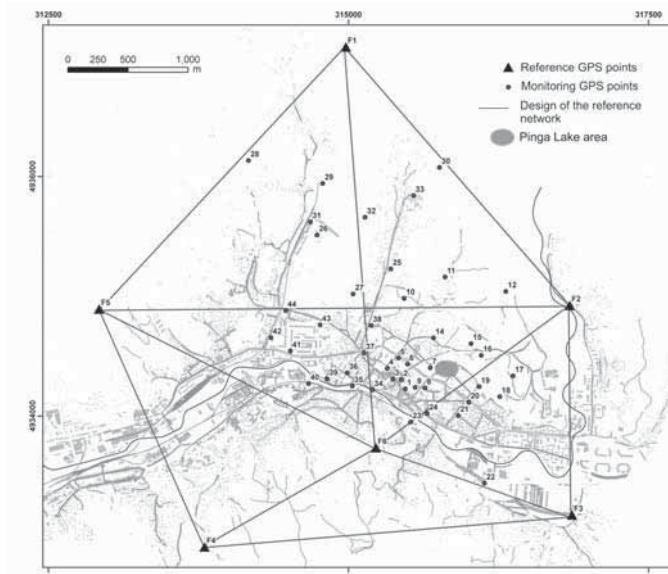


Fig. 4 - La rete GPS utilizzata per il monitoraggio recente della subsidenza

4.2 Risalita della falda freatica

Le depressioni topografiche che si verificano in zone caratterizzate da carsismo in ambiente evaporitico sono spesso soggette ad inondazione per la capacità di concentrare il *run-off* superficiale di acque piovane e per la maggiore vulnerabilità verso l'eventuale risalita della falda freatica (GUTIERREZ *et al.*, 2008). La comprensione delle caratteristiche idrogeologiche dell'area rappresenta un aspetto cruciale nell'analisi del fenomeno di deformazione, poiché i flussi della falda freatica costituiscono uno dei principali fattori responsabili della carsificazione degli strati di origine evaporitica.

Sono stati analizzati i livelli piezometrici ed i relativi movimenti nel tempo e nello spazio. La Facoltà di Scienze Minerarie, Geologiche ed Ingegneristiche dell'Università di Tuzla ha eseguito tale monitoraggio con campagne di misura effettuate nel 1979, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2004 (ORUČ AND MANDŽIĆ, 2005).

È evidente che la parte della città maggiormente sprofondata è anche quella soggetta a più frequenti inondazioni durante gli eventi meteorici estremi, situazione aggravata dalle complicazioni relative alla risalita della tavola d'acqua in conseguenza dell'interruzione dei

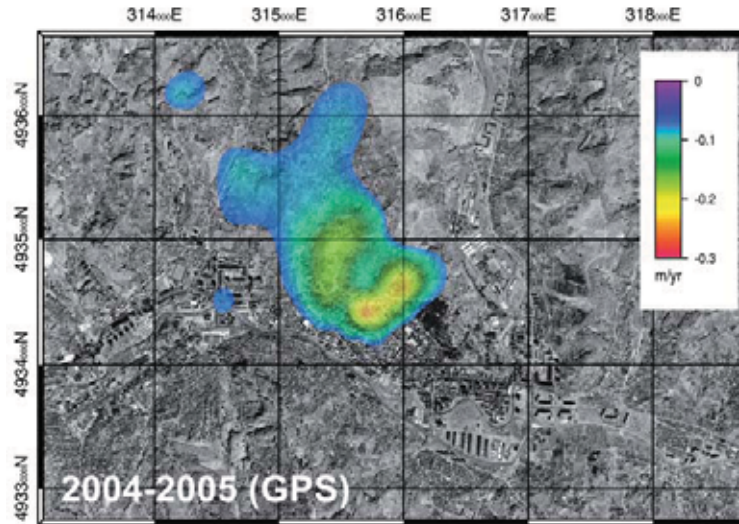


Fig. 5 - Tassi di subsidenza per il periodo 2004-2005. L'accuratezza sulle misure è inferiore al cm.

prelievi. Le informazioni riguardanti la falda freatica sono state processate in ambiente GIS e correlate con i dati relativi al Modello Digitale del Terreno (DTM), al fine di identificare le aree maggiormente a rischio di allagamento. In questo modo è stato possibile stimare la distanza della falda dalla superficie e metterla in relazione con gli attuali tassi di risalita dei livelli piezometrici.

I risultati evidenziano come tra il 1979 ed il 1985 vi sia stato un forte abbassamento della falda, a causa delle intense estrazioni, ed in seguito, tra il 1985 ed il 2004, sia avvenuta un'inversione di tendenza con risalite nell'ordine dei 90 metri per una vasta porzione dell'area di studio. La Figura 6 illustra l'andamento descritto in mappa con valori negativi per gli abbassamenti dei livelli di falda e positivi per gli innalzamenti. La vista tridimensionale mette in relazione i livelli freatici 1985 e 2004 con la distanza dalla superficie del terreno.

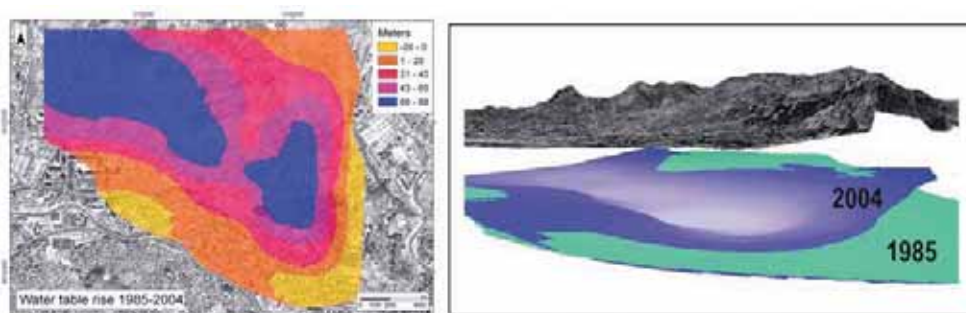


Fig. 6 - Andamento della falda freatica nel periodo compreso tra il 1985 ed il 2004. In negativo le zone caratterizzate da abbassamento della falda e in positivo quelle in innalzamento.

4.3 Identificazione delle fratture profonde tramite analisi di curvatura

Come verificato in laboratorio da Hongxing and Jackson (1998), la dissoluzione di evaporiti è in grado di generare sistemi di faglie e fratture in conseguenza del fenomeno deformativo. Nel caso di Tuzla, sono state utilizzate varie tecniche di indagine (tra cui la riflessione sismica e la tomografia geoelettrica) per identificare la presenza di strutture profonde deformate, anche se con scarsi risultati a causa della forte differenza di velocità che subisce il segnale attraversando le rocce sedimentarie ed i corpi evaporitici. Determinare lo stile, l'orientazione e la densità delle fratture negli strati profondi rappresenta una fase critica nella gestione degli acquiferi. Vari autori suggeriscono l'uso degli attributi delle superfici, tra cui l'analisi di curvatura, per localizzare e quantificare le deformazioni negli strati profondi (BERGBAUER AND POLLARD, 2003 a,b; ALLWARDT *et al.*, 2007). Nel caso di Tuzla l'analisi di curvatura è stata applicata alla superficie di abbassamento cumulativo, anziché a dati topografici o sismici, identificando in maniera efficace le zone potenzialmente fratturate. Nella figura 7 sono illustrati i dati riguardanti la curvatura Gaussiana mentre per approfondimenti circa il metodo analitico e la sua applicazione al caso di Tuzla si rimanda a STECCHI *et al.*, [2009]. I valori positivi di curvatura Gaussiana sono da interpretarsi come strutture di tipo *horst*, o più in generale come il letto di faglie profonde, invece valori negativi indicano, al contrario, zone di dolina, o con caratteristiche di bacino, da correlarsi a strutture di tipo *graben*. Come indicato in Figura 7, le fratture sono da localizzarsi laddove si presentano bruschi passaggi da valori positivi a negativi della curvatura Gaussiana.

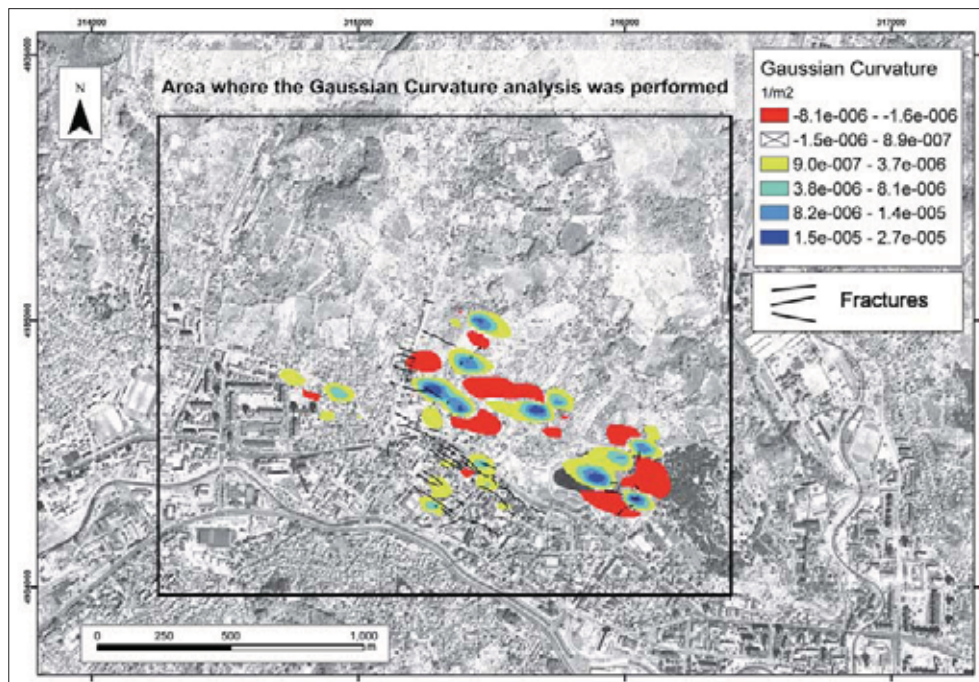


Fig. 7 - I valori di curvatura Gaussiana e la presunta dislocazione delle fratture profonde.

4.4 Fratture superficiali

L'identificazione di aree dove l'accumulo di stress ha generato fratture superficiali è stata eseguita tramite mappatura cinematica GPS. Sfortunatamente, però, non è stato possibile identificare le fratture proprio nella zona maggiormente deformata, poiché gli ingenti danni provocati nel corso degli anni dagli sprofondamenti hanno indotto numerose opere di restauro e rimodellazione del terreno, rendendo molto difficile l'identificazione di fratture. Al contrario, nella zona del centro cittadino le fratture sono ben evidenti lungo le strade, i marciapiedi e su numerosi edifici (Fig. 8).

Come ben evidenziato in Figura 7, il modello di fratture superficiali rilevato presenta un allineamento NW-SE, confermando i campi di stress indicati dall'analisi di curvatura Gaussiana.



Fig. 8 - Esempi di fratture presenti nel centro di Tuzla e sui palazzi storici.

