

Nuove possibilità offerte dai metodi geofisici per la risoluzione dei problemi connessi all'esistenza di vuoti sotterranei

C. AQUILINA *

SOMMARIO: Si descrivono brevemente alcune tecniche utilizzate dall'Istituto di Geofisica Mineraria dell'Università di Roma per la risoluzione di problemi connessi all'esistenza di vuoti sotterranei nella città. Dopo un accenno alle indagini preliminari, geologiche, geomorfologiche e geoidrologiche, si illustra un nuovo dispositivo elettrodico che permette l'individuazione dei vuoti in molti dei casi nei quali i dispositivi tradizionali non potevano dare alcun risultato. Viene inoltre descritto un nuovo metodo per il collegamento topografico rapido di punti situati all'interno dei vuoti con punti all'esterno. Esso è basato sulla determinazione, all'esterno, dell'andamento di un campo elettromagnetico generato da una bobina emittente posta nel vuoto da rilevare.

1. Premesse.

Tra le varie questioni discusse nell'ottavo Congresso dell'Associazione Geotecnica, figurano i problemi che si debbono affrontare quando nel sottosuolo di aree soggette ad urbanizzazione sono presenti, o si presume che siano presenti, vuoti sotterranei.

Gli aspetti del problema dei vuoti sotterranei sono molteplici.

Si può trattare solo della individuazione della esistenza o meno di vuoti sotterranei in una data area e nella determinazione anche di prima approssimazione delle principali caratteristiche dei vuoti stessi (tipo, dimensioni, profondità etc.); ciò può essere sufficiente nella scelta delle aree da destinare ad un tipo di costruzioni, nell'elaborazione di piani regolatori, ecc.

Si può giungere invece alla valutazione delle caratteristiche meccaniche e dello stato di sollecitazione delle rocce, costituenti la volta e le pareti del vuoto, per un giudizio sulla stabilità del suolo sovrastante il vuoto, o per la corretta progettazione, sia di eventuali interventi da effettuare, sia delle fondazioni delle opere insistenti sui vuoti in esame.

Nell'area interessata dall'espansione della città di Roma esistono numerose zone con vuoti sotterranei di varie forme e dimensioni.

L'Istituto di Geofisica Mineraria della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma è stato, in diverse occasioni, interessato ai problemi relativi a tali vuoti ed ha avuto modo di intraprendere studi e di sperimentare metodi e tecniche particolari alcuni dei quali presentano carattere di originalità.

Gli studi, sviluppati anche in collaborazione con gli Istituti di Arte Mineraria, Geologia Applicata e Topografia della stessa Facoltà hanno portato in molti casi a risultati positivi per cui si è ritenuto potesse essere utile raccogliere gli elementi più indicativi nella presente nota.

Ci si riferirà a due aspetti del problema dei vuoti sotterranei ed in particolare si considererà:

a) la individuazione, dalla superficie del terreno, della esistenza, ed eventualmente del tipo, di vuoti;

b) la ricostruzione in sotterraneo della ubicazione, forma e dimensioni dei vuoti accessibili.

Si sono effettuati studi anche su di un terzo aspetto del problema: la valutazione dello stato di sollecitazione e di fratturazione delle rocce costituenti le pareti e le coperture dei vuoti.

Le considerazioni di tali studi sono state già presentate in campo nazionale ed internazionale [BERNABINI, 1965; MARTINETTI et al., 1965; BERNABINI et al., 1966].

2. Tipi di vuoti interessati dalle sperimentazioni.

Prima di iniziare la descrizione delle tecniche e dei metodi utilizzati si ritiene utile premettere alcune notizie sui tipi di vuoti sotterranei che sono stati oggetto di sperimentazione.

La città di Roma ricade in gran parte in una

(*) Prof. Ing. Carmelo AQUILINA, Ordinario di Geofisica Mineraria, Direttore degli Istituti di Geofisica Mineraria e Geodesia e Topografia della Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Roma.

zona di affioramento di prodotti piroclastici del Vulcano Laziale.

In tali prodotti sono intercalati alcuni livelli di materiali che sono stati, e ancora sono, largamente

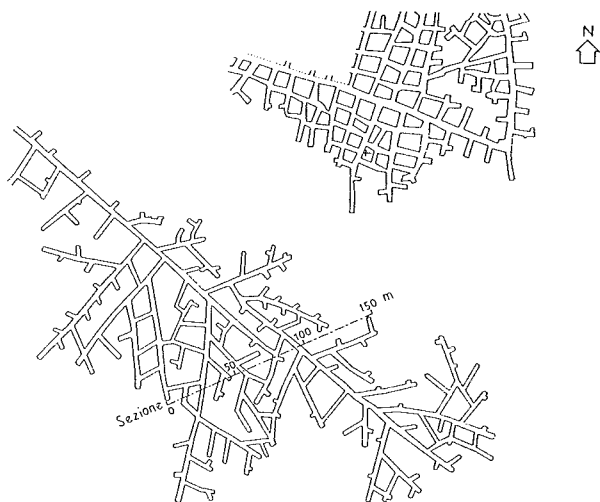


Fig. 1. - Pianta di due delle numerose reti di gallerie esistenti nella zona « Tre Fontane » in Roma. La sezione, la cui traccia è indicata nella planimetria, è riportata in fig. 5.

utilizzati per la preparazione sia di leganti idraulici (le *pozzolane nere e rosse*), sia di pietrame per muratura (il *tufo lionato*).

