

Problemi di stabilità per le infrastrutture nelle aree interessate da cavità (occhi pollini) nei sedimenti pleistocenici della pianura lombarda

Stability problem for infrastructure in the areas interested by cavities (occhi pollini) in the Pleistocenes sediments in the Lombardy plain (Italy)

LORENZO C. (*), CONSONNI M. (*),
COLOMBO L. (**), GATTINONI P. (**)

RIASSUNTO - Le cavità sotterranee possono manifestarsi in differenti contesti geo-litologici. Se da una parte esiste una certa esperienza e bibliografia inerente le cavità in roccia (ad esempio nelle rocce calcaree, nelle evaporiti o nei gessi), dall'altra si manifesta sempre più insistentemente la necessità di comprendere e prevedere un fenomeno particolare, legato in gran parte a terreni di natura alluvionale, che comporta svariati problemi alle infrastrutture interrate nell'alta pianura lombarda: i cosiddetti "Occhi Pollini". STRINI (2004) ha per primo riconosciuto e schematizzato la natura di questa cavità, mettendo in luce la loro stretta connessione con la struttura geologica e idrogeologica, nonché con la presenza di elementi antropici (ad esempio la presenza di pozzi perdenti). Studi precedenti (DELLA ROSSA *et alii*, 2003) hanno affrontato il tema degli occhi pollini con una combinazione di approcci: dalle prove penetrometriche all'analisi dello stato di alterazione, tenendo conto anche dei parametri geomeccanici e dei moti di filtrazione della falda (gradienti critici). Tale studio, seppure preliminare e prevalentemente teorico, poiché i dati di sottosuolo erano limitati, ha comunque permesso di individuare importanti relazioni tra alcuni parametri geotecnici e la presenza di zone a bassa resistenza nel territorio Monzese.

Il presente studio, grazie alla disponibilità di una buona mole di dati di sottosuolo distribuiti su un'estesa area interessata dal fenomeno degli occhi pollini, mira ad individuare quali siano gli indicatori/parametri geo-litologici e geotecnici utili per l'identificazione delle aree più suscettibili alla formazione di cavità nelle alluvioni o negli strati superficiali più alterati delle rocce sottostanti.

La disponibilità di dati tecnici, raccolti in modo organico e sistematico su un'estesa fascia di territorio e non più isolati

e circoscritti a livello di singole opere/abitazioni, nasce dalla collaborazione nella progettazione di una importante infrastruttura viaria lombarda. L'interesse applicativo dello studio deriva dalle importanti difficoltà progettuali e costruttive che possono derivare dall'intercettazione di queste cavità, rendendo di fatto indispensabile la loro preventiva individuazione (tramite opportune indagini geognostiche), nonché la previsione del comportamento tensio-deformativo del sistema opera-terreno.

A questo scopo, attraverso l'analisi di diversi parametri, sia qualitativi che quantitativi, si è cercato di sperimentare un metodo che consenta di valutare a scala di progetto le zone più suscettibili alla presenza di Occhi Pollini e il relativo rischio per le infrastrutture. Tra i parametri qualitativi si sono analizzate le frequenze di accadimento relative a determinate successioni litologiche, alla granulometria e allo stato di alterazione dei ciottoli; tra quelli quantitativi si sono esaminati parametri geotecnici e geofisici (ad es. numero di colpi SPT e NCPT, modulo di Young, risultati delle prove Los Angeles, resistività dei terreni).

Nella presente nota, dopo un breve inquadramento del fenomeno in esame e dell'opera in progetto, si illustreranno le correlazioni esistenti tra i parametri esaminati e il fenomeno geologico reale, con l'obiettivo ultimo di suggerire un approccio al problema, che permetta di razionalizzare ed ottimizzare risorse e sforzi volti a garantire la sicurezza per il personale in cantiere e l'esercizio dell'infrastruttura nel tempo.

PAROLE CHIAVE: Occhi pollini, erosione sotterranea, cavità sotterranee, indagini geognostiche, indagini geofisiche

(*) Tethys Srl, Milano, Viale Lombardia 11, 20131 Milano - Italy

(**) Politecnico di Milano - D.I.C.A., Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Pza Leonardo da Vinci 32, Milano - Italy

ABSTRACT – Underground cavities can develop in different geo-lithological settings. In fact, a huge number of experiences referred to rock cavities (i.e. in limestone, in evaporites or in gypsum) are reported worldwide. On the other hand, the need to understand and forecast the phenomenon is of chief importance in the Upper Lombardy Alluvial Plain, where many infrastructures are under construction. The aim of this work is to underline some parameters or indicators which allow to forecast, and therefore prevent, the most important geo-lithological and geotechnical conditions that are likely to favour the formation of cavities in the alluvial deposits or in the upper and weathered bedrock layers.

Indeed it is the first time that a good number of data are available in a wide area and not only in a little portion of a territory (the phenomenon was mainly known for individual buildings' concerns). Moreover, the available technical data are systematic (both continuous and discrete data are available) and are finely spatially distributed.

Actually, during design of a main road in the Lombardy Plain a huge number of data have been required in order to find a useful method to forecast and quantify the underground cavities' occurrence in areas nearby the city of Milan.

The importance of this work regards designing and building issues, occurring when the infrastructure actually intersects cavities. Their identification through geognostical surveys and the assessment of the stress-strain behaviour nearby the cavities in underground is essential.

For this purpose, a statistical analysis was carried out over the geotechnical parameters, in order to deliver an experimental method capable of "Occhi Pollini" hazard areas identification, in the designing phase of a big infrastructure.

A sensitivity analysis was also done on the qualitative parameters: some lithological sequences show an increasing frequency of cavities with a superposition of alluvial carbonatized matrices and weathered conglomerates. Moreover, by evaluating geotechnical and geophysical parameters, a correlation was found between cavities occurrence and these parameters (SPT and NCPT surveys, Young modulus).

The study shows the existing correlation between some typical geognostic parameters and the phenomenon under exam. The probability density function for the SPT parameter shows a very strong response with soil stress release whereas on the other hand, hydraulic conductivity was only poorly correlated while load modulus showed a moderate correlation.

KEY WORDS: Sinkholes, subterranean erosion, underground cavities, geognostic surveys, geophysical surveys

1. - BREVE CENNO ALL'ATTIVITÀ CONDOTTA PER IL PROGETTO STRADALE

Il progetto stradale oggetto di studio copre una lunghezza di circa 67 km di cui circa la metà risultano in trincea, 11 km in galleria artificiale e 3 km in galleria naturale. Risulta per tale motivo di grande importanza, durante la fase di progetto definitivo ed esecutivo dell'opera, avere una buona informazione circa le caratteristiche del sottosuolo e in particolare dell'esistenza di possibili aree de-tensionate o addirittura cavità sotterranee. L'opera stradale risulta molto complessa, dal momento che occupa più di 10 km² di territorio ed è realizzata da più di 100 società. L'impatto sul territorio del

progetto stradale risulta elevato: si stima infatti che circa 86.000 veicoli possano percorrere l'intero tracciato ogni giorno e circa 100.000 persone possano essere direttamente interessate dalla fase di espropri.

