

I FENOMENI DI SINKHOLE COME ELEMENTO DI RISCHIO LUNGO LE GRANDI ARTERIE STRADALI

ALBANESE GIOVANNI*, **CAPELLI GIUSEPPE****, **FEDERICO PAOLO***, **SALVATI ROBERTO****, **STORONI SERGIO*** & **ZALAFFI MARCELLO****

*ANAS S.p.A.

**Dipartimento Scienze Geologiche, Università Roma TRE

INTRODUZIONE

La Via Appia e la Via Salaria, nel loro tratto laziale, attraversano rispettivamente la Pianura Pontina e la Piana di San Vittorino, due aree storicamente soggette al rischio di sprofondamenti improvvisi del suolo.

E' ormai conoscenza acquisita che la potenziale presenza di tali fenomeni rappresenti di fatto un grosso problema nella gestione delle infrastrutture localizzate nel territorio (siano esse aree edificate, aree industriali o vie di comunicazione), anche a causa della difficile localizzazione e previsione degli stessi.

L'ANAS S.p.A., ente gestore delle due importanti arterie stradali, sin dal 1999 ha pertanto avviato, nell'ambito di una più vasta collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra di Roma Tre, un programma di studio del rischio sinkhole lungo i tratti stradali citati, finalizzati alla maggiore conoscenza del fenomeno ed alla sua mappatura.

Si ricorda brevemente che in termini economici il Rischio è definibile come la possibilità di perdita di proprietà o di funzionalità delle strutture in genere a causa di un determinato evento. La stima quantitativa del Rischio può quindi essere definita con la seguente relazione:

Rischio = Pericolosità x Vulnerabilità x Esposizione

dove:

Pericolosità = probabilità che si verifichi in un dato luogo o entro un certo periodo di tempo un evento capace di causare danni;

Vulnerabilità = predisposizione da parte di persone, beni o attività a subire danni o modificazioni in seguito all'evento;

Esposizione = dislocazione, consistenza, qualità e valore dei beni e delle attività presenti nell'area e che possono essere influenzate direttamente o indirettamente dall'evento.

La collaborazione instaurata con il Dipartimento di Scienze della Terra si è al momento concretizzata nell'esecuzione di un sondaggio a carotaggio continuo spinto fino alla profondità di circa 190 m nei pressi del Km 65 + 750 della Via Appia che ha permesso di acquisire importanti dati geologici, geotecnici ed idrogeologici sulla sequenza dei terreni di copertura del bedrock carbonatico, fondamentali ai fini della comprensione dell'inesco di un sinkhole e quindi della definizione successiva di pericolosità dell'area.

Inoltre vengono illustrati anche i risultati delle indagini eseguite nella Piana di San Vittorino che hanno permesso di identificare, anche in questa zona, sequenze litologiche ritenute a rischio.

1. AREA PONTINA

1.1. ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE DELLA PIANURA PONTINA

Nella Pianura Pontina la natura del sottosuolo può essere ricostruita utilizzando i dati geofisici (Capelli G. & Salvati R. 2002, Compagnia Mediterranea Prospezioni 1968, Di Filippo M. & Toro B. 1980) e le stratigrafie di numerose perforazioni (Barbieri M. 1999, Mouton J. 1973).

Lungo il margine nord-orientale della pianura si individua chiaramente un settore della struttura carbonatica lepino-ausona, debolmente ribassato e coperto da depositi quaternari recenti. Quest'area marginale della Pianura Pontina è stata oggetto di accurati studi condotti nei decenni passati e nel corso di questa ricerca. Tra i lavori storici si ricorda uno studio geoelettrico (Mouton, 1973) supportato da una campagna di perforazioni, che fornisce un'eccellente ricostruzione di dettaglio dell'andamento del tetto dei calcari.

Dagli elementi raccolti risulta che lungo la Pianura Pontina si individua un solco profondo apertosi tra il margine della piattaforma lepina e le strutture sepolte più occidentali, formate da depositi in facies di transizione di tipo sabino. Pur mancando prove sicure, si può pensare che il solco sia stato parzialmente colmato da un flysch oligo-miocenico e da depositi caotici di tipo sicilide. Una fase tettonica contemporanea alla deposizione del flysch, costruisce le strutture oggi sepolte lungo la costa e che sembrano estendersi nel Tirreno.

A partire dal Pliocene inferiore una fase tettonica distensiva conferisce alla regione un assetto ad Horst e Graben. Con il riattivarsi delle vecchie linee tettoniche, si riapre gradualmente il solco pontino, con un processo discontinuo probabilmente non ancora del tutto esaurito. In questo periodo il mare ingredisce in gran parte della regione, dove deposita un potente pacco di argille marnose di schietto ambiente pelagico (affioramento di Tor Caldara e sondaggio Foce Verde) che d'altra parte non sono state raggiunte dalle perforazioni eseguite nel settore centrale della depressione pontina.

Il Pliocene medio superiore è ben rappresentato nei sondaggi Foce Verde, Fogliano I, La Guardia, e Pontinia; in quest'ultimo, più prossimo al rilievo lepino, si trova una facie detritico-organogena (Macco) direttamente trasgressiva sul Mesozoico.

