

Sprofondamenti di origine antropica nell'area di Marsala (Sicilia occidentale) analizzati mediante rilievi in sito e analisi numerica dei processi di instabilità nelle cave sotterranee

Study of anthropogenic sinkholes in the Marsala area (western Sicily) through field surveys and numerical analyses of instability processes in underground quarries

BONAMINI M. (*), DI MAGGIO C. (**), LOLLINO P. (***), MADONIA G. (**),
PARISE M. (***), VATTANO M. (**)

RIASSUNTO - Il territorio di Marsala, in Sicilia occidentale, è caratterizzato da numerose cave per l'estrazione della locale roccia calcarenitica, da utilizzare come materiale da costruzione. Molte di queste cave sono sotterranee, a profondità variabili da pochi metri a circa 15 m, su livello singolo o su due livelli, seguendo la tecnica di scavo a gallerie e pilastri. Con il passare del tempo, le cave sotterranee sono state progressivamente abbandonate a causa di diversi motivi, incluso il decadimento delle proprietà fisiche e meccaniche dell'ammasso roccioso calcarenitico, la interazione con le acque sotterranee, gli elevati costi di estrazione, i pericoli e le difficoltà incontrate nel lavorare in sotterraneo.

A partire dagli anni 1960 le cave sotterranee sono state interessate da fenomeni di instabilità, con eventi di collasso e deformazioni delle volte e dei pilastri degli ambienti ipogei. Tali fenomeni si sono spesso propagati verso l'alto sino a raggiungere la superficie topografica, con formazione di sprofondamenti che hanno coinvolto anche aree urbanizzate, producendo significativi danni.

Scopo del presente lavoro è la descrizione e l'analisi a ritroso di un evento di sprofondamento avvenuto nel giugno 2011 nella zona orientale della città di Marsala, prodotto dall'instabilità all'interno di una cava sotterranea, e che ha provocato danni ad un edificio scolastico. Oltre alla caratterizzazione geologica e strutturale del sito, vengono presen-

tati i risultati di analisi numeriche agli elementi finiti, svolte al fine di comprendere i fattori responsabili dei meccanismi genetici dello sprofondamento.

PAROLE CHIAVE: sprofondamenti, cavità artificiali, cave sotterranee, modellazione numerica, Sicilia

ABSTRACT - The area of Marsala, in western Sicily (southern Italy), is characterized by numerous quarries for extraction of calcarenite rocks to be used as building material. The oldest of these are underground quarries which were realized at depth ranging from a few meters to about 15 m, on a single or two levels, resulting from the excavation technique of galleries and pillars. With time, the underground quarries have been progressively abandoned owing to several reasons, including the decay in the physical and mechanical properties of the calcarenite rock mass, the interaction with the groundwater, the high costs of extraction, the dangers and difficulties encountered in working underground.

Since the 1960's the quarries have been subjected to instability processes, through collapse and deformation of vaults and pillars. These phenomena often propagate upward until the topographic surface with the formation of sinkholes which affected also the built-up area causing extensive damages.

(*) Ingegnere – libero professionista, via Trinacria 8, 90144 Palermo, Italy (bonamini@neomedia.it)

(**) Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo, via Archirafi 22 – 90123 Palermo, Italy (marco.vattano@unipa.it)

(***) CNR IRPI, via Amendola, 122/I, 70126 Bari, Italy (m.parise@ba.irpi.cnr.it)

The aim of this paper is to present a description and a back-analysis of a sinkhole occurred in June 2011 at the eastern sector of the town of Marsala, related to presence of an underground quarry, and that has caused significant damage to a school building. The site is described as regards geology and structural geology, and, in addition, 2-D finite element analyses have been performed in order to identify the factors responsible of the instability processes and the genetic mechanism of the anthropogenic sinkhole.

KEY WORDS: anthropogenic sinkhole, artificial cavity, underground quarry, numerical modeling, Sicily.

1. - INTRODUZIONE

Sinkhole e processi di subsidenza di natura antropica sono molto diffusi e sono generalmente connessi alla presenza di cavità sotterranee scavate dall'uomo, quali cave e miniere, o all'estrazione indiscriminata di fluidi, tipo acqua, gas e oli (WALTHAM, 2002; WALTHAM *et alii*, 2005).

Il territorio di Marsala (estremità occidentale della Sicilia) è interessato da numerosi fenomeni di sprofondamento che si sono verificati nell'ultimo ventennio e che hanno provocato numerosi e ingenti danni a insediamenti e infrastrutture. In particolare, tali fenomeni sono da mettere in relazione alla diffusa presenza di cave sotterranee che sono state scavate per l'estrazione di conci di calcarenite da impiegare come materiale da costruzione. Queste cave sono state realizzate nel sottosuolo, ad una profondità variabile da pochi metri fino a circa 25 metri, su uno o su due livelli a luoghi sovrapposti, seguendo la tecnica che prevede lo scavo di camere e gallerie e l'isolamento di pilastri in roccia. La loro coltivazione, tuttavia, è avvenuta in maniera indiscriminata ed estensiva senza seguire alcun tipo di pianificazione.

Nel tempo le cave sotterranee sono state progressivamente abbandonate per decadimento delle proprietà fisico-meccaniche della roccia, interazione con le acque sotterranee, costi di gestione elevati, difficoltà e pericolosità nelle opere di estrazione in profondità. In molte cavità oggi sono evidenti i segni di instabilità lungo le volte, le pareti e i pilastri, che spesso si propagano verso l'alto causando l'innescare di fenomeni di sprofondamento (*sinkhole*) e subsidenza, secondo i meccanismi ri-

chiamati in PARISE & LOLLINO (2011) e creando numerosi danni ad edifici e infrastrutture.

In particolare, nel giugno 2011 nel settore orientale della città di Marsala si è verificato un evento di sprofondamento in corrispondenza di una cava sotterranea, che ha coinvolto i manufatti circostanti. La cava era stata già oggetto di rilievi nel 2000 in seguito alla necessità di effettuare delle indagini per una possibile utilizzazione dell'area sovrastante. Durante questa ispezione erano stati già individuati numerosi segni di instabilità lungo le volte e i pilastri dell'ipogeo, costituiti da un intenso sistema di fratturazione e distacchi di blocchi rocciosi anche di grandi dimensioni.

Successivamente alla formazione del *sinkhole* sono stati condotti nuovi sopralluoghi all'interno della cava, al fine di raccogliere elementi utili alla comprensione della genesi dello sprofondamento; tali ispezioni tuttavia si sono limitate al solo settore occidentale essendo stati molti ambienti, e in particolare l'intera area corrispondente al *sinkhole*, occlusi da materiale di crollo (cfr. capitolo 3). In superficie è stato realizzato un rilievo topografico di dettaglio della depressione e una serie di misure nei mesi successivi al fine di registrare eventuali nuovi segni di sprofondamento e movimento della superficie topografica.

Nel presente lavoro si descrivono i caratteri geologici e strutturali del sito, e si illustrano i risultati preliminari di modellazioni numeriche agli elementi finiti, implementate al fine di contribuire alla comprensione dei meccanismi genetici dello sprofondamento, al pari di quanto già sviluppato in altri settori dell'Italia meridionale (PARISE & LOLLINO, 2011; PARISE, 2012).

2. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area indagata è caratterizzata da affioramenti di terreni calcarenitici riferibili alla "Calcarenite di Marsala" del Pleistocene inferiore (RUGGIERI & UNTI, 1974; RUGGIERI *et alii*, 1975), appartenenti al Sintema di Marsala (DI MAGGIO *et alii*, 2009). La Calcarenite di Marsala è contraddistinta da tre principali litofacies con rapporti verticali e laterali in-

dicanti un'evoluzione regressiva del sistema di sedimentazione: calcareniti litoclastiche e bioclastiche da grossolane a fini, ricche in macrofossili, sabbie e argille grigie sabbiose, entrambe ricche in microfossili. Le calcareniti e le sabbie passano lateralmente in maniera graduale alle argille sabbiose e a silts che in generale si ritrovano alla base dell'intera successione.

All'interno della litofacies calcarenitica a sua volta si distinguono tre litotipi: a) calcareniti grossolane e calciruditi in strati spessi tra 10 e 100 cm; b) calcareniti a grana media e fine con grani addensati; c) calcareniti a grana da media a grossolana in strati di diverso spessore (7-15 cm) con sottili intercalazioni silteose di 1-2 cm (RUGGIERI *et alii*, 1975; ARCES *et alii*, 2000).

L'intera successione ha uno spessore di circa 80 m, gli strati presentano una generale immersione verso i quadranti occidentali e sud-occidentali, con pendenze comprese tra 5 e 10°.

In particolare, la cava oggetto di studio insiste sulle calcareniti a grana media e fine (litotipo b) caratterizzate da migliori proprietà tecniche. Qui la calcarenite presenta una stratificazione da sub-orizzontale a debolmente inclinata con immersione verso WSW e un'intensa fratturazione, con piani di discontinuità generalmente ad alto angolo orientati principalmente in direzione NW-SE e secondariamente E-W.