2. - DESCRIZIONE DEL FENOMENO DEGLI "OCCHI POLLINI"

2.1. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO-IDROGEOLOGICO

L'area oggetto del presente studio si trova al limite meridionale dell'alta pianura padana, ed è caratterizzata dal punto di vista litologico dalla presenza di depositi fluvio-glaciali appartenenti all'Allogruppo di Besnate (Pleistocene medio - superiore) e all'Allogruppo di Binago (Pleistocene medio) costituiti in prevalenza da ghiaie e sabbie, localmente a supporto di matrice, con grado di alterazione da moderato a medio. Nel sottosuolo, le perforazioni geognostiche hanno messo in luce la presenza di conglomerati con caratteristiche affini al "Ceppo Auct." dal quale risultano pressoché indistinguibili se non per particolari scarsamente significativi ai fini pratici ("Conglomerati di incerta attribuzione"). Tali conglomerati presentano caratteristiche litotecniche generalmente buone che possono tuttavia risultare più scadenti in corrispondenza di zone fratturate e/o alterate o soggette a dissoluzione della componente carbonatica. Questa può essere così accentuata da lasciare spazio alla genesi di cavità sotterranee estese e ramificate, note come "occhi pollini", che si possono spingere fino oltre i 10 m di profondità.

I piezometri realizzati nelle varie fasi di indagine, hanno evidenziato la presenza della falda acquifera a profondità variabili tra 30 e 40 m da p.c. Il particolare quadro litostratigrafico caratterizzato frequentemente, nei primi 10 - 20 metri dal piano campagna, da lenti argillose e/o limose argillose più o meno estese ed inglobate entro depositi incoerenti permeabili, può dar luogo localmente a particolari sistemi idrogeologici, di limitata estensione, con acquiferi sospesi per cui la falda assume carattere locale e temporaneo.

2.2. - ORIGINE DELLE CAVITÀ

Gli occhi pollini si presentano generalmente come cavità del sottosuolo che, sulla base delle attuali conoscenze, risulterebbero dalla dissoluzione della componente carbonatica dei depositi alluvionali, e dall'asportazione di particelle fini da parte delle acque circolanti nel sottosuolo (CALDARA *et alii*, 1988; TOGNINI, 1999). Il fenomeno (*piping*, suffosione, erosione sotterranea) ampiamente de-

scritto in Strini (2004), che può portare a frane lungo le ripe di corsi d'acqua o delle strade e a cedimenti di edifici, si innesca in presenza di particolari condizioni geologiche legate alla morfologia, granulometria, composizione litologica, storia geologica e climatica ed è particolarmente diffuso nell'Alta Pianura Lombarda, in particolare in Brianza (fig. 1). Le cavità in sedimenti non cementati che si trovano a contatto con un sottostante sub-strato carsificato sono diffuse in molte parti del mondo ed esiste una fiorente letteratura a riguardo (KHOMENKO V.P. 2006, DURGIN P. 1984, KAUFMANN, 2000).

Gli occhi pollini si rinvengono tipicamente all'interno dei depositi fluvioglaciali con elevato

grado di alterazione appartenenti all'Allogruppo di Binago (Riss Auct.) e all'Allogruppo del Bozzente (Mindel Auct.), ma localmente possono presentarsi anche all'interno di unità più recenti (Allogruppo di Besnate). Sono localizzati normalmente al di sopra della falda acquifera, a profondità variabili da pochi decimetri fino a 10-20 m. La loro origine in questo caso è legata a processi di piping, mentre la frazione argillosa derivante dall'alterazione fornisce la coesione necessaria al mantenimento della cavità. Molto diffuse anche le cavità in conglomerato (Ceppo Auct.), dove il limo e l'argilla vengono asportati insieme a una parte del cemento carbonatico. Le cavità, che singolarmente possono avere dimensioni di diversi metri cubi, possono essere interpretate come un sistema di vuoti interconnessi lungo i quali l'acqua si sposta fino a un recapito che può consistere nella falda o in una risorgenza o in un corpo idrico superficiale (figg. 2, 3). Questo schema di circolazione è emerso in seguito all'analisi delle prospezioni geognostiche eseguite in sede progettuale, e non risultava in precedenza noto se non in termini generali. Il reperimento di questo complesso sistema di cavità si distingue infatti soprattutto per la profondità da esse raggiunta (fino a circa 30 m in alcuni casi) e per la sua grande estensione.

La presenza degli Occhi Pollini nel sottosuolo viene generalmente rilevata grazie alla scarsa resistenza all'avanzamento delle sonde penetrometriche, dato che solitamente le cavità sono distinguibili per una resistenza nulla o quasi nulla. Si nota frequentemente che anche al disopra delle cavità i terreni presentano cadute di resistenza, fino quasi alla superficie, producendo importanti fenomeni di detensionamento anche a diversi metri di distanza dai vuoti stessi.

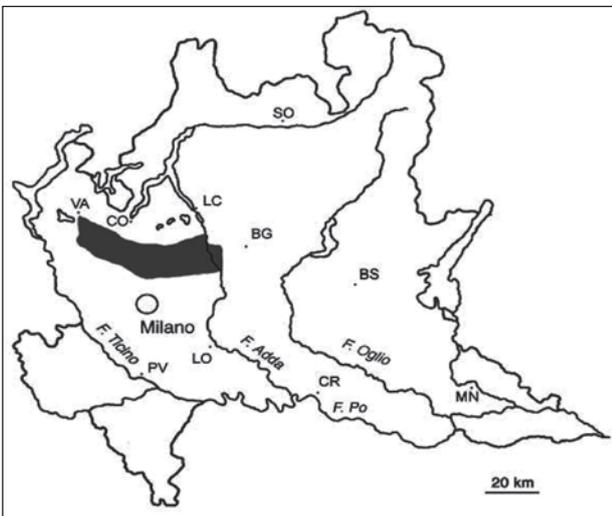


Fig. 1 – L'area di maggiore diffusione è l'area in grigio (da STRINI, 2004).
- The main diffusion area is represented with grey color (STRINI, 2004).

