

PROBLEMATICHE DI VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI CROLLO DI CAVITÀ SOTTERRANEE

*Antonio Fiore * & Maurizio Lanzini ***

*Rischio Geologico – Autorità di Bacino della Puglia

**Geologo libero professionista (Roma) – e.mail: lanzin@aconet.it

1. PREMESSA

L'analisi dell'interazione tra cavità sotterranee e le infrastrutture esistenti, con riferimento specifico alla loro evoluzione morfodinamica, non risulta di facile ed immediata determinazione, soprattutto nelle situazioni in cui la mancata percezione del rischio o la "distrazione urbanistica" hanno avuto come conseguenza l'edificazione di aree dove sono presenti, nei primi strati del sottosuolo, cavità sotterranee naturali o antropiche, delle quali non si hanno a disposizione dati planoaltimetrici e geostatici precisi.

Tale situazione, frequente in molte aree italiane, avrebbe richiesto un più accorto uso del territorio e scelte urbanistiche più attente alla realtà geoambientale; invece il risultato è che la disordinata espansione edilizia del dopoguerra ha portato alla edificazione di interi quartieri densamente popolati al di sopra di cavità sotterranee.

Ad oggi la situazione è tale che di frequente disastri, repentine aperture di voragini, cedimenti, lesioni ad edifici e infrastrutture provocano danni economici e rischi per la popolazione residente.

L'aumento di sensibilità da parte degli Enti locali fa presupporre che sia maturata la dovuta consapevolezza del problema e che ciò possa finalmente portare alla giusta considerazione dello stesso nell'ambito della pianificazione urbanistica e nella programmazione degli interventi.

E' infatti necessario che si superi la concezione degli interventi quali rimedi isolati e sporadici per fronteggiare l'emergenza e si proceda alla definizione di piani organici di risanamento, oltre che di sottrazione alla ulteriore espansione urbanistica delle aree riconosciute a pericolosità geomorfologica.

Spesso si è verificato che gli stessi interventi di risanamento, realizzati senza un'analisi complessiva della situazione e dell'interazione tra i vari "sistemi" coinvolti, hanno indotto nel tempo la diffusa compromissione della stabilità delle aree attigue.

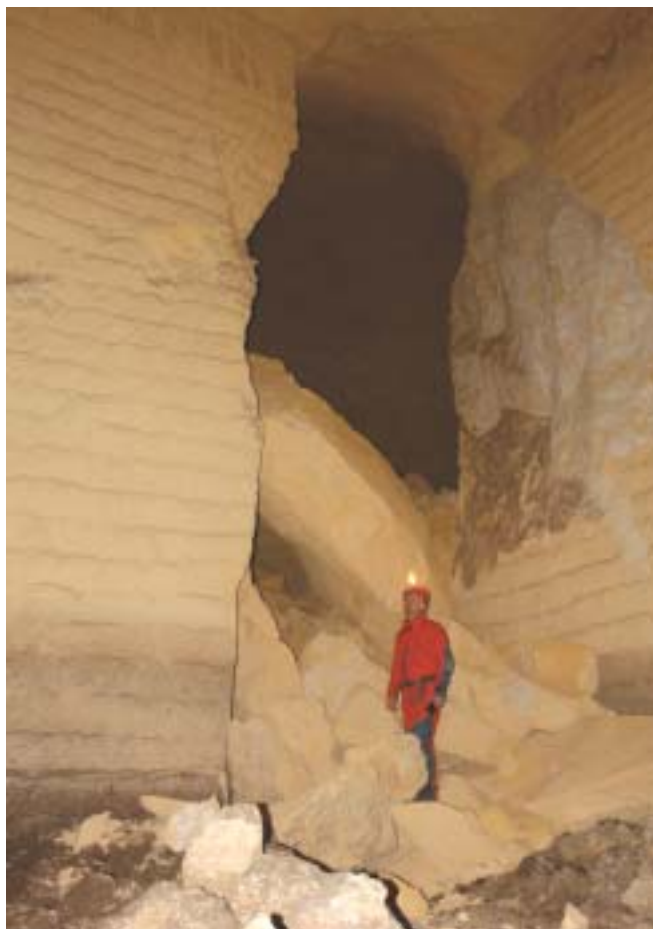
Esemplificativi a riguardo sono i casi in cui il tentativo di superamento del problema connesso alla costruzione di nuovi edifici, in aree affette dalla presenza di reti caveali, ha avuto come effetto un generale aggravio delle condizioni statiche delle

cavità le cui calotte sono risultate sezionate ed indebolite dalla realizzazione di tipologie di fondazioni profonde (pali); in quest'ultimo caso, per esempio, i pali possono fungere da direttrici di filtrazione di acque di perdita delle reti idriche e fognarie sino agli ipogei.

Appare evidente che la presenza di cavità, eventualmente evidenziate dalla solita e puntuale voragine, pone tutta una serie di problematiche geoambientali e geologico-applicative correlate allo studio, alla caratterizzazione geotecnica dei terreni, alla valutazione del rischio ed alla impostazione dell'indagine, che è di solito



Altamura (BA), voragine prossima ad abitazioni nella zona di Parco San Giuliano (maggio 2007). Foto CARS Altamura



Altamura (BA), crolli delle calotte e lungo le pareti nella rete di cavità antropiche presenti nel sottosuolo della zona di Parco San Giuliano. Foto CARS Altamura

trascurata e sottovalutata, con la conseguenza che nella maggior parte dei casi gli interventi sulle voragini si limitano, oltre ai sondaggi puntuali, al successivo riempimento delle voragini stesse.

2. APPLICABILITÀ DEL CONCETTO DI RISCHIO AL PROBLEMA “CROLLO PER CAVITÀ SOTTERRANEA”

In generale nella definizione del rischio sussistono due elementi: uno relativo alla possibilità che in un certo arco di tempo si verifichi l'evento indesiderato ed uno relativo alla gravità ed entità dei danni locali ed areali che tale evento può determinare.