La coltivazione in sotterraneo di tali materiali,

iniziata in età romana, si è sviluppata fino a qualche decennio fa. I vuoti sotterranei originati da tali coltivazioni hanno forme differenti a seconda dei tipi di materiali estratti.

I vuoti nelle pozzolane sono costituiti in genere da reti di gallerie irregolari le più antiche, molto più regolari le più recenti, talvolta disposte su più livelli. Nella figura 1 è riportato un esempio di rete di gallerie relativamente recenti (fine XIX inizio XX secolo): le gallerie hanno dimensioni medie sia in altezza che in larghezza di 3-4 m e sono delimitate da pilastri di dimensioni medie di 8-10 m.

I vuoti del tufo lionato sono costituiti da grosse camere con tetto cupoliforme e dimensioni molto variabili (da qualche metro a 30-40 m) frequentemente in dipendenza dello spessore del banco di tufo. Un esempio di vuoti di questo tipo è riportato nella fig. 2.

La ubicazione delle cave nella zona ora urbana di Roma è irregolare come irregolare è l'estensione delle singole cave (da qualche decina di metri quadri ad alcune decine di ettari). In qualche caso, come nella zona dei Gordiani, si è riscontrata la sovrapposizione delle coltivazioni del tufo lionato e delle pozzolane: si sono rinvenuti infatti vuoti nel tufo lionato sovrastanti vuoti nelle pozzolane talora in condizioni impossibili di stabilità.

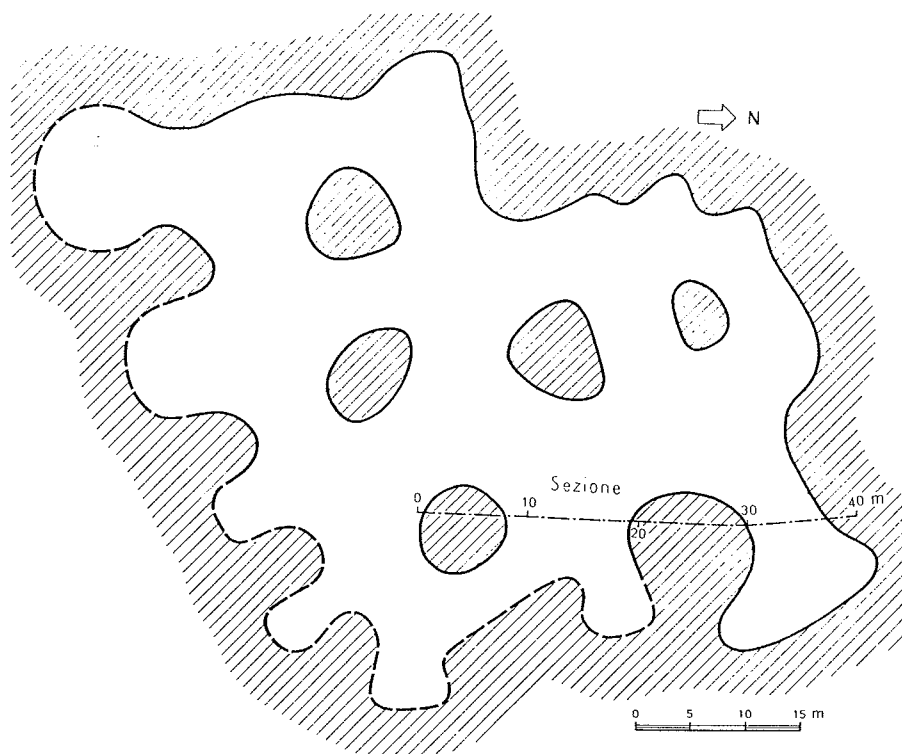


Fig. 2. - Pianta di una cava di tufo lionato (Zona Portuense Roma). La sezione, la cui traccia è indicata nella planimetria, è riportata in Fig. 6.

3. Indagini preliminari.

In molte delle ricerche affrontate dall'Istituto, le prime operazioni che in genere si sono eseguite sono stati un rilievo geologico ed una accurata analisi di foto aeree completata da sopralluoghi sul posto.

Il rilievo geologico fornisce l'indicazione sulla posizione degli orizzonti che possono essere sedi di coltivazioni in sotterraneo (nel caso di Roma le pozzolane rosse e nere ed il tufo lionato) e quindi dà un indirizzo immediato alla ricerca.