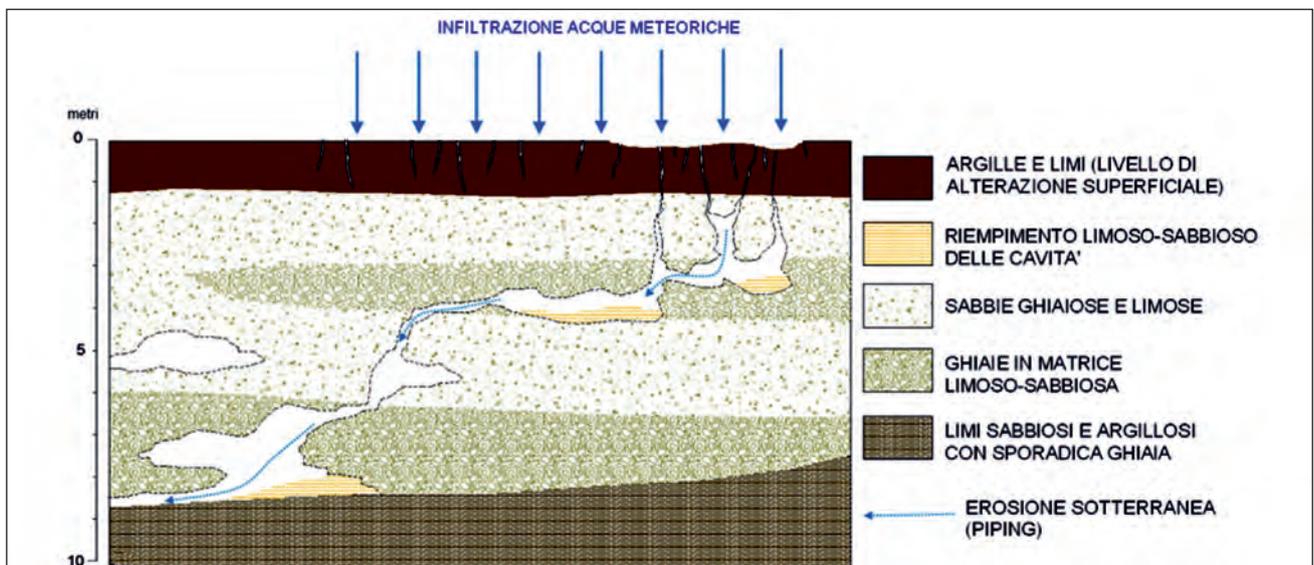


Fig. 2 – Rappresentazione schematica in sezione di gallerie e cavità (occhi pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea ad opera delle acque di infiltrazione.
- Schematic cross-section representing underground pipes and cavities generated by subterranean erosion due to rainfall infiltration in the study area.

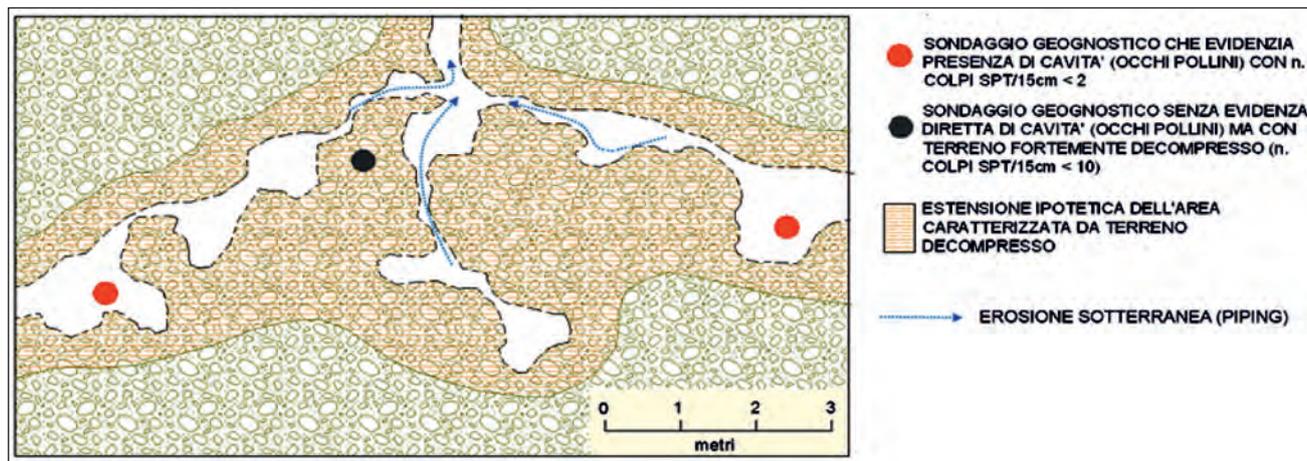


Fig. 3 – Rappresentazione schematica in pianta di una rete di cavità (occhi pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea ad opera delle acque di infiltrazione, che determinano la formazione di una fascia di decompressione dei terreni circostanti (retina).
- Schematic plain view of a cavity network and its surrounding area, characterized by stress-release.

3. - PARAMETRI GEOLOGICO-TECNICI E GEOFISICI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE ANOMALIE NEL SOTTOSUOLO

L'area oggetto del presente studio comprende un tratto della lunghezza di circa 10 km che si sviluppa lungo l'asse principale dell'opera stradale in progetto. In tale tratto il progetto stradale prevede la presenza di importanti opere quali gallerie artificiali e cavalcavia con fondazioni su pali fino a profondità di 30 m dal piano campagna. La possibile esistenza di cavità nel sottosuolo interferenti con le opere di fondazione pone importanti problematiche sia in fase di progettazione che di cantierizzazione/realizzazione, oltre che durante le successive fasi di esercizio dell'infrastruttura stessa.

Per tali ragioni, al fine di individuare le aree maggiormente soggette al rischio di occhi pollini è stata svolta un'indagine che ha comportato l'esame sinottico di dati provenienti da diverse indagini, al fine di compensare le lacune e le incertezze che le differenti tecniche presentano se non ne vengono tra di loro integrate. Le indagini svolte comprendono infatti sia dati geognostici puntuali (geologico-stratigrafici, geotecnici) che continui (prospezioni geofisiche).

Le informazioni disponibili sono state messe a sistema al fine di inquadrare il fenomeno dell'erosione sotterranea, che si può manifestare in forma leggermente differente nei terreni incoerenti (occhi pollini) e nei conglomerati (occhi pollini e cavità vucolari), distinguendo nelle valutazioni effettuate l'occorrenza di tali fenomeni negli orizzonti lapidei o nei terreni, al fine di sostenere al meglio le scelte dei progettisti.

Avendo infatti avuto a disposizione un numero di dati superiore ad altri casi di studio relativi agli Occhi Pollini, si è tentato di scoprire se esista:

- Un parametro geotecnico comunemente utilizzato in fase di progettazione fortemente correlato con la presenza di cavità o terreni detensionati;
- una relazione evidente tra dati puntuali e continui, nell'ottica di usare i primi quali segnali precursori che permettano, attraverso il successivo utilizzo di dati geofisici, la delimitazione areale delle cavità.

3.1. - INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE

I dati disponibili, raccolti durante le fasi progettuali dell'opera stradale (progetto definitivo e progetto esecutivo) comprendono in totale n. 87 sondaggi geognostici a carotaggio continuo in corrispondenza dei quali sono state eseguite prove geotecniche in sito (prove pressiometriche Menard e prove SPT in foro), indagini sismiche (*down hole* – MASW - sismica a rifrazione) e prove di permeabilità in foro (LEFRANC & LUGEON).

L'esame dei dati ottenuti dalle indagini sopraccitate ha evidenziato quanto segue:

- Nel tratto considerato i sondaggi geognostici hanno individuato la presenza di 12 cavità (tab. 1 e fig. 4) localizzate a profondità variabili tra un minimo di 3 m e un massimo di 28 m da piano campagna. Le cavità sono generalmente rinvenute in aree caratterizzate dalla presenza a piccola profondità (<20 m da p.c.) di conglomerati molto alterati e in cui è presente a breve distanza un recapito per le acque di infiltrazione responsabili del fenomeno (la falda acquifera in questo caso). Le stratigrafie evidenziano che quasi sempre le cavità non sono vuote ma presentano un riempimento limoso-argilloso con bassissimo grado di addensamento, talora con sabbia e sporadica ghiaia.

