

Modellazione numerica 3D agli elementi finiti (FEM) per la valutazione delle condizioni di stabilità di cavità antropiche del territorio pugliese: il caso studio della cava ipogea di San Procopio (Barletta, Murge settentrionali)

3D finite element method (FEM) for stability assessment of anthropogenic cavities in the Apulia region: the case study of the underground quarry of San Procopio (Barletta, Northern Murge)

LUISI M. (*), DI SANTO A. (*), FIORE A. (*), LEPORE D. (*),
LOLLINO P. (**), MICCOLI M.N. (*), PARISE M. (**),
SPALLUTO L. (*)

RIASSUNTO - Nel presente lavoro sono esposti i risultati della modellazione numerica tridimensionale agli elementi finiti (FEM) applicata al caso di studio di una cava in sotterraneo, scavata nelle calcareniti tenere della Formazione della Calcarenite di Gravina (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore), sita in località San Procopio (Barletta, Murge settentrionali). Tale cava è stata recentemente interessata da un crollo parziale che ha determinato lo sprofondamento di un'area di circa 800 m². L'obiettivo dello studio è analizzare i fattori che hanno determinato lo sprofondamento e ricavare informazioni sullo "stato di salute" dei pilastri e delle volte non ancora interessati da dissesti, per poter pertanto valutare in via preliminare il relativo rischio residuo.

Per il caso in esame si è fatto uso del software MIDAS GTS NX con cui sono state condotte analisi non lineari incrementali al passo ("*path-following*"). Tali analisi si sono rese necessarie per ricostruire l'evoluzione dello stato tenso-deformativo della struttura nelle fasi precedenti e successive al crollo. Per la definizione del modello numerico è stata utilizzata la geometria ricostruita dal rilievo speleologico fornito dalla Federazione Speleologica Pugliese, mentre per quanto riguarda i parametri meccanici delle calcareniti, si è fatto uso della letteratura disponibile.

Il risultato più evidente della modellazione è stato quello di riconoscere il mutamento dello stato tenso-deformativo per i pilastri più prossimi alla zona del dissesto. Tali pilastri, nella fase precedente al collasso, si trovavano, data la regolarità tra le spazature delle gallerie, in condizioni di carico pressoché centrato. Nella fase successiva alla rottura e al conseguente sprofondamento, a causa di una maggiore eccentricità del carico venutasi a creare per lo squilibrio indotto dal crollo stesso, tali pilastri risultano sollecitati oltre che da sforzi normali anche da importanti componenti flessionali e

di taglio. Tale incremento in alcuni casi potrebbe non essere trascurabile dato che un decadimento naturale delle caratteristiche meccaniche delle rocce, spesso accelerato da fattori legati all'uso del suolo, potrebbe determinare nel corso del tempo una eccessiva riduzione delle condizioni di sicurezza.

Questo studio evidenzia come la costruzione di un modello numerico tridimensionale del sottosuolo sia un approccio imprescindibile per lo studio dei fenomeni di instabilità di cavità. I risultati permetteranno di fornire gli elementi di valutazione necessari per pianificare interventi di risanamento strutturale delle cavità o per progettare interventi di bonifica laddove la situazione dovesse presentarsi compromessa.

PAROLE CHIAVE: modellazione numerica 3D, metodo agli elementi finiti, cavità antropiche, San Procopio, Barletta, Murge settentrionali, Puglia

ABSTRACT - In this paper, the implementation of the finite element method (FEM) to an underground quarry, mined in soft calcarenites of the Calcarenite di Gravina Fm (Late Pliocene – Early Pleistocene), is presented. The quarry, located in San Procopio locality (Barletta, northern Murge), was recently affected by a partial collapse, which produced a 800 m² wide sinkhole. This study aims at i) analyzing the factors which produced the sinking of the collapsed portion of the quarry; ii) obtaining information on the state of the not collapsed pillars in order to assess, in a preliminary way, the residual hazard.

In the present study, the software MIDAS GTS NX was used in order to make a nonlinear path-following analysis. This allowed us to reconstruct the evolution of the stress-strain state of the structure both before and after the sinkhole for-

(*) Autorità di Bacino della Puglia, c/o InnovaPuglia S.p.a. (Ex Tecnopolis CSATA) - Str. Prov. per Casamassima, km 3 - 70010 Valenzano (Ba). E-mail: michele.luisi@adb.puglia.it

(**) Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) del CNR, U.O.S. di Bari, via Amendola 122/I - 70126 Bari

mation. The geometric model of the quarry was built using the speleologic survey performed by the Apulian Speleological Federation, while the mechanical parameters of soft calcarenites come from published geotechnical data.

The most prominent result of the model is the evidence of the stress-strain changing state measured along the pillars located closest to the collapsed area. These, before the sinkhole formation, were in almost centered loading conditions due to the regular distribution of the underground galleries. After the sinkhole formation, these pillars underwent a strong eccentricity of loading conditions, which produced, in addition to the normal stress, also important components of bending and shear stresses. The change in stress condition of the pillars closest to the sinkhole is not negligible since a natural decay of the mechanical properties of the soft calcarenites, often increased by factors related to the land use, could determine over time an excessive reduction of the safety conditions, and the subsequent possible enlargement of the sinkhole.

This study shows that the three-dimensional numerical modelling of the subsurface is an important approach for verifying the stability assessment of anthropogenic cavities in order to provide useful information aiming at restoring the structural stability of cavities or at planning a reclamation project for structurally compromised underground quarries.

KEY WORDS: 3D numerical modelling, finite element method, anthropogenic cavities, San Procopio, Barletta, northern Murge, Apulia

1. - INTRODUZIONE

Gran parte del territorio pugliese è costituito da una potente successione carbonatica mesozoica autoctona su cui poggiano in discordanza sedimenti neogenici costituiti in prevalenza da calcareniti spesse da pochi metri ad alcune decine di metri (CIARANFI *et alii*, 1988). Le caratteristiche fisiche e meccaniche delle calcareniti sono quelle tipiche delle rocce tenere, e per tale ragione molto spesso sono state utilizzate come materiale da costruzione nel settore dell'edilizia tradizionale. A partire dai primi anni del 1800 si è diffusa infatti una florida attività estrattiva che, al fine di conservare il suolo in superficie per attività agricole, si è sviluppata prevalentemente in sotterraneo (PARISE, 2010). Le estrazioni di roccia generalmente avvenivano mediante il sistema di coltivazione sotterranea "a camere e pilastri" il cui dimensionamento avveniva in maniera empirica rispondendo più a esigenze di sfruttamento del giacimento che a criteri di salvaguardia della stabilità degli ambienti nel tempo. Per tale ragione, alcune delle cave hanno registrato fenomeni di dissesto incipiente o collasso generalizzato con formazione di sprofondamenti in superficie. Questa situazione costituisce una delle principali pericolosità geomorfologiche del territorio pugliese poiché minaccia direttamente tutte le attività che si svolgono in corrispondenza della superficie delle cavità (PARISE, 2008; BARNABA *et alii*, 2010; DE PASCALIS *et alii*, 2010; FIORE & PARISE, 2013; PARISE & VENNARI, 2013).