5. STIMA DEL RISCHIO GLOBALE

Seguendo quanto proposto da VARNES (1994), esistono tre componenti principali nella valutazione del rischio: l'*hazard* (H), ovvero la probabilità che un fenomeno impattante agisca su di una porzione di territorio per un determinato periodo di tempo; gli elementi a rischio (E), rappresentati principalmente da esseri umani, edifici ed infrastrutture; la vulnerabilità (V) degli elementi verso quel particolare fenomeno impattante. Da un punto di vista matematico nei lavori di Varnes il rischio può essere espresso dalla funzione:

$$R = \sum H \cdot E \cdot V$$

dove compaiono i fattori sopra esposti oltre ad R che rappresenta il rischio complessivo. Nel paragrafo successivo ogni singolo *hazard* è rappresentato e classificato attraverso mappe *raster* e la loro combinazione attraverso l'applicazione dei metodi multi criteri e grazie agli strumenti di *map algebra* porta alla stima dell'*hazard* complessivo e, successivamente, a quella del rischio globale dovuto ai fenomeni di deformazione.

5.1 Riclassificazione dei fenomeni impattanti

Con l'intento di effettuare una valutazione del rischio che fosse associata alle informazioni più recentemente disponibili, è stato scelto l'intervallo relativo al periodo 2004-2005 per il quale sono stati quindi analizzati i fattori che concorrono a formare il rischio: subsidenza, fratture superficiali e profonde e la risalita dei livelli piezometrici. I vari fattori sono stati ricampionati su una griglia con passo di 50 metri e riclassificati secondo 5 livelli di intensità. La tabella 1 riassume le varie scale di intensità utilizzate per la riclassificazione dei fenomeni impattanti.

I tassi annuali di subsidenza [cm/anno] derivano dalle misure GPS effettuate durante le campagne di monitoraggio, mentre la minaccia di risalita della tavola d'acqua è stata quantificata dalle mappe isofreatiche, ed espressa in termini del tempo previsto e necessario alla falda freatica per raggiungere la superficie. Sia per le fratture superficiali che per quelle profonde l'intensità del fattore impattante è stata espressa come densità lineare di fratturazione [m/ha].

Tab.1 - Schema riassuntivo delle classi di intensità dei singoli hazard.

Hazard	Classes	Reference values
Deformation (sinking rate)	1	from -0.01 to 0.00 m/yr
	2	from -0.03 to -0.01 m/yr
	3	from -0.07 to -0.03 m/yr
	4	from -0.12 to -0.07 m/yr
	5	from -0.22 to -0.12 m/yr
Water table rise	1	from 0 to 10 m
	2	from 10 to 15 m
	3	from 15 to 20 m
	4	from 20 to 30 m
	5	from 30 to 40 m
Shallow fractures density	1	from 0.0 to 0.2 m/ha
	2	from 0.2 to 0.8 m/ha
	3	from 0.8 to 1.4 m/ha
	4	from 1.4 to 2.6 m/ha
	5	from 2.6 to 4.6 m/ha
Superficial deformation	1	from 0.0 to 0.2 m/ha
	2	from 0.2 to 0.8 m/ha
	3	from 0.8 to 1.4 m/ha
	4	from 1.4 to 2.6 m/ha
	5	from 2.6 to 4.6 m/ha

5.2 Analisi di decisione multicriteriale (MDA)

Recentemente sono stati studiati vari metodi di analisi multicriteriale e associati con diversi modelli decisionali, al fine di valutare numerose tipologie di rischio correlato alla presenza di *geohazard*. MALCZEWSKI (1999, 2006) fornisce un'esaustiva panoramica riguardante i possibili approcci multicriteriali, analizzando svariate metodologie adottabili per soppesare i fattori e la loro implementazione in ambiente GIS. Sebbene non vi sia ancora un'abbondante letteratura riguardante la valutazione del rischio in ambiente urbano connessa a fenomeni geologici, è comunque necessario definire una criterio decisionale per mezzo del quale ordinare gerarchicamente gli *hazard* nella stima del rischio complessivo.

In questo studio il peso relativo di ogni singolo fattore viene quantificato per mezzo di un semplice confronto "tra coppie" di fattori (Bana et al., 2003, 2006), spesso definito in letteratura *Pairwise Comparison Method* in cui il peso normalizzato dei vari fattori si ottiene per mezzo di una matrice (Tabella 2) che confronta gli *hazard* in termini di incidenza relativa. Sebbene nella fase di giudizio dei fattori sia necessaria una conoscenza approfondita del problema (parere esperto), questo metodo permette di soppesare gli *hazard* in modo meno soggettivo. Nella Tabella 2 il valore 1 indica che il fattore indicato nella riga della matrice è considerato più importante di quello nella colonna, mentre il valore 0 indica il contrario. Per maggiori dettagli sull'applicazione di tale metodo al caso di studio specifico si rimanda a MANCINI *et al.*, (2009).

Il criterio adottato si basa sull'ipotesi che la stabilità e l'integrità degli edifici sia influenzata principalmente dalle fratture superficiali e, in sequenza, dal rischio di esondazione della falda, dalla subsidenza e dalle presunte fratture profonde. Questa scelta deriva dal fatto che le fratture profonde sono dedotte da un calcolo matematico e quindi, nonostante la loro influenza sugli edifici potrebbe essere molto intensa, l'affidabilità dei risultati non è confrontabile con quella degli altri fattori, che sono misurati direttamente sul campo.

In conclusione la mappa di *hazard* complessivo è stata ottenuta mediante una procedura additiva applicata ai singoli fattori con i relativi pesi (SAW, Simple Additive Weighting) implementata in GIS grazie agli strumenti di *map algebra*.

Tab. 2 - Correlazione a coppia e peso relativo dei fattori in gioco.

Hazard	Subsidence rate	Water rising	Visible fractures	Inferred fractures	Fictitious factor	Total	Normalized weight
Subsidence rate	-	0	0	1	1	2	0.2
Water rising	1	-	0	1	1	3	0.3
Visible fractures	1	1	-	1	1	4	0.4
Inferred fractures	0	0	0	-	1	1	0.1
Fictitious factor	0	0	0	0	-	0	0.0

5.3 Vulnerabilità ed esposizione al danno

La stima della vulnerabilità richiede un preciso censimento degli elementi a rischio, che nel caso di Tuzla sono rappresentati principalmente dagli edifici e dalle infrastrutture. A causa delle scarse informazioni disponibili le infrastrutture non sono state incluse nell'analisi del rischio. Per quanto riguarda le vite umane, la probabilità di morte o infortunio risulta molto bassa per gli abitanti di Tuzla, in quanto le deformazioni del terreno sono sempre

avvenute in modo graduale senza mai portare a crolli improvvisi degli edifici. L'analisi della vulnerabilità è stata perciò impostata sulla presenza/assenza degli edifici all'interno dell'area a rischio, assumendo che la vulnerabilità sia uguale a 1 per i beni materiali e 0 per le vite umane. In tal modo la vulnerabilità diventa inclusiva anche del fattore esposizione (elementi a rischio).

In realtà un'esaustiva analisi di vulnerabilità degli edifici dovrebbe tenere conto di vari parametri tra cui l'età del fabbricato, la tipologia di costruzione, la presenza o meno di un quadro di lesioni e fessurazioni. Purtroppo la Municipalità di Tuzla non è stata in grado di fornire questo tipo di informazioni, per cui la mappa di esposizione al danno è stata calcolata considerando l'attuale densità dell'urbanizzato all'interno dell'area minacciata.

Se si analizza l'evoluzione urbanistica della città confrontando le carte storiche con più recenti immagini satellitari ne scaturisce che in circa 40 anni circa 1100 edifici sono stati evacuati e successivamente demoliti. Secondo fonti locali si stima che circa 15000 persone abbiano dovuto abbandonare le proprie abitazioni (IBRELIĆ *et al.*, 2007). Gli edifici ancora presenti all'interno della zona subsidente sono quelli considerati nell'analisi di esposizione/vulnerabilità. Nello specifico è stato calcolato un fattore di densità degli edifici per mezzo di una procedura analoga a quella utilizzata per le classi di intensità degli *hazard*. La Figura 9 mostra la densità degli edifici (espressa in metri di mura edificate per ettaro) e la relativa classificazione; la mappa include così le componenti di vulnerabilità ed esposizione, considerando $V=1$ in caso di presenza di edifici ed E proporzionale alla densità degli edifici stessi.

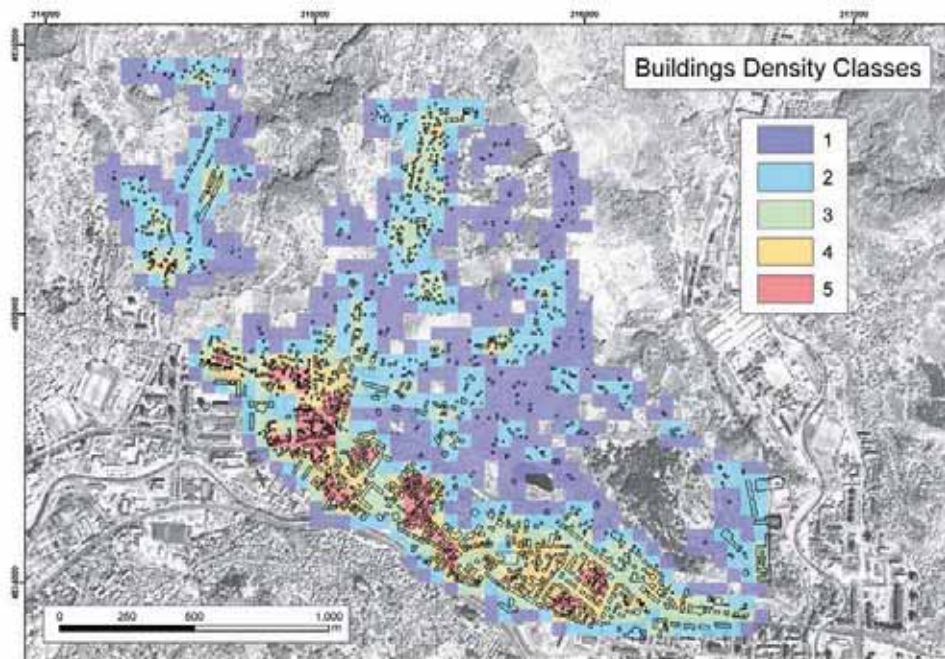


Fig. 9 - Classi di vulnerabilità per l'area a rischio. Le classi sono suddivise secondo la densità degli edifici [m/ha].

6. ANALISI DEL RISCHIO TOTALE

La formula di Varnes permette la stima del rischio totale (R) mettendo in relazione i singoli *hazard* (H) con la vulnerabilità (V) e l'esposizione (E). In riferimento ai fattori analizzati, la formula per il calcolo del rischio può essere espressa come:

$$R = \sum_1^4 (H_i w_i) \cdot E \cdot V$$

dove R è calcolato per ogni cella della griglia (50x50 m), $i=1...4$ rappresentano gli *hazard* e w il peso relativo dei singoli *fattori*. La mappa di rischio totale è stata ottenuta implementando la formula suddetta in ambiente GIS, mediante strumenti di *Map Algebra*. Sebbene non sia stata effettuata nessuna analisi statistica per stimare un livello di accuratezza dei risultati, l'elevata densità dei dati e le rigorose tecniche di indagine utilizzate attribuiscono un alto grado di affidabilità all'analisi nel suo complesso.