- I risultati delle prove SPT hanno evidenziato, nell'intorno delle cavità individuate dai sondaggi,

Tab. 1 - *Cavità rinvenute lungo l'asse stradale nel tratto considerato.*
 - *Cavities found along the considered road section.*

SONDAGGIO	KM	PROFONDITÀ CAVITÀ (m da p.c.)	DESCRIZIONE
XX09	2+775	9-11.5	Cavità in ghiaie sabbioso-limose alterate
XX38	6+275	6.5/10.5	Cavità in ghiaia sabbioso-limosa, con riempimento
XX39	6+275	13.5-20	Cavità in conglomerato alterato e degradato, riempimento di limo sabbioso-argilloso con bas- sissimo grado di addensamento
XX40		13.5-19	Cavità in conglomerato alterato e degradato, riempimento di limo sabbioso-argilloso con bas- sissimo grado di addensamento
XX10	6+850	9-15	Cavità in ghiaie in matrice sabbioso-limosa
XX43	6+875	9-12	Cavità in ghiaia sabbioso-limosa
XX10bis	7+075	7.5-13	Cavità all'interno di sabbia con limo ghiaiosa e ghiaia in matrice sabbioso-limosa
XX47	7+425	18-28	Cavità in conglomerato debolmente cementato, riempimento limoso-argilloso con bassissimo grado di addensamento
XX49	7+800	3-17.8	Cavità in ghiaie con interlivelli conglomeratici, riempimento sabbioso-limoso con ghiaia a clasti molto alterati
XX50	8+075	12.5-18	Cavità in sabbie limoso-ghiaiose con livelli con- glomeratici, riempimento sabbioso-limoso con ghiaia e livelli decimetrici di argilla
XX51	8+400	6-15	Cavità in ghiaia sabbioso-limosa
XX56	9+550	15.17.2	n. colpi SPT=1 in sabbia limoso-argillosa



Fig. 4 – Cavità (occhi pollini) individuati durante la perforazione dei sondaggi geognostici.
 - *Cavities ("Occhi pollini") found during borehole drillings.*

la presenza di zone con estensione variabile caratterizzate da basso n° colpi/15 cm rispetto alle aree circostanti con litologia simile. La rimozione di porzioni di terreno determinati dai processi di erosione sotterranea (suffosione) causa infatti un cambiamento nel campo di tensioni geostatiche nel terreno con la formazione di una zona “detensionata” di dimensione variabile. La presenza di tali

zone “detensionate” nelle aree circostanti la cavità può influenzare in modo significativo il comportamento del terreno sia dal punto di vista meccanico che idraulico (COLOMBO L. *et alii*, 2014). Nella letteratura specialistica sono descritti fenomeni analoghi osservati negli ammassi rocciosi in corrispondenza di scavi in sotterraneo (PAN Y. & CHEN Y., 1990; ZHANG C. *et alii*, 2010).

3.2. - INDAGINI GEOFISICHE

Le informazioni puntuali derivanti dai sondaggi geognostici, pur consentendo di individuare la presenza di cavità, non permettono di determinarne l'estensione e il volume, parametri che risultano di primaria importanza ai fini pratici per la progettazione e l'esecuzione delle opere infrastrutturali, nonché per il dimensionamento degli eventuali interventi di bonifica/consolidamento delle cavità stesse e dei terreni detensionati circostanti.

Al fine di colmare la lacuna informativa inerente le cavità sotterranee, potenzialmente ubicate anche nelle aree tra i sondaggi effettuati in fase di progettazione (aventi una distanza relativa mediamente pari a 50 m), e dunque non ancora individuate, è stato predisposto un piano di indagini geofisiche estese alle porzioni considerate maggiormente critiche per la presenza di condizioni geologiche particolari e l'esistenza contemporanea nel progetto di opere d'arte importanti. Le indagini constano di 42 stendimenti geoelettrici con lunghezza variabile tra 100 e 280 m e sono state eseguite dalla società Akron s.r.l., con il contributo di supervisore, nella fase di interpretazione dei dati, del dott. Roberto De Franco del CNR-IDPA di Milano).

Si è cercato, attraverso opportune analisi incrociate di dati geotecnici e geologici con quelli geofisici, di produrre un quadro sintetico di riferimento, riportato nella tabella 2:

Tab. 2 - *Significato geologico possibile degli intervalli di resistività elettrica per le aree oggetto di studio.*

- Geo-lithological interpretation of resistivity range values in the studied area.

RESISTIVITÀ ELETTRICA (ohm*m)	DESCRIZIONE
0-150	Limi sabbiosi e limi argillosi. Possibili aree interessate dalla presenza di cavità riempite di materiale prevalentemente limoso-argilloso o limoso-sabbioso
150-250	Possibili aree interessate da fenomeni di erosione sotterranea caratterizzate dalla presenza di detensionamenti e materiale fine, circostanti le cavità principali
250-500	Ghiaie e sabbie insature
500-700	Ghiaie detensionate con alto/elevato indice dei vuoti
700-900	Conglomerati alterati/degradati e vacuolari
900-1500	Conglomerati alterati/degradati con elevata percentuale di vuoti e scavarnamenti
1500-3000	Conglomerati ben cementati
3000-5000	Possibile cavità vuota all'interno di conglomerati
>5000	

In figura 5 si riportano a titolo di esempio i risultati, espressi come resistività apparente in $ohm \times m$, di 4 sezioni geoelettriche sovrapposte alla sezione geologica eseguita lungo il tracciato dell'infrastruttura in progetto.

È possibile identificare una buona correlazione tra valori di resistività e unità litologiche, in particolare l'unità dei "Conglomerati di incerta attribuzione", più antica e caratterizzata da un elevato grado di alterazione dei clasti, presenta generalmente valori di resistività sensibilmente inferiori rispetto ai soprastanti e più recenti depositi ghiaioso-sabbiosi appartenenti all'Allogruppo di Binago e all'Allogruppo di Besnate. I valori di resistività risultanti dalle prospezioni geoelettriche potrebbero quindi essere utilizzati come parametro indice per identificare e delimitare le aree caratterizzate dalla presenza dei terreni maggiormente alterati e degradati, all'interno dei quali i fenomeni di erosione sotterranea, precursori della formazione di cavità e detensionamenti, appaiono maggiormente frequenti.

3.3. - ANALISI STATISTICA DEI PARAMETRI DIRETTI ED INDIRETTI LUNGO L'ASSE STRADALE: APPROCCIO PREVISIONALE PER L'INDIVIDUAZIONE DEGLI OCCHI POLLINI

Nell'ottica di individuare quali possano essere i parametri geotecnici puntuali che evidenzino meglio la presenza di fenomeni erosivi sotterranei nelle immediate vicinanze, o che possano essere messi in relazione ad indagini indirette dallo sviluppo continuo, più adatte a valutare possibili interferenze con le infrastrutture viarie, si è cercato, attraverso un approccio statistico, di individuare le maggiori correlazioni esistenti tra fenomeno rilevato e valore dei parametri. Durante la raccolta dati tipica delle fasi progettuali (progetto definitivo ed esecutivo) sono state eseguite le indagini citate nei capitoli precedenti. Dall'esame dei dati raccolti si è evinta la fortissima correlazione esistente tra i risultati delle prove penetrometriche e la distribuzione delle cavità e delle zone di terreno detensionato prossime agli Occhi Pollini stessi. Pertanto tale parametro è stato usato come riferimento per confronto con gli altri dati disponibili.