Le problematiche di definizione del rischio sono già state affrontate, pur con modalità differenti, nei campi più disparati (rischio sismico, vulcanico, di esondazione fluviale). Nel caso del rischio sismico, vulcanico, di esondazione sono possibili valutazioni probabilistiche derivate dalla analisi di serie storiche e valutazioni di gravità intrinseca dell'evento per mezzo di scale empiriche (scale di inten-

sità sismica, quote idrometriche, ecc.). Al contrario nel caso della valutazione della pericolosità conseguente al crollo di una cavità sotterranea non è possibile eseguire valutazioni sui tempi di ritorno e quindi valutazioni probabilistiche sul verificarsi dell'evento in un determinato orizzonte temporale.

Tale difficoltà può essere superata se al concetto di pericolosità si sostituisce quello di pericolo dove non è presente alcun termine probabilistico. Il pericolo di crollo viene infatti a coincidere con il rischio assoluto che in una determinata area, in un intervallo di tempo infinito, si determini una voragine.

In relazione alla presenza di cavità ipogee pertanto si definisce il pericolo di voragine con la sola accezione della minore o maggiore possibilità che possano verificarsi voragini e/o subsidenze per crollo delle cavità stesse; tale assunzione è assimilabile alle valutazioni del rischio di frana nella quale non sono date indicazioni temporali del probabile evento franoso.

In tale senso si assume che sia possibile individuare situazioni di maggiore o minore pericolo (o più classi di pericolo), attraverso l'analisi di una serie di “indicatori”. L'importanza di eseguire una zonazione di pericolo (rischio assoluto di voragine) è giustificata dalla necessità di individuare zone con maggiori potenzialità di crollo e che richiedono immediati interventi di risanamento.

In relazione alla Vulnerabilità del sistema superficiale che può subire danni (area urbana) sussistono minori problemi per la sua definizione: nel senso che è ovvio che le tipologie infrastrutturali (che verranno di seguito definite) porteranno alla individuazione di elementi meno vulnerabili (parchi, aree marginali, edifici con fondazioni profonde, ecc.) e di elementi più vulnerabili (edifici con fondazioni dirette, manufatti di importanza storica, servizi pubblici, ecc.).

2.1 SISTEMI COINVOLTI NEL PROBLEMA “VORAGINE”

Nel contesto di valutazione del rischio di crollo di cavità sotterranee l'assunzione di concetti quali il Pericolo e la Vulnerabilità ha lo scopo di definire le interazioni fra i vari “sistemi”. Si possono individuare i seguenti sistemi:

Sistema ipogeo

Il sistema ipogeo è rappresentato dalla presenza di cavità sotterranee, come sono realmente ad oggi esistenti anche in relazione alla loro storia evolutiva

e tensionale. Il livello di equilibrio e/o squilibrio statico di tale sistema, che si esplica con la possibilità di verificarsi di crolli, è l'origine degli impatti negativi e distruttivi sul sovrastante SISTEMA INSEDIATIVO. Nell'ambito del SISTEMA IPOGEO pertanto il problema è di verificare quali elementi possono essere presi in considerazione per valutare i livelli di stabilità e/o instabilità (pericolo). E' auspicabile che si possa sviluppare una metodologia che permetta di operare una zonazione con vari livelli di pericolosità, sia per ovvi problemi di gestione politica di tale rischio che può coinvolgere vaste porzioni del tessuto urbano, che per la necessità di impiegare risorse economiche in zone relativamente più rischiose. Si assume pertanto che è possibile eseguire una zonazione di pericolo (con i limiti sopra esposti) fra varie situazioni caveali.

All'interno del SISTEMA IPOGEO una prima classificazione finalizzata alla valutazione del pericolo di crollo può essere la seguente:

1. CAVITÀ NATURALI
 - 1.1 CAVITÀ PRODOTTE DA FENOMENI DI DISSOLUZIONE DI ROCCE CARBONATICHE
2. CAVITÀ ANTROPICHE
 - 2.1 CAVITÀ CONCEPITE PER ESSERE SITUATE NEL SOTTOSUOLO
 - 2.1.1 Scavate in roccia (litoide o granulare) senza sostegni
 - 2.1.2 Scavate in roccia (litoide o granulare) con sostegni
 - 2.2 CAVITÀ SOTTERRANEE COSTITUITE DA STRUTTURE EDIFICATE NEL SOPRASSUOLO

Per quanto riguarda le cavità naturali, prodotte da fenomeni di dissoluzione carsica, si possono avere le morfologie più disparate (inghiottitoi, reti beanti, caverne vere e proprie, ecc.) e con dimensioni molto variabili; queste sono le più difficili da indagare in quanto prodotte da fenomenologie non controllate dall'uomo e con andamenti plano-altimetrici molto variabile da punto a punto.

Per quanto riguarda le cavità antropiche, che principalmente vengono trattate in questo testo, esiste una netta differenza per ciò che riguarda la loro potenziale instabilità tra le cavità concepite

per essere situate nel sottosuolo e le cavità sotterranee costituite da strutture edificate nel soprassuolo.

Nel primo gruppo rientrano tutta una serie di strutture quali ad esempio: gallerie di miniera, gallerie stradali, acquedotti sotterranei e loro diramazioni, condotti per la presa e distribuzione locale dell'acqua, pozzi, cisterne, fognature, cave in sotterraneo, luoghi di culto (cripte, mitrei), sepolture (tombe, catacombe, colombari), sotterranei di servizio che furono ideate e realizzate per essere ipogee e quindi essere "stabili" nel contesto sotterraneo nel quale sono state inserite. I problemi potenziali di stabilità di queste cavità aumentano in funzione dell'aumento della loro prossimità al piano campagna. A maggiori problemi di stabilità vanno incontro sicuramente quelle cavità che non hanno delle strutture di sostegno o non sono state realizzate in opera muraria come ad esempio le cave sotterranee. Questi ipogei possono coinvolgere le litologie più disparate (pozzolane, calcareniti, conglomerati, arenarie, ecc.).