3. - LA CAVA E I FENOMENI DI INSTABILITÀ

La cava oggetto di studio (fig. 1) è formata da camere circa quadrangolari, spesso comunicanti fra loro e/o separate da sottili pareti o piccoli pilastri in roccia che fungono da sostegno; nel settore centrale gli ambienti sono costituiti da gallerie allungate in direzione NW-SE separate anch'esse da sottili pareti rocciose. I vani presentano un'elevata

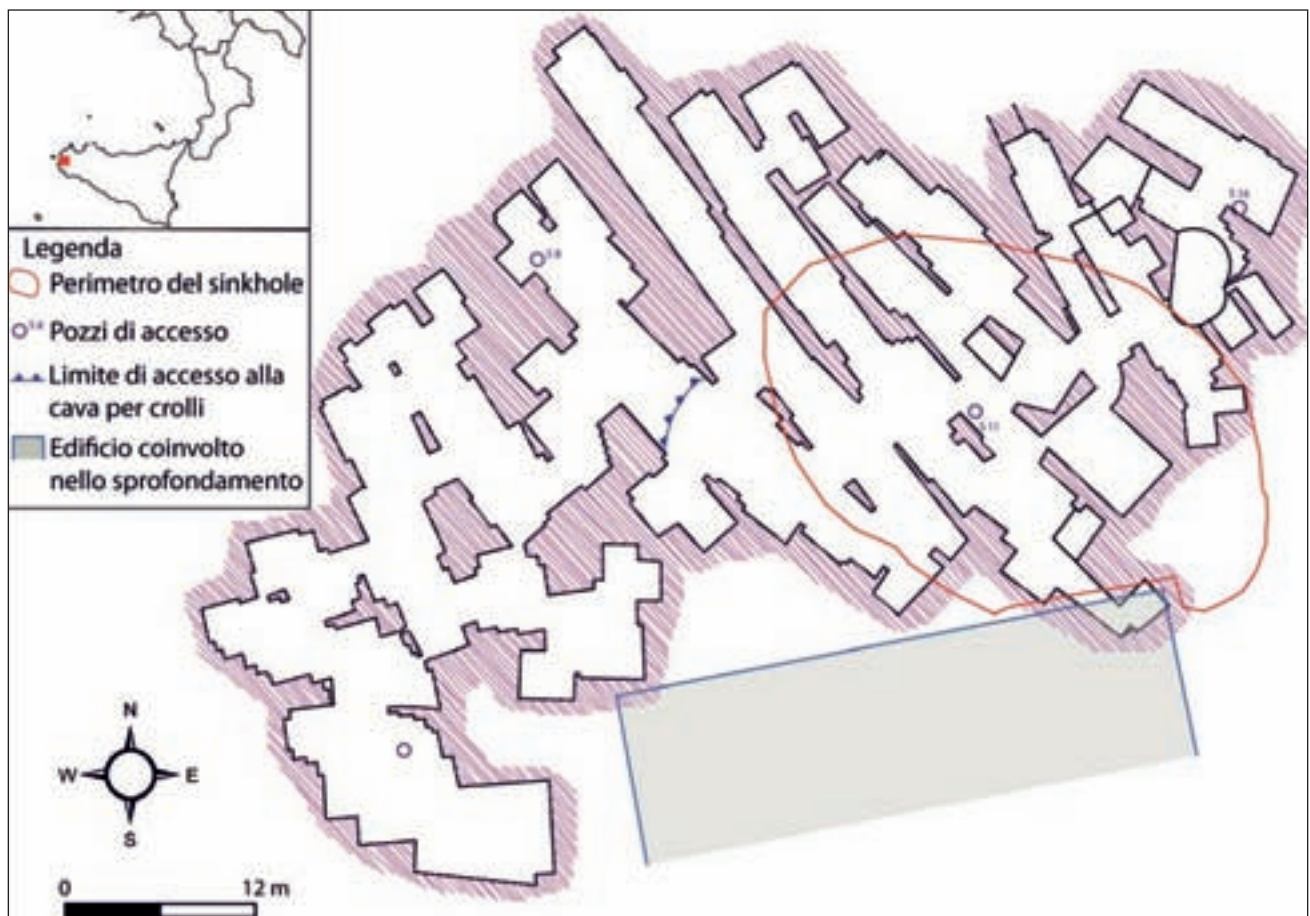


Fig. 1 - Rilievo topografico della cava oggetto di studio con indicazione del perimetro del sinkhole. Nel riquadro localizzazione dell'area.
- Topographic survey of the underground quarry, showing also the boundaries of the sinkhole. In the inset, location of the study area.

variabilità dimensionale: l'altezza media è di circa 2.7 m, con valore minimo di 1.1 m e massimo di 7.5 m; la larghezza media è di 3.5 m, con un minimo di 1.8 m ed un massimo di circa 8 m, mentre la lunghezza media risulta essere di 12 m, e variabile tra circa 2.6 e 40 m. Le pareti hanno uno spessore compreso tra 20 cm e 4 m, mentre i pilastri hanno larghezze variabili tra 30 cm e 4 m e lunghezze comprese tra 70 cm e 6 m. Complessivamente l'ipogeo si sviluppa per circa 480 m al di sotto di uno spessore di roccia compreso tra 8.2 e 11.8 m di profondità.

L'estrazione della calcarenite è avvenuta seguendo direzioni variabili, verosimilmente dettate dalla qualità della roccia e dai limiti della proprietà del fondo al di sotto del quale si sviluppa la cava. La maggiore variabilità nelle direzioni si registra nel settore occidentale dell'ipogeo, come si evince dalla forma e distribuzione dei vani; nei settori centrale ed orientale sono invece individuabili delle direzioni preferenziali di scavo, testimoniate dalla presenza di camere e gallerie con lunghezze anche di decine di metri ad andamento predominante NW-SE, parallelamente alla direzione delle principali discontinuità presenti nella roccia calcarenitica (fig. 2). La coltivazione della cava lungo discontinuità preferenziali nasceva dalla necessità di riuscire ad estrarre conci di calcarenite integra, non interessata da altri sistemi di fratturazione.

All'interno della cava sono numerosi i segni di instabilità a diverso grado evolutivo che interessano le volte, le pareti e i pilastri dei diversi ambienti. I fenomeni di instabilità sono generalmente connessi al sistema di fratturazione del corpo calcarenitico, alla fitta e irregolare rete di camere e gallerie, nonché ai processi di alterazione della roccia da parte delle acque di infiltrazione.

Le volte sono interessate da distacco di grandi volumi di roccia, a luoghi sottoforma di lastre, favoriti sia da sistemi di discontinuità paralleli e/o coincidenti ai piani di stratificazione sia dalla rete di fratture sub-verticali che interessa la massa calcarenitica (fig. 3). Nel rilevamento del 2000 era stato notato che i crolli erano maggiormente diffusi nel settore orientale della cava, dove gli ambienti presentano maggiori dimensioni e i setti di separazione sono costituiti da piccoli pilastri o pa-

reti con spessore inferiore a 30 cm; oltre al distacco di blocchi calcarenitici, qui erano stati individuati anche spostamenti di ingenti volumi di roccia lungo fratture sub-verticali. Tale settore è localizzato in corrispondenza dell'area in cui successivamente si è verificato il *sinkhole*.

Lungo le fratture sono quasi sempre evidenti i segni dell'imbibizione e dell'alterazione chimica della roccia da parte delle acque di percolazione provenienti dal piano campagna.

Le pareti dei diversi ambienti sono interessate da fratture parallele alla direzione delle pareti stesse, alcune delle quali incipienti, mentre altre sono aperte fino a qualche centimetro. Vi si riconoscono due tipologie di fratture: quelle pre-esistenti alla coltivazione della cava e quelle connesse agli effetti dei processi di instabilità locali della roccia all'interno della cava. Nel primo caso le fratture sono continue anche lungo le volte dei diversi am-

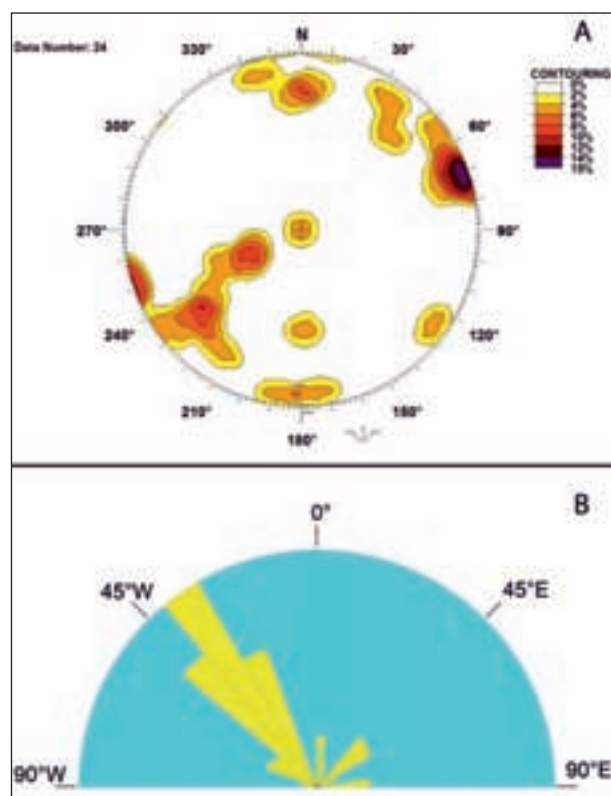


Fig. 2 - A - Proiezione stereografica (Schmidt, emisfero inferiore) dei poli dei piani di frattura della roccia calcarenitica rilevati all'interno della cava (elaborazione con Daisy 3; SALVINI, 2011). B - Direzioni preferenziali di sviluppo degli ambienti ipogei.