Dalle foto aeree si possono spesso distinguere anche le piccole depressioni dovute ad antichi sprofondamenti per crolli in vuoti preesistenti o ad antichi scavi per l'accesso ai sotterranei. È preferibile che vengano prese in considerazione foto aeree d'epoca quanto più antica possibile e comunque prima che eventuali discariche recenti abbiano sostanzialmente modificato la morfologia della zona.

I sopralluoghi sul posto hanno spesso permesso di confermare e completare gli elementi ricavati dalle foto aeree con il riconoscimento degli sprofondamenti, degli accessi alle cave sotterranee, di eventuali pozzetti di areazione, etc. I rilevamenti sono stati talvolta estesi ad un raggio molto ampio intorno alle zone interessate in dipendenza della morfologia e della geologia locale. È abbastanza frequente che scavi iniziati sui fianchi di una valletta si prolunghino per varie centinaia di metri nel sottosuolo seguendo l'andamento suborizzontale degli strati.

Ulteriore elemento, sempre preso in considerazione, è stata la presenza e profondità di eventuali falde d'acqua. Poiché non sono presumibili variazioni di quote delle falde avvenute in età storica, si può ritenere che non siano avvenute coltivazioni al di sotto, ed anche di un poco al di sopra, del livello statico della falda.

Nelle indagini preliminari il ricorso ai sondaggi meccanici è stato sempre rimandato il più possibile per ragioni di economicità.

Indichiamo infatti con I/K il rapporto tra area complessiva della zona da esplorare ed area complessiva dei vuoti presenti nella zona stessa.

Se si eseguono n sondaggi, vi sarà una certa probabilità P che un certo numero r di essi ($0 \leq r \leq n$) incontrino i vuoti. Se si considera il singolo sondaggio come puntiforme ed ubicato casualmente sull'area da esplorare, tale probabilità P può calcolarsi con la distribuzione binomiale:

$$P = \binom{n}{r} \cdot K^r (1 - K)^{n-r}$$

in cui K è l'inverso del rapporto tra le aree sopra definite.

Nella pratica esecuzione delle indagini la migliore stima del rapporto K (che indica l'importanza relativa dei vuoti) è data dalla frazione $q = r/n$ dei sondaggi che hanno incontrato i vuoti stessi. Dato un certo valore di K esisterà una certa probabilità che alla fine delle indagini si ottenga un determinato o determinati valori di q in dipendenza del numero n dei sondaggi. Nella tabella 1 sono riportati le probabilità, per alcuni valori di n e di q , relative ai casi $K = 0,1$; $K = 0,2$; $K = 0,5$ [TABLES ecc., 1955].

Si può notare come per avere buone probabilità

TABELLA 1

Probabilità che si ottengano certi valori di q (rapporto tra il numero dei sondaggi che hanno incontrato i vuoti e numero totale dei sondaggi) in funzione del numero n dei sondaggi e del rapporto K tra area dei vuoti ed area complessiva.

$K = 0,1$

n	$q = 0$	$q < 0,05$	$0,05 \leq q \leq 0,15$	$q > 0,15$
5	59%	59%	—	41%
10	35%	35%	39%	26%
20	12%	12%	75%	13%
40	2%	8%	82%	10%
100	0,003%	2%	94%	4%

$K = 0,2$

n	$q = 0$	$q < 0,1$	$0,1 \leq q \leq 0,3$	$q > 0,3$
5	33%	33%	41%	26%
10	11%	11%	77%	12%
20	2%	7%	84%	9%
40	0,02%	3%	93%	4%
100	—	0,2%	99,5%	0,3%

$K = 0,5$

n	$q = 0$	$q < 0,4$	$0,4 \leq q \leq 0,6$	$q > 0,6$
5	3%	19%	62%	19%
10	0,1%	17%	66%	17%
20	0,002%	13%	74%	13%
40	—	8%	84%	8%
100	—	2%	96%	2%

che il q ottenuto si approssimi al K effettivo del $\pm 50\%$ nel caso di $K = 0,2$ e $0,1$ e del $\pm 20\%$ nel caso di $K = 0,5$ bisogna effettuare un gran numero di sondaggi (almeno più di 40).

Le indicazioni sopra riportate sono valide qualsiasi sia l'estensione dell'area oggetto di indagine; il valore di q che si ricava dovrà essere ovviamente riferito all'area stessa. Se quest'ultima dovesse essere frazionata in più parti, per ciascuna delle parti dovranno essere applicate le considerazioni sopra sviluppate assumendo per n il numero dei sondaggi che in detta parte ricadono. Per giudicare sull'assenza dei vuoti bisogna tener presente che ad esempio nel caso di $K = 0,1$ ⁽¹⁾ c'è il 35% di probabilità che su 10 sondaggi nessuno incontri i vuoti.