Nel presente lavoro sono esposti i risultati della modellazione numerica tridimensionale agli elementi finiti (FEM) applicata al caso di studio di una cava in sotterraneo, realizzata nelle calcareniti tenere della Formazione della Calcarenite di Gravina (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore), sita in località San Procopio (Barletta, Murge settentrionali). Tale approccio è insostituibile nelle analisi dei meccanismi di rottura e di deformazione di elementi strutturali per i quali non sia applicabile, per la complessità della geometria in gioco, un'analisi semplificata in deformazione piana.

La cava in esame è stata interessata dal crollo, avvenuto la notte tra il 2 e il 3 maggio 2010, di una porzione del reticolo caveale ampia circa 800 mq (DE GIOVANNI *et alii*, 2010; PARISE *et alii*, 2013). L'obiettivo dello studio è stato quello di verificare, attraverso analisi non lineari incrementali al passo ("*path-following*"), i fattori che hanno determinato lo sprofondamento e di ricavare informazioni sullo stato delle strutture (pilastri e intradossi delle gallerie) prossime all'area interessata dallo sprofondamento ma non ancora collassate, e di poter pertanto valutare, in via preliminare, il relativo rischio residuo.

2. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La località San Procopio, in agro di Barletta, fa parte del settore settentrionale delle Murge costituito, nelle sue linee più essenziali, da sedimenti calcarei del Cretaceo, che costituiscono il substrato dell'intera regione murgiana, dislocato da faglie orientate circa NO-SE e E-O (CIARANFI *et alii*, 1988; PIERI *et alii*, 1997; FESTA, 2003). Più in particolare, il quadro geologico locale può essere sintetizzato come segue: sui calcari cretacei di piattaforma carbonatica (localmente rappresentati dal Calcare di Bari), poggiano in discordanza le unità plio-pleistoceniche del ciclo della Fossa bradanica (Calcarenite di Gravina ed Argille Subappennine) e, in discordanza su tutte le unità più antiche, si rinvengono le unità marine e continentali terrazzate del Pleistocene medio-superiore (BOENZI *et alii*, 1971; PIERI, 1975; 1980; CIARANFI *et alii*, 1988; RICCHETTI *et alii*, 1988) (fig. 1).

La successione plio-pleistocenica della Calcarenite di Gravina affiora diffusamente in tutta l'area in esame e poggia direttamente sul substrato cretaceo. Il contatto è rappresentato da una discordanza angolare marcata da una superficie di abrasione marina sui calcari cretacei. Tale contatto trasgressivo è ben evidente per il contrasto litologico fra i sottostanti calcari micritici del Cretaceo e i soprastanti depositi calcarenitici, dovuto ai diversi caratteri tessiturali e al diverso grado di ce-

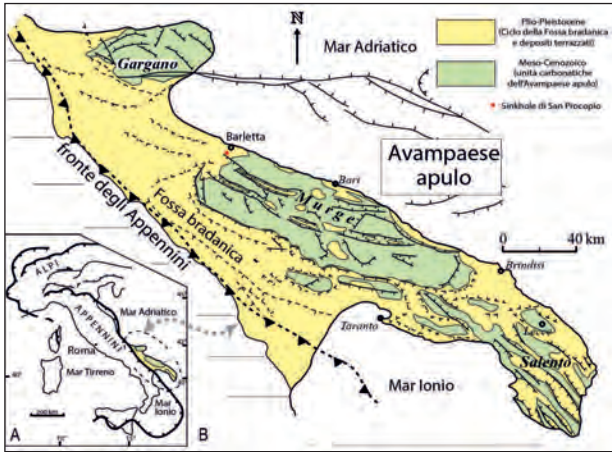


Fig. 1 – Carta geologica dell’Avampaese apulo (modificato da PIERI *et alii*, 1997).
 – Geologic map of the Apulian foreland (modified after PIERI *et alii*, 1997).

mentazione. Nello specifico, la Calcarenite di Gravina nell’area in esame presenta una giacitura clinostatificata con strati immergenti verso i quadranti settentrionali di circa 30-35° ed è costituita da strati e banchi di calcareniti e calciruditi bioclastiche e da calcari organogeni ad alghe calcaree, scarsamente cementati e abbondantemente porosi, per uno spessore massimo complessivo di circa 50-60 metri.

Tale formazione mostra caratteri di facies riconducibili in prevalenza ad un sistema carbonatico di mare sottile, dominato dalle onde (TROPEANO & SABATO, 2000).

Le calcareniti, per le loro peculiari caratteristiche fisiche e meccaniche, sono classificabili come rocce tenere (ANDRIANI & WALSH, 2003; CHERUBINI *et alii*, 1993) e sono state adoperate estensivamente come materiale da costruzione venendo estratte in conci da cave realizzate sia in superficie che nel sottosuolo.

3. - CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEL RETICOLO CAVEALE

Il rilievo eseguito negli ambienti ipogei, a cura della Federazione Speleologica Pugliese, con integrazioni di carattere geologico-strutturale e mappatura dei fenomeni di instabilità a cura del CNR-IRPI (DE GIOVANNI *et alii*, 2011), ha permesso di investigare una rete caveale piuttosto complessa costituita da camere squadrate sorrette da pilastri e setti interdistanti fra di loro in media 4 metri, con altezza media di circa 12-15 m. La cava veniva raggiunta presumibilmente per mezzo di cunicoli orizzontali aperti sul fianco della cava a cielo aperto in calcarenite posta circa 60 m ad E dello sprofondamento. Tutti i rilievi speleologici sono stati effettuati con un grado di precisione

delle poligonali pari a 5 (*British Cave Research Association*), con uso di bussola e inclinometro (Disto X – Nautiz X7), ed approssimazioni angolari e spaziali rispettivamente pari a 1° e 5÷10 cm (DE GIOVANNI *et alii*, 2011).

I rilievi topografici in superficie, correlati con i rilievi speleologici, hanno consentito di verificare uno spessore minimo delle calotte pari a 4 m, con spessore massimo di 20 m e spessore medio di 7,80 m circa. La zona a SE dello sprofondamento risulta avere lo spessore medio delle calotte più esiguo, pari a 4,70 m. La larghezza media dei pilastri/setti rilevati risulta pari a 3,25 m e la loro altezza media a 4,35 m.

4. - CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI

Le calcareniti plio-pleistoceniche pugliesi sono comunemente classificate, in base ai valori di resistenza a compressione monoassiale, come roccia tenera (da estremamente tenera a molto tenera secondo le indicazioni ISRM, 1979). Di seguito (tab. 1) si elencano alcune caratteristiche medie di questo tipo di roccia, così come proposto da numerosi autori (CALÒ *et alii*, 1992; CHERUBINI & SGOBBA, 1997; COTECCHIA *et alii*, 1985):

Dal punto di vista meccanico le calcareniti in esame possono essere considerate come materiali che esibiscono un comportamento intermedio tra i terreni e le rocce, che risulta fortemente influenzato dallo stato tensionale. In particolare per valori bassi del livello tensionale tali materiali mostrano un comportamento assai simile a quello delle rocce (legame costitutivo elasto-fragile con elevati valori di rigidezza) mentre per bassi valori del livello tensionale si mostrano più simili ai terreni (rottura duttile che avviene a grandi deformazioni e bassi valori di rigidezza).

Tab. 1 – *Caratteristiche geotecniche delle calcareniti plio-pleistoceniche.*
 – Geotechnical properties of Plio-Pleistocene calcarenites.

PESO DELL'UNITÀ DI VOLUME	14 ÷ 17	kN/m ³
PESO SPECIFICO DEI GRANI	25,8 ÷ 27,4	kN/m ³
POROSITÀ	28 ÷ 51	%
RESISTENZA A COMPRESSIONE MONOASSIALE	1000 ÷ 2000	kPa
RESISTENZA A COMPRESSIONE MONOASSIALE (campione saturo)	750 ÷ 1500	kPa
RESISTENZA A TRAZIONE	100 ÷ 200	kPa
ANGOLO DI ATTRITO	30 ÷ 35	(°)
COESIONE EFFICACE	80 - 200	kPa
MODULO DI ELASTICITÀ LONGITUDINALE	100 ÷ 150	MPa

5. - MODELLO NUMERICO

La costruzione di un modello numerico tridimensionale agli elementi finiti segue una precisa logica che si compone di più fasi che hanno come finalità quella di approssimare maggiormente il fenomeno fisico reale. Pertanto, il primo *step* è stato quello di ricostruire il modello geometrico tridimensionale a partire dal rilievo plano-altimetrico della cava (figg. 2A, 2B). Tale fase è fondamentale in quanto fornisce una ragionata semplificazione del modello geometrico tridimensionale della cava che consente di avere soluzioni numeriche più stabili e veloci insieme a una più facile lettura ed interpretazione dei risultati.

Una volta creato il modello geometrico si passa alla definizione delle griglie (fig. 3a) per ciascun elemento strutturale. Tale fase è molto delicata poiché queste vanno definite in maniera tale che a bruschi cambiamenti di geometria o di condizioni di carico corrisponda un infittimento della trama degli elementi finiti (fig. 3b).

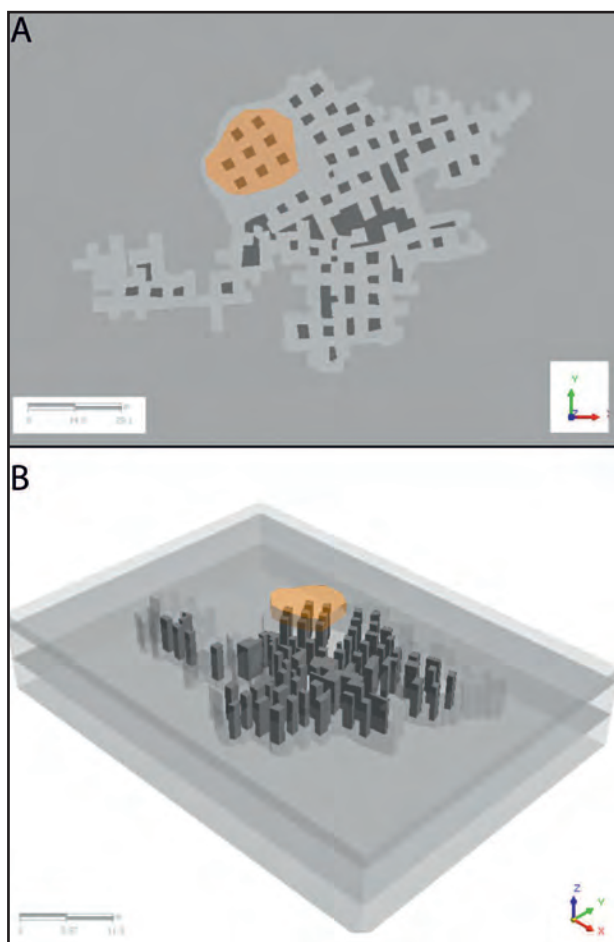


Fig. 2 – Rappresentazione in pianta (A) e in prospettiva (B) del modello geometrico relativo al modello numerico 3D rielaborato a partire dal rilievo speleologico fornito dalla Federazione Speleologica Pugliese.
– In plan (A) and perspective (B) views of the geometric model for the numerical model 3D reworked from the cave survey provided by the Apulian Speleological Federation.

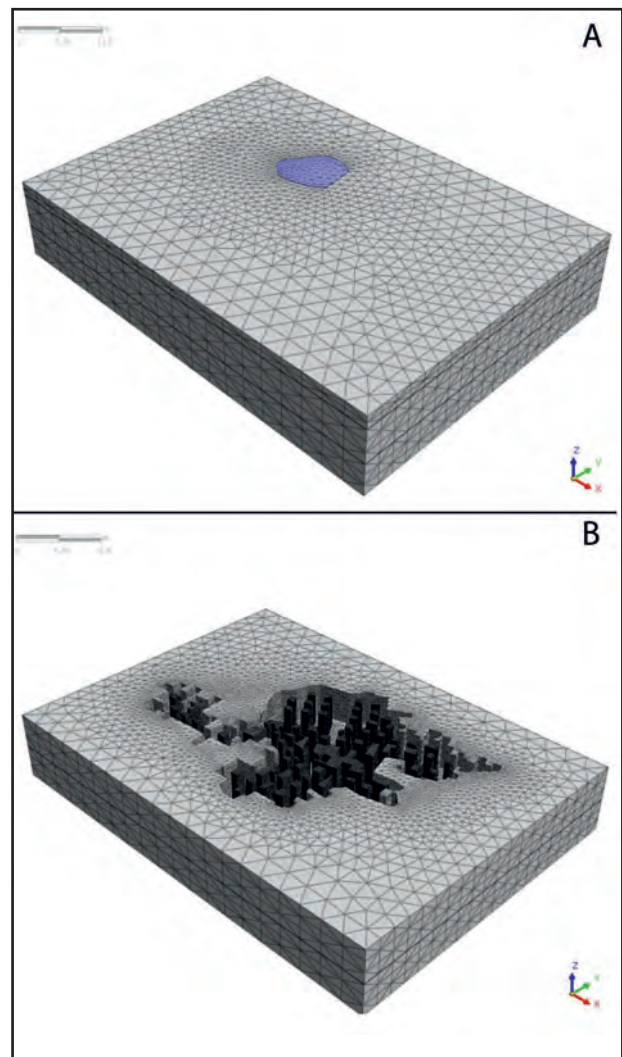


Fig. 3 – Rappresentazione prospettica del modello FEM completo (A) (in cui è visibile in viola la parte relativa al crollo) e parziale (B) con particolare riguardo alla parte interna con evidenza delle camere e dei pilastri.
– Perspective representation of the complete FEM model (A) (the collapsed area is shown in purple) and partial representation (B) with particular regard to the inner part with evidence of rooms and pillars.