Il Calabriano argilloso-sabbioso, si estende con continuità lungo il settore costiero della pianura. Una considerazione particolare merita l'attività vulcanica che ha interessato la regione, soprattutto nella fase più recente della sua evoluzione. Numerosi affioramenti di piroclastiti, disseminati al margine del rilievo lepino e nelle depressioni interne, sono riferibili alla intensa attività vulcanica manifestatasi nell'area albana. Fanno tuttavia eccezione alcuni affioramenti che, per le loro caratteristiche vanno ricollegati ad un vulcanismo periferico, ad attività prevalentemente esplosiva, dovuta a centri di emissione assai prossimi alle aree di affioramento (Abbadia di Valvisciolo, Acquapuzza ecc.).

1.2. Il pericolo Sinkhole

Nella Piana Pontina sono storicamente presenti diverse aree a rischio di sprofondamento catastrofico:

DOGANELLA-VIA NINFINA (Comuni di Sermoneta e Cisterna)

Colpita da un recente sprofondamento (1989), questa zona è comprovatamente impostata su un'area tettonica che per lungo tempo è stata sede di fenomeni sorgivi idrotermali che hanno dato luogo a una serie di depositi travertinosi. Oltre ai banchi principali di travertino, nel sondaggio del 2001, realizzato presso il Centro Anziani di Doganella, sono stati intercettati livelli ritmici di travertino, spessi circa un metro intervallati a sabbie e argille molli (Capelli G. & Salvati R. 2002).

Uno studio geofisico eseguito per il Comune di Cisterna, ubicato a nord della Via Ninfina, ha individuato travertini e depositi terrigeni, nonché una depressione dai margini scoscesi, colmata di sedimenti rimaneggiati (sinkhole?). Dallo studio emergono vari indizi di pericolosità geologica. Le acque dei pozzi controllati risultano sottosature e aggressive Tuccimei et al, in (Capelli G. & Salvati R. 2002). Per quanto risulta dalle stratigrafie disponibili, in alcuni casi i depositi sabbiosi poggiano direttamente sui calcari tettonizzati e carsificati, il cui tetto è posto a circa 140 metri dal piano campagna (Capelli G. & Salvati R. 2002). Verso la zona di Doganella convergono importanti linee di flusso idrico sotterraneo provenienti dal complesso travertinoso di Cisterna e dai Lepini (Boni C. 1988).

1.2.1. Contrada Ciocco – Contrada Talci, San Michele

Questa zona è posta sul proseguimento sepolto della conoide che da Valvisciolo scende verso Contrada Ciocco. La gravimetria indica chiaramente la presenza di una paleovalle che dovrebbe essere in parte colmata da una conoide sepolta (Di Filippo & Toro in (Capelli G. & Salvati R. 2002). La depressione valliva, durante il basso stazionamento del livello marino, doveva essere sede di sorgenti, richiamando i flussi che ai nostri giorni alimentano Ninfa e le Acque Puzze. I processi tettonici e carsici hanno probabilmente prodotto, unitamente a una potente circolazione idrica di tipo termominerale, un'azione di dissoluzione e trasporto non solo nei carbonati, ma anche nei depositi di conoide, determinando in un recente passato i noti sprofondi, ancor oggi visibili tra Valvisciolo e Mola Monticchio, le cui acque, analizzate dagli autori nel 2001, sono risultate sottosature. Nel settembre 2002, nei pressi della chiesa di San Michele si è manifestato un piccolo sprofondamento su un'area di alcune decine di metri.

1.2.2. Gricilli-Mezzaluna-Tenuta Isabella-Cotarda

Questa area, compresa tra il Canale della Selcella, il Fiume Sisto, la Migliara 46 ed il Borgo della Cotarda, costituisce una piccola depressione strutturale, all'interno della quale, anche a seguito delle condizioni idrologiche ed idrogeologiche, si è depositato uno dei maggiori spessori di terre organiche e torbe della Piana Pontina. Sul lato pedemontano a sud del Fiume Uffente, che accresce la propria portata di alcuni metri cubi grazie alla presenza di un enorme flusso idrico, è nota la presenza di manifestazioni sorgive blandamente termominerali con forti venute di gas. Le torbe si associano a livelli di travertino fitoerale e/o lacustre collegati alla deposizione chimica sia delle sorgenti carsiche che idrotermali ubicate nella zona. La presenza di quasi tutti gli indicatori che favoriscono i fenomeni di sprofondamento, rende questa zona pericolosa per il cedimento dei suoli sia nel senso della subsidenza, che dello sprofondamento.

Nella piana sono state individuate altre zone a rischio, dove la situazione sembra meno grave. Queste realtà vengono chiamate "aree di attenzione". Esse si identificano con i toponimi di Casa Affonata e Laghi di Cotronia, entrambe in comune di Cisterna.