La mappa del rischio mostrata in figura 10 mostra le aree maggiormente minacciate dalla somma degli *hazard* impattanti, fornendo così un importante strumento a supporto delle fasi pianificatorie a livello sotto-comunale. La mappa in questione suddivide il rischio totale in cinque classi di intensità dalla più bassa (1) alla più alta (5). Ovviamente le zone più a rischio sono rappresentate dalle aree maggiormente colpite dalle deformazioni, ma si può notare come, nella parte nord-occidentale della mappa, siano presenti aree ad alto rischio. In questa zona è presente la vecchia miniera abbandonata, dove per decenni è stato estratto "a secco" salgemma lungo gallerie che probabilmente sono state di recente colmate in seguito all'innalzamento del livello freatico. L'ipotetica dissoluzione di ulteriore salgemma in quest'area fa presupporre che potrebbero verificarsi nuovi ed intensi fenomeni di deformazione e dissesto.

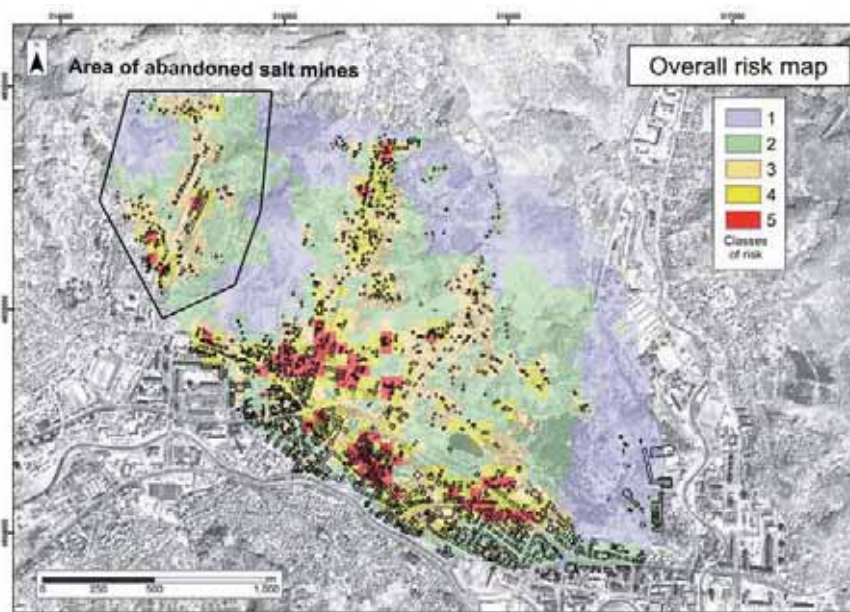


Fig. 10 - La mappa di rischio per la città di Tuzla ottenuta applicando la formula di Varnes (1984).

7. CONCLUSIONI

Il lavoro ha illustrato le potenzialità dei metodi propri della Geomatica e dei Sistemi Informativi Geografici nella valutazione del rischio per l'area di Tuzla, soggetta ad intense deformazioni del suolo per via di vari fattori correlati al prelievo di brina dal sottosuolo.

I dati acquisiti per mezzo di GPS geodetici, rilievi piezometrici e analisi di dati morfometrici hanno consentito l'identificazione e la quantificazione dei fattori in gioco nella definizione del fenomeno deformativo. La conoscenza dei fattori di vulnerabilità presenti nel tessuto urbano ha poi consentito la definizione di una mappa di rischio totale, anche se proprio sulla definizione della componente V si devono concentrare ulteriori sforzi sia nella raccolta delle informazioni che sul loro trattamento. Le mappe ottenute tramite applicazioni GIS rappresentano un importante strumento per gli enti locali nell'ambito della pianificazione urbanistica e territoriale. I risultati raggiunti infatti oltre a mettere in luce le aree della città soggette a classi di rischio superiore, suggeriscono di intensificare l'attività di monitoraggio dei movimenti della falda freatica e delle fratture superficiali.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Regione Emilia Romagna e la Provincia di Ravenna per aver finanziato il progetto "Realizzazione a Tuzla (Bosnia and Erzegovina) di un programma di assistenza tecnica per la gestione di un sistema territoriale finalizzato al controllo e monitoraggio dei problemi di subsidenza legati allo sfruttamento dei sottostanti depositi di salgemma (Coordinatore: Prof. Giovanni Gabbianelli)". L'attuale progetto "DEMOS" è supportato da NATO's Public Diplomacy Division nell'ambito dei finanziamenti "Science for Peace". La Municipalità di Tuzla ha fornito l'archivio di dati storici (D.O.O. Mining Institute of Tuzla). In particolare si ringraziano Amer Dzindo, Rusmir Salihovic, Toni Nikolic, Mauro Altizio, Mario Laghi, Andrea Minchio e Beatrice Giambastiani per il supporto fornito durante le campagne di rilievo GPS.

BIBLIOGRAFIA

- ALLWARDT P.F., BELLAHSEN N., POLLARD D.D. (2007) - *Curvature and fracturing based on global positioning system data collected at Sheep Mountain anticline, Wyoming*. Geosphere, **3** (6), 408-421.
- BANA E., COSTA C.A., AÑTAO DA SILVA P., NUNES CORREIA F. (2003) - *Multicriteria Evaluation of Flood Control Measures: The Case of Ribeira do Livramento*. The London School of Economics and Political Science, London.
- BANA E., COSTA C.A., OLIVEIRA C.S., VIEIRA V. (2006) - *Prioritization of bridges and tunnels in earthquake risk mitigation using multicriteria decision analysis: application to Lisbon*. Omega, **36** (3), 442-450.
- BENITO G., GUTIÉRREZ F., PÉREZ-GONZÁLEZ A., MACHADO M.J. (1998) - *River response to Quaternary subsidence due to evaporite solution (Gallego River, Ebro Basin, Spain)*. Geomorphology, **22**, 243-263.
- BENITO G., GUTIÉRREZ F., PÉREZ-GONZÁLEZ A., MACHADO M.J. (2000) - *Geomorphological and sedimentological features in Quaternary fluvial systems affected by solution induced subsidence (Ebro Basin, Spain)*. Geomorphology, **33**, 209-224.
- BERGBAUER S., POLLARD D.D. (2003A) - *How to calculate normal curvatures of sampled geological surfaces*. Journal of Structural Geology, **25**, 277-289.

- BERGBAUER S., POLLARD D.D. (2003B). *Erratum to "How to calculate normal curvatures of sampled geological surfaces"*. Journal of Structural Geology, **25**, 2167.
- COOPER A.H. (1996) - *Gypsum karst of Great Britain*. In: Klimchouk A., Lowe D., Cooper A., Sauro U. (Eds.) - *Gypsum Karst of the World*. International Journal of Speleology, **25** (3-4), 195-202.
- COOPER A.H. (2002) - *Halite karst geohazards (natural and man-made) in the United Kingdom*. Environmental Geology, **42**, 505-512.
- D.O.O. MINING INSTITUTE OF TUZLA (2000) - *Controlling subsidence problem in city Tuzla, Bosnia & Herzegovina*. Technical Report.
- GARLEFF K., KUGLER H., POSCHINGER A.V., STERR H., VILLWOCK G. (1997)- In: Embleton C. (Ed.) - *Geomorphological Hazards of Europe*. Developments in Earth Surface Processes, **5**, 147-177.
- GUTIÉRREZ M., GUTIÉRREZ F. (1998) - *Geomorphology of the tertiary gypsum formations in the Ebro Depression (Spain)*. Geoderma, **87**, 1-29.
- GUTIÉRREZ-SANTOLALLA F., GUTIÉRREZ-ELORZA M., MARÍN C., MALDONADO C., YOUNGER P.L. (2005) - *Subsidence hazard avoidance based on geomorphological mapping in the Ebro River valley mantled evaporite karst terrain (NE Spain)*. Environmental Geology, **48**, 370-383.
- GUTIÉRREZ F., COOPER A.H., JOHNSON K. (2008) - *Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas*. Environmental Geology, **53**, 1007-1022.
- HONGXING G., JACKSON M.P.A. (1998) - *Physical modeling of structures formed by salt withdrawal: implications for deformation caused by salt dissolution*. AAPG Bulletin, **82** (2), 228-250.
- HRVATOVIĆ H. (2006) - *Geological guidebook trough Bosnia and Herzegovina*. Geological Survey of Federation Bosnia Herzegovina.
- IBRELIĆ I., KUDUMOVIĆ F., AHMETBEGOVIĆ S. (2007) - *Economy and ecology of natural resources in Tuzla area (Bosnia and Herzegovina) in the past and future projections*. Proceedings of the "Joint congress of the European Regional Science Association and ASRDLF [Association de Science Regionale de Langue Francaise]. 1-7.
- JOHNSON K.S. (1997) - *Evaporite karst in the United States*. Carbonates and Evaporites, **12** (1), 2-14.
- JOHNSON K.S. (2005) - *Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States*. Environmental Geology, **48**, 395-409.
- MALCZEWSKI J. (1999) - *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Wiley J. and Sons. 408 pp.
- MALCZEWSKI J. (2006) - *Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multi-criteria evaluation for land-use suitability analysis*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, **8** (4), 270-277.
- MANCINI F., STECCHI F., ZANNI M., GABBIANELLI G. (2009) - *Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia & Herzegovina)*. Environmental Geology, **58**, 381-389.
- MANCINI F., STECCHI F., GABBIANELLI G. (2009) - *GIS based assessment of risk due to salt mining activities at Tuzla (Bosnia and Herzegovina)*. Engineering Geology, **109**, 170-182.

- ORUČ E. MANDŽIĆ E. (2005) - *Hydrological and hydrodynamic consideration about Tuzla salt deposit*. PhD thesis of the Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering (RFFG) of the University of Tuzla. Serbian–Croatian language.
- REUTER F. STOYAN D. (1993) - *Sinkholes in carbonate, sulphate and chloride karst regions: principles and problems of engineering geological investigations and predictions, with comments for the construction and mining industries*. In: BECK B.F. (Ed.) - Fourth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and the Environmental Impacts of Karst. Panama City, Florida.
- SORIANO M.A., SIMÓN J.L. (1995) - *Alluvial dolines in the central Ebro basin, Spain: a spatial and developmental hazard analysis*. *Geomorphology*, **11**, 295–309.
- SORIANO M.A., SIMÓN J.L. (2001) - *Subsidence rates of alluvial dolines in the central Ebro Basin, northeastern Spain*. In: BECK B., HERRING J.G. (Eds.) - Geotechnical and environmental applications of karst geology and hydrology. Balkema, Rotterdam, 47–52.
- SORIANO M.A., SIMÓN J.L. (2002) - *Subsidence rates and urban damages in alluvial dolines of the Central Ebro basin (NE Spain)*. *Environmental Geology*, **42**, 476–484.
- STECCHI F., MANCINI F., GABBIANELLI G. (2006) - *G.I.S. as a tool for data management and ground deformations analysis in the city of Tuzla (BiH)*. Proceedings of the 5th Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems. Barcelona, Spain.
- STECCHI F., ANTONELLINI M., GABBIANELLI G. (2009) - *Curvature analysis as a tool for subsidence-related risk zones identification in the city of Tuzla (BiH)*. *Geomorphology*, **107**, 316–325.
- TATIĆ M., (1979) - *Environment protection against the consequences of subsidence in town of Tuzla, Bosnia & Herzegovina*. Community Head-Office for Construction of Tuzla.
- TARI V., PAMIĆ J. (1998) - *Geodynamic evolution of the northern Dinarides and the southern part of the Pannonian Basin*. *Tectonophysics*, **297**, 269–281.
- TOULEMONT M. (1984) - *Le karst gypseux du Lutétien supérieur de la région parisienne: Caractéristiques et impact sur le milieu ur bain*. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, **25** (3), 213–228.
- VARNES D.J. (1984) - *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Paris, pp 63.