Nel secondo gruppo rientrano quelle cavità dovute all'inglobamento nel sottosuolo di strutture originariamente nate per essere localizzate in superficie e successivamente sepolte (ad esempio nelle città storiche ciò è dovuto al progressivo innalzamento del livello del suolo per aumento della coltre di riporto antropico). I problemi di stabilità di queste strutture, che si trovano oggi anche a diversi metri di profondità, sono sicuramente



Canosa di Puglia (BA), cavità antropiche parzialmente riempite da materiale di scarto. Sul lato destro si nota la camicia di un palo di fondazione con parte della gettata di calcestruzzo fuoruscita dalla stessa. Foto Ing. S. Germinario

maggiori in quanto non progettate esplicitamente per sopportare i pesi e le spinte dovuti alla loro condizione sotterranea.

Per ognuna delle tipologie sopraesposte saranno definiti quei fattori, propri o dovuti all'azione dell'uomo, che contribuiscono a determinare e aumentare il pericolo di crollo della cavità e quindi a sprofondamenti in superficie.

Nell'ambito di eventuali interventi di stabilizzazione una differenziazione importante all'interno del SISTEMA IPOGEO può essere anche quella fra ipogei per i quali in genere non si hanno particolari interessi di salvaguardia (cave) e ipogei di importanza storico-culturale ed archeologica, i quali possono essere origine di un dissesto e nel contempo degni di essere conservati. Non si esclude comunque che alcune cavità legate ad antiche cave possano avere valore di memoria storica di attività umane e pertanto meritevoli di conservazione.

Sistema insediativo

Il sistema insediativo definisce le attività, la sicurezza, il valore economico e storico-culturale delle infrastrutture di superficie e della popolazione. Rappresenta il bersaglio che può essere colpito da eventi di crollo originati nel SISTEMA IPOGEO. All'interno del SISTEMA INSEDIATIVO potranno essere eseguite valutazioni di maggiore o minore vulnerabilità, individuando alcuni indicatori di vulnerabilità.

Questo schema concentra l'attenzione sui danni che possono colpire il tessuto urbano e la popolazione, in quanto in questa sede si pone principalmente l'obiettivo di una corretta gestione da parte della Amministrazione Pubblica delle problematiche relative ai rischi per la città, in termini di organizzazione amministrativa e non unicamente l'analisi tecnico-scientifica della stabilità degli ipogei in se stessi (anche se tale contesto è, come visto, fondamentale). Vale a dire che le problematiche tecnico-scientifiche di valutazione evolutiva delle cavità è funzionale e subordinate alla necessità di impostare un ottimale governo tecnico-amministrativo dei problemi in oggetto.

Si elencano di seguito alcuni danni che possono derivare sul sistema insediativo:

- lesioni ad edifici e manufatti
- crollo di edifici e manufatti
- rottura di reti idriche, fognarie, del gas, ecc.
- rottura manto e struttura stradale

- interruzione strade ed aree urbane, interruzione del traffico
- pericoli per la cittadinanza
- disturbi alla cittadinanza
- costi relativi ai danni di cui sopra

Il SISTEMA INSEDIATIVO non è esclusivamente bersaglio degli impatti distruttivi originatesi nel SISTEMA IPOGEO, ma contiene anche elementi di incremento della pericolosità del SISTEMA IPOGEO stesso: manufatti con fondazioni dirette al di sopra di cavità (sovraccarichi), vibrazioni del traffico, perdite della rete idrica e/o fognaria possono portare con incrementi di carico, tensioni dinamiche e scaldamento delle caratteristiche geotecniche dei terreni ad accelerare evoluzioni delle cavità verso condizioni di maggiore pericolosità ed instabilità.

Sistema idrogeologico

Tale sistema è stato introdotto per una maggiore completezza della rete di interazioni fra i vari sistemi. Infatti come spesso verificato le gallerie sono invase da acque e/o liquami con evidente rischio di inquinamento della falda. In tale senso nel sistema idrogeologico potranno essere eseguite valutazioni di vulnerabilità di inquinamento.

Ai sistemi precedenti va aggiunto inoltre la possibilità di sismi che possono aumentare la pericolosità del SISTEMA IPOGEO.

2.2 INDICATORI DI PERICOLO DEL SISTEMA IPOGEO E DI VULNERABILITÀ DEL SISTEMA INSEDIATIVO

Al fine di individuare i livelli di pericolo di crollo degli ipogei e di vulnerabilità territoriale si possono selezionare alcuni indicatori la cui disponibilità e qualità è funzione della scala di lavoro e dei dati effettivamente acquisibili.

Qui di seguito sono elencati alcuni *indicatori* che possono essere utilizzati per definire il Pericolo di sprofondamento legato al crollo di una cavità:

- numero di cavità
- profondità calotta
- dimensioni planimetriche caveali, cavità unica, rete caveale, ecc.
- percentuale di scavo
- rapporto fra altezza e larghezza dei pilastri
- rapporto fra profondità e larghezza della cavità
- tipologia (cava, cunicolo idraulico, catacomba, ecc.)

- geologia, litologia, stratigrafia
- idrogeologia
- caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni
- stato tensionale ed evolutivo delle gallerie (dedotto da analisi diagnostica visiva delle cavità o calcolato con il metodo dell'area tributaria)
- presenza di strutture di sostegno in sotterraneo
- reti idriche e fognarie lesionate e con perdite (sistema insediativo)
- vibrazioni del traffico (sistema insediativo)
- presenza di sovraccarichi - fondazioni dirette (sistema insediativo)

Qui di seguito invece sono elencati alcuni *indicatori* per individuare i livelli di vulnerabilità del sistema insediativo:

- presenza o meno di edifici
- tipologie dei manufatti
- tipologie fondazionali
- presenza di reti di sottoservizi (in particolare gas)
- presenza di reti fognarie ed idriche

3. INDAGINI DI CAVITÀ SOTTERRANEE

Le indagini su cavità e gallerie, che si eseguono in genere soltanto dopo il verificarsi di un dissesto localizzato, vengono di solito sviluppate, oltre che con i necessari sondaggi geognostici e prove di laboratorio, attraverso l'esecuzione di sondaggi a distruzione di nucleo, i quali permettono di individuare il tetto e il letto di un vuoto sotterraneo. Se per una singola galleria o cunicolo ciò appare ancora accettabile (ma dovrebbe essere prima verificato che esista una sola galleria o camera), in presenza di una rete di gallerie, come è il caso di Altamura, Canosa di Puglia e Gallipoli tale metodologia appare insufficiente. Infatti risulta alquanto problematica, sulla base di una maglia di fori i quali hanno individuato o meno dei vuoti, l'estrapolazione dei risultati fino alla costruzione di un attendibile andamento della rete di gallerie; inoltre in tal modo non si ottengono informazioni circa la larghezza delle cavità, lo stato fisico delle pareti degli ipogei e le evoluzioni tensionali in atto.