3.3.1. - *Analisi di frequenza e distribuzione di probabilità*

Per ogni tratto omogeneo dell'infrastruttura, in particolare trincee e gallerie, sono stati esaminati i dati delle indagini penetrometriche, suddividendo il risultato per classi di profondità, dal momento che il fenomeno si verifica tendenzialmente in settori ben definiti del sottosuolo, importanti da determinare in fase progettuale, al fine di predisporre

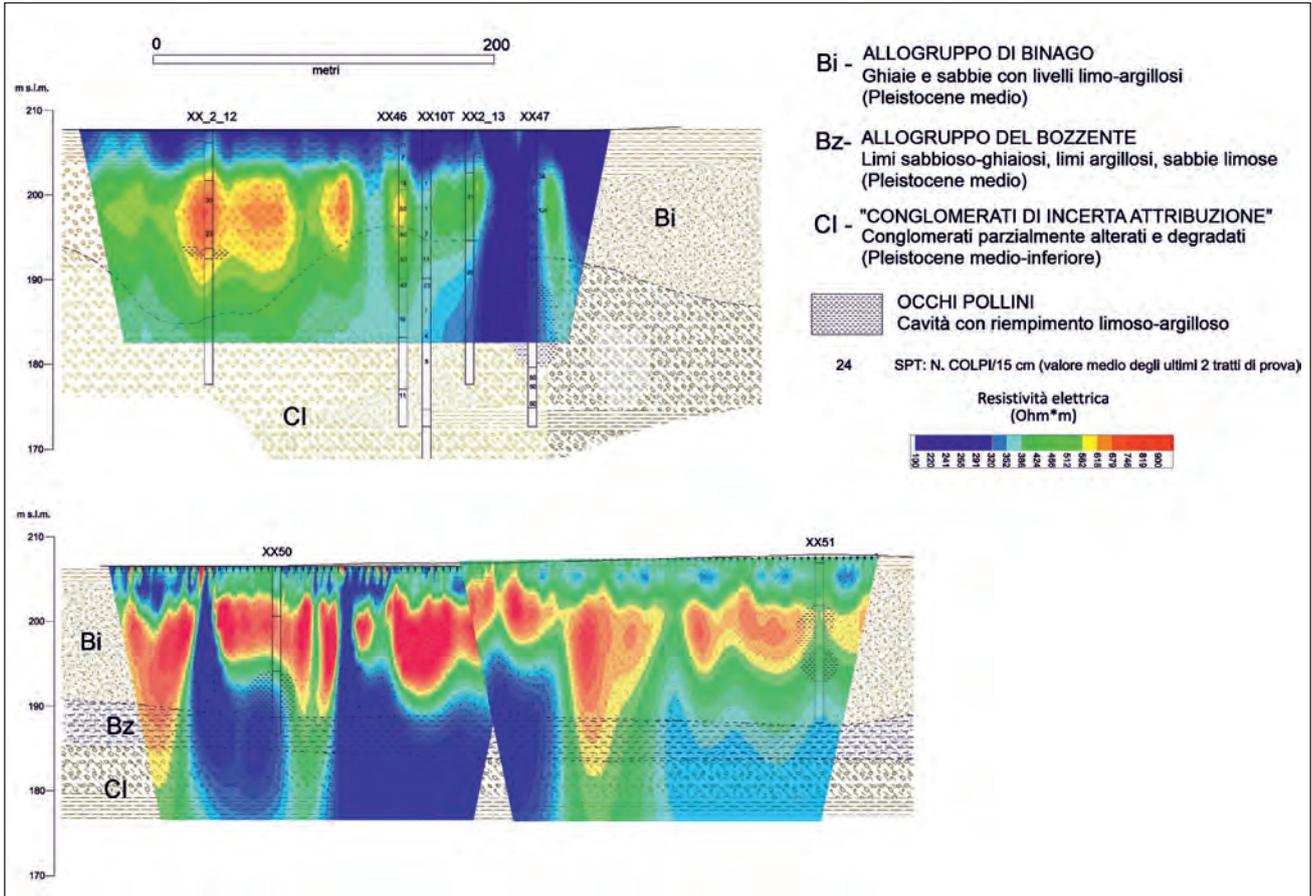


Fig. 5 – Sovrapposizione tra sezione geologica e sezioni geoelettriche.
 - Superposition between geo-electrical and geological cross-sections.

adeguate misure di mitigazione del fenomeno. Di seguito viene riportata la tabella 3 che indica le progressive relative al tratto in esame e la massima profondità raggiunta, considerando anche le fondazioni delle opere che possono interferire con le cavità sotterranee.

Per ogni tratto si è dunque calcolata la frequenza relativa al numero di colpi relativo alle prove penetrometriche in base alla profondità; ciò ha permesso di individuare anche la distribuzione della probabilità di accadimento, per ogni tratto, di un determinato valore di SPT. Il confronto dei grafici permette, già in fase progettuale, di evidenziare quale tratto di viabilità possa essere maggiormente esposto alla presenza di occhi pollini o aree detensionate. I risultati dell'analisi statistica sono rappresentati nella figura 6.

Si può osservare immediatamente come dal confronto delle varie distribuzioni di probabilità per singolo tratto dell'infrastruttura si possano evincere le condizioni geologiche maggiormente critiche. In particolare si osserva come per alcuni tratti vi siano frequenze elevate per valori di SPT bassi (<10), con conseguente distribuzione di probabilità spostata verso sinistra. L'ampiezza della

curva determina invece la varietà di valori presenti nel set di dati, mentre la posizione identifica la qualità dei materiali, crescenti all'aumentare dell'asse delle ascisse.

Nel caso in esame, le gallerie 2, 3 e, soprattutto, 4, sono quelle in cui i parametri geotecnici appaiono nel complesso più scadenti, come confermato dai sondaggi litostratigrafici e da altri indicatori geotecnici.

3.3.2. - Correlazione tra SPT e altri parametri

Al fine di valutare altri parametri rappresentativi del sottosuolo ed il loro legame con aree caratterizzate dalla presenza di terreni detensionati, si sono passati in rassegna i dati disponibili da PD e PE al fine di determinarne la relazione con le SPT, fortemente correlate alla presenza delle cavità nel sottosuolo.

Data la scarsità di dati associabili in base all'ubicazione relativa tra indagine penetrometrica ed altre prospezioni, si ritiene che i risultati possano solo fornire un'indicazione di massima circa la rappresentatività dei parametri al fine di essere considerati potenziali precursori della presenza di cavità.

Tab. 3 - Tratti di studio della strada (in diversi colori) e sondaggi presenti per ciascuna tratto. Sono indicate anche le informazioni relative alla tipologia di fondazioni.

- Studied road sections (in different colours) and associated boreholes. Information about foundation typologies are further indicated.