Definita la stratigrafia ed i parametri geotecnici si è assunto preliminarmente un legame costitutivo elasto-perfettamente plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb e con limitazione della tensione di trazione (*tension cut-off*). Tale approccio, seppur con i suoi limiti, conduce per questi materiali a soluzioni affidabili anche in campo non lineare.

Una volta definite le proprietà meccaniche delle griglie sono state assegnate le condizioni al contorno al problema strutturale, vincolando la struttura in maniera tale da rispettare le reali condizioni cinematiche (fig. 4).

Dopo aver assegnato i vincoli si sono definiti i carichi esterni. In particolare la coltre di terreno vegetale sovrastante insieme al peso degli alberi di ulivo presenti è stata modellata come un carico di superficie pari a 2100 daN/mq^2 (fig. 5).

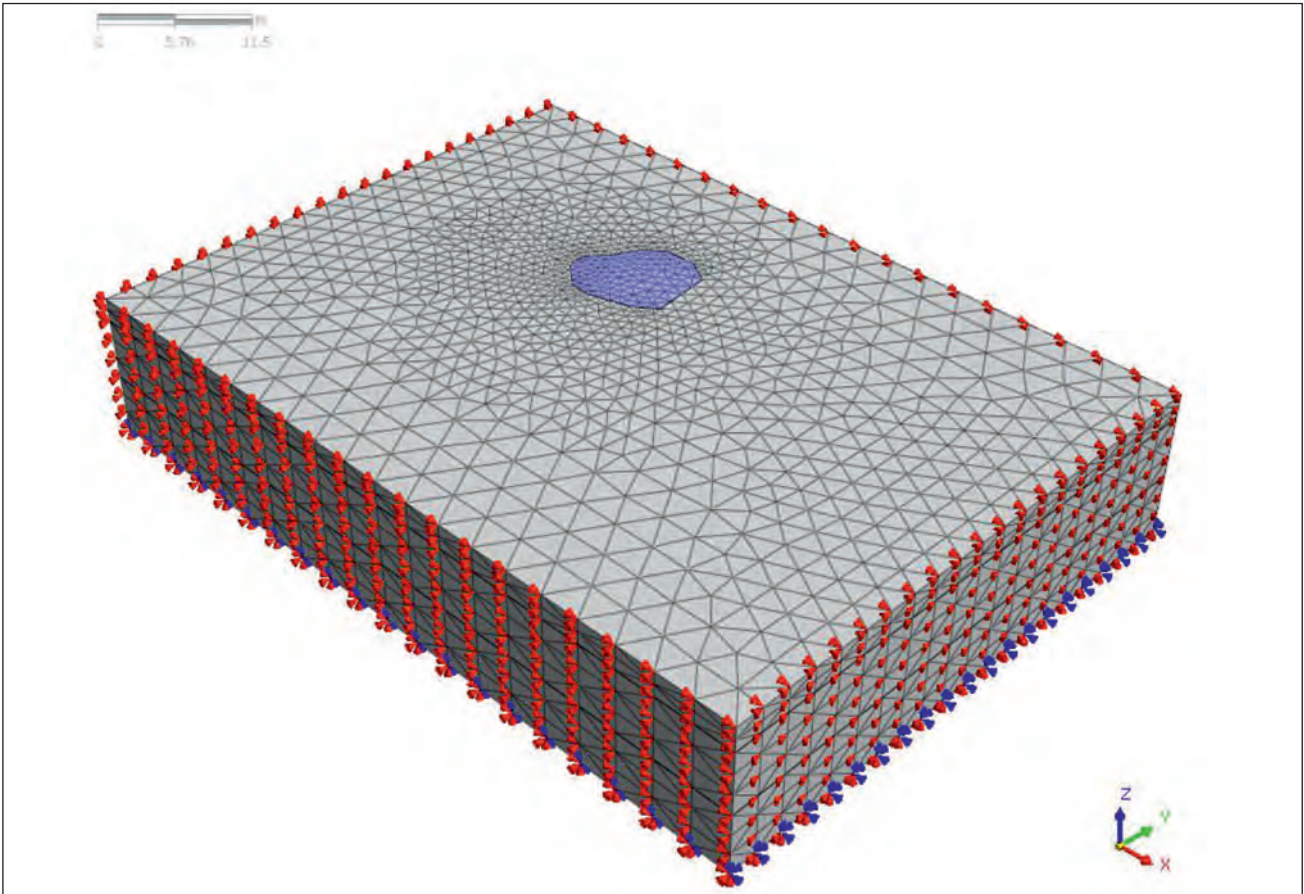


Fig. 4 – Rappresentazione delle condizioni al contorno (vincoli cinematici) per il modello numerico.
 - Representation of the boundary conditions (kinematic constraints) for the numerical model.