Altre metodologie di solito citate in letteratura, sempre per la determinazione della realtà ipogea, sono rappresentate da indagini geofisiche (geoelettrica e georadar); tali metodologie raramente però danno risultati accettabili in quanto la geoelettrica trova evidenti limiti di operatività in aree urbanizzate (senza considerare le diverse fonti di disturbo

da parte di correnti vaganti), mentre il georadar, in terreni umidi e argillificati (per esempio a causa della copertura di "terre rosse" a matrice argillosa), difficilmente riesce ad investigare terreni oltre pochi decimetri dal piano campagna (mentre le gallerie sono localizzate di solito entro i primi 10-20 metri di profondità).

Una ulteriore metodologia di indagine consiste nell'esplorazione delle gallerie con tecniche speleologiche; in tale maniera sarebbe possibile, con la visione diretta degli ipogei, acquisire una maggiore mole di misure e dati di rilevamento geostrutturale, ma nella realtà i rischi evidenti per tali esplorazioni, nonché il fatto che sovente le gallerie sono invase da liquami o interrotte da frane ed altri dissesti, impediscono un uso efficace e continuo di esplorazioni speleologiche.

Pertanto l'esplorazione, il rilievo e la modellazione tridimensionale geologica e geotecnica delle cavità sotterranee, allo stato dell'arte, è ancora compito problematico. Il geologo chiamato a tale compito dunque dovrà valutare di volta in volta quali indagini fare, in modo da modellare al meglio possibile il problema. Resta inteso che qualunque modello, tranne casi particolari ben indagabili ed esplorabili, sarà sempre approssimato e perfezionabile. Da ciò deriva che, nella progettazione degli interventi e nelle destinazioni d'uso del territorio soprastante, bisognerà attenersi a rigidi principi di cautela.

Le metodologie di studio ed individuazione di cavità sotterranee, in generale, si possono dividere fra metodi indiretti e diretti:

METODI INDIRETTI (GEOFISICI)

- geoelettrici
- georadar
- microgravimetrici

METODI DIRETTI

- sondaggi meccanici
- rilievi speleologici
- rilievi topografici
- indagini televisive o laser in foro

I *metodi indiretti* sono basati sulla misura di una proprietà specifica dei vuoti, che si presentano come oggetti a bassa o nulla densità, rigidità nulla ed alta resistività elettrica. Le problematiche di utilizzazione dei vari metodi geofisici risiedono nel fatto che usualmente le indagini vengono eseguite in aree urbane e si può asserire che le procedure

ed i principi adottati per effettuare prospezioni in aperta campagna non possono essere pedissequamente trasferiti in aree intensamente antropizzate; infatti la geofisica in area urbana presenta una serie di problemi, ancora non tutti risolti, tanto da poter essere considerata come una specifica branca della geofisica applicata.

I problemi principali dell'utilizzo di metodologie geofisiche in zone ad alta urbanizzazione possono essere:

- barriere fisiche che impediscono l'uso di configurazioni geometriche standardizzate
- rumori di fondo di varia natura (vibrazionali, elettrici, correnti vaganti, ecc.) che diminuiscono la sensibilità delle varie strumentazioni

I metodi indiretti non permettono ovviamente nessuna valutazione circa lo stato fisico di stabilità delle calotte e dei pilastri, ma hanno però il vantaggio di essere non distruttivi. Alla luce di quanto sopra esposto appare che, pur nelle varie limitazioni esistenti, le indagini con metodi indiretti sono utili per una individuazione di massima della presenza o meno di vuoti, soprattutto in aree ove non esistono indizi certi della loro esistenza.

Viste le limitate informazioni sulla geometria delle gallerie, acquisibili con le usuali indagini indirette come quelle qui sopra brevemente descritte, appare quanto meno illusorio dare risposte attendibili circa la loro stabilità ed arrivare ad accettabili valutazioni di tale rischio geologico, sia su singole cavità che in complesse reti di gallerie.

I *metodi diretti* sono peraltro condizionati dalla effettiva possibilità di esplorazione in relazione alla presenza o meno di accessi alla rete caveale ed alle condizioni di sicurezza per i tecnici; oltre ai rilevamenti speleologici, un metodo diretto che supera questi problemi può essere l'indagine televisiva o laser in foro di sondaggio.

I metodi diretti permettono, per quanto possibile, di *individuare il reale andamento plano-altimetrico ipogeo*, e ciò è particolarmente importante soprattutto qualora siano coinvolte problematiche di stabilità di edifici, fognature, ecc.; inoltre si sottolinea la necessità di una *Interpretazione Diagnostica delle gallerie per addivenire a realistiche valutazioni della stabilità e di pericolo geologico* che può avvenire soltanto tramite analisi visiva dei pilastri e delle calotte.

Ecco dunque la necessità di associare, all'indagine indiretta, anche l'indagine con metodi di

diretta esplorazione.

Una corretta *Interpretazione Diagnostica delle gallerie* richiede la conoscenza delle variazioni geostatiche che lo scavo di una galleria induce nel terreno: lo scavo di una galleria determina una modificazione dello stato tensionale che si risolve con la realizzazione di sollecitazioni e deformazioni in calotta e sui piedritti, che sono più o meno sopportati in funzione delle geometrie del cavo e dei parametri geomeccanici degli ammassi; in pratica la resistenza della calotta controlla l'ampiezza delle gallerie, mentre la resistenza dei piedritti determina la stabilità dei pilastri.

Sulle calotte si inducono tensioni di trazione o di compressione, mentre sulle pareti dei piedritti si inducono stress di compressione: le tensioni più elevate sono sempre quelle subite dalle pareti dei pilastri. L'evoluzione che subisce una galleria dopo lo scavo è rappresentata pertanto da deformazioni e da distacchi di materiale che in ordine crescente di sollecitazione e di potenziale instabilità coinvolgono la calotta, la congiunzione calotta-pilastro e successivamente le pareti intere dei pilastri, fino agli stati critici nei quali i pilastri assumono la classica forma a "clessidra": tale trasferimento tensionale dal tetto al cavo ai pilastri viene comunemente chiamato "effetto arco".