4. Indagini geofisiche di superficie.

Per tentare di risolvere per altre vie i casi in cui le indagini preliminari indicate nel precedente paragrafo non fossero risultate sufficienti per escludere o confermare la presenza di vuoti sotterranei o per delimitarne l'estensione, è stato iniziato uno studio sull'applicabilità dei metodi geofisici di superficie.

Scartati i metodi gravimetrici perché utilizzabili solo con vuoti di notevoli dimensioni e i metodi magnetometrici perché non impiegabili in genere in aree urbane, si è polarizzata l'attenzione sul metodo dei sondaggi elettrici orizzontali.

È noto che, inviando nel terreno correnti elettriche con due o più elettrodi e misurando il potenziale in vari punti nel terreno mediante altri elettrodi, sia possibile calcolare la resistività elettrica vera del terreno nel caso di terreno omogeneo, isotropo e di spazio semiinfinito; o nel caso di presenza di mezzi a differente resistività, una resistività apparente funzione delle resistività dei mezzi e della posizione geometrica dei mezzi stessi e degli elettrodi. Dalla distribuzione di tale resistività apparente misurata con diverse disposizioni degli elettrodi è possibile risalire alla distribuzione delle resistività vere nel sottosuolo e quindi ai vari mezzi presenti.

Se la disposizione reciproca degli elettrodi viene lasciata inalterata e si effettuano misure spostando l'intero dispositivo elettrodico sulla superficie del suolo, si effettua un *sondaggio elettrico orizzontale*.

Tale sondaggio è particolarmente indicato per

⁽¹⁾ Tale caso è abbastanza frequente: basta considerare ad esempio che in un'area di un ettaro l'area complessiva dei vuoti sia di 1000 m².

la determinazione di variazioni laterali nelle resistività.

I dispositivi che di regola vengono impiegati utilizzano due elettrodi di corrente di diversa polarità e due elettrodi di potenziale situati all'interno sul segmento che ha per estremi i due elettrodi di corrente (fig. 3).

Se nel sottosuolo vi è una galleria orizzontale con asse normale alla direzione in cui si sviluppa il dispositivo elettrodico, poiché la galleria ha una resistività praticamente infinita, si avrà una distorsione delle linee di corrente e delle superfici equipotenziali.

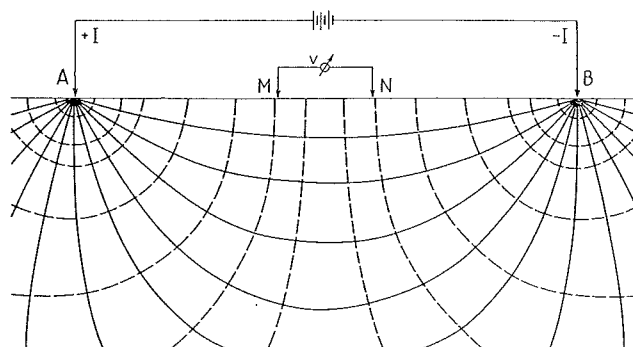


Fig. 3. - Andamento delle linee di corrente (a tratto intero) e di potenziale (a tratto tratteggiato) nel caso di dispositivo convenzionale (Tipo Schlumberger). A e B sono gli elettrodi di corrente ed M e N quelli di potenziale.

Tale distorsione è risentita in superficie e quindi sugli elettrodi di potenziale M ed N; si ha quindi una « anomalia » nella differenza di potenziale ΔV misurata tra le sonde MN rispetto al caso di assenza delle gallerie.

In genere questa anomalia di potenziale è piccola rispetto alla differenza ΔV_n che si avrebbe nel caso di assenza di galleria, e diventa inferiore agli errori di misura quando la profondità della galleria, supposta cilindrica, supera di 2-3 volte il raggio della galleria stessa.

Per ovviare almeno in parte a tale limitazione si sono iniziati studi su nuovi dispositivi elettrodici. Si è osservato che la distorsione delle superfici equipotenziali è massima nella direzione nella quale si propaga la corrente. Si è presa quindi in considerazione la possibilità di investire il corpo anomalo (la galleria nel nostro caso) mediante un flusso di corrente pressoché verticale ottenuto mediante l'impiego di due elettrodi eroganti correnti della stessa polarità ed intensità con il ritorno di corrente all'infinito (vedi fig. 4). In tal caso si accentua l'anomalia in superficie che può essere meglio messa in evidenza misurando la differenza di potenziale