- A - Stereographic projection (Schmidt, lower hemisphere) of the poles of the fracture planes in the calcarenite rock mass, as from the survey within the quarry (data elaboration by means of Daisy 3; SALVINI, 2011). B - Main development directions of the underground passages.



Fig. 3 - Fenomeni di instabilità lungo le volte della cava. Crolli (foto A e B) e movimenti di ingenti volumi di roccia lungo fratture sub-verticali (foto C) rilevati nel 2000, in corrispondenza del settore in cui si è verificato il sinkhole. D - Distacchi di lastre rocciose lungo sistemi di discontinuità paralleli e/o coincidenti ai piani di stratificazione.

- *Instability phenomena in the quarry vaults. Falls (photos A and B) and movements of great volumes of rock along sub-vertical fractures (photo C) surveyed in 2000, in correspondence of the sector where the sinkhole formed. D - Detachments of rock slabs along discontinuity systems parallel and/or corresponding to the bedding planes.*

bienti, risultano in prevalenza aperte e in esse sono visibili i segni di alterazione della roccia da parte dell'acqua; nel secondo caso, lungo le discontinuità sono evidenti delle deformazioni della roccia calcarenitica con la presenza di estrusioni di materiale litoide. Entrambe le tipologie di fratture possono isolare lastre di roccia di vario spessore che, nelle situazioni più evolute sono soggette a crolli (fig. 4).

Anche i pilastri sono caratterizzati da sistemi di fratture a diversa inclinazione e grado di apertura:

alcune di queste fratture sono pre-esistenti alla coltivazione della cava, mentre altre sembrano indotte dagli elevati livelli di sforzo cui è soggetta la roccia calcarenitica all'interno dei pilastri. Queste fratture possono delimitare elementi di roccia di dimensioni anche metriche e favorirne il distacco lungo gli spigoli dei pilastri, o possono attraversare longitudinalmente i pilastri per tutta la loro altezza, favorendone l'assottigliamento e nei casi più estremi il definitivo collasso (fig. 5).

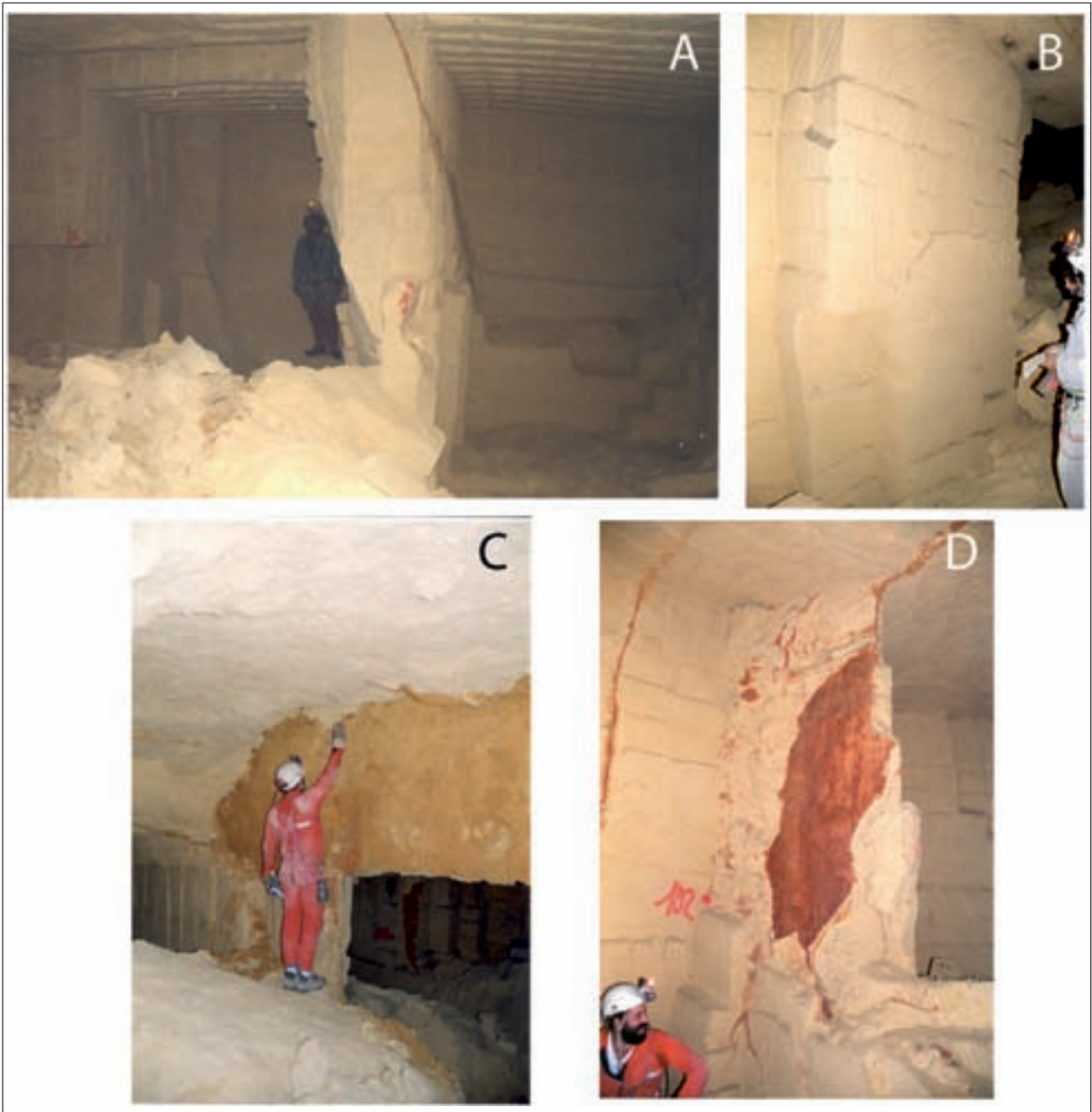


Fig. 4 - Segni di instabilità lungo le pareti delle camere e gallerie della cava. A - fratturazione della roccia calcarenitica preesistente alla coltivazione della cava. B - Estrusione di materiale roccioso legato al peso della massa calcarenitica circostante la cava; C e D - Distacchi di lastre e blocchi di calcarenite lungo sistemi di fratture dove sono evidenti i segni di alterazione da parte delle acque di percolazione.

- Evidence of instability along the walls of the galleries in the quarry. A - fracturing of the calcarenite rock mass, pre-existing to the quarry opening. B - Extrusion of the rock material due to weight of the rock mass surrounding the quarry; C and D - Detachments of calcarenite slabs and blocks along joint systems, with clear evidence of weathering effects by the infiltrating water.

In superficie, in corrispondenza della zona orientale della cava, è presente uno sprofondamento, generatosi nel giugno del 2011, che ha interessato diversi manufatti sovrastanti, fra cui un plesso sportivo e le strutture ad esso adiacenti (fig. 6). È stato quindi realizzato un rilievo topografico di dettaglio al fine di definirne il perimetro, la

forma e la profondità. Il rilievo è stato effettuato utilizzando una stazione topografica totale attraverso una griglia di punti di misura posizionati circa ogni 2.5 m, in relazione alla conformazione del terreno e alla vegetazione presente.

La depressione presenta un perimetro circa ellittico, con diametro massimo di 130 m e minimo



Fig. 5 - A e B - Fratture sub-verticali che sezionano interamente un pilastro della cava. C - pilastro interessato da fratture a diversa inclinazione.
 - A and B - Sub-vertical joints crossing a quarry pillar. C - pillar affected by joints with varying dip.