INDIVIDUAZIONE DI UN'AREA A RISCHIO SINKHOLES INTERESSATA DA UN PROGRAMMA INTEGRATO DI INTERVENTO URBANISTICO (PR.INT. "PRIMA PORTA", ROMA)

di *Succhiarelli C.¹, Sciacca P.², Fucci F.³, Marabotto F.⁴*

ABSTRACT

In a peripheral area located in the north side of Rome, buildings workshops, roads, park, parking spaces and one kindergarten were planned by means of the instrument of Integrated Program for Action named Pr.int "*Prima Porta*" (Pr.int, the acronym derived from the name in Italian). The Pr.int "*Prima Porta*" is situated on a pyroclastic volcanic plateau. This Plateau is composed of pyroclastic ash, lapilli and black scoria from the Sabatini volcanic districts. The radiometric age of pyroclastic plateau ranges about from 514 ka and 410 ka (middle Pleistocene).

In the preliminary geological study of their morphology, the sinkholes of Integrated Program for Action area were identified by the observation of an british military aerial photography (R.A.F.) of the Second World War.

The identified of sinkholes are depressions of the field level with nearly circular and elliptical shapes with diameter range between five – six meters to twenty-five meters. These depressions originated by the collapse of the higher geological structure of artificial underground caves and tunnels. Archeological and geological evidences prove that the underground tunnels and caves were excavated during the Roman period and the inputs (or entrances) of excavation were located along scarps of pyroclastic plateau.

The work of identifying the morphology of sinkholes and the morphological evolution of territory was carried out using informations from military aerial photography and aerial photography archive (1955, 1961, 1967, 1977 and 1991) of Department of Urban Planning of Municipality of Rome. The reason why the ancient roman excavated tunnels and caves was probably related to the extraction of building stone.

This work presents the results of geological coring and electric resistivity survey and the methods used for identification and verification of geological risk sinkholes by the location

1 Geologo, Comune di Roma, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Direzione Programmazione e Pianificazione del Territorio, Ufficio Pianificazione Urbanistica Generale – P.R.G., via del Turismo, 30 - 00144 Roma

2 Geologo, ISPRA, Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale, Servizio Valutazioni Ambientali, viale Cesare Pavese, 305 - 00144 Roma

3 Geometra, Comune di Roma, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Direzione Programmazione e Pianificazione del Territorio, Ufficio Pianificazione, Mobilità e Infrastrutture, piazzale Kennedy, 1 - 00144 Roma

4 Architetto, libero professionista (ex Direttore dell'Ufficio Mobilità Generale e Riqualificazione Aree Ferroviarie del Dipartimento alle Politiche della Programmazione e Pianificazione del Territorio del Comune di Roma), viale Tito Livio, 45 - 00136 Roma

of underground caves. The geological coring has shown the presence of underground caves and the electric resistivity surveys have revealed a high probability of tunnels and underground caves located at a depth of between six and ten meters from the ground level. Geological risk assessment will provide the specific geological and technical requirements for urban planning of Pr.int "Prima Porta".

1. INTRODUZIONE

In un'area della periferia a Nord di Roma compresa tra la via Flaminia, la via Tiberina e il cimitero comunale Flaminio (fig. 1) (Municipio Roma XX), geomorfologicamente costituita da un altopiano vulcanico di origine piroclastica prospiciente la pianura alluvionale del fiume Tevere, sono pianificati una serie di interventi, riguardanti la localizzazione di attività artigianali per una superficie edificabile di circa 52.000 m² e la realizzazione di viabilità, parcheggi, un parco urbano e spazi verdi (per circa 12 ettari) e servizi (tra cui un asilo nido), da attuarsi attraverso lo strumento urbanistico del Programma integrato denominato "Prima Porta" dall'omonima area urbana in cui ricade.

Durante la fase preliminare degli studi geologici per la valutazione dell'idoneità territoriale (ai sensi della Delibera di Giunta Regionale del Lazio 2649/1999 "Linee guida e documentazione per l'indagine geologica e vegetazionale. Estensione dell'applicabilità della legge 2 febbraio 1974, n.64") [SCIACCA P. & ZUCCA P. (2005)] e per il supporto tecnico alla redazione dello Studio di Inserimento Paesistico (previsto dalla Legge Regionale del Lazio 24/98 "Pianificazione paesistica e tutela dei beni e delle aree sottoposti a vincolo paesistico") [SUCCHIARELLI C., FUCCI F. & TORNIAI I. (2009 a e b)] in relazione all'approvazione dello strumento urbanistico da parte della Regione Lazio, fu individuata un'area interessata da fenomeni di *sinkholes* (sprofondamenti catastrofici del piano campagna) avvenuti nel passato e attualmente non più rilevabili visivamente sul terreno in quanto bonificati (nel corso degli anni) per lo svolgimento di attività agricole.

Le ricerche effettuate hanno condotto all'ipotesi che i processi di *sinkholes* furono collegati al crollo delle volte di una estesa rete caveale sotterranea.

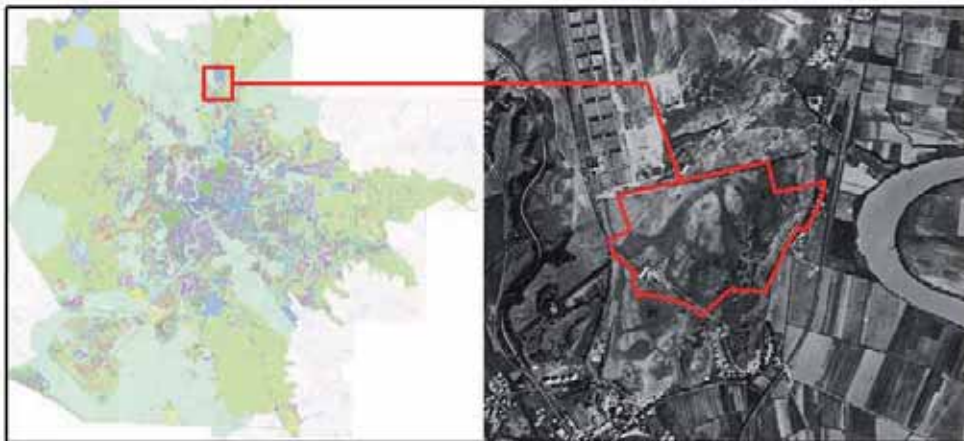


Fig. 1 – Ubicazione nel Comune di Roma e delimitazione (in rosso) dell'area territoriale interessata dal Programma integrato di intervento urbanistico "Prima Porta".

Di seguito vengono illustrate le attività svolte per la identificazione dell'area a rischio *sinkholes* che, in una prima fase furono condotte in un'area campione, per l'accertamento della localizzazione delle cavità nel sottosuolo. I dati raccolti hanno consentito di determinare specifiche prescrizioni geologico-tecniche da mettere in atto nelle successive fasi di indagini della progettazione e nella fase attuativa del Programma urbanistico.

2. CARATTERI GEOLITOLOGICI E GEOMORFOLOGICI

I dati raccolti dal rilevamento di campagna e da quelli provenienti dalla letteratura scientifica [KARNER D.B., MARRA F. E RENNE P.R. (2001)] hanno permesso di definire la costituzione geologico - stratigrafica del sottosuolo della parte dell'area dell'altopiano interessata (fig. 2) dalla realizzazione del Programma integrato come composta da sedimenti vulcanici di tipo piroclastico, qui di seguito descritti, secondo la loro successione cronostatigrafica di deposizione, partendo dal più antico al più recente:

- *Tufi Stratificati Varicolori di Sacrofano*, ascrivibili al Pleistocene medio con età compresa tra 514.000 e 488.000 ya;
- *Tufo Rosso a Scorie Nere* sabatino, ascrivibile al Pleistocene medio con datazione di circa 449.000 ya;
- *Unità stratigrafica dei Tufi Stratificati Varicolori di La Storta*, ascrivibile al Pleistocene medio con datazione a 410.000 ya) (fig. 3).

I *Tufi Stratificati Varicolori di Sacrofano* sono costituiti da ceneri e lapilli aventi diversi gradi di coesione e distinti stratigraficamente, dal più antico al più recente, in:

- *Tufo Giallo di Prima Porta* che costituisce la parte basale della scarpata di raccordo tra la pianura alluvionale del fiume Tevere e il sommitale altopiano piroclastico;
- *Sequenza Piroclastica di Grottarossa*;
- *Tufo Terroso con Pomici Bianche* (fig. 4).

Il *Tufo Rosso a Scorie Nere* sabatino presenta un aspetto massivo con scorie nere fortemente vescicolate aventi dimensioni variabili da 5 - 10 cm a 30 - 40 cm in matrice cineritica di colore grigio. Rappresenta la litologia che presumibilmente è stata interessata, in epoca romana, da attività estrattive in sotterraneo (per impieghi edilizi) e che, successivamente nel loro sviluppo ipogeo, hanno prodotto la formazione di estesi *sinkholes* testimoniati in una aerofotografia del 1944.



Fig. 2 - Vista panoramica da nord verso sud dell'area agricola dell'altopiano piroclastico interessata dagli interventi del Programma Integrato (foto Fucci F., 2005).

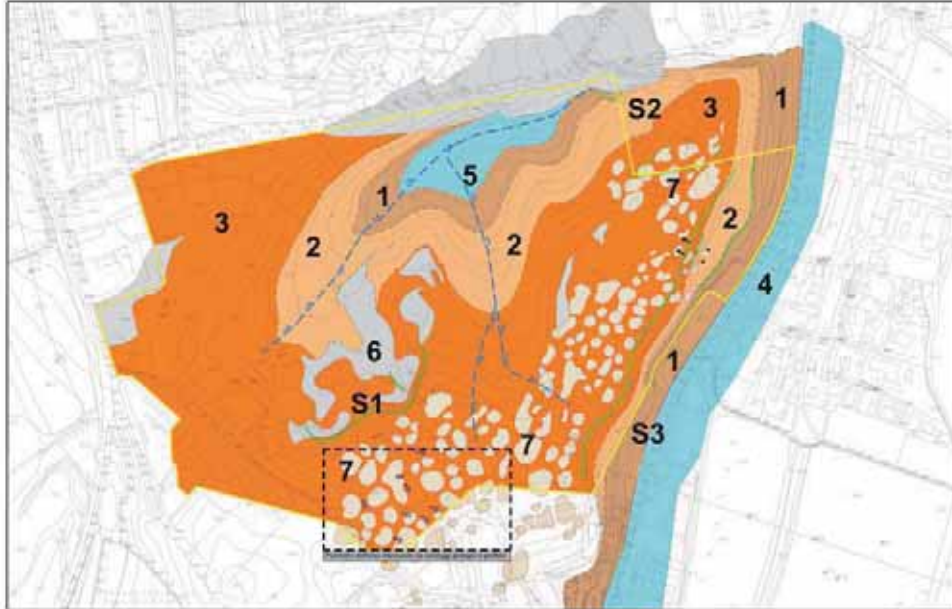


Fig. 3 - Carta geolitologica con l'ubicazione nel riquadro nero tratteggiato [zona S1] della prima fase delle indagini geologiche dirette e indirette per l'identificazione e la valutazione del rischio geologico in relazione della presenza di cavità sotterranee. Legenda: 1) Tufi Stratificati Varicolori di Sacrofano; 2) Tufo Rosso a Scorie Nere; 3) Tufi Stratificati Varicolori di La Storta; 4) depositi alluvionali del fiume Tevere; 5) depositi colluviali e alluvionali del reticolo idrografico locale; 6) terreni di riporto di riempimento delle aree estrattive a cielo aperto; 7) forme subcircolari dei sinkholes colmate da terreni di riporto; S1 e S2) affioramenti geolitologici riportati nella colonna stratigrafica di fig. 5; S3) affioramento geolitologico riportato nella colonna stratigrafica di fig. 4 [da: Succhiarelli C., Fucci F. & Torniai I. (2009 a)]