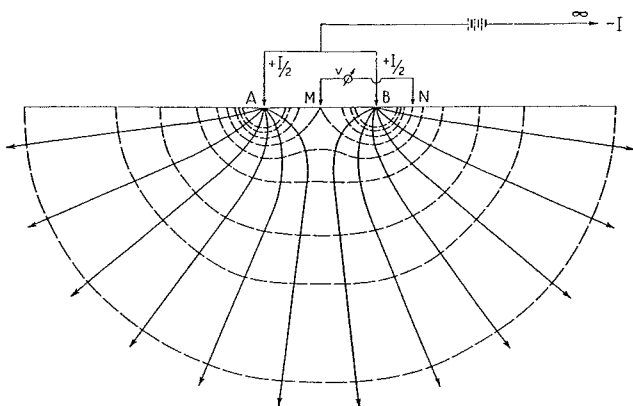


Fig. 4. - Andamento delle linee di corrente (a tratto intero) e di potenziale (a tratteggio) nel caso del nuovo dispositivo.

tra un elettrodo (M) posto al centro del dispositivo ed un secondo elettrodo (N) situato all'esterno del dispositivo stesso in un punto nel quale si dovrebbe avere lo stesso potenziale in assenza di anomalia.

Nel caso ipotetico di assenza di inhomogeneità superficiali, la sensibilità del dispositivo dovrebbe essere teoricamente infinita.

Sono attualmente allo studio le condizioni di optimum ed i limiti di applicabilità del metodo soprattutto per quanto riguarda l'effetto di inhomogeneità superficiali e la ripetibilità delle misure in diversi momenti fisici.

I primi risultati finora ottenuti sono stati nel complesso soddisfacenti. Si riportano ad esempio nella fig. 5 i risultati ottenuti su di un profilo effettuato sulla rete di gallerie in pozzolana rappresentate nella fig. 1. Si può notare che le anomalie

riscontrate in corrispondenza delle gallerie sono nettamente superiori alle variazioni che si ottengono al di fuori dell'area interessata dalle gallerie a causa di inhomogeneità. I rapporti tra raggio delle gallerie e profondità sono in questo caso anche inferiori ad 1/10, molto al di sotto quindi dei limiti « tradizionali ».

Nella fig. 6 si riporta un altro esempio relativo ad una indagine sulla zona interessata da vuoti in tufo lionato di fig. 2. In questo caso le anomalie sono ancor più nette e facilmente individuabili.

Allo stato attuale delle sperimentazioni sembrerebbe pertanto confermata la validità del metodo che presenta, inoltre, il vantaggio di utilizzare in campagna distanze tra gli elettrodi di corrente anche dell'ordine di qualche metro. Ciò permette di attenuare gli effetti di inhomogeneità laterali nelle resistività.

L'utilizzazione dei metodi sismici per la individuazione delle cavità è ancora oggetto di studio. In questi ultimi anni è apparso un nuovo sistema utilizzando la determinazione della frequenza di risonanza di un'onda sismica persistente generata da un vibratore meccanico posto in superficie. Tale metodo, che sembra aver dato buoni risultati, non è stato ancora sperimentato nel nostro Istituto. Sinora è stato da noi impiegato il metodo sismico a rifrazione in massima parte per la individuazione del tufo lionato; esso è risultato particolarmente efficace nell'individuazione di vecchi fronti di cava a cielo aperto completamente mascherati da suc-

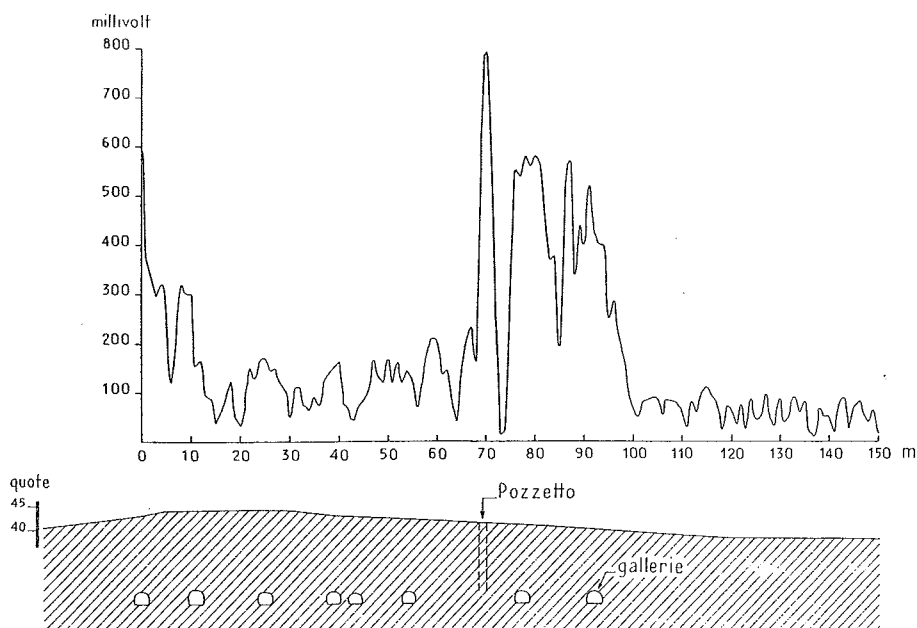


Fig. 5. - Profilo di potenziale anomalo determinato lungo un allineamento su di una rete di gallerie in pozzolana riportate nella Fig. 1.