Fig. 6 - A - Sinkhole creatosi nel giugno 2011. B e C - Danni provocati dallo sprofondamento ai manufatti sovrastanti. D - Materiale di crollo presente all'interno della cava in prossimità dell'area interessata dal sinkhole.
 - A - Sinkhole formed in June 2011. B and C - Damage caused by the sinkhole to the overlying buildings. D - Fall deposits within the quarry in the proximity of the area affected by the sinkhole.

di 90 m, e una profondità massima di 2.4 m; ha forma asimmetrica con il punto più depresso localizzato nel settore orientale, dove è presente una scarpata di circa 2 m, e una direzione di allungamento NW-SE, parallelamente alla direzione delle gallerie sotterranee e alle principali discontinuità tettoniche dell'area.

Nei mesi successivi alla formazione del *sinkhole*, sono state condotte nuove campagne di misura al fine di valutare eventuali progressivi abbassamenti della superficie topografica. Tali misure effettuate lungo un transetto circa E-W lungo il versante meridionale del *sinkhole*, non hanno mostrato nessuna variazione apprezzabile di quota della superficie.

4. - ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Una caratterizzazione geotecnica di dettaglio della calcarenite pleistocenica di Marsala, a grana medio-fine, che risulta inquadrabile secondo le classificazioni dell'Associazione Geotecnica Italiana (AGI) e dell'*International Society for Rock Mechanics* (ISRM) come roccia da molto tenera a estremamente tenera, è descritta in ARCES *et alii* (2000). Tali autori evidenziano la significativa influenza del grado di saturazione dei campioni sulla resistenza a compressione monoassiale degli stessi, con valori di resistenza in condizioni sature

($\sigma_c = 1.3 \div 1.6$ MPa) pari circa alla metà dei corrispondenti valori ottenuti nelle ipotesi di grado di saturazione nullo ($\sigma_c = 2 \div 3$ MPa). Analoga riduzione è altresì osservata per il modulo di elasticità longitudinale misurato al 50% della resistenza monoassiale (E'_{50}) al variare del grado di saturazione, con valori compresi tra 0.03×10^4 e 0.08×10^4 MPa. Nella modellazione di seguito descritta, è stato assunto un valore di resistenza a trazione pari a 1/10 di quella a compressione, dunque in un intervallo pari a $\sigma_t = 130 \div 160$ kPa in condizioni sature e $\sigma_t = 200 \div 300$ kPa in condizioni di grado di saturazione nulla. Sulla base dei valori citati, sono stati dedotti parametri medi di resistenza al taglio secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb pari a $c' = 110 \div 150$ kPa e $\varphi' = 35^\circ$, nell'ipotesi di calcarenite in condizioni di saturazione; si sono altresì considerati valori pari a $c' = 165 \div 220$ kPa e $\varphi' = 35^\circ$ per simulare condizioni di calcarenite a basso grado di saturazione. Detti parametri sono stati dedotti come approssimazione lineare di involuppi di resistenza ottenuti secondo il criterio di Hoek-Brown con riferimento ad un intervallo di livello tensionale confrontabile con quello di sito ed avendo ipotizzato un valore di GSI (*Geological Strength Index*; HOEK, 1994) pari a GSI = 95, ossia rappresentativo di condizioni di roccia massiva e pressoché intatta. In tabella 1 sono sintetizzati i parametri

Tab. 1 - Parametri adottati nelle analisi numeriche FEM.
- Parameters adopted in the FEM numerical analyses.

	γ (kN/m ³)	E'_{50} (MPa)	ν'	c' (kPa)	φ' (°)	σ_t (kPa)	σ_c (kPa)
Calcarenite secca GSI = 95	15	600	0.3	165	35	200	2000
Calcarenite satura (S = 1) GSI = 95	15	300	0.3	110	35	130	1300
Calcarenite satura (S = 1) GSI = 80	15	300	0.3	75	35	130	1300

specifici adottati nel calcolo di seguito illustrato.

Al fine di ricostruire le condizioni che hanno determinato il processo di sprofondamento occorso nel settore orientale della città di Marsala e descritto nel paragrafo precedente è stata condotta un'analisi a ritroso con il metodo degli elementi finiti (FEM), che consente di simulare l'evoluzione tenso-deformativa in campo elasto-plastico di ammassi rocciosi continui interessati dalla presenza di cavità sotterranee (PARISE & LOLLINO, 2011). In particolare, è stata svolta un'analisi di tipo bidimensionale con il codice di calcolo PLAXIS^{2D} (PLAXIS-BV 2010), adottando come sezione di analisi la sezione 6 indicata in figura 7, che maggiormente approssima condizioni di deformazione piana. Il modello costitutivo adottato per la roccia è di tipo elastico-perfettamente plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, flusso non associato ($\psi = 0^\circ$) e resistenza a trazione limitata. Le analisi sono state condotte in condizioni drenate ed assumendo l'intero dominio di analisi al di sopra della falda, che nell'area delle cavità risulta essere a profondità maggiore, come rinvenuto sulla base di misure di sito. La sezione di calcolo e la maglia di discretizzazione sono mostrate in figura 8.

In particolare, inizialmente è stata condotta un'analisi numerica con caratteristiche meccaniche rappresentative di condizioni di basso grado di saturazione (*Analisi 1*); successivamente, è stata condotta un'analisi che implementa parametri rappresentativi di condizioni di saturazione della calcarenite, nell'ipotesi che l'ammasso non sia affetto da stati di fessurazione apprezzabili (GSI = 95; *Analisi 2*). In particolare, tale analisi simula condizioni di imbibizione della calcarenite, che conseguono a prolungati processi di percolazione di acqua dal piano campagna lungo le fratture, così come osservato sulla base di rilievi in sito. Da ultimo, si è svolta un'analisi rappresentativa di ipotesi di saturazione della calcarenite, con parametri di resistenza che contemplano uno stato fessurativo dell'ammasso roccioso non più trascurabile (GSI = 80). Tale ipotesi è in accordo con quanto osservato nel corso dei rilievi effettuati in sito, che hanno evidenziato la presenza di almeno una significativa famiglia di discontinuità ad andamento NW-SE. Per questa analisi, pertanto, si è ipotizzato

un inviluppo di resistenza lineare equivalente all'inviluppo di Hoek-Brown definito da $c' = 75$ kPa e $\varphi' = 35^\circ$ (tabella 1; *Analisi 3*).

Un valore del coefficiente di spinta a riposo pari a $K_0 = 1$ è stato scelto per l'assegnazione dello stato tensionale iniziale dell'ammasso. La procedura di calcolo adottata per le tre diverse analisi su descritte ha previsto una fase di generazione dello stato tensionale iniziale, ed una fase di simulazione dello scavo delle camere di coltivazione fino al raggiungimento dell'attuale configurazione geometrica, con riferimento alla quale è stata condotta l'analisi tenso-deformativa. Successivamente, nell'ipotesi di convergenza numerica (condizioni di stabilità del modello), ai fini del calcolo del coefficiente di stabilità, è stata svolta un'analisi di tipo "*strength reduction*" (MATSUI & SAN, 1992), che comporta una graduale riduzione delle caratteristiche di resistenza della roccia fino al raggiungimento del collasso.

Con riferimento all'analisi 1 (calcarenite con basso grado di saturazione; GSI = 95), a seguito dell'analisi plastica, i risultati indicano condizioni di stabilità del modello. Tuttavia, l'analisi indica evidenti zone di plasticizzazione nei pilastri che delimitano le camere di coltivazione (fig. 9) ed accumulo di deformazioni di taglio nelle stesse aree del dominio di calcolo (fig. 10). L'analisi di tipo "*strength reduction*" ha indicato in questo caso un valore del coefficiente di stabilità dell'ammasso pari a $F = 1.7$.

L'analisi 2 (calcarenite con grado di saturazione $S = 1$; GSI = 95) mostra uno stadio di plasticizzazione molto più avanzato nelle aree dei pilastri divisorii, con zone plastiche che si dipartono con andamento inclinato dalle estremità inferiori e superiori delle camere di coltivazione e si propagano senza soluzione di continuità da una camera all'altra (fig. 11). In queste condizioni, l'analisi "*c- φ reduction*" indica un valore del coefficiente di stabilità dell'ammasso pari a $F = 1.3$ ed il meccanismo di collasso associato al raggiungimento della condizione di instabilità, cioè al termine della fase di riduzione della resistenza, è mostrato in figura 12 in termini di isolinee delle deformazioni di taglio incrementali ed in figura 13 in termini di maglia deformata finale con scala degli spostamenti