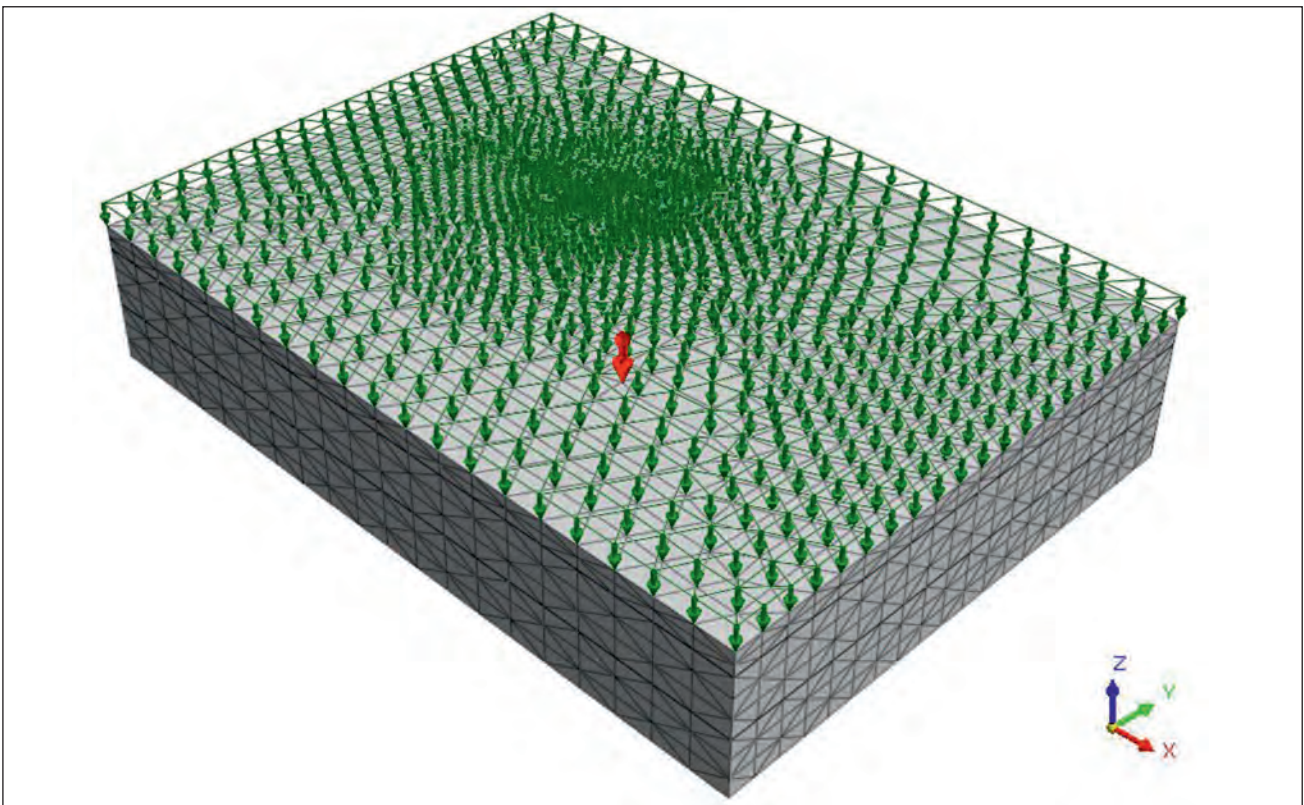


Fig. 5 – Rappresentazione delle condizioni di carico statico per il modello numerico. - Representation of the static load conditions for the numerical model.

Definiti tutti i parametri in gioco si è impostata l'analisi numerica. Per poter valutare in maniera più corretta lo stato di sollecitazione iniziale si è scelto di effettuare una analisi detta "costruzione per fasi", costituita dalle seguenti operazioni:

1) attribuzione del peso proprio dei materiali al modello completo e assegnazione delle azioni esterne. In questo modo si è ricostruito lo stato di sollecitazione che la struttura possedeva prima del crollo anche se, a livello geometrico, essa risulta deformata rispetto alla reale configurazione di partenza.

2) azzeramento delle deformazioni ottenute nella prima fase. In questa maniera la struttura possiede lo stato di sollecitazione e di deformazione pre-crollo.

3) eliminazione degli elementi coinvolti nel meccanismo di rottura e crollo. Il sistema strutturale è così portato alla configurazione di equilibrio attuale (post-crollo).

Le tre fasi di analisi sono state condotte in regime statico non lineare utilizzando un'analisi incrementale al passo ("path-following") che rappresenta ad oggi lo strumento largamente più utilizzato nelle analisi non lineari. In funzione della "curva di risposta della struttura" si è utilizzato come metodo di soluzione iterativo il "metodo della rigidezza costante" poiché

questo garantisce con certezza la convergenza della soluzione. Per quanto riguarda la procedura di controllo dell'incremento di carico si è fatto uso del metodo della lunghezza dell'arco ("Arc-length method") il quale risulta molto versatile sia che si abbia a che fare con curve di risposta strutturali incrudenti che ram-mollenti (RIKS, 1972, 1979; FAFARD & MASSICOTTE, 1993; MEMON & SU, 2004).

In questo lavoro si è fatto uso di una combinazione di criteri di convergenza in termini di forze residue, spostamenti ed energia di deformazione in modo da individuare a seconda dei casi il criterio più idoneo.

6. - RISULTATI NUMERICI

Poiché il modello è stato ottenuto inserendo parametri geotecnici di letteratura si è pensato di analizzare separatamente due casi estremi rappresentativi del range di variazione dei parametri geotecnici tipici delle calcareniti.

Come si può notare, in entrambe le analisi, la struttura risulta fortemente compromessa già in fase pre-crollo (fig. 6). A prescindere dai valori dei