Più in generale va detto che esiste una pericolosità estesa, ma non grave, in tutti i settori dove i carbonati soggiacenti, sono direttamente a contatto con formazioni sabbiose prevalentemente poco addensate, se non addirittura sciolte (Chiesa G. 1993, Salvati R. 2004).

1.3. Indagini eseguite

Lo scopo della perforazione e delle indagini geofisiche eseguite è stato quello di ottenere informazioni stratigrafiche, geotecniche ed idrogeologiche dei terreni di copertura presenti al di sopra del substrato carbonatico, che permettano di creare un modello numerico sulla genesi ed innesco del fenomeno, e quello di poter utilizzare successivamente la perforazione per monitorare nel tempo le falde incontrate (Fig. 1).



Fig. 1 - Cantiere Tor Tre Ponti in esecuzione

Le numerose problematiche presenti sono così riassumibili:

- necessità di un sondaggio profondo (circa 200 m) in terreni sciolti o comunque di scarsa consistenza;
- rappresentatività dei materiali estratti;
- necessità di un campionamento indisturbato a diverse profondità;
- presenza di un sistema di falde multistrato nei terreni di copertura e di una falda artesianica nei carbonati;
- necessità di dover mantenere stabile il foro per i monitoraggi successivi e con diametri adeguati alla strumentazione da inserire;
- localizzazione del sondaggio in un'area prossima a quella in cui si era verificato qualche anno addietro uno sprofondamento improvviso durante l'esecuzione di un pozzo.

Esse hanno imposto l'adozione sia di un elevato standard tecnologico, sia la necessità di operare in condizioni di massima sicurezza e, conseguentemente, una accurata progettazione iniziale, che ha condotto alla redazione di un dettagliato capitolato tecnico, che lasciasse però ampio margine di libertà qualora le ipotesi di partenza non fossero risultate compatibili con lo stato di fatto riscontrato in corso d'opera.

1.4. Modalità tecnologiche di esecuzione

Il programma iniziale è stato redatto sulla base delle conoscenze bibliografiche del sito (Chiesa, 1993; Cassa del Mezzogiorno, 1979) e pertanto esso doveva essere inteso come una proposta di lavoro che l'Impresa aggiudicataria doveva fare propria prima dell'inizio dei lavori, rimanendo comunque libera di proporre modifiche e/o integrazioni da concordarsi con la Direzione Lavori.

In linea generale il piano prevedeva le seguenti fasi:

- perforazione a carotaggio continuo con il sistema Wire Line con diametro esterno non inferiore a $f = 125$ mm, e diametro interno $f = 80$ mm fino a -40 m dal p.c.;
- alesatura del foro al diametro $f = 311$ mm (121/4") con fango bentonitico, messa in opera di una tubazione di rivestimento definitiva ($L = 40$ m), con saldatura in opera dei singoli spezzoni di tubazione, rigorosamente coassiali con $f = 244$ mm e spessore $s = 4.5$ mm, calandrata, munita di centratori, flangia terminale superiore e scarpa di cementazione con valvola di non ritorno; cementazione del rivestimento (mediante la testa di cementazione e i tappi) fino al rifluimento della boiaccia;
- ripresa della perforazione a carotaggio continuo fino al tetto dei calcari (profondità prevista inizialmente circa 200 m);
- nuova alesatura del foro (da -40 a -200 m dal p. c. circa) al diametro $f = 229$ mm (9"), messa in opera del rivestimento definitivo ($L = 200$ m circa) con diametro $f = 168.3$ mm e spessore $s = 4.0$ mm saldato in opera, con testa e scarpa di cementazione, centratori (uno ogni 18 m), flangia terminale, cementazione del rivestimento per tutto il suo sviluppo verticale fino al rifluimento della boiaccia in superficie. Ogni cementazione di ciascun tratto delle tubazioni del rivestimento deve essere eseguita categoricamente in un'unica operazione e completata prima che la boiaccia abbia iniziato la presa e diminuito la sua fluidità. La boiaccia doveva avere una densità compresa fra 1.80 e 1.90 t/mc, ottenuta miscelando 1350 kg di cemento Portland 325 (additivato con 2-3% in peso di bentonite) con 600 litri di acqua.

- proseguimento della perforazione, sempre a carotaggio continuo, per altri 3-5 m all'interno dei calcari.

Rispetto al programma iniziale, ci sono state alcune variazioni legate a difficoltà esecutive, sorte in corso d'opera. La prima è consistita nell'approfondimento del 1° rivestimento ($f = 244$ mm) fino a 105 m (all'interno dei depositi pliocenici), dal momento che i terreni presenti alla quota inizialmente prevista di 40 m, erano costituiti da sabbie e ghiaie sciolte e poi da argille tenere poco consistenti e quindi non davano garanzia sulla perfetta cementazione dello stesso. Successivamente è stata ripresa la perforazione che però è stata interrotta a 152 m a causa del bloccaggio della rotazione. A questo inconveniente si è ovviato mettendo in opera il 2° rivestimento ($f = 168.3$ mm) fino a 160 m. Questo problema ha causato la perdita di carotaggio fra le due quote citate (cioè da 152 a 160 m).