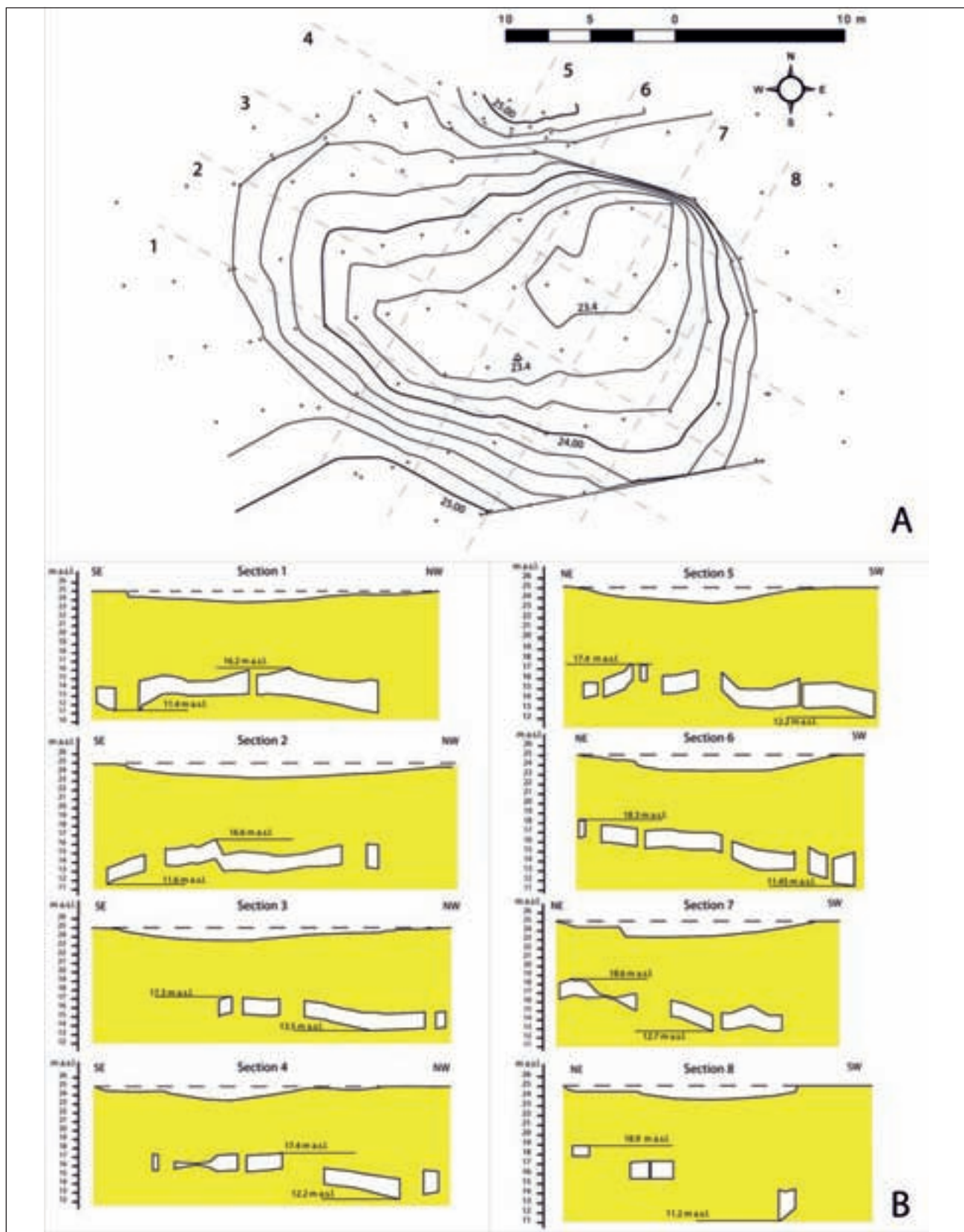


Fig. 7 - A - Rilievo topografico di dettaglio del sinkhole originatosi nel giugno 2011. Le linee tratteggiate indicano le tracce delle sezioni riportate in figura 7B; le croci rappresentano i siti di misura della stazione topografica. B - Sezioni del sinkhole e dei settori di cava corrispondenti nel sottosuolo. La linea tratteggiata indica la superficie topografica prima dello sprofondamento.

- A - Detailed topographic survey of the June 2011 sinkhole. Dashed lines indicate the traces of the sections shown in figure 7B; crosses mark the topographic measurement stations.

B: Sections of the sinkhole and the corresponding underground quarry sectors. Dashed line indicates the topography before occurrence of the sinkhole.

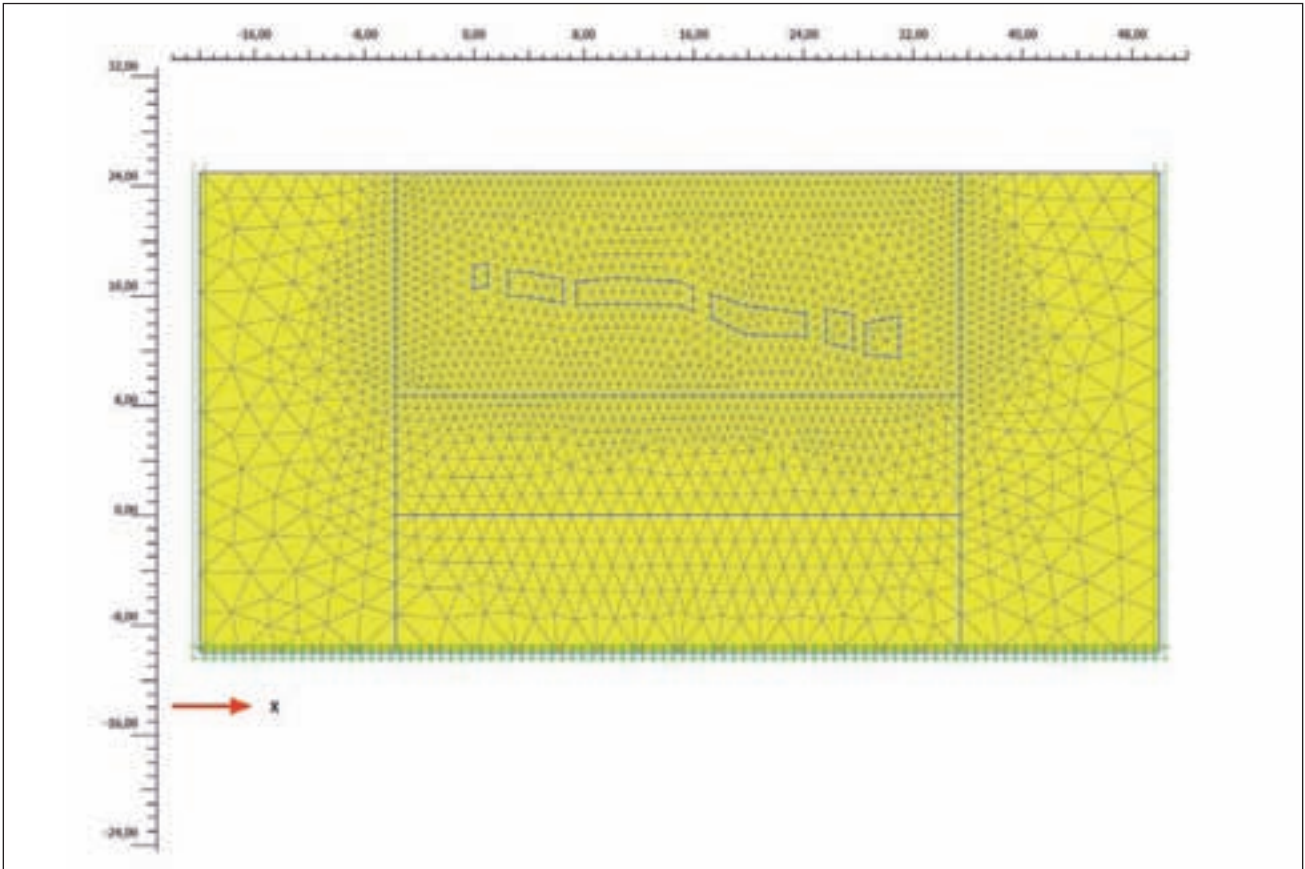


Fig. 8 - Sezione di calcolo (sezione 6, per l'ubicazione vedi figura 7) e maglia di discretizzazione considerate per l'implementazione del modello agli elementi finiti.
 - Mesh used for the finite element model (section no. 6, for location see figure 7).