SONDAGGIO	DISTANZA PROGRESSIVA (M)	OPERE D'ARTE MAGGIORI	FONDAZIONI
XX05T	283934.61	TRINCEA 1	
XX26	283986.88		
XX06	284179.99		
XX27	284299.98		
XX28	284391.53		
XX07	284494.66	GALLERIA 1	PALI 27 M
XX31	284699.17		
XX32	285012		
XX33	285075.18		
XX35	285174.79		
XX36	285443.74		
XX38	285647.16		
XX39	285725.03		
XX09	285809.46		
XX40	285887		
XX41/41bis	286051.97	GALLERIA 2	PALI 30 M
XX42	286193.35		
XX10	286354.59		
XX43	286420.17		
XX10bis	286610.6		
XX6	286888.46	GALLERIA 3	PALI 17 M
XX10T	286923.75		
XX47/47bis	287008.19	GALLERIA 4	DIRETTE 13 M
XX12 BIS	287108.19		
XX49	287208.19		
XX50	287308.19		
XX51	287408.19		
XX52	287508.19		

A partire dai parametri che in prima analisi (frequenza per classi di profondità) avevano dato un segnale più positivo, sono state valutate le correlazioni (fig. 7) tra:

- Conducibilità idraulica e n° di colpi SPT: si osserva che le due grandezze risultano debolmente e inversamente correlate. Da un lato la bassa correlazione è data dalla scarsità di dati presenti (per la permeabilità del sottosuolo), dall'altra la negatività

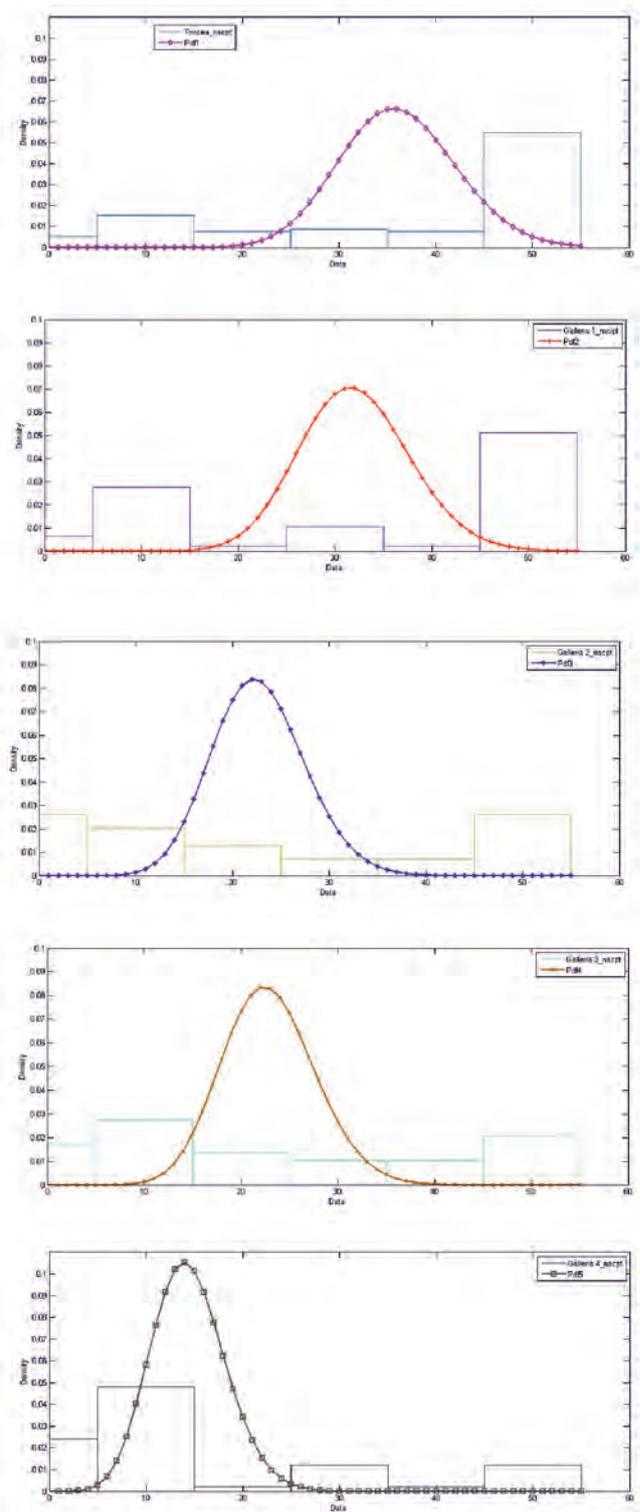


Fig. 6 – Andamento della distribuzione di probabilità nei diversi tratti. I rettangoli rappresentano invece le frequenze relative dei valori di Nsect divisi per classi di ampiezza 10.

- Probability distribution computed in different road sections. The relative frequencies of Nsect values are represented by means of rectangles divided in different classes having constant amplitude (10).

indica una proporzionalità inversa tra le due grandezze. Infatti per valori elevati di K si possono osservare valori bassi di SPT; dato comunque il basso valore dell'indice di correlazione, tale valore non

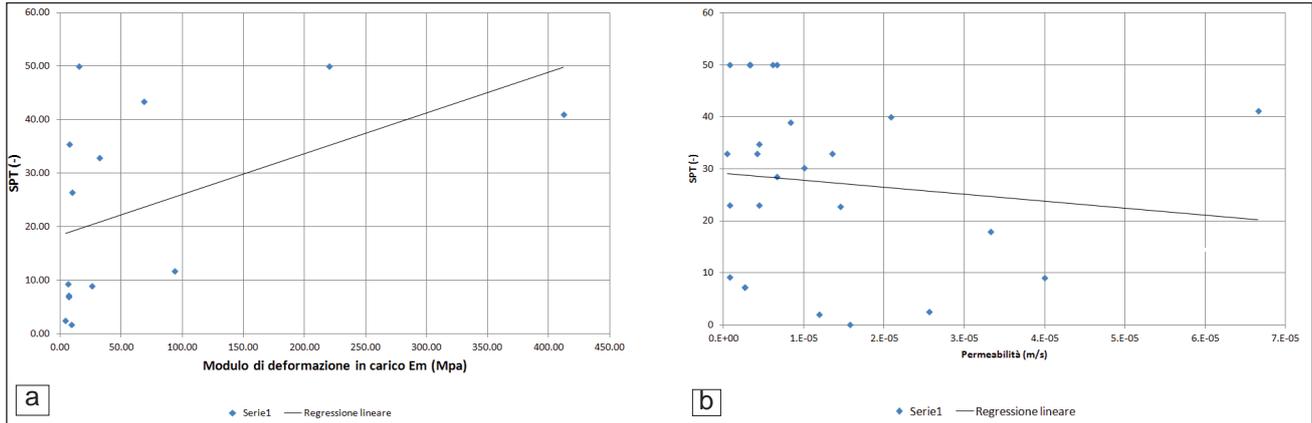


Fig. 7 – Regressioni lineari dei valori di : a) SPT vs K(m/s); b) SPT vs Em (MPa). - Linear regression of values: a) SPT vs K(m/s); b) SPT vs Em(MPa).

può essere considerato di per sé un valido parametro volto ad individuare aree detensionate, in assenza di dati SPT.

- Modulo di deformazione in fase di carico e n° di colpi SPT: si osserva che i due parametri risultano direttamente correlabili, e presentano un indice di correlazione moderato (tab. 4). Anche in questo caso, data la scarsità di dati accoppiabili, si reputa opportuno segnalare il solo valore simbolico del risultato, osservando comunque che il modulo di deformazione potrebbe risultare idoneo al fine di segnalare la presenza di aree detensionate, in particolare in aree caratterizzate dalle condizioni geolitologiche discusse nei capitoli precedenti.

Tab. 4 - Correlazione tra parametri geotecnici puntuali. - Correlation between geotechnical parameters.

	K (m/s)	Em (MPa)
SPT	-0.12	0.48

3.3.3. - Correlazione tra dati puntuali (SPT) e continui (indagini geofisiche)

Un'ulteriore analisi, utile per la progettazione e soprattutto la successiva fase di cantierizzazione, nella quale è necessario individuare la posizione ma soprattutto l'ingombro delle cavità, al fine di rendere sicure le operazioni di cantiere, è quella di ricercare le possibili correlazioni tra parametri geotecnici (di natura puntuale) e parametri geofisici (distribuiti e continui).