Successivamente si è ripresa la perforazione fino a fondo foro (184.7 m). Dal momento che i terreni incontrati (argille e sabbie compatte del Pliocene e calcari del basamento) si sono dimostrati autoportanti, si è deciso di non mettere in opera un 3° rivestimento con diametro inferiore, che avrebbe necessariamente comportato un ulteriore rialesaggio del foro; si è comunque inserito un tubo inox AISI 304 di spessore $s = 3.0$ mm, per una lunghezza totale di 27 m, comprensivi anche del tratto con filtro Johnson all'interno dei calcari.

A quota 172.5 dal p. c. è stata intercettata la falda in pressione con risalita della stessa di un metro oltre il boccapozzo del 2° rivestimento ($f = 168.3$ mm).

Al termine, dopo aver bloccato la risalita della falda tramite packer, si è provveduto alla sistemazione temporanea del boccaforo con una flangia, il tutto inglobato in un pozzetto in calcestruzzo e chiuso in ghisa carrabile.

Successivamente, per poter garantire la perfetta tenuta del pozzo e contestualmente facilitare al massimo le operazioni di monitoraggio della falda profonda, si è provveduto alla sistemazione definitiva del foro mediante la messa in opera di una testa di chiusura in acciaio inox AISI 304, appositamente progettata, con le seguenti caratteristiche:

- una valvola a sfera del diametro di 1 1/2 " (48.3 mm) assicurerà in caso di necessità e comunque almeno una volta l'anno uno spurgo del pozzo almeno per tre ore con lo scopo di rimuovere i sedimenti fini che potrebbero depositarsi nella parte basale del pozzo stesso;
- un trasduttore installato alcuni metri dentro il pozzo invierà ad una centralina di registrazione collocata in superficie, con le sequenze temporali impostate, le altezze piezometriche e le loro variazioni;
- le altezze piezometriche della falda basale potranno essere lette anche attraverso una asta idrometrica installata in superficie unitamente ad un manometro;
- un tubo di piccolo diametro (8x10 mm) in polietilene alimentare andrà ad emungere acqua direttamente dalla profondità di 195 m dal p.c. senza farla passare entro tubazioni in ferro precedentemente installate, consentendo controlli idrochimici e idrobiologici direttamente sulle acque di circolazione profonda;
- un tubicino in polietilene (6x8 mm) assicurerà, per motivi di igiene microbiologica, nell'arco di 2-3 gg, un totale ricambio di acqua entro la tubazione di ferro acciaiolo ($F = 168$ mm) con un minimo consumo di acqua;
- tutti i comandi idraulici per le misure e i controlli (salvo quanto specificato al punto 1) saranno portati in superficie e concentrati in un quadro posto in una cassetta metallica.

1.5. Risultati delle indagini

1.5.1. Stratigrafia

La perforazione a carotaggio continuo (e successivamente le prospezioni geofisiche) hanno permesso innanzi tutto la ricostruzione dettagliata della stratigrafia dell'area,

che pur con le dovute cautele legate alla notevole variabilità laterale dei depositi di colmamento della Pianura Pontina, può essere considerata rappresentativa di questo settore della piana. La quota del p. c. è a circa + 10 s.l.m.

In generale la sequenza incontrata può essere schematizzata come segue.

0.0 – 83.0 m: depositi di laguna e/o costieri (Pleistocene - Olocene)

Si tratta di alternanze di sabbie, ghiaie ed argille con resti di gasteropodi. Il colore dal nocciola chiaro al grigio nerastro e la consistenza che varia notevolmente, starebbero ad indicare una continua oscillazione dei depositi al di sopra ed al di sotto dell'originario livello di falda. A diverse quote inoltre si rinvencono depositi piroclastici rimaneggiati e probabilmente anche primari (21.10 – 31 m, 32.7 – 34.9 m). Non si sono riscontrati depositi di travertino se non per spessori trascurabili.

83.0 – 167.8 m: argille e sabbie grigie molto consistenti (Pliocene)

Si tratta di alternanze continue di terreni fini limo-argillosi ricchi di resti di bivalvi e gasteropodi e terreni più grossolani sabbiosi sempre di colore grigio. Intervallati a tali terreni sono state rinvenuti anche livelli calcarenitici litoidi molto compatti il più consistente dei quali, di colore avana, da 87.5 a 94.2.

167.8 – 175.7 m: arenarie grigio-giallastre (Flysch Toscano?)

175.7 – 184.7 m (fondo foro): calcari micritici (Mesocenoico?).

Il calcare si presenta molto fratturato (alcune fratture sono riempite di arenaria del flysch soprastante) ed è presente anche una cavità di circa un metro fra 183.5 e 184.3 m.

Tutti i terreni incontrati sono al momento oggetto di un dettagliato studio micropaleontologico per poter determinare, per quanto possibile, l'età dei singoli depositi e poter ricostruire i diversi ambienti di sedimentazione.

1.5.2 Indagini geofisiche

Al termine della fase di perforazione è stata eseguita una prospezione sismica in foro (downhole) con modalità tomografica, secondo tre direttrici tutte comprese nel settore ad est della Via Appia. L'indagine ha consentito di ricostruire una sezione bidimensionale di velocità sismica dei terreni.