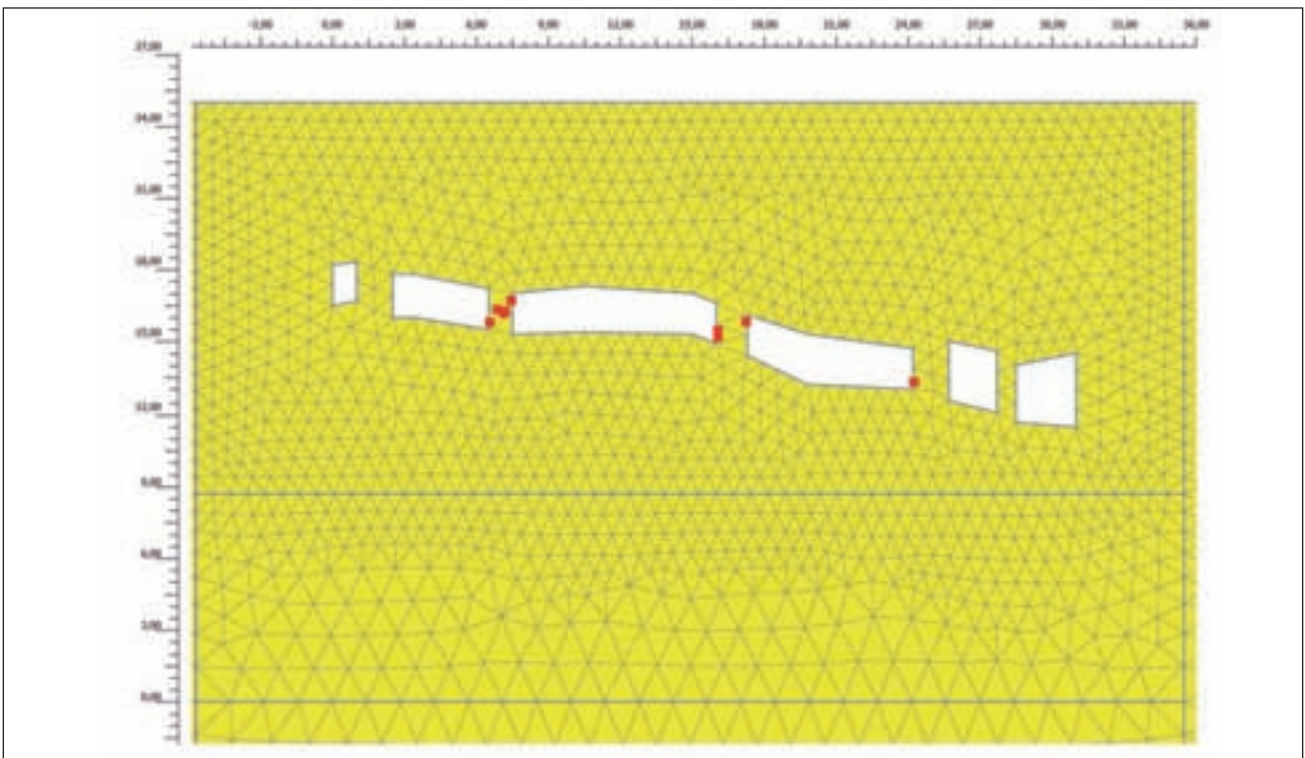


Fig. 9 - Analisi 1 (calcarenite con basso grado di saturazione; GSI = 95): zone di plasticizzazione nei pilastri che delimitano le camere di coltivazione.
 - Analysis 1 (calcarenite with low degree of saturation; GSI = 95): plastic points in the pillars of the underground quarry.

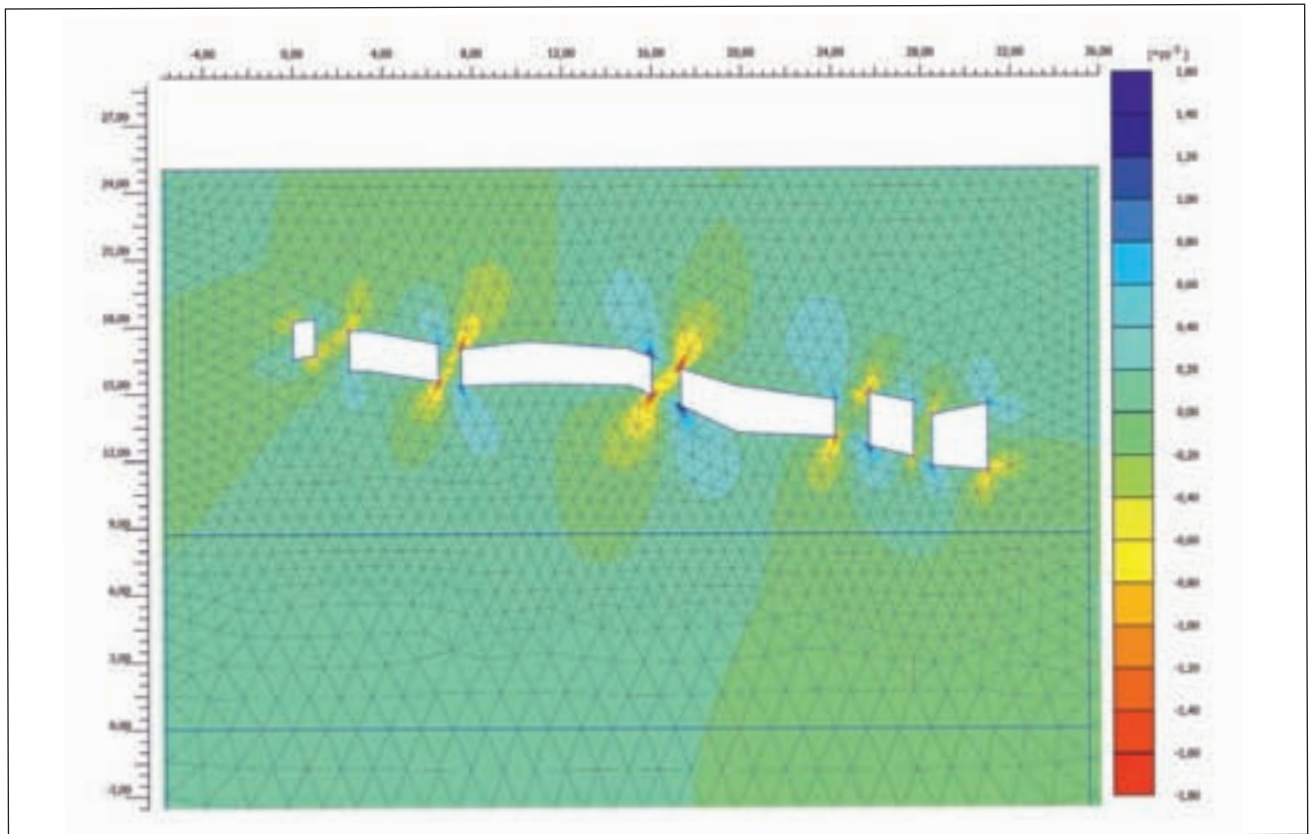


Fig. 10 - Analisi 1 (calcareniti con basso grado di saturazione; GSI = 95): accumulo di deformazioni di taglio nelle stesse aree del dominio di calcolo.
 - Analysis 1 (calcareniti with low degree of saturation; GSI = 95): shear deformations in the underground quarry.

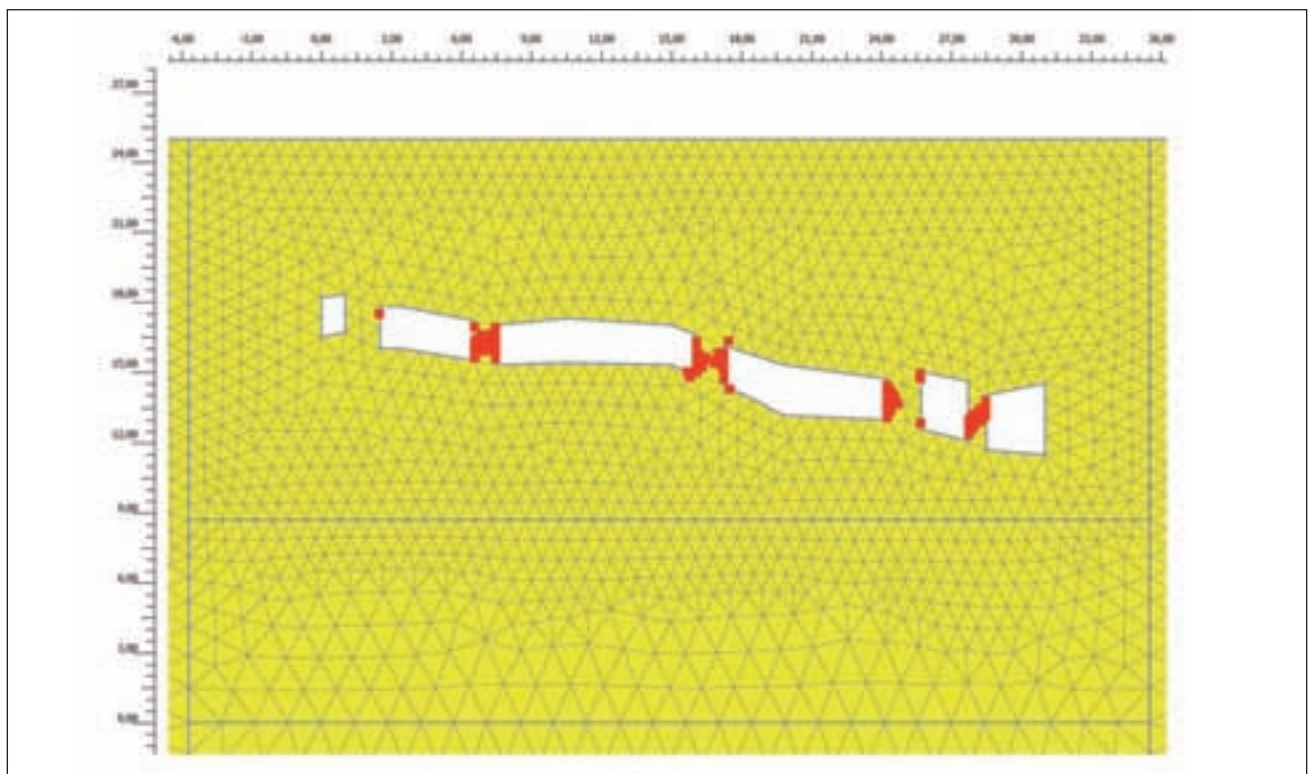


Fig. 11 - Analisi 2 (calcareniti con grado di saturazione $S = 1$; GSI = 95): zone di plasticizzazione nei pilastri che delimitano le camere di coltivazione.
 - Analysis 2 (calcareniti with degree of saturation $S = 1$; GSI = 95): plastic points in the pillars of the underground quarry.