A tal riguardo sono stati esaminati i dati delle indagini geoelettriche in corrispondenza dei sondaggi in cui sono state svolte indagini penetrometriche (tab. 5).

Da questa analisi è emerso come vi sia una forte correlazione ($\rho > 0.70$) in sondaggi in cui si riscontra la presenza di occhi pollini (XX46, XX47). In effetti

Tab. 5 - Analisi di correlazione tra parametri puntuali (SPT) e parametri distribuiti (Resistività Ohm m). - Correlation analysis between punctual (SPT) and distributed parameters (resistivity in Ohm*m).

SONDAGGIO	P (SPT/RESISTIVITÀ)
XX46	0.87
XX47	0.87
XX09	0.75
XX38	0.36
XX39	-0.27

in questi sondaggi le stratigrafie e la sezione geologica evidenziano come le resistività più basse (in azzurro/blu) siano legate alla comparsa dell'unità dei "conglomerati di incerta attribuzione", più antica e di conseguenza più alterata. Ad una maggiore alterazione corrisponde quindi una maggiore debolezza dei clasti ed una maggiore presenza di minerali delle argille, da cui derivano SPT e resistività più basse. In questo caso la forte correlazione tra resistività e SPT rappresenta una sorta di validazione indiretta della geofisica, che diventa quindi strumento utile per identificare e delimitare, se non propriamente le cavità, quantomeno le zone a maggiore alterazione e quindi a maggior rischio di rinvenimento di OP. I due sondaggi analizzati ricadono infatti nella WBS Galleria 3 che risulta avere una delle densità di probabilità più prossime a valori bassi di SPT.

Anche il sondaggio XX09 presenta una forte correlazione, seppur meno marcata dei casi precedenti. In tale foro, infatti, non è stato riscontrato un Occhio Pollino, sebbene risulta molto probabile la presenza di una zona detensionata nelle vicinanze, contenente possibili cavità.

Per il sondaggio XX38 (escludendo i primi due metri che risultano legati a strutture antropiche) la correlazione risulta meno marcata ma pur sempre moderata (circa 0.40).

Il sondaggio XX39, al contrario, non sembra denotare alcuna correlazione tra indagini dirette ed indirette, probabilmente a causa dell'ubicazione non idonea del sondaggio rispetto alle linee dello stendimento geofisico.

Sebbene i risultati ottenuti non determinino di per sé un nesso causale tra geofisica e presenza di cavità, perlomeno non così forte quale quello esistente tra cavità/terreni detensionati e indagini penetrometriche, si evidenzia comunque il potenziale contributo che le indagini geofisiche possono fornire nell'integrare le informazioni fornite dalle indagini dirette, nell'ambito di valutazioni quali-quantitative volte ad identificare la presenza di alterazioni delle proprietà geomeccaniche del sottosuolo.

4. - APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER LE INFRASTRUTTURE

La generazione di una mappatura preliminare una volta analizzati i dati litologici e geognostici presenti lungo il tracciato stradale, può essere molto utile in via preliminare al fine di evidenziare il rischio relativo associato alla presenza di cavità sotterranee lungo il tracciato di un'infrastruttura viaria.

La valutazione del rischio relativo all'infrastruttura viaria è stata condotta esaminando 4 parametri fondamentali:

- F—Frequenza di reperimento delle cavità sotterranee (dalle osservazioni dirette dei sondaggi) calcolata a partire dal rapporto tra le lunghezze riferite alle cavità presenti nelle stratigrafie dei sondaggi e la lunghezza complessiva degli stessi, è stato utilizzato il valore percentuale risultante, accorpato in 4 classi con peso crescente (da livello basso a livello medio, da livello medio-alto a livello alto)

- S—Suscettibilità geologica all'esistenza di cavità sotterranee (dall'analisi interpretativa dei dati geognostici e litostratigrafici qualora si presentino condizioni geologiche predisponenti viene associato al reperimento di fenomeni erosivi sotterranei, un peso pari a 2, peso pari ad 1 in tutti gli altri casi).

- O—Presenza delle principali opere d'arte con pesi crescenti come indicato nella tabella 6.

Tab. 6 - *Pesi attribuiti alle principali opere d'arte.*

- Weights assigned to the main infrastructures.

Gallerie	4
Ponti/Cavalcavia	3
Diaframmi	3
Trincee	2
Rilevati	1

- I—Intersezione dell'infrastruttura con le cavità rilevate, espressa mediante pesi che crescono da 1 a 3 in base alla intersezione con opere d'arte da assenti ad importanti.

5. - RISULTATI OTTENUTI

Considerato che la valutazione del Rischio genericamente è data dal prodotto di una pericolosità per una vulnerabilità (esposizione)

$$R=P*E$$

e sapendo che $P=F*S$ ed $E=O*I$, si avrà che

$$R= F*S*O*I$$

I valori di rischio per l'infrastruttura viaria ottenuti sono stati così suddivisi in classi variabili tra bassa (1-5), media (25-50) ed alta (>75). Tali classe sono state mappate dettagliatamente lungo l'asse principale dell'infrastruttura (fig. 8), indicando la criticità esistente per ogni tratto in progetto, dal punto di vista della sorpresa geologica legata alla potenziale esistenza di cavità sotterranee. Tale mappatura può essere utile al progettista, in maniera complementare rispetto a quanto già evidenziato nell'analisi statistica, al fine di ricavare indicazioni continue lungo l'opera di interesse e poter indirizzare adeguatamente investimenti e sforzi verso le aree più critiche.

Accoppiata alla mappatura di rischio, sviluppata essenzialmente in planimetria lungo il tracciato stradale, si è ritenuto utile sviluppare un'elaborazione in sezione verticale, per determinare la suscettibilità del sottosuolo alla presenza di cavità interferenti con strutture interrato. Per tale analisi sono stati utilizzati 5 parametri:

1. prossimità della falda;
2. zone caratterizzate da una forte oscillazione storica della falda;
3. vicinanza con un recapito idrico (fiume, torrente, lago);
4. vicinanza all'unità dei conglomerati;
5. vicinanza al cappellaccio di alterazione del substrato roccioso.

La mappatura mostra per fasce di colori quali siano le zone potenzialmente più soggette alla presenza di cavità sotterranee (in colore rosso nella figura 9).

6. - CONCLUSIONI

La progettazione di una infrastruttura viaria non può prescindere da valutazioni volte a ottimizzare tempi e costi di esecuzione. Per tale motivo, sia durante le fasi iniziali sia durante la stesura dei progetti definitivi ed esecutivi, le indagini geologi-



Fig. 8 – Carta del rischio per l’infrastruttura considerando la presenza di cavità sotterranee sia nei terreni sciolti che nei conglomerati.
 - Risk mapping for the infrastructure, considering cavities presence both in loose soil and conglomerates.

che, geotecniche e geofisiche devono essere opportunamente messe a sistema. In particolare, si possono garantire:

- la sicurezza di macchine ed operatori durante la fase di cantierizzazione; le “sorprese” geologiche possono infatti pregiudicare il normale svolgimento delle attività di cantiere, allungandone i tempi.

- la durata nel tempo dell’infrastruttura: l’accurata stima di qualità dei materiali e anomalie geologiche interferenti con l’opera garantisce la migliore scelta delle tecniche di costruzione stradale.