L'analisi degli elaborati grafici e la relativa scala di velocità permette di osservare che l'intervallo di velocità più rappresentato è quello compreso fra 1400 e 2000 m/s in cui rientrano i terreni sciolti, le sabbie pseudocementate, i limi e le argille consistenti (Pleistocene – Pliocene). Le altre velocità registrate hanno permesso di individuare i terreni arenacei ($2000 < V_p < 3000$ m/s) ed infine quelli calcarei ($V_p > 3000$ m/s). È da osservare che lungo l'asse della perforazione sono state individuate a diverse profondità (50 e 150 m) delle zone con bassi valori di velocità (terreni a bassa consistenza).

1.5.3 Caratteristiche geotecniche

Come detto precedentemente in tutta la sequenza terrigena pliocenico-olocenica sono stati prelevati numerosi campioni indisturbati che sono stati poi oggetto di prove di laboratorio per una caratterizzazione geotecnica in termini di resistenza al taglio, ed i cui risultati vengono descritti in (Garbi net al, 2004) in questo volume.

1.5.4 Idrogeologia

Data la natura dei terreni attraversati ed i loro rapporti reciproci, è ovvio attendersi un assetto idrogeologico articolato (Boni, 1988; Mouton, 1973). La sequenza pleistocenico-olocenica, è sede di un 1° acquifero che viene tamponato dai terreni pliocenici più o meno fini, e comunque a permeabilità minore. La natura di tale acquifero a sua volta, data la presenza di orizzonti più permeabili che poggiano su livelli francamente argillosi è di tipo semiconfinato, perché le eteropie laterali permettono comunque la continuità idraulica su vasta scala. Per poter monitorare anche questa falda è stato realizzato un secondo foro, a fianco del primo, fino alla profondità di -70 m dal p.c., con

la messa in opera di due piezometri a tubo aperto, rispettivamente alle quote di -70 e -20 m dal p.c. Il livello della falda, in entrambi i piezometri si stabilizza a circa -0.5 m dal p.c. L'acquifero più consistente è quello contenuto all'interno dei carbonati, tamponato superiormente dai terreni pliocenici. Dopo che la perforazione lo ha incontrato, il livello della falda ha inizialmente raggiunto i +3 m dal p.c. con un risalita quindi di circa 180 m. È da notare che i calcari sono fortemente carsificati e fratturati (con la presenza anche di vere e proprie cavità) e che pertanto è ragionevole ipotizzare che ci sia una forte circolazione al loro interno. Il foro realizzato permetterà il monitoraggio nel tempo di tale falda, anche con l'ausilio di sonde parametriche per l'acquisizione dei parametri chimico-fisici delle acque.

2. PIANA DI S. VITTORINO

2.1. Assetto geologico

La piana è localizzata, da un punto di vista geologico, nel settore di incontro fra i paleodomini di piattaforma carbonatica laziale-abruzzese, quelli in facies di transizione umbro-sabina e quelli appartenenti al dominio pelagico umbro-marchigiano.

Riferendosi allo stretto intorno della Piana di S. Vittorino, si osservano affioramenti di terreni appartenenti alle facies di piattaforma, di rampa e di bacino attribuibili all'intervallo temporale che si estende dal Trias al Miocene superiore.

I depositi di colmamento della piana stessa sono riferiti al Pleistocene sup-Olocene mentre nella porzione occidentale del settore si rileva presenza di terreni pliocenico-quadernari in facies fluvio-lacustre appartenenti al bacino di Rieti (Cavinato G.P. 1989).

Il settore risulta essere particolarmente complesso, da un punto di vista tettonico, in ragione della presenza di un importante lineamento strutturale, noto come Linea Ancona-Anzio Auct., che ha svolto un ruolo di primo piano nella fase di rift, e quindi nella identificazione dei paleodomini (Cavinato G.P. 1989, Parotto M. 1975, Salvini F. 1982). Di seguito sono riportati i caratteri salienti dei depositi di colmamento della piana, che sono quelli di più diretto interesse per lo studio dei sinkhole.

Unità di Calciariola – Fosso Canalicchio (Villafranchiano inferiore)

Questa è costituita prevalentemente da conglomerati eterometrici all'interno dei quali è possibile trovare intercalati orizzonti calcarenitici e corpi di breccie a geometria sostanzialmente lenticolare.

È possibile osservare questi terreni in affioramento con una certa continuità nel settore sud-occidentale dell'area.

Travertini (Pleistocene superiore – Olocene)

Affiorano con una certa continuità nei pressi di Caporio e presso l'abitato di Vasche, dove è stato ipotizzato uno spessore per tale litologia di almeno 35 m; da un punto di vista tessiturale questi presentano facies sia stromatolitiche che fitoermale (Compagnia Mediterranea Prospezioni 1964).

La loro formazione è da mettere in relazione ad emergenze di acque solfuro-carbonate.