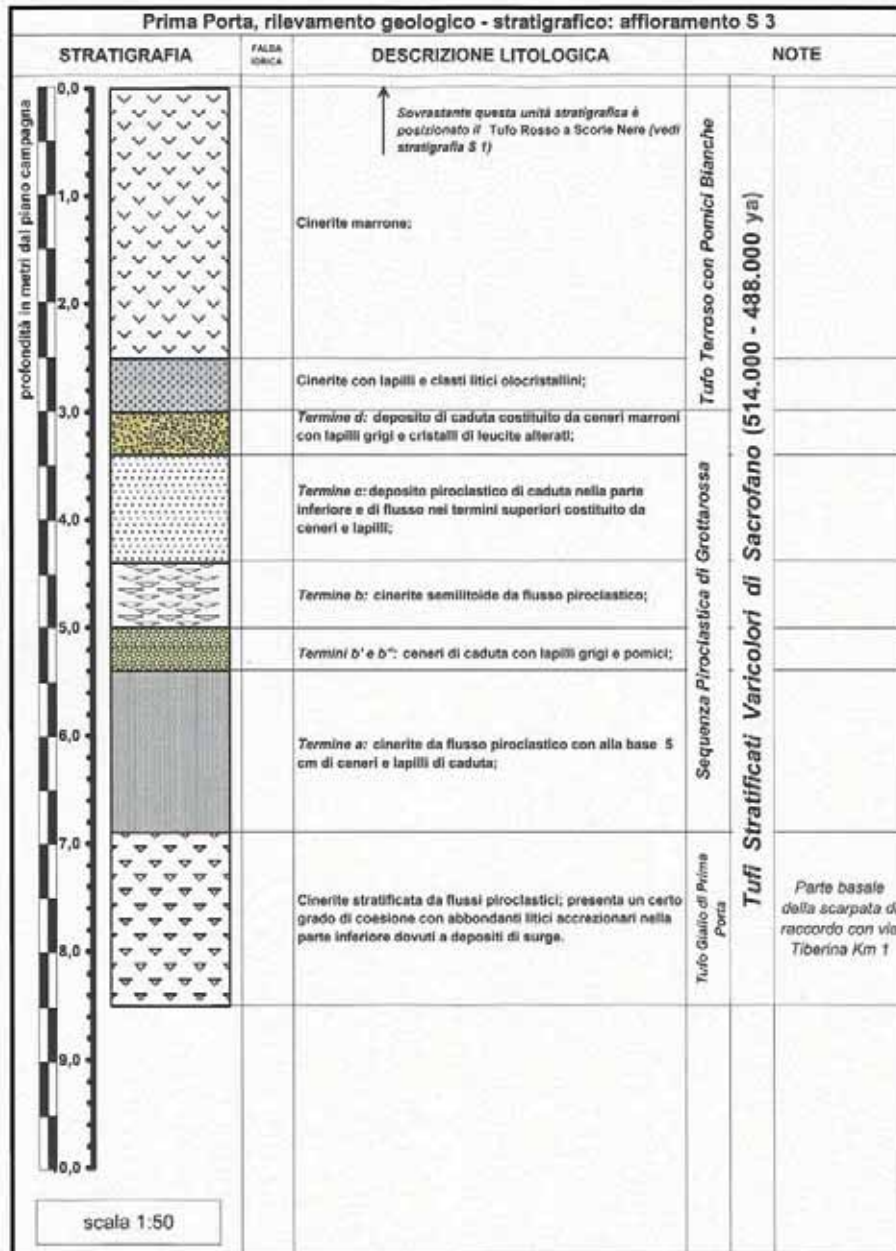


Fig. 4 - Colonna stratigrafica della parte litologica inferiore dell'altopiano piroclastico interessato dal Programma integrato di intervento urbanistico [dati stratigrafici da: Karner D.B., Marra F. & Renne P.R. (2001) ed elaborazione informatica a cura di Succhiarelli C.].

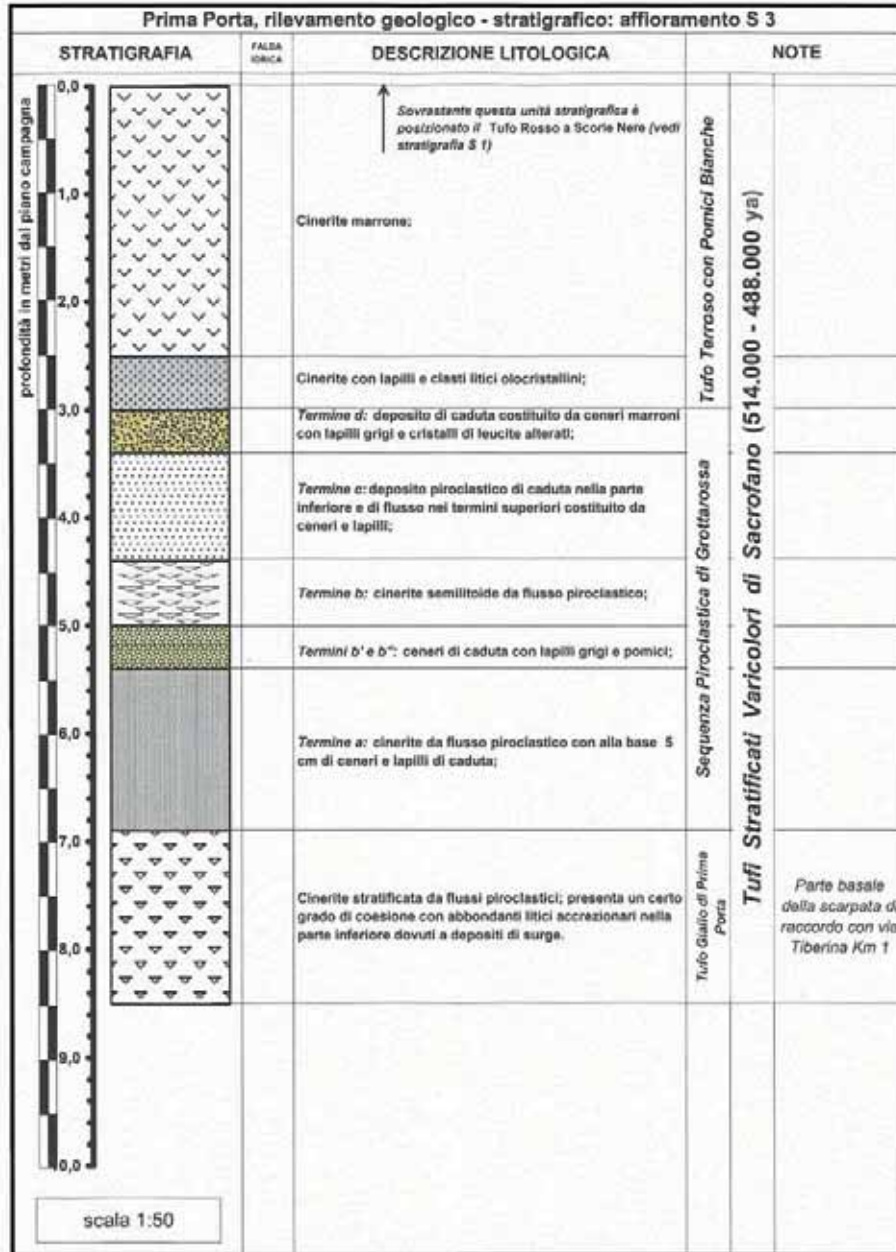


Fig. 5 - Colonna stratigrafica della parte litologica superiore dell'altopiano piroclastico interessato da processi di dissesto dei sinkholes e dal Programma integrato di intervento urbanistico (rilevamento geolitoologico ed elaborazione stratigrafica a cura di Succhiarelli C. e Marra F.)

L'Unità stratigrafica dei Tufi Stratificati Varicolori di La Storta è costituita da cineriti marroni chiare semilitoidi con fessurazioni verticali formanti blocchi in incipiente stato di crollo per ribaltamento. Rappresentano i termini litologici interessati da attività estrattive condotte a cielo aperto negli anni '60 e dismesse probabilmente negli anni '80 (fig. 5).

3. IDENTIFICAZIONE DELLA ZONA A RISCHIO SINKHOLES ED EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELL'AREA DELL'INTERVENTO URBANISTICO

L'identificazione dell'esistenza di un'area del Programma integrato di intervento urbanistico interessata dal rischio di dissesto per *sinkholes* fu inizialmente ipotizzata dall'osservazione di forme subcircolari depresse in una fotografia dell'aeronautica militare inglese (R.A.F.) del 1944, durante la fase di raccolta di materiale documentario per la redazione dello studio di inserimento paesistico (fig. 6A).

L'ipotesi dell'esistenza di una possibile area a rischio geologico presente in modo esteso, all'interno della perimetrazione interessata dagli interventi urbanistici, nonché la tipologia del rischio non identificabile e delimitabile immediatamente in relazione alle osservazioni geologiche di campagna, hanno condotto a svolgere una ricerca di approfondimento indirizzata verso una analisi delle informazioni presenti nelle fotografie aree disponibili nell'archivio della Direzione Programmazione e Pianificazione del Territorio del Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica del Comune di Roma.

Le analisi territoriali vennero quindi condotte sulle sequenze temporale delle foto recuperate dalla ricerca che riguardarono gli anni: 1955, 1961, 1967, 1977 e 1991.

La foto dell'aeronautica militare inglese del 1944 costituì il documento che consentì di definire con precisione e definizione per la sua nitidezza l'area a rischio e quindi la rappresentazione cartografica dei suoi elementi morfologici. All'interno della perimetrazione del Programma urbanistico fu quantificata la presenza di circa un centinaio di depressioni per *sinkholes* aventi forme prevalentemente subcircolari con diametri variabili da 5 - 6 m circa a 15 - 25 m [SUCCHIARELLI C., FUCCI F. & TORNIAI I. (2009 b)].

Il documento aerofotografico del 1955 testimoniò e confermò i dissesti identificati nella foto del 1944 e in alcune parti si rilevò la presenza di limitati interventi di colmamento e appianamento di qualche forma di depressione di *sinkhole*.