In particolare, nel presente studio si è dimostrato che, grazie alla disponibilità di dati ben organizzati di buona qualità, è possibile prevedere la distribuzione di cavità nel sottosuolo, potenzialmente pericolose per l’opera in progetto. La possibilità di operare una tale previsione deriva dall’osservazione sperimentale che nell’intorno delle cavità vere e proprie è presente una fascia di terreno, la cui estensione è spesso correlabile al diametro della cavità stessa, caratterizzata da un significativo detensionamento,

con conseguente significativa variazione delle proprietà geomeccaniche.

Per l’individuazione degli Occhi Pollini, risulta quindi di fondamentale utilità la rilevazione delle aree detensionate, dato che tali aree sono più semplici da intercettare durante le indagini rispetto alla cavità stessa. Di conseguenza, a partire dai dati comunemente raccolti in fase di progettazione definitiva ed esecutiva, si è cercato di individuare quali parametri avessero maggiore correlazione con la presenza di cavità o terreni detensionati. Lo studio ha messo in luce l’esistenza di correlazioni tra i parametri esaminati e il fenomeno geologico reale, mostrando che alcuni indicatori geologici e parametri geotecniche risultano maggiormente correlati di altri alla presenza di cavità e/o zone di alterazione (zone “detensionate”). In particolare, tra gli indicatori geologici (con particolare riferimento alla successione litologica) si osserva una maggiore frequenza di cavità in presenza di una sovrapposizione di matrici alluvionali carbonatiche a rocce conglomeratiche caratterizzate da uno strato superficiale fortemente al-

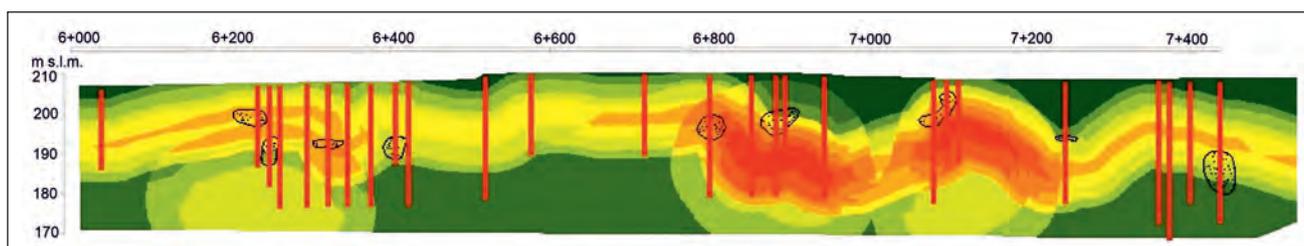


Fig. 9 – Sezione 2D della suscettibilità dei terreni alla presenza di cavità sotterranee.
 - 2D section of soil susceptibility to cavities' occurrence.

terato. Il parametro geotecnico che ha fornito la migliore risposta, oltre a quello qualitativo legato alla successione stratigrafica, è stato quello associato al detensionamento dei terreni rilevabile tramite le prove penetrometriche SPT). Il vantaggio di tale indagine è che permette di individuare con certezza sia le cavità che le zone di debolezza circostanti, ma d'altro canto risulta un dato difficile da utilizzare per delineare la dimensione della cavità individuata, data la natura puntuale dell'indagine (tab. 7).

Tab. 7 - *Vantaggi e svantaggi delle prove dirette e indirette per l'individuazione delle cavità.*

- Advantages and disadvantages of direct and indirect surveys for cavities identification.

INDAGINI	PRO	CONTRO
dirette	- efficaci nell'individuazione delle cavità	- dispendiose in termini di tempo e risorse finanziarie - carattere puntuale
indirette	- continuità spaziale dell'informazione - possono fornire indicazioni di massima circa la possibilità di riscontrare cavità in un terreno	- non risultano esaurienti per individuazione reale

Pertanto si è cercato di determinare se potesse esistere una relazione tra dati diretti e puntuali (dati geognostici) e dati continui ed indiretti (indagini geofisiche), al fine di individuare le cavità nello spazio. I risultati ottenuti evidenziano una relazione diretta piuttosto interessante per più della metà dei sondaggi esaminati, viziata però da un numero di osservazioni troppo limitato. Appare dunque possibile che vi possa essere una relazione nei depositi alluvionali tra determinati valori riferiti alla resistività elettrica evidenziata dalle indagini geoelettriche e l'esistenza di aree detensionate con probabile presenza di cavità. In particolare è emerso che per bassi valori di resistività elettrica sono probabili cavità riempite di materiale limoso-argilloso sotto-consolidato nei depositi alluvionali, mentre per valori molto elevati di resistività elettrica (superiori a 3.000 Ohm*m), sono possibili cavità nei conglomerati esaminati, tendenzialmente di dimensioni superiori a quelli presenti nelle alluvioni.

In base a questi risultati si è cercato di individuare un metodo che, per *step* successivi, possa servire ai progettisti nell'incanalare risorse e sforzi al fine di salvaguardare personale e opere grazie ad una pianificazione preliminare da svolgersi secondo questa scaletta:

1. raccolta di informazioni geognostiche (litostratigrafiche, geotecniche);
2. raccolta di informazioni geofisiche;
3. messa a sistema dei dati, preferibilmente su Sistema Informativo Territoriale;
4. analisi statistica dei parametri geotecnici per singola WBS;
5. generazione di una lista di priorità legata alla sorpresa geologica per singola WBS;
6. redazione di una mappatura di rischio per la presenza di cavità sotterranee;
7. redazione di sezioni per verificare la suscettibilità del sottosuolo alla presenza di fenomeni di erosione sotterranea;
8. progettazione di ulteriori indagini geognostiche e geofisiche sulle WBS individuate maggiormente a rischio;
9. valutazione dell'indice di correlazione tra i parametri geotecnici e indagini geofisiche;
10. rielaborazione delle indagini geofisiche per l'individuazione delle cavità;

Quand'anche non fosse possibile effettuare ogni passaggio sopra riportato, per una adeguata razionalizzazione del problema si consiglia di eseguire perlomeno i punti dall'1 al 7, al fine di approssimare in modo completo il problema legato alla presenza di cavità sotterranee nelle alluvioni interferenti con infrastrutture viarie.

BIBLIOGRAFIA

- COLOMBO L., FRANCANI V. & GATTINONI P. (2014) - *Suffosion hazard for building and infrastructure in the Upper Lombardy Plain*. 14th International Multidisciplinary Scientific GeConference SGEM 2014, Bulgaria.
- DELLA ROSSA M.C., FRANCANI V. & GATTINONI P. (2003) - *Studio idrogeologico del territorio monzese: individuazione e caratterizzazione delle zone a bassa resistenza*. Quaderni di Geologia Applicata, 10-2 (2003).
- PAN Y. & CHEN Y. (1990) - *Plastic Zones and Characteristics-line Families for Openings in Elasto-plastic Rock Mass*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 23, 275-292.
- STRINI A. (2004) - *Erosione Sotterranea e sprofondamenti nell'alta pianura Lombarda: gli "Occhi Pollini"*. Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes, pp. 665-675.
- ZHANG C.G., WANG J.F. & ZHAO J. (2010) - *Unified solutions for stresses and displacements around circular tunnels using the Unified Strength Theory*. Science China, 53, No.6: 1694-1699.