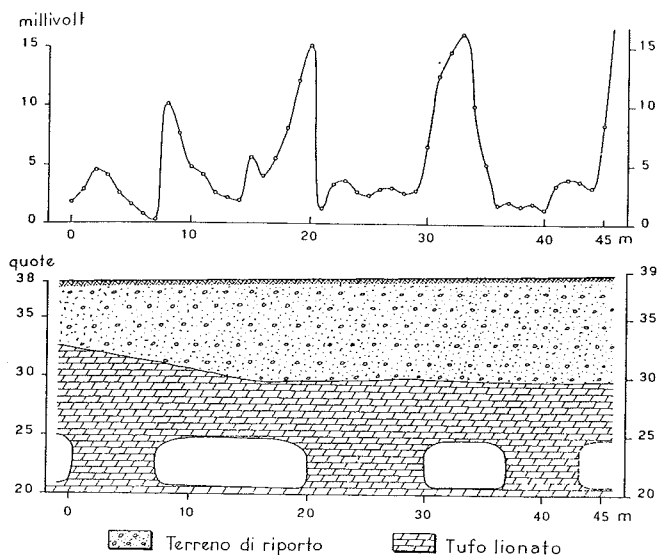


Fig. 6. - Profilo di potenziale anomalo determinato al di sopra di una cava di tufo lionato. La traccia della sezione riportata nella parte inferiore della figura, è riportata in Fig. 2.

cessive discariche (fig. 7). La delimitazione planimetrica di tali fronti ha permesso di individuare e circoscrivere riempimenti in genere poco costipati e di notevole spessore. Inoltre poiché dai fronti di cava molto spesso iniziavano scavi in sotterraneo, il rilievo ha permesso di indirizzare le ulteriori indagini per la ricerca di eventuali vuoti nel tufo lionato. L'esecuzione delle operazioni di campagna

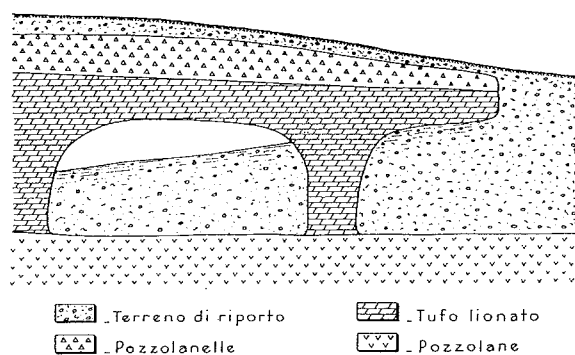


Fig. 7. - Rappresentazione di vuoti nel tufo lionato originati da scavi all'aperto proseguiti poi in sotterraneo e successivamente parzialmente riempiti.

non ha dato luogo a particolari inconvenienti dato che si è evitato l'uso di esplosivi con l'impiego di una massa battente come sorgente di energia.

5. Rilievo dei vuoti accessibili.

Molte delle gallerie e dei vuoti che sono stati oggetto di studio sono risultati ancora accessibili

sia pur con un certo pericolo; alcuni di essi ricadevano in aree già direttamente interessate da strade o da fondazioni di edifici già esistenti o in procinto di realizzazione.

Per effettuare uno studio sia pur di prima approssimazione sulla stabilità dei vuoti e quindi per progettare gli interventi che era indispensabile eseguire, per evitare il pericolo di futuri improvvisi crolli, è stata necessaria una ricostruzione dettagliata dei vuoti sotterranei mediante un rilievo topografico poggiato su fitte ed intricate poligonali, collegate all'esterno tramite imbocchi o voragini provocate dai crolli; per la ricostruzione dei dettagli si sono effettuate trilaterazioni appoggiate alle poligonali.

Ci si è serviti inoltre di livellazioni tecniche per la determinazione delle quote del fondo galleria e di canne metriche per l'altezza delle gallerie stesse.

Lo schema di rilevamento sopra indicato è stato eseguito in alcuni rilievi con ottimi risultati⁽²⁾ ma ha comportato un lungo ed oneroso lavoro condotto in condizioni talvolta molto difficili. Ciò si è particolarmente sentito quando le gallerie si presentavano rettilinee solo per piccoli tratti e quando gli imbocchi alle gallerie erano molto lontani dalle zone che dovevano essere interessate dal rilievo di dettaglio. In quest'ultimo caso era risultata particolarmente laboriosa l'individuazione, partendo dagli imbocchi, delle zone da rilevare in quanto era abbastanza facile, nei sopralluoghi iniziali, perdere l'orientamento, anche per vari gradi, nel dedalo delle gallerie e quindi trovarsi alla fine a rilevare vuoti che almeno in parte non interessavano il problema che si voleva affrontare. Per facilitare le indagini preliminari e sia per le poligonali in sotterraneo che per i collegamenti con l'esterno, si è ricorsi all'applicazione di metodi elettromagnetici già utilizzati per altri scopi nella ricerca geofisica.