Nel documento del 1961 si osservò che l'area interessata dai *sinkholes*, risultò completamente bonificata attraverso colmamenti e riempimenti delle loro depressioni di sprofondamento per adeguare e rendere agibile il piano campagna alla pratica delle attività agricole. Associato alla bonifica delle depressioni furono operati interventi per il drenaggio delle acque meteoriche mediante la realizzazione di un sistema di canali di irrigazione e bonifica in terra. Dalla aerofotografia fu evidenziata anche la neoformazione di due nuovi *sinkholes* a testimonianza di un processo di dissesto gravitativo di sprofondamento ancora attivo in quel periodo nella parte centrale dell'area agricola.

La fotografia aerea del 1967 mette in evidenza come una parte dell'area agricola fu interessata dall'apertura di una grande cava a cielo aperto per l'estrazione di materiali piroclastici. Le attività agricole ed estrattive rimasero coesistenti fino al 1977 come rilevabile nella foto del volo aereo di quell'anno, mentre nel 1991 la cava a cielo aperto appare bonificata attraverso il colmamento e il riprofilamento artificiale della morfologia del terreno per adeguare l'intera area alle pratiche agricole (fig. 6B).

Successivamente le testimonianze cartografiche e archeologiche raccolte che documentano, sia l'esistenza nell'altopiano di diversi ingressi di cavità sotterranee, di cui due situati



Fig. 6a – In alto, foto aerea realizzata nel 1944 dall'aeronautica militare inglese della Royal Air Force (fonte: Ministero per i Beni e le Attività Culturali) dove viene evidenziata una estesa area interessata da depressioni circolari e sub-circolari prodotti dai processi gravitativi causati da sinkholes antropici per antiche cavità sotterranee adibite ad attività estrattive in epoca romana (la linea gialla indica il perimetro di intervento del programma urbanistico integrato). In basso, identificazione e restituzione cartografica dei processi di dissesto dei sinkholes antropici in relazione ai dati aerofotografici del 1944 [da: Succhiarelli C. & Fucci F. (2010)]



Fig. 6b - In alto, immagine satellitare attuale (2007) dell'area interessata dal Programma urbanistico integrato. Le attività agricole che si svilupparono estesamente nell'area romana tra gli anni '50 e '60 portarono ad una bonifica del terreno superficiale con un mascheramento delle forme della pericolosità geologica dell'area e quindi ad influenzare la valutazione della prevenzione del rischio geotecnico e da frana per sinkholes in relazione agli interventi urbanistici (elaborazione informatica Fucci F. da: www.earth.google.it).

In basso, rappresentazione complessiva delle trasformazioni morfologiche: spianamenti del terreno (in giallo) e colmamento con terreni di riporto dei sinkholes (in arancione) e delle escavazioni estrattive a cielo aperto (in grigio) per permettere le attività agricole [da: Succhiarelli C., Fucci F. & Torniai I. (2009 b)].



Fig. 6c - In alto, planimetria della previsione della trasformazione urbanistica dell'area agricola attraverso lo strumento del Programma integrato [La greca S. B. (studio di architettura) [a cura di] (2006)] costituito principalmente da interventi edilizi, vie di comunicazione e aree verdi. In basso, rappresentazione delle interazioni per sovrapposizione tra gli interventi previsti del Programma integrato e i rischi geologici rilevati [rischio gravitativo per sinkholes e rischio geotecnico per la presenza di spessori significativi di terreni di riporto] [da: Succhiarelli C., Fucci F. & Torniai I. (2009 b)].

all'interno della perimetrazione interessata dal Programma integrato (e attualmente non più presenti a seguito di crolli e riempimenti da parte delle attività agricole), sia la tipologia della litologia interessata dalle attività estrattive, hanno consentito di ipotizzare la causa dei processi di dissesto dei *sinkholes*, con il crollo di parti delle volte di una estesa rete caveale di origine romana, finora sconosciuta, che ha subito, molto probabilmente, nel corso dei tempi storici ampliamenti significativi.

Le ricerche condotte sulle aerofotografie degli anni 1955 e 1961 hanno quindi confermato le osservazioni desunte dalla fotografia aerea del 1944 mentre quelle del 1967 e 1977 hanno evidenziato la presenza di un'area a rischio geotecnico per la deposizione di spessori significativi di terreni di riporto riguardante la bonifica morfologica di una cava a cielo aperto.

L'analisi della documentazione aerofotografica ha fornito un contributo tecnico fondamentale alla progettazione consentendo di:

- ricostruire il processo dell'evoluzione morfologica dell'area collegato con le attività antropiche;
- definire e rappresentare preliminarmente le zone e le tipologie di rischio geologico surrettiziamente presenti;
- localizzare gli interventi edilizi all'esterno all'area a rischio *sinkholes*;
- predisporre un successivo programma specifico di indagini strumentali del sottosuolo finalizzate alla quantificazione del rischio geologico in relazione agli interventi urbanistici previsti (fig. 6C).

4. ANALISI E VERIFICA DELLA ZONA A RISCHIO SINKHOLES

4.1 Le indagini indirette geoelettriche di resistività

Le analisi svolte per la identificazione dell'area a rischio *sinkholes* hanno consentito di indirizzare una prima campagna di indagini, dirette ed indirette, volte ad una prima verifica circa la localizzazione delle cavità presenti nel sottosuolo nonché alla definizione delle ulte-

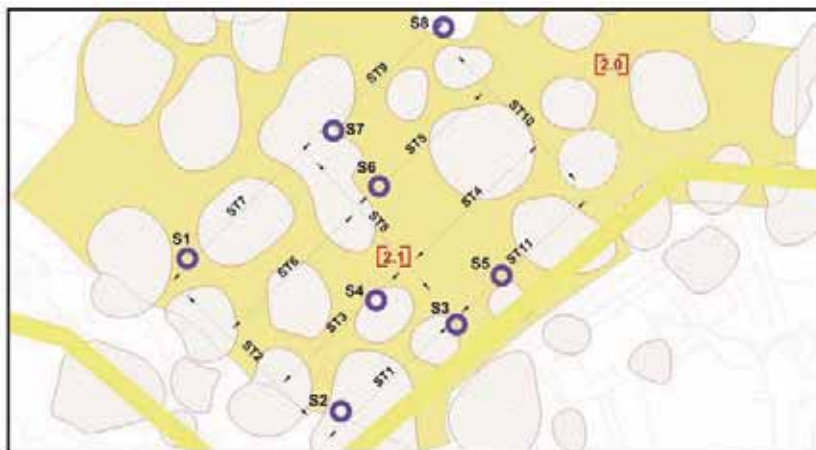


Fig. 7 - Ubicazione dei sondaggi stratigrafici [riportati nella tab. 1] e geofisici per la verifica della presenza di cavità sotterranee nella zona S1 [da: Succhiarelli C., Fucci F. & Torniai I. (2009 b) e Tecnopro (2006)].

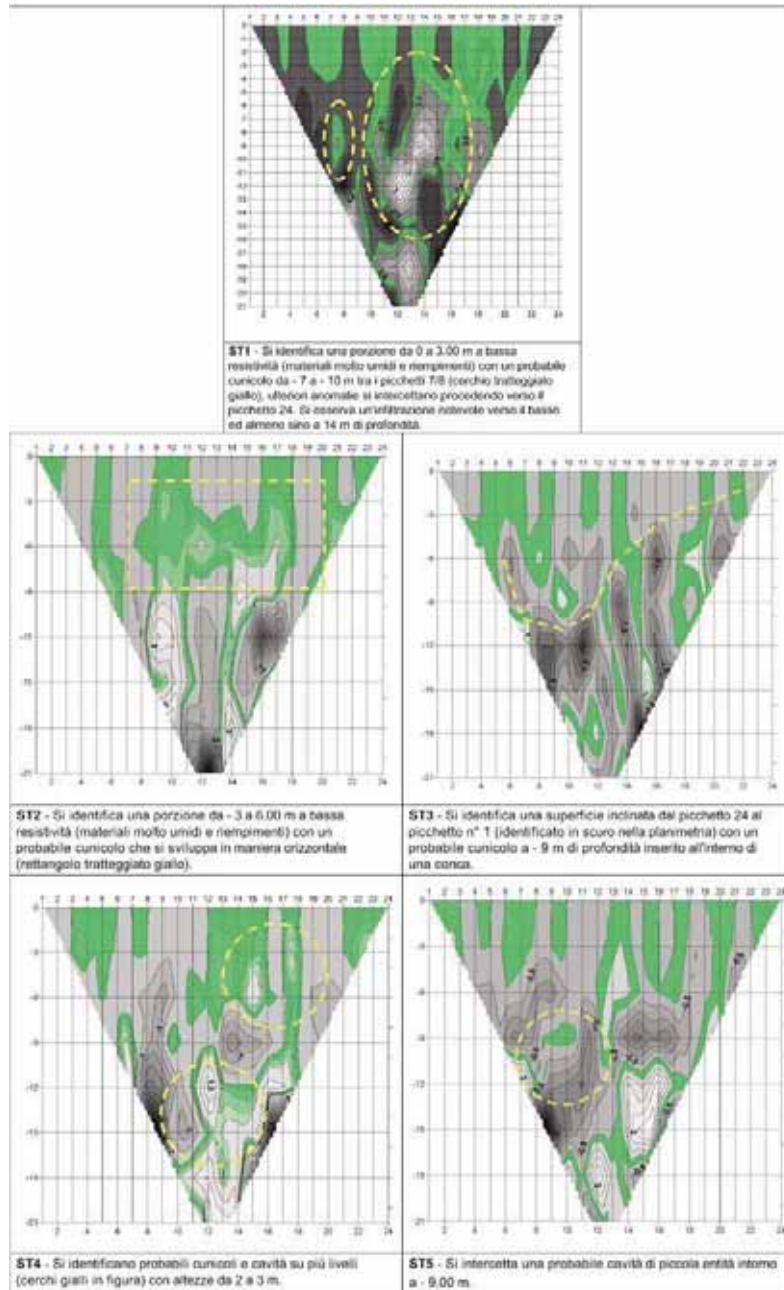


Fig. 8 – Tomogrammi degli stendimenti geoelettrici da ST1 a ST5 a 24 picchetti (riportati in ascissa) in relazione ad una profondità massima significativa di 21 m (riportata in ordinata) che evidenziano zone con anomalie di resistività interpretate [e identificate dalle linee gialle] come probabile presenza di cavità o cunicoli sotterranee [da: TecnoPro (2006) modificato].