Nella *analisi diagnostica* si assume pertanto che gli elementi geometrici, le tipologie dei distacchi, la qualità e le granulometrie dei detriti franati nelle gallerie, diano una risposta sintetica della storia tensionale subita dal cavo, dal momento dello scavo ai giorni nostri. Con tali elementi è già possibile eseguire una zonazione di rischio ed inoltre, assumendo coefficienti di sicurezza unitari, per esempio in caso di pilastri particolarmente tensionati, è possibile con valutazioni di Back Analysis, stimare la resistenza a compressione del pilastro stesso. Tali resistenze a compressione, statisticamente analizzate e confrontate con i parametri di laboratorio, permettono per approssimazioni successive di avvicinarsi alla descrizione del comportamento geomeccanico dell'ammasso roccioso esistente in sito.

Queste metodologie richiedono ovviamente la conoscenza di reti di gallerie con sufficiente sviluppo areale per permettere una geometrizzazione statisticamente attendibile delle gallerie e dei pilastri.

La fase di analisi diagnostica degli elementi morfologici, morfometrici, geomeccanici e tensionali delle gallerie, rappresenta dunque la fase centrale

della metodologia proposta e tale indagine trova senz'altro nel geologo la figura principale per la sua corretta esecuzione. Infatti il geologo, nell'ambito delle sue conoscenze geologico-geomorfologiche, è in possesso della capacità di interpretare le forme ed i fenomeni di alterazione in contesti sia naturali che antropizzati (geologia urbana) e di esprimere ipotesi attendibili sulle tendenze evolutive nel tempo delle geostrutture ipogee.

4. INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

In passato per la stabilizzazione degli ipogei, quando erano ancora esposti gli accessi delle reti caveali, si ricorreva alla realizzazione di muri e di pilastri che sorreggevano le calotte e diminuivano le luci delle gallerie.

Oggi giorno queste gallerie sono invece frequentemente difficilmente accessibili data la obliterazione degli accessi, l'estesa urbanizzazione, i dissesti in sotterraneo e la presenza frequente di acqua nelle reti caveali e pertanto i suddetti sistemi di consolidamento non sono in genere realizzabili.

Pertanto risulta che gli interventi di consolidamento degli ipogei più frequentemente utilizzati consistono nel loro riempimento.

Tali interventi debbono comunque essere progettati in relazione al materiale più idoneo da immettere nella cavità, il quale deve assicurare una permeabilità ed una rigidità dello stesso ordine di grandezza dei terreni.

I materiali utilizzabili per il riempimento possono essere costituiti da pozzolane/sabbie calcarenitiche e calce fluitata in acqua, oppure dei calcestruzzi a granulometria sabbiosa appositamente progettati per tali riempimenti e che hanno la caratteristica di essere permeabili e di avere una densità e rigidità paragonabile agli ammassi pozzolanici/calcarenitici. Inoltre è importante che tali miscele di riempimento siano facilmente iniettabili e che non richiedano operazioni di compattazione o vibrazione, ma che nel contempo garantiscano assenza di assestamenti da segregazione ed una certa stabilità nel tempo.

A tale scopo si possono utilizzare dei particolari calcestruzzi "leggeri" costituiti da una miscela a base di leganti idraulici ed una certa quantità di aggregati sabbiosi naturali, fluida, autolivellante, con caratteristiche controllate, priva di segregazione ed essudazione. Allo stato indurito è un prodotto del tutto assimilabile ad un terreno artificiale, idoneo per terreni tufaceo-pozzolanici e/o

calcarenitici porosi, con le seguenti caratteristiche:

- Resistenza meccanica a compressione a 28 giorni: $1 \div 2$ MPa
- Massa Volumica: $1400 \div 1800$ kg/mc
- Modulo di elasticità: $400 \div 600$ MPa
- Permeabilità: $10^{-1} \div 10^{-3}$ cm/sec

Queste miscele sono prodotte dalla maggior parte degli impianti di confezionamento calcestruzzi e trasportato mediante autobetoniere.

Il dato della permeabilità di questi calcestruzzi "leggeri" può inoltre risultare molto interessante nel caso si debbano riempire delle cavità interessate da flusso di percolazione. In questi casi infatti il riempimento, comportandosi come un materiale incoerente sciolto (nei confronti della sola permeabilità) non impedisce il passaggio dell'acqua e non crea quindi sbarramenti al flusso idraulico che possono aggravare la situazione geotecnica dell'intorno della cavità.

Per controllare la buona riuscita del riempimento della rete caveale è necessario suddividere la stessa in camere isolate tra loro; questa parzializzazione è eseguita allo scopo di:

- controllare i volumi iniettati in funzione della stima dei volumi condotta in fase di indagine preliminare
- circoscrivere opportunamente le aree di riempimento per evitare, ad esempio, di creare sovrappressioni indotte dal materiale fluido su un lato di un pilastro non confinato dal lato opposto.

Per poter controllare i volumi immessi nelle cavità è comunque necessario suddividere gli ipogei in settori delimitati e ciò può essere realizzato con paratie di micropali attrezzati con "sacchi otturatori" opportunamente iniettati. Questa ultima metodologia è stata utilizzata per il riempimento della rete caveale presente al di sotto della Scuola Santa Beatrice al Portuense – Roma (Conti, 1999). In tale intervento, le barriere artificiali sono state realizzate ponendo in opera dei micropali con diametro uguale a 250 mm e lunghezze complessive generalmente comprese fra 10 e 15 metri, tali da garantire un immorsamento di circa 3 metri nel terreno al disotto del pavimento delle gallerie. L'armatura dei micropali era costituita da un tubo metallico di diametro 139,7 e spessore 8,8 mm, attrezzato con valvole di iniezione di non ritorno (manchettes) e dotati di sacchi otturatori in corrispondenza del tratto di cavità attraversato.