Si immagini di porre in un punto *S* di una galleria il centro di una bobina ad asse verticale percorsa da una corrente alternata (vedi fig. 8). Si origina così un campo magnetico alternativo le cui linee di forza avranno un andamento calcolabile, una volta note o valutate le caratteristiche fisiche dei mezzi circostanti la bobina. Nel caso nostro si può supporre con sufficiente approssimazione che le li-

(2) Nel corso di un'indagine, sulla base del rilievo in sotterraneo sono stati ubicati più di 200 sondaggi meccanici, verticali ed inclinati, che dovevano incontrare i vuoti in punti prefissati da un progetto di risanamento mediante riempimento dei vuoti dall'esterno. Gli scarti rispetto alle posizioni di progetto degli sbocchi dei fori nei sotterranei sono risultati non superiori ai 20-30 cm.

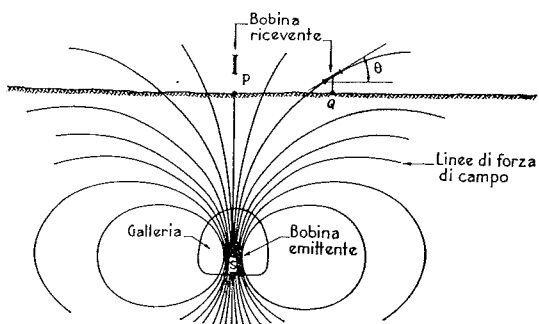


Fig. 8. - Andamento delle linee di forza del campo magnetico generato dalle spire emittenti poste nel punto S all'interno della galleria. Sono indicate anche le posizioni della bobina ricevente posta all'interno all'atto delle misure.

nee di forza del campo hanno l'andamento indicato nella fig. 8. Se si pone verticale una bobina ricevente situata all'esterno e la si trasla parallelamente a se stessa, si avrà flusso di induzione nullo nella bobina (e quindi assenza di correnti indotte) quando la bobina sarà situata su di un piano verticale passante per il centro della bobina emittente. Ruotando la bobina ricevente di 90° intorno alla verticale e operando come sopra visto, si individua un secondo piano verticale passante per il centro della bobina emittente. L'intersezione dei due piani individuerà l'asse della bobina. Si potrà pertanto determinare la posizione del punto P intersezione della superficie topografica con l'asse (verticale) della bobina emittente e quindi la ubicazione planimetrica del punto S in galleria.

Per determinare la differenza di quota tra punto in galleria S e punto all'esterno P si inclinerà la bobina ricevente di un angolo θ prefissato; trasladando in orizzontale la bobina stessa in modo che il suo asse intersechi sempre la congiungente P-S, si individua il punto Q in cui si ha nuovamente flusso nullo. Dalla distanza P-Q, noto l'angolo di inclinazione θ della bobina, è possibile risalire al dislivello P-S.

In tal modo è possibile ricavare la posizione planoaltimetrica, rispetto a riferimenti esterni, di punti in galleria, senza effettuare collegamenti topografici diretti interno-esterno.

Una volta riportati in superficie un numero sufficiente di punti del sottoterraneo, collegati tra loro e con i riferimenti esterni, è sufficiente effettuare il rilievo di dettaglio con trilaterazioni per ottenere una ricostruzione dei vuoti sotterranei che si è rivelata sufficientemente accurata per l'approssimazione grafica di una rappresentazione in scala 1:200.

L'approssimazione dei collegamenti interno-esterno raggiunta nei casi in cui il metodo è stato sperimentato, è stata infatti dell'ordine di qualche

centimetro, per profondità delle gallerie dell'ordine della decina di metri.

Il metodo, leggermente modificato, è risultato inoltre particolarmente utile anche nei sopralluoghi preliminari per individuare, grosso modo, la posizione di reti di gallerie rispetto all'esterno. In tali casi è preferibile mantenere orizzontale la bobina ricevente; la posizione della bobina emittente in sotterraneo viene determinata facilmente all'esterno mediante la individuazione della zona nella quale si ha un flusso di induzione massimo (e quindi il massimo del segnale). Se ci si accontenta di una approssimazione dell'ordine di 1-2 m nella ubicazione planimetrica, in superficie, della emittente in galleria, la determinazione richiede al massimo uno o due minuti. Nelle esplorazioni preliminari, se si mantengono costantemente in funzione le apparecchiature e se gli operatori sono in collegamento telefonico, è possibile seguire e quindi indirizzare dall'esterno il procedere del rilevatore che esplora il sottoterraneo, ottenendo così una prima ubicazione e delimitazione dei vuoti accessibili con notevole risparmio di tempo e di fatica.