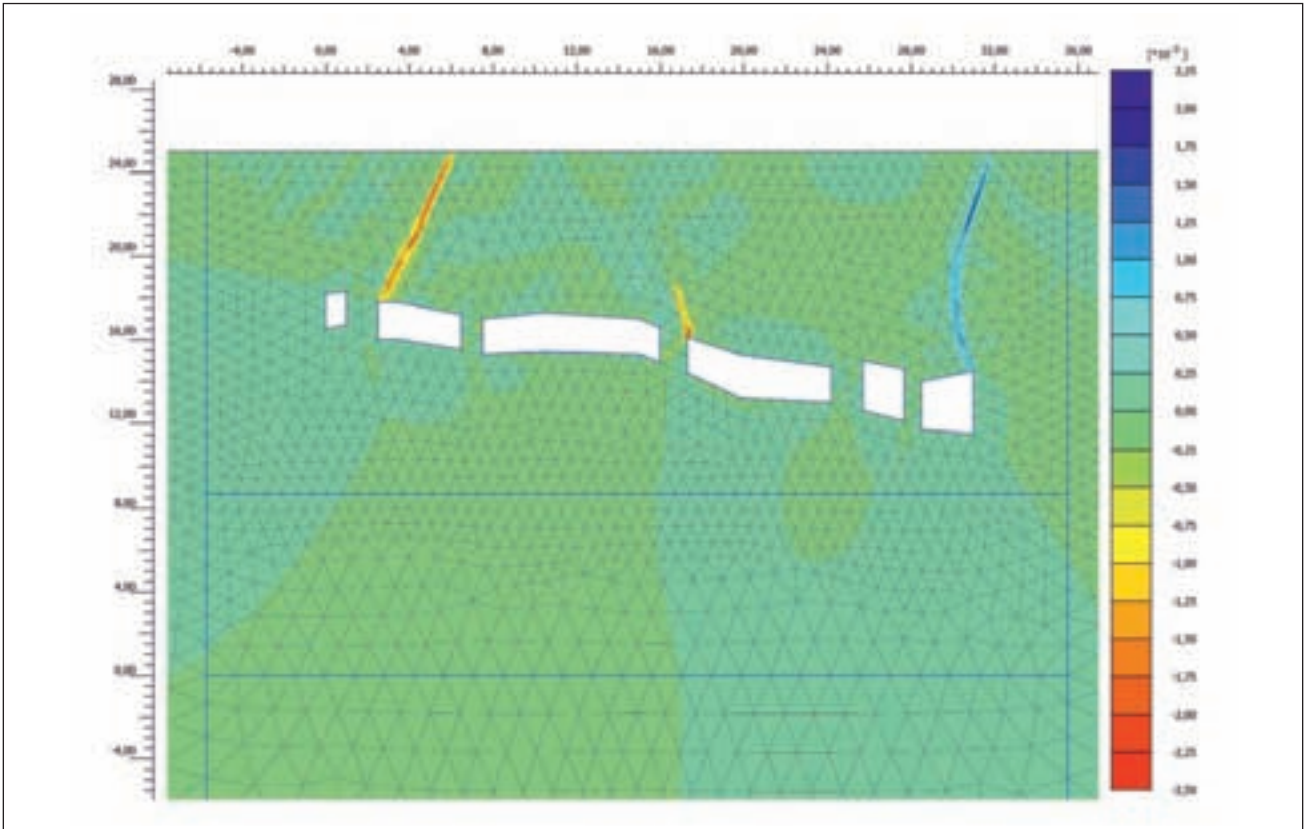


Fig. 12 - Analisi 2 (calcarenite con grado di saturazione $S = 1$; $GSI = 95$): accumulo di deformazioni di taglio nelle stesse aree del dominio di calcolo.
 - *Analysis 2 (calcarenite with degree of saturation $S = 1$; $GSI = 95$): shear deformations in the underground quarry.*

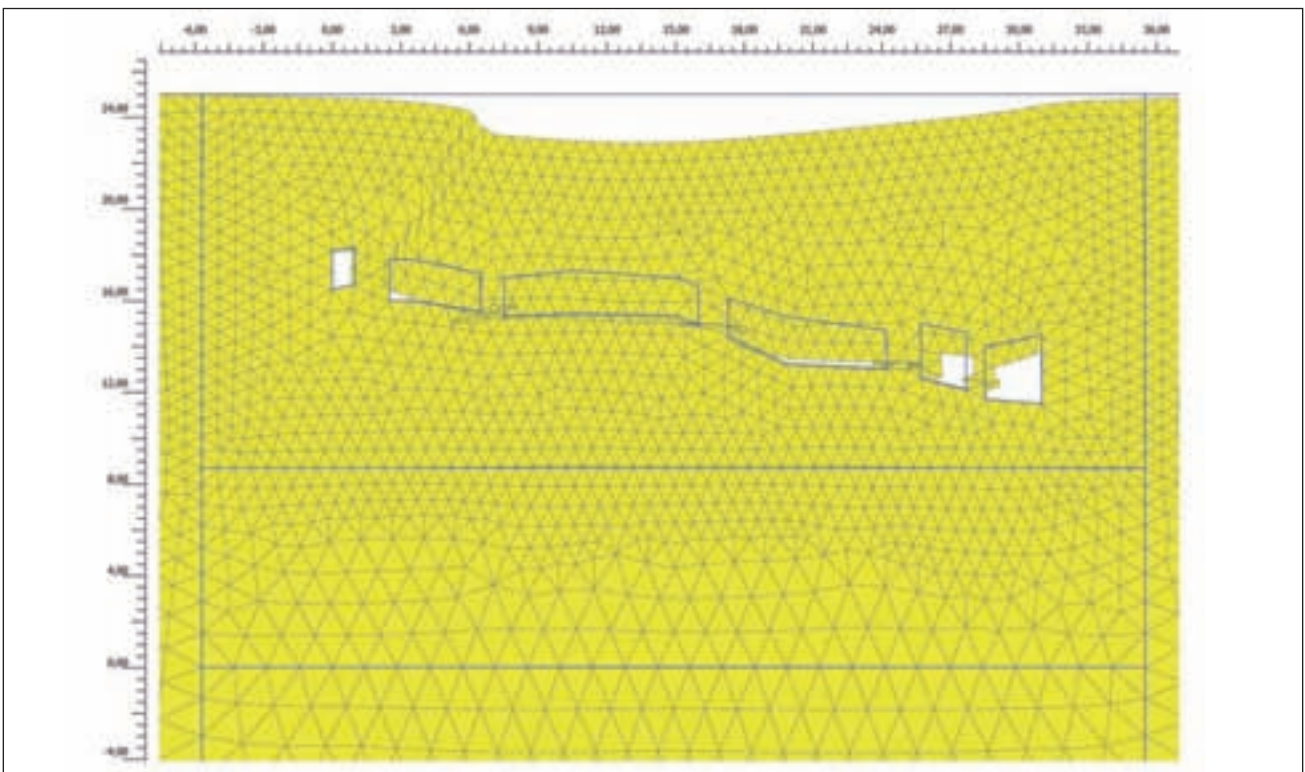


Fig. 13 - Analisi 2 (calcarenite con grado di saturazione $S = 1$; $GSI = 95$): maglia deformata della superficie topografica conseguente al collasso.
 - *Analysis 2 (calcarenite with degree of saturation $S = 1$; $GSI = 95$): deformed mesh in the ground surface as a consequence of the collapse.*