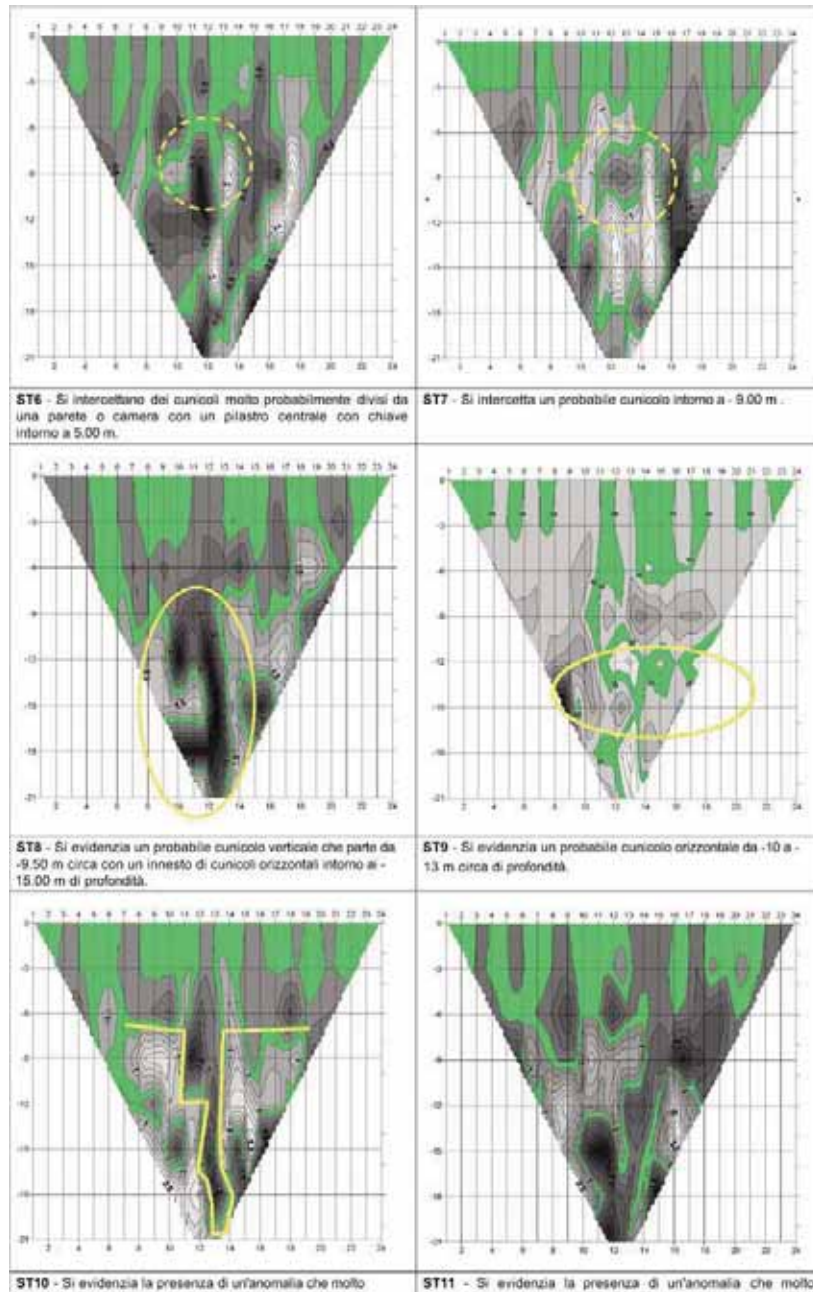


Fig. 9 – Tomogrammi degli stendimenti geoelettrici da ST6 a ST11 a 24 picchetti (riportati in ascissa) in relazione ad una profondità massima significativa di 21 m (riportata in ordinata) che come riportato nella fig. precedente evidenziano la probabile presenza di cavità o cunicoli sotterranee [da: Tecnopro (2006) modificato].

riori indagini ed alla formulazione di specifiche prescrizioni geologico-tecniche cui attenersi nelle successive fasi del programma integrato.

Le attività di verifica in campagna hanno previsto sia indagini dirette (sondaggi stratigrafici) sia indirette (tomografia elettrica) per determinare la continuità laterale e verticale dei terreni e la presenza di cavità; in particolare sono state eseguiti 11 stendimenti di tomografia elettrica e 10 fori di sondaggio al duplice scopo di poter tarare le indagini elettriche e, contemporaneamente avere una stratigrafia di massima dei primi 10 metri dal piano campagna. Due dei 10 fori furono collocati al centro dell'area di ex cava allo scopo di verificare lo spessore dei terreni di riporto (fig. 7).

Le indagini geoelettriche hanno permesso di misurare le variazioni di resistività dei terreni attraverso il passaggio di corrente elettrica (immessa nel sottosuolo) dai picchetti "trasmettitori" ai picchetti "ricettori"; la conduttività dipendendo dalla capacità della natura mineralogica del mezzo (e dal suo contenuto in acqua umidità) di trasportare corrente è massima in acqua (bassa resistività) e minima nell'aria (cavità).

Infatti, questi ultimi, energizzati dai picchetti ed attraversati da corrente, trasmettono corrente elettrica a dei: la trasmissione avverrà secondo la capacità di trasportare corrente del mezzo attraversato (conduttività).

Per la metodologia di indagine furono realizzati stendimenti composti da 24 picchetti, collegati a una centralina di gestione ed acquisizione dei dati che furono elaborati tramite computer da un software dedicato.

I risultati degli stendimenti sul terreno sono stati rappresentati in grafici a colori dove, attraverso la scala cromatica, sono stati differenziati i terreni attraversati o gli elementi quali acqua e cavità nel sottosuolo.

Gli stendimenti hanno avuto interasse tra i picchetti di 2 m con una profondità di indagine, dunque, pari a 20 m circa con una massima affidabilità del dato nella zona centrale dello stendimento.

Di seguito si riportano i tomogrammi degli 11 stendimenti eseguiti con le relative interpretazioni effettuate (fig. 8 e fig. 9) [TECNOPRO (2006)].

- Stend 1: si identifica una porzione da 0 a 3.00 m a bassa resistività (materiali molto umidi e riempimenti) con un probabile cunicolo da - 7 a - 10 m tra i picchetti 7/8 (cerchio tratteggiato giallo); ulteriori anomalie si intercettano procedendo verso il picchetto 24. Si osserva un'infiltrazione notevole verso il basso ed almeno sino a 14 m di profondità.
- Stend 2: si identifica una porzione da - 3 a 6.00 m a bassa resistività (materiali molto umidi e riempimenti) con un probabile cunicolo che si sviluppa in maniera orizzontale (rettangolo tratteggiato giallo).
- Stend 3: si identifica una superficie inclinata dal picchetto 24 al picchetto n. 1 (identificato in scuro nella planimetria) con un probabile cunicolo a - 9 m di profondità inserito all'interno di una conca.
- Stend 4: si identificano probabili cunicoli e cavità su più livelli (cerchi gialli in figura) con altezze da 2 a 3 m.
- Stend 5: si intercetta una probabile cavità di piccola entità intorno a - 9.00 m.
- Stend 6: si intercettano dei cunicoli molto probabilmente divisi da una parete o camera con un pilastro centrale con chiave intorno a 5.00 m.
- Stend 7: si intercetta un probabile cunicolo intorno a - 9.00 m.

- Stend 8: si evidenzia un probabile cunicolo verticale che parte da -9.50 m circa con un innesto di cunicoli orizzontali intorno ai - 15.00 m di profondità.
- Stend 9: si evidenzia un probabile cunicolo orizzontale da -10 a - 13 m circa di profondità.
- Stend 10: si evidenzia la presenza di un'anomalia che molto probabilmente identifica una forma ad "inghiottitoio" con camera laterale.
- Stend 11: si evidenzia la presenza di un'anomalia che molto probabilmente identifica un cunicolo da - 4.00 m a - 8 m.

4.2 Le indagini dirette (sondaggi geognostici)

La massima applicabilità delle metodiche indirette si ha quando è possibile compararle con indagini dirette quali sondaggi o prove penetrometriche.

Tab. 1 - Stratigrafie dei sondaggi geognostici dove vengono evidenziate e intercettate probabili presenze di cavità sotterranee (S5 e S7) e cavità colmate (S6)[da: Tecnopro (2006), modificato].

SONDAGGIO	QUOTE	STRATIGRAFIA	NOTE
S1	0 - 0.80	Terreno vegetale	Tra 5.00 - 6.00 m livello più grossolano ricco in pomici. Oltre i 7.00 m materiale molto umido indica una probabile via d'acqua
	0.80 - 8.00	Tufo da giallo a marrone	
S2	0 - 0.80	Terreno vegetale	Tra 4.50 - 6.00 m livello più grossolano ricco in pomici
	0.80 - 10.00	Tufo da giallo a marrone	
S3	0 - 0.70	Terreno vegetale	Tra 6.00 - 7.15 m livello più grossolano ricco in pomici. Il materiale da 8.00 - 10.00 metri risulta molto umido; a perforazione completata il foro si riempie d'acqua
	0.70 - 10.00	Tufo da giallo a marrone	
S4	0 - 1.00	Terreno vegetale	Non si ritrova lo strato grossolano pomiceo caratteristico compreso fra 5.00 - 6.00 metri circa. I materiali estratti risultano molto fini
	1.00 - 10.00	Tufo da giallo a marrone estremamente alterato	
S5	0 - 0.80	Terreno vegetale	Tra 7.50 - 9.00 m livello più grossolano ricco in pomici. Non è stata rilevata presenza d'acqua. La sonda tra i 4.00 - 6.00 avanza senza spinta (probabile presenza di cavità colmata)
	0.80 - 10.00	Tufo da giallo a marrone estremamente alterato	
S6	0 - 0.70	Terreno vegetale	Non si ritrova lo strato grossolano pomiceo caratteristico compreso fra 5.00 - 6.00 metri circa. Tra i 5-7 metri la sonda avanza senza spinta (probabile cavità colmata)
	0.70 - 10.00	Tufo da giallo a marrone estremamente alterato	
S7	0 - 0.70	Terreno vegetale	Tra 5.50 - 6.50 m livello più grossolano ricco in pomici. Tra 2.50 - 3.00 e tra 9.00 - 10.00 la sonda avanza senza spinta (probabile intercettazione di cavità)
	0.70 - 10.00	Tufo da giallo a marrone estremamente alterato	
S8	0 - 0.70	Terreno vegetale	Tra 5.50 - 6.50 m livello più grossolano ricco in pomici. Materiale estremamente umido attorno a 8.00 m dal. p.c..
	0.70 - 10.00	Tufo da giallo a marrone estremamente alterato	
S9	0 - 1.00	Terreno vegetale	Acqua a 8.00 dal p.c.
	1.00 - 3.00	Terreno di riporto	
	3.00 - 10.00	Tufo da giallo a marrone. Tra 6.00 - 6.50 livello argillificato	
S10	0 - 1.00	Terreno vegetale	Acqua a 7.00 dal p.c.
	1.00 - 2.00	Terreno di riporto	
	3.00 - 10.00	Tufo da giallo a marrone. Tra 5.50 - 6.00 presenza di una lente d'acqua. Tra 6.00 - 7.00 livello argillificato	

Le indagini dirette effettuate nella prima fase di indagini è consistita in 10 sondaggi concentrati prevalentemente nella zona destinata alla realizzazione di un asilo (fig. 7). All'interno della suddetta area (di dimensione circa 90 x 60 metri) si sono eseguiti 8 fori al duplice scopo di poter tarare la tomografia elettrica e contemporaneamente avere una stratigrafia di massima dei primi 10 metri dal piano campagna [TECNOPRO (2006)].

L'ubicazione dei fori è stata decisa tenendo presente le direzioni delle stese elettriche e la posizione del futuro asilo in progetto. I fori sono stati trivellati con una macchina per pali con carotiere da Ø 40 mm pertanto, i campioni restituiti sono altamente alterati e non consentono la ricostruzione puntuale della stratigrafia locale.

Dall'analisi dei dati raccolti attraverso tali sondaggi (tab. 1) si è potuto tuttavia dedurre che vi possano essere delle cavità, probabilmente colmate da materiali di riporto. In particolare nei sondaggi da 4 a 7, a quote variabili, ma generalmente comprese tra i 4 ed 7 metri dal piano campagna, l'andamento della perforazione dove la sonda avanzò senza spinta ed il materiale fine ed estremamente umido estratto non correlabile (nella loro tipologia litologica) con quello rinvenuto nella successione stratigrafica, hanno fatto supporre la presenza di cavità colmate da materiali provenienti dal crollo delle volte o da riempimenti dovuti alle bonifiche ed alle arature agricole.