L'armatura è stata dimensionata per garantire che le barriere potessero resistere alla pressione orizzontale trasmessa dal materiale di riempimento nella fase fluida.

La tecnica di esecuzione prevedeva di utilizzare, per ogni barriera, un numero dispari di micropali. In questo modo era possibile eseguire il riempimento dei sacchi otturatori dei micropali primari (sempre in numero pari) e poi procedere al riempimento dei sacchi otturatori dei micropali secondari (sempre in numero dispari) che si trovavano pertanto sempre confinati, in asse al diaframma, o da due sacchi già riempiti o da un sacco e dalla parete della cavità. Questo assicurava la perfetta sigillatura della parete.

Diverse prove eseguite prima di iniziare il lavoro, hanno consentito di valutare le caratteristiche del materiale utilizzato per confezionare i sacchi e di determinare il numero di legature provvisorie con le quali avvolgere il sacco prima della sua introduzione nel foro. Il riempimento è stato condotto con miscela cementizia.

Le operazioni di riempimento dei sacchi sono state tutte seguite visivamente grazie all'impiego della telecamera, per assicurarsi della sigillatura delle barriere.

Operativamente si è proceduto come nel seguito descritto:

- Sigillatura dell'intercapedine tra tubo e perforazione (guaina) nella parte al disotto del sacco otturatore.
- Riempimento, mediante iniezione, dei sacchi otturatori dei micropali primari.
- Riempimento, mediante iniezione, dei sacchi otturatori dei micropali secondari.
- Sigillatura dell'intercapedine tra tubo e perforazione nella parte al disopra del sacco otturatore.

Le valvole di non ritorno poste subito al disopra del sacco otturatore sono state infine utilizzate per iniettare miscele cementizie il cui scopo era quello di sigillare la sommità dei cunicoli.

5. METODOLOGIE OPERATIVE PER LA GESTIONE DEL RISCHIO

Si propongono di seguito alcune metodologie operative per una migliore gestione delle problematiche inerenti i dissesti in ambito urbano, legati alla presenza di cavità sotterranee, limitatamente alle tipologie di indagine e valutazione del rischio.

Nell'ambito dei problemi qui esaminati, ai tecnici della Pubblica Amministrazione si presentano

due tipi di problemi:

- 1) EMERGENZA: problemi di gestione di eventi puntuali di dissesto (voragini, lesioni su strade o edifici imputabili a crolli di cavità sotterranee).
- 2) PROGRAMMAZIONE: problemi di gestione del rischio a scala territoriale (valutazione di rischio su aree urbanizzate estese, progettazione di infrastrutture - strade, fognature, ecc.).

1) EMERGENZA

Al verificarsi di una voragine, oltre ai problemi di recinzione dell'area, di deviazione del traffico e/o di eventuale sgombero di edifici per i quali i tecnici della Pubblica Amministrazione sono già attrezzati ed esperti, si impongono tutte le problematiche di indagine, studio, valutazione del rischio e di risanamento dell'area, in aggiunta alla necessità di eseguire tali interventi con la massima celebrità per limitare i disturbi al traffico ed alla cittadinanza.

Normalmente, in tali casi, l'esigenza di risolvere il problema velocemente fa sì che si ricorre al riempimento della voragine senza un preventivo progetto di tale intervento. Spesso, infatti, le voragini si verificano in corrispondenza e/o in adiacenza di passati dissesti per riempimenti eseguiti alla cieca. In questa sede si sottolinea invece il bisogno di eseguire alcuni studi geologici finalizzati alla mappatura della rete caveale in prossimità della voragine, nonché ad una sua descrizione dello stato di dissesto presente in sottoterraneo.

La necessità di eseguire una mappatura plano-altimetrica della rete caveale all'intorno della voragine è finalizzata al progetto del riempimento in quanto questo è fattibile con sicurezza, soltanto se si possono isolare i vuoti da riempire, si individuano le quantità dei materiali di riempimento e se non sono presenti nelle cavità circolazioni idriche e/o di liquami che rischierebbero di invalidare l'efficacia del riempimento stesso. Un ulteriore elemento necessario al progettista per stabilire l'ubicazione dei "diaframmi" di chiusura del settore da riempire, è la conoscenza precisa dello stato di lesionamento già presente o indotto dal crollo stesso.

L'indagine deve iniziare con uno o più sondaggi geognostici in adiacenza alla voragine poiché l'individuazione della serie stratigrafica, serve come guida per definire la profondità e lo spessore degli strati geologici oggetto di passate attività di scavo. La stratigrafia deve dare indicazione dettagliata

circa le rocce incontrate in sondaggio, in modo tale da poter distinguere quali strati siano stati passibili di escavazione in sotterraneo o meno.

Successivamente si deve eseguire una serie di perforazioni a distruzioni di nucleo all'intorno della voragine, per permettere l'esecuzione di ispezioni televisive o laser in foro in modo da mappare una porzione significativa all'intorno della voragine stessa e di condurre un'indagine qualitativa dello stato fisico degli ipogei. E' ovvio che se la voragine mette in luce una sottostante rete caveale raggiungibile ed esplorabile con sicurezza da personale speleologico specializzato, la mappatura e l'osservazione possono essere eseguite direttamente senza l'ausilio delle perforazioni a distruzione di nucleo.

Nel contesto di un problema puntuale come quello relativo ad una voragine, la valutazione del rischio appare di limitata importanza perché la voragine è già un indice di un dissesto avvenuto e per la necessità di risanare l'area in tempi il più possibile brevi.

L'utilizzo di metodologie indirette (geofisiche) per la mappatura delle cavità, va utilizzata con cognizione di causa e dopo aver verificato, sul luogo del dissesto, che il mezzo riesca a individuare il vuoto sotterraneo (taratura strumentale). E' opportuno ribadire poi che, in ogni caso, le indagini geofisiche non permettono una valutazione dello stato di dissesto delle stesse cavità.