6. Conclusioni.

Le brevi informazioni sopra esposte sono state riportate per fornire un quadro dell'attività svolta da questo Istituto per il problema dei vuoti sotterranei; per gli aspetti più originali, il nuovo dispositivo elettrodico e il metodo elettromagnetico per i collegamenti interno-esterno, sono state pubblicate note dettagliate da parte dei collaboratori dello scrivente che si sono occupati degli argomenti e che hanno eseguito sperimentazioni pratiche: l'Ingegnere M. GRANDINETTI [1967] ed il Dottore C. ZACCHI [1967].

Complessivamente si può affermare che l'impiego di metodi collegati ai procedimenti geofisici ha permesso di ottenere nuove possibilità di applicazione anche per il grave problema dei vuoti sotterranei, sempreché le indagini siano razionalmente imposte, rigorosamente eseguite ed accortamente interpretate.

« Mentre la presente nota era in corso di stampa, è deceduto per un infortunio sul lavoro il Dott. Ing. Maurizio Grandinetti, giovanissimo assistente ordinario presso l'Istituto di Geofisica Mineraria ed autore di uno degli studi riportati in questa nota. Lo scrivente, che lo ha avuto tra i suoi più validi collaboratori, lo ricorda a tutti coloro che lo hanno conosciuto e che hanno avuto la possibilità di apprezzare, oltre che la sua profonda pre-

parazione e la sua serietà nello studio e nel lavoro, anche il suo giovanile entusiasmo e le sue doti di simpatia e di schiettezza che colpivano chiunque lo avvicinasse ».

BIBLIOGRAFIA

- BERNABINI M. (1965) - *Un esempio di applicazione dei metodi sismici allo studio del comportamento statico di pilastri in sotterraneo*. Symposium « Problemi Minerari della Sardegna » Ass. Min. Sarda, Cagliari.
- BERNABINI M., ESU F., MARTINETTI S., RIBACCHI R. (1966) - *On the stability of the pillars in an underground quarry*

- worked through soft pyroclastic rocks*. Proceedings of 1° International Congress on Rock Mechanics, Lisbona.
- GRANDINETTI M. (1967) - *Una nuova disposizione elettrodoica per la ricerca di corpi di limitate dimensioni*. Bollettino di Geofisica Teor. e Appl. IX n. 35.
- MARTINETTI S., RIBACCHI R. (1965) - *Osservazioni sul comportamento statico dei pilastri di una cava in sotterraneo di materiali piroclastici (« Pozzolane »)*. Symposium « Problemi Minerari della Sardegna » Ass. Min. Sarda, Cagliari.
- ZACCHI C. (1967) - *Impiego di campi elettromagnetici per il rilievo topografico dei vuoti sotterranei*. Rassegna dei Lavori Pubblici n. 7-8.
- (1955) - *Tables of the cumulative probability distribution*. By Computation Laboratory - Harvard University Press. Cambridge Mass.

SUMMARY

New possibilities of geophysical methods in the solution of problems related to the existence of underground tunnels and caves.

Some techniques used by the Institute of Mining Geophysics of Rome University for the solution of problems related to the existence of underground tunnel and caves are briefly described.

The tunnels and caves in Rome are found in some levels of pyroclastic products of « Laziale » volcano, outcropping in a part of the town area, and particularly in the levels of black and red « pozzolane » and « tufo lionato ». In the « pozzolane » one or some superposed levels of tunnel networks are found (fig. 1 and 7); in the « tufo lionato » the hollows generally consist of big (fig. 2 and 6) underground rooms.

During a survey, geological, geomorphological and geohydrological investigations are previously made. Geological investigations are made to localize the levels, where tunnels and caves can be found. Geomorphological investigations (also using aerial photos) are made to localize entrances, shafts, and thrusts. The localization of water levels limits the depth of the survey. Mechanical drillings were always postponed as much as possible, for economic reasons. In fact, to have only a small knowledge of the percentage of the

surveyed area, where there are hollows, more than 50 drillings may be necessary (see table I).

Geophysical methods, and particularly horizontal electrical soundings were used to localize the hollows from the surface. Traditional electrode arrangements (WENNER, SCHLUMBERGER, etc.) (fig. 3) are not sensitive enough to localize the tunnels and caves as they are in Rome.

A new electrode arrangement based on the use of two current electrodes of the same polarity (fig. 4) and two potential electrodes has been studied. Between the potential electrodes the potential difference is zero if there are not anomalous bodies. Pure anomalous values, increased by the use of the current focused by the two current electrodes is determined. The first results have been satisfactory (fig. 5 and 6).

In many surveys the tunnel and caves were still accessible. To study the stability of the underground tunnels and caves, an accurate localization of them was necessary. This localization was previously made by underground topographic polygonals connected to surface datum points. Successively the survey was made easier by direct connection between underground and surface points. This connection was made by determining on the surface the trend of an electromagnetic field generated by a vertical axis sender coil situated in the different points of the underground hollows (fig. 8).