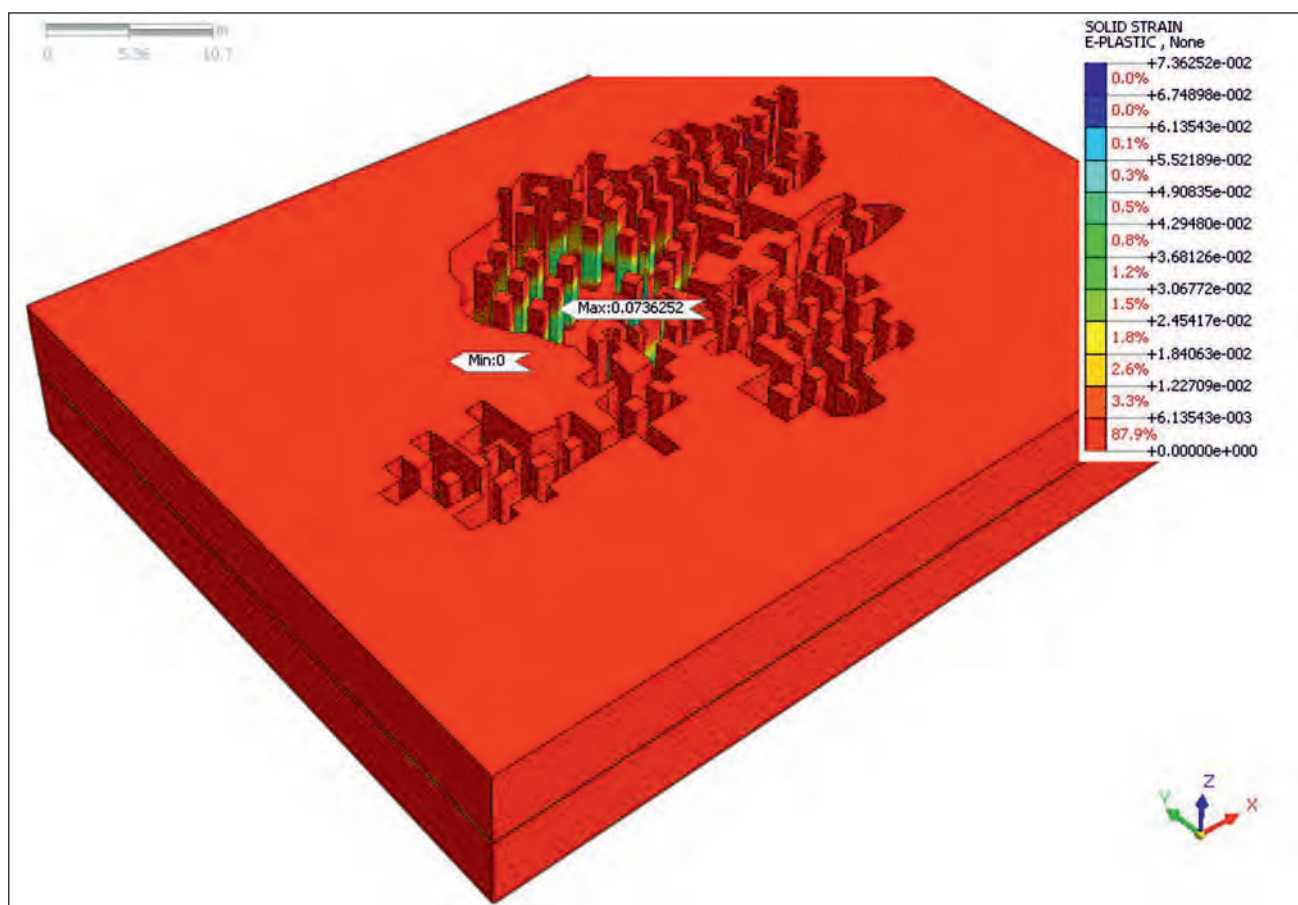


Fig. 6 – Situazione deformativa precedente al crollo.
- Deformative status before the collapse.

parametri geotecnici assunti, si possono osservare, per entrambe le analisi, i seguenti comuni aspetti:

sono evidenti nella fase pre-crollo importanti deformazioni plastiche nei pilastri della porzione crollata (punti verdi in figura 7);

l'incremento delle deformazioni plastiche (fig. 8) è confinato ad una zona che, sebbene dipendente dai parametri geotecnici assunti nell'analisi, è comunque limitata alle immediate vicinanze della porzione crollata ma che potrebbe (come per "Effetto Domino") interessare anche zone più lontane qualora dovessero "cedere" i pilastri che al momento sembrano essere i più compromessi;

nei pilastri più prossimi alla zona di rottura (figg. 9, 10) si generano importanti valori delle tensioni tangenziali e delle tensioni normali a testimonianza dello squilibrio di carico indotto dal crollo. Tale aspetto trova conferma nel quadro fessurativo osservato in sito.

7. – CONCLUSIONI

Le analisi numeriche in Geotecnica sono un efficace strumento di valutazione dei meccanismi di deformazione e di rottura dei terreni e delle rocce

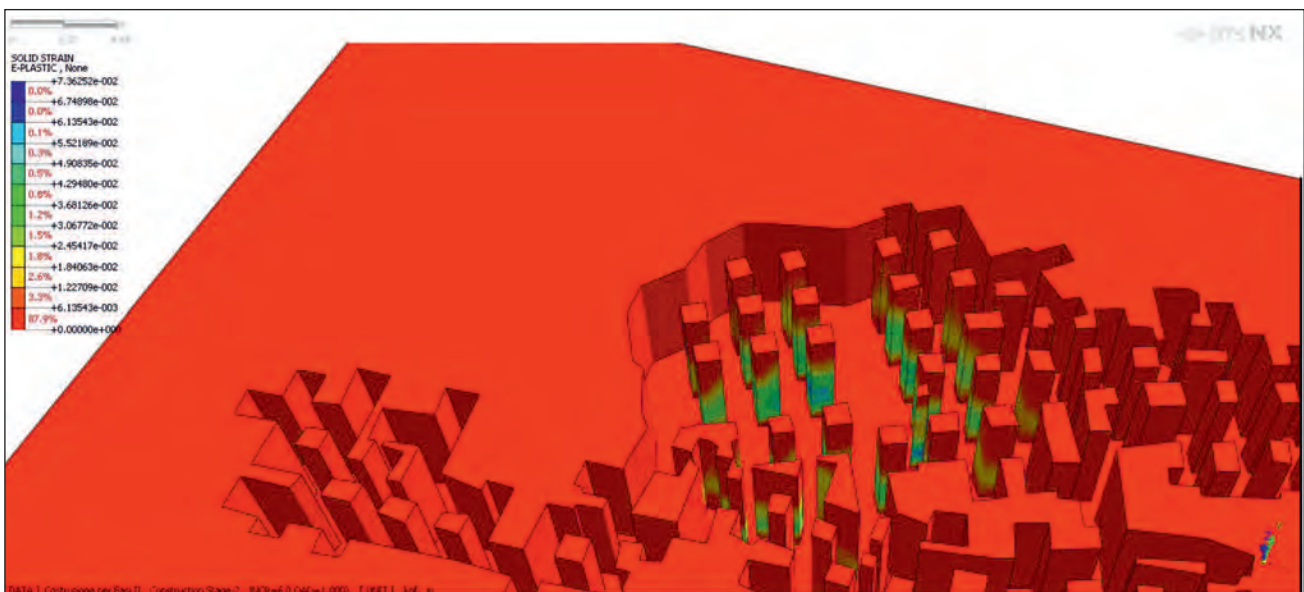


Fig. 7 – Situazione deformativa precedente al crollo con particolare riguardo al volume interessato dai meccanismi di rottura.
 - Deformative status preceding the collapse with particular regard to the volume affected by the failure mechanisms.

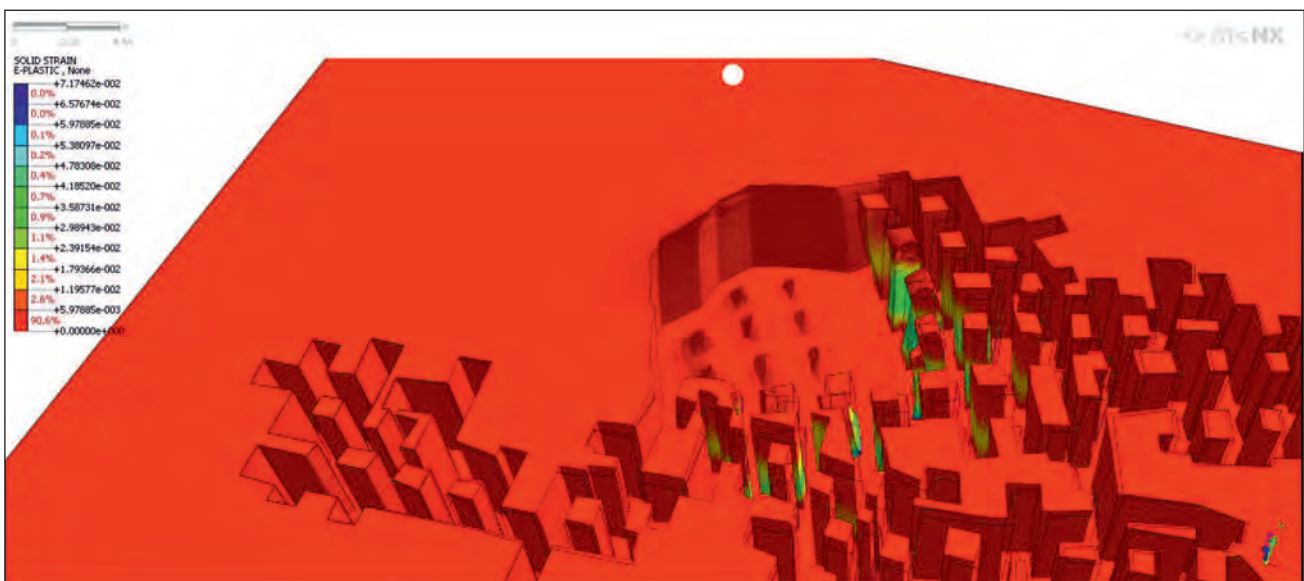


Fig. 8 – Situazione deformativa successiva al crollo con particolare riguardo al volume interessato dai meccanismi di rottura.
 - Deformative status after the collapse with special regard to the volume affected by the failure mechanisms.