I dati delle indagini (stratigrafia, dati geotecnici, geometria della rete caveale e sua descrizione) costituiscono la base per la progettazione degli interventi di risanamento che, alla luce della necessità di interventi veloci, saranno quasi sempre rappresentati da un riempimento delle cavità. La mappatura e l'analisi diagnostica sullo stato delle calotte e dei pilastri (ricavata dall'esplorazione speleologica o dalle indagini televisive e/o laser in foro), permetteranno al geologo ed al progettista di individuare la porzione di rete caveale da riempire, di studiare le tipologie degli interventi per isolare tale porzione e di stabilire le modalità cantieristiche del riempimento stesso.

Il riempimento potrà essere eseguito con calcestruzzi speciali a granulometria sabbiosa e a bassa densità normalmente in commercio.

Un aspetto importante è che i risultati della indagine geognostica, la mappa della cavità ed il progetto eseguito, dovranno essere organizzati in una banca dati in modo tale da contribuire in iti-

nere alla conoscenza organizzata della realtà ipogea; conoscenza che crescerà nel tempo e che servirà agli studi di importanza territoriale.

In tale fase di emergenza è evidente che i primi ad intervenire sul luogo della voragine sono i tecnici della Pubblica Amministrazione, i quali possono eseguire osservazioni immediate, di notevole aiuto alla successiva fase di programmazione delle indagini, di studio e di progettazione degli interventi di consolidamento.

Un esempio di *scheda sintetica* di rilevamento utilizzabile da tecnici della Pubblica Amministrazione, al fine di raccogliere le prime osservazioni relative alla voragine, è quella approntata dall'Autorità di Bacino della Puglia (Caggiano, Di Santo, Fiore, Palumbo, questo volume); tale scheda andrà poi consegnata ai geologi e ingegneri che si occuperanno delle problematiche di studio e di consolidamento dell'area.

2) PROGRAMMAZIONE

Oltre al problema puntuale di dissesto ora descritto, la Pubblica Amministrazione è impegnata a affrontare problemi di gestione del rischio a scala territoriale: valutazione di rischio su aree urbanizzate estese, progettazione di infrastrutture quali strade, fognature, ecc..

In tale contesto gli obiettivi dello studio sono quelli di una zonazione di rischio in modo da individuare i siti ove intervenire con massima urgenza: tale finalità si realizza attraverso l'analisi della intera rete caveale (pilastri e calotte) alla luce delle condizioni urbanistiche al contorno.

La conoscenza precisa dell'andamento plano-altimetrico ipogeo acquista una importanza decisiva in caso di gallerie estese e soprattutto qualora siano presenti problematiche di stabilità di infrastrutture; inoltre è essenziale relazionare le geometrie urbanistiche e strutturali con l'andamento della rete di gallerie.

In particolare per qualsiasi valutazione del rischio e di stabilità delle gallerie, è necessario esaminare i seguenti elementi:

- geometria ipogea (mappa delle gallerie, profondità, larghezze ed altezze delle cavità)
- caratteristiche litostratigrafiche
- caratteristiche idrogeologiche
- caratteristiche geotecniche dei terreni fra la calotta e la superficie topografica
- caratteristiche geotecniche dei terreni contenenti cavità (pareti del cavo)

- entità dei fenomeni evolutivi di alterazione della calotta e dei piedritti della cavità (analisi diagnostica degli ipogei)
- livelli tensionali geostatici
- eventuali carichi indotti da manufatti (sia in superficie che in sotterraneo)
- tipologie e geometrie fondazionali
- eventuali perdite della rete idrica o fognaria
- vibrazioni indotte da traffico

Normalmente questa fase non è soggetta a particolari vincoli di emergenza e pertanto le indagini possono essere programmate scegliendo le opportune metodologie idonee alle differenti realtà territoriali e urbanistiche studiate. Per un'analisi critica delle varie metodologie di indagine su cavità sotterranee, si rimanda al paragrafo 3.

Indipendentemente dalle metodologie di studio utilizzate, per arrivare ad una attendibile zonazione del rischio, è fondamentale produrre una mappa quotata delle gallerie e un'analisi diagnostica sullo stato fisico delle calotte e dei pilastri.

Nell'*analisi diagnostica* si assume pertanto che gli elementi geometrici, le tipologie dei distacchi, la qualità e le dimensioni del materiale franato nelle gallerie, diano una risposta sintetica della storia tensionale subita dall'ipogeo, dal momento dello scavo ai giorni nostri. Con tali elementi è già possibile eseguire una zonazione di rischio.

Queste metodologie richiedono, ovviamente, la conoscenza della geometria delle reti di gallerie, con sufficiente sviluppo areale, per permettere una analisi statisticamente attendibile delle gallerie e dei pilastri.

La fase di studio degli elementi morfologici, morfometrici, geomeccanici e tensionali delle gallerie, rappresenta la fase centrale della metodologia proposta.

L'analisi degli elementi suddetti, che porta alla individuazione delle zone a rischio, deve essere lasciata alla libera interpretazione ed esperienza del professionista incaricato.

Ad ogni modo, qualunque sia la metodologia interpretativa utilizzata, è necessario che lo studio produca una planimetria quanto più possibile realistica della rete caveale con l'indicazione dei dissesti in atto o potenziali e le possibili interazioni tra le cavità e le infrastrutture di superficie (edifici, rete idrica e fognaria, strade, ecc.) in modo che il progettista possa articolare gli interventi di consolidamento e/o di progettazione in maniera efficace, adeguandoli alla realtà ipogea.

PRINCIPALE BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (1999) – Atti del Convegno *Le cavità sotterranee nell'area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione*, SIGEA Lazio e Ufficio Geologico della Provincia di Roma, Roma.

AA.VV. (2002) – *Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana*. Atti del Convegno "Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana", Grosseto 31 marzo 2000.

AA.VV. (2004) – *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*. Atti del 1° Seminario Roma 20-21 maggio 2004.

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 e Territorio, questo volume.

CATENACCI V. (1992) – *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., XLVII.

CONTI M. (1999) – *Interventi di risanamento e consolidamento di cavità sotterranee: il caso della scuola di S. Beatrice (Roma)*. Convegno "Le cavità sotterranee nell'area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione" Provincia di Roma, Roma.

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.

CORAZZA A. (2004 a) – *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, pp. 319-330.

CORAZZA A. (2004 b) – *Censimento dei dissesti dovuti a cavità sotterranee in Italia. La scheda di rilevamento*. 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, pp. 307 – 318.