Alluvioni recenti ed attuali (Olocene)

Depositi alluvionali del F. Velino sabbioso-argilloso e argillo-sabbiosi con intercalati depositi più grossolani (ghiaie). Costituiscono la più parte del riempimento della piana.

Detrito di falda e conoidi di versante (Olocene)

Materiale detritico prevalentemente incoerente proveniente dallo smantellamento delle aree di versante, costituito da clasti di dimensioni eterometriche di composizione sostanzialmente carbonatica, che in alcuni casi va a costituire delle vere e proprie conoidi di versante.

In alcuni casi, quando si presentano fortemente cementati, tali depositi vanno a forma-

re delle brecce di pendio stratificate con giacitura parallela al pendio stesso. E' possibile rinvenire tali terreni in affioramento ai piedi dei versanti che circondano la Piana di S. Vittorino.

2.2. Assetto idrogeologico

L'assetto idrogeologico della Piana, e dei settori ad essa limitrofi, si presenta piuttosto articolato proprio in virtù della complessità strutturale che caratterizza l'area (Boni C. 1986, 1988, Boni C. 1995).

La Piana di S. Vittorino risulta essere la zona di recapito della circolazione idrica sotterranea circolante nei rilievi ad essa circostanti con una portata di circa 18 m³/sec ed in particolare costituisce il livello di base del sistema idrogeologico Giano-Nuria-Velino (Boni C. 1995).

Ai piedi del M. Nuria, infatti, nel settore meridionale della piana, si localizzano le sorgenti del Peschiera che, costituiscono una tra le più grandi emergenze dell'Italia centrale (Boni et alii 1986).

Le sorgenti presenti nella parte meridionale dell'area si distribuiscono lungo un fronte diffuso pur presentando punti sorgivi localizzati lungo la linea di contatto tra l'acquifero carbonatico ed i terreni a bassa permeabilità che colmano la piana (Boni C. 1995). Nel settore della Piana di S. Vittorino le sorgenti non sono soltanto localizzate ai piedi dei versanti o in loro corrispondenza, ma anche in numerosi punti della piana. Questo fatto rende conto sia della presenza di una falda superficiale con soggiacenza estremamente ridotta, sia della esistenza di una interazione tra circuito superficiale e circuito profondo, come testimoniato dalle caratteristiche fisico chimiche delle acque presenti in alcuni sinkhole. In quest'ultimo caso le acque sotterranee mostrano a luoghi caratteristiche chimico-fisiche marcate, con presenza di emissioni gassose più o meno evidenti.

2.3 Il pericolo sinkholes

Il succedersi di fenomeni di collasso e sprofondamento del suolo all'interno della piana e lungo i suoi bordi cartonatici, è documentato a partire sin dal I sec a.C.

Sono state catalogate da vari Autori (Capelli & Salvati, 2002) non meno di 43 depressioni, alcune ormai oblite, altre tuttora visibili, tra doline di pendio lungo i bordi cartonatici, di chiara origine carsica, e sprofondamenti circolari del suolo all'interno dei depositi alluvionali, che quasi tutti riempiti d'acqua, formano attualmente dei laghetti. Nel XIX e XX sec. i fenomeni di sprofondamento hanno interessato a vario titolo infrastrutture insediamenti umani; in primo luogo la linea ferroviaria Terni-Sulmona, che ha subito almeno cinque spostamenti progressivi dal centro della piana verso il bordo meridionale, lungo il quale corre il tracciato attuale.

Anche lo sviluppo degli insediamenti urbani, residenziali e delle infrastrutture connesse alle attività agricolo- pastorali e turistiche sono state condizionate da tali fenomeni: in tempi recenti con la Delibera della Giunta Regionale del Lazio n. 8989 del 12.11.'96 sono stati posti seri limiti all'edificazione, anche se in maniera differenziata, all'interno di aree a diverso grado di salvaguardia.

La strada statale n. 4 "Via Salaria " percorre il limite settentrionale della Piana (Fig.2). Negli ultimi 15 anni circa 200 m di strada (dal km 88+700 al km 88+900) è stato interessato da tre fenomeni di sprofondamento rispettivamente nel 1989, nel 1999 e nel 2000.

I fenomeni del 1989 e del 2000 riguardavano la riattivazione di un processo di subsidenza connesso alla presenza di un sinkhole al margine meridionale della strada, mentre nel 1999 lo sprofondamento interessò direttamente l'intera sede stradale che ri-