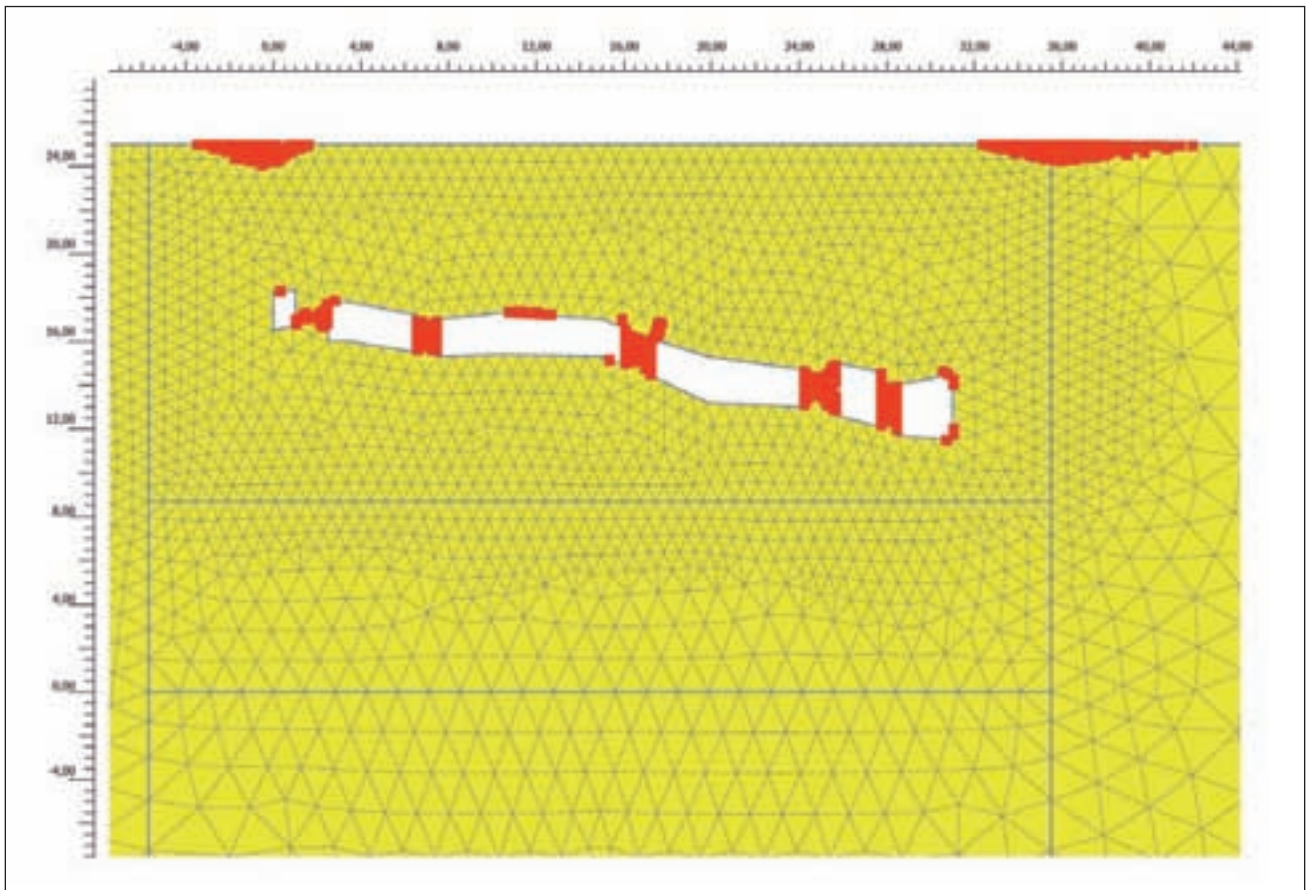


Fig. 14 - Analisi 3 (calcarenite con grado di saturazione $S = 1$; $GSI = 80$): zone di plasticizzazione nei pilastri che delimitano le camere di coltivazione.
 - *Analysis 3 (calcarenite with degree of saturation $S = 1$; $GSI = 80$): plastic points in the pillars of the underground quarry.*

amplificata. In particolare, la figura 12 indica un processo di rottura che evolve a partire dalla seconda cavità a sinistra con andamento inclinato verso destra, mentre il limite a destra dell'area soggetta a sprofondamento segue un andamento ad arco a partire dall'estremo superiore dell'ultima cavità a destra. La figura 13 mostra invece in scala amplificata la variazione della superficie topografica conseguente al collasso stesso. Le figure 12 e 13 configurano dunque un meccanismo di collasso che ben si accorda con la geometria dell'ammasso successiva allo sprofondamento, così come ricostruito sulla base dei rilievi topografici in sito (vedi fig. 7).

Infine, l'analisi 3 (calcarenite con grado di saturazione $S = 1$; $GSI = 80$) ha comportato un mancato raggiungimento della convergenza numerica, che indica dunque condizioni di instabilità ($F \leq 1$). In figura 14 è riportato il meccanismo iniziale di rottura sulla base delle zone plastiche calcolate per la stessa analisi.

5. - CONCLUSIONI

I rilievi *in situ* integrati da analisi numeriche effettuate con il metodo degli elementi finiti (FEM) hanno permesso di ipotizzare in via preliminare, le condizioni che hanno favorito il fenomeno di sprofondamento verificatosi in corrispondenza di una cava sotterranea, nella zona orientale della città di Marsala.

Le analisi svolte suggeriscono come le condizioni che possono aver condotto al collasso da sprofondamento siano presumibilmente da ricercarsi nella concomitanza di processi di saturazione della calcarenite per imbibizione della stessa roccia e di stati di fessurazione presenti nell'area in esame, che alla scala dell'ammasso roccioso possono aver comportato una riduzione della resistenza disponibile necessaria per mantenere la stabilità dello stesso ammasso. Con riferimento al caso specifico qui indagato si riconoscono i limiti della modella-

zione bidimensionale fin qui condotta e la necessità di implementare modelli di tipo 3-D, maggiormente capaci di simulare il reale comportamento tenso-deformativo dell'ammasso in simili assetti geometrici, e pertanto questi aspetti costituiranno oggetto di sviluppi futuri della ricerca da parte degli autori.

Inoltre è da considerare che rispetto ad un'area di cava estesa per circa 1500 m², l'area effettivamente occupata interessa una superficie di circa 2000 m², con un rapporto pieni/vuoti di 1 a 3 o, in alternativa, tra pieni non cavati e superficie complessiva di 1 a 4. Questo comporta che il peso di una qualsiasi porzione di roccia soprastante le cavità grava mediamente sopra una sezione di sostegno pari ad 1/4 di quella iniziale, ovvero che il carico sui pilastri rimasti, spesso in condizioni di snellezza, da intendersi come rapporto tra altezza e sezione orizzontale, sia diventato 4 volte superiore a quello originario.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare l'Ing. F. Patti del Comune di Marsala per la disponibilità dimostrata, il Prof. Ing. G. Umiltà per i costruttivi suggerimenti e i preziosi spunti di riflessione e il Sig. G. Ceresia per il supporto nella realizzazione della documentazione fotografica.

BIBLIOGRAFIA

- ARCES M., AVERSA S., LO CICERO G. & NOCILLA N. (2000) – *The Pleistocene “Calcareni di Marsala”: geotechnical and sedimentological characterisation*. Mem. Soc. Geol. It., **55**: 483-489.
- DI MAGGIO C., AGATE M., CONTINO A., BASILONE L. & CATALANO R. (2009) – *Unità a limiti inconformi utilizzate per la cartografia dei depositi quaternari nei Fogli Carg della Sicilia nord-occidentale*. Il Quaternario, **22** (2): 345-364.
- HOEK E. (1994) – *Strength of rock and rock masses*. ISRM News Journal, **2** (2): 4-16.
- MATSUI T. & SAN K.C. (1992) – *Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique*. Soils & Foundation, **32** (1): 59-70.
- PARISE M. & LOLLINO P. (2011) – *A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy*. Geomorphology, **134**: 132-143.
- PARISE M. (2012) – *A present risk from past activities: sinkhole occurrence above underground quarries*. Carbonates and Evaporites, **27** (2): pp. 109-118.
- RUGGIERI G. & UNTI M. (1974) – *Pliocene e Pleistocene nell'entroterra di Marsala*. Boll. Soc. Geol. It., **93**: 723-733.
- RUGGIERI G., UNTI A., UNTI M. & MORONI M.A. (1975) – *La calcarenite di Marsala (Pleistocene inferiore) e i terreni contermini*. Boll. Soc. Geol. It., **94**: 1623-1657.
- SALVINI F. (2011) – *Daisy 3, the structural data integrated analyzer*. Free distribution by e-mailing to daisy@uniroma3.it. Dipartimento di Scienze Geologiche, Università di “Roma Tre”, Roma.
- WALTHAM T. (2002) – *The engineering classification of karst with respect to the role and influence of caves*. Int. J. Speleol. **31** (1/4): 19-35.
- WALTHAM T., BELL F. & CULSHAW M. (2005) – *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*: pp. 382, Springer, Berlin.