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1940) - *La stabilità delle cave e cavità sotterranee*. Materie Prime d'Italia, 5, Roma.

DONATO D. ET ALII (1991) - *Studi di Meccanica delle Rocce per l'ottimizzazione di una coltivazione*

a camere e pilastri a debole profondità. La Meccanica delle rocce a piccola profondità, AMS, Torino.

EVANGELISTA A. & PELLEGRINO A. (1988) - *Caratteristiche geotecniche di alcune rocce tenere italiane*. Secondo ciclo di conferenze di meccanica ed Ingegneria delle Rocce, Politecnico di Torino, 1988.

FIORE A. (2006) - *Pericolosità geologica connessa alla presenza di cavità sotterranee. Atto di indirizzo dell'Autorità di Bacino della Puglia*. Periodico di Scienze della Terra dell'Ordine dei Geologi della Puglia, Geologi e Territorio, n. 1/2/3-2006.

GISOTTI G. (1994) - *La stabilità delle gallerie adibite a coltivazione di funghi in via Appia Pignatelli (Roma)*. Rel. 20/09/1994, Roma.

GISOTTI G. (1997) - *La stabilità delle gallerie adibite a coltivazione di funghi in via dell'Almone, 6 (Roma)*. Rel. 14/11/1997, Roma.

LANZINI M. (1995) - *Il problema delle cavità sotterranee a Roma (un rischio geologico)*. SIGEA, Geologia dell'Ambiente, 3, Luglio-Settembre 1995.

LANZINI M., SALUCCI R. (2003) - *Il rischio di crollo per cavità sotterranee*. Professione Geologo (Notiziario dell'Ordine dei Geologi del Lazio), n. 3.

MARTINETTI S. & RIBACCHI R. (1965) - *Osservazioni sul comportamento statico dei pilastri in una cava in sottoterraneo di materiali piroclastici*. Simp. Probl. Geomin. Sardi, Cagliari.

MAZZA R., PAGANELLI D., CAMPOLUNGI M.P.,

CAPELLI G., LANZINI M., SERENI M., DE FILIPPIS L. (2001) - *Rischio di crolli da cavità sotterranee nel settore orientale della Città di Roma*. III Forum Italiano di Scienze della Terra, Geoitalia (5-8 Settembre 2001, Chieti). Abstract in Abstract Book del Congresso.

PELIZZA S. & PEILA D. (1994) - *Riuso di vuoti minerari: una rassegna di esempi internazionali*. GEAM, Dicembre 1994.

PELLEGRINI F.S. (1995) - *Reticoli caveali nel sottosuolo dei centri storici. Proposta di un intervento di studio nell'area del Comune di Roma*. Relazione inedita.

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.

SCIOTTI M. (1984) - *Situazione di rischio, naturali ed indotte, in alcuni centri abitati dell'Italia Centrale. Criteri di intervento*. II Congr. Naz. "La città difficile", Ferrara.

SCIOTTI M. (1999) - *Il sottosuolo delle aree urbane: risorsa o minaccia?* Convegno "Le cavità sotterranee nell'area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione" Provincia di Roma, Roma.

SCIOTTI M. (2001) - *Rischio Cavità Sotterranee nell'area del Comune di Roma*. Amm. Comunale di Roma.

GUIDA AGLI AUTORI: INDICAZIONI PER LA STESURA DEI TESTI

Nell'intento di agevolare gli Autori nella stesura degli articoli per "Geologi e Territorio" si forniscono alcuni orientamenti da seguire nella preparazione dei lavori a stampa. La Segreteria di Redazione è comunque a disposizione di tutti gli interessati per fornire ulteriori chiarimenti ed indicazioni su aspetti e casi particolari non previsti in questa breve nota.

I TESTI devono essere inviati mediante posta elettronica a info@geologipuglia.it completi di allegati (figure, mappe, profili, foto) altrimenti con floppy disk o CD Rom. Il formato deve essere WinWord non formattato. Il carattere deve essere Arial 12, interlinea singola, senza rientri o spaziature a capo dei paragrafi. I testi devono essere continui, e non devono contenere automatismi (ad es. le numerazioni dei paragrafi vanno impostate manualmente), le pagine vanno numerate. Possibilmente le note, se non possono essere eliminate, devono essere a fine testo e non a piè di pagina.

Le IMMAGINI informatizzate vanno inviate in file separati dal testo, preferibilmente nei formati Tif, Jpg o Bmp con risoluzione minima di 300 dpi; per formati diversi contattare prima la Segreteria di Redazione. Diversamente, anche al fine di evitare problemi di risoluzione, foto e immagini possono essere spedite a:

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA PUGLIA via Amendola 168/5 - 70126 Bari.

Le TABELLE, costruite con Word o con Excel, devono essere riportate in file separati dal testo.

Le indicazioni delle FIGURE (per figure si intendono fotografie, diapositive, disegni, profili, grafici, tavole, etc.) inserite nel testo dovranno essere numerate progressivamente.

Le qualifiche dell'Autore o degli Autori, l'Ente di appartenenza verranno indicati in apertura dell'articolo.

La Redazione inserirà come primo autore quello iscritto all'Albo dei geologi della Puglia in ordine alfabetico o secondo indicazioni impartite dagli Autori.

SIMBOLI ed ABBREVIAZIONI poco usati dovranno essere chiaramente definiti nel testo.

Le CITAZIONI BIBLIOGRAFICHE saranno tra parentesi tonde, accompagnate dall'anno di pubblicazione e verranno riportate in Bibliografia alla fine dell'articolo, con il titolo dei lavori citati.

La BIBLIOGRAFIA sarà preparata come illustrata nel seguito, con i vari elementi nell'ordine.

Autore: in maiuscolo, cognome per esteso e per il nome solo la lettera iniziale seguita da un punto. Per più autori intercalare con una virgola. *Data di pubblicazione:* fra parentesi tonda. *Titolo:* in corsivo. *Nome della pubblicazione. Numero del fascicolo.* Oppure, per una monografia: *Editore, luogo dell'edizione.*

La Segreteria di Redazione riterrà accettabile per la stampa solo il materiale iconografico di alta qualità.

La Segreteria di Redazione