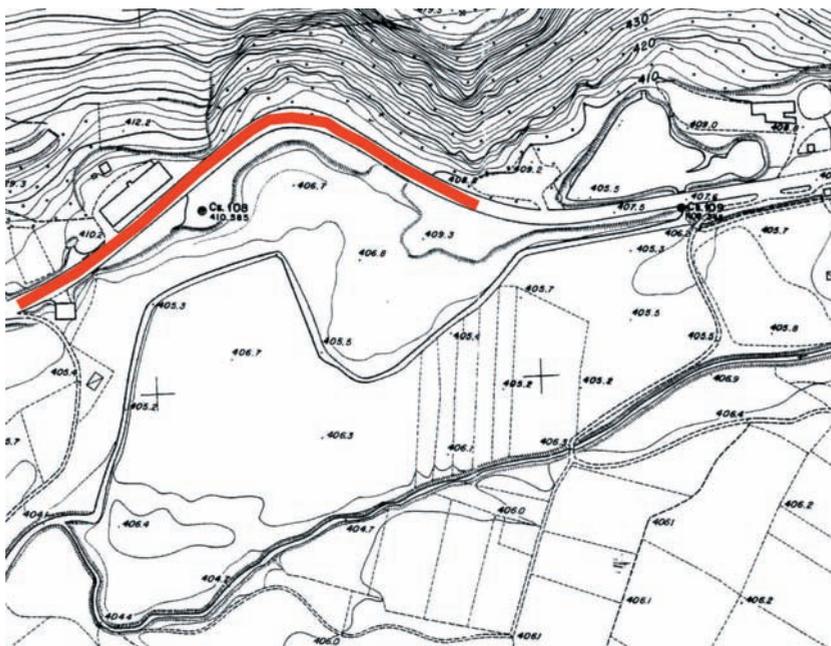


Fig. 2 – S.S.4 Salaria nel tratto centrale della Piana del Velino. In rosso è evidenziato il settore maggiormente interessato dai sinkhole.

mase interrotta e chiusa al traffico per un giorno intero, obbligando l'utenza ad un percorso alternativo molto più lungo.

Il 19 agosto 1999 alle ore 10,00 la Polizia Municipale di Caporio trovò lungo la Via Salaria al km 88+800 ca. un brusco avvallamento del piano viabile di circa mezzo metro e provvide a fermare il traffico e dare l'allarme; circa due ore dopo, la strada era completamente interessata da uno sprofondamento circolare del diametro di 15 m che aveva ribassato il suolo di più di 3 m.

2.4 Interventi sulla Via Salaria

Gli interventi di ripristino della stabilità e sicurezza della Via Salaria progettati dal Compartimento ANAS per la Viabilità del Lazio sono consistiti nella realizzazione di un "viadotto interrato" costituito da un impalcato poggiate su travi portanti accostate che scaricano su setti di micropali con funzione di trasferimento dei carichi in profondità.

La sequenza litologica sottostante la strada statale è costituita da depositi di pendio di natura calcarea, eterometrici e negli orizzonti più superficiali, probabilmente coincidenti con la fascia di escursione del livello di falda o con le vie preferenziali di flusso, estremamente poveri di matrice che si ritiene sia costituita da sabbie medie e grossolane sciolte. La presenza di orizzonti, spessi a volte diversi metri, in cui prevalgono i vuoti per la sola presenza dello "scheletro carbonatico" totalmente privato della matrice fino è probabilmente da attribuire a processi di dissoluzione di tipo chimico ad opera delle acque ricche di CO₂ e congiuntamente a fenomeni meccanici di asporto per azione di notevoli flussi idrici sotterranei.

I micropali sono stati realizzati con tubi metallici valvolati nel tratto più profondo per consentire di iniettare biacca di cemento a bassa pressione e a più riprese in modo da garantire un adeguato consolidamento dell'orizzonte di appoggio dei micropali stessi e nel contempo evitare che le iniezioni potessero invadere orizzonti permeabili, sedi di fal-

de mineralizzate in possibile connessione con le vicine sorgenti termali delle "Terme di Cotilia".

Gli interventi, pur se effettuati in tre periodi diversi, sono tra loro contigui, per cui attualmente la strada è messa in sicurezza per un tratto lungo circa 150 m.

Sino ad oggi non si segnalano controindicazioni alla tipologia di consolidamento adottata anche se ci si pone ovviamente il problema di cosa stia avvenendo sotto la struttura realizzata.

Nel tratto di strada immediatamente precedente quello sede dello sprofondamento del 1999 e prospiciente l'ex edificio per il pompaggio della CO₂, al momento sono presenti sul piano viabile avvallamenti localizzati in forma di depressioni circolari del diametro di 30-60cm.

Le prospezioni georadar effettuate e i sondaggi meccanici eseguiti in prossimità di dette piccole depressioni hanno evidenziato la presenza di uno strato spesso tra i 4 e i 5 m di detrito carbonatico caratterizzato da scarso addensamento; in alcuni casi è stata accertata la presenza di vere e proprie cavità di poco meno di 1 m di diametro a meno di 2,5 m sotto il piano stradale.

Ciò ha imposto una costante sorveglianza della situazione cui si è affiancata una stazione di monitoraggio costituita da due assestimetri ad aste multiple ed un piezometro che sono attualmente oggetto di letture periodiche.

Occorre segnalare la notevole difficoltà incontrata nella realizzazione dei fori per l'installazione delle aste a causa della inconsistenza del detrito carbonatico in presenza di falda in movimento.

Quest'ultima ha procurato notevoli difficoltà durante la fase di cementazione delle aste al terreno, creando incertezza sulla sua perfetta esecuzione e riuscita. Ad oggi sono state effettuate 4 letture oltre quella di 0: i movimenti registrati sono di piccola entità e oscillano intorno allo 0. Essi da una parte non segnalano movimenti del suolo e dall'altro sembrano dare garanzia della buona aderenza delle aste al terreno.