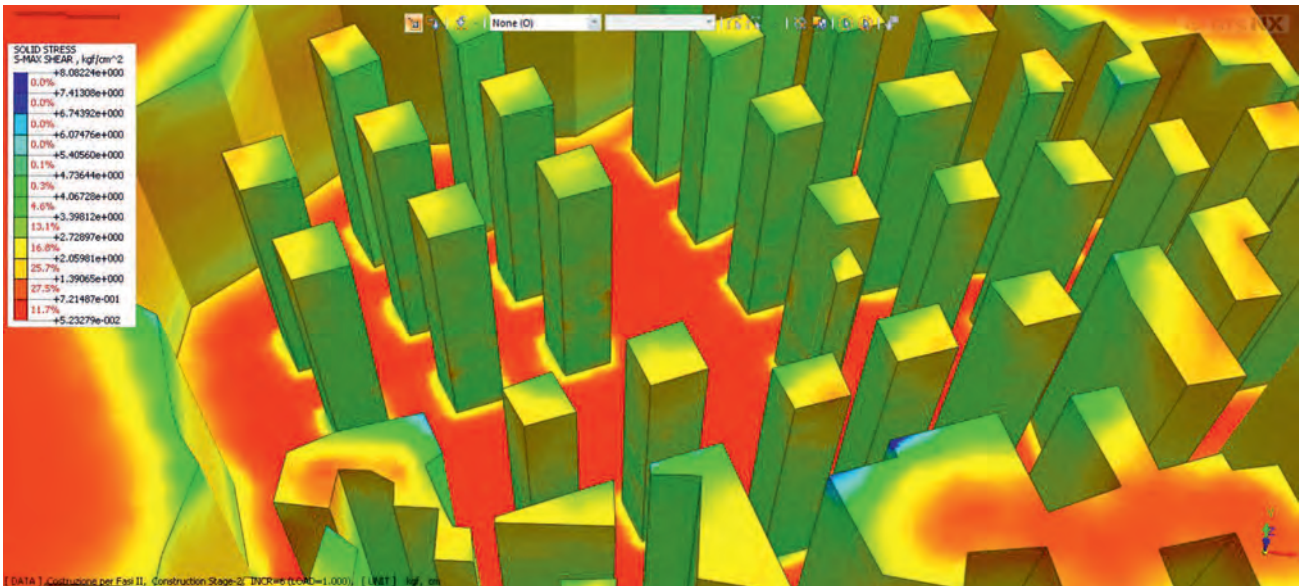


Fig. 9 – Tensioni di Taglio massime precedenti al crollo relative al volume interessato dai meccanismi di rottura.
- *Maximum Shear Stresses preceding the collapse on the volume affected by the failure mechanisms.*

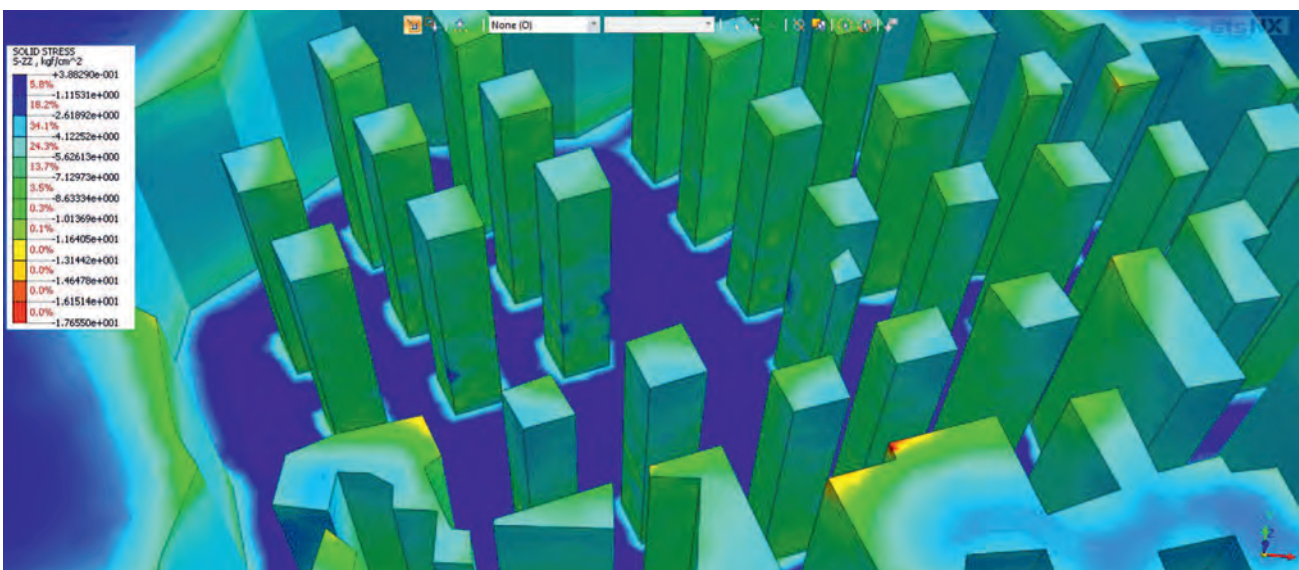


Fig. 10 – Tensioni Normali massime precedenti al crollo relative al volume interessato dai meccanismi di rottura.
- *Maximum Normal Stresses preceding the collapse on the volume affected by the failure mechanisms.*

(LOLLINO & PARISE, 2010, 2014). Tali strumenti però, soprattutto nel caso di “analisi non lineari”, risentono molto dei parametri di ingresso, nonché della scelta del tipo di analisi. Per questo motivo attualmente il gruppo di lavoro è impegnato in una migliore calibrazione del modello mediante:

- una più precisa ricognizione dei parametri meccanici mediante prove dirette sui materiali;
- una definizione più accurata della geometria della rete caveale mediante rilievo laser scanner 3D;
- indagini indirette volte ad una migliore defi-

nizione della posizione dei pilastri crollati;