5. CONCLUSIONI TECNICHE DELLE INDAGINI

Dal confronto tra i risultati ottenuti dalle indagini dirette con quelli derivati dalla tomografia elettrica si rintracciano significative coincidenze a supporto dell'ipotesi dell'esistenza di cunicoli e cavità ipogee, in particolare nei sondaggi S4, S5, S6, S7. Nei suddetti sondaggi si sono rinvenuti infatti livelli di materiale fine ed estremamente umido, non confrontabile con la successione stratigrafica, sia pur approssimativa, dei sondaggi limitrofi. Tali sedimenti di materiale più fino ed umido sono riconducibili a crolli e riempimenti di cavità ipogee. Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle indagini effettuate si può concludere che, nella zona analizzata:

- è presente un'alta percentuale di cavità e cunicoli che, per la maggior parte, si sviluppano dai 6-9 m dal p.c. in profondità;
- detti cunicoli presentano altezze di circa 3 m e nella maggior parte dei casi risultano riempiti da materiale di crollo;
- alcuni dei cunicoli, molto probabilmente sono saturi in acqua o hanno al loro interno terreni con un elevato contenuto in acqua;
- la porzione "superficiale", ovvero da 0 m a 6 m si presenta molto aerata, ovvero con grosse infiltrazioni dal piano campagna verso il basso.

Dall'insieme dei dati raccolti si è potuto tarare la campagna di indagini che dovrà essere realizzata in sede di progetto esecutivo per la definizione di dettaglio delle caratteristiche geotecniche e stratigrafiche dell'area.

Tale campagna dovrà prevedere un adeguato numero di sondaggi geognostici ed indagini geofisiche, a maglie sufficientemente strette per mettere in evidenza la presenza di eventuali cavità sotterranee e abbattere la soglia di rischio, progettando opportune fondazioni che risolvano il problema legato a crolli di materiale vulcanico [REGIONE LAZIO, DIPARTIMENTO TERRITORIO 2, DIREZIONE REGIONALE AMBIENTE E COOPERAZIONE TRA I POPOLI 2S, AREA DIFESA DEL SUOLO 05 (2006)].

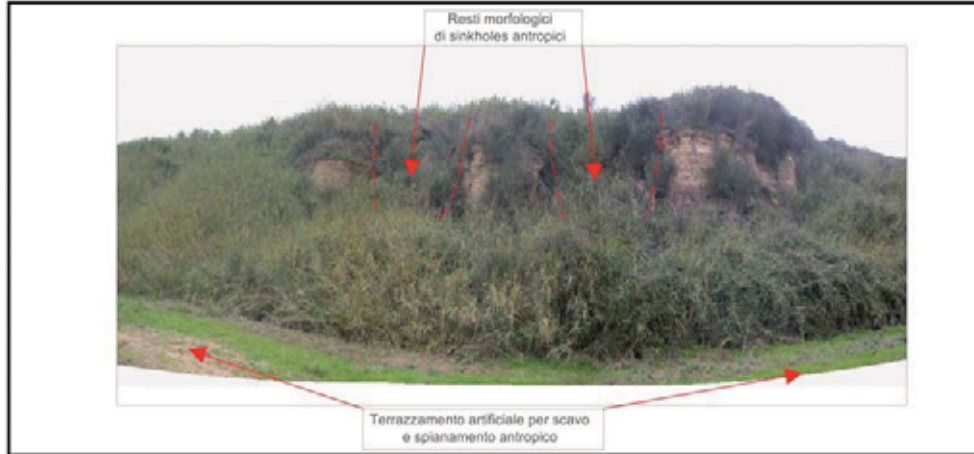


Fig. 10 - Scarpata artificiale di raccordo tra il sommitale altopiano interessato dal Programma Integrato Prima Porta e il terrazzamento antropico sottostante che ha messo in evidenza i resti morfologici di due sinkholes connessi con le passate attività estrattive.

Nei sondaggi saranno eseguite prove penetrometriche dinamiche e statiche, i campioni di terreno prelevati in fase di indagine saranno sottoposti alle prove geotecniche di laboratorio ed una parte dei sondaggi sarà attrezzata a piezometro.

Analogamente si dovrà procedere nelle aree verdi che in buona parte coincidono sia con le aree a maggior rischio dovuto a cavità sia con le aree prospicienti le scarpate (fig. 10). Qualora le indagini preventive verificassero l'incompatibilità tra la pericolosità e le edificazioni previste si dovranno delocalizzare le opere in aree prive di rischio geologico.

6. CONCLUSIONI GENERALI

La pianificazione urbanistica e, più in generale, la progettazione di interventi che prevedano la realizzazione di opere con il coinvolgimento di superfici molto ampie, necessitano di studi geologici propedeutici che contribuiscano all'abbattimento dei rischi connessi. L'ampiezza delle aree coinvolte tuttavia rende particolarmente onerosa e, talvolta, poco esaustiva, una campagna di indagini estesa a tappeto su tutta la zona di interesse.

L'affiancamento dell'opera del geologo a quella del progettista, nelle varie fasi della progettazione, consente di ottimizzare e fasizzare le attività da svolgere e i relativi costi. Soprattutto negli interventi pianificatori è di fondamentale importanza l'iniziale analisi del territorio che, partendo anche da dati storici e bibliografici, consente di verificare la compatibilità geologica del piano o del progetto e di programmare le successive analisi ed indagini.

Nel caso specifico le ricerche condotte, basate inizialmente sulla documentazione storica esistente (cartografie ed aerofoto) hanno messo in luce la presenza di attività estrattive ipogee, di probabile epoca romana, con conseguente presenza di un rischio geologico da frana per *sinkholes* antropici. Successive bonifiche subite dall'area a partire dagli anni '60 hanno determinato il colmamento e l'appianamento delle depressioni e quindi il totale occultamento dei *sinkholes*.

Ciò ha consentito di mirare le indagini successive, basate su alcuni carotaggi e su alcuni stendimenti di tomografia elettrica, che hanno confermato gli indizi raccolti attraverso l'analisi della documentazione storica disponibile ed hanno permesso di adeguare il piano per limitare al minimo l'interazione tra le aree a pericolosità geologica e gli interventi edilizi e infrastrutturali previsti.

L'insieme delle analisi condotte per la identificazione dell'area a rischio sinkholes hanno inoltre consentito di definire le ulteriori indagini di maggior dettaglio da svolgere nelle successive fasi del programma integrato e di formulare specifiche prescrizioni geologico-tecniche cui attenersi nella fase di realizzazione degli interventi.

L'analisi inoltre mette in evidenza come sia di fondamentale importanza e determinante, nella pianificazione generale e nella attuazione urbanistica dei relativi interventi, la fase propedeutica o preliminare della ricerca storico-documentaria (scritta, cartografica e aerofotografica) nella verifica e identificazione dei rischi geologici presenti sul territorio.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori vogliono rivolgere un ringraziamento agli amici e colleghi del Dipartimento alla Programmazione e Attuazione Urbanistica del Comune di Roma: all'Architetto LUIGI TODDE (direttore dell'Ufficio Pianificazione, Mobilità e Infrastrutture) e all'Ing. ANGELO DI STEFANO (responsabile del procedimento del Programma urbanistico Integrato "Prima Porta") per l'autorizzazione alla divulgazione dei risultati degli studi geologici; all'Istruttore Tecnico Grafico dei Sistemi Informativi Territoriali IRENE TORNIAI dell'Ufficio Città Periferica, per il supporto informatico nella fase di restituzione cartografica dei dati geologici; al Funzionario per i Sistemi Informativi Territoriali ANTONIO CIANI e agli Esperti Gis Dott. GAETANO PELLICONE e DOTT. MARCO TARANTINO, collaboratori dell'Ufficio Grandi Opere Strategiche, per il contributo tecnico alla stampa del poster di questo lavoro presentato al workshop internazionale. Si ringrazia inoltre la TECNOPRO di Roma che ha effettuato le indagini geoelettriche nell'area.

BIBLIOGRAFIA

- KARNER D.B., MARRA F. & RENNE P.R. (2001) - *The history of the Monti Sabatini and Alban Hills volcanoes: groundwork for assessing volcanic-tectonic hazards for Rome*. J. Volcanol. Geotherm. Res. **107**: 185-219.
- LA GRECA S. B. (STUDIO DI ARCHITETTURA) [a cura di] (2006) - *Planovolumetrico esemplificativo del Programma Integrato "Prima Porta". Scala 1:1.000*, elaborato tav. c7 bis, carta inedita, dicembre 2006, Roma.
- REGIONE LAZIO, DIPARTIMENTO TERRITORIO 2, DIREZIONE REGIONALE AMBIENTE E COOPERAZIONE TRA I POPOLI 2S, AREA DIFESA DEL SUOLO 05 (2006) - *Parere ai sensi del D.P.R. 380/01, art. 89 della L. R. 72/75 della D.G.R. 2649/99 e D.G.R. 655/02 concernente il Programma integrato di intervento urbanistico "Prima Porta"*, pagg. 1-3, Roma, ottobre 2006.
- SCIACCA P. & ZUCCA P. (2005) - *Indagine geologica e vegetazionale (D.G.R. n. 2649 del 18.05.1999) per il Programma integrato di intervento urbanistico "Prima Porta"*. Pag. 1-71 con 9 cartografie e una documentazione fotografica, relazione inedita, Roma.
- SUCCHIARELLI C., FUCCI F. & TORNIAI I. (2009 a) - *Carta geolitologica del territorio interessato dal Programma Integrato "Prima Porta"*. Scala 1:1.000, rilevamento geolitolo-

gico gennaio – febbraio 2005, elaborazione cartografica novembre – dicembre 2005, completamento cartografico marzo – maggio 2009, Comune di Roma, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Direzione Programmazione e Pianificazione del Territorio, Ufficio Pianificazione, Mobilità e Infrastrutture, carta tecnica interna inedita.

SUCCHIARELLI C., FUCCI F. & TORNIAI I. (2009 b) – *Carta geomorfologica del territorio interessato dal Programma Integrato "Prima Porta"*. Scala 1:1.000, rilevamento geomorfologico gennaio – febbraio 2005, elaborazione cartografica novembre – dicembre 2005, completamento cartografico marzo – maggio 2009, Comune di Roma, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Direzione Programmazione e Pianificazione del Territorio, Ufficio Pianificazione, Mobilità e Infrastrutture, elaborato n. 2, carta tecnica interna inedita.

SUCCHIARELLI C. & FUCCI F. (2010) – *Carta geomorfologica delle trasformazioni territoriali 1944 - 2006 dell'area interessata dal Programma Integrato "Prima Porta"*. Scala 1:1.000, elaborazione cartografica marzo – maggio 2009 e completamento cartografico novembre 2009 - febbraio 2010, Comune di Roma, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Direzione Programmazione e Pianificazione del Territorio, Ufficio Pianificazione, Mobilità e Infrastrutture, carta tecnica interna inedita.

TECNOPRO (2006) – *Indagini geologiche e geofisiche riguardanti il Programma Integrato "Prima Porta"*. Pagg. 1-21, relazione tecnica inedita, Roma.