CONCLUSIONI

Nell'ambito di una vasta problematica come quella rappresentata dai sinkhole la collaborazione fra enti gestori di infrastrutture ed enti di ricerca è fondamentale per un corretto approccio al problema. Significativa in tal senso è stata la collaborazione fra ANAS S.p.A. ed il Dipartimento di Scienze della Terra di Roma Tre. Gli esempi citati dimostrano anche come a parità di fenomeno (sinkhole = sprofondamento improvviso) diversi siano i metodi di approccio e le soluzioni adottabili. Infatti nel caso della Via Salaria la conoscenza del fenomeno ha condotto al rintracciamento dell'opera in cui via via sono stati esclusi i possibili tracciati, fino all'individuazione dell'unico tracciato che desse garanzie certe e che quindi doveva essere fuori dalla piana, sul lato verso monte.

Nel caso invece della Via Appia, il tracciamento dell'infrastruttura in area assolutamente priva di rischio non è possibile (sia dal punto di vista economico sia da quello ambientale) e pertanto l'unico approccio possibile è lo studio integrato con tutti gli enti di ricerca che si interessano alla problematica per poter definire un'area con minor rischio e mettere nel frattempo in atto tutti i sistemi di monitoraggio che la comunità scientifica ritiene più opportuni ed idonei per il caso in esame (circa 200 m di copertura, bedrock carbonatico profondo, con circolazione idrica sotterranea potente e veloce ed acque aggressive).

Se confermato, questo dato rappresenterebbe la dimostrazione che la genesi e l'innesco dei sinkhole in condizioni di spesse coperture al di sopra di un substrato carbonatico carsico è un fenomeno che avviene ad elevate profondità con tutte le conseguenze in termini di previsione e prevenzione del rischio che ne conseguirebbero.

BIBLIOGRAFIA

- BARBIERI M., CARRARA C., CASTORINA F., DAI PRA G., ESU D., GLIOZZI E., PAGANIN G. & SADORI L., 1999 - Multidisciplinary study of Middle-Upper Pliocene deposits in a core from the Piana Pontina (Central Italy). *Giornale di Geologia*, **61**
- BONI C., BONO P., CAPELLI G., 1986 - Schema Idrogeologico dell'Italia centrale-Carta A e B. *Memorie della Società Geologica Italiana* **35**
- BONI C., BONO P., CAPELLI G., 1988 - Carta Idrogeologica del territorio della Regione Lazio. Regione Lazio e Dip. Sc. della Terra - Univ. "La Sapienza"
- BONI C., CAPELLI G., PETITTA M., 1995 - Carta idrogeologica dell'alta e media valle del Fiume Velino. Systemcart
- CAPELLI G. & SALVATI R., 2002. Il Progetto Sinkhole del Lazio. Dip. Sc. Geologiche Univ. Roma TRE & Regione Lazio Ass.to U.T.V.R.A., Rome.
- CAVINATO G.P., CHIARETTI F., COSENTINO D., SERVA L., 1989 - Caratteri geologico-strutturali del margine orientale della conca di Rieti. *Boll. Soc. Geol. It.*, **108**
- CHIESA G., 1993. Analisi delle cause che hanno prodotto lo sprofondamento di Tor Tre Ponti, Latina. Rapporto inedito
- COMPAGNIA MEDITERRANEA PROSPEZIONI, 1964. Prospezioni per uno studio idrogeologico e geofisico nella zona delle Sorgenti del Peschiera, Roma.
- COMPAGNIA MEDITERRANEA PROSPEZIONI, 1968. Prospezione geoelettrica nella Pianura Pontina, Roma.
- DI FILIPPO M. & TORO B., 1980 - Analisi gravimetrica delle strutture geologiche del Lazio meridionale. *Geologica Romana*, **19**
- GARBIN F., SCARAPAZZI M., CIANCI S., CAPELLI G., SALVATI R., ALBANESE G. & STORONI S., 2004 - Esempio di caratterizzazione geotecnica finalizzata alla definizione del rischio in un'area interessata da fenomeni di sprofondamento catastrofico (Tor Tre Ponti, Latina). In questo volume
- MOUTON J., 1973. Contributo allo studio delle acque sotterranee dell'Agro romano e pontino, L'acqua per la Pianura Pontina, situazioni e prospettive. Provincia di Latina, Latina.
- PAROTTO M., & PRATURLON A., 1975 - Geological summary of the Central Apennine. Structural Model of Italy,
- SALVATI R., CAPELLI G. & GARELLO M., 2004. Carta delle aree a rischio sinkhole della Regione Lazio. In questo volume.
- SALVINI F., VITTORI E., 1982 - Analisi strutturale della Linea Olevano-Antròdoco-Posta (Ancona-Anzio Auct.): metodologia di studio delle deformazioni fragili e presentazione del tratto meridionale. *Mem.Soc.Geol.It.*, **24**.