- una ricostruzione più accurata dei giunti e delle giaciture stratigrafiche;
- un raffinamento del modello numerico utilizzando legami costitutivi più complessi (*Jointed Rock Model*) in grado di considerare meglio l’anisotropia dell’ammasso roccioso anche in relazione alla giacitura dei giunti di strato;
- l’utilizzo dello “*Shear Strength Reduction Method*” capace di fornire indicazioni sul fattore di sicurezza della struttura allo stato attuale;
- l’analisi in campo dinamico.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRIANI & WALSH, (2003) - *Fabric, porosity and water permeability of calcarenites from Apulia (SE Italy) used as building and ornamental stone*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **62**: 77–84.
- BOENZI PALMENTOLA G., PIERI P. & VALDUGA A. (1971) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. Foglio 165 "Trinitapoli" e Foglio 176 "Barletta"*. Serv. Geol. d'It., 33 pp.
- CALÒ G.C., MELIDORO G. & MONTERISI L. (1992) - *Recupero tecnico-economico di cave sotterranee in rocce calcarenitiche nella Provincia di Lecce*. Atti 1° Conf. Europea "Euro-cave 92", Courmayeur.
- CHERUBINI C. & SGOBBA D. (1997) - *Le cave sotterranee di tufo pugliesi: descrizione degli ipogei e valutazione di stabilità*. Atti IV Conv. Naz. Cavità Artificiali, Osoppo, 30 maggio – 1 giugno 1997: 51-68.
- CHERUBINI C., GERMINARIO S., PAGLIARULO R. & RAMUNNI F.F. (1993) - *Caratterizzazione geomeccanica delle calcareniti di Canosa in relazione alla stabilità degli ipogei*. Atti I Conv. Naz. "Le pietre da costruzione in Puglia: il Tufo Calcarea e la Pietra Leccese", Bari: 221-230.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia Centro Meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., **41** (1): 449-460.
- COTECCHIA V., CALÒ G. & SPILOTRO G. (1985) - *Caratterizzazione geolitologica e tecnica delle calcareniti pugliesi*. Atti III Convegno Nazionale "Attività Estrattiva dei Minerali di 2a Categoria".
- DE GIOVANNI A., MARTIMUCCI V., MARZULLI M., PARISE M., PENTIMONE N. & SPORTELLI D. (2011) - *Operazioni di rilievo e analisi preliminare dello sprofondamento in località San Procopio (Barletta), 2-3 maggio 2010*. Atti 7 Convegno Nazionale di Speleologia in Cavità Artificiali, Urbino, 4-8 dicembre 2010, Opera Ipogea, n. 1/2: 151-158.
- DE PASCALIS A., DE PASCALIS F. & PARISE M. (2010) - *Genesi ed evoluzione di un sinkhole connesso a cavità antropiche sotterranee nel distretto estrattivo di Cutrofiano (prov. Lecce, Puglia)*. Atti 2° Workshop Internazionale: "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009: 703-718.
- FAFARD M. & MASSICOTTE B. (1993) - *Geometrical interpretation of the arc-length method*. Computers & Structures, **46**, (4).
- FESTA V. (2003) - *Cretaceous structural features of the Murge area (Apulian Foreland, southern Italy)*. Eclogae Geologicae Helvetiae, **96**: 11–22.
- FIGLIORE A. & PARISE M. (2013) - *Cronologia degli eventi di sprofondamento in Puglia, con particolare riferimento alle interazioni con l'ambiente antropizzato*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **93**: 239-252.
- I.S.R.M. (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS) (1979) - *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **16** (2): 135–140.
- LOLLINO P. & PARISE M. (2010) - *Analisi numerica di processi di instabilità di cavità sotterranee e degli effetti indotti in superficie*. Atti 2° Workshop Internazionale: "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009: 803-816.
- LOLLINO P. & PARISE M. (2014) - *La valutazione delle condizioni di stabilità di cavità sotterranee: approcci semplificati e metodi avanzati di calcolo*. Geologia dell'Ambiente, suppl. 2/2014: 74-81.
- MEMON B.A. & SU XIAO-ZU (2004) - *Arc-length technique for nonlinear finite element analysis*. Journal of Zhejiang University Science.
- PARISE M. (2008) - *I sinkholes in Puglia*. In: S. NISIO (a cura di) "I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane". Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **85**: 309-334.
- PARISE M. (2010) - *The impacts of quarrying in the Apulian karst*. In: F. CARRASCO, J.W. LAMOREAUX, J.J. DURAN VALSERO & B. ANDREO (Eds.), *Advances in research in karst media*. Springer: 441-447.
- PARISE M. & LOLLINO P. (2011) - *A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy*. Geomorphology, **134** (1-2): 132-143.
- PARISE M. & VENNARI C. (2013) - *A chronological catalogue of sinkholes in Italy: the first step toward a real evaluation of the sinkhole hazard*. In: L. LAND, D.H. DOCTOR & B. STEPHENSON (Eds.), *Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, Carlsbad (New Mexico, USA), 6-10 May 2013, National Cave and Karst Research Institute: 383-392.
- PARISE M., DE GIOVANNI A. & MARTIMUCCI V. (2013) - *Sinkholes caused by underground quarries: the case of the 2–3 May 2010, event at Barletta (Southern Italy)*. Speleology and Speleology, Proceedings IV International Scientific Conference (November 2013, Naberezhnye Chelny, Russia): 158-162.
- PELLEGRINO A. (1970) - *Le rocce lapidee tenere*. Technical report, Istituto di Tecnica delle Fondazioni e Costruzioni di Terra dell'Università di Napoli.
- PELLEGRINO A. (1968) - *Compressibilità e resistenza a rottura del tufo giallo napoletano*. Ass. Geotec, Ital., 9 Convegno di Geotecnica.
- PIERI (1980) - *Principali caratteri geologici e morfologici delle Murge Murgia Sotterranea*, Martina Franca, **2**: 13-19.
- PIERI P., FESTA V., MORETTI M. & TROPEANO M. (1997) - *Quaternary tectonic of the Murge area (Apulian foreland - Southern Italy)*. Annali di Geofisica, **40** (5): 1395–1404.
- RICCHETTI G., CIARANFI N., LUPERTO SINNI E., MONGELLI F. & PIERI P. (1988) - *Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'avampese apulo*. Mem. della Soc. Geol. Ital., **41**: 57–82.
- RIKS, E. (1972) - *The application of Newton's method to the problem of elastic stability*. J. Appl. Mech., **39**(4), 1060-1065 (1972).
- RIKS E. (1979) - *An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems*. International Journal of Solids and Structures, **15**: 529-551.
- TROPEANO M. & SABATO L. (2000) - *Response of Plio-Pleistocene mixed bioclastic-lithoclastic temperate-water carbonate systems to forced regressions: the Calcarenite di Gravina Formation, Puglia, SE Italy*. In: D. Hunt & R.L. Gawthorpe (Eds.) *Sedimentary responses to forced regressions*. Geol. Soc. London spec. publ. **172**: